



Institut für Schicht- und Ionentechnik

***Entwicklung und Beschreibung
von Dünnschichtsensoren
zur Farberkennung***

Dietmar Knipp

***Entwicklung und Beschreibung
von Dünnschichtsensoren
zur Farberkennung***

Dietmar Knipp

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3684
ISSN 0944-2952
Institut für Schicht- und Ionentechnik Jül-3684
D 82 (Diss. RWTH Aachen, 1999)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
☎ 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Realization and Characterization of thin film sensors for color recognition

Abstract: Color image processing is usually performed with the aid of CFA (color filter array) coated CCD or CMOS sensor arrays. However, color detection with a CFA leads to the color moiré or color aliasing effect, which is observed when structures with high spatial frequencies are captured. Furthermore, traditional sensor systems exhibit a rather limited resolution and a low area fill factor, because one color pixel is splitted into several chromatic subpixels. In order to overcome the color moiré effect, vertically integrated sensor elements have been realized based on amorphous silicon and its alloys. Due to the high photosensitivity from the UVA (ultra violet A) to the near IR (infra red) part of the spectrum amorphous silicon (a-Si:H) is a highly suitable material for thin film color sensors. While the color information with a two terminal device can be read out sequentially by changing the applied bias voltage, a multi terminal device allows the simultaneous generation of a red-green-blue (RGB) signal at the same spatial position. The color separation of the two terminal three color sensors is achieved by adjustment of the optical bandgap and the $\mu\tau$ -(carrier-mobility-lifetime)-product of the absorption layers within the device structure. Nevertheless multi-channel sensors based on stacked amorphous pin diodes have been realized which facilitates the parallel generation of 3 or 4 sensor signals at the same spatial position. Furthermore, a thin film sensor has been demonstrated which generates 6 sensor signals by two read out cycles. The 6-channel sensor exhibits a color error close to the limit of the human color perception.

Entwicklung und Beschreibung von Dünnschichtsensoren zur Farberkennung

Kurfassung: Gewöhnlich werden zur Farbbildverarbeitung CCDs oder CMOS-Sensoren eingesetzt, die mit einem Filterarray beschichtet sind. Die Farbdetektion mittels eines Filterarrays führt allerdings zum Farb-Moiré- oder Farb-Aliasing-Effekt, welcher beobachtet wird, wenn Strukturen mit hohen Ortsfrequenzen aufgenommen werden. Weiterhin besitzen traditionelle Sensorsysteme eine begrenzte Auflösung und einen geringen Flächenfüllfaktor aufgrund der Unterteilung eines Farbpixels in mehrere chromatische Subpixel. Zur Überwindung des Farb-Moiré-Effekts sind vertikal integrierte Sensoren aus amorphem Silizium (a-Si:H) und dessen Legierungen hergestellt worden. Aufgrund der hohen Photoempfindlichkeit vom ultravioletten (UVA) bis zum nahen infraroten (IR) Teil des Spektrums ist amorphes Silizium ein hervorragendes Material für Dünnschicht-Farbsensoren. Während die Farbinformation mit einem Zweipol-Bauelement sequentiell durch Wechsel der angelegten Spannung ausgelesen werden kann, erlaubt ein Mehrkanalsensor die simultane Generation eines RGB-Signals an einem Ort. Die Farbtrennung eines Zweipol-Dreifarb-sensors wird durch die Anpassung der optischen Bandlücke und des $\mu\tau$ -(Ladungsträger-Beweglichkeits-Lebensdauer)-Produktes der Absorberschicht des Bauelements erreicht. Somit wurden Mehrkanalsensoren aus gestapelten amorphen pin-Dioden realisiert, die die Generation von 3 oder 4 Sensorsignalen an einem Ort. Weiterhin wurde ein 6-Kanal-Sensor vorgestellt, der mittels zweier Schüsse ausgelesen werden kann. Der 6-Kanal-Sensor zeigt einen Farbfehler nahe der menschlichen Farbwahrnehmungsgrenze.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Struktur der Arbeit	5
3	Vom menschlichen Sehen zum optischen Sensor	9
3.1	Intelligente Bildsensoren	9
3.2	Architektur von Bildsensoren	12
3.2.1	Integrations- und Nicht-Integrations-Sensoren	13
3.2.2	Passive Pixel und aktive Pixel Sensoren	14
3.3	Grundlagen des amorphen Siliziums	16
3.4	Das wissenschaftliche Umfeld der Arbeit	19
3.4.1	Amorphe Dünnschichtsensoren zur Farberkennung	19
3.4.2	Sensorarrays in Dünnschichttechnologie	20
3.4.3	Bildaufnehmersysteme mit optischen Filtern	21
3.4.4	Multispektraltechnik	22
3.4.5	Der Farbmoiré oder Farb-Aliasing-Effekt	23
3.4.6	Farb-Aliasing freie Bildaufnehmer	24
3.4.7	Hybride Bildaufnehmersysteme	27
3.5	Farbmetrische Charakterisierung	27
4	Der Dreifarbensensor	31
4.1	Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign	34
4.2	Spektrale Empfindlichkeit	35
4.3	Lineare Unabhängigkeit	37
4.4	Temperaturabhängigkeit	40
4.5	Dynamik	40
4.6	Staebler-Wronski-Effekt	42
4.7	Degradation	42
4.8	Transientes Verhalten	43
4.8.1	Spannungsschalten	44
4.8.2	Lichtschalten	48
4.9	Zusammenfassung	54
5	Farbsensoren für den Einsatz unter hohen Beleuchtungsstärken	57
5.1	Experiment / Bauelementdesign	58
5.2	Mikrokristallines Silizium	60
5.3	Intrinsische Niedertemperaturschichten	62

5.4	Lichtinduzierte Alterung	62
5.5	Transientes Verhalten.	68
5.5.1	Spannungsschalten	68
5.5.2	Lichtschalten	74
3.7	Zusammenfassung und Vergleich von nipiin- und piinip-Strukturen	75
6	Unipolare Sensoren	79
6.1	Detektionskonzept	81
6.2	Experiment / Bauelementdesign	82
6.3	Optisches Vielschichtmodell	88
6.4	Optische Modellierung	90
6.5	Lineare Unabhängigkeit	94
6.6	Zusammenfassung der stationären Ergebnisse	98
6.7	Transientes Verhalten.	100
6.8	Zusammenfassung und Vergleich von unipolaren und bipolaren Sensoren	104
7	Gestapelte Sensorstrukturen / Vierpol-Bauelemente	105
7.1	Der 3-Kanal-Sensor	106
7.1.1	Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign	106
7.1.2	Spektrale Empfindlichkeit	107
7.1.3	Farbmetrische Auswertung des 3-Kanal-Sensors	109
7.1.4	Optische Modellierung	110
7.1.5	Einfluß des Bandabstands der Diode D1 auf das spektrale Verhalten	111
7.1.6	Dynamik	115
7.1.7	Einfluß der TCO-Schichtdicke auf das spektrale Verhalten	116
7.1.8	Zusammenfassung	116
7.2	Der 6-Kanal-Sensor	118
7.2.1	Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign	119
7.2.2	Stationäre Bauelementeigenschaften	119
7.2.3	Farbmetrische Auswertung des 6-Kanal-Sensors	124
7.2.4	Zusammenfassung	125
8	Gestapelte Sensorstrukturen / Das Fünfpol-Bauelement	127
8.1	Optische Modellierung	128
8.2	Experiment / Bauelementdesign	134
8.3	Stationäre Bauelementeigenschaften	134
8.4	Zusammenfassung	136
8.5	Ausblick	136
9	Invertierte Sensoren.	139
9.1	Mechanische Eigenschaften	140
9.2	Elektrische Eigenschaften	141
9.3	Optische Eigenschaften	143
9.4	Zusammenfassung	144
10	Zusammenfassung und Ausblick	147

Anhang A: Pixelschaltungen	.	.	.	.	.	.	.	151
A.1 Passive-Pixel-Sensoren	.	.	.	.	.	.	.	151
A.2 Aktive-Pixel-Sensoren	.	.	.	.	.	.	.	153
A.3 Der 3-Kanal-Sensor	.	.	.	.	.	.	.	154
Literaturverzeichnis.	.	.	.	.	.	.	.	155
Dank	.	.	.	.	.	.	.	167

Es muß immer wieder das Unmögliche versucht werden,
um das Mögliche zu erreichen.
(Hermann Hesse)

Kapitel 1

Motivation

Moderne CMOS¹-Bildsensoren verdrängen zunehmend CCD²-Bildaufnehmer aus ihren Anwendungsfeldern [Kempainen97, Strüder98]. Die Entwicklung auf dem Gebiet der CMOS-Bildsensoren wird vorangetrieben von Neuerungen im Bereich der Speicherbausteine und Mikroprozessoren. Dies ermöglicht die kostengünstige Herstellung von Sensorarrays in großer Stückzahl. Weiterhin erlaubt die CMOS-Technologie im Gegensatz zur CCD-Technologie die Implementierung einer Vorverarbeitungselektronik³ in jedem Pixel, was eine Anpassung des Sensors an die individuellen Anforderungen erlaubt. Die Integration von „Intelligenz“ in jedem Pixel führt zu einer deutlichen Leistungssteigerung der Bildsensoren und läßt CMOS-Bildsensoren in immer weitere Bereiche des täglichen Lebens vordringen. Durch die Integration einer Verarbeitungselektronik innerhalb eines jeden Pixels reduziert sich allerdings auch der Flächenfüllfaktor⁴. Die Reduktion des Flächenfüllfaktors führt zu einer Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses, so daß in der Folge die Bildqualität sinkt. Trotz dieser Einschränkung sind CMOS-Bildsensoren CCD-Bildsensoren in vielen Bereichen überlegen.

Die traditionelle Farbdetektion von Halbleiter-Bildsensoren basiert auf der Integration einer Matrix von optischen Filtern auf dem Detektorfeld. Hierbei besteht eine solche Matrix aus drei unterschiedlichen Filtern zur Detektion der Farben rot, grün und blau. Somit wird die Farbinformation eines Pixels an unterschiedlichen Orten eines Sensorarrays abgetastet. Matrixartig angeordnete Filter werden sowohl auf CMOS-, als auch auf CCD-Bildaufnehmern

¹ CMOS steht für Complementary Metal Oxide Semiconductor.

² CCD steht für Charge Coupled Device.

³ Die Vorverarbeitungselektronik ermöglicht beispielsweise eine Datenreduktion, indem das Ausgangssignal des Sensorelements nicht linear, sondern logarithmisch [Meynants98] an die externe Verarbeitungselektronik weitergegeben wird, ähnlich den Bipolarzellen in der menschlichen Netzhaut [Schmidt95, Kapitel 3]. Oder es wird immer nur dann die Pixelinformation an die Weiterverarbeitung weitergegeben, wenn sich das Ausgangssignal des Sensorelements ändert [Schulte96]. Weiterhin läßt sich durch eine Vorverarbeitung die Dynamik des Sensors erhöhen. Hierzu kann die Integrationszeit eines jeden Pixels lokal autoadaptiv an die Beleuchtungsbedingungen [Böhm98] angepaßt werden. Somit wird die Integrationszeit in jedem Pixel individuell an die Beleuchtungsbedingungen angepaßt.

⁴ Die Gesamtfläche eines Pixels setzt sich zusammen aus der Fläche für den eigentlichen Detektor und der Fläche für die zusätzliche Elektronik. Im einfachsten Fall besteht die zusätzliche Elektronik aus einem Schalttransistor. Beim Flächenfüllfaktor handelt es sich um das Verhältnis zwischen Gesamtfläche eines Pixels und der aktiven Fläche des Detektors.

aufgebracht. Ebenso werden sie bei der Farbdetektion von großflächigen Sensoren in Dünnschichttechnologie⁵ eingesetzt. Diese Art der Farbdetektion führt zum Farb-Aliasing oder zum Farbmoiré-Effekt [McClollan98].

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung neuartiger optischer Detektoren, die in der Lage sind, an einem Ort innerhalb eines Sensorarrays die vollständige Farbinformation zu ermitteln. Der Sensor ist damit farbmoiréfrei. Eingesetzt wurden hierzu Dünnschichtsensoren auf der Basis von amorphem und mikrokristallinem Silizium und dessen Legierungen. Die Sensoren lassen sich in einem Niedertemperaturprozeß (100-250°C) herstellen, so daß sie auf einer Schaltungselektronik integriert werden können. Damit wird die Herstellung von Sensoren mit einem Flächenfüllfaktor nahe 100% möglich. Zur Herstellung der amorphen und mikrokristallinen Schichten wird ein PECVD-Prozeß⁶ eingesetzt. Weiterhin besteht durch den Herstellungsprozeß die Möglichkeit, den Bandabstand des Materials in einem weiten Bereich einzustellen (1.1eV - 2.2eV). Dies erlaubt die Anpassung der spektralen Verläufe der Detektoren an die spektrale Empfindlichkeit des Standardbeobachters⁷.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Sensorkonzepte entwickelt und umgesetzt. So wurden Farb-Aliasing freie Bauelemente⁸ realisiert, deren Farbinformation zeitlich sequentiell ausgelesen werden kann. Alternativ wurden Sensoren realisiert, die zeitlich parallel ausgelesen werden können. Je nach Anwendung lassen sich so die Sensoren an die entsprechenden Anforderungen anpassen. Die Bauelemente, welche sequentiell ausgelesen werden können, basieren auf einer Zweikontakt- oder Zweipol-Anordnung. Bei den Sensoren, die parallel ausgelesen werden können, erhöht sich je nach Anzahl der auszulesenden Sensorsignale die Anzahl der notwendigen Kontakte.

Den auf der Basis einer Zweipol-Anordnung realisierten Sensoren ist gemeinsam, daß sich die spektrale Empfindlichkeit in Abhängigkeit der angelegten Spannung gezielt steuern läßt. Mit einem solchen Zweipol-Bauelement ist es möglich, drei linear unabhängige Verläufe der spektralen Empfindlichkeit zu detektieren. Unterscheiden lassen sich die Sensoren anhand der notwendigen Betriebsspannung. Basiert die Bauelementstruktur auf der antiseriellen Verschaltung zweier pin- oder nip-Dioden, so sind bipolare (positive und negative) Betriebsspannungen zum Auslesen des Sensors notwendig. Läßt sich die Farbinformation nur mit einer unipolaren Betriebsspannung auslesen, so bestehen die Sensoren aus einer pin-Struktur, bei der die Absorberschicht unterteilt ist.

Die Sensoren, die sich parallel auslesen lassen, bestehen aus gestapelten Sensorstrukturen mit gemeinsamen transparenten leitfähigen Kontakten, die in den Sensorstapel eingebracht werden. Ausgehend von diesem Konzept wurden Sensoren

⁵ Als Systeme in Dünnschichttechnologien werden die Schichtsysteme bezeichnet, deren Schichtdicke im Bereich zwischen einigen Nanometern und einigen Mikrometern liegt. Die Dünnschichttechnologie steht im Gegensatz zur traditionellen kristallinen Siliziumtechnologie, die auch als Dickschichttechnologie bezeichnet wird. Die typischen Schichtdicken liegen hier bei $>10\mu\text{m}$.

⁶ Bei einem PECVD-Prozeß handelt es sich um einen Plasma-Enhanced-Chemical-Vapor-Deposition-Prozeß. Beschrieben wird der Herstellungsprozeß bei Luft [Luft93].

⁷ Der farbmimetrische Standardbeobachter wird seit 1931 durch die CIE-(Commission Internationale de l'Éclairage/Internationale Beleuchtungskommission) festgelegt. Auf diesem Farbsystem basieren alle weiteren Standards, die durch die Internationale Beleuchtungskommission festgelegt wurden. Dieser Standard wird als Konsensbasis der Farbmimetrik verstanden. In Deutschland ist dieser in der DIN5033 festgelegt. So existiert seit 1931 ein Standardbeobachter im rgb-Farbraum und im $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ -Farbraum, die linear ineinander transformiert werden können. Die Grundlagen für die Definition und die historische Entwicklung, die zur Einführung des CIE-Standards geführt haben, finden sich bei Wyszecki [Wyszecki82]. In Kapitel 3.5 wird auf die farbmimetrische Charakterisierung in aller Kürze eingegangen.

⁸ Wird in dieser Arbeit von Bauelementen oder Sensoren gesprochen, so sind hiermit Einzelsensoren gemeint.

entwickelt, die die parallele Generation von drei Ausgangssignalen erlauben. Das Konzept wurde erweitert, so daß auch 4 Kanäle parallel ausgelesen werden können oder die Generation von 6 Kanälen möglich wird. Für den 6-Kanal-Sensor sind allerdings zwei Auslesevorgänge notwendig.

Ausgehend von den unterschiedlichen Sensoren soll deren Realisierung und Charakterisierung dargestellt werden. Weiterhin sollen die Strukturen untereinander verglichen, bzw. Optimierungskriterien zur Verbesserung der Bauelementeigenschaften entwickelt werden.

Kapitel 2

Struktur der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Realisierung neuartiger Sensoren zur Farberkennung mittels Dünnschichttechnologie. Bevor auf die eigentlichen Bauelemente, deren Kenngrößen sowie deren Herstellung eingegangen wird, soll die Methodik des Vorgehens bei dieser Arbeit dargestellt werden. Hierzu ist in Abb. 2.1 ein schematischer Ablaufplan dargestellt, welcher bei der Umsetzung der einzelnen im Rahmen dieser Arbeit realisierten Strukturen berücksichtigt wurde. Voraussetzung für die gezielte Entwicklung und Optimierung der im weiteren vorzustellenden Sensoren ist der wechselseitige Austausch zwischen optischer Simulation und experimenteller Realisierung. Dies gilt für alle Bauelementstrukturen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Die optische Simulation beinhaltet keine Aussagen zum elektrischen Bauelementverhalten, aber unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien ist eine Aussage bezüglich der optoelektronischen Bauelementeigenschaften möglich. Bei dieser Vorgehensweise erfolgt eine stetige Rückkopplung zwischen Experiment und Simulation. In Abb. 2.1 ist dies auch im Ablaufplan dargestellt. Hierin sind die Ein- und Ausgangsgrößen jeweils durch ein Rechteck gekennzeichnet. Die Ellipsen stellen hingegen die eigentlichen Arbeitsblöcke dar. Diese werden je nach zu realisierender Struktur unterschiedlich gewichtet. Eingangsgrößen sowohl für die optische Simulation als auch für die technologische Realisierung sind die optischen und elektronischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien. Stationäre Ausgangsgrößen sind die spektrale Empfindlichkeit, die Reflexion und auch die I/U-Kennlinien. Die Modellierung und Realisierung der Bauelemente wird hierzu in dieser Arbeit als gleichberechtigt und gegenseitig unterstützend angesehen. Die Realisierung und Optimierung von Bauelementen ohne die Unterstützung der Bauelementsimulation ist nur eingeschränkt möglich. Erst der Einsatz der Simulationsrechnungen erlaubt eine gezielte Optimierung der Bauelementstrukturen. Umgekehrt benötigt die Bauelementmodellierung eine stetige Rückkopplung zum Experiment, da nur so eine Verbesserung der numerischen Beschreibung der Bauelemente erfolgen kann. Trotz dieser engen Zusammenarbeit steht die Realisierung und Charakterisierung der Bauelemente im Vordergrund dieser Arbeit. Die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren als Ausgangsgröße dient dann als Eingangsgröße für die farbmimetrische Auswertung. Erst die farbmimetrische Analyse erlaubt einen Vergleich der Bauelemente mit anderen Lösungsansätzen.

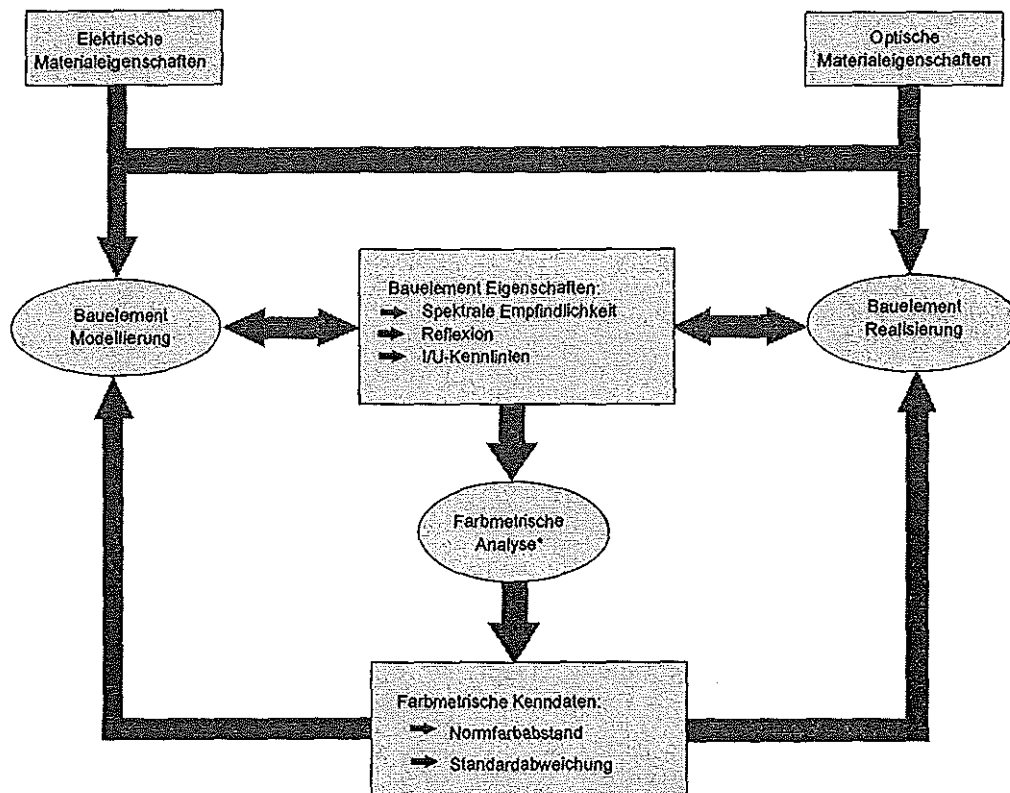


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Entwicklung und Optimierung der Farbsensoren, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden (* [Herzog98, 99]). Ein- und Ausgangsgrößen sind gekennzeichnet durch Rechtecke. Die Ellipsen stellen die eigentlichen Arbeitsblöcke im Rahmen der Entwicklung der Sensoren dar.

Ohne die Rückkopplung der farbmetrischen Charakterisierung zur optischen Modellierung und zur experimentellen Realisierung der Bauelemente ist keine Verbesserung der Bauelemente unter farbmetrischen Gesichtspunkten möglich. Die farbmetrische Analyse legt hierfür die Randbedingungen fest und stellt so eine Verbindung zwischen Bauelementeigenschaften und den farbmetrischen Anforderungen her.

Ausgehend vom Ablaufplan zur Entwicklung und Optimierung der Bauelemente (Abb. 2.1), soll dieser im weiteren auf die unterschiedlichen Strukturen angewendet werden. Zuvor soll aber in Kapitel 3 das Umfeld der Arbeit vorgestellt werden. Hierzu wird ausgehend vom menschlichen Sehen auf unterschiedliche Sensorkonzepte eingegangen. Weiterhin wird das wissenschaftliche Umfeld der Arbeit beschrieben und die Grundlagen des amorphen Siliziums und der farbmetrischen Auswertung dargestellt. Im Kapitel 4 werden anschließend die optoelektronischen Eigenschaften einer nipiin-Struktur diskutiert, die bei der Entwicklung weiterer Sensoren als Ausgangsstruktur diente. Bei einer nipiin-Struktur handelt es sich um die antiserielle Verschaltung zweier Dioden. Die beiden Dioden werden im weiteren als Top- und Bottom-Diode bezeichnet. Hierbei bezeichnet man unabhängig von der Depositionsabfolge diejenige Diode als Top-Diode, durch die das Licht in den Sensor einfällt. Bei der nipiin-Struktur handelt es sich um einen bipolaren Sensor, der blau in der Top-Diode und grün und rot in der Bottom-Diode detektiert. Im Gegensatz zur Absorberschicht der Top-Diode ist die Absorberschicht der Bottom-Diode zweigeteilt. Die Teilung dient der Farbseparation von grünem und rotem Licht. Somit werden zwei spektral unabhängige Verläufe in der Bottom-Diode generiert.

Im Gegensatz dazu trennt eine piinip-Struktur, die in Kapitel 5 vorgestellt wird, zwischen blauem und grünem Licht in der Top-Diode. Rotes Licht wird in der Bottom-Diode detektiert. Im Mittelpunkt des Kapitels 5 steht die Analyse des Degradationsverhaltens unterschiedlicher piinip-Strukturen mit dem Ziel der Reduzierung der lichtinduzierten Alterung.

Sowohl die nipiin- als auch die piinip-Struktur (Kapitel 4 und 5) sind bipolare Bauelemente. Das Auslesen der drei spektralen Empfindlichkeiten erfordert somit den Wechsel der Polarität der angelegten Spannung. Im Falle der Kombination einer solchen Sensorstruktur mit einem ASIC⁹ muß eine bipolare Spannung allerdings erst erzeugt werden, da ein ASIC unipolar betrieben wird. Um diese Limitierung auszuschalten, werden in Kapitel 6 Sensoren auf der Basis einer pin-Struktur vorgestellt. Bei diesen Sensoren ist die Absorberschicht dreigeteilt. Ziel ist die Detektion dreier linear unabhängiger Verläufe der spektralen Empfindlichkeit innerhalb einer Diode, wobei die Farbtrennung durch eine spannungsabhängige Sammeleffizienz realisiert wird.

Abschließend wird in Kapitel 7 und 8 die Funktionsweise von gestapelten Sensoren diskutiert. Hierbei handelt es sich um Bauelemente mit 4 und 5 Kontakten, die je nach implementierter Bauelementstruktur 3, 4 oder 6 linear unabhängige Farbkanäle generieren. Das Verhalten von Bauelementen auf der Basis von vier Bauelementkontakten wird in Kapitel 7 vorgestellt. Hierbei wird das Verhalten eines 3-Kanal-Sensors in Kapitel 7.1 und das eines 6-Kanal-Sensors in Kapitel 7.2 diskutiert. Anschließend wird in Kapitel 8 auf einen 4-Kanal-Sensor eingegangen, der auf einer 5-Kontakt-Anordnung basiert.

Sämtlichen Sensoren, die in den Kapitel 4 bis 8 vorgestellt werden, ist gemeinsam, daß sie nichtinvertiert auf einem Glassubstrat hergestellt wurden. Das heißt, das Licht fällt durch das Glassubstrat auf den eigentlichen Sensor. Für die Realisierung eines Sensors auf einer amorphen, polykristallinen oder kristallinen Ausleseelektronik ist allerdings die invertierte (umgekehrte) Deposition des Sensors notwendig. Die Konsequenzen, die sich aus der invertierten Deposition ableiten, werden in Kapitel 9 dargestellt.

Neben den einzelnen Zusammenfassungen, die am Ende eines jeden Kapitels gegeben werden, wird in Kapitel 10 noch einmal die gesamte Arbeit zusammengefaßt und Ausblicke auf weitere Arbeiten gegeben.

⁹ ASIC steht für Application Specific Integrated Circuit. Hierbei handelt es sich um eine CMOS-Schaltung. Im Gegensatz zu einem Full-Custom-Entwurf wird nicht jedes Bauelement individuell entworfen, sondern es wird auf Bibliotheksfunktionen zurückgegriffen, die Blöcke von einzelnen Bauelementen zusammenfügen. Dies erlaubt einen schnellen und weniger zeitintensiven Entwurf. Weiterhin sinken die Herstellungskosten. Im Gegenzug ist die Flächenausnutzung und die Betriebsgeschwindigkeit nicht optimal.

Kapitel 3

Vom menschlichen Sehen zum optischen Sensor

Die Entwicklung, Realisierung und Optimierung von optischen Sensoren zur Farberkennung erfordert das Zusammenwirken unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen. So berühren Teile dieser Arbeit die Gebiete der Dünnschichttechnologie, der Halbleiterphysik, der Photonik, der Signalverarbeitung und auch Teile der Farbmeterik. Ausgehend von den unterschiedlichen Ansätzen sollen im Weiteren Einblicke in die einzelnen Teilgebiete¹⁰ gegeben werden.

So wird in Kapitel 3.1 auf das Funktionsprinzip von „intelligenten“ Bildsensoren eingegangen. Hierbei wird auf die Parallelen zwischen technischer und menschlicher visueller Informationsaufnahme eingegangen. In Kapitel 3.2 werden dann mögliche Architekturen technischer Sensoren vorgestellt. Da zur Herstellung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Sensoren die amorphe Dünnschichttechnologie eingesetzt wird, werden in Kapitel 3.3 die Grundlagen des amorphen Siliziums dargestellt. Bevor in Kapitel 4 bis 9 die eigentlichen Ergebnisse der Arbeit vorgestellt werden, soll das wissenschaftliche Umfeld der in Kapitel 3.4 beschrieben werden. Da in den weiteren Kapiteln sowohl die Sensorstrukturen untereinander als auch mit Sensoren anderer Technologie verglichen werden sollen, werden in Kapitel 3.5 die Grundlagen zur farbmeterischen Charakterisierung dargestellt.

3.1 Intelligente Bildsensoren

Ein großer Teil der Wahrnehmung des Menschen wird durch die visuelle Informationsaufnahme bestimmt. Verantwortlich hierfür ist der Gesichtssinn des Menschen. Als Gesichtssinn wird die Gemeinschaftsleistung der Netzhaut mit dem Gehirn, verbunden durch

¹⁰ Da es im Rahmen dieses Kapitels nur gelingen kann, Einblicke in die einzelnen Bereiche zu geben, sei auf die folgenden grundlegenden Arbeiten verwiesen: Grundsätzliche Arbeiten zur Dünnschichttechnologie finden sich bei [Frey86]. Im besonderen auf die Physik des amorphen Siliziums wird bei Street [Street91] und Kanicki [Kanicki91] eingegangen. Zu Fragen der Optik und Photonik sei auf die Arbeiten von Hecht [Hecht87] und Reider [Reider97] verwiesen. Grundlegende Arbeiten zur Signalverarbeitung und zur Farbmeterik finden sich bei Glassner [Glassner95], der sich mit den Prinzipien der Bildsynthese befaßt hat.

den Sehnerv, bezeichnet. Unser Gesichtssinn ist somit die Schnittstelle zwischen Umwelt und unserer Wahrnehmung der Außenwelt. Entsprechend gelten optische Sensorsysteme in technischen Lösungen als Schnittstelle zwischen Umwelt und Maschine. So müssen sich in vielen Bereichen die technischen Systeme mit den Lösungen der Evolution vergleichen lassen. Was einzelne Aspekte der visuellen Wahrnehmung anbelangt, so sind die technischen Lösungen dem Menschen weit überlegen. Was allerdings komplexe Wahrnehmungsprozesse anbelangt, wie beispielsweise Fragen der dreidimensionalen Objekterkennung, so sind heutige technische Lösungen der menschlichen Leistungsfähigkeit weit unterlegen.

So erzeugt die Retina in Zusammenarbeit mit dem visuellen Kortex¹¹ von einer zweidimensionalen Abbildung der Umwelt auf der Netzhaut einen dreidimensionalen Eindruck in unserem Gehirn. Weiterhin generiert unser Gesichtssinn aus den drei Zapfen der Retina, die für das Farbsehen verantwortlich sind, einen Farbeindruck. Hierbei ist Farbe gleichzusetzen mit Information, vergleichbar der Information, die der Mensch aus der räumlichen Wahrnehmung der Umwelt extrahiert. Als dritte wesentliche Leistung ist unser Sehsystem in der Lage, sowohl bei sternklarer Nacht als auch im Fall direkter Sonneneinstrahlung seine Umgebung wahrzunehmen. Die Dynamik des Auges wird hierbei lokal an die Beleuchtungsbedingungen angepaßt. So erreicht die menschliche Netzhaut eine Gesamtdynamik von mehr als 9 Größenordnungen [Glassner95].

Fällt Licht auf unsere Netzhaut, so wird es dort von Photosensoren in einen elektrischen Reiz umgewandelt. Anschließend wird der zweidimensionale Eindruck, der auf unserer Netzhaut entsteht, parallel weiterverarbeitet. Dieses geschieht bereits zum Teil in der Netzhaut und wird im Gehirn fortgesetzt. Die Netzhaut setzt sich aus fünf Ebenen¹² zusammen, wobei sich die Zapfen und Stäbchen als lichtempfindliche Elemente auf der ersten Ebene befinden. Auf der zweiten Ebene befinden sich die Horizontalzellen. Diese reagieren entsprechend der mittleren Intensität mehrerer Photosensoren. Hierbei mitteln die Horizontalzellen räumlich über die Nachbarzellen. Anschließend wird die Information in Form eines elektrischen Potentials von jeweils einer Horizontalzelle und einem Photosensor an eine Bipolarzelle weitergegeben. Das Ausgangssignal ist proportional der Differenz aus den beiden Signalen. Anschließend fließt die Information über die vierte Ebene, die Amakrinenzellen, zu den Ganglienzellen, die ihre Information wiederum an den Sehnerv weitergeben. Das Phänomen des menschlichen Sehens wird deutlich, wenn man berücksichtigt, daß die Stäbchen auf geringe Lichtmengen reagieren, wohingegen die Zapfen erst auf große Lichtmengen ansprechen. Der enorme Dynamikumfang des Auges beruht darauf, daß in den ersten drei Schichten der menschlichen Retina eine automatische Anpassung der Empfindlichkeit erfolgt. Eine Bipolarzelle arbeitet bereits mit einem reduzierten Dynamikumfang verglichen mit den Horizontalzellen oder den Photosensoren. Ein hoher Dynamikumfang ist auch nicht notwendig, da sowohl die Photosensoren als auch die Horizontalzellen ein Signal weitergeben, das nicht proportional zur Intensität des einfallenden Lichts sondern proportional zum Logarithmus der Intensität ist. Mithin ist es der Bipolarzelle möglich, auch noch geringe Unterschiede der Intensität weiterzugeben, da sie eine Differenz aus dem Logarithmus der gemittelten Intensität und dem Logarithmus der Intensität eines einzelnen Photosensors weitergibt. Dieses System erlaubt nicht nur eine feine Auflösung der Intensität, sondern sorgt auch für eine Unterdrückung uninteressanter Bildteile, da gleichförmig beleuchtete Objekte nur schwache Signale der Bipolarzellen hervorrufen.

¹¹ Der visuelle Kortex bezeichnet jenen Bereich in der Großhirnrinde, der für die Verarbeitung der Informationen der Retina zuständig ist [Nicholls95].

¹² In der Literatur werden zur Anzahl der Ebenen innerhalb der Retina sehr unterschiedliche Angaben gemacht. Die hier gewählte Unterteilung orientiert sich an der Arbeit von Schmidt [Schmidt95].

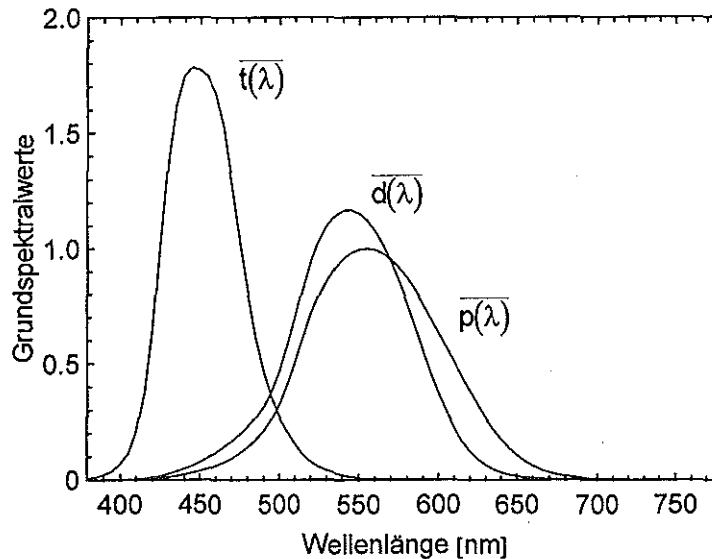


Abb. 3.1: Spektrale Empfindlichkeit der menschlichen Zapfen. Kurzwelliger Zapfen ($\overline{t(\lambda)}$), mittelwelliger Zapfen ($\overline{d(\lambda)}$), langwelliger Zapfen ($\overline{p(\lambda)}$).

Unsere visuelle Informationsaufnahme ist somit ein hochkomplexes System, das allerdings nur im Zusammenwirken der Retina mit unserem Gehirn seine Leistungsfähigkeit erreicht.

Vergleicht man die Möglichkeiten des menschlichen Auges mit den Systemen, die technisch realisiert wurden, so steht die Leistungsfähigkeit technischer Systeme deutlich hinter denen des Menschen zurück. Nichtsdestotrotz hat man seit Mitte der 80er Jahre begonnen, sich am Vorbild des menschlichen Sehens zu orientieren und Sensorsysteme zu entwickeln, die die Funktionen des menschlichen Auges nachbilden. Wesentliche Impulse auf diesem Gebiet gingen von den Arbeiten von Mead [Mead85, Mahowald89] aus. Diese Untersuchungen haben nicht nur dazu geführt, daß Entwickler von Bildaufnehmern das menschliche Sehen intensiver studiert haben, sondern daß die Erkenntnisse auch zu deutlichen Impulsen in der Kameratechnik geführt haben. So ist zunehmend zu beobachten, daß CMOS¹³-Sensoren die klassische CCD¹⁴ in vielen Bereichen verdrängen [Stüder98], da man neben dem eigentlichen Photoelement auch eine „Intelligenz“ in ein Pixel eines solchen Sensors implementieren kann. So läßt sich das Sensorsignal beispielsweise bereits innerhalb der Pixelelektronik logarithmieren [Meynants98]. Ebenso sind Systeme realisiert worden, die die Funktion der Horizontalzellen mit Hilfe eines Widerstandsnetzwerks nachbilden [Kobayashi91] und so auf eine rechnerintensive Nachbearbeitung der Sensordaten verzichtet werden kann.

Was das Farbsehen anbelangt, so erfolgt die neuronale Verarbeitung der spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen durch komplexe Vorgänge im Gehirn. Wie von Young, Helmholtz und Maxwell beschrieben, beruht unser Farbeindruck auf der trichromatischen Theorie [Helmholtz62]. Hierbei läßt sich jeder gewünschte Farbeindruck durch die Mischung von drei monochromatischen Lichtquellen realisieren. Die menschliche Wahrnehmung unterscheidet allerdings zwischen Farbton, Sättigung und Helligkeit¹⁵. Dies erlaubt die Unterscheidung von mehreren Millionen Farben. Die spektralen Empfindlichkeiten der drei

¹³ Die Entwicklung des CMOS-Sensors geht auf das Jahr 1967 zurück.

¹⁴ Die ersten CCDs wurden 1969 bei Philips [Sangster69] und 1970 bei AT&T [Boyle70] entwickelt.

¹⁵ Der Mensch kann unterscheiden zwischen etwa 200 Farbtönen, 20 Sättigungsstufen und rund 500 Helligkeitsstufen [Schmidt95].

menschlichen Zapfen sind in Abb. 3.1 dargestellt. Die Empfindlichkeiten der Zapfen besitzen Maxima im kurzwelligen bei 445nm, im mittelwelligen bei 535nm und im langwelligen bei 555nm. Hierbei fällt auf, daß das Maximum der Absorption für den langwelligen Zapfen bei 555nm liegt. Dies entspricht einer Absorption im gelben und nicht im roten Bereich des sichtbaren Lichts. Die Stäbchen besitzen ihr Maximum der Absorption bei einer Wellenlänge von etwa 500nm [Schmidt95].

So erkennen seit vielen Jahren Entwickler von technischen Lösungen zur optischen Informationsaufnahme, daß die Physiologie in vielen Bereichen als Vorbild dienen kann. Insbesondere die Halbleiterelektronik bietet viele Möglichkeiten, die Funktionen sowohl der Retina als auch des Gehirns nachzubilden. Weiterhin erkennt man, daß die Leistungsfähigkeit eines Gesamtsystems, welches auf optische Eingangsgrößen zurückgreift, wesentlich von der „intelligenten“ Verarbeitung der optischen Eingangsgröße abhängt. Eben solche Sensorsysteme faßt man seit ca. einem Jahrzehnt unter dem Begriff „Smart“-Sensors oder „intelligente“ Sensoren zusammen. Als intelligente optische Sensoren werden Bauelemente verstanden, die das Sensorelement und die Signalverarbeitung gemeinsam integrieren. Angetrieben wird diese Entwicklung maßgeblich durch den Fortschritt in der CMOS-Technologie¹⁶. Somit steht ein kostengünstiger Prozeß zur Verfügung, der die Entwicklung intelligenter optoelektronischer Systeme erlaubt. Im Zusammenhang mit CMOS-Bildaufnehmersystemen wird unter intelligenten Sensoren in der Regel die Integration einer Auswerteelektronik direkt in einem Pixel verstanden. Diese erlaubt zum Beispiel eine Datenreduktion bereits in jedem Pixel, indem das Ausgangssignal des Sensorelements nicht linear sondern logarithmisch an die externe Weiterverarbeitung weitergegeben wird. Der Sensor verhält sich hier ebenso wie die menschliche Netzhaut, welche die Information logarithmisch an die Großhirnrinde weitergibt. Andere Lösungen erlauben die automatische Anpassung der Integrationszeit innerhalb eines jeden Pixels, so daß die Gesamtdynamik des Systems und damit der Kontrast deutlich gesteigert werden kann. So sind inzwischen Sensoren realisiert worden, dessen Pixelelektronik einen vollständigen A/D-Wandler beinhaltet [Mandl99]. Dies macht deutlich, wie die Entwicklung auf diesem Gebiet voranschreitet.

Nachfolgend sollen unterschiedliche Sensorarchitekturen vorgestellt werden, die im Bereich der Sensorik eingesetzt werden.

3.2 Architektur von Bildsensoren

Zweidimensionale Sensorsysteme lassen sich beispielsweise anhand der Herstellungstechnologie klassifizieren. Dies ermöglicht den Vergleich von amorpher (Dünnschicht-) mit kristalliner (Dickschicht-) Technologie. Aber bereits der Vergleich der kristallinen CCD- mit der CMOS-Technologie zeigt, daß andere Wesensmerkmale als nur die Herstellungstechnologie miteinander verglichen werden müssen. Insbesondere wenn Hybridtechnologien¹⁷ mit Standardtechnologien verglichen werden sollen, stoßen Vergleiche auf Grundlage der Herstellungstechnologie an ihre Grenzen. Weitere Möglichkeiten der Unterscheidung sind die spektrale Empfindlichkeit, das Rauschverhalten, der Dunkelstrom, die Dynamik oder auch der

¹⁶ Die Entwicklung im Bereich der CMOS-Bildaufnehmer ist kompatibel zu den Prozessen, die für Speicherbausteine und Mikroprozessoren verwendet werden. Zur Realisierung von CCDs (Charge Coupled Devices) bedarf es eines modifizierten Herstellungsprozesses.

¹⁷ Als Hybridtechnologie wird die Kombination unterschiedlicher Technologien zum Beispiel der amorphen Dünnschicht- mit der kristallinen Dickschichttechnologie verstanden.

Pixel-Pitch, die Auflösung oder der Leistungsverbrauch und nicht zuletzt kann der Preis als Kriterium zur Unterscheidung herangezogen werden. Unter diesen Kriterien sollen die Sensoren im Folgenden allerdings nicht unterschieden werden. Vielmehr soll die Sensorarchitektur zur Unterscheidung herangezogen werden. Auf der Basis der verwendeten Architekturen lassen sich Randbedingungen ableiten, bzw. kann auf das mögliche Einsatzgebiet der Sensoren geschlossen werden, wobei von kristallinen zu amorphen oder auch hybriden Systemen übergegangen werden kann.

3.2.1 Integrations- und Nicht-Integrations-Sensoren

Ein Integrations-Sensor (Abb. 3.2) ist dadurch gekennzeichnet, daß das Ausgangssignal eines Sensorelements proportional zur gespeicherten Ladung innerhalb des Pixels ist. Die Ladung wird hierbei direkt in der Diode gespeichert. In Anhang A wird im Zusammenhang mit möglichen Ausleseschaltungen auf einen Integrations-Sensor eingegangen (Anhang A.1). Die Beleuchtungszeit entspricht in diesem Fall auch der Integrationszeit. Die Integrationszeit beginnt mit dem Zurücksetzen (Reset) der Diode und endet mit dem Auslesevorgang des Pixels. Ein Nachteil diese Systems ist das zeitlich festgelegte Ausleseschema. Dies hat zur Folge, daß die Integrationszeit für alle Sensorelemente des Arrays gleich ist.

Im Gegensatz zu Integrations-Sensoren können Nicht-Integrations-Sensoren zu jedem Zeitpunkt ausgelesen werden. Bei diesen Sensoren ist das Ausgangssignal des Pixels proportional zum Photostrom. Der Photostrom wird also nicht im Pixel integriert. Eine solche Struktur benötigt somit kein festes zeitliches Ausleseschema. Mithin kann die Integrationszeit individuell für jedes Pixel adaptiert werden. Man spricht bei einem solchen Sensor auch von einem Random-Access-Sensor in Analogie zu einem RAM¹⁸-Baustein.

In Abb. 3.3 ist der prinzipielle Aufbau eines Random-Access-Sensors dargestellt. Zu einem beliebigen Zeitpunkt kann also immer nur ein Pixel eines solchen Sensorfeldes ausgelesen werden.

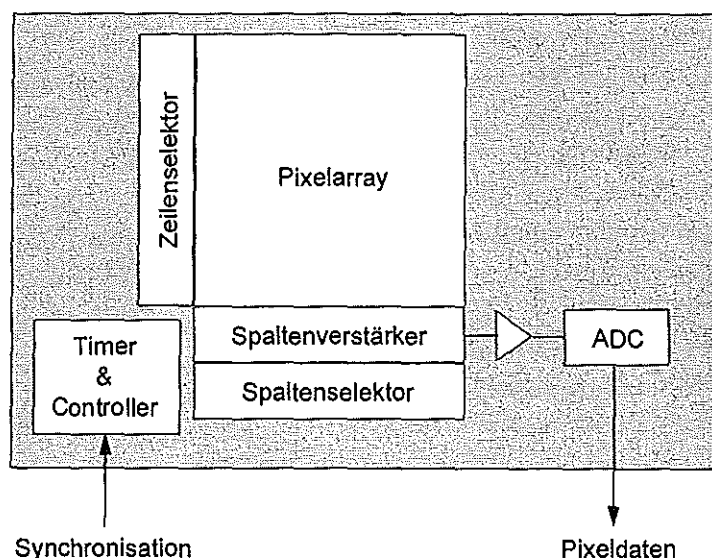


Abb. 3.2: Architektur eines Bildaufnehmers der nach dem Integrationsverfahren arbeitet, in Anlehnung an Ogiers [Ogiers97].

¹⁸ RAM steht für Random Access Memory.

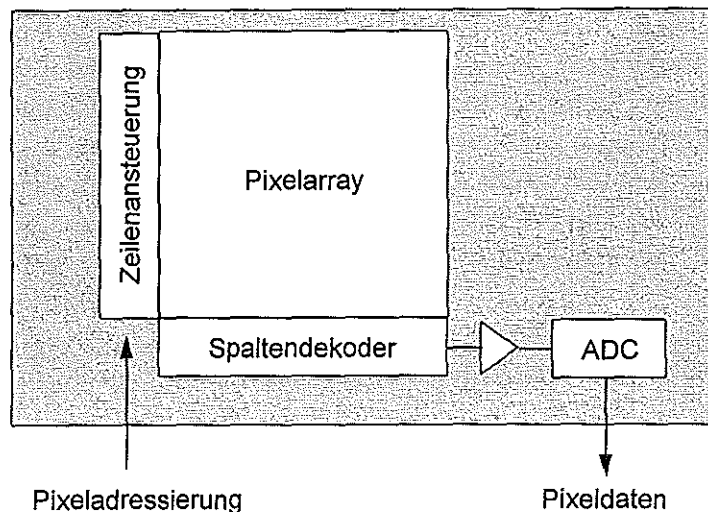


Abb. 3.3: Schematischer Aufbau eines Random-Access-Sensors in Anlehnung an Ogiers [Ogiers97].

Nachteil eines solchen Systems ist die geringe Bildqualität, hervorgerufen durch Rauschprozesse [Fujieda93, Ogiers97]. Solche Bildaufnehmer werden vorrangig in einem industriellen Umfeld eingesetzt. Vorteil eines Random-Access-Sensors ist die Möglichkeit, die Information sehr schnell aus einem Pixel auszulesen. Neben der Integrations- oder Nicht-Integrations-eigenschaft innerhalb eines Pixels können Bildaufnehmer auch anhand der Tatsache klassifiziert werden, ob sie eine aktive oder passive Pixelelektronik enthalten.

3.2.2 Passive Pixel- und aktive Pixelsensoren

Passive Pixelsensoren (PPS) sind dadurch gekennzeichnet, daß das Sensorsignal innerhalb des Pixels nicht zwischengespeichert oder vorverarbeitet wird. Vorteil einer solchen Struktur ist der hohe Flächenfüllfaktor, da nur sehr wenig Fläche für einen Auslesetransistor vorgesehen werden muß. Ein solcher Sensor kann als Integrations-Sensor oder auch als Nicht-Integrations-Sensor eingesetzt werden. In beiden Fällen besteht die Pixelelektronik nur aus einem Schaltelement, das entweder die in der Diode gespeicherte Ladung nach außen abgibt oder den Photostrom direkt nach außen leitet. Ein PPS besteht also aus einem Sensor- und einem Schaltelement. Alle Lösungen, die mehr als ein Schaltelement enthalten, werden als aktive Pixelsensoren (APS) bezeichnet. Aktive-Pixel-Sensoren beinhalten beispielsweise einen Zwischenspeicher oder einen Verstärker. Dies wird bereits als Vorverarbeitungselektronik bezeichnet. Der Vorteil eines Sensors mit einem Zwischenspeicher besteht in der Entkopplung des Sensorarrays von der Weiterverarbeitung. Eine solche Schaltung wurde beispielsweise von Yadid-Pecht [Yadid-Pecht91] realisiert. Die aufgrund der optischen Generation erzeugte Ladung in einer Diode des Sensorarrays wird gesammelt und in einem ersten Verarbeitungsschritt in einen Speicherkondensator der Pixelelektronik umgeladen. Hierbei ist die umgeladene Ladung proportional dem Photostrom der beleuchteten Diode und der Integrationszeit. Die auf dem Kondensator gespeicherte Ladung kann nun zu beliebigen Zeitpunkten ein- oder mehrfach ausgelesen werden. Der Vorteil dieses Sensorkonzepts liegt in der Möglichkeit, den Sensor sehr schnell und so oft wie gewünscht bei einer gleichzeitig moderaten Ausnutzung der Pixelfläche auszulesen.

Trotz der deutlichen Fortschritte in diesem Gebiet der Sensorik existieren immer noch Limitierungen, so zum Beispiel im Bereich des Flächenfüllfaktors oder der Farbdetektion. Realisiert man eine intelligente Vorverarbeitung gemeinsam mit einem lichtempfindlichen

Detektor in einem Pixel eines Sensorarrays bei gleichzeitig hoher Auflösung, steht für den eigentlichen Detektor nur noch wenig Integrationsfläche zur Verfügung, da ein wesentlicher Teil durch die Verarbeitungselektronik benötigt wird. Der geringe Flächenfüllfaktor¹⁹ sorgt dafür, daß sich das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert und somit die Leistungsfähigkeit des Systems trotz der gewonnenen Vorteile durch die Vorverarbeitung wieder sinkt. Dies wird umgangen, indem auf jeden Detektor des Arrays eine Mikrolinse integriert wird [Meynants98]. Hierdurch läßt sich die Lichteinkopplung verbessern. Dies ist allerdings ein aufwendiger und kostenintensiver Prozeß. Weitere in der CMOS-Technologie ebenfalls nicht übliche Prozeßschritte sind bei der Realisierung eines Farbbildaufnehmers notwendig. Hierzu wird ein Mosaik aus optischen Filtern auf die Sensormatrix aufgebracht. Das Mosaik besteht aus einer periodischen Anordnung von blauen, roten und grünen Filterelementen. Mithin sind drei Detektoren mit jeweils einem blauen, grünen und roten Filter notwendig, um die Farbinformation zu detektieren. Für gewöhnlich werden allerdings zwei grüne Filter verwendet (Bayer-Anordnung), so daß insgesamt vier Detektoren notwendig sind, um die Farbinformation an einem Punkt zu ermitteln. Die orts aufgelöste Farbdetektion führt nicht nur zu einer reduzierten Auflösung des Sensors, sondern sie führt ebenfalls zum Farb-Aliasing oder Farbmoiré-Effekt. Dieser Effekt tritt bei allen Systemen auf, die die Farbinformation örtlich detektieren. Bedingt durch die flächige Ausdehnung der mit Farbfiltern beschichteten Dioden treten insbesondere bei feinen periodischen Strukturen starke Fehler auf. Zumeist tritt der Farbmoiré-Effekt allerdings gemeinsam mit dem Schwarz/Weiß-Moiré-Effekt auf. Der Schwarz/Weiß-Moiré-Effekt wird durch die Diskretisierung der einzelnen Elemente eines Sensorarrays hervorgerufen. Dieser Effekt ist somit auch bei Schwarz/Weiß-Bildsensoren zu beobachten. Tritt bei einem Farbbildaufnehmer weiterhin eine Farbverfälschung auf, so ist diese auf den Farb-Aliasing oder Farbmoiré-Effekt zurückzuführen. Auch in diesem Fall ist der Fehler auf die Abbildung des Objekts auf eine diskrete Diodenmatrix zurückzuführen, nur daß sich in diesem Fall die Farbinformation aus der Information der vier Subpixel zusammensetzt. Hierbei wird das Objekt an unterschiedlichen Orten abgetastet und anschließend zu einer Farbinformation an einem Ort zusammengesetzt. Dies sorgt allerdings nur dann für einen Fehler, wenn die Subpixel eines Pixels unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen ausgesetzt sind. Da sich im Vergleich zu einer Schwarz/Weiß-Kamera die Auflösung für eine Farbkamera um den Faktor 4 reduziert, tritt auch der Schwarz/Weiß-Moiré-Effekt bedingt durch die Farbdetektion stärker auf. Mithin ist die Trennung dieser beiden Moiré-Fehler nur schwer möglich.

Trotz der immer weiteren Miniaturisierung der Diodenmatrix mit ihren Filtern, die zu einer Reduktion des Farbmoiré- als auch des Schwarz/Weiß-Moiré-Effekts führt, läßt sich der Farb-Aliasing Effekt nur vollständig vermeiden, indem die Farbe nicht in der Abbildungsebene örtlich diskretisiert, sondern in der räumlichen Tiefe detektiert wird. Voraussetzung hierfür ist die vertikale Integration der drei Abtastelemente. Solche Sensoren, die die Farbinformation in der Tiefe detektieren, sollen im weiteren vorgestellt und deren Eigenschaften diskutiert werden. Die Sensoren erlauben damit eine Farb-Aliasing- oder Farb-Moiré freie Bildaufnahme. Damit sinkt der Platzbedarf auf ein viertel, bzw. die Auflösung kann um den Faktor vier verbessert werden. Dies hat indirekt auch zur Folge, daß der Schwarz/Weiß-Moiré-Effekt zurückgeht. Da die Sensoren nicht nur vertikal übereinander angeordnet werden sondern auch vertikal auf einer Ausleseelektronik integriert werden können, steigt nicht nur die Auflösung, sondern auch der Flächenfüllfaktor kann gesteigert werden. Berücksichtigt

¹⁹ Das Verhältnis zwischen Gesamtfläche eines Pixels und der aktiven Fläche des Detektors schwankt je nach verwendeter Technologie und Integrationsgrad der Vorverarbeitung. Der Flächenfüllfaktor liegt typischerweise zwischen 30% und 65%. So beträgt die aktive Sensorfläche des von Yadid-Pecht [Yadid-Pecht91] vorgestellten Sensors nur 6%.

werden muß hierbei allerdings, daß die Integration auf einer kristallinen Ausleseelektronik nur bei niedrigen Herstellungstemperaturen möglich ist, da ansonsten die kristalline Schaltung beschädigt werden kann. Dies ist mit amorphem und mikrokristallinem Silizium möglich. Es läßt sich bei Temperaturen unter 250°C herstellen. Im Folgenden soll neben der Herstellung des amorphen Siliziums auf die grundlegenden Materialeigenschaften eingegangen werden.

3.3 Grundlagen des amorphen Siliziums

Mitte der 70er Jahre gelang es Spear und LeComber [Spear76] amorphes hydrogeniertes Silizium zu dotieren. Damit wurde amorphes Silizium interessant für Bauelementanwendungen. In der Folgezeit wurden die ersten Solarzellen, Dünnschichttransistoren (TFTs) und auch Sensoren realisiert. Damit stand eine kostengünstige Technologie zur Verfügung, die die großflächige Herstellung von Solarzellen aber auch von großflächiger Elektronik erlaubt, wobei die Strukturen auf unterschiedlichen Substraten hergestellt werden können: z.B. Glas, Stahl oder Kunststoffolien. Einsatzmöglichkeiten von großflächiger Elektronik sind zum Beispiel die Ansteuerungstransistoren in Flüssigkristall-Displays (LCD).

Die Schichten und Sensorstrukturen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, wurden mit Hilfe eines PECVD-(Plasma-Enhanced-Chemical-Vapor-Deposition)-Prozesses hergestellt. Bei der Herstellung der Schichten wird eine Wechselspannung an zwei parallele Elektroden (Plattenkondensator-Anordnung) angelegt. Die Elektrodenanordnung befindet sich in einer Depositionskammer, in der sich ebenfalls das Depositionsgasgemisch befindet. Die für amorphe Schichten verwendete Frequenz beträgt typischerweise 13.56-100MHz. Wird die Depositionsleistung an die Platten angelegt, so kommt es zu einer plasmaunterstützten Glimmentladung. Im Plasma zersetzt sich dann das Depositionsgas Silan (SiH_4), wobei die Radikale im elektrischen Feld zu den Platten transportiert werden. Auf die plasma-physikalischen Vorgänge während der Abscheidung der Schichten wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Hierzu sei auf die Arbeit von Luft [Luft93] verwiesen. Ebenso werden dort alternative Depositionstechniken vorgestellt. Wesentliche Parameter bei der Herstellung der Schichten sind die Depositionsleistung, der Depositionsdruck, die Depositionstemperatur, der Gasfluß und die Gaszusammensetzung. Auf die Wechselwirkung der Depositionsbedingungen mit den elektrischen, optischen oder auch strukturellen Eigenschaften wird ebenfalls nicht eingegangen. Dies ist bereits an anderer Stelle ausführlich geschehen. Eine Zusammenfassung dieser Arbeiten findet sich ebenfalls bei Luft [Luft93]. An dieser Stelle soll weniger auf den Herstellungsprozeß als vielmehr auf das Material, welches hergestellt wird, eingegangen werden.

Aufgrund von Schwankungen der Bindungslängen und Bindungswinkel im Netzwerk besitzt amorphes Silizium zwar eine atomare Nahordnung vergleichbar mit dem kristallinen Silizium, aber eine Fernordnung existiert in diesem Material nicht [Street91a]. Die fehlende Fernordnung führt zu lokalisierten Zuständen. Weiterhin existieren freie Valenzen, die als Defektzustände in der Bandlücke auftreten und so die Lebensdauer der Ladungsträger reduzieren. Erst durch die Zugabe von Wasserstoff während der Herstellung läßt sich ein Teil der freien Valenzen absättigen. Hiermit sinkt die Zustandsdichte im Bereich der Bandlücke. Entgegen dem Verhalten von kristallinem Silizium besitzt amorphes Silizium nur eine Pseudobandlücke, dargestellt in Abb. 3.4. Alle in dieser Arbeit angegebenen Bandabstände

sind bezogen auf den Absorptionskoeffizienten $\alpha=10^{3.5}\text{cm}^{-1}$. Weiterhin wird angenommen, daß die optische Bandlücke gleich der Beweglichkeitslücke²⁰ im Material ist.

Wasserstoff führt allerdings nicht nur zu einer Absättigung der Dangling Bonds. Der Anteil des Wasserstoffs innerhalb einer amorphen Schicht schwankt zwischen 10-20% und liegt damit deutlich über dem notwendigen Wert für eine Absättigung der Defekte. Somit nimmt der Wasserstoff auch Einfluß auf die strukturellen Eigenschaften des Materials. Mithin ist amorphes Silizium eine Legierung aus Wasserstoff und Silizium. Neben den Dangling Bonds treten auch noch Voids (Hohlräume) im Material auf, die die Materialqualität verschlechtern. Betrachtet man den Verlauf der Zustandsdichte als Funktion der Energie in Abb. 3.5, so treten neben den Bandkanten des Halbleiters noch Bandausläufer auf. Dabei ist die Steigung des Valenzbandtails flacher als die des Leitungsbandtails. Der Übergang von der Bandlücke zu den Zuständen innerhalb der Bandlücke wird als Übergang von delokalisierten zu den lokalisierten Zuständen bezeichnet.

Was die Beschreibung der Defektdichte innerhalb der Bandlücke anbelangt, so hat sich das Defekt-Pool-Modell in vielen Bereichen als das Modell erwiesen, das eine möglichst exakte Beschreibung der Defektkonstellation in Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen liefert. Hierbei wird die Variation der Defektverteilung als Funktion des Fermi-Niveaus beschrieben [Winer90, Powell93]. Innerhalb von numerischen Modellen wird von einer gaußförmigen Defektverteilung ausgegangen, die als D_n -, D_i - und D_p -Peaks (Abb. 3.5) vorliegen [Stiebig95a]. Der D_n -Peak liegt hierbei unterhalb der Bandmitte und der D_p -Peak oberhalb. Jeder dieser drei Defektpeaks setzt sich wiederum aus drei Ladungszuständen zusammen, einem D^- , einem D^+ und einem D^0 -Zustand. Hierbei ist der D^+ mit keinem Elektron besetzt, der D^0 mit einem und der D^- mit zwei Elektronen. Verschiebt sich beispielsweise das Fermi-niveau als Folge einer Phosphor-Dotierung²¹ in Richtung der Leitungsbandkante, so nimmt die Defektdichte des D_n -Peaks drastisch zu.

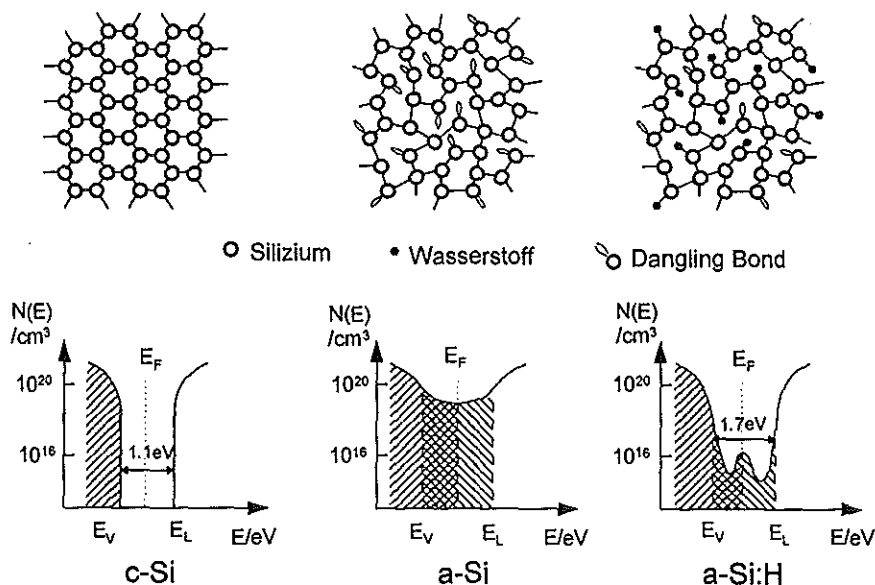


Abb. 3.4: Struktur und Bandverlauf von kristallinem (c-Si), amorphem (a-Si) und hydriertem amorphem Silizium (a-Si:H). Eingetragen ist jeweils das Leitungsband (LB), das Valenzband (VB) und das Fermi-Niveau.

²⁰ Hierzu gibt es in der Literatur unterschiedliche Meinungen. So wird von Stuke [Stuke87] und Jackson [Jackson87] behauptet, daß die optische Bandlücke und die Beweglichkeitsbandlücke identisch sind. Im Gegensatz dazu beobachtet Wronski [Wronski89] hier einen Unterschied von 0.15 eV.

²¹ Zur Herstellung einer n-Schicht wird dem Depositionsgas Silan (SiH_4) das Gas Phosphin (PH_3) beigegeben.

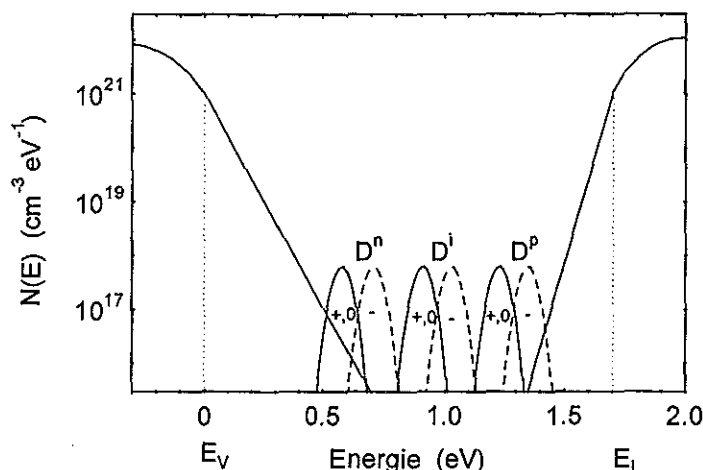


Abb. 3.5: Defektdichteverteilung in Übereinstimmung mit dem Defekt-Pool-Modell.

Da das Fermi-Niveau in diesem Fall oberhalb der Bandmitte liegt, sind die Zustände mit zwei Elektronen besetzt und somit negativ geladen. Umgekehrt verhält es sich für Bor-dotierte²² Proben.

Im Rahmen dieser Arbeit, die als Ziel die Entwicklung und Charakterisierung von Bauelementen zur Farberkennung hat, kann nicht näher auf die Grundlagen des Materials eingegangen werden. Hierzu wird auf die Arbeiten von Street [Street91] verwiesen. Ausgehend von amorphen Schichten sind in der Vergangenheit unterschiedliche Dünnschichtsysteme entwickelt worden. Betrachtet man den Bereich der Bauelemente [Kanicki91], so lassen sich die Aktivitäten im wesentlichen auf drei Hauptanwendungen stützen. Dies sind zum einen die amorphen Solarzellen in Form von Einzel-, Tandem- oder auch Tripelzellen, zum anderen die Dünnschichttransistoren (TFTs) zur Ansteuerung von Flüssigkristall-Displays (LCD). Als dritter erfolgreicher Zweig der amorphen Technologie kann die Realisierung von großflächigen Sensorarrays betrachtet werden. Bei den Anwendungen in der großflächigen Sensorik sind allerdings bisher nur amorphe pin-Dioden als Schwarz/Weiß-Sensoren eingesetzt worden. Neben diesem Bereich hat sich in den letzten Jahren der Bereich der Farbsensorik stark weiterentwickelt. Ausgehend von diesen Ergebnissen soll das wissenschaftliche Umfeld dieser Arbeit im nächsten Kapitel dargestellt werden.

²² Zur Herstellung von p-Schichten wird ein Gasgemisch aus Silan (SiH_4), Methan (CH_4) und TMB ($\text{B}(\text{CH}_3)_3$) verwendet.

3.4 Das wissenschaftliche Umfeld der Arbeit

3.4.1 Amorphe Dünnschichtsensoren zur Farberkennung

Der erste Dreifarbensensor, bestehend aus zwei antiseriell verschalteten Dioden aus amorphem Silizium, wurde 1988 von einer Forschergruppe aus Taiwan publiziert [Tsai88]. Die Struktur besteht aus einer nipin Schichtenfolge, wobei die Absorptionsschicht der Bottom-Diode aus zwei unterschiedlichen i-Schichten besteht. Die beiden Bereiche der i-Schicht in der Bottom-Diode wurden bei unterschiedlichen Wasserstoffverdünnungen hergestellt, so daß sich für die erste i-Schicht in der Bottom-Diode eine optische Bandlücke von 1.85eV und für den hinteren Bereich eine Bandlücke von 1.75eV einstellt. Der Sensor besitzt Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 480nm, 530nm und 575nm bei Anlegen einer Spannung von 2.0V, -0.2V und -2.0V. Hierbei wird die Trennung zwischen rot und grün in der Bottom-Diode vorgenommen. Als Funktionsprinzip wird neben den unterschiedlichen optischen Bandabständen in den zwei Bereichen der Bottom-Diode eine Diskontinuität des Valenzbandverlaufes angegeben, die dazu führt, daß bei kleinen negativen Spannungen lediglich die Ladungsträger aus dem vorderen Bereich der Bottom-Diode extrahiert werden. In diesem Fall ist die Top-Diode in Durchlaßbetrieb und die Bottom-Diode in Sperrbetrieb. Bei höherer Spannung weitet sich die Extraktion auf die komplette Bottom-Diode aus. Für den Sensor liegen keine Messungen der spektralen Empfindlichkeit unter Biaslicht vor. Dies ist allerdings die Voraussetzung für die Generation von drei linear unabhängigen Verläufen der spektralen Empfindlichkeit. Die Herstellung der Sensorstruktur in einem Depositionsreaktor²³ in Kombination mit der Tatsache, daß lediglich die Wasserstoffkonzentration in den beiden i-Schichten der Bottom-Diode variiert wurde, deutet auf starke Nichtlinearitäten des Bauelements hin, die sich insbesondere bei lichtinduzierter Alterung des Bauelements noch verstärken dürften. Neben 3-Farbsensoren wurden allerdings auch 2-Farbsensoren entwickelt, deren Herstellung auf der Basis zweier antiseriell verschalteter Dioden deutlich einfacher als die Herstellung von 3-Farbsensoren ist.

Im Gegensatz zu Bauelementen, die drei unabhängige Verläufe der spektralen Empfindlichkeit detektieren, sind die Anwendungsmöglichkeiten von Zweifarbsensoren [Tsai87, Cesare94, 95, Zhu94] eingeschränkt. Zweifarbsensoren erscheinen als einsetzbar, wo sie in Kombination mit Flüssigkristall-Displays als Elemente eines optischen neuronalen Netzwerks eingesetzt werden [Clough95]. So lassen sich optische Signale mittels eines anderen optischen Signals schalten [Barbier93]. Dies wurde zwar bereits mit amorphen Siliziumkohlenstoff pin-Dioden demonstriert [Akiyama93], jedoch eignet sich ein nipin- oder pinip-Zweifarbensor ebenfalls gut für eine solche Anwendung.

Neben der Möglichkeit, die Farben mit Hilfe zweier antiserieller Dioden zu detektieren, sind auch Publikationen bekannt, die sich mit der Entwicklung von Farbsensoren auf der Basis von Doppel-Schottky-Kontakten befassen. Der von Fang [Fang91] vorgestellte Sensor zeigt eine gute Farbtrennung mit Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 480nm, 530nm und 620nm. Andere Autoren weisen allerdings nach, daß die Eigenschaften des Bauelements stark von den Eigenschaften der Grenzfläche zwischen Metall und Halbleiter bestimmt werden [Rossi95]. Entsprechend sinkt die Reproduzierbarkeit der vorgestellten Sensoren.

Weitere Gruppen haben sich mit der Entwicklung von amorphen Zweipol-Sensoren beschäftigt. Ziel war allerdings nicht die Entwicklung eines Farbsensors, sondern die

²³ Dotierte und intrinsische Schichten wurden also in einem Depositionsreaktor hergestellt.

Realisierung von Phototransistoren [Chang87, Hwang93] mit einer möglichst hohen optischen Verstärkung. Hierzu wurden ebenfalls nipin-Strukturen eingesetzt. Sämtliche Publikationen zeigen zwar, daß sich optische Verstärkungen von bis zu 50 erzielen lassen, aber die Bauelemente sind sehr stark nichtlinear. Neben dem Einsatz von antiseriell verschalteten Dioden sind auch komplexere Schichtfolgen zur Farbdetektion eingesetzt worden. So wurden nipinin oder pinipip-Strukturen [Rieve96] oder noch komplexere Strukturen [Caputo95, 96], die aus mehrfach geschichteten pinip oder nipin-Strukturen bestehen, eingesetzt. Zu Strukturen dieser Art liegen allerdings keine Ergebnisse der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe vor, wobei allerdings das Bauelementdesign auf starke Nichtlinearitäten schließen läßt. Weiterhin sind die Dunkelströme dieser Bauelemente sehr hoch, so daß ein geringes Photo-/Dunkelstrom-Verhältnis erzielt wurde.

3.4.2 Sensorarrays in Dünnschichttechnologie

Neben Einzelsensoren sind auch ein- oder zweidimensionale Sensorfelder realisiert worden [Street98, Weisfield93, Hoheisel98, Berkel94]. Bei allen bisher publizierten Sensorfeldern in Dünnschichttechnologie sind ausschließlich pin-Dioden aus amorphem Silizium eingesetzt worden. Die pin-Dioden werden in diesen Anwendungen als Schwarz/Weiß-Sensoren eingesetzt. Bei diesen großflächigen Sensoren handelt es sich um Integrations-Sensoren (Kapitel 3.2.1). In allen bekannten Fällen dient die Diode neben der Sammlung der photogenerierten Ladungsträger auch der Speicherung der Ladung. Darüber hinaus handelt es sich um Passive-Pixel-Sensoren (Kapitel 3.1.2), da lediglich ein Schaltelement in jedem Pixel implementiert ist. Als Schaltelement werden z.B. amorphe Dioden eingesetzt [Berkel94, Hoheisel98]. Weiterhin werden amorphe Dünnschicht-Transistoren (TFTs) eingesetzt. Schaltdioden lassen sich einfacher herstellen als Dünnschicht-Transistoren aufgrund einer reduzierten Anzahl von photolithographischen Schritten. Die eingeschränkte Linearität der Schaltdioden hat allerdings dazu geführt, daß fast ausschließlich amorphe TFTs als Ausleselemente [Kaneko91, Powell92, Yamaguchi92, Fujieda93, Weisfield93, Okamura94, Street95, Street98] eingesetzt werden. Neben den amorphen Sensoren und amorphen Auslesetransistoren werden auch polykristalline Transistoren gemeinsam auf einem Substrat integriert.

Die gemeinsame Realisierung von amorpher und polykristalliner Dünnschichttechnik findet dort ihre Anwendung, wo es auf großflächige Sensorik²⁴ ankommt, wie im Fall von Scannern, Kopierer und großflächigen Röntgendetektoren. Die polykristallinen TFTs werden hierbei als Zeilen- oder Spaltentreiber eingesetzt. Auch in diesem Fall wird von einer Hybridtechnologie²⁵ gesprochen [Mei94], da gemeinsam amorphe und polykristalline TFTs eingesetzt werden. In einem Herstellungsschritt wird sowohl der Kanal für die amorphen als auch für die polykristallinen Silizium TFTs abgeschieden. Realisiert werden die polykristallinen TFTs anschließend durch Rekristallisation der amorphen Schicht [Hack93, Mei94, Aoyama94]. Somit lassen sich amorphe und polykristalline Transistoren mit einer einzigen Abscheidung realisieren. Rekristallisiert werden die amorphen Schichten mit einem Excimer Laser (Laserwellenlänge im nahen UV). Im Gegensatz zur Festphasenrekristallisation von amorphen Schichten bei einer Temperatur von 550°C bis 700°C [Yamauchi93] erlaubt die Laserrekristallisation die Verwendung von Low-Cost-

²⁴ Als Ausgangssubstrate, auf denen die Detektorsystem deponiert sind, werden in der Regel Glassubstrate eingesetzt. Es sind aber auch Publikationen bekannt, in denen Sensorarrays auf transparenten PVC-Folien realisiert wurden [Okamura94].

²⁵ Siehe hierzu Kapitel 3.2.

Glassubstraten. Der Einsatz von Low-Cost-Glassubstraten ist deshalb von Interesse, weil ein großer Teil der Herstellungskosten von LCDs und großflächigen Scannern von den Kosten für die Glassubstrate bestimmt wird. Bei der Laserrekristallisation sorgt der Laser nur für einen Phasenübergang des amorphen Materials zu polykristallinem Silizium und nicht für ein Aufheizen des Glassubstrates. So kann verhindert werden, daß z.B. Bor aus den Low-Cost-Glassubstraten austritt und so die Halbleiterschichten kontaminiert. Vergleicht man die Eigenschaften von amorphen und polykristallinen TFTs, so liegen die Unterschiede im wesentlichen in der Beweglichkeit der Ladungsträger und im Dunkelstrom. Amorphe TFTs besitzen eine Beweglichkeit von ca. $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ und einen Dunkelstrom von kleiner $0.1\text{pA}/\mu\text{m}$ [Chen96]. Für polykristalline Transistoren liegt die Beweglichkeit um den Faktor 30-50 höher, aber ebenso steigt der Dunkelstrom um den Faktor 1000 [Chen96]. Diese beiden Randbedingungen haben zur Folge, daß amorphe Transistoren als Schaltelemente in einem Pixel eines Sensorarrays integriert werden und polykristalline Transistoren als schnelle Zeilen- und Spaltentreiber oder auch als Transistoren in einer externen Verarbeitungselektronik eingesetzt werden. Die Technologie zur Herstellung von polykristallinen TFTs wird von Anwendungen im Bereich der Flüssigkristall-Displaytechnik vorangetrieben [Chen94]. In diesem Bereich dienen die polykristallinen Transistoren als Schaltelemente in einem Pixel. In einem Sensorarray werden also amorphe und in einem Flüssigkristall-Display polykristalline Transistoren als Schaltelemente eingesetzt. Auch hier verwendet man die Laserrekristallisation, da kostengünstige Glassubstrate eingesetzt werden sollen. Mithin ist die Dünnschicht-Sensortechnik eng verwandt mit der Displaytechnologie [Hack94].

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels angedeutet, finden in den bisher realisierten Sensorarrays ausschließlich amorphe pin-Dioden eine Anwendung. Damit stehen bisher lediglich Schwarz/Weiß-Sensoren zur Verfügung. Zur Realisierung eines Farbsensorarrays müssen die Dioden mit Farbfiltern beschichtet werden. Bei den Filtern handelt es sich um solche, die auch für CMOS- und CCD-Sensoren eingesetzt werden. Im Weiteren soll auf Bildaufnehmersysteme eingegangen werden, die Farbe mit Hilfe von optischen Filtern detektieren.

3.4.3 Farbbildaufnehmersysteme mit optischen Filtern

Im Wesentlichen beruht die Farbdetektion von CCD- oder CMOS-Bildaufnehmern, aber auch von Dünnschicht-Sensorarrays auf der Verwendung von optischen Filtern. Entweder setzt man ein Kamerasystem bestehend aus drei Kameras mit jeweils einem roten, grünen und blauen Filter ein, was aber aus Kostengründen nicht rentabel erscheint [Winstel86] oder man beschichtet eine Sensormatrix alternierend mit drei unterschiedlichen Gelatine- oder Interferenzfiltern. Typischerweise wird heute eine Bayer-Filteranordnung verwendet, bei der sich die Farbinformation aus jeweils einem blauen, einem roten und zwei grünen Pixeln zusammensetzt.

In Abb. 3.6 ist die relative spektrale Empfindlichkeit eines kommerziell erhältlichen Scanners dargestellt. Die Spitzen im Verlauf der spektralen Empfindlichkeit sind zurückzuführen auf den Einfluß der Beleuchtungsquelle, da es sich bei den dargestellten Kurven bereits um das Produkt aus der spektralen Empfindlichkeit und der spektralen Strahlungsverteilung der Beleuchtungsquelle handelt.

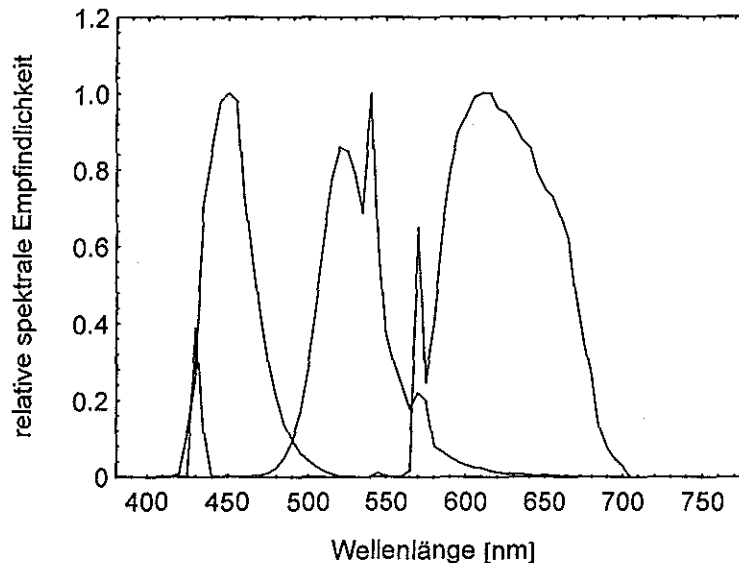


Abb. 3.6: Relative spektrale Empfindlichkeit eines kommerziell erhältlichen Scanners (Firma Sharp). Die spektrale Empfindlichkeit beinhaltet bereits die Spektralcharakteristik der Beleuchtungsquelle.

Die Halbwertsbreite²⁶ der spektralen Verläufe liegt für blau, grün und rot bei <50nm, 50nm und <100nm. Der Schnittpunkt der relativen spektralen Empfindlichkeit liegt bei 0.1 (blau/grün) und 0.2 (grün/rot). Die spektralen Empfindlichkeiten entsprechen den Werten, wie sie auch für Farbfilter publiziert wurden, die auf Dünnschicht-Sensorarrays [Weisfield92], CMOS-Sensoren [D'Luna91] aufgebracht oder auch in Farbkopierern [Takenchi88] eingesetzt wurden. Die technologische Vorgehensweise zur Integration der Filter ist hierbei für die unterschiedlichen Systeme identisch. Die Halbwertsbreite der spektralen Verläufe für Anwendungen dieser Art liegt charakteristischerweise unterhalb von 100nm und der Schnittpunkt der relativen spektralen Empfindlichkeiten unterhalb von 0.5.

Neben der Möglichkeit, die alternierende Filteranordnung direkt auf eine Matrix aus lichtempfindlichen Elementen aufzubringen oder drei Kameras zu verwenden, denen jeweils ein roter, grüner und blauer Filter vorgeschaltet wird, läßt sich auch eine Kamera verwenden, welche hintereinander mehrere Bilder aufnimmt, wobei die Filter bei jeder Aufnahme gewechselt werden. Ein solches System läßt sich zwar nur für zeitlich invariante Bildsequenzen einsetzen, jedoch ermöglicht es zum einen eine Farbmoiré- oder Farb-Aliasing freie Aufnahme und darüber hinaus läßt sich die Anzahl der verwendeten Filter erhöhen, um so die Farbauflösung zu verbessern. Man spricht hierbei von der Multispektraltechnik.

3.4.4 Multispektraltechnik

Wesentliches Merkmal der Multispektraltechnik ist die Möglichkeit, die Farbinformation dokumenten-, beleuchtungsbedingungs- und beobachterunabhängig aufzunehmen. Weiterhin ist es damit möglich, die Farbinformation geräteunabhängig zu ermitteln [Keusen96]. Dies ermöglicht die deutlich einfachere Anpassung der gewonnenen Farbinformation an beliebige Ausgabemedien. Darüber hinaus steht ein Aufnahmesystem zur

²⁶ Der Begriff der Halbwertsbreite wird in dieser Arbeit gleichbedeutend mit dem Begriff FWHM (Full-Width at Half Maximum) verwendet. Hierbei handelt es sich um die volle Breite des Verlaufs bei halber Amplitude.

Verfügung, das aufgrund seiner Farbinformationsaufnahme ein offenes System darstellt, welches mit anderen Medien kombiniert werden kann [Keusen96, Hill98]. So wurde von Keusen [Keusen96] gezeigt, daß eine Kameraanordnung mit 14 Interferenzfiltern eine sehr gute Farbaufnahme erlaubt. Die Halbwertsbreite der verwendeten Filter betrug 20nm. Mit einem solchen System ist es möglich, die auftretenden Metameriefehler²⁷ eines Farbinformationssystems drastisch zu senken.

Nachteil einer solchen Anordnung ist die Begrenzung der Aufnahme auf zeitinvariante Sequenzen. Farbbildaufnehmer, die mit einem Mosaik aus Filtern beschichtet sind, erlauben zwar die Aufnahme bewegter Bildfolgen, jedoch besitzen diese Systeme einen deutlich höheren Metameriefehler. Darüber hinaus tritt der Farb-Aliasing-Effekt auf. Der Metameriefehler läßt sich reduzieren jedoch nur auf Kosten eines steigenden Farb-Aliasing-Fehlers. Durch die höhere Anzahl aufzubringender Farbfilter steigt die Anzahl an Subpixeln, die zu einem Farbpixel zusammengefaßt werden, und damit nimmt die Ortsauflösung ab und der Farb-Aliasing-Effekt nimmt zu. Somit fehlt bisher ein Farb-Aliasing freies Bildaufnehmersystem, welches bewegte Bilder bei gleichzeitig reduziertem Metameriefehler aufnehmen kann. Eine Möglichkeit dies zu realisieren ist die Aufnahme der Farbinformation in der Tiefe des Bauelements. Nachfolgend werden unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die sich bisher mit der Realisierung einer solchen Idee befaßt haben. Zuvor soll aber noch kurz auf die Ursachen des Farb-Aliasing-Effekts eingegangen werden.

3.4.5 Der Farbmoiré oder Farb-Aliasing-Effekt

Allen kommerziellen Bildaufnehmersystemen ist die örtliche Diskretisierung der Farbinformation gemeinsam. Wesentlicher Nachteil all dieser Systeme ist das Auftreten des Farbmoiré- oder Farb-Aliasing-Effekts. Neben dem Farb-Aliasing tritt bei Bildaufnehmersystemen, ob Dünnschichtsystem oder kristalliner One-Chip-Sensor, ebenfalls der Schwarz/Weiß- oder auch Gray-Aliasing-Effekt auf. Die Trennung dieser beiden Effekte ist nur sehr schwer möglich. So tritt bei Schwarz/Weiß-Bildaufnehmern der Schwarz/Weiß- oder Gray-Aliasing-Effekt auf. Dieser Effekt tritt ebenfalls bei Farbbildaufnehmern auf, wird aber ergänzt durch einen Farb-Aliasing-Effekt. Somit tritt für Farbbildaufnehmer sowohl der Gray-Aliasing-Effekt als auch der Farb-Aliasing-Effekt auf. Mithin treten bei Farbbildaufnehmern größere Aliasingfehler auf.

Betrachtet man den Aliasingeffekt (Gray-Aliasing-Effekt und Farb-Aliasing-Effekt) unter signaltheoretischen Ansätzen, so wird ein kontinuierliches Signal diskret abgetastet und anschließend wieder rekonstruiert. Das kontinuierliche Eingangssignal ist gleich dem Ausgangssignal, wenn das Eingangssignal bandbegrenzt und die Grenzfrequenz kleiner als die halbe Abtastfrequenz ist (Nyquist-Kriterium). Diese Bedingung ist allerdings nicht immer erfüllt. Unterdrücken läßt sich dieser Effekt durch spezielle Anti-Aliasing-Filter oder Anti-Aliasing-Algorithmen [Glassner95]. Hierzu ist allerdings eine Nachbearbeitung der digitalen Bildinformation notwendig. Ausschalten kann man den Farb-Aliasing- oder den Gray-Aliasing-Effekt auf diesem Wege nicht.

Der Farb-Aliasing-Effekt läßt sich allerdings durch eine vertikale Integration der Farbdetektoren ausschalten. Hierbei wird die vollständige Farbinformation an einem Ort eines Sensorarrays aufgenommen. Damit läßt sich der Farb-Aliasing-Effekt ausschalten. Der Gray-Aliasing-Effekt bleibt allerdings erhalten. Er läßt sich nur reduzieren, indem die Pixelfläche

²⁷ Metameriefehler treten auf, wenn die spektrale Empfindlichkeit des Sensors von der Empfindlichkeit des Standardbeobachters abweicht. Mithin besitzen alle Farbaufnehmersysteme mehr oder weniger stark ausgeprägte Metameriefehler.

verkleinert wird. Da die Farbinformation in der Tiefe detektiert wird und so keine Farbfilter mehr notwendig sind, erhöht sich gleichzeitig auch die Auflösung (Bayer-Filteranordnung vorausgesetzt, ein blauer, zwei grüne und ein roter Filter) des Sensorarrays bei gleichem Pixelpitch um den Faktor 4. Hieraus folgt, daß sich durch die vertikale Detektion nicht nur der Farb-Aliasing-Effekt ausschalten, sondern auch der Gray-Aliasing-Effekt verbessern läßt.

3.4.6 Farb-Aliasing freie Bildaufnehmer

Ein solches System, bestehend aus drei vertikal integrierten Sensoren, ist bisher in kristalliner Siliziumtechnologie realisiert worden. Zur Herstellung wurde ein BiCMOS-Prozeß verwendet. Ein solcher Prozeß erlaubt die Kombination von sowohl digitalen als auch analogen Schaltungskomponenten in einer Schaltung. Kristallines Silizium mit seinem optischen Bandabstand von 1.1eV ist als Detektor für den Einsatz im nahen infraroten gut geeignet, aber für den Einsatz im Bereich des sichtbaren Lichts ist es nur unzureichend geeignet. Erst die Kombination mit optischen Filtern erlaubt die Realisierung von Bauelementen mit sehr guter Farbtrennung, wobei die Anforderungen hinsichtlich der Farbtrennung an die Sensoren durch die optischen Filter bestimmt werden. Nutzt man dennoch die wellenlängenabhängige Absorption des kristallinen Materials, so wird Licht der Wellenlänge 450nm bis zu einer Tiefe von 0.5µm und Licht der Wellenlänge 650nm bis zu einer Tiefe von 2µm absorbiert. Trotz der Schwierigkeiten bei der Herstellung bedingt durch die Integration von drei vertikal angeordneten pn-Übergängen haben sich mehrere Forschungsgruppen mit der Realisierung einer solchen Struktur befaßt [Kramer93, Chouikh96]. Die Abb. 3.8 zeigt die spektrale Empfindlichkeit dreier vertikal integrierter p/n-Übergänge in Anlehnung an die schematische Schichtanordnung in Abb. 3.7. Die Struktur wurde mit Hilfe eines BiCMOS-Prozesses von Kramer [Kramer93] hergestellt. In ein p⁻-Substrat, welches als Ausgangssubstrat dient, wurde eine n⁻-Wanne eindiffundiert. Anschließend wurde eine p-dotierte Polysiliziumschicht aufgebracht, in welche ein n⁺-Gebiet implantiert wurde.

Auch Chouikh [Chouikh96] hat sich mit der Farbdetektion nach einem ähnlichen Prinzip beschäftigt. In diesem Fall ist allerdings statt des Implantations- ein Diffusionsschritt für die Realisierung des pn-Übergangs zur Blaudetektion vorgenommen worden. Die realisierten spektralen Empfindlichkeiten zeigen allerdings aufgrund der konstanten Absorptionskoeffizienten im Material für beide Strukturen ein ähnliches Verhalten [Kramer93, Chouikh96].

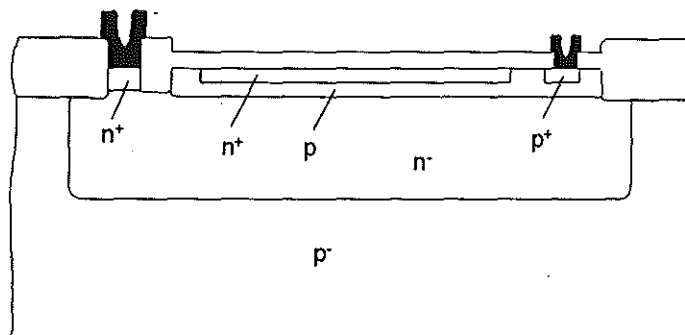


Abb. 3.7: Schnitt durch die vertikal integrierte Struktur dreier pn-Übergänge. Die pn-Übergänge werden gebildet durch die n⁻-Wanne im p⁻-Substrat, die n⁻-Wanne zur p-Basis und die p-Basis zur implantierten n⁺-Schicht [Kramer93, Seitz93].

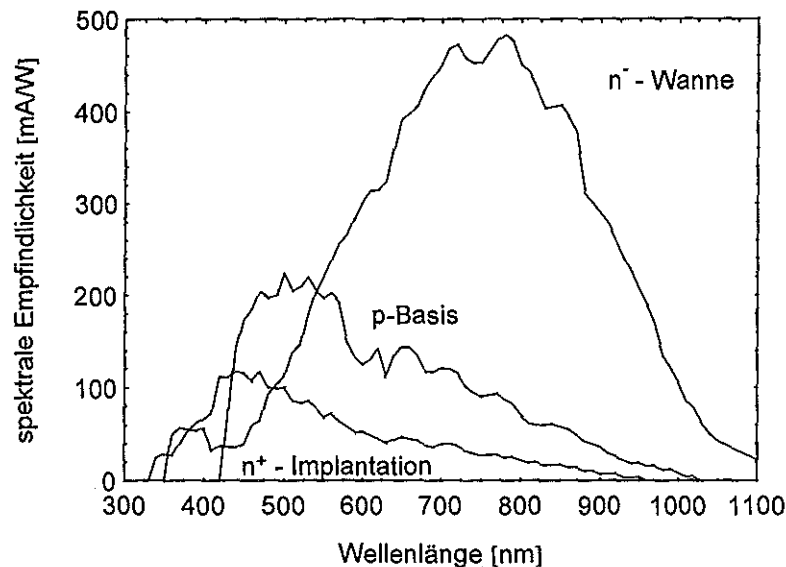


Abb. 3.8: Spektrale Empfindlichkeiten der in Abb. 3.7 dargestellten drei pn-Übergänge [Kramer93, Seitz93].

Trotz der Tatsache, daß der in Abb. 3.7 vorgestellte Sensor kompatibel ist zu herkömmlichen Standard-Prozessen der Halbleiterindustrie, besteht aufgrund des konstanten Absorptionskoeffizienten von c-Si nur die Möglichkeit, die Farbtrennung über die Lage des pn-Überganges im Bulkmaterial festzulegen. Darüber hinaus steht die für den Detektor genutzte Schaltungsfläche für andere Komponenten wie die Ausleseelektronik nicht mehr zur Verfügung. Dies mag ein Grund sein, weshalb trotz des Nachweises der Farbdetektion eines solchen Einzelsensors bisher noch kein Sensorarray realisiert wurde.

Es wurde allerdings auch vorgeschlagen zwei der drei Dioden lateral zu realisieren, um so die Farbtrennung aufgrund dünnerer aktiver Halbleiterschichten zu verbessern [Poenar97]. Hierzu wurden zwei Polysiliziumschichten auf einem kristallinen Siliziumsubstrat aufgebracht, die durch Siliziumoxidschichten getrennt werden. Hierbei wird die in Lichteinfallsrichtung unterste kristalline Diode vertikal hergestellt. Nach der Realisierung der ersten Diode wird eine Oxid/Nitridschicht zur Isolation der untersten von der mittleren Diode aufgebracht. Auf die Isolationsschicht wird eine planare pin-Dioden aus polykristalliner Silizium integriert. Anschließend wiederholt sich das Aufbringen der Isolationsschicht und der planaren Dioden.

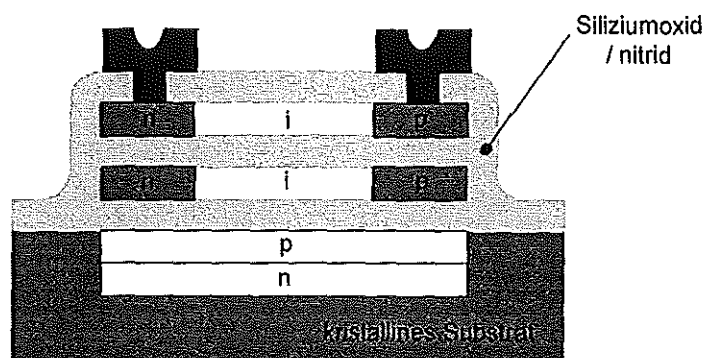


Abb. 3.9: Schematischer Aufbau eines Farb-Aliasing freien 3-Kanal-Sensors, bestehend aus zwei lateral und einer vertikal angeordneten Diode [Poenar97].

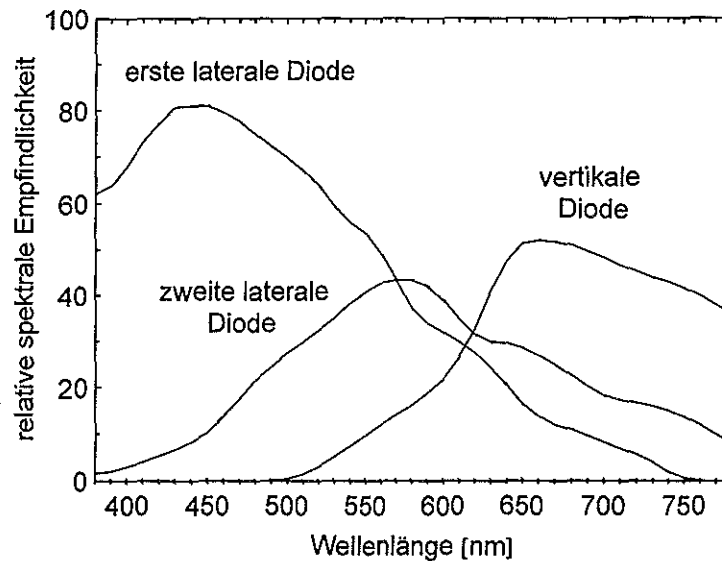


Abb. 3.10: Relative spektrale Empfindlichkeit eines Farb-Aliasing freien 3-Kanal-Sensors (Abb. 3.9) bestehend aus zwei lateral und einer vertikal angeordneten Diode [Poenar97].

Abb. 3.9 zeigt den schematischen Aufbau eines Pixels eines solchen Sensors. In Abb. 3.10 ist die spektrale Empfindlichkeit der Struktur aus Abb. 3.9 dargestellt. Die Schichtdicke der aktiven Absorberschicht der ersten Diode beträgt 66nm und die der mittleren polykristallinen Diode 1 μ m. Der pn-Übergang im kristallinen Substrat liegt in einer Tiefe von 5 μ m. Im Gegensatz zur spektralen Empfindlichkeit in Abb. 3.8 ist die Farbtrennung verbessert. Unbeantwortet bleibt in der Publikation von Poenar [Poenar97] die Frage, wie die einzelnen Dioden kontaktiert werden, wenn ein Sensorfeld realisiert werden soll. Weiterhin geht die kristalline Detektorfläche für eine mögliche Ausleseschaltung verloren, da sie für die vertikale Diode genutzt wird, welche den Rotanteil des Lichts detektiert.

Vergleicht man Dünn- und Dickschicht-Technologien unter dem Gesichtspunkt des Einsatzes in der optischen Sensorik, so liegen die Begrenzungen der Dünnschichttechnologie typischerweise in den elektrischen Eigenschaften des Materials, wogegen kristallines Silizium als wichtigstes Material der Dickschicht-Technologie mit seinem geringen Bandabstand von 1.1eV nur begrenzt gute Eigenschaften als Detektor im Bereich des sichtbaren Lichts besitzt. Hybride Systeme ermöglichen die Begrenzungen zu umgehen und jeweils die Stärken der Systeme zu kombinieren.

3.4.7 Hybride Bildaufnehmersysteme

In der Vergangenheit sind unterschiedliche hybride Bildaufnehmersysteme realisiert worden. So wurden, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, amorphe und polykristalline Technologie kombiniert zur Herstellung von großflächigen Sensoren. Weiterhin sind auch amorphe Detektoren auf einer kristallinen Schaltung integriert worden [Tsukada81, Manabe91, Schneider98]. Ebenso wie amorphe Schichten sind auch chalcogenide Glasfilme [Chikamara82] oder auch Zinkselenid/Zinkcadmium-Telurid-Heterostrukturen [Tsukada79] mit einer kristallinen Ausleseelektronik verbunden worden.

Nachteil der bisher realisierten Systeme ist, daß entweder nur Schwarz/Weiß-Sensoren realisiert wurden oder aber Farbfilter zur Farbdetektion eingesetzt wurden.

Damit liegt noch kein hybrides System vor, das die Farbinformation in der Tiefe des Bauelements aufnimmt und damit Farb-Aliasing frei ist und gleichzeitig die guten elektrischen Eigenschaften einer kristallinen Schaltung nutzt, um die generierte Farbinformation zu verarbeiten.

3.5 Farbmétrische Charakterisierung

Ziel der farbmétrischen Charakterisierung ist der quantitative Vergleich der spektralen Empfindlichkeit unterschiedlicher Sensorsysteme. Hierzu wird in dieser Arbeit der Normfarb-
abstand im CIELab-Farbraum verwendet.

Ausgangspunkt für die farbmétrische Charakterisierung ist die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Diese liegt in Form der Grundspektralwertkurven²⁸ vor. Dargestellt wurden diese in Abb. 3.1. Durch eine lineare Transformation lassen sich diese in die Normspektralwerte $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ überführen (Abb. 3.11). Der $\bar{y}$ -Verlauf entspricht hierbei der Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Unter Berücksichtigung der genutzten Lichtquelle in Form einer spektralen Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ die mit dem Remissionsgrad $r(\lambda)$ des zu untersuchenden Objektes multipliziert wird, ergibt sich der Farbreiz:

$$\phi(\lambda) = S(\lambda) \cdot r(\lambda) \quad \text{Gl. 3.1}$$

Dieser lässt sich nach Multiplikation mit den Normspektralwertkurven und anschließender Integration über die Wellenlänge in den Normfarbwert überführen. Je nach Farbreiz ergeben sich so die entsprechenden Normfarbwerte X, Y und Z.

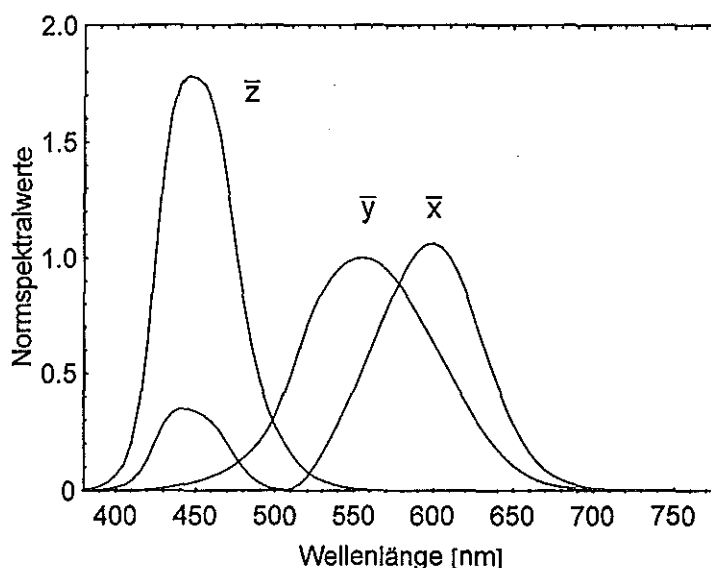


Abb. 3.11: Normspektralwertkurven nach Stiles und Butch [Stiles59] in Übereinstimmung mit der DIN5033.

²⁸ Die Grundspektralwertkurven beschreiben die spektrale Empfindlichkeit der drei menschlichen Zapfenarten.

$$X = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 3.2a}$$

$$Y = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 3.2b}$$

$$Z = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 3.2c}$$

Hierbei wird über den vollständigen sichtbaren Spektralbereich von 380nm bis 780nm integriert. Der Faktor k vor dem Integrationszeichen wird so definiert, daß sich für eine festgelegte spektrale Strahlungsverteilung unter Verwendung einer mattweißen Fläche für Y ein Wert von 100 ergibt. Entsprechend gilt:

$$k = \frac{100}{\int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 3.3}$$

Für sämtliche Farbreize, die bei der Charakterisierung berücksichtigt werden, liegen so jeweils ein Normfarbwertvektor $\mathbf{X}(X, Y, Z)$ vor. Dieser wird im weiteren als Farbwert der Referenz bezeichnet. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Sensoren dienen 64 Testfarben (Munsell) aus dem „Book of Colors“ von Munsell oder 1269 Farben (MunsLarge) [Parkkinen89] als Testgrundlage. Für die spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren erfolgt ebenfalls die Bestimmung der Farbsignale. Hierzu wird jeder Kanal j des Sensors mit dem Farbreiz multipliziert und anschließend integriert, so daß sich die Farbsignale v_j einstellen.

$$v_j = \int_{380nm}^{780nm} \phi(\lambda) \cdot \omega_j(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 3.4}$$

Hierbei ist $\omega_j(\lambda)$ die spektrale Empfindlichkeit des Kanals j des Sensors. Je nach Anzahl der Sensorkanäle kann der Vektor $\mathbf{V}$ des Farbsignals 3, 4 oder auch 6 Elemente enthalten. Im weiteren werden die Farbsignale v_j als Farbsignale des Detektors bezeichnet. Bevor die Farbsignale des Detektors und der Referenz in den CIELab-Farbraum transformiert werden können, müssen die Sensorsignale noch in den XYZ-Farbraum überführt werden. Hierfür muß eine Transformationsmatrix $\mathbf{A}$ bestimmt werden. Diese läßt sich mit Hilfe eines Least-Square-Fit-Algorithmus bestimmen. Die Gl. 3.5 läßt sich hierfür verwenden.

$$\mathbf{A} = (\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^T)^{-1} \cdot (\mathbf{V} \cdot \mathbf{X}) \quad \text{Gl. 3.5}$$

Dieser Algorithmus bestimmt unter Berücksichtigung von n Farbreizen für n Gleichungssysteme eine Näherungslösung für die Transformationsmatrix $\mathbf{A}$. Hierbei entspricht $\mathbf{X}$ dem Farbwertvektor der Referenz. Zur Unterscheidung zwischen Referenz und Detektor werden im weiteren die Farbwerte mit einem Index R (Referenz) oder D (Detektor) versehen. Unter Berücksichtigung der Transformationsmatrix $\mathbf{A}$ lassen sich so für einen 6-Kanal-Sensor nach Gl. 3.6 die Farbwerte für den Detektor bestimmen.

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1,6} \\ \cdot & & & & & \cdot \\ a_{3,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{3,6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_6 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3.6}$$

Diese Farbwerte werden wie auch die Farbwerte der Referenz in den CIELab-Farbraum überführt. Beim CIELab-Farbraum handelt es sich um einen Farbraum, der die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges als äquidistanten Abstand berücksichtigt. Die Transformation erfolgt nach der folgenden Vorschrift:

$$L^* = 116 \cdot Y^* - 16 \quad \text{Gl. 3.7a}$$

$$a^* = 500 \cdot (X^* - Y^*) \quad \text{Gl. 3.7b}$$

$$b^* = 500 \cdot (Y^* - Z^*) \quad \text{Gl. 3.7c}$$

Hierbei ist:

$$X^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{X}{X_W}} & \text{für } \frac{X}{X_W} > 0.008856 \\ 7.787 \cdot \frac{X}{X_W} + 0.138 & \text{für } \frac{X}{X_W} \leq 0.008856 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.7d}$$

$$Y^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_W}} & \text{für } \frac{Y}{Y_W} > 0.008856 \\ 7.787 \cdot \frac{Y}{Y_W} + 0.138 & \text{für } \frac{Y}{Y_W} \leq 0.008856 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.7e}$$

$$Z^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_W}} & \text{für } \frac{Z}{Z_W} > 0.008856 \\ 7.787 \cdot \frac{Z}{Z_W} + 0.138 & \text{für } \frac{Z}{Z_W} \leq 0.008856 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.7f}$$

Bei dieser Transformation sind X_W , Y_W , Z_W die Normfarbwerte der verwendeten Lichtart mit der Normierung $Y_W=100$. Da der CIELab-Farbraum fast äquidistante Farbabstände besitzt lassen sich so unterschiedliche Detektoren mit unterschiedlicher Spektralcharakteristika quantitativ vergleichen. Eingesetzt wird diese Transformation in allen Bereichen, wo es auf industrielle Anwendungen ankommt. Anschließend läßt sich im CIELab-Farbraum der Normfarbabstand ermitteln. Dieser setzt sich aus dem geometrischen Abstand der Spektralwerte des Detektors und der Referenz zusammen:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_R^* - L_D^*)^2 + (a_R^* - a_D^*)^2 + (b_R^* - b_D^*)^2} \quad \text{Gl. 3.8}$$

Nach der Mittelung

$$\overline{\Delta E_{ab}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_{ab}^i \quad \text{Gl. 3.9}$$

über alle untersuchten Proben n ergibt sich so ein mittlerer Normfarbabstand. Dies erlaubt einen Vergleich unterschiedlicher Detektorsysteme als auch die Bestimmung auftretender Metameriefehler. Eine ausführliche Beschreibung der farbmtrischen Charakterisierung findet sich bei Herzog [Herzog99].

Kapitel 4

Der Dreifarbensensor

Amorphes Silizium und dessen Legierungen ist ein vielversprechendes Material für die Anwendung in der Sensorik und Optoelektronik. So besitzt das Material einen stark wellenlängenabhängige Absorption, welche im Bereich des sichtbaren Lichts (550nm) um den Faktor 20 höheren ist als für kristallinem Silizium. Steuern läßt sich die Absorption durch die Wahl der Prozeßparameter während der Herstellung. So nimmt durch Zugabe von Kohlenstoff zum amorphen Silizium der Bandabstand zu, wohingegen der Bandabstand durch Beigabe von Germanium abnimmt. Durch eine zusätzliche Variation der Schichtdicken innerhalb des Schichtpakets läßt sich so die spektrale Empfindlichkeit anwendungsspezifisch vom nahen ultravioletten bis zum nahen infraroten Bereich des Spektrums einstellen. Gerade im Hinblick auf anwendungsorientierte Problemlösungen ist dies von wesentlichem Interesse.

Ziel der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und realisierten Sensoren ist die Detektion der Farbinformation in der Tiefe des Bauelements. So dringt Licht mit der Wellenlänge von 450nm 50nm tief in das Material ein. Für Licht mit der Wellenlänge von 550nm (600nm) liegt die Eindringtiefe²⁹ bei 200nm (600nm). Gelingt es nun, die photogenerierten Ladungsträger in Abhängigkeit der Tiefe einzusammeln, so lassen sich auf dieser Basis Farbsensoren realisieren. Mit einem solchen Sensor steht ein Bauelement zur Verfügung, das eine Farb-Aliasing oder Farbmoiré freie Bildaufnahme ermöglicht.

In diesem Kapitel wird ein Zweipol-Bauelement bestehend aus einer nipiin-Anordnung vorgestellt. Ein solches Bauelement erlaubt die Generation von drei linear unabhängigen Verläufen der spektralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Zur Vereinfachung der Nomenklatur wird im weiteren die nip-Diode der antiseriell verschalteten nipiin-Struktur als Top- und die piin-Struktur als Bottom-Diode bezeichnet. Hierbei fällt das Licht durch die Top-Diode in das Bauelement ein. Das Design des Bauelement ist so konzipiert, daß blaues Licht hauptsächlich in der Top-Diode absorbiert wird, wohingegen grünes und rotes Licht vorrangig in der Bottom-Diode absorbiert wird. Da mit Hilfe eines Zweipol-Bauelements drei linear unabhängige Verläufe der spektralen Empfindlichkeit generiert werden sollen, ist neben der Anpassung des optischen Verlaufs eine gezielte Steuerung der Sammeleffizienz in den einzelnen Bereichen des Bauelements notwendig. Dies gilt insbesondere für die Bottom-Diode des Bauelements, da dort sowohl grünes als auch rotes Licht absorbiert wird. Zur Trennung von rot und grün lassen sich die

²⁹ Als Eindringtiefe (d) wird diejenige Schichtdicke bezeichnet, bis zu der die Generation in der Schicht auf $1/e$ absinkt. Dadurch ergibt sich die Eindringtiefe zu $d = 1/\alpha$. Hierbei ist α der Absorptionskoeffizient der Schicht.

unterschiedlichen Transporteigenschaften der unterschiedlichen Materialien nutzen. So ändert sich durch Zulegieren von German oder Methan nicht nur der Bandabstand sondern auch die Transporteigenschaften des Materials. Die Transporteigenschaften des Materials lassen sich beschreiben durch die Summe des $\mu\tau$ -Produkts für Löcher und Elektronen. Beim $\mu\tau$ -Produkt handelt es sich um das Produkt aus Lebensdauer und Beweglichkeit der Minoritäts- und der Majoritätsladungsträger. Das $\mu\tau$ -Produkt der Minoritätsladungsträger ist wiederum proportional zur ambipolaren Diffusionslänge. Die Abb. 4.1 zeigt, daß sich die ambipolare Diffusionslänge ausgehend vom amorphen Silizium mit einem optischen Bandabstand von ca. 1.74eV sowohl mit zunehmendem als auch mit abnehmendem Bandabstand verringert. Ermittelt wurde die ambipolare Diffusionslänge mit Hilfe von SSPG-(Steady-State-Photo-Grating)-Messungen. Verursacht wird die Abnahme der Diffusionslänge durch eine Zunahme der Defektdichte im Material sowohl für eine zunehmende als auch für eine abnehmende Bandlücke. Verbessern lassen sich die Materialeigenschaften und damit das Produkt aus Beweglichkeit und Lebensdauer der Minoritätsladungsträger durch die Verdünnung des Depositionsgasgemisches aus Silan und Methan oder Silan und German mit Wasserstoff. Als Folge steigt das $\mu\tau$ -Produkt fast unabhängig vom optischen Bandabstand um eine Größenordnung an, ebenso wie die ambipolare Diffusionslänge ansteigt. Wesentlich für das Verständnis eines nipiin-Sensors ist nicht nur die Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der einzelnen Schichten sondern auch die Berücksichtigung ihrer Transporteigenschaften. Erst die Kombination aus angepaßten optischen und elektrischen Eigenschaften erlaubt die spannungsabhängige Farbtrennung. In Abb. 2.2 ist der schematische Bandverlauf einer nipiin-Struktur dargestellt.

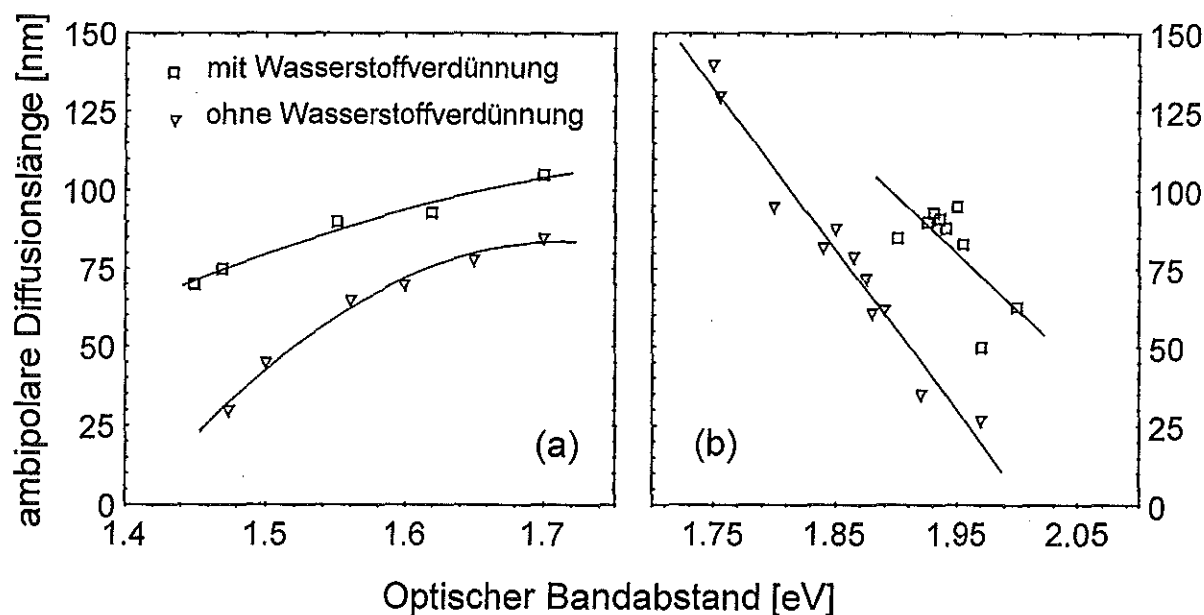


Abb. 4.1: Ambipolare Diffusionslänge für amorphes Siliziumgermanium (a) und amorphen Siliziumkohlenstoff (b) mit und ohne Wasserstoffverdünnung als Funktion der optischen Bandlücke bestimmt mittels SSPG-(Steady-State-Photo-Grating)-Messungen [Luft93].

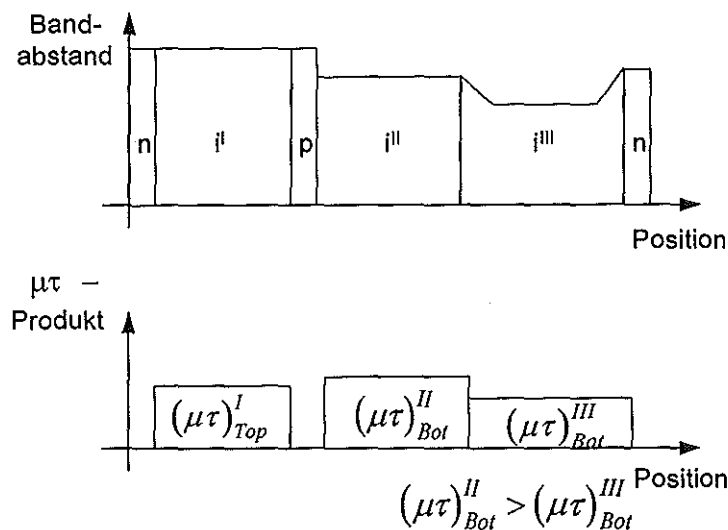


Abb. 4.2: Schematischer Bandverlauf und Produkt aus Beweglichkeit und Lebensdauer eines nipiin-Sensors als Funktion des Ortes.

Bevor das Funktionsprinzip eines nipiin-Farbsensors in Kapitel 4.2 erläutert wird, soll im weiteren die experimentelle Realisierung der Struktur (Kapitel 4.1) dargestellt werden. Anschließend wird auf wesentliche Kenngrößen eines amorphen Dünnschicht-Farbsensors eingegangen. Neben der Farbtrennung, anhand der das Funktionsprinzip des Sensors erläutert wird, soll die Linearität der spektralen Verläufe diskutiert werden (Kapitel 4.3). Die Linearität stellt neben der Farbtrennung ein weiteres wesentliches Kriterium dar, welches über die Einsatzmöglichkeiten der Sensoren entscheidet. Weiterhin wird auf das Temperaturverhalten (Kapitel 4.4), die Dynamik (Kapitel 4.5) und die Degradationseigenschaften (Kapitel 4.7) eingegangen. Zuvor wird aber noch in Kapitel 4.6 auf den Staebler-Wronski-Effekt eingegangen. Anschließend wird das transiente Verhalten des Bauelements untersucht (Kapitel 4.8). Aufgrund des Detektionskonzepts dieses Zweipol-Sensors läßt sich die transiente Charakterisierung in zwei Bereiche unterteilen. Da die Farbinformation durch den dreimaligen Wechsel der angelegten Spannung generiert wird, soll die transiente Photostromantwort des Sensors nach Wechsel der angelegten Spannung in Kapitel 4.8.1 untersucht werden. In einem zweiten Teil (Kapitel 4.8.2) wird dann das Verhalten des Sensors auf die Anregung mit einem optischen Lichtpuls untersucht.

Die weitere Darstellung wird zeigen, daß die Kenngrößen von amorphen Zweipol-Sensoren, wie Farbtrennung, lineare Unabhängigkeit, Dynamik oder auch das transiente Verhalten von amorphen Zweipol-Sensoren eng miteinander verbunden sind. Dies steht im Gegensatz zu Sensoren, die beispielsweise mittels optischer Filter das sichtbare Licht in die spektralen Komponenten zerlegen. So können die Detektoren und die optischen Filtern separat optimiert werden. Dies ist für die hier vorzustellende Struktur nicht möglich. Eine Änderung der spektralen Empfindlichkeit hat immer auch Auswirkungen auf die Linearität, die Dynamik und das Degradationsverhalten der Struktur.

4.1 Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign

Als Trägermaterial für die Herstellung der amorphen Schichtsysteme kommen kristalline Siliziumwafer, Glas aber auch Metall, Quarz und PVC-Folien in Betracht. Somit kann ein solcher Detektor auf unterschiedlichen Substraten aufgebracht werden. Die im Rahmen dieser Arbeit realisierten Sensoren sind alle auf Glassubstraten ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) hergestellt worden. Die Substrate sind bereits durch den Hersteller mit einem leitfähigen transparenten Oxid (TCO) beschichtet und bilden so den transparenten Frontkontakt. Bei dem verwendeten TCO handelt es sich um Zinkoxid (ZnO) der Dicke 90nm. Das Glassubstrat wird nach einer Reinigung in die Depositionsanlage eingebracht und auf die Depositionstemperatur, in diesem Fall 210°C , aufgeheizt. Anschließend wird das Schichtsystem abgeschieden. Die Schichtstrukturen, die im Rahmen dieser Arbeit hergestellt und untersucht wurden, sind alle in einer 6-Kammer PECVD-Anlage (Plasma-Enhanced-Chemical-Vapor-Deposition) deponiert worden. Auf den Aufbau dieser Anlage soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Dies ist bereits an anderer Stelle ausführlich geschehen [Hapke95, Lundszen96]. Die Depositionstemperatur von 210°C wird während der Herstellung sämtlicher Schichten der hier vorzustellenden nipiin-Struktur beibehalten. Der Depositionsdruck variiert je nach präparierter Schicht zwischen 300 und 2000mTorr³⁰. Begonnen wird die Abscheidung mit der Deposition einer 10nm dicken n-Schicht. Hierzu wird dem Depositionsgas Silan (SiH_4) Phosphin (PH_3) beigegeben. Anschließend wird in einer anderen Depositionskammer eine amorphe Siliziumkohlenstoff-Schicht (a-Si(C):H) mit einer Schichtdicke von 120nm präpariert. Hierzu wird dem Silan sowohl Methan (CH_4) als auch Wasserstoff beigegeben. Das Verhältnis von Silan und Methan zu Wasserstoff $[(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4)/\text{H}_2]$ beträgt 1/25. Die Beigabe von Wasserstoff hat zur Folge, daß die Materialqualität ansteigt. Dies äußert sich in einem Anstieg der ambipolaren Diffusionslänge (Abb. 4.1) und damit dem $\mu\tau$ -Produkt [Luft93]. Die Depositionsrate nimmt jedoch mit zunehmendem Wasserstoffanteil am Depositionsgasgemisch ab. Dies gilt nicht nur für die Siliziumkohlenstoff-Schicht sondern auch für reine amorphe Schichten oder auch Silizium-germanium- (a-Si(Ge):H) -Schichten (Abb. 4.1). Für die 120nm dicke amorphe a-Si(C):H -Schicht mit einem optischen Bandabstand von 2.0eV, welche im Anschluß an die n-Schicht aufgebracht wurde, liegt die Depositionsrate bei 2.75nm/min. Für unterschiedliche Materiallegierungen, welche bei der Herstellung des Sensors verwendet werden, existiert jeweils eine eigene Depositionskammer. Bei der hier realisierten nipiin-Struktur sind vier unterschiedliche Depositionskammern genutzt worden. Für die Herstellung der n-, der p-, der a-Si(Ge):H - und der a-Si(C):H -Schichten wird jeweils eine eigene Kammer verwendet. Nur so ist gewährleistet, daß es zu keiner Verschleppung von Legierungs- und Dotieratomen in die Absorberschichten kommt. Die Verschleppung von Dotieratomen führt nicht nur zu einer Beeinträchtigung der Bauelementeigenschaften sondern auch zu einer Kontamination der Depositionskammer. Nach der Deposition der a-Si(C):H -Schicht von 120nm wird die p-Schicht deponiert. Sowohl für die p-, als auch für die Herstellung der n-Schicht werden jeweils Standard-Rezepte verwendet. Hierbei handelt es sich um optimierte Rezepte, die auch bei der Herstellung von Solarzellen eingesetzt werden. Bei der amorphen p-Schicht handelt es sich um eine Schicht mit einem optischen Bandabstand von 1.9eV. Hierzu wurde Trimethylbor (TMB) und Methan dem Depositionsgas Silan beigegeben. Anschließend wird wieder eine a-Si(C):H -Schicht der Dicke 200nm deponiert. Der optische Bandabstand wurde aber durch eine geringere Beigabe von Methan im Vergleich zur i-Schicht (Abb. 4.2) auf 1.9eV abgesenkt. Der zweite Bereich der i-Schicht in der Bottom-Diode wird unter Zugabe

³⁰ Ein Torr entspricht 1.33mbar.

von German hergestellt. Zur Anpassung des optischen Bandabstands in der Bottom-Diode wird die Bandlücke von ca. 1.75eV auf 1.55eV reduziert. Hierzu wird auf einer Schichtdicke von 5-15nm linear der Anteil an Germanium im Festkörper erhöht, bis der gewünschte Minimalbandabstand von 1.55eV erreicht ist. Erreicht wird dies durch einen Anstieg des Germananteils am Depositionsgasgemisch. Zur Anpassung der Bandabstände der a-Si(Ge):H und der abschließend deponierten n-Schicht wird eine 15nm dicke Zwischenschicht eingefügt. Der Germananteil im Festkörper wird auf diesen 15nm wieder reduziert, so daß der Bandabstand wieder zunimmt. Abgeschlossen wird das Schichtsystem mit einem Aluminiumrückkontakt, welcher großflächig mittels Elektronenstrahlverdampfung aufgebracht wird. Vor der Charakterisierung des Schichtsystems wird sowohl der Rückkontakt als auch das amorphe Schichtsystem mittels Photolithographie und reaktivem Ionenätzen strukturiert. Die so realisierte Testpixelfläche beträgt 10mm^2 . In Abb. 4.2 ist der schematische Bandverlauf der realisierten Struktur dargestellt. Fällt nun Licht durch das Glassubstrat in den Sensor ein, so wird hauptsächlich Licht kürzerer Wellenlänge in der Top-Diode (Bereich I) absorbiert. Licht mittlerer Wellenlänge gelangt durch die Top-Diode und wird in der ersten i-Schicht der Bottom-Diode (Bereich II) absorbiert. Der Rotanteil des Lichts wird schließlich im hinteren Bereich (Bereich III) des Bauelementes absorbiert. Wie bereits im Zusammenhang mit Abb. 4.1 angedeutet, kommt den Transporteigenschaften der Bottom-Diode eine zentrale Funktion zu, da hier zwei Verläufe der spektralen Empfindlichkeit getrennt werden sollen. Das Design der Top-Diode wird hauptsächlich durch die optischen Eigenschaften der Absorberschicht bestimmt. Wesentlich für die Farbtrennung zwischen grün und rot sind allerdings die Transporteigenschaften der i-Schichten in der Bottom-Diode. So besitzt das Material in Bereich II (Abb. 4.2) bessere Transporteigenschaften als das Material in Bereich III. Wesentlich für die Farbtrennung in der Bottom-Diode ist ein reduziertes Produkt aus Beweglichkeit und Lebensdauer im hinteren Teil (Bereich III) der Bottom-Diode.

4.2 Spektrale Empfindlichkeit

Legt man eine positive Spannung an die nipiin-Struktur an, so befindet sich die Top-Diode in Sperrichtung, wohingegen die Bottom-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird. Aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke in der in Sperrbetrieb befindlichen Top-Diode werden die dort vornehmlich von blauem Licht generierten Ladungsträger getrennt. Die Elektronen gelangen zur vorderen n-Schicht, wohingegen die Löcher aufgrund des elektrischen Feldes zur mittleren p-Schicht driften. Die Löcher werden dann in die Bottom-Diode injiziert, wo sie mit Elektronen rekombinieren, die vom Rückkontakt der Bottom-Diode aus injiziert werden.

Wechselt nun die angelegte Spannung von positiven zu negativen Werten, so werden die Ladungsträger aus der Bottom-Diode extrahiert. Somit wird der Photostrom des Bauelements durch die im Sperrbetrieb befindliche Bottom-Diode bestimmt. Die Top-Diode wird in Durchlaßrichtung betrieben. Auf dieser Grundlage läßt sich ein Zweifarbensensor herstellen, wobei je nach gewähltem Bauelementdesign die Maxima der spektralen Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge verschoben werden können. Zur Trennung zweier spektraler Verläufe innerhalb einer Diode bedient man sich der spannungsabhängigen Sammlung innerhalb der Bottom-Diode.

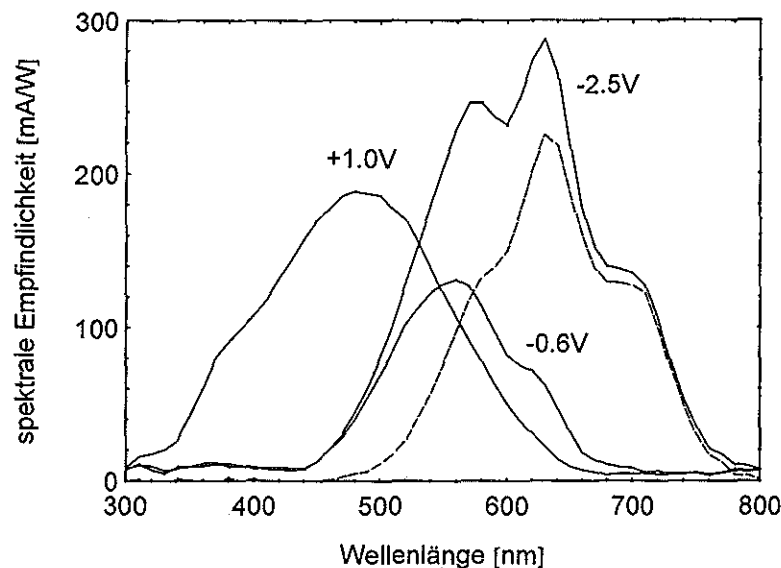


Abb. 4.3: Spektrale Empfindlichkeit eines nipin-Sensors für die Spannungen $+1.0V$, $-0.6V$ und $-2.5V$. Die gestrichelte Linie entspricht der Differenz aus der spektralen Empfindlichkeit für $-2.5V$ und $-0.6V$.

Legt man eine geringe negative Spannung an das Bauelement an, so werden aufgrund des größeren Produkts aus Lebensdauer und Beweglichkeit der Ladungsträger im Bereich II der Bottom-Diode (Abb. 4.2) die Ladungsträger extrahiert, wohingegen die Ladungsträger im Bereich III rekombinieren. Erst im Falle höherer negativer Spannungen werden auch die Ladungsträger aus dem Bereich III eingesammelt. So wird der Photostrom für höhere negative Spannungen von der Generation von Ladungsträgern aus den Bereichen II und III bestimmt. In Abb. 4.3 ist die spektrale Empfindlichkeit der in Abb. 4.2 schematisch dargestellten Struktur gezeigt. Für eine positive Spannung von $+1.0V$ ergibt sich ein Maximum der spektralen Empfindlichkeit der Top-Diode bei 480nm . Für eine negative Spannung von $-0.6V$ liegt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit bei 560nm . Erhöht man die negative Spannung auf $-2.5V$, so schiebt das Maximum der Empfindlichkeit nach 630nm . Hierbei ist zu berücksichtigen, daß im Fall hoher negativer Spannung die Ladungsträger aus dem Bereich II und III eingesammelt werden. Die spektrale Empfindlichkeit wird damit also vom grünen und roten Anteil des Lichts bestimmt und nicht nur vom roten Licht. Zur Bestimmung der Rotempfindlichkeit wird die spektrale Empfindlichkeit für kleinere negative Spannungen von der spektralen Empfindlichkeit für höhere negative Spannungen subtrahiert. Als gestrichelte Linie ist in Abb. 4.3 die Differenz der spektralen Empfindlichkeit zwischen $-2.5V$ und $-0.6V$ zusätzlich eingezeichnet. Voraussetzung für die Subtraktion der spektralen Empfindlichkeiten ist die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe. Dies wird im Folgenden untersucht. Zuvor wird aber darauf eingegangen, was unter linearer Unabhängigkeit verstanden wird.

4.3 Lineare Unabhängigkeit

Wie in der Einleitung zu dieser Arbeit dargestellt, kommt der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe eine zentrale Bedeutung zu. Ohne die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe ist eine Entfaltung des gemessenen Sensorsignals für die drei Spannungen in die drei Kanäle R, G und B nicht möglich. Ein RGB-Signal wird allgemein als linear unabhängig bezeichnet, wenn die lineare Kombination der drei Kanäle des Sensors sich nicht zu Null ergänzt.

$$\lambda_1 \cdot R + \lambda_2 \cdot G + \lambda_3 \cdot B \neq 0,$$

Gl. 4.1

wobei die Konstanten λ_1 bis λ_3 ungleich Null sein müssen. Für die Entfaltung der drei spektralen Empfindlichkeiten einer nipiin-Struktur gilt unter Berücksichtigung des Detektionskonzeptes die folgende Beziehung:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DSR(V_R) - DSR(V_G) \\ DSR(V_G) \\ DSR(V_B) \end{bmatrix}$$

Gl. 4.2

Hierbei sind V_B , V_G und V_R die Spannungen zur Generation der spektralen Empfindlichkeiten (DSR) für blau, grün und rot. So ergibt sich die Rotempfindlichkeit des Sensors aus der Differenz der spektralen Empfindlichkeit für die Spannungen V_G und V_R zu $(DSR(V_R) - DSR(V_G))$. Gilt lineare Unabhängigkeit, muß die Rotempfindlichkeit des Sensors unabhängig sein von der Blau- und Grünempfindlichkeit. Überprüfen läßt sich dies durch die Bestrahlung der Probe mit zwei Lichtquellen.

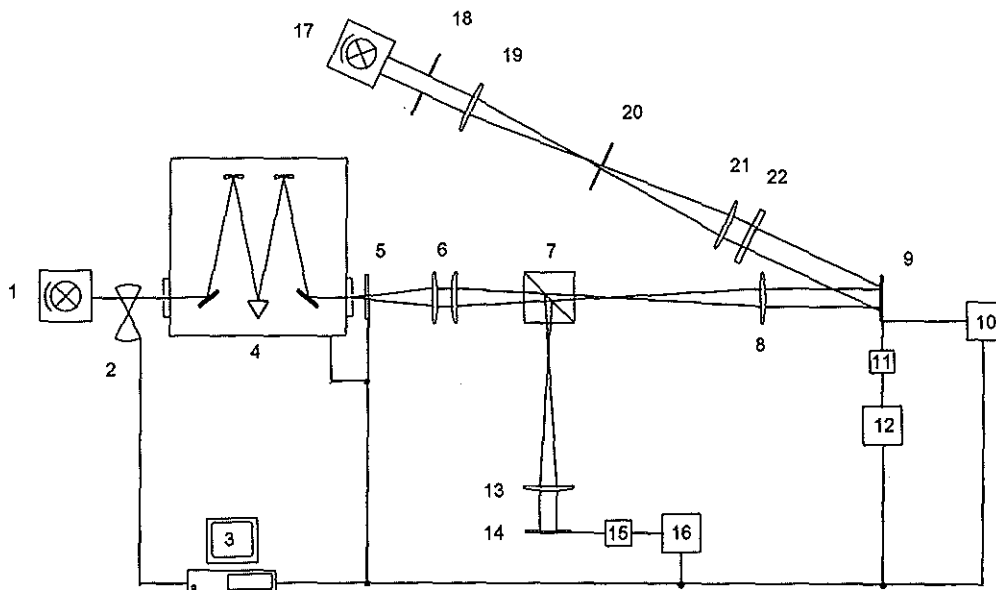


Abb. 4.4: Schematischer Aufbau eines Meßplatzes zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit mit und ohne Biaslicht. (1) Xenon-Lampe, (2) Chopperrad, (3) Meßrechner, (4) Monochromator, (5) Kantenfilterrad, (6) Linsensystem, (7) Strahlteiler, (8, 13) Achromat, (9) Meßobjekt, (10) Spannungsquelle, (11, 15) Vorverstärker, (12, 16) Lock-in-Verstärker, (14) Referenzzelle, (17) Weißlichtquelle, (18-21) Strahlengang, (22) Interferenzfilter.

Hierzu ist der Sensor neben dem Meßsignal zusätzlich mit einem konstanten monochromatischen Biaslicht beleuchtet worden. Die Intensität des Biaslichts beträgt $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und ist damit mehr als eine Größenordnung höher als die Intensität des Meßsignals ($10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Als Wellenlängen des monochromatischen Biaslichts wurde 450nm und 650nm gewählt. Trennen läßt sich das Meßlicht vom Biaslicht durch Verwendung von Lock-in Technik. So setzt sich der photogenerierte Strom aus einem Wechsel- und einem Gleichanteil zusammen. Zur Verdeutlichung des Meßaufbaus ist dieser in Abb. 4.4 dargestellt. Während der Messung wird das vom Monochromator (4) erzeugte Meßlicht mit Hilfe eines Choppers (2) in eine Folge von Lichtpulsen zerlegt. Die periodische Lichtfolge erzeugt im Bauelement einen periodischen Photostrom, der nach einer Vorverstärkung (11) von einem Lock-in-Verstärker (12) ein weiteres Mal verstärkt wird. Der konstante durch die Biaslichtquelle (17) erzeugte Photostrom ist von dieser Verstärkung im Lock-in-Verstärker (12) ausgenommen. Hierbei entspricht der Gleichanteil (G_{DC}) dem Biaslicht und der Wechselanteil dem Meßsignal (G_{AC}).

$$I_{Photo}(G_{DC} + G_{AC}) = I_{Photo}(G_{DC}) + I_{Photo}(G_{AC})$$

Gl. 4.3

Im Weiteren wird nun untersucht, ob und inwieweit die in Gl. 4.3 beschriebene Linearität für das realisierte Bauelement gilt. Für die drei Spannungen +1.0V, -0.6V, und -2.5V ist nahezu keine Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit vom Biaslicht zu beobachten (Abb. 4.5). Lediglich für eine Zwischenspannung von -1.5V, für die die spektrale Empfindlichkeit ebenfalls dargestellt ist, wurde eine Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit gemessen. Hierbei nimmt sowohl für blaues als auch für rotes Biaslicht die spektrale Empfindlichkeit ab. Im Fall der mittleren negativen Spannungen werden die photogenerierten Ladungsträger aus dem Bereich II und Teile aus Bereich III der Bottom-Diode extrahiert. Die zusätzlich generierten Ladungsträger sorgen für eine Umladung von Defektzuständen, so daß sich die elektrische Feldverteilung im Bauelement ändert.

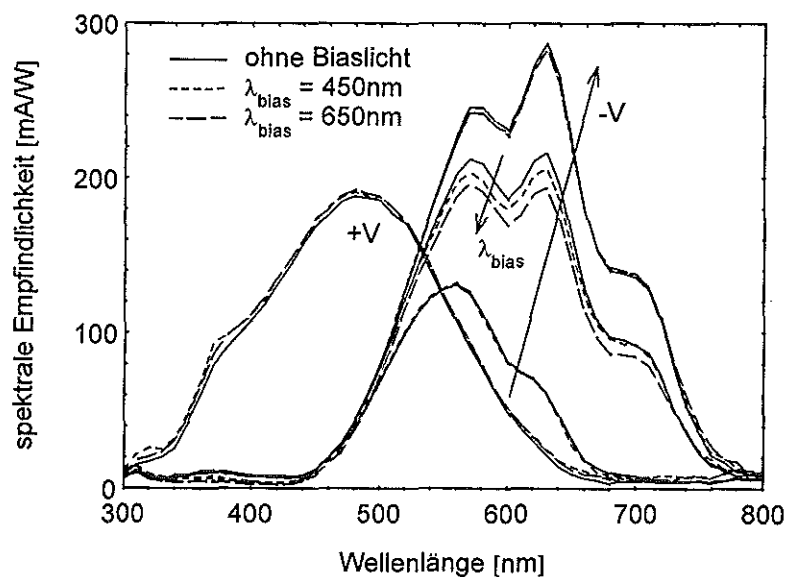


Abb. 4.5: Spektrale Empfindlichkeit eines nipiin-Sensors für die Spannungen +1.0V, -0.6V und -2.5V mit und ohne Biaslicht der Wellenlänge 450nm und 650nm. Die Photonenflußdichte des Meßsignals beträgt $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und die des Biaslichts $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

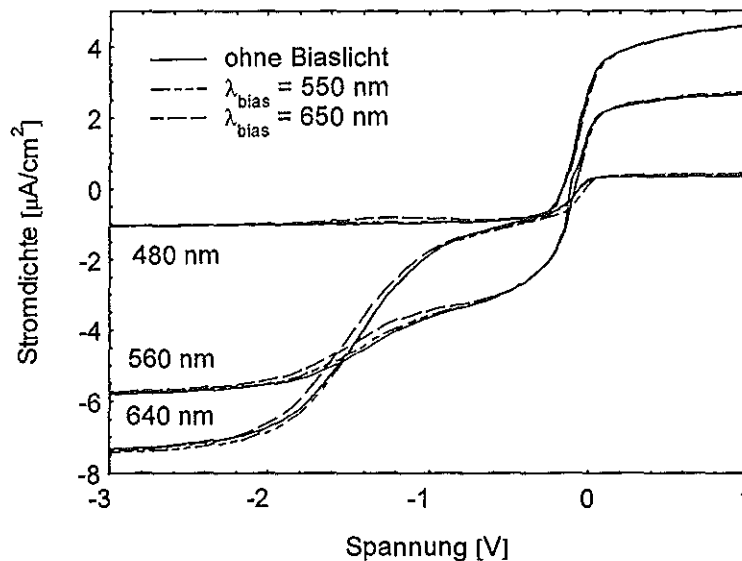


Abb. 4.6: Monochromatische I/U-Kennlinien eines nipiin-Sensors für die Wellenlängen 480nm, 560nm und 640nm als Funktion der angelegten Spannung mit und ohne zusätzliches Biaslicht. Die Intensität des Meßsignals beträgt $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen und die des Biaslichts $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

Dies führt dann zu einer geänderten Extraktion. Im Fall der drei Spannungen +1.0V, -0.6V und -2.5V tritt dies nicht auf, da die Extraktion in diesem Fall von der extern angelegten Spannung bestimmt und weniger durch die zusätzlich umgeladenen Defekte beeinflusst wird.

Der Einfluß der zusätzlichen Generation auf die Extraktion ist in Abb. 4.6 intensiver untersucht worden. Hierzu sind monochromatische I/U-Kennlinien für Meßlicht der Wellenlänge von 480nm, 560nm und 640nm aufgenommen worden. Bei der verwendeten Meßanordnung handelt es sich um den Meßaufbau, der auch zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit in Abb. 4.5 eingesetzt wurde. In Abb. 4.6 wird nicht die Wellenlänge für eine feste Spannung variiert, sondern die Spannung für eine feste Wellenlänge. Bei den gewählten Wellenlängen des Meßsignals handelt es sich um korrespondierende Wellenlängen zu den Maxima der spektralen Empfindlichkeiten. Auch in diesem Fall lag die Intensität des Meßsignals bei $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen und die des Biaslichts bei $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Anhand von Abb. 4.6 wird deutlich, daß im Bereich des Übergangs der Empfindlichkeit von grün zu rot das Bauelement sensitiv auf zusätzliches Biaslicht reagiert.

Legt man sich also auf die gewählten Spannungen +1.0V, -0.6V und -2.5V fest, so ist die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe gewährleistet. Entsprechend ist die in Gl. 4.2 beschriebene Subtraktion der Empfindlichkeiten zulässig. Die Subtraktion der Empfindlichkeit für -0.6V und -2.5V liefert somit die Rotempfindlichkeit des Sensors. Die sich ergebenden Halbwertsbreiten (Full Width at half Maximum) liegen für die drei Kanäle bei 182nm, 127nm und 147nm. Eine dritte wesentliche Bauelementkenngröße, neben Farbtrennung und der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe ist die Linearität des Photostroms. In Abb. 4.7 ist der Photostrom eines nipiin-Detektors für die drei Wellenlängen 450nm, 550nm und 600nm aufgenommen worden. Zu den Wellenlängen sind die entsprechenden Spannungen an das Bauelement angelegt worden. So ist für die Wellenlänge von 450nm eine Spannung von 1.0V, für die Wellenlänge von 550nm eine Spannung von -0.6V und schließlich für die Wellenlänge von 650nm eine Spannung von -2.5V an das Bauelement angelegt worden.

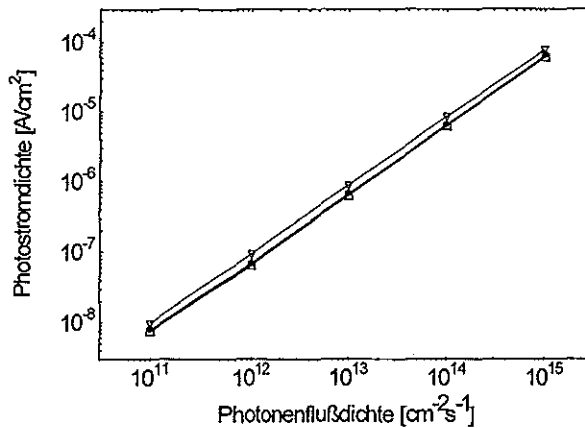


Abb. 4.7: Gemessener Photostrom als Funktion der Photonenflußdichte für die Wellenlängen 450nm (Kreise, $U=1.0V$), 550nm (Quadrate, $U=-0.6V$) und 650nm (Dreiecke, $U=-2.5V$).

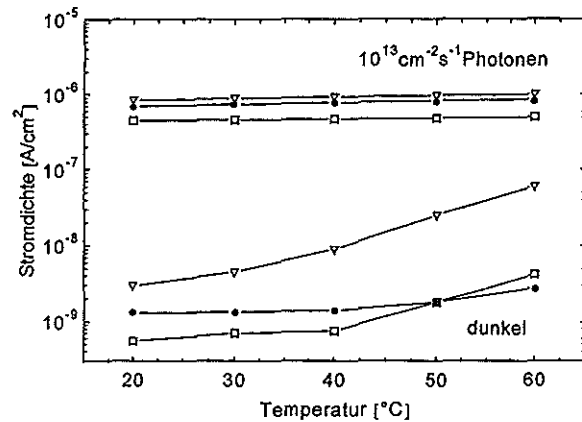


Abb. 4.8: Dunkelstrom und Photostrom für eine Beleuchtungsintensität von $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ als Funktion der Temperatur. (Kreise entsprechen der Spannung $U=1.0V$, Quadrate der Spannung $U=-0.6V$ und Dreiecke der Spannung $U=-2.5V$).

Vom gemessenen Strom wurde jeweils der Dunkelstrom abgezogen. Auf das Verhalten des Bauelements im Dunkelfall wird in Kapitel 4.5 eingegangen. Der Sensor zeigt über einen Bereich von 4 Größenordnungen eine gute Linearität. Somit ist also gewährleistet, daß das Bauelement die Detektion von drei Verläufen der spektralen Empfindlichkeit erlaubt, die linear unabhängig sind. Weiterhin ist der Photostrom über 4 Größenordnungen der Intensität linear. Vorgenommen wurden die Messungen bei einer Umgebungstemperatur von 25°C.

4.4 Temperaturabhängigkeit

In Abb. 4.8 ist der Dunkel- und der Photostrom für eine Photonenflußdichte von $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ als Funktion der Temperatur dargestellt. Hierbei wird der Dunkelstrom für die Spannung +1.0V durch Kreise gekennzeichnet, der Dunkelstrom für die Spannung -0.6V durch Quadrate und der Dunkelstrom für die Spannung -2.5V durch Dreiecke.

Für kristalline CCDs ist bekannt, daß sich der Dunkelstrom in Abhängigkeit der Temperatur alle 5°C verdoppelt [Schulte96]. Die Änderung des Dunkelstroms für den nipiin-Sensor ist geringer. So verdoppelt sich der Dunkelstrom für eine Spannung von 1.0V lediglich alle 40°C. Für die Spannung -0.6V (-2.5V) reduziert sich die Temperatur bei der sich der Dunkelstrom verdoppelt auf 13°C (8°C-10°C). Der deutlichere Anstieg des Dunkelstroms für negative Spannungen ist auf den Bereich III der Bottom-Diode zurückzuführen, da der geringere Bandabstand in diesem Bereich eine erhöhte thermische Generation zur Folge hat.

4.5 Dynamik

In Abb. 4.9 ist der Dunkelstrom eines nipiin-Sensors als Funktion der Spannung aufgetragen. Weiterhin ist in diesem Graph die Dynamik eines nipiin-Sensors eingezeichnet. Die Dynamik wird in dieser Arbeit definiert als

$$D = 20 \cdot \log \left(\frac{j_{1000 \text{ lx}}}{j_{\text{dunkel}}} \right)$$

Gl. 4.4

der Logarithmus des Quotienten des Photostroms für 1000lx zum Dunkelstrom. Vergleicht man die Definition der Dynamik aus Gl. 4.4 mit der Definition der Dynamik für CCDs, so wird diese für geringe Intensitäten durch den Dunkelstrom und für hohe Intensitäten durch die Sättigung des lichtempfindlichen Bauelements bestimmt. Für die hier untersuchten Sensoren wurde die Obergrenze der Beleuchtungsintensität bei 1000lx Weißlicht festgelegt. Hierbei handelt es sich nicht um den Sättigungsstrom. Das Bauelement ist auch noch für höhere Beleuchtungsstärken linear. Damit wird die Dynamik hauptsächlich durch den Dunkelstrom des Bauelements bestimmt. So liegt die Dynamik des realisierten Sensors im Spannungsbereich von -2.5V bis 1.0V bei >90dB. Limitiert wird die Dynamik durch den Dunkelstrom bei -2.5V. Betrachtet man den Verlauf des Dunkelstroms, so existiert ein Plateau für positive (bis 0.6V) und negative Spannungen (bis -1.75V). Bis zu dieser Spannung ist nur ein geringfügiger Anstieg des Dunkelstroms zu beobachten. Für jeweils betragsmäßig höhere Spannungen ist ein deutlicher Anstieg des Dunkelstroms zu beobachten. Dieser Anstieg sowohl für positive als auch negative Spannungen ist auf das Überfluten der mittleren p-Schicht durch Elektronen der Diode, welche in Durchlaßrichtung betrieben wird, zurückzuführen. Damit stehen in der Diode, welche in Sperrichtung betrieben wird, Rekombinationspartner zur Verfügung, so daß der Dunkelstrom ansteigt. Für Spannungen kleiner als 0.6V oder größer als -1.75V wird der Gesamtstrom durch den Dunkelstrom der Diode in Sperrbetrieb bestimmt. Hierzu finden sich detaillierte Untersuchungen und numerische Simulationen bei Stiebig [Stiebig95].

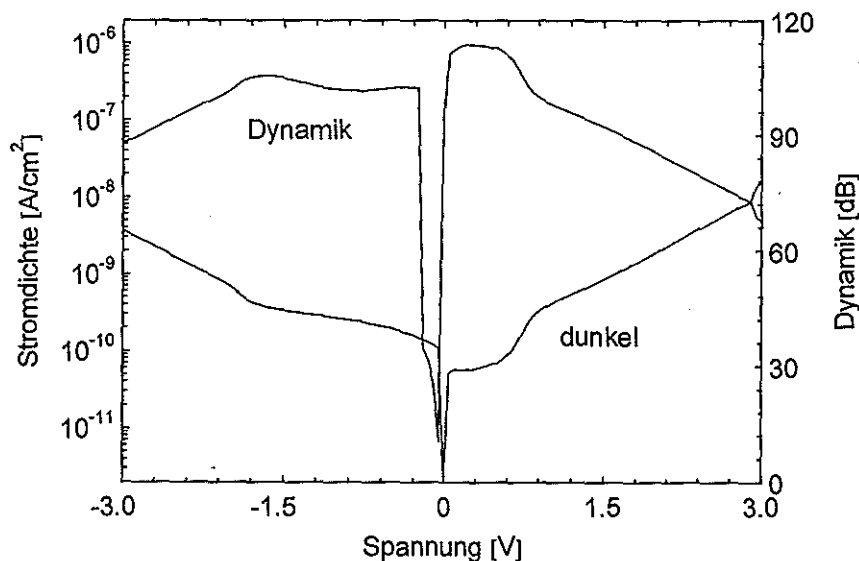


Abb. 4.9: Dynamik und Dunkelstrom eines nipi-Sensors. Die Dynamik wird nach der Beziehung in Gl. 4.4 bestimmt.

4.6 Staebler-Wronski-Effekt

Im Jahre 1977 entdeckten Staebler und Wronski [Staebler77] den Effekt der lichtinduzierten Degradation von amorphem Silizium und dessen Reversibilität. Bei ihren Untersuchungen reduzierte sich das Verhältnis der Photo- zur Dunkelleitfähigkeit³¹ von amorphen Siliziumschichten nach längerer Beleuchtung deutlich. Durch einen Temperschnitt bei ca. 150°C für 30-60min. gingen die Schichten wieder in ihren Ursprungszustand zurück. Man spricht hier auch vom „annealten“ Zustand. Dieser Effekt ist nach Staebler und Wronski (SWE) benannt.

In den vergangenen 20 Jahren hat man sich intensiv mit der Untersuchung dieses Effektes³² beschäftigt [Stutzmann85, Stutzmann87, Stutzmann91, Santos91a, Santos91b, Schumm91]. Bis heute sind diese Untersuchungen allerdings nicht abgeschlossen³³. So befassen sich die Untersuchungen mit dem Einfluß von Wasserstoff auf die Defektkonstellation [Jackson90], dem Einfluß von Verunreinigungen wie Sauerstoff, Stickstoff etc. [Redfield90] oder der Korrelation von strukturellen Eigenschaften des Materials mit der Metastabilität.

Verbessern lassen sich die Materialeigenschaften durch die Deposition von amorphen Schichten mit einer hohen bzw. sehr hohen Wasserstoffverdünnung. Die hohe Wasserstoffverdünnung führt neben einem deutlichen Rückgang der Depositionsrate zu einer reduzierten Defektdichte und zu kompakterem Material. Dieses Verhalten gilt nicht nur für reine amorphe Schichten sondern auch für Legierungen des amorphen Siliziums, wie amorphes Silizium-germanium (a-SiGe:H) [Luft93, Lundszen96] oder amorpher Siliziumkohlenstoff (a-SiC:H) [Fölsch95]. Ausgewirkt hat sich die Materialverbesserung beispielsweise in deutlich verbesserten Eigenschaften von Solarzellen. So liegt der Weltrekord für amorphe Stapelsolarzellen auf kleiner Fläche im ungealterten Zustand inzwischen bei über 15% [Yang98].

An dieser Stelle kann weder auf die historische Entwicklung des SWE, noch auf die Mechanismen, die zu diesem Effekt führen, eingegangen werden, zumal die auslösenden Mechanismen noch nicht vollständig verstanden sind. Vielmehr sollen die Auswirkungen des SWE auf die unterschiedlichen Materialkombinationen anhand der Kenngrößen der Sensorstrukturen untersucht werden.

4.7 Degradation

In Abb. 4.10 ist die spektrale Empfindlichkeit eines nipiin-Sensors als Funktion der Degradationszeit aufgetragen. Die Probe wurde mit einem AM1.5 Spektrum³⁴ gealtert. Die Alterungstemperatur betrug 50°C. Dies entspricht der Temperatur, die sich aufgrund der Beleuchtung einstellt. Die Probe wurde nicht zusätzlich temperiert.

³¹ Für gutes intrinsisches amorphes Silizium liegt das Verhältnis von Photo- zu Dunkelleitfähigkeit je nach gewählten Depositions- und Beleuchtungsbedingungen zwischen 10^5 und 10^7 .

³² Neben lichtinduzierter Alterung läßt sich auch durch das Einbringen von Überschußladungsträgern in Form beispielsweise einer Ladungsträgerinjektion, eine Alterung des Materials herbeiführen. Aber auch der Beschuß mit niederenergetischen Elektronen führt zu einer Änderung der Defektdichte im Material.

³³ Einen Überblick über die Anzahl der Publikationen auf diesem Gebiet als Funktion der Zeit findet man bei Stutzmann [Stutzmann97].

³⁴ Bei einem AM1.5 Spektrum handelt es sich um das Spektrum der Sonne, welches unter einem Winkel (Breitengrad) von 48.2° auf die Erde trifft. Die Strahlungsleistungsdichte auf der Erde beträgt in diesem Fall 100mW/cm^2 .

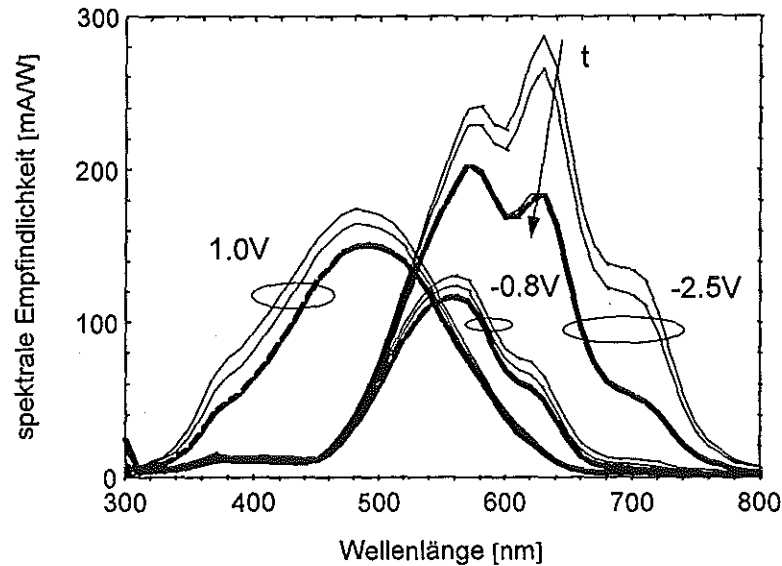


Abb. 4.10: Gemessene spektrale Empfindlichkeit eines niptin-Sensors für die Spannungen 1.0V, -0.6V und -2.5V. Die Probe wurde mit einem AM1.5 Spektrum gealtert. Die Messungen wurden durchgeführt nach 0h, 1h, 10h und 100h. Die Degradationstemperatur betrug 50°C.

Weiterhin wurde die Probe bei offenen Klemmen gealtert. Die Alterungszeiten betrugen 0h, 1h, 10h und 100h. In Abb. 4.10 ist kein Unterschied mehr zwischen einer Alterung von 10h und 100h erkennbar. Jedoch ist der Unterschied zwischen dem ungealterten Zustand und dem Zustand nach 10h ausgeprägt. Insbesondere für die Spannung von -2.5V ist ein sehr starker Einbruch der spektralen Empfindlichkeit festzustellen. Die beiden anderen spektralen Verläufe für die Spannungen 1.0V und -0.6V sind weniger stark betroffen. Obwohl auch für die Spannung von 1.0V die Empfindlichkeit der Top-Diode zu höheren Wellenlängen schiebt.

Neben der Farbtrennung, der Dynamik, dem Temperaturverhalten und der Degradation ist das transiente Verhalten des Bauelements ein weiteres wesentliches Kriterium, unter dem Sensoren charakterisiert werden. Hierzu werden im folgenden Kapitel die transienten Photoströme nach Wechsel der angelegten Spannung als auch nach Einschalten einer optischen Anregung untersucht.

4.8 Transientes Verhalten

In der Vergangenheit ist bereits intensiv das Verhalten von amorphen pin-Dioden nach Einschalten einer optischen Anregung [Wieczorek87, Wieczorek91, Brüggemann93, Brüggemann93b] oder nach Einschalten eines Spannungspulses [Silver86, Shapiro88, Shapiro89, Street92, Becker94] untersucht worden. Zum transienten Verhalten von Farbsensoren hingegen liegen nur wenige wissenschaftliche Publikationen vor [Stiebig96a, Stiebig98, Sterzel96, Stannowski99]. Entweder beschränken sich die Publikationen auf die Analyse des Photostroms nach optischer Anregung oder das Verhalten des Bauelements nach Einschalten einer Biasspannung wird näher untersucht. An dieser Stelle soll das transiente Verhalten sowohl nach Spannungs- als auch nach Lichtschalten näher untersucht werden.

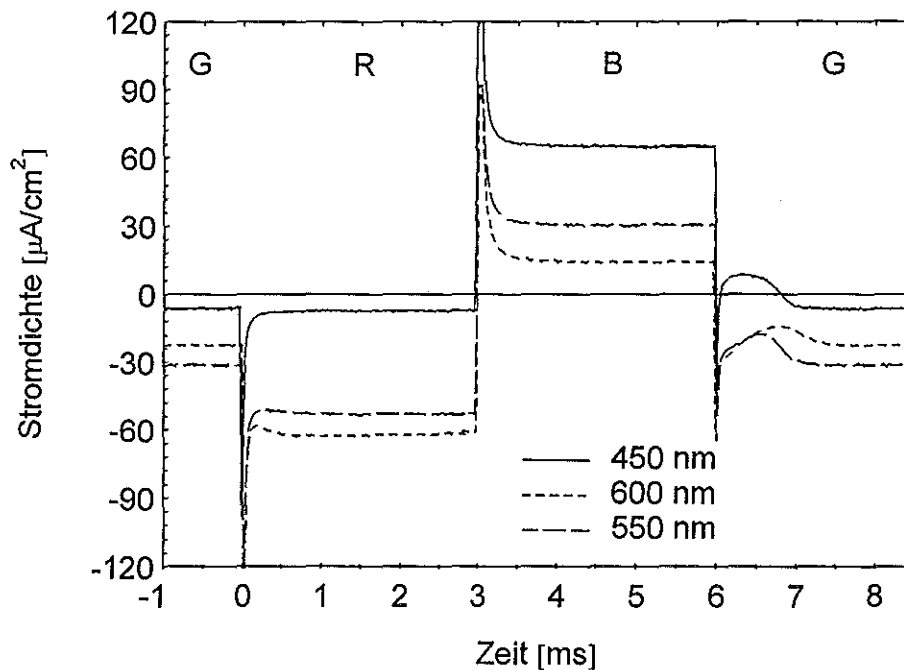


Abb. 4.11: Optimierte Spannungsschaltfolge eines nipiin-Sensors für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 600nm. Die Beleuchtungsintensität beträgt $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

Hierzu wird in Kapitel 4.8.1 das transiente Verhalten nach Wechsel der angelegten Spannung beschrieben. Nachfolgend wird dann in Kapitel 4.8.2 auf den transienten Photostrom nach optischer Anregung mit einem Lichtpuls eingegangen. Zum weiteren Verständnis der experimentellen Ergebnisse wird das Verhalten auch mit Hilfe eines SPICE³⁵-Modells und auch einer numerischen Simulation untersucht.

4.8.1 Spannungsschalten

Aufgrund des zeitlich sequentiellen Auslesevorgangs einer nipiin-Struktur kommt dem transienten Verhalten nach Wechsel der angelegten Spannung eine zentrale Bedeutung zu. Hierzu ist in Abb. 4.11 eine optimierte Spannungsschaltfolge für einen vollständigen Auslesezyklus zur Generation eines RGB-Signals dargestellt. Bei der dargestellten Schaltfolge, die für eine Beleuchtungsintensität von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen aufgenommen wurde, ist die angelegte Spannung alle 3ms zyklisch von -0.6V nach -2.5V und nach 1.0V gewechselt worden. Dargestellt ist der Photostrom für die drei Wellenlängen 450nm, 550nm und 600nm. Analysiert man die möglichen Übergänge, die sich aufgrund der drei Spannungen ergeben, so lassen sich die ermittelten 6 Spannungstransienten in drei Fälle unterteilen. Fall I ist gekennzeichnet von einem sehr schnellen Übergang des Photostroms nach Wechsel der angelegten Spannung in den stationären Wert. Exemplarisch ist ein solcher Fall beim Wechsel von grün nach rot in Abb. 4.11 zu beobachten. Für Fall II ist ebenfalls wie für Fall I nach Durchlaufen einer Stromspitze ein exponentieller Rückgang des Photostroms zu beobachten. Jedoch liegt die Abklingzeit in diesem Fall um den Faktor 3-5 höher als in Fall I. Diese Photostromantwort ist in Abb. 4.11 beim Übergang von rot nach blau zu beobachten. In einem dritten Fall kommt es zur Ausbildung eines Plateaus, von dem aus der Photostrom nach einer Verweildauer in den stationären Wert übergeht. Dieser Übergang ist von allen drei Übergängen der Langsamste. Abb. 4.11 zeigt einen solchen Übergang im Fall des Wechsels der

³⁵ SPICE steht für Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis.

Empfindlichkeit von blau nach grün. Insbesondere für die Beleuchtung mit einer Wellenlänge von 450nm fällt auf, daß in diesem Fall eine Umkehr des Photostroms zu beobachten ist. Unterteilt man die 6 möglichen Übergänge in die drei beschriebenen Fälle, so ist Fall I lediglich beim Übergang von grün nach rot zu beobachten. Fall II ist jeweils beim Wechsel der Extraktion von der Bottom-Diode zur Top-Diode zu beobachten, also beim Wechsel von der Grün- oder Rot- zur Blauempfindlichkeit. Die Ausbildung eines Plateaus im Fall III ist beim Wechsel von blau nach grün oder rot zu beobachten, weiterhin beim Wechsel von rot nach grün. Betrachtet man nun die möglichen Übergänge zur Generation eines RGB-Signals und vergleicht die Verzögerungszeiten, so handelt es sich bei der Schaltfolge in Abb. 4.11 um eine optimierte Schaltfolge, da lediglich einmal Fall III auftritt. Bei allen anderen möglichen Schaltfolgen tritt zweimal Fall III auf.

Die Gesamtverzögerungszeit der drei Übergänge zur Generation eines RGB-Signals ist somit durch den Übergang von blau nach grün limitiert. Dieser Übergang wird im Weiteren näher untersucht. Zur Charakterisierung des Falles III wurde in Abb. 4.12a und 4.12b die Abhängigkeit der Verzögerungszeit des Photostroms von der angelegten Spannung gezeigt. Hierzu wurde ein nipiin-Sensor monochromatisch (600nm) mit der Intensität von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen beleuchtet. Anschließend wurde von der Blau- zur Rotempfindlichkeit umgeschaltet, wobei die Spannung vor dem Wechsel variiert wurde. Im Weiteren wird zur Vereinfachung der Nomenklatur, die Spannung vor dem Wechsel als U_1 bezeichnet, wobei die Spannung nach dem Wechsel als U_2 bezeichnet wird. Konkret wurde die Spannung von $U_1=0.5\text{V}$, 1.0V , 1.5V und 2.0V nach $U_2=-1.5\text{V}$ gewechselt. Es ist eine deutliche Zunahme der Verzögerungszeit mit Zunahme der Spannung U_1 zu beobachten.

Zur Analyse des transienten Verhaltens der einzelnen Teildioden wurde ein SPICE-Modell entwickelt, das die empirische Beschreibung des Bauelements erlaubt. Hierzu wurden in diesem Modell zwei antiseriell verschaltete Dioden berücksichtigt, die durch ein einfaches Ersatzschaltbild nachgebildet wurden. Neben der idealen Diode wurde ein Shunt- und ein Serienwiderstand für die Top- und Bottom-Diode berücksichtigt. Ergänzt wurde jede Diode durch eine spannungsabhängige Kapazität. Diese ließ sich aus $C(U)$ -Messungen³⁶ an nipiin- und pin-Strukturen in Abhängigkeit der angelegten Spannung ermitteln.

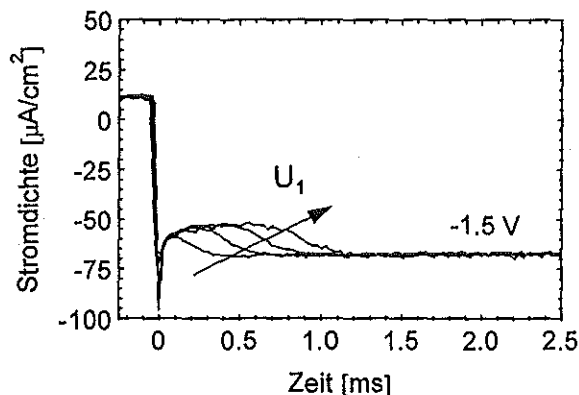


Abb. 4.12a: Experimentell ermittelter transienter Photostromübergang nach Wechsel der angelegten Spannung von $U_1=0.5\text{V}$, 1.0V , 1.5V und 2.0V nach $U_2=-1.5\text{V}$. Die Wellenlänge der monochromatischen Beleuchtung betrug 600nm ($10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen).

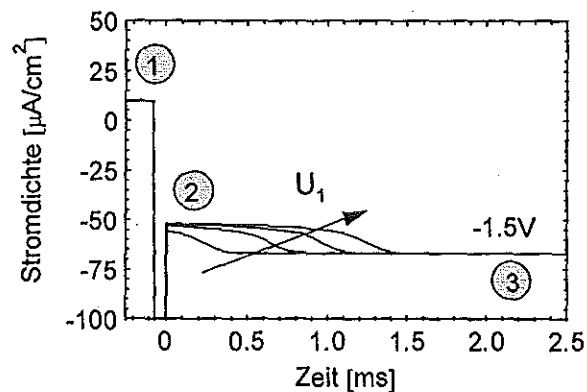


Abb. 4.12b: Simulation des transienten Photostromübergangs nach Wechsel der angelegten Spannung von $U_1=0.5\text{V}$, 1.0V , 1.5V und 2.0V nach $U_2=-1.5\text{V}$. Die Wellenlänge der monochromatischen Beleuchtung betrug 600nm ($10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen).

³⁶ Die Messungen wurden mit einem Impedanzanalyzer für unterschiedliche Frequenzen durchgeführt.

Vor der Beschreibung des transienten Photostroms wurde der stationäre Photostrom als Funktion der Wellenlänge und Spannung ermittelt. Aufgrund dieser experimentellen Angaben ließen sich die Parameter des Ersatzschaltbildes bestimmen. Die Abb. 4.12b zeigt die Simulation des Spannungsüberganges aus Abb. 4.12a. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation zu beobachten. Bei dem Übergang in Abb. 4.12a und Abb. 4.12b handelt es sich um ein Beispiel, welches exemplarisch betrachtet wurde. Das Modell ist neben der Beschreibung von monochromatischen I/U-Kennlinien in der Lage, sämtliche gemessenen Spannungsübergänge nachzubilden. Auf das Modell kann aber an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, es wird auf die Arbeit von [Knipp95, Stiebig98] verwiesen. Die Beschreibung des Bauelements für sämtliche Spannungsübergänge ist Voraussetzung für die Analyse der Teildioden des Bauelements. Zur näheren Untersuchung der Teildioden wird das Verhalten der Top- und Bottom-Diode im weiteren zu drei Zeitpunkten betrachtet. Eingetragen sind diese Zeitpunkte in der Abb. 4.12b. Hierbei wird das Bauelement vor dem Wechsel der angelegten Spannung (Zeitpunkt 1), während der Verweilzeit im Plateau (Zeitpunkt 2) und beim Erreichen des stationären Photostroms (Zeitpunkt 3) betrachtet. Die drei Zeitpunkte in Abb. 4.12b korrespondieren mit den drei Zeitpunkten in Abb. 4.13a und 4.13b. In Abb. 4.13a und 4.13b wird für die Top- und die Bottom-Diode für die unterschiedlichen Zeitpunkte die angelegte Spannung anhand der jeweiligen I/U-Kennlinie betrachtet. Zum Zeitpunkt 1 liegt über der gesamten nipiin-Struktur eine Spannung von 2.0V an. Diese teilt sich zu -1.4V auf die im Sperrbetrieb befindliche Top- und zu +0.6V auf die in Durchlaßrichtung befindliche Bottom-Diode auf. Wechselt nun die an das Bauelement angelegte Spannung auf -1.5V, so muß für jeden Zeitpunkt der Strom durch die Top-Diode gleich dem negativen Strom durch die Bottom-Diode sein. Hierzu ist es notwendig, daß sowohl die Top- als auch die Bottom-Diode jeweils den aktiven Quadranten der I/U-Kennlinie durchlaufen. Geht man exemplarisch davon aus, daß zum Zeitpunkt 2 ($U_2 = -1.5V$) über der Top-Diode eine Spannung von 0.1V anliegt und entsprechend über der Bottom-Diode eine Spannung von -1.4V, so hat die Bottom-Diode bereits den aktiven Quadranten durchlaufen. Alternativ können auch andere Spannungen über der Top-Diode angenommen werden. Der Extremfall wird im Kurzschlußfall der Top-Diode erreicht. In diesem Fall liegt über der Bottom-Diode eine Spannung von -1.5V an. Wesentlich bei dieser Betrachtung ist, daß zum Zeitpunkt 2 beide Dioden einen Photostrom liefern. Der Photostrom der Top- und Bottom-Diode hat allerdings unterschiedliche Vorzeichen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die beiden Dioden antiseriell verschaltet sind.

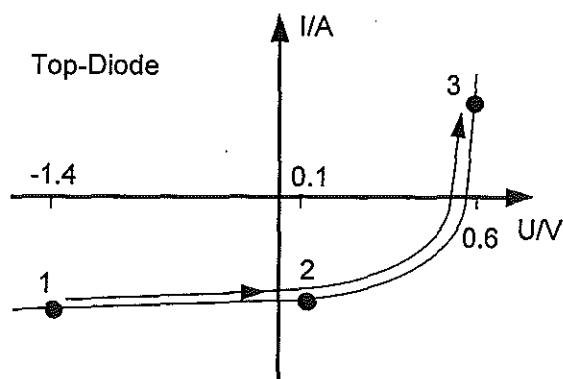


Abb. 4.13a: Schematische Darstellung des Photostroms der Top-Diode bei einem Spannungssprung von $U_1 = 2.0V$ nach $U_2 = -1.5V$ in Anlehnung an Abb. 4.12b.

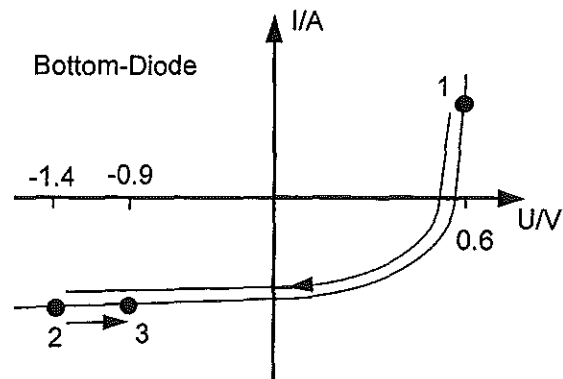


Abb. 4.13b: Schematische Darstellung des Photostroms der Bottom-Diode bei einem Spannungssprung von $U_1 = 2.0V$ nach $U_2 = -1.5V$ in Anlehnung an Abb. 4.12b.

Entsprechend kompensieren oder überkompensieren sich die beiden Photoströme. Dies erklärt das Plateau, welches beim Übergang von 2.0V nach -1.5V auftritt. Erst wenn durch einen Umladevorgang der Top-Diode die Spannung von 0.1V auf 0.6V angestiegen ist, geht auch der Photostrom in seinen stationären Wert über.

Ein analoges Verhalten des Photostroms und auch der Teildioden läßt sich für die Übergänge von blau nach grün und von rot nach grün beobachten. Allen drei Fällen ist gemeinsam, daß die Diode, die nach Wechsel der Spannung in Vorwärtsrichtung betrieben wird, einen Photostrom liefert, der dem Strom der in Sperrrichtung befindlichen Diode entgegenwirkt. Optimieren läßt sich dieser Spannungsübergang nur sehr eingeschränkt, da die Verweildauer des Photostroms im aktiven Quadranten von der geometrischen Kapazität der Teildioden bestimmt wird. Eine Möglichkeit der Verbesserung der Verzögerungszeit besteht in der Optimierung der Spannungsschaltfolge. So läßt sich, wie beschrieben bei Knipp [Knipp98a], die Verzögerungszeit reduzieren, wenn die Spannungsdifferenz zur Detektion von grün und rot sinkt. Gleichzeitig muß allerdings die lineare Unabhängigkeit des Bauelements gewahrt bleiben (Abb. 4.5). Dies schränkt die Möglichkeiten der Reduktion der Verzögerungszeit wieder deutlich ein. Eine weitere Möglichkeit besteht im modifizierten Design des Bauelements. Damit ändert sich aber die Farbtrennung. Mithin legen die Randbedingungen der Farbtrennung und der linearen Unabhängigkeit auch das transiente Verhalten nach Wechsel der Spannung fest.

Neben der Wellenlänge läßt sich bei dieser Betrachtung auch die Intensität variieren. Untersuchungen hierzu zeigen, daß die Verzögerungszeit des Bauelements mit abnehmender Beleuchtungsintensität nahezu linear zunimmt. Die Verzögerungszeit wird also von der Generation von Ladungsträgern innerhalb des Bauelementes bestimmt. In Abb. 4.14 ist die Abhängigkeit der Ausleserate von der Beleuchtungsintensität aufgetragen. Berücksichtigt wurde bei der Bestimmung der Ausleserate die Summe der Verzögerungszeiten der drei Übergänge. So ist für eine Intensität von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen eine Ausleserate von 100 möglich. Für sehr geringe Beleuchtungsstärken geht das lineare Verhältnis zwischen eingestrahltm Photonenfluß und Ausleserate in ein hyperlineares über, da in diesem Fall der elektrische Transport im Bauelement vom Dunkelstrom bestimmt wird. Geht man von einer Videorate von 25 Halbbildern pro Sekunde aus, so läßt sich bis zu einer Intensität von $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen der Photostrom detektieren.

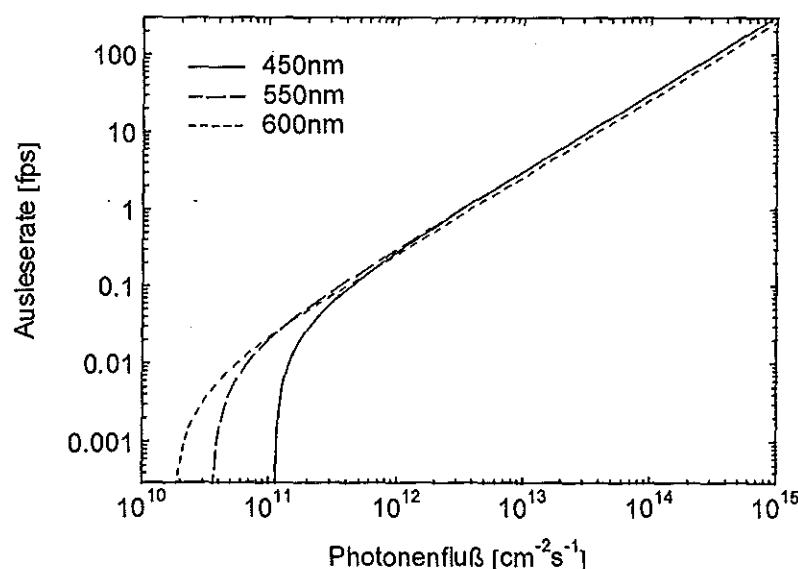


Abb. 4.14: Ausleserate eines nipiin-Sensors als Funktion der Wellenlänge 450nm, 550nm und 600nm.

Bei dieser Betrachtung wird deutlich, daß der Sensor nicht für die Realzeit-Farbaufnahme einsetzbar ist, wenn die Beleuchtungsintensität gering ist. Neben dem Spannungsschalten soll im Weiteren die Photostromantwort nach Einschalten einer optischen Anregung untersucht werden.

4.8.2 Lichtschalten

Das transiente Verhalten des Photostroms auf eine optische Anregung hat eine ähnlich zentrale Bedeutung wie der Wechsel der angelegten Spannung. Dieses Verhalten soll im Folgenden näher charakterisiert werden.

Die Analyse des Photostroms amorpher Bauelemente nach optischer Anregung ist ein weiteres Forschungsgebiet. So wurden Flugzeitexperimente an Einzelschichten [Nebel89, Wang93] und auch transiente Photostromexperimente an amorphen Solarzellen [Brüggemann93a, Brüggemann93b] und auch Sensoren [Stannowski99] durchgeführt. In Abb. 4.15 ist die transiente Photostromantwort eines nipiin-Sensors nach einer optischen Anregung mit der Wellenlänge von 650nm dargestellt. Die Intensität der optischen Anregung beträgt $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Die als Anregungsmedium verwendeten LEDs kombiniert mit einem Interferenzfilter zur Spektralbereichsbegrenzung besitzen eine Anstiegszeit von ca. $5 \mu\text{s}$. Vorgenommen wurden die Messungen für die Spannungen 0.6V, -1.0V und -1.5V. Bis zu einer Zeit von 10^{-5} s wird die Stromtransiente von der Anstiegszeit des LED-Arrays bestimmt. Anschließend bleibt der Strom fast unabhängig von der angelegten Spannung konstant bis zu einer Zeit von 10^{-3} s . Für die Spannungen 0.6V kommt es dann zu einer Stromumkehr, so daß nach $4 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ der stationäre Photostrom erreicht ist. Für die Spannung -1.5V steigt der Photostrom hingegen weiter an.

Betrachtet man den Fall der Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm, so ist ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten. Der Photostrom ist bis zu 10^{-3} s positiv und nur gering von der angelegten Spannung beeinflusst. Im Zeitfenster zwischen 10^{-3} s und 10^{-2} s wechselt dann der Strom sein Vorzeichen oder steigt weiter an.

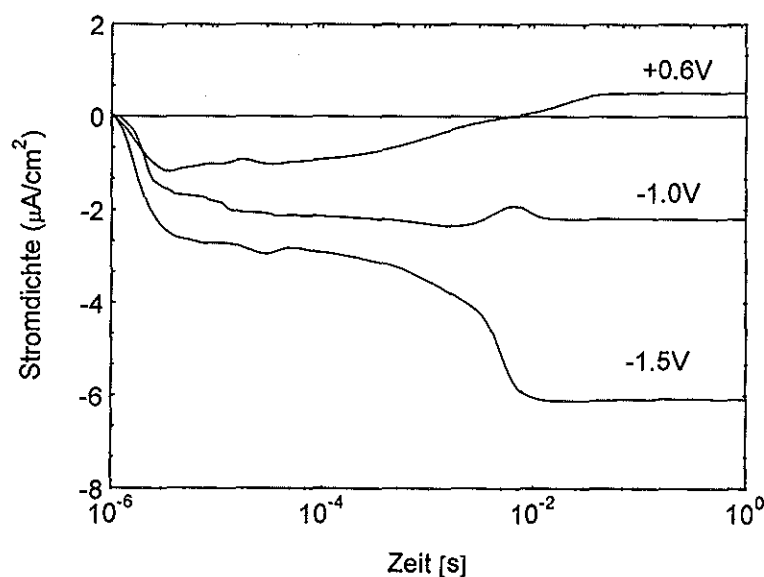


Abb. 4.15: Gemessene transiente Photostromantwort eines nipiin-Sensors nach optischer Anregung mit einer Wellenlänge von 650nm für verschiedene Spannungen. Der Photonenfluß während der Messung betrug $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

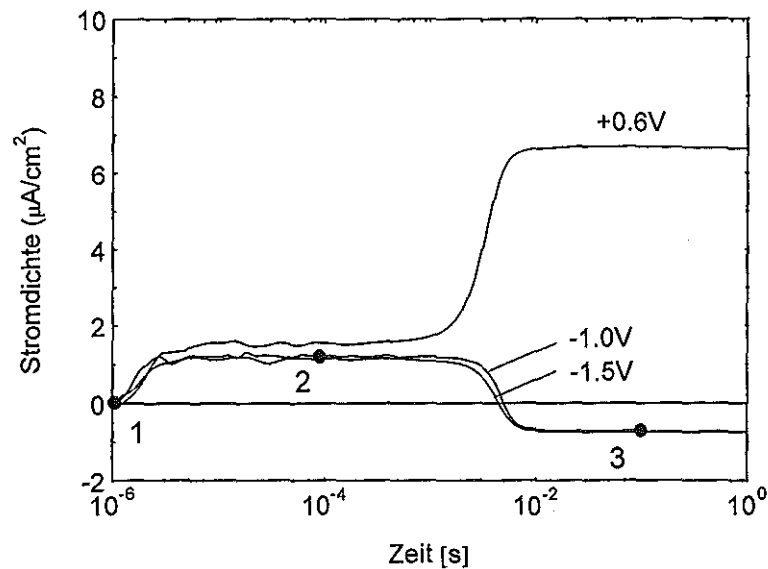


Abb. 4.16 Gemessene transiente Photostromantwort eines nipiin-Sensors nach optischer Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm für verschiedene Spannungen. Der Photonenfluß während der Messung betrug $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

Auch für die optische Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm ist der stationäre Wert des Photostroms im Bereich von 10^{-2} s erreicht.

Zur Analyse des transienten Verhaltens wurde ein numerisches Simulationsprogramm von Stannowski [Stannowski97, Stannowski99] entwickelt. Es erlaubt die Lösung der zeitabhängigen Transportgleichung für Elektronen und Löcher. Weiterhin berücksichtigt das Simulationsmodell die Wechselwirkung von delokalisierten und lokalisierten Zuständen. Das numerische Simulationsmodell berechnet selbstkonsistent eine ortsabhängige Defektdichteverteilung der Dangling Bonds, welche sich auf eine Fermi-Niveau abhängige Defektverteilung in Anlehnung an das Defekt-Pool-Modell zurückführen läßt.

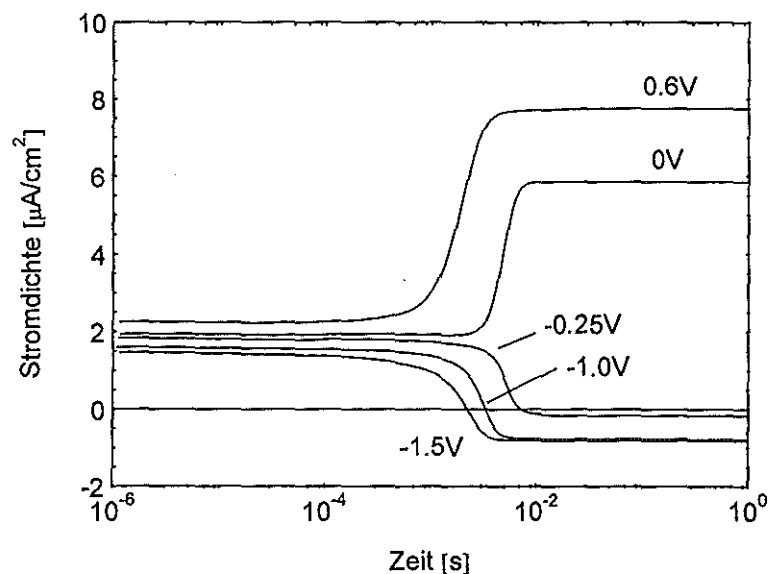


Abb. 4.17: Simulierte transiente Photostromantwort eines nipiin-Sensors nach optischer Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm ($10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) für verschiedene Spannungen.

Auf dieses Modell kann an dieser Stelle allerdings nicht eingegangen werden, hierzu sei auf die Arbeit von Stiebig [Stiebg95a] verwiesen.

In Abb. 4.17 ist das simulierte Ergebnis für die optische Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm dargestellt. Zwischen dem experimentellen Ergebnis aus Abb. 4.16 und dem numerischen Ergebnis in Abb. 4.17 liegt eine sehr gute Übereinstimmung vor. Zur Analyse des Bauelements soll nun anhand numerischer Simulationen und einer Betrachtung der Teildioden auf das Verhalten des Bauelements eingegangen werden. Hierzu wird im ersten Teil dieses Kapitels die Stromumkehr für die optische Anregung mit der Wellenlänge 450nm im Fall einer negativen Spannung erörtert. Zur Analyse des Verhaltens der Teildioden ist in Abb. 4.18 der Bandverlauf einer nipiin-Struktur im Dunkeln und unter Beleuchtung dargestellt. Während die Potentialdifferenz zwischen der vorderen n- und hinteren n-Schicht konstant bleibt, zeigen die numerischen Simulationen einen Rückgang des Potentials in der mittleren p-Schicht um ca. 0.15V als Folge der Beleuchtung. Betrachtet man die Potentialdifferenz als Funktion der Zeit, so erfolgt der Rückgang des Potentials über den Teildioden in der Zeit zwischen 10^{-3} s und 10^{-2} s. Die Umkehr des Photostrom korrespondiert also mit der auftretenden Potentialverschiebung. Zur Verdeutlichung des Verhaltens der Teildioden sind in Abb. 4.19a und 4.19b die schematischen I/U-Kennlinien der Top- und Bottom-Dioden dargestellt. Die in Abb. 4.19a und 4.19b eingezeichneten Punkte 1, 2 und 3 korrespondieren mit den Zeitpunkten in Abb. 4.16.

Zum Zeitpunkt 1 befindet sich das Bauelement im stationären Zustand, vor dem Einschalten der optischen Anregung (Dunkelfall). Zum Zeitpunkt 2 sind 10^{-4} s vergangen. Im Zustand 3 hat das Bauelement wieder seinen stationären Zustand erreicht. Zum Zeitpunkt 1 wird der Stromtransport bestimmt durch die thermisch generierten Ladungsträger in der Bottom-Diode. Zum Zeitpunkt 2 werden aufgrund der optischen Anregung zusätzliche Ladungsträger generiert, die sowohl in der Top- als auch der Bottom-Diode zu einem Photostrom führen. Bestimmt wird der Photostrom des Bauelements durch den photogenerierten Strom der Top-Diode, da aufgrund der inhomogenen Generation (450nm), der Photostrom der Top-Diode deutlich größer ist als der Photostrom der Bottom-Diode. Im Zeitintervall von 10^{-4} s bis 10^{-2} s sinkt dann das Potential in der p-Schicht und der Arbeitspunkt der Top-Diode verschiebt sich um ΔU vom aktiven Quadranten in den Vorwärtsbetrieb. Als Folge wechselt die Top-Diode ihre Stromrichtung. Wurde der Photostrom der Bottom-Diode zum Zeitpunkt 2 noch überkompensiert vom Photostrom aus der Top-Diode, so geht die Bottom-Diode zum Zeitpunkt 3 in den stationären Wert über. In diesem Fall wird der Strom bestimmt durch die photogenerierten Ladungsträger in der Bottom-Diode.

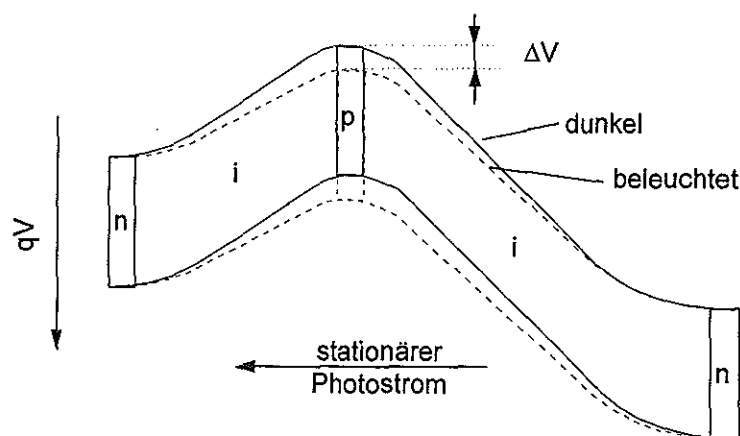


Abb. 4.18: Schematischer Bandverlauf einer nipiin-Struktur im Dunkeln (durchgezogene Linie) und unter Beleuchtung (gestrichelte Linie) für höhere negative Spannungen.

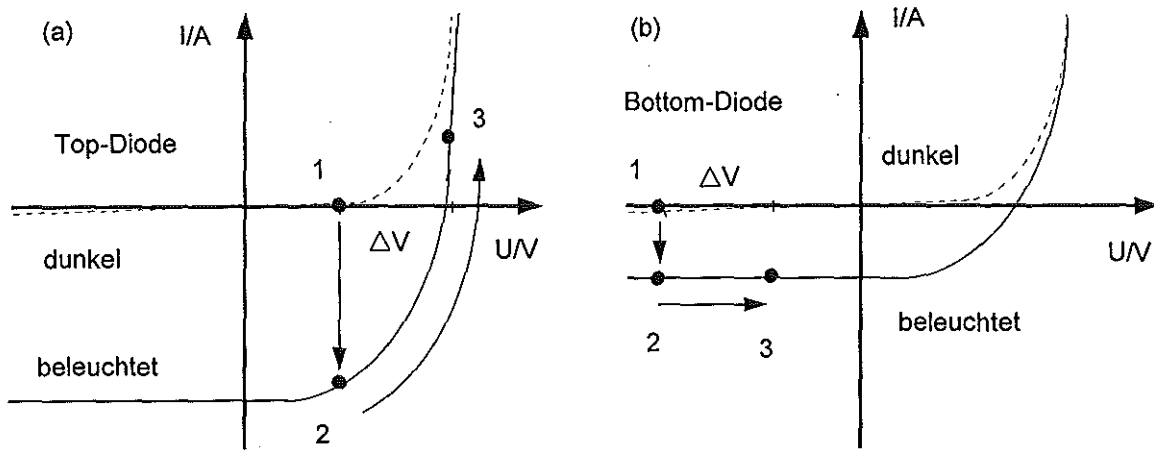


Abb. 4.19: Schematischer Verlauf der I/U -Kennlinie der Top- (a) und Bottom-Diode (b) einer $nipiin$ -Struktur nach einer optischen Anregung mit einer Wellenlänge von 450nm für die Zeitpunkte 1 (10^{-6}s , Dunkelfall), 2 (10^{-4}s), 3 (10^{-1}s). Die Zeitpunkte 1, 2 und 3 korrespondieren mit den Zeitpunkten in Abb. 4.16.

Der Strom der Bottom-Diode ändert sich nur sehr gering aufgrund der Reduktion der Sperrspannung um ΔU .

Eine genauere Darstellung des sich ändernden Stroms wird in Abb. 4.20 gegeben. Hier sind die Löcher- und Elektronenströme als Funktion der Zeit aufgetragen, die zu diskreten Zeitpunkten, 10^{-4}s , 10^{-3}s , $2 \cdot 10^{-3}\text{s}$ und 10^{-2}s bestimmt wurden. Im Falle eines positiven Stroms fließen die Löcher in positive x -Richtung. Im Fall eines positiven Elektronenstroms fließen die Elektronen in negative x -Richtung. Für frühe Zeitpunkte (10^{-4}s) verhalten sich die Top- und die Bottom-Diode identisch. In beiden Dioden fließen Löcher zur mittleren p -Schicht und Elektronen zur vorderen und hinteren n -Schicht. In diesem Fall ist der Strom beider Dioden feldkontrolliert. Aufgrund der höheren Absorption für Licht mit kürzerer Wellenlänge (450nm) in der Top-Diode verbunden mit einem inhomogenen Generationsprofil ergibt sich ein höherer Photostrom für die Top- als für die Bottom-Diode. Der Photostrom der Bottom-Diode wird durch den Strom der Top-Diode überkompensiert. Dies resultiert in einen positiven Gesamtstrom. Für spätere Zeitpunkte ist das Verhalten der Elektronen- und Löcherstromdichte der Bottom-Diode nahezu unverändert. Bedingt durch den Löchertransport zur p -Schicht, können dort Defektzustände wieder positiv geladen werden, die im Dunkelfall entleert wurden. Als Folge der positiven Ladungsansammlung kommt es zu einer Potentialverschiebung und der Elektronenstrom in der Top-Diode beginnt zur p -Schicht zu diffundieren. Der Löcherstrom der Top-Diode ist weniger deutlich von der Änderung des Potentials der p -Schicht beeinflusst. Lediglich im Bereich des i/p -Interfaces und innerhalb der p -Schicht ist eine Umkehr des Vorzeichens für den Löcherstrom zu beobachten. Die Umkehr des Elektronenstroms in der Top-Diode- und des Löcherstroms in der Umgebung der p -Schicht wird hervorgerufen durch ein Auffüllen von positiv geladenen Defektzuständen in der p -Schicht durch Löcher, die zur p -Schicht driften.

In Analogie zum Verhalten für die negative Spannung von -1.5V soll unter identischen Beleuchtungsbedingungen das Verhalten für eine Spannung von 0.6V (Abb. 4.21) diskutiert werden. In diesem Fall setzt also keine Stromumkehr sondern ein deutlicher Anstieg des Photostroms ein (Abb. 4.16).

Im Dunkelfall wird der Stromtransport bestimmt durch thermisch generierte Ladungsträger aus der Top-Diode.

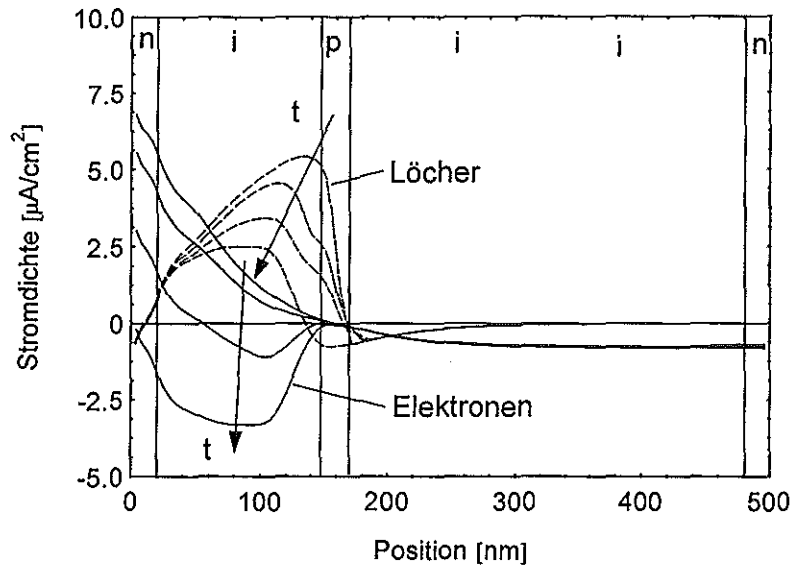


Abb. 4.20: Löcher- und Elektronenstrom für die Spannung $-1.5V$ für die Zeitpunkte $10^{-4}s$, $10^{-3}s$, $2 \cdot 10^{-3}s$ und $10^{-2}s$ unter Beleuchtung mit $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen der Wellenlänge 450nm .

In diesem Fall ist die Top-Diode in Sperrbetrieb und die Bottom-Diode ist in Vorwärtsrichtung geschaltet. Wie auch für den Fall der negativen Spannung von $-1.5V$ ist für frühe Zeitpunkte $t=10^{-4}s$ der Strom in beiden Dioden driftkontrolliert. Auch in diesem Beispiel sind die Löcher- und Elektronenströme für die Zeitpunkte $10^{-4}s$, $10^{-3}s$, $2 \cdot 10^{-3}s$ und $10^{-2}s$ aufgetragen. Im Zeitintervall zwischen $10^{-4}s$ und $10^{-3}s$ gelangen immer mehr Löcher zur p-Schicht. Als Folge dessen kommt es zu einer Potentialabsenkung der p-Schicht und der Stromtransport in der Bottom-Diode geht von einem Drift- zu einem Diffusionsstrom über. Zum Zeitpunkt 3 müssen die durch die p-Schicht injezierten Löcher mit Elektronen rekombinieren, die vom Rückkontakt injiziert werden. Betrachtet man den Ort der Rekombination, so findet diese vorrangig im hinteren Teil der Bottom-Diode aufgrund der deutlich erhöhten Defektdichte in diesem Teil der i-Schicht statt.

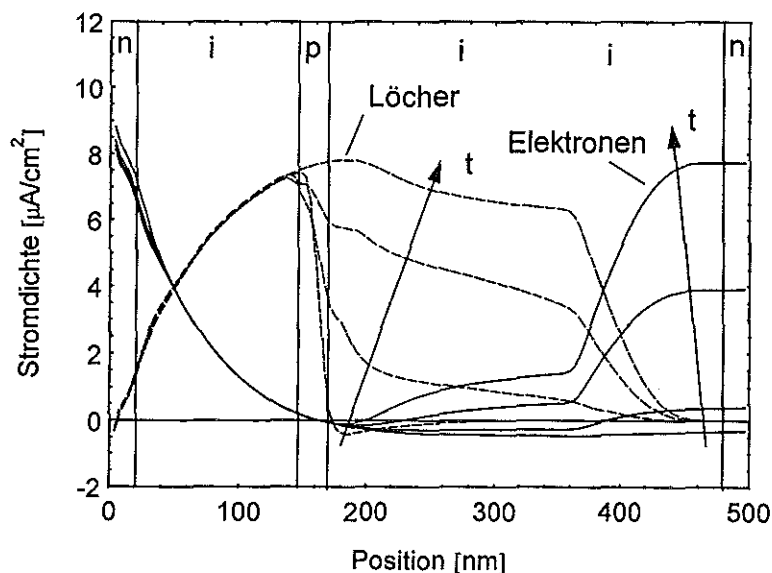


Abb. 4.21: Löcher- und Elektronenstrom für die Spannung $0.6V$ für die Zeitpunkte $10^{-4}s$, $10^{-3}s$, $2 \cdot 10^{-3}s$ und $10^{-2}s$ unter Beleuchtung mit $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen der Wellenlänge 450nm .

Auch in diesem Fall ist die Potentialverschiebung in der mittleren p-Schicht die Ursache für den verzögerten Anstieg des Photostroms.

Um die Ursache für die Potentialverschiebung in der p-Schicht detailliert zu erörtern, ist in Abb. 4.22 die Löcher- und Elektronenkonzentration als Funktion der Zeit aufgetragen. Darüber hinaus ist noch der Verlauf der Löcher und Elektronen im Dunkelfall eingezeichnet. Sowohl im Dunkeln als auch im Beleuchtungsfall ist die Elektronenkonzentration in der vorderen und hinteren n-Schicht sehr hoch. Dies ändert sich auch nicht signifikant durch die Beleuchtung. Im Gegensatz dazu ist die Elektronenkonzentration in der p-Schicht im Dunkelfall sehr gering. Der Sprung in der Elektronenkonzentration im hinteren Teil der Bottom-Diode rührt von der Bandgap-Gradierung her (Abb. 4.2).

Die Löcherkonzentration ist von der Diskontinuität des Bandverlaufs nicht betroffen, da im numerischen Simulationsmodell lediglich ein Sprung im Leitungsband angenommen wurde [Stannowski99]. Obwohl die Löcher Majoritätsladungsträger in der p-Schicht sind, ist deren Konzentration im Dunkelfall gering. Verantwortlich hierfür ist das „Ausräumen“ der p-Schicht nach Anlegen der Spannung. Als Folge dessen ist nicht nur die Löcherkonzentration in der p-Schicht reduziert, sondern auch positiv geladene Defektzustände in und in der Umgebung der p-Schicht werden neutralisiert. Dies führt zu einem Anstieg des Built-in-Potentials der Top- und Bottom-Diode. Im Beleuchtungsfall werden dann die Defektzustände in der Bandlücke wieder aufgefüllt und die neutralisierten Defektzustände in der Bandlücke werden wieder positiv geladen. Als Konsequenz steigt die Löcherkonzentration um über 5 Größenordnungen an. Hervorgerufen wird dies vorrangig durch Löcher die aus der Top-Diode zur mittleren p-Schicht driften.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Verschiebung des Potentials der p-Schicht und das daraus resultierende verzögerte Einsetzen des Photostroms auf das „Ausräumen“ der p-Schicht im Dunkelfall zurückzuführen ist. Damit handelt es sich um eine Bauelement inhärente Limitierung.

Die Simulationen machen weiterhin deutlich, daß das „Auffüllen“ der Defektzustände verantwortlich ist für die Verzögerungszeit des Photostroms. Hieraus folgt, daß bei höherer Generation mehr Ladungsträger zur Verfügung stehen, um die Defektzustände in der p-Schicht und deren Umgebung „aufzufüllen“.

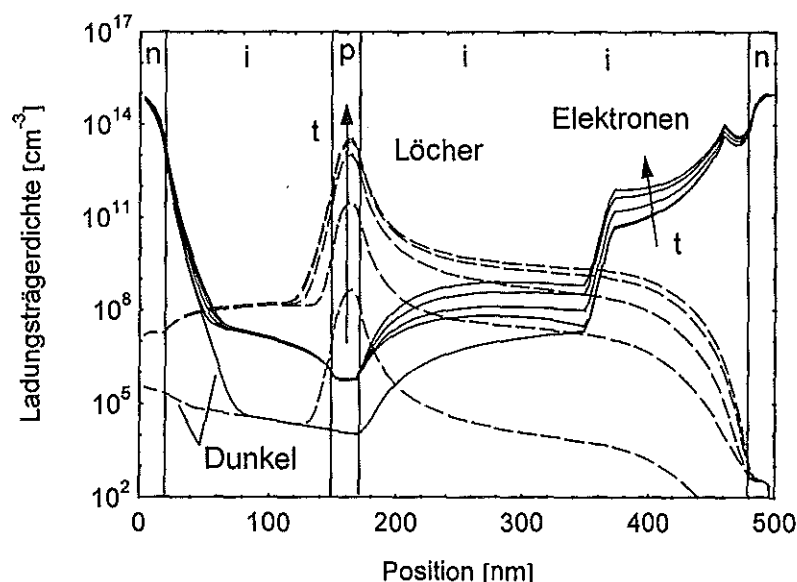


Abb. 4.22: Löcher und Elektronenkonzentration im Dunkeln und nach optischer Anregung für die Zeiten 10^{-4} s, 10^{-3} s, $4 \cdot 10^{-3}$ s und 10^{-2} s. Die angelegte Spannung beträgt 0.6V.

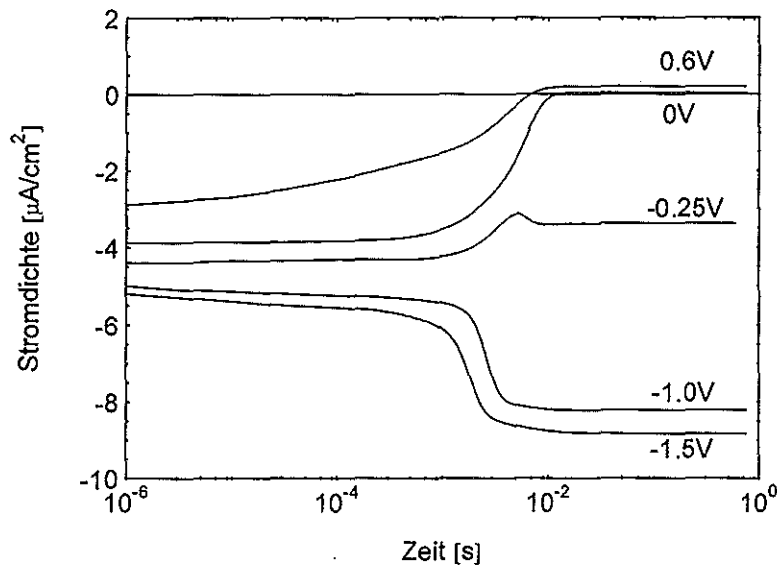


Abb. 4.23: Simulierte transiente Photostromantwort eines nipiin-Sensors nach optischer Anregung mit einer Wellenlänge von 650nm ($10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) für verschiedene Spannungen.

Somit sinkt die Verzögerungszeit. An dieser Stelle wird auf die Darstellung dieser Untersuchungen verzichtet [Stiebig96, Knipp98a]. Die Verzögerungszeit folgt hierbei umgekehrt proportional der Generation im Bauelement. So läßt sich in Analogie zu Abb. 4.14 auch für die Ausleserate als Funktion der Photonenflußdichte bei Einschalten einer optischen Anregung über einen weiten Bereich der Intensität die Verzögerungszeit linear auftragen.

Das hier beschriebene Verhalten für eine optische Anregung mit blauem (450nm) Licht läßt sich auch übertragen auf den Fall der Anregung mit rotem Biaslicht. In Abb. 4.23 ist die simulierte Antwort der nipiin-Struktur für eine optische Anregung mit Licht der Wellenlänge 650nm dargestellt. Auch in diesem Fall werden die experimentellen Ergebnisse aus Abb. 4.15 sehr gut wiedergegeben. Aufgrund der höheren Absorption des Lichts im hinteren Teil des Bauelements wird in diesem Fall der Photostrom der Top-Diode überkompensiert vom Photostrom der Bottom-Diode.

4.9 Zusammenfassung

Der vorgestellte nipiin-Sensor erlaubt die Separation von drei Verläufen der spektralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Hierzu werden zwei amorphe pin-Dioden antiseriell verschaltet. Der optische Bandabstand des Schichtsystems wurde hierbei dem einfallenden Licht so angepaßt, daß blaues Licht in der Top- und grünes und rotes Licht in der Bottom-Diode detektiert werden. So detektiert der Sensor für die Spannungen 1.0V, -0.6V und -2.5V Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 480nm, 560nm und 630nm. Neben den optischen Eigenschaften sind ebenfalls die elektrischen Eigenschaften zu berücksichtigen. So muß das Produkt aus Lebensdauer und Beweglichkeit der Ladungsträger von der mittleren zur hinteren n-Schicht abnehmen. Dies ist durch den Einbau einer a-Si(Ge):H-Schicht im hinteren Teil der Bottom-Diode möglich. Ausgehend von diesem Bauelement wurde weiterhin die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe untersucht. Der Sensor besitzt eine gute lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe, was eine Entfaltung der spektralen Verläufe der Bottom-Diode zuläßt. Mithin kann der detektierte

Verlauf für eine Spannung von -2.5V als Superposition von grün und rot betrachtet werden. Weiterhin wurde das Temperaturverhalten des Bauelements untersucht. Der Temperaturkoeffizient ist geringer als der von kristallinem Silizium, jedoch nimmt er auch mit dem Einsatz von Materialien mit geringerem Bandabstand deutlich zu. Der Sensor besitzt eine sehr gute Dynamik.

Die Struktur besitzt Nachteile dahingehend, daß die Farbtrennung nur als moderat anzusehen ist. Dies wird allerdings dadurch ausgeglichen, daß es sich bei diesem Bauelement um ein Zweipol-Bauelement handelt. Damit zeichnet sich das Bauelement durch einfache Herstellung aus. Ein weiterer Nachteil ist die inhärente Limitierung des transienten Verhaltens. Somit ist der Einsatz im Bereich der Realzeitaufnahme nicht möglich. Dies gilt sowohl für das Verhalten nach Wechsel der angelegten Spannung als auch nach Anregung durch einen optischen Lichtpuls. Das Verhalten sowohl nach Spannungs- als auch nach Lichtschalten liegt in Abhängigkeit der Beleuchtungsintensität im selben Zeitfenster.

Kapitel 5

Sensoren für den Einsatz unter hohen Beleuchtungsstärken

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, daß die Verzögerungszeit des Photostroms mit abnehmendem Photonenfluß zunimmt. Dies gilt sowohl bei Wechsel der angelegten Spannung als auch bei Einschalten einer optischen Anregung. Dies macht die Realzeitaufnahme und Verarbeitung der Sensorsignale nur unter hohen Beleuchtungsstärken möglich. Wie ebenfalls im vergangenen Kapitel gezeigt, kommt es allerdings unter hohen Beleuchtungsintensitäten zu einer Veränderung der elektrischen Eigenschaften der amorphen Schichten innerhalb des Sensors, der sogenannten lichtinduzierten Alterung (Staebler-Wronski-Effekt). Dies führt zu einer Zunahme der Defektdichte im Material, welche sich auf die Kenngrößen des Sensors negativ auswirkt. Bei amorphen Sensoren führt die lichtinduzierte Alterung hauptsächlich zu einer Reduktion der Dynamik, hervorgerufen durch einen ansteigenden Dunkelstrom und zu einer Verschlechterung der Farbtrennung. Diese Einschränkungen haben bisher den Einsatz von amorphen Sensoren unter hohen Beleuchtungsintensitäten³⁷ verhindert. Sensoren die unter hohen Beleuchtungsstärken arbeiten sind z.B. als Scanner oder digitale Photokopierer einsetzbar.

Unterschiedliche Zweipol-Sensorstrukturen sind im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für hohe Beleuchtungsstärken untersucht worden. Hierbei wurde die Metastabilität der möglichen Absorbermaterialien ebenso berücksichtigt wie das Bauelementdesign eines solchen Sensors. Ziel war die Implementierung von Materialien in einen Sensor, welche eine geringe Metastabilität besitzen oder kein Degradationsverhalten aufweisen. Darüber hinaus sollten die i-Schichtdicken der Dioden möglichst gering sein, so daß durch Degradation erzeugte Defekte einen möglichst geringen Einfluß auf die elektrische Feldverteilung im Bauelement haben. Dies ist für dünne Dioden möglich, da der Feldverlauf maßgeblich durch die extern angelegte Spannung bestimmt wird. Diese Randbedingungen haben dazu geführt, sich im Folgenden bei der detaillierten Untersuchung der Degradation auf eine piinip-Struktur

³⁷ Als hohe Beleuchtungsintensität wird in diesem Kapitel eine Leistungsdichte von 100mW/cm^2 verstanden. Dies entspricht der Leistungsdichte unter der auch Solarzellen charakterisiert und gealtert werden. Das verwendete Spektrum des Lichts ist dem der Sonne angepaßt. Im Bereich der Photovoltaik spricht man auch von einem AM1.5 Spektrum.

zu konzentrieren. Hierbei wird zwischen blau und grün in der Top-Diode unterschieden, wohingegen rot in der Bottom-Diode detektiert wird.

Der Einfluß der lichtinduzierten Alterung auf die Kenngrößen unterschiedlicher piinip-Sensoren soll im folgenden Kapitel untersucht werden.

5.1 Experiment / Bauelementdesign

Wie in Kapitel 4 beschrieben, führt die lichtinduzierte Alterung zu einem Anstieg der Defektdichte im Material. Dies wiederum wirkt sich negativ auf die Bauelementeigenschaften aus. So steigt der Dunkelstrom an und auch die Farbtrennung des Sensors ist negativ beeinflusst.

Verbessern lassen sich die Materialeigenschaften durch die Deposition von amorphen Schichten mit einer hohen oder sehr hohen Wasserstoffverdünnung. Die hohe Wasserstoffverdünnung führt neben einem deutlichen Rückgang der Depositionsrate zu einer reduzierten Defektdichte und zu kompakterem Material. Dargestellt wurde dies bereits in Kapitel 4.6. Als weiteres Material läßt sich mikrokristallines Silizium einsetzen, was keine Alterungseigenschaften mehr zeigt [Meier96, Yamamoto97,98]. So sind auch mit mikrokristallinem Silizium Einfachsolarzellen mit einem stabilen Wirkungsgrad $>10\%$ hergestellt worden [Yamamoto98].

Die in diesem Kapitel untersuchten piinip-Strukturen trennen zwischen blauem und grünem Licht in der Top-Diode, wohingegen rotes Licht in der Bottom-Diode detektiert wird. Die Strukturen bestehen jeweils aus 6 Schichten, wie schematisch in Abb. 5.1 dargestellt. Die Top-Diode der Strukturen besteht hierbei aus zwei unterschiedlichen i-Schichten mit abnehmendem Bandabstand von der vorderen p- zur mittleren n-Schicht zur Farbtrennung zwischen blau und grün. Das Design der Bottom-Diode, in der der Rotanteil des Lichts detektiert wird, ist für alle drei hier untersuchten Strukturen identisch. Eine 300nm dicke amorphe Siliziumschicht mit einem optischen Bandabstand von 1.74eV bildet den Absorber in der Bottom-Diode.

Wird eine geringe negative Spannung an das Bauelement angelegt, so ist der Sensor blauempfindlich, da lediglich die photogenerateden Ladungsträger im Bereich I zum Photostrom beitragen. Die Top-Diode wird in diesem Fall in Sperrrichtung betrieben, wohingegen die Bottom-Diode in Vorwärtsrichtung geschaltet ist. Die im Bereich II generierten Ladungsträger rekombinieren und tragen nicht zum Stromtransport bei, da das Feld in diesem Bereich nicht ausreichend hoch ist, die photogenerateden Ladungsträger zu extrahieren.

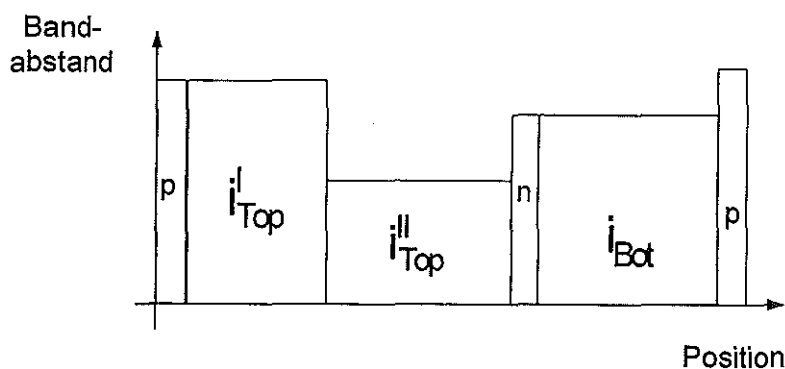


Abb. 5.1: Schematischer Bandverlauf einer piinip-Strukturen in Anlehnung an Struktur B und C (Tab. 5.1).

Struktur	Γ	Region I	Region II	Region III
Material	A	a-Si(C):H	a-Si:H ¹	a-Si:H
Schichtdicke		80nm	150nm	300nm
Bandabstand		2.0eV	1.85eV	1.74eV
Material	B	a-Si(C):H	μ c-Si:H	a-Si:H
Schichtdicke		80nm	300nm	300nm
Bandabstand		2.0eV		1.74eV
Material	C	a-Si:H ²	μ c-Si:H	a-Si:H
Schichtdicke		80nm	300nm	300nm
Bandabstand		1.95eV		1.74eV

Tab. 5.1: Depositionsbedingungen der piinip-Sensoren A, B und C.

¹⁾ $\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/4$ ²⁾ $\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/30$

Mit zunehmender negativer Spannung steigt das elektrische Feld in der Top-Diode an, bis für höhere negative Spannungen nahezu alle photogenerierten Ladungsträger aus der Top-Diode extrahiert werden. Die spektrale Empfindlichkeit schiebt als Folge zu höheren Wellenlängen. Legt man eine positive Spannung an den Sensor an, so bestimmen hauptsächlich die photogenerierten Ladungsträger aus der Bottom-Diode den Photostrom, da für diesen Fall die Top-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird.

Die realisierten piinip-Strukturen sind auf Glassubstraten der Dicke 1.1mm hergestellt worden. Die Glassubstrate sind beschichtet mit einer 155nm dicken Zinkoxid-Schicht als Frontkontakt. Nachdem eine amorphe p-Schicht der Schichtdicke 10nm abgeschieden wurde, wird die erste Region der Top-Diode von Struktur A (Tab. 5.1) aufgebracht. Sie besteht aus einer 80nm dicken kohlenstofflegierten Siliziumschicht (a-Si(C):H) mit einer optischen Bandlücke von $E_g=2.0\text{eV}$. Vorrangig Licht der Wellenlänge 400nm bis 500nm wird in dieser Schicht absorbiert. Schicht II wurde als Niedertemperaturschicht bei einer Substrattemperatur von 140-160°C hergestellt und besitzt einen optischen Bandabstand von ca. 1.8eV. Im Vergleich zu Struktur A ist in Struktur B die zweite Schicht der Top-Diode durch eine mikrokristalline Siliziumschicht ersetzt worden. Die a-Si(C):H-Schicht in Region I ist für Struktur B beibehalten worden. Im nächsten Schritt (Struktur C) ist auch die a-Si(C):H-Schicht im ersten Bereich der Top-Diode durch eine Niedertemperaturschicht ($T_s=140^\circ\text{C}$) ersetzt worden. Bei einer Wasserstoffverdünnung von $[\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/30]$ ergibt sich so eine optische Bandlücke von 1.95eV. Der zweite Bereich der Top-Diode von Struktur C besteht wieder aus einer 300nm dicken mikrokristallinen Siliziumschicht. Einen Überblick über die im Folgenden untersuchten Strukturen gibt die Tab. 5.1. Bevor im Weiteren auf die Alterungsuntersuchungen näher eingegangen wird, soll in Kapitel 5.2 auf mikrokristallines Silizium und in Kapitel 5.3 auf intrinsisches Niedertemperaturmaterial eingegangen werden, da beide Materialien als Absorber in der Top-Diode der untersuchten Strukturen eine Anwendung finden.

5.2 Mikrokristallines Silizium

Mikrokristallines Silizium ist von großem Interesse für optoelektronische Bauelemente wie Solarzellen oder auch Sensoren, da es eine höhere freie Ladungsträgerbeweglichkeit [Harder98] und eine höhere Leitfähigkeit besitzt als amorphes Silizium [Finger97]. Weiterhin zeigt das Material keine Degradationseigenschaften (Staebler-Wronski-Effekt) [Keppner97], was das Material für den Einsatz in Bauelementen interessant macht, die unter hohen Beleuchtungsstärken betrieben werden.

Obwohl das Wachstum der Schichten als auch die Transportmechanismen im mikrokristallinen Silizium noch nicht vollständig verstanden sind, ist es in jüngster Zeit unterschiedlichen Gruppen gelungen, erfolgreich Bauelemente zu realisieren. So sind Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium mit hohem stabilen Wirkungsgrad hergestellt worden [Meier 96, Yamamoto97,98]. Darüber hinaus wird mikrokristallines Material bereits seit vielen Jahren als Kontaktschicht beispielsweise in Stapelsolarzellen eingesetzt [Yang92].

Bei mikrokristallinem Silizium handelt es sich um eine Materialklasse im Bereich zwischen amorphem und polykristallinem Silizium. Je nach Herstellungsbedingungen verschiebt sich der amorphe Anteil zugunsten von kristallinen Anteilen im Material, wobei das Material neben der kristallinen und amorphen Phase auch Korngrenzen und Voids³⁸ enthält. Die Größe der so hergestellten Kristallite schwankt zwischen 5 und 40nm je nach Präparationsbedingungen [Hapke95]. Die Kristallite wachsen während der Abscheidung säulenartig (man spricht auch von columnarem Wachstum) auf dem Substrat auf. Der Durchmesser der Säulen nimmt im Bereich der Nukleation zu, so daß die Säulen aneinander stoßen. Obgleich die Säulen je nach Schichtdicke durchgehend wachsen, entsteht kein einkristallines Material. Der Raum zwischen den Kristalliten wird als Korngrenzen bezeichnet. Der Volumenanteil der Kristallite im Material kann von einigen Prozent bis nahe an 100% heranreichen.

Der Plasmaanregungsfrequenz kommt während der Herstellung der Schichten eine zentrale Bedeutung zu. So nimmt der kristalline Volumenanteil, die Kristallitgröße wie auch die Depositionsrate mit steigender Frequenz zu [Hapke95]. Amorphe Schichten werden typischerweise bei Anregungsfrequenzen bis zu 13.56MHz deponiert, wobei für die Herstellung von mikrokristallinem Material³⁹ bereits Anregungsfrequenzen von bis zu 116MHz verwendet wurden [Finger97]. Geht man von den Despositionsleistungen für amorphes Silizium aus, die im Bereich von 25-50mW/cm² liegen, resultiert dies in eine Depositionsrate für mikrokristallines Silizium von 3 bis 9nm/min je nach Anregungsfrequenz und Gaszusammensetzung. Hiermit liegt die Depositionsrate deutlich unter der von amorphem Silizium, wobei auch für amorphes Silizium mit zunehmendem Wasserstoffanteil während der Deposition die Depositionsrate sinkt [Rech96]. Was das Wachstum der Schichten anbelangt, so werden unterschiedliche Wachstumsmodelle diskutiert. Auf diese soll an dieser Stelle aber nicht eingegangen werden. Wesentlich bei allen Modellen ist der Einfluß des Wasserstoffs auf das Wachstum der Schichten. Bei diesem Vorgang wird sowohl Material auf dem Substrat abgeschieden als auch Material wieder abgetragen. Für den Abtrag an Material ist der Wasserstoff verantwortlich. Die Abtragsrate liegt allerdings unterhalb der Depositionsrate, so daß es zu einer Nettodeposition kommt. Der in das Netzwerk eingebaute

³⁸ Bei Voids handelt es sich um Hohlräume im Material, die je nach Präparationsbedingungen auftreten. Insbesondere bei Schichten, die mit hoher Depositionsleistung gewachsen werden, treten zunehmend Voids im Material auf.

³⁹ Sämtliche im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Schichten wurden bei einer Anregungsfrequenz von 94.7MHz abgeschieden.

Wasserstoff beträgt 2-7% [Finger97] und liegt damit deutlich unter den Werten, die für amorphes Silizium (10-20%) [Yang94a, Yang94b] verwendet werden.

Was den elektrischen Transport innerhalb des Materials anbelangt, so ist dieser seit vielen Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion [Carius97, Otte97]. Die für polykristallines Silizium bekannten Transportmodelle stoßen an ihre Grenzen und erlauben keine hinreichende Beschreibung des mikrokristallinen Materials. Insbesondere der Einfluß der amorphen Phase und der Korngrenzen auf den Transport ist Gegenstand kontroverser Diskussionen. In jüngster Vergangenheit zeigen zweidimensionale Simulationsrechnungen, daß der amorphen Phase eine deutlich geringere Bedeutung am Transport zukommt als bisher angenommen [Zimmer 98a, Zimmer 98b].

In Abb. 5.2 sind Absorptionsspektren von amorphem, mikrokristallinem und kristallinem Silizium dargestellt, ermittelt mit Hilfe von PDS-(Photodeflektions-spektroskopie)-Messungen und Reflexions-/Transmissionsmessungen. Im sichtbaren Spektralbereich zwischen 1.75eV und 2.75eV ist die Absorption von mikrokristallinem Silizium erhöht im Vergleich zu kristallinem Material. Dieser Effekt ist allgemein in der Literatur bekannt [Meier96]. Der Effekt läßt sich unter anderem auf den noch vorhandenen Anteil an amorpher Phase im Material zurückführen [Carius97]. Weiterhin kommt dem Effekt der Lichtstreuung innerhalb des Materials eine Bedeutung zu. Im Bereich kleiner Energien <1.75eV ist eine deutlich erhöhte Absorption des mikrokristallinen Materials verglichen mit a-Si:H zu beobachten. Diese erhöhte Absorption macht das Material interessant für photovoltaische und sensorische Anwendungen, da mit mikrokristallinem Silizium ein Absorber zu Verfügung steht, der eine hohe Absorption im infraroten Bereich besitzt. Die Bandkante für das Material wird in der Regel mit 1.1eV angegeben. Vergleicht man das $\mu\text{c-Si:H}$ mit c-Si im Subbandgap-Bereich, so ist für das $\mu\text{c-Si:H}$ ein Bandausläufer zu beobachten, der auch von amorphem Material her bekannt ist.

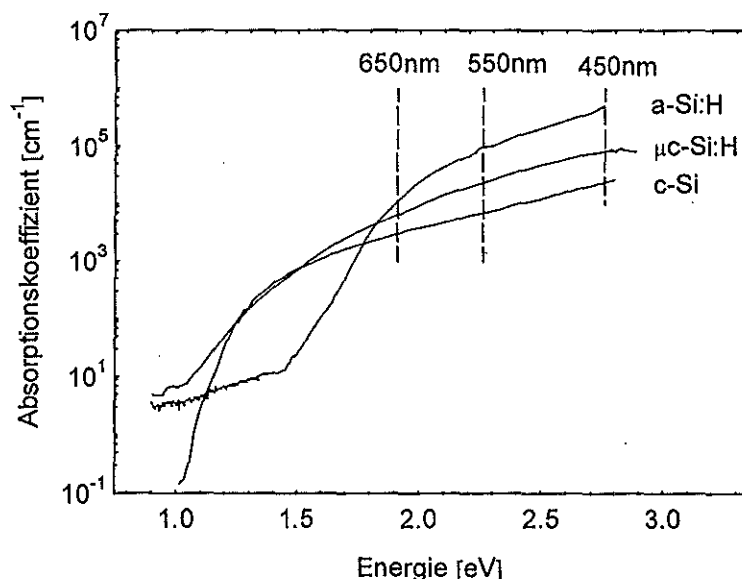


Abb. 5.2: Absorptionsspektren von amorphem (a-Si:H), mikrokristallinem ($\mu\text{c-Si:H}$) und kristallinem (c-Si) Silizium bestimmt mittels PDS⁴⁰ und Transmissions/Reflexionsdaten [Carius97].

⁴⁰ Für weitere Informationen zum Thema Photothermische Deflektionsspektroskopie sei auf die Arbeiten von Höhne [Höhne97, Höhne98] verwiesen.

5.3 Intrinsische Niedertemperaturschichten

Es ist bekannt, daß durch Absenken der Depositionstemperatur ($T < 180^\circ\text{C}$) der optische Bandabstand der amorphen Schichten leicht zunimmt. Neben dem Anstieg der optischen Bandlücke kommt es zu einer deutlichen Zunahme der Defektdichte im Material. Somit kommt es zu einem deutlichen Rückgang des Dunkel/Photoleitungsverhältnisses und zu einer Verschlechterung der strukturellen Eigenschaften. Durch die Beigabe von Wasserstoff kommt es für die niedrigen Temperaturen allerdings wieder zu einer Zunahme der Photoleitung und zu einer Verbesserung der strukturellen Eigenschaften. Weiterhin nimmt die optische Bandlücke mit Zugabe von Wasserstoff während der Deposition zu. So führt ein Absenken der Depositionstemperatur von 210°C auf 140°C unter Verwendung einer Wasserstoffverdünnung von 30 ($[\text{H}_2]/[\text{SiH}_4]=30$) zu einer Zunahme des optischen Bandabstands um ca. 0.2eV auf 1.95eV [Rech96, Wieder96]. Mit verbesserten Materialeigenschaften sind die Schichten erfolgreich in Solarzellen eingebaut worden. Die relative Alterung sowohl der Schichten als auch der Solarzellen ist durch die H_2 -Verdünnung deutlich reduziert worden.

5.4 Lichtinduzierte Alterung

In Abb. 5.3 sind die Verläufe der spektralen Empfindlichkeit für die Strukturen A, B und C im ungealterten Zustand und nach 1h, 10h und 100h Lichtalterung dargestellt. Alle drei Proben wurden bei einer Probertemperatur von 50°C ⁴¹ mit einem AM1.5 Spektrum gealtert. Bei den dick eingezeichneten Kurven handelt es sich um die Empfindlichkeiten nach 100h Alterung.

Die Maxima der spektralen Empfindlichkeit für die Struktur A im ungealterten Zustand liegen bei 460nm (-0.2V), 520nm (-2.0V) und 640nm ($+2.0\text{V}$). Mit zunehmender Degradationszeit nimmt die spektrale Empfindlichkeit ab und die Maxima verschieben sich. Mit der Degradation nach 100h hat sich der Unterschied der Maxima der spektralen Empfindlichkeit für Struktur A zwischen blau und grün von 60nm auf 20nm reduziert. So hat sich das Maxima der spektralen Empfindlichkeit für -0.2V von 460nm auf 480nm verschoben und für die Spannung -2.0V von 520nm auf 500nm . Weiterhin hat sich die Amplitude der spektralen Empfindlichkeit für die Wellenlänge von 400nm (-0.2V) um 75% reduziert. Für eine Wellenlänge von 500nm (-0.2V) liegt der Rückgang noch bei 25%. Eine Farbtrennung zwischen blau und grün ist nach 100h Alterung nicht mehr möglich. Zurückführen läßt sich dieses Verhalten für Struktur A auf einen Rückgang des elektrischen Feldes wie auch der Lebensdauer in der Top-Diode. Hervorgerufen wird dieses Verhalten durch die Zunahme an lichtinduzierten Defekten in der i-Schicht in der Top-Diode. Für geringe negative Spannungen hat die Umladung von Defekten nahe des p/i- und n/i-Interfaces einen deutlichen Einfluß auf die Feldverteilung innerhalb der Top-Diode. So werden durch den Meßstrahl während des Meßvorgangs für kleinere Wellenlängen im Bereich zwischen 350nm und 450nm hauptsächlich Defekte im Bereich des p/i-Interfaces umgeladen, was einerseits zu einem Rückgang des elektrischen Feldes im vorderen Teil der i-Schicht führt, andererseits wird das Feld im hinteren Teil der i-Schicht angehoben.

⁴¹ Die Probertemperatur von 50°C entspricht der typischen Temperatur, die ein Sensor auch unter realen Bedingungen ausgesetzt ist.

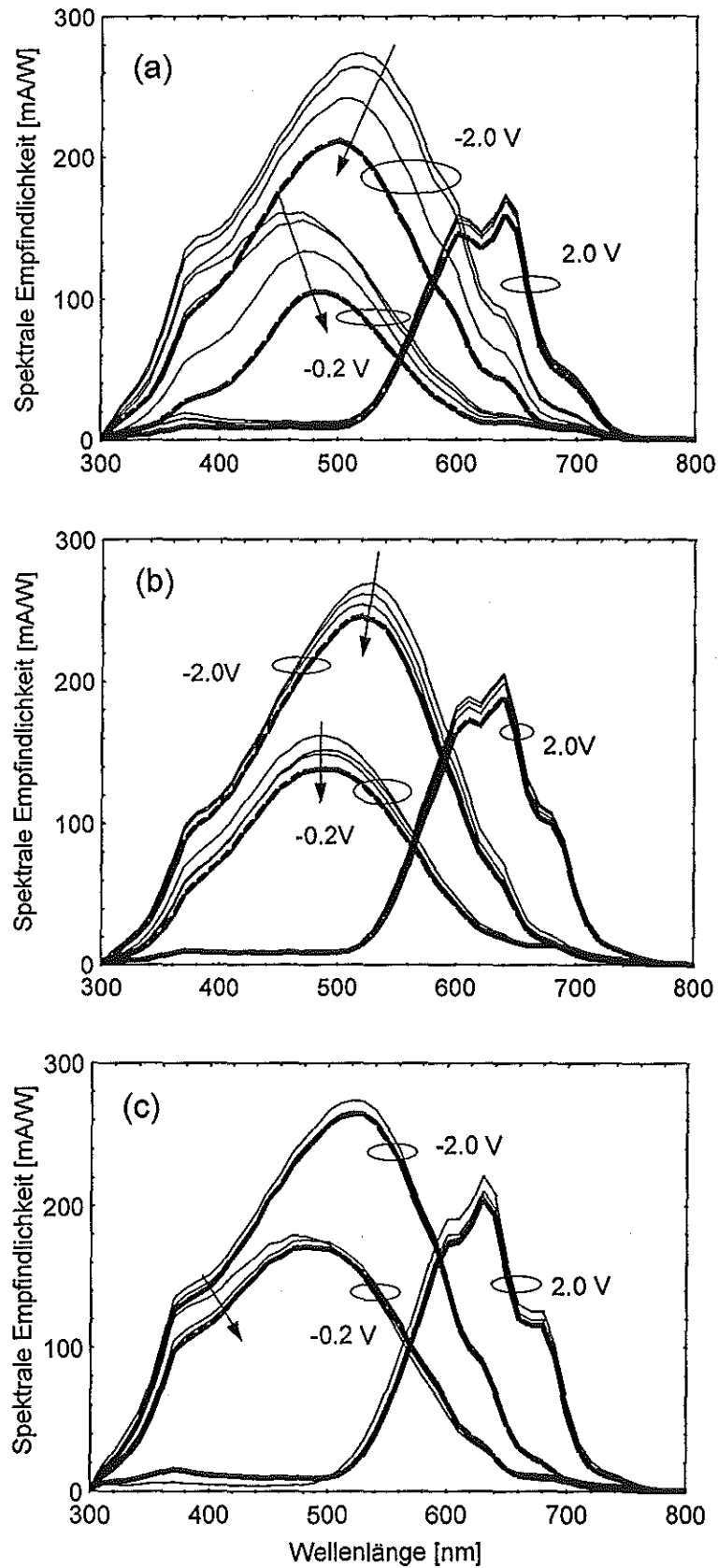


Abb. 5.3: Spektrale Empfindlichkeit der pinip Dreifarbensensoren A (a), B (b) und C (c) nach 0h, 1h 10h und 100h (dicke Linien) Lichtalterung mit einem AM1.5 Spektrum bei 50°C.

Der Rückgang des elektrischen Feldes im vorderen Bereich führt zum drastischen Rückgang der Empfindlichkeit im Bereich zwischen 350nm und 450nm. Für Meßlicht größerer Wellenlänge (grün/rot) kommt es zu einer Umladung sowohl des p/i- als auch des n/i-Interfaces, so daß die Feldstärke im Bulk der Top-Diode ansteigt. Dies hat zur Folge, daß der Rückgang der Empfindlichkeit für größere Wellenlängen weniger ausgeprägt ist. Somit sorgt die lichtinduzierte Defektzunahme für einen drastischen Rückgang der Empfindlichkeit im blauen und einem geringer ausgeprägten Rückgang im grün/roten Bereich. Ein umgekehrtes Verhalten ist für höhere negative Spannungen ($U=-2.0V$) zu beobachten. Nach der Alterung schiebt das Maximum der Empfindlichkeit zu kleineren Wellenlängen, wobei der Rückgang der Empfindlichkeit hauptsächlich für größere Wellenlängen zu beobachten ist. Für höhere negative Spannungen ist der Einfluß der Umladung auf das elektrische Feld reduziert und die Extraktion von Ladungsträgern wird durch die Anzahl an Rekombinationszentren und die Beweglichkeit der Ladungsträger limitiert. Ausgehend von einer geringeren Beweglichkeit der Löcher verglichen mit der Beweglichkeit der Elektronen, rekombinieren diese bereits im hinteren Teil der Top-Diode bei ansteigender Defektdichte und gelangen so nicht mehr zur vorderen p-Schicht. Die im vorderen Teil der i-Schicht generierten Elektronen sind hiervon weniger betroffen, so daß deren Extraktion nicht im gleichen Maße zurückgeht. Als Resultat schiebt die Grünempfindlichkeit zu kleineren Wellenlängen bei höheren negativen Spannungen ($U=-2.0V$).

Für Struktur A kann bei kleinen negativen Spannungen von einem elektronenlimitierten Transport ausgegangen werden, wohingegen bei höheren negativen Spannungen von einem löcherlimitierten Prozeß ausgegangen werden kann.

Der Austausch der Niedertemperatur i-Schicht im hinteren Teil der Top-Diode führt zu einer deutlichen Verbesserung der Stabilität des Sensors B wie in Abb. 5.3b dargestellt. Neben der verbesserten Stabilität ist für den Sensor eine reduzierte Farbtrennung im annealten (ungealterten) Zustand zu beobachten, und auch der Dunkelstrom steigt im Vergleich zu Struktur A an. Der erhöhte Dunkelstrom für negative Spannungen ist zurückzuführen auf die erhöhte thermische Generation von Ladungsträgern in Region II, bedingt durch den geringeren Bandabstand. Die verbesserte Stabilität von Struktur B kann wie folgt erklärt werden: Zum einen zeigt das mikrokristalline Material keine signifikante lichtinduzierte Alterung [Meier96], zum anderen kommt es zu keiner Abschirmung von positiv geladenen Defekten am n/i-Interface durch eine Zunahme von negativer Ladung. Das Phänomen der Abschirmung an den Interfaces beobachtet man sowohl für positive als auch negative Ladungen bei amorphen pin-Dioden [Zimmer99]. Für mikrokristalline Dioden wird dieses Phänomen nicht beobachtet. Mithin führt die Nichtabschirmung der Ladung im Bereich der Interface zu einem erhöhten elektrischen Feld in der Mitte der i-Schicht. Somit besteht keine Evidenz für die Annahme eines Elektronen limitierten Transports für hohe Spannungen. Die lichtinduzierten Defekte in Region I sind verantwortlich für die nahezu wellenlängenunabhängige Reduktion der spektralen Empfindlichkeit.

Struktur C zeigt Maxima der spektralen Empfindlichkeit (Abb. 5.3c) für 470nm ($-0.1V$), 530nm ($-2.0V$) und 630nm ($+2.0V$). An Stelle der kohlenstofflegierten Schicht in Region I ist defektärmeres a-Si:H Niedertemperaturmaterial eingebaut worden. Für diese Struktur ist weder die Farbtrennung noch der Dunkelstrom deutlich durch die Alterung beeinflusst, da beide Materialien sich durch hohe Stabilität auszeichnen. Für die Bottom-Diode der drei Strukturen ist eine Reduktion der Empfindlichkeit von 10% unabhängig von der Struktur und den verwendeten Materialien in der Top-Diode zu beobachten.

Der Einfluß des verbesserten Materials spiegelt sich ebenso im Dunkerverhalten von Struktur C wieder.

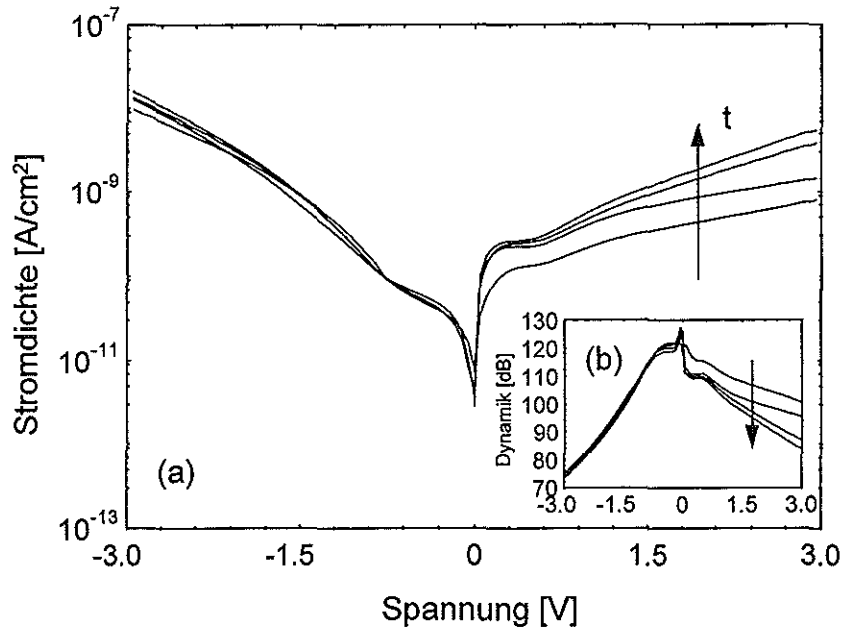


Abb. 5.4 Dunkelstrom (a) und Dynamik (b) der pi-in-p-Struktur C nach 0h, 1h 10h und 100h Lichtalterung durch ein AM1.5 Spektrum bei 50°C.

Der Verlauf des Dunkelstroms und der Dynamik ist in Abb. 5.4 dargestellt. Für positive Spannungen ist eine Zunahme des Dunkelstroms als Folge der zunehmenden Defektdichte in der Bottom-Diode zu beobachten. Der Dynamikumfang nach 100h Lichtalterung sinkt für positive Spannungen von >105dB auf >90dB. Für negative Spannungen läßt sich nach 100h nahezu kein Einfluß der Alterung beobachten. Begrenzt wird allerdings der Dynamikumfang des Sensors durch die Dynamik für die negative Spannung von -2.0V. In diesem Fall liegt die Dynamik >85dB. Hervorgerufen wird der deutliche Anstieg des Dunkelstroms von den thermisch generierten Ladungsträgern in Bereich II aufgrund des reduzierten Bandabstandes. Vergleicht man die Dynamik der Struktur C mit der Dynamik der Struktur A, so verhält sich der Dunkelstrom der Bottom-Dioden nahezu identisch. Im Gegensatz zu Struktur C ist für Struktur A ein deutlicher Anstieg des Dunkelstroms für negative Spannungen nach Lichtalterung zu beobachten. So steigt der Dunkelstrom etwa um eine Größenordnung an. Dies führt dazu, daß der Dynamikumfang für die Spannung -2.0V nach 100h Alterung auf >95dB absinkt. Somit wird die Gesamtdynamik der Struktur A vom Dynamikumfang der Bottom-Diode mit >90dB bestimmt. Obgleich die Defektdichte in der Top-Diode der Struktur A zunimmt, ist der Dunkelstrom aufgrund des größeren Bandabstands und der damit verbundenen geringeren thermischen Generation in Bereich II geringer als für Struktur C.

Eine Voraussetzung für die Generation eines RGB-Signals mit einem Zweipol-Sensor ist die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe. Ohne linear unabhängige Verläufe der spektralen Empfindlichkeit können diese nicht in ein anderes linear unabhängiges Farbsystem transformiert werden. Aufgrund der zusätzlichen Defekte im Bauelement ändert sich nicht nur die spektrale Empfindlichkeit, sondern das Bauelement reagiert auch sensibler auf eine Biaslicht induzierte Umladung der Defekte. Mithin ist nicht nur die Farbtrennung sondern auch die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe beeinträchtigt.

Zu diesem Zweck ist die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren A und C im gealterten Zustand unter Biasbeleuchtung bestimmt worden (Abb. 5.5). Die Photonenflußdichte des Biaslichts liegt bei $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, wohingegen die Intensität des Meßstrahls bei ca. $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ liegt. Die Messung der spektralen Empfindlichkeit für Struktur A zeigt einen

deutlichen Einfluß des Biaslichts auf die spektrale Empfindlichkeit. So ist für Biaslicht der Wellenlänge 450nm eine deutliche Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit zu höheren Wellenlängen zu beobachten, wohingegen sich für Biaslicht der Wellenlänge 650nm die Empfindlichkeit zu kleineren Wellenlängen verschiebt. Weiterhin ist eine Zunahme der spektralen Empfindlichkeit der Top-Diode zu beobachten. In diesem Fall ist anzunehmen, daß auch Biaslicht mit eingesammelt wird. Das Biaslicht führt zu einer Umladung von Defekten, die sich auf die elektrische Feldverteilung deutlich auswirkt. Ist vor der Degradation noch nahezu kein Einfluß des Biaslichts auf die Empfindlichkeit zu beobachten, so verdeutlicht Abb. 5.5a den Einfluß der zusätzlich erzeugten Defekte in der Top-Diode. Für blaues Biaslicht kommt es zu einer Umladung der Defektzustände im Bereich des p/i-Interfaces. Dies hat zur Folge, daß weniger Ladungsträger durch Rekombinationsverluste im Bereich der i-Schicht verloren gehen und so die Extraktion ansteigt. Für rotes Biaslicht werden die Defektzustände sowohl am p/i- als auch am n/i-Interface umgeladen.

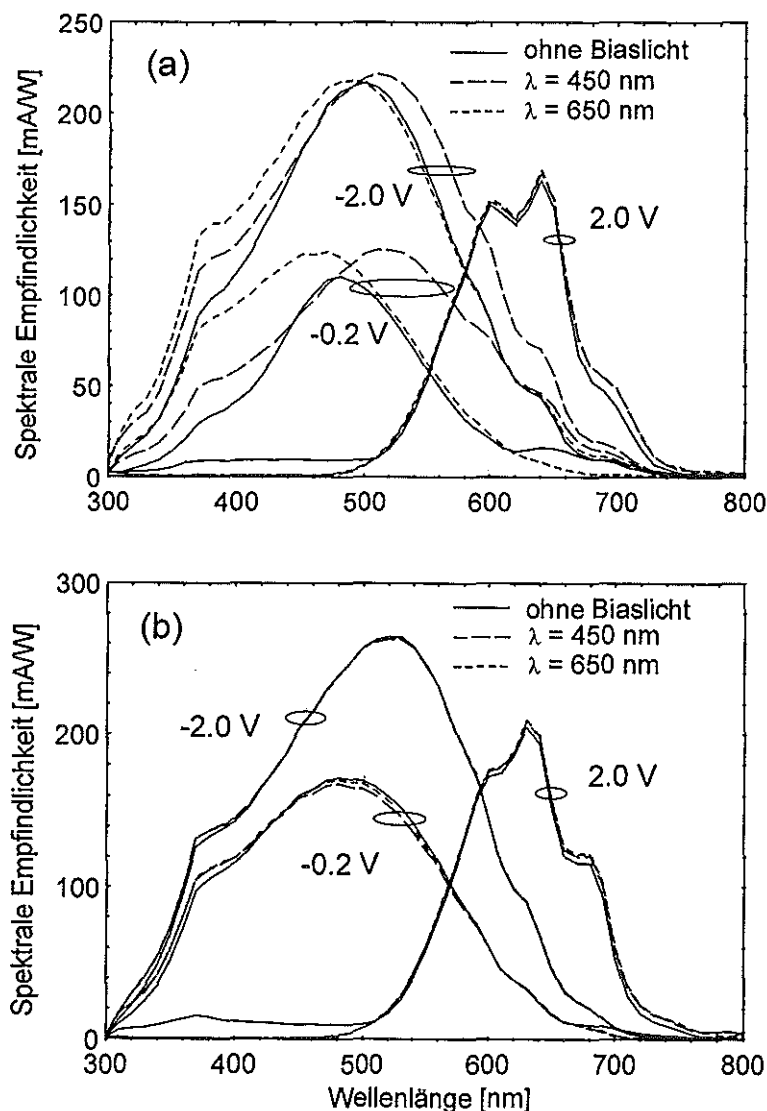


Abb. 5.5: Spektrale Empfindlichkeit der Strukturen A (a) und C (b) mit und ohne monochromatischem Biaslicht $\Phi_{bias}=10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ nach der Alterung von 100h mittels eines AM1.5 Spektrums (Leistungsdichte $100\text{mW}/\text{cm}^2$).

Für Struktur C ist nahezu kein Einfluß des Biaslichts auf die spektrale Empfindlichkeit nach 100h Alterung mit einem AM1.5 Spektrum zu beobachten. Der Sensor C besitzt eine gute Unterdrückung der Biasbeleuchtung und erlaubt somit die Generation linear unabhängiger Verläufe der spektralen Empfindlichkeit. Der Einfluß der zusätzlichen Elektronen/Loch-Paare auf das elektrische Feld und somit auf die spektrale Empfindlichkeit kann unterdrückt werden.

Setzt man die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe in der Top-Diode voraus, so ergibt sich nach Subtraktion der spektralen Verläufe für blau und grün ein Maximum für eine Wellenlänge von 550nm (Abb. 5.6a). Implementiert man in Bereich II der Top-Diode eine dickere i-Schicht, so schiebt sowohl das Maximum der spektralen Empfindlichkeit als auch das Maximum nach Subtraktion der beiden Verläufe. Dies wurde untersucht für den Einbau einer dickeren mikrokristallinen i-Schicht in Bereich II der Top-Diode von Struktur C. Der Austausch der 300nm dicken i-Schicht in Region II gegen eine 400nm dicke Schicht führt zu einer zusätzlichen Verschiebung des Maximums der Grünempfindlichkeit um 20nm von 510nm nach 530nm für eine angelegte Spannung von -2.0V.

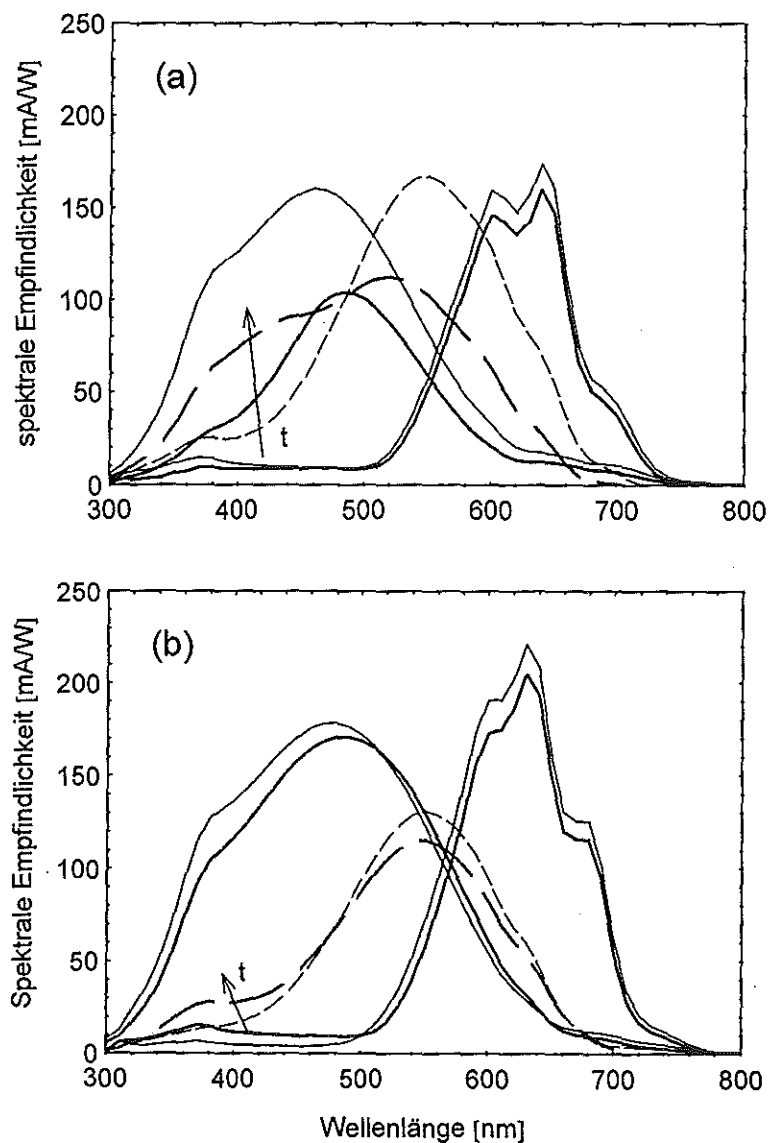


Abb. 5.6: RGB-Signal der Struktur A (a) und C (b) im ungealterten Zustand und nach 100h AM1.5 Degradation.

Die Blauempfindlichkeiten der Struktur C mit einer 300nm und 400nm dicken i-Schicht in Bereich II ist völlig identisch. Die Rotempfindlichkeit schiebt aufgrund der höheren Absorption in der Top-Diode um 10nm. Subtrahiert man die gemessenen Signale dieser Struktur, so schiebt auch das Maximum des Grünsignals aufgrund der dickeren i-Schicht in Bereich II um 20nm von 550nm nach 570nm. Ebenso nimmt die Halbwertsbreite um 20nm zu. Damit schiebt die Grün- und Rotempfindlichkeit zu stark zu höheren Wellenlängen, so daß es zu einer Verschlechterung der Farbtrennung kommt.

5.5 Transientes Verhalten

Im vorhergehenden Kapitel 4 wurde gezeigt, daß zwischen der Verzögerungszeit des Photostroms und dem eingestrahlteten Photonenfluß eine nahezu lineare Beziehung besteht. Weiterhin wurde gezeigt, daß die Realzeitaufnahme und Verarbeitung der Sensorsignale nur unter einem hohen Photonenfluß möglich ist. In diesem Kapitel wird nun das transiente Verhalten der realisierten piinip-Strukturen für den Einsatz unter hoher Beleuchtungsstärke untersucht.

Im folgenden Kapitel (Kapitel 5.5.1) soll auf das spannungsabhängige transiente Verhalten der Sensoren eingegangen werden. Hierbei werden die charakterisierten Proben einer konstanten monochromatischen Beleuchtung ausgesetzt, wobei die angelegte Spannung umgeschaltet wird. Im zweiten Teil des Kapitels (Kap. 5.5.2) wird dann auf die Photostromtransiente nach Einschalten einer optischen Anregung eingegangen. In diesem Fall ist die angelegte Spannung konstant, aber die Beleuchtungsbedingungen werden variiert.

5.5.1 Spannungsschalten

Da das RGB-Signal eines Zweipol-Bauelements zeitlich sequentiell ausgelesen wird, kommt dem transienten Verhalten eine zentrale Bedeutung zu. Im Folgenden soll das transiente Verhalten nach Wechsel der angelegten Spannung diskutiert werden.

Wie auch für die nipiin-Sensoren lassen sich die unterschiedlichen Spannungstransienten einer piinip-Struktur in drei Fälle unterteilen. So läßt sich für eine piinip-Struktur in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der nipiin-Struktur ein schneller transienter Übergang beobachten. Der Verlauf des Photostroms ist in diesem Fall gekennzeichnet durch einen exponentiellen Übergang des Stroms in seinen stationären Wert. Dieser Übergang wird im weiteren als Fall I bezeichnet. Ebenso tritt für die piinip-Struktur ein breiter Peak des Photostroms nach Wechsel der Spannung auf (Fall II). Die Verzögerungszeit liegt in diesem Fall um den Faktor 5-6 höher als für den Fall I. Dieser Verlauf ist ebenso wie der Fall I exponentiell. Darüber hinaus tritt auch hier (ebenfalls wie für eine nipiin-Struktur) ein langsamer Übergang (Fall III) des Photostroms auf. In diesen Fall kommt es zu einer Kompensation oder Überkompensation des Photostroms einer Diode durch den Photostrom der anderen Diode. Verursacht wird dies durch die antiserielle Verschaltung der beiden Dioden des Sensors. Man beobachtet schnelle Übergänge (Fall I) beim Wechsel der Spannung von blau (-0.2V) nach grün (-2.0V) und von rot (+2.0V) nach grün (-2.0V). Fall II läßt sich beobachten für die Übergänge von grün (-0.2V) nach rot (+2.0V). Fall III ist gekennzeichnet durch die Ausbildung eines Plateaus. Dieser Übergang wird beobachtet beim Wechsel von grün (-2.0V) nach rot (+2.0V) oder blau (-0.2V) und von rot (+2.0V) nach blau (-0.2V). Vergleicht man die in Kapitel 4 untersuchte nipiin-Struktur mit den hier untersuchten

Strukturen, so lassen sich Gemeinsamkeiten, aber auch deutliche Unterschiede beobachten. Für die nipiin-Struktur werden in der Bottom-Diode zwei Verläufe der spektralen Empfindlichkeit generiert. Für die piinp-Struktur erfolgt die Trennung von zwei spektral unabhängigen Verläufen in der Top-Diode. Diese veränderte Farbdetektion hat ein deutlich geändertes Bauelementdesign zur Folge.

Was die Gemeinsamkeiten der Strukturen anbelangt, so ist jeweils Fall I und III beim Wechsel der Empfindlichkeit innerhalb einer Diode zu beobachten. Für die nipiin-Struktur tritt ein schneller Übergang von grün (-0.6V) nach rot (-1.5V) auf. Wohingegen dieser Übergang für die piinp-Struktur beim Wechsel von blau (-0.2V) nach grün (-2V) auftritt. Beim Zurückschalten tritt dann für beide Strukturen ein langsamer Übergang (Fall III) auf.

In Abb. 5.7 und 5.8 sind zwei Spannungsübergänge der Struktur A für den Fall III dargestellt. Die Wellenlänge des monochromatischen Biaslichts beträgt 450nm und 600nm. Die Photostromtransiente in Abb. 5.7 wurde aufgenommen beim Wechsel der Top-Diode vom Sperr- in den Durchlaßzustand. Gleichzeitig wechselt die Bottom-Diode vom Durchlaß- in den Sperrbetrieb. In Abb. 5.8 werden Photostromtransienten nach Wechsel der Bottom-Diode vom Sperr- in den Durchlaßzustand dargestellt. Entsprechend wechselt die Top-Diode vom Durchlaß- in den Sperrbetrieb. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß in Abb. 5.7 von der Grün- zur Rot- und in Abb. 5.8 von Rot- zur Blauempfindlichkeit geschaltet wurde. Die Intensität des Biaslichts beträgt $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Zur Vereinfachung der Beschreibung ist im Folgenden die Spannung vor dem Umschalten immer mit U_1 bezeichnet und nach dem Umschalten mit U_2 . In Abb. 5.7 wird von der Grün- zur Rotempfindlichkeit des Sensors gewechselt, wobei die Spannung U_2 von 0.8V über 1.2V und 1.6V auf 2.0V erhöht wurde. Die Verzögerungszeit unter blauer (roter) Beleuchtung beträgt 1ms (1.2ms). Der Verlauf und die Form der Photostromtransienten ist nahezu unabhängig von der Wellenlänge des Lichts. Nach Durchlaufen einer Stromspitze, bestimmt durch die Zeitkonstante der Meßanordnung, stellt sich ein konstanter Wert ein, von dem aus der Strom in Abhängigkeit der Spannung in den stationären Photostrom übergeht. Die Zunahme der Spannung U_2 von 0.8V auf 2.0V führt zu einer Zunahme der Verzögerungszeit um 0.4ms. Der stationäre Photostrom bleibt von der Änderung der Spannung U_2 nahezu unbeeinflusst.

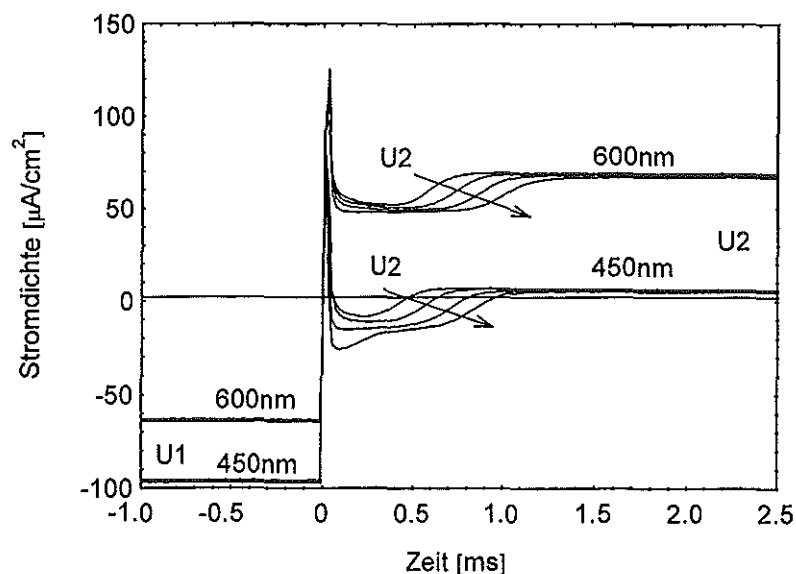


Abb. 5.7: Transiente Photostromantwort der Struktur A im ungealterten Zustand nach Wechsel der angelegten Spannung von $U_1 = -2.0V$ nach $U_2 = 0.8V, 1.2V, 1.6V$ und $2.0V$ für monochromatisches Licht der Wellenlänge 450nm und 600nm. ($10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

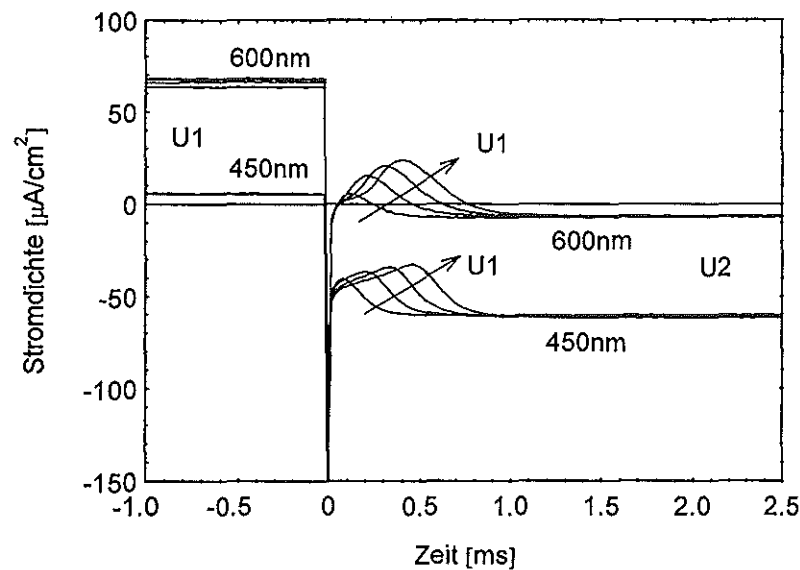


Abb. 5.8: Transiente Photostromantwort der Struktur A im ungealterten Zustand nach Wechsel der angelegten Spannung von $U_1=0.8V$, $1.2V$, $1.6V$ und $2.0V$ nach $U_2=-0.2V$ für monochromatisches Licht der Wellenlänge $450nm$ und $600nm$. ($10^{15} cm^{-2} s^{-1}$).

Dies belegt, daß bereits für geringe Spannungen wie $0.8V$ nahezu alle Ladungsträger aus der Bottom-Diode extrahiert werden. Eine weitere Zunahme der Spannung führt lediglich zu einem geringen Anwachsen des stationären Photostroms.

Ein analoges Verhalten ist für den Übergang von rot nach blau zu beobachten. Bei diesem Übergang handelt es sich ebenfalls um Fall III. Im Gegensatz zu Abb. 5.7, in der die Spannung U_2 variiert wurde, wird für Abb. 5.8 die Spannung U_1 von $0.8V$ über $1.2V$ und $1.6V$ auf $2.0V$ erhöht. Für diesen Übergang nimmt die Verzögerungszeit des Photostroms um $0.4ms$ von $0.4ms$ auf $0.8ms$ zu. Auch für diesen Übergang ist eine Umkehr des Vorzeichens des Photostroms zu beobachten, bevor der stationäre Wert erreicht wird. In Abb. 5.7 ist die Stromumkehr für die Beleuchtung mit blauem Licht ($450nm$) zu beobachten und in Abb. 5.8 für die Beleuchtung mit rotem Licht ($600nm$). Aus beiden untersuchten Schaltfolgen läßt sich nun ableiten, daß eine Reduktion der Spannung zur Detektion der Rotempfindlichkeit zu einer deutlichen Verbesserung des zeitlichen Verhaltens führt. Betrachtet man allerdings die zwei möglichen Schaltfolgen zur Generation einer RGB-Folge, so ergibt sich entweder eine $G \rightarrow B \rightarrow R \rightarrow G$ - oder eine $G \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow G$ -Schaltsequenz. Vergleicht man diese beiden Möglichkeiten, so beinhalten die $G \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow G$ -Folge zwei Übergänge nach Fall III, wohingegen für die $G \rightarrow B \rightarrow R \rightarrow G$ -Folge nur ein Übergang nach Fall III auftritt. Die $G \rightarrow B \rightarrow R \rightarrow G$ -Folge besitzt also eine geringere Gesamtverzögerungszeit, da der Übergang III der jeweils zeitlich limitierende Übergang ist. Der ermittelte Vorteil einer gesenkten Spannung zur Detektion des Rotanteils kann bei dieser Schaltsequenz nicht genutzt werden, da beide Fälle gemeinsam bei der Generation einer $G \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow G$ -Folge auftreten.

Grundsätzlich läßt sich an dieser Stelle festhalten, daß die transienten Übergänge der Strukturen A, B und C nahezu identisch sind. Obwohl zwar die Schichtdicke der Top-Diode von Struktur A im Vergleich zu Struktur B und C um $150nm$ verkürzt ist, wird der Rückgang der Schichtdicke durch Verwendung von Material mit einer geringeren Dielektrizitätskonstanten nahezu wieder ausgeglichen. Mithin sind die geometrischen Kapazitäten der drei Strukturen nahezu identisch.

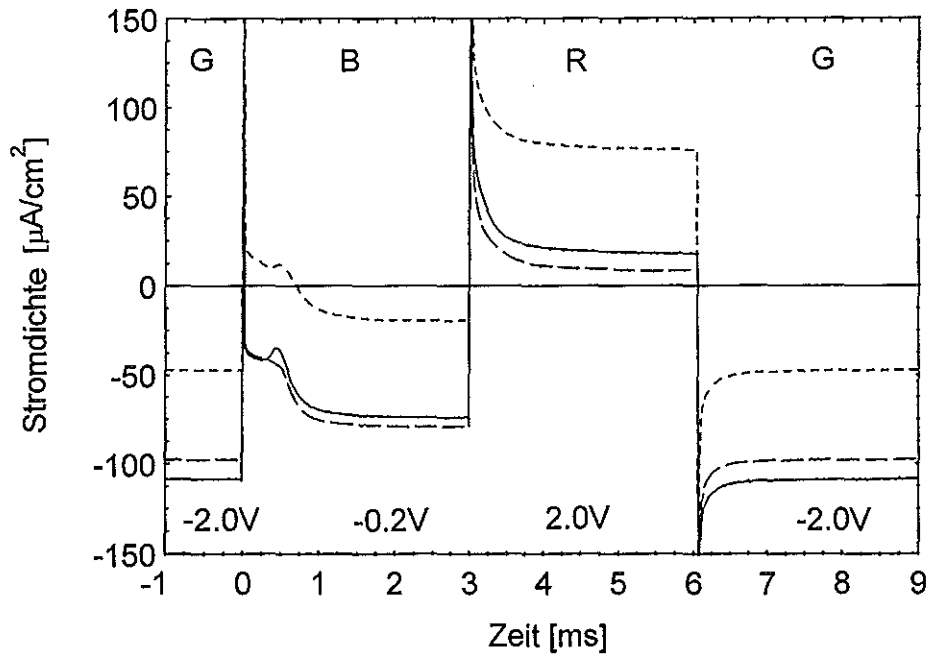


Abb. 5.9: Optimierte RGB-Schaltfolge der Struktur C für die Wellenlängen 450nm (durchgezogene Linie), 550nm (grob gestrichelte Linie) und 600nm (fein gestrichelte Linie). Die Beleuchtungsintensität beträgt $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

In Abb. 5.9 ist nun eine optimierte G→B→R→G-Schaltfolge für die Struktur C dargestellt. Auch diese Schaltfolge ist unter einer Photonenflußdichte von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aufgenommen worden. Der schnelle Übergang (Fall I) ist von rot nach grün zu beobachten, wohingegen der Fall II von blau nach rot auftritt. Der limitierende Fall III tritt beim Wechsel von grün nach blau auf. Vergleicht man für diese drei Übergänge die Anstiegszeiten und definiert die Anstiegszeit als Zeit zwischen dem Wechsel der angelegten Spannung und dem Erreichen von 90% des stationären Werts, so ergeben sich folgende Werte: Für den Übergang von rot nach grün, also Fall I, liegt die Anstiegszeit bei $200 \mu\text{s}$. Für Fall II von blau nach rot liegt die Anstiegszeit schon 5 fach höher als für Fall I. Für Fall III, dem Übergang von grün nach blau, kommt es zur Ausbildung eines Plateaus oder auch lokalen Maximums. Für diesen Fall liegt die Anstiegszeit für einen Photonenfluß von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 1.2ms.

Fall III soll anhand des Übergangs von grün nach blau in Abb. 5.10 näher untersucht werden. Mithin werden alle möglichen Übergänge von Fall III für die untersuchten piinip-Strukturen in diesem Kapitel dargestellt (Abb. 5.7, Abb. 5.8 und Abb. 5.10). Betrachtet wird in Abb. 5.10 der Übergang von grün nach blau für unterschiedliche Spannungen U_1 . Variiert wurde U_1 im Bereich von -1.0V nach -2.0V und -3.0V für die monochromatische Beleuchtung mit einer Wellenlänge von 500nm. Auch für diesen Übergang nimmt die Verzögerungszeit mit zunehmender Spannung U_1 zu. Hierbei liegt die Zunahme der Verzögerungszeit für einen Anstieg von U_1 um $\Delta U = 1\text{V}$ bei 250-300 μs . Die Form des Photostromverlaufs ändert sich mit steigender Spannung U_1 nicht.

Im Folgenden werden für den transienten Übergang des Photostroms von U_1 nach U_2 drei feste Zeitpunkte betrachtet. Das Verhalten des Sensors wird für die drei Zeitpunkte mit dem Verhalten der beiden Teildioden verglichen. Das Verhalten der Top- und Bottom-Diode ist in Abb. 5.11a und Abb. 5.11b schematisch dargestellt. Zum Zeitpunkt 1 ($t < 0\text{s}$) befindet sich der Sensor im stationären Zustand. Die Top-Diode ist in Sperrbetrieb und die Bottom-Diode in Durchlaßbetrieb. Es liegt eine hohe Sperrspannung über der Top-Diode an, so daß nahezu alle photogenerierten Ladungsträger aus der Top-Diode extrahiert werden können.

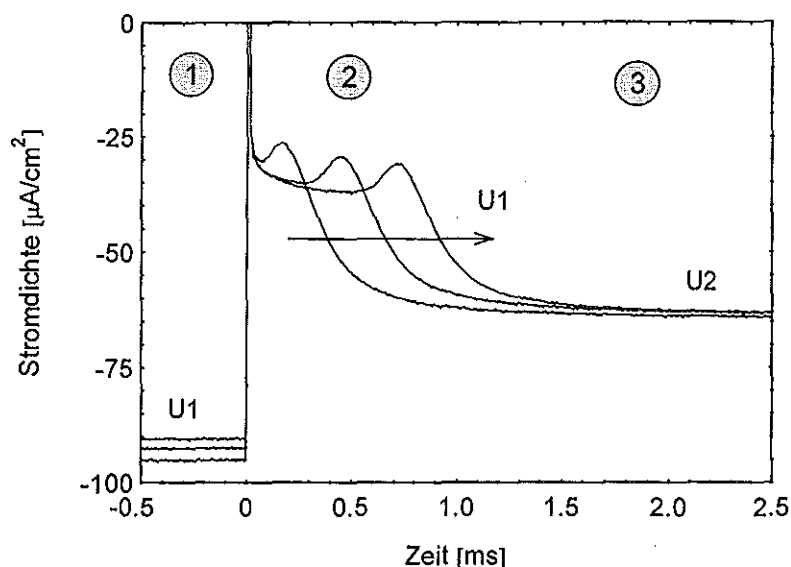


Abb. 5.10: Transienter Photostrom nach Wechsel der angelegten Spannung von $U_1 = -1.0\text{V}$, -2.0V und -3.0V nach $U_2 = -0.2\text{V}$ für die Wellenlänge 500nm . Die Beleuchtungsintensität beträgt $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Zum Zeitpunkt 2 ($0 < t < 1.5\text{ms}$) befindet sich der Sensor im Bereich der Kompensation der Photoströme von Top- und Bottom-Diode. Der Zeitpunkt 3 ($t > 1.5\text{ms}$) entspricht dann wieder dem stationären Zustand, den das Bauelement nach dem Schalten erreicht. Zum Zeitpunkt 1 liegt eine Spannung von $U_1 = -2.0\text{V}$ über dem Bauelement an. Diese teilt sich zu ca. -1.4V und $+0.6\text{V}$ auf die Top- und Bottom-Diode auf. Die Top-Diode extrahiert nahezu alle photogenerierten Ladungsträger, wohingegen die Bottom-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird. Erfolgt das Umschalten der Spannung auf $U_2 = -0.2\text{V}$, so wird das Verhalten der Teildioden bestimmt durch ihre I/U -Kennlinien. Im stationären Zustand $U_2 = -0.2\text{V}$ liegt dann über der Top-Diode eine Spannung von 0.4V an, wohingegen über der Bottom-Diode, wie auch schon zum Zeitpunkt 1, eine Spannung von 0.6V anliegt. Die Spannungen über der Top- und Bottom-Diode sind allerdings während des Umschaltvorgangs nicht konstant.

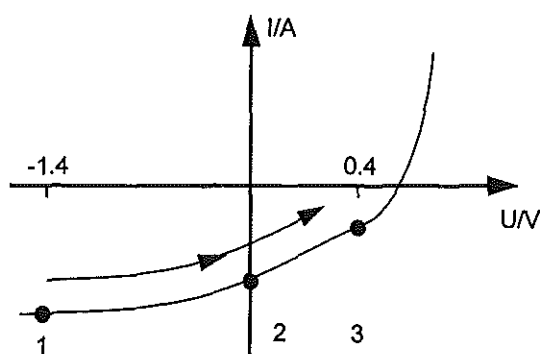


Abb. 5.11a: Schematischer Verlauf der I/U -Kennlinie der Top-Diode für eine piinip -Struktur. Die eingezeichneten Zeitpunkte 1, 2 und 3 korrespondieren mit den Zeitpunkten in Abb. 5.10.

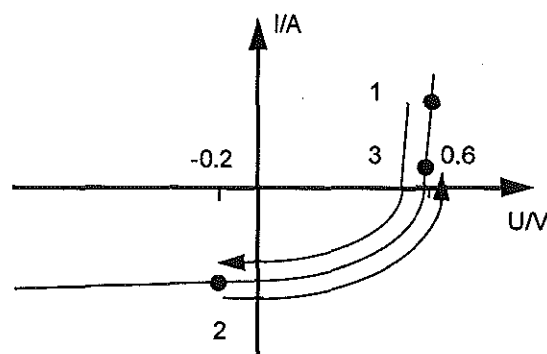


Abb. 5.11b: Schematischer Verlauf der I/U -Kennlinie der Bottom-Diode für eine piinip -Struktur. Die eingezeichneten Zeitpunkte 1, 2 und 3 korrespondieren mit den Zeitpunkten in Abb. 5.10.

Da als Randbedingung die extern angelegte Spannung nach dem Spannungswechsel konstant ist $U(t > 0s) = \text{konst.} = -0.2V$, verschiebt sich der Arbeitspunkt der Top-Diode von Punkt 1 durch den aktiven Quadranten zu Punkt 2. Erreicht die Top-Diode den Kurzschlußpunkt, so ist dies der Punkt maximaler Extraktion für die Bottom-Diode, da für diesen Zeitpunkt die Spannung über der Bottom-Diode auf $-0.2V$ absinkt.

Das lokale Maximum des Photostroms für den Sensor in Abb. 5.10 ist auf das unterschiedliche Extraktionsverhalten der beiden Teildioden zurückzuführen. Dies wird durch einen unterschiedlichen Verlauf der I/U-Kennlinie in Abb. 5.11a und Abb. 5.11b berücksichtigt. Eben dieser Unterschied in der I/U-Kennlinie erlaubt die Farbtrennung zwischen blau und grün in der Top-Diode. Erst für höhere Sperrspannungen werden die Ladungsträger aus Bereich II der Top-Diode extrahiert. Somit werden im Kurzschlußfall der Top-Diode bereits deutlich weniger Ladungsträger extrahiert als im Sperrbetrieb. Die Bottom-Diode zeigt im Vergleich zur Top-Diode eine deutlich bessere Extraktion im Kurzschlußfall.

Berücksichtigt man nun die einzelnen Verzögerungszeiten, so läßt sich die Gesamtverzögerungszeit für einen RGB-Auslesevorgang ermitteln. Für die optimierte Schaltfolge in Abb. 5.10 liegt die Verzögerungszeit bei ca. 2.5ms unter Berücksichtigung einer Beleuchtungsintensität von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Entsprechend läßt sich nun für andere Beleuchtungsintensitäten die Verzögerungszeit des Sensorsignals nach Wechsel der angelegten Spannung ermitteln. Dies wurde für die Struktur C unter Verwendung der drei monochromatischen Wellenlängen 450nm, 500nm und 600nm durchgeführt. Vergleicht man die drei Wellenlängen, so ergibt sich die beste Ausleserate für die Wellenlänge von 600nm, da in diesem Fall die Generation im Bauelement am homogensten ist. Über einen Bereich von 5 Größenordnungen wurde so die Ausleserate des Sensors ermittelt. Geht man von der maximal verwendeten Beleuchtungsintensität von $10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen aus, so ergibt sich eine Verzögerungszeit für eine RGB-Schaltfolge von 50 μs . Die Videorate für ein Fernsehbild liegt bei 40ms. Berücksichtigt man diese Randbedingung, so ergibt sich eine untere Grenze der Beleuchtungsintensität von $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen, für die der Photostrom noch seinen stationären Wert erreicht. Allerdings wurde in Abb. 5.12 keine Integrationszeit für den Sensor berücksichtigt.

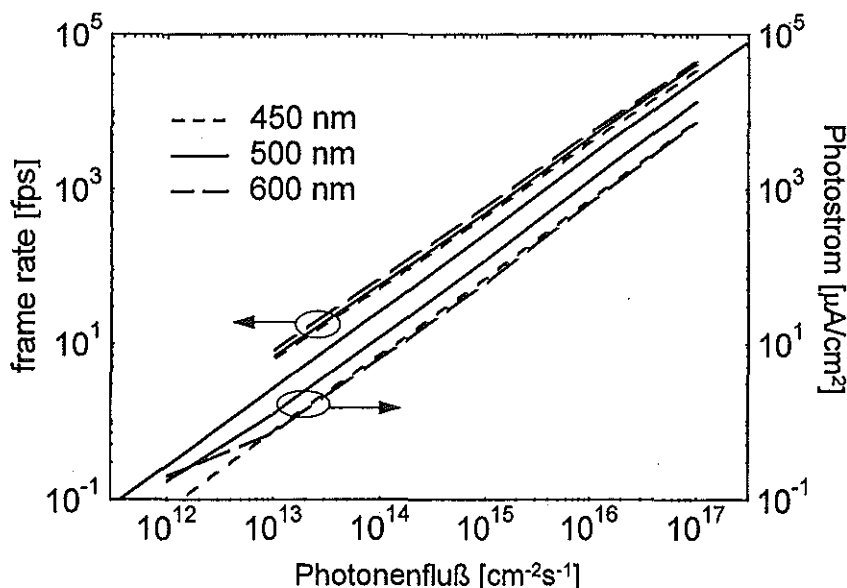


Abb. 5.12: Ausleserate und Photostrom des Sensors C als Funktion des Photonenflusses für die drei Wellenlängen 450nm, 500nm und 600nm.

Die aufgetragene Ausleserate berücksichtigt nur die reine Verzögerungszeit des Sensors. Die Berücksichtigung einer intensitätsadaptierten Integrationszeit führt im Idealfall zur parallelen Verschiebung der Kennlinie hin zu kleineren Ausleseraten oder alternativ zu einer Verschiebung der Kennlinie bei konstanter Ausleserate zu höheren Intensitäten. Die in Abb. 5.12 eingezeichnete Ausleserate stellt die Grenze dar, bis zu welcher die Farbinformation in Abhängigkeit der Intensität noch exakt ermittelt werden kann. Bewegt man sich mit den gewählten Beleuchtungsbedingungen und der Ausleserate in den Bereich links der Geraden, so ist eine Farbdetektion nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt möglich. Liegt der gewählte Arbeitspunkt des Sensors rechts der eingezeichneten Verläufe der Ausleserate ist in jedem Fall eine Detektion der Farbinformation möglich.

Weiterhin aufgetragen ist in Abb. 5.12 der Photostrom des Sensors als Funktion des Photonenflusses. Auch in diesem Fall ist eine lineare Korrelation über mehr als 5 Größenordnungen zu beobachten. Der piinip-Sensor besitzt zwar kein besseres transientes Verhalten als eine nipiin-Struktur, jedoch läßt sich für den piinip-Sensor der Betriebsbereich zu höheren Intensitäten hin erweitern.

So wie sich für das Spannungsschalten Parallelen zwischen dem Verhalten eines nipiin- und eines piinip-Sensors aufzeigen, so soll im Folgenden das Verhalten nach optischer Anregung mit einem Lichtpuls auf Gemeinsamkeiten zum nipiin-Sensor untersucht werden.

5.5.2 Lichtschalten

Geht man vom Verhalten einer nipiin-Struktur aus, so ist eine Umkehr des Vorzeichens des Photostroms nach optischer Anregung mit einem Lichtpuls zu beobachten, wenn die optische Generation vorrangig in der in Vorwärtsrichtung betriebenen Diode stattfindet. Dies ist der Fall, wenn ein nipiin-Sensor mit blauem Biaslicht angeregt wird, aber die angelegte Spannung negativ ist. Für die Anregung mit rotem Biaslicht stellt sich eine Umkehr des Photostroms ein, wenn die Farbspannung positiv ist und die Top-Diode in Sperrichtung betrieben wird. Für die bisher in diesem Kapitel untersuchten piinip-Sensoren läßt sich ein analoges Verhalten beobachten. Wird der Sensor mit blauem Biaslicht optisch angeregt, so stellt sich für positive Spannungen eine Umkehr des Photostroms ein. Für die optische Anregung mit rotem Biaslicht stellt sich für negative Farbspannungen eine Umkehr des Photostroms ein.

Die entsprechenden Details sollen nun anhand der Abb. 5.13a und 5.13b näher dargestellt werden. Aufgetragen ist in Abb. 5.13a und 5.13b jeweils die Photostromantwort der Strukturen A (dünne Linien) und C (dicke Linien) nach optischer Anregung mit den Wellenlängen 480nm (a) und 650nm (b). Die Intensität beträgt in beiden Fällen ca. $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Wie auch schon beim Wechsel der angelegten Spannungen im Kapitel 5.5.1 ergeben sich für die gewählten Beleuchtungsbedingungen Verzögerungszeiten im Bereich von 10^{-3} s . Im Fall der optischen Anregung mit rotem Biaslicht erfolgt der Übergang in den stationären Zustand für die Strukturen A und C schneller als für eine Anregung mit einer kürzeren Wellenlänge (480nm). Ähnliches ließ sich bereits für das Spannungsschalten an Struktur A und C in Kapitel 5.6.1 beobachten. Je höher und homogener die Generation in den i-Schichten, desto geringer ist die Verzögerungszeit der Sensoren. Vergleicht man die beiden untersuchten Strukturen A und C, so verhalten sich die Bauelemente, wie schon für das Spannungsschalten dargestellt, auch im Fall der Photostromantwort nach optischer Anregung vergleichbar.

Vergleicht man das Verhalten der piinip-Struktur mit dem Verhalten der nipiin-Struktur in Abb. 4.15 und Abb. 4.16, so verhält sich die piinip-Struktur für eine optische Anregung mit blauem Licht vollständig analog wie eine nipiin-Struktur unter roter Anregung.

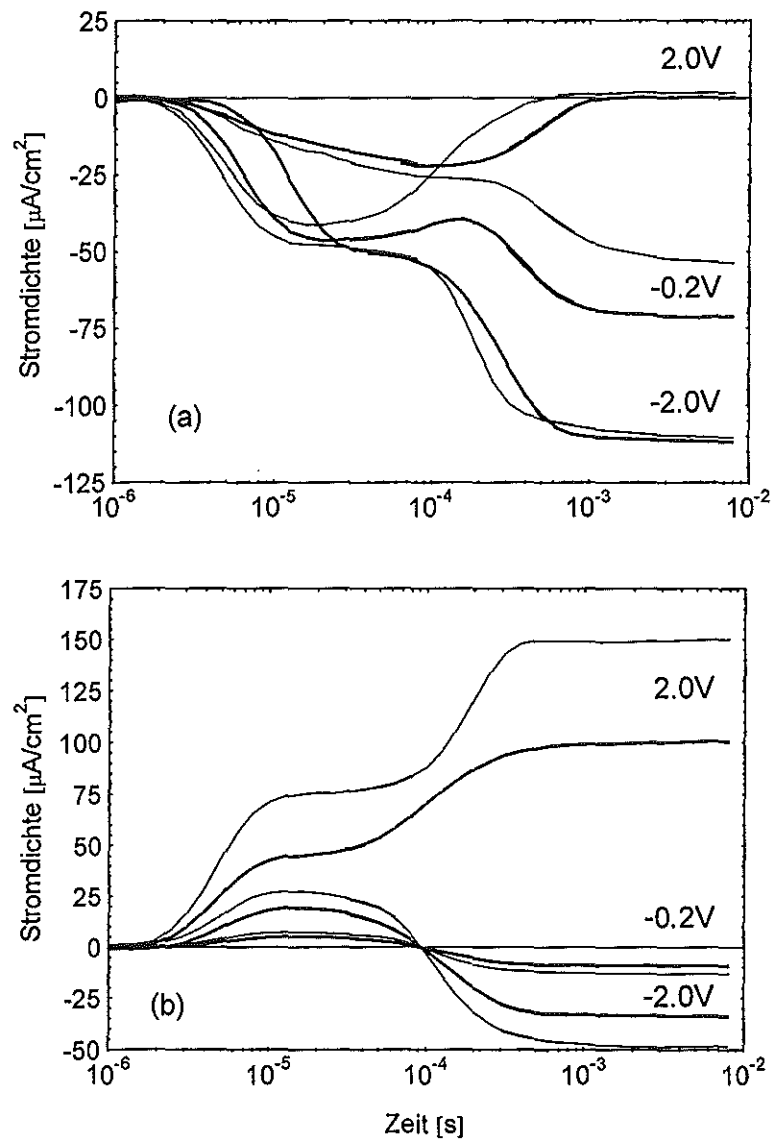


Abb. 5.13: Transiente Photostromantwort der Strukturen A (dünne Linie) und C (fette Linie) im ungealterten Zustand für die Wellenlängen 480nm (a) und 650nm (b). Die Intensität der optischen Anregung beträgt ca. $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

Sogar das lokale Maximum des transienten Photostroms für die Grünspannung ist für beide Strukturen analog zu beobachten. Für beide Strukturen tritt also eine Umkehr des Photostroms oder ein verzögerter Anstieg des Photostroms auf. Regt man eine nipiin-Struktur hingegen mit blauem Biaslicht an, so verhält sich der nipiin-Sensor wie eine piinip-Struktur bei roter Anregung.

5.6 Zusammenfassung und Vergleich von nipiin- und piinip-Strukturen

In diesem Teil der Arbeit sollen die in Kapitel 4 und 5 untersuchten bipolaren Sensoren (nipiin- und piinip-Struktur) verglichen werden. Das Detektionsprinzip beider Sensoren basiert auf der Trennung zweier spektraler Verläufe in einer der beiden Dioden der antiseriellen Anordnung. Neben der Generation der spektralen Empfindlichkeit müssen diese noch linear unabhängig sein. Dies ist ein wesentliches Kriterium, das bei der Entwicklung und

Optimierung der Bauelemente berücksichtigt werden muß. Diese Randbedingungen setzen der Bauelementoptimierung enge Grenzen. Eingeschränkt wird das Bauelementdesign der beiden Strukturen weiterhin vom transienten Verhalten. Obgleich in diesem Kapitel ein Sensor vorgestellt wurde, der ein deutlich verbessertes Verhalten nach Lichtalterung zeigt und somit auch im Bereich höherer Intensitäten eingesetzt werden kann, hat der Einsatz von mikrokristallinem Silizium und amorphem Niedertemperaturmaterial für die hier untersuchten Bauelemente zu keiner wesentlichen Verbesserung des transienten Verhaltens geführt. Lediglich der Betriebsbereich konnte zu höheren Intensitäten ausgeweitet werden. Hierbei soll nicht unterstellt werden, daß die Verwendung von mikrokristallinem Silizium und Niedertemperaturmaterial grundsätzlich zu keiner Verbesserung des transienten Verhaltens führt. Vielmehr soll hervorgehoben werden, daß das transiente Verhalten der piinip-Struktur, wie auch das Verhalten der nipiin-Struktur vom Bauelementdesign bestimmt wird. Wie für die nipiin-Struktur gezeigt, wird das transiente Verhalten vom Ausräumen und Auffüllen der mittleren dotierten Schicht bestimmt.

Zusammenfassend läßt sich zeigen, daß die piinip-Struktur im direkten Vergleich zur nipiin-Struktur Vorteile aufweist. Diese sollen im weiteren anhand der wesentlichen Bauelementparameter zusammengefaßt werden.

Farbtrennung:

Neben der Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der unterschiedlichen Absorbermaterialien wird das Design des Bauelements von den Transporteigenschaften der einzelnen Absorber bestimmt. Dies gilt für die piinip- und die nipiin-Struktur in gleichem Maße. Die höheren Anforderungen werden in beiden Fällen an die Diode gestellt, in der zwei Verläufe der spektralen Empfindlichkeit generiert werden. Dies ist für die nipiin-Struktur die Bottom-Diode und für die piinip-Struktur die Top-Diode. Für die piinip-Struktur kann somit die Bottom-Diode unabhängig von der Top-Diode optimiert werden, da diese optisch vor der Bottom-Diode liegt. Dies ist für eine nipiin-Struktur nicht möglich. Eine Modifikation der Top-Diode hat immer auch zur Folge, daß das Design der Bottom-Diode überdacht werden muß, da die Top-Diode als optischer Filter für die Bottom-Diode wirkt. Dies eröffnet bei der Entwicklung oder Optimierung einer piinip-Struktur mehr Freiheitsgrade.

Lineare Unabhängigkeit:

Die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe wird dadurch beeinträchtigt, daß sich der Verlauf des elektrischen Feldes innerhalb der Diode, die zwei Verläufe der spektralen Empfindlichkeit generiert, bedingt durch Umladungen von Defektzuständen, ändert. Als Konsequenz sollte Material mit einer möglichst geringen Defektdichte in das Schichtsystem implementiert werden. Somit stehen weniger Defekte zur Umladung zur Verfügung, so daß die Beeinflussung des elektrischen Feldes möglichst gering ist. Dies ist allerdings nicht möglich, da das Detektionsprinzip darauf beruht, daß man Material mit unterschiedlichem Transportverhalten in die Schichtfolge einbringt, wobei das Transportverhalten wiederum von der Defektdichte im Material bestimmt wird. Dies hat zur Folge, daß vermeintlich „schlechteres“ Material eingebaut werden muß. Dies gilt sowohl für eine nipiin- als auch eine piinip-Struktur. Berücksichtigt man weiterhin die Möglichkeiten des Bauelementdesigns, so sind die Verläufe der spektralen Empfindlichkeit dann linear unabhängig, wenn die

Schichtdicke des Absorbers möglichst gering ist und der Unterschied des $\mu\tau$ -Produkts möglichst groß ist.

Dynamik:

Sowohl die Dynamik der piinip- als auch der nipiin-Struktur ist sehr hoch. Mithin existieren keine Vor- oder Nachteile für die eine oder andere Struktur. Als Randbedingung ist hier lediglich der Einsatz von mikrokristallinem Silizium zu sehen. Aufgrund der erhöhten thermischen Generation steigt der Dunkelstrom deutlich an und als Folge sinkt die Dynamik. In diesem Bereich sind weitere Optimierungen notwendig. Dies betrifft sowohl das Material als auch die Interface innerhalb des Schichtsystems.

Transientes Verhalten:

Ein Vergleich der beiden Strukturen hat keinen Vorteil für eine piinip-Struktur gezeigt, obwohl die geometrische Anordnung einen leichten Vorteil für die piinip-Struktur hätte vermuten lassen. Durch die deutlich reduzierte Degradation ist aber mit einer piinip-Struktur der Einsatz unter deutlich höheren Beleuchtungsintensitäten (Faktor 100) möglich.

Lichtinduzierte Degradation:

Die piinip-Struktur C zeigt die bisher besten Eigenschaften nach Degradation aller untersuchten Strukturen. Zwar zeigt die Struktur noch einen leichten Einfluß der lichtinduzierten Alterung auf die spektralen Verläufe des Bauelement, jedoch sind diese fast wellenlängenunabhängig. Damit nimmt die spektrale Empfindlichkeit nahezu linear um etwa 10% ab. Ein solcher Rückgang hat jedoch keine Auswirkungen bezüglich der Farberkennung.

Abschließend läßt sich sagen, daß eine piinip-Struktur Vorteile im Vergleich zu einer nipiin-Struktur besitzt. Insbesondere der Einsatz von mikrokristallinem Silizium hat gezeigt, daß ein solches Zweipol-Bauelement noch verbessert werden kann. Dem Nachteil, daß bipolaren Sensoren nur zeitlich sequentiell ausgelesen werden können, steht der Vorteil einer einfachen Bauelementstruktur gegenüber. Dies gilt für alle im Rahmen dieser Arbeit realisierten Zweipol-Sensoren.

Kapitel 6

Unipolare Sensoren

Nachdem in Kapitel 4 und 5 die Funktionsweise von bipolaren Sensoren am Beispiel von nipiin- und piinip-Sensoren vorgestellt wurde, soll das Detektionskonzept in diesem Kapitel auf unipolare Sensoren erweitert werden. Hierbei soll gezeigt werden, daß die Detektion dreier Verläufe der spektralen Empfindlichkeit mit einer pin-Diode, die eine dreigeteilte Absorberschicht besitzt, möglich ist. Darüber hinaus wird die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe untersucht. Neben dem einfachen Schichtaufbau einer pin-Struktur besitzt diese Struktur eine hohe Kompatibilität zur CMOS-Technologie, da sowohl der Sensor als auch eine mögliche CMOS-Ausleseschaltung, auf der der amorphe Sensor integriert werden kann, mit einer unipolaren Betriebsspannung arbeitet. Die Versorgungsspannung für CMOS-Bildsensoren liegt in der Regel bei 5V oder bei der neuen CMOS-Standardspannung von 3.3V. Vereinzelt sind auch Publikationen bekannt, bei denen die Betriebsspannungen bis auf 1.8V abgesenkt wurden [Ogiers97]. Bei diesen geringen Versorgungsspannungen ist es schaltungstechnisch aufwendig, Spannungen für einen Sensor in der Größenordnung von $\pm 3V$ bereit zu stellen, insbesondere wenn der Detektor auf einer kristallinen Schaltung integriert wird. Im Gegensatz zu unipolaren Sensoren benötigen bipolare Sensoren auch bipolare Betriebsspannungen, so daß im direkten Vergleich unipolare Sensoren unter dem Gesichtspunkt der Betriebsspannung Vorteile bieten.

Der technologische Vorteil eines unipolaren Sensors liegt ebenso wie für einen bipolaren Sensor in der einfacheren Integrierbarkeit der Sensorschichtfolge auf einer kristallinen oder amorphen Ausleseelektronik und damit verbunden der einfacheren Kontaktierung mit der Peripherieelektronik. Lediglich der Rückkontakt jedes Pixels eines Zweipol-Sensoren muß mit der Ausleseelektronik verbunden werden. Der Frontkontakt jedes Pixels wird als gemeinsamer Kontakt realisiert. Die Anforderungen an die Ausleseelektronik für bipolare und unipolare Zweipol-Bauelemente unterscheiden sich nicht.

Darüber hinaus belegt die Anzahl aktueller Publikationen auf diesem Gebiet der amorphen Dünnschichtsensorik das zunehmende Interesse an unipolaren Sensorstrukturen [Neidlinger96, Stiebig96c].

Was die Pixelkopplung oder das Übersprechen an einem unstrukturierten Sensorarray⁴² anbelangt, so haben die experimentellen Untersuchungen von Blecher [Blecher95] und Rössinger [Rössinger97] gezeigt, daß der mittleren dotierten Schicht in einer

⁴² Ein Sensorarray wird als unstrukturiert bezeichnet, wenn lediglich der Rückkontakt die Pixelfläche definiert und das Dünnschichtsystem zwischen den Rückkontaktflächen nicht entfernt wurde.

nipiin- und auch einer piinip-Struktur eine zentrale Bedeutung beigemessen werden muß. So kommt es beispielsweise für einen bipolaren Sensor zu einer Potentialverschiebung⁴³ in der dotierten Schicht, wenn zwei benachbarte Pixel eines Sensorarrays unterschiedlich beleuchtet werden. Zur Vermeidung dieser Kopplung muß das Dünnschichtsystem strukturiert werden. Als Strukturierung wird das Freilegen der einzelnen Pixel eines Sensorfeldes bezeichnet. Die Strukturierung erfordert zusätzliche Prozeßschritte, die - wenn möglich - vermieden werden sollten. Ziel der Strukturierung ist die Definition einer exakten Pixelfläche und damit verbunden die optische und optoelektronische Entkopplung einzelner Pixel innerhalb eines Sensorfeldes. Für eine pin-Struktur tritt der Effekt der Potentialverschiebung aufgrund der einfacheren Schichtfolge nicht auf⁴⁴. Da ein pin-Sensor mit geteilter Absorberschicht nicht als Integrations-Sensor (Kapitel 3.2.1) betrieben werden kann, muß der Photostrom für jede Farbspannung ausgelesen werden. Der Photostrom wird dann extern in einem Kondensator integriert. Hierfür läßt sich ein kapazitiv rückgekoppelter Operationsverstärker einsetzen. Im Anhang A.2 wird auf diese Ausleseschaltung eingegangen. Die Kombination aus Operationsverstärker und Kondensator arbeitet nicht nur als Integrator sondern auch als Impedanzwandler. Der Impedanzwandler sorgt für ein konstantes Potential an der Rückelektrode und reduziert so die Pixelkopplung aufgrund von Potentialverschiebungen. So kann auf die Strukturierung weitestgehend verzichtet werden. Zum Thema Pixelkopplung an amorphen Sensorfeldern sei auf die Arbeit von Rössinger [Rössinger97] verwiesen.

Bevor die experimentellen Ergebnisse von pin-Strukturen mit geteilter i-Schicht vorgestellt werden, soll in Kapitel 6.1 das Detektionskonzept erläutert werden. Anschließend soll in Kapitel 6.2 auf die experimentelle Realisierung und das Bauelementdesign der untersuchten Proben eingegangen werden. Weiterhin wird in Kapitel 6.3 ein optisches Vielschichtmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe das optische Verhalten der Bauelemente simuliert wurde, um so einen Einblick in das optische Verhalten des Bauelements zu erhalten und hieraus Optimierungskriterien abzuleiten (Kapitel 6.4). Es schließt sich eine ausführliche Diskussion der Linearität und der linearen Unabhängigkeit der Verläufe der spektralen Empfindlichkeit des Sensors in Kapitel 6.5 an. Bevor in Kapitel 6.7 das transiente Verhalten dargestellt wird, werden die stationären Ergebnisse in Kapitel 6.6 zusammengefaßt. In Kapitel 6.8 erfolgt dann eine Zusammenfassung und ein Vergleich von bipolaren und unipolaren Sensoren.

⁴³ So nimmt beispielsweise das Potential in der p-Schicht der nipiin-Struktur aus Kapitel 4 für eine Beleuchtung mit 450nm ($\phi=10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ Photonen) um 0.32V ($U_b=0\text{V}$), 0.19V ($U_b=-1.5\text{V}$) und 0.12V ($U_b=-2.0\text{V}$) im Vergleich zum Dunkelfall ab. Hierbei ist U_b die extern abgelegte Spannung.

⁴⁴ Es tritt zwar auch über intrinsische Schichten eine Kopplung auf, jedoch ist diese um mehrere Größenordnungen reduziert.

6.1 Detektionskonzept

In Abb. 6.1a ist der schematische Bandverlauf einer pin Struktur mit dreigeteilter Absorberschicht dargestellt. Von der p-Schicht ausgehend, durch die das Licht in den Sensor eingekoppelt wird, nimmt der optische Bandabstand zur n-Schicht ab. Neben dem Bandverlauf kommt, wie auch bei bipolaren Sensoren, den Transporteigenschaften der Ladungsträger in den drei Absorberschichten eine zentrale Bedeutung zu. So nimmt das Produkt aus Lebensdauer und Beweglichkeit der Ladungsträger von der p- zur n-Schicht ab. Der Geltungsbereich dieses Detektionskonzepts erstreckt sich auf alle in diesem Kapitel vorgestellten pin-Dioden mit beteiligter Absorberschicht, wobei als Absorbermaterialien amorphe Siliziumschichten und dessen Legierungen eingesetzt werden. Der Einsatz von mikrokristallinem Silizium als Absorbermaterial führt zu Abweichungen vom Detektionskonzept aufgrund der geänderten Transporteigenschaften.

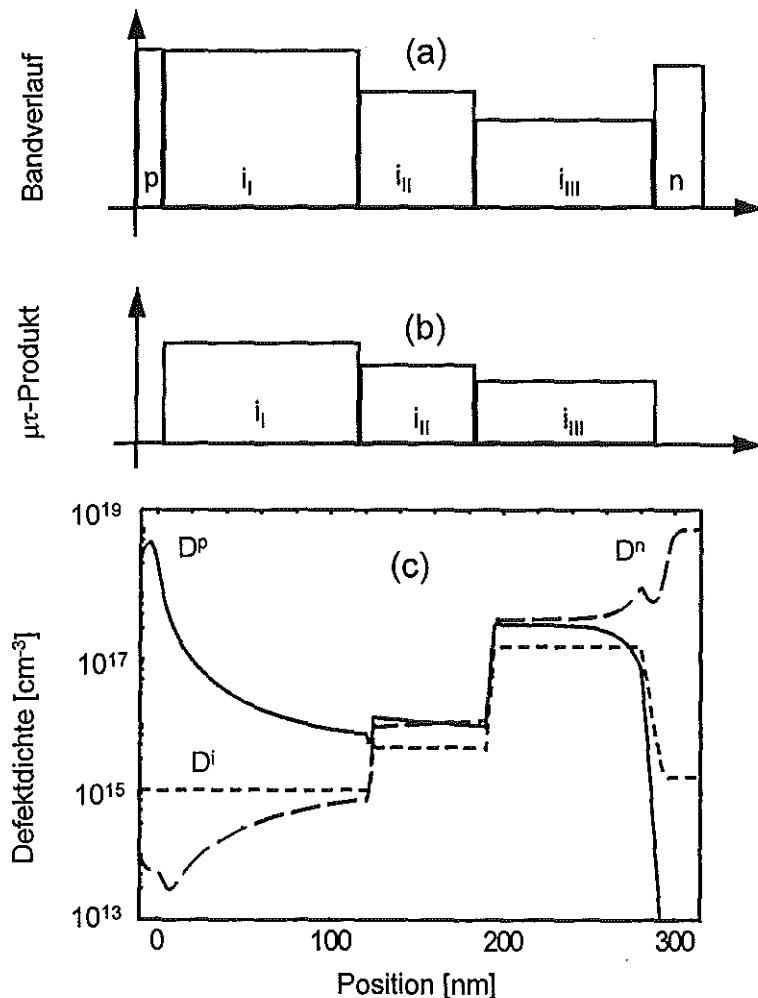


Abb. 6.1: Schematischer Verlauf des Bandabstandes einer pin-Struktur (a), bei der die Absorberschicht in drei Bereiche unterschiedlichen $\mu\tau$ -Produkts unterteilt ist. Das $\mu\tau$ -Produkt (b) nimmt von der p- zur n-Schicht ab. Bei der mit dem Defekt-Pool-Modell berechneten Gleichgewichtsverteilung der Defektdichte handelt es sich um eine Simulation in Anlehnung an die im Weiteren untersuchte Struktur A (Tab. 6.1).

Die Auswirkungen des mikrokristallinen Materials auf die Bauelementeigenschaften werden im Folgenden vergleichend diskutiert.

Das Konzept, welches für amorphe π i π n-Strukturen entwickelt wurde, wird in diesem Kapitel auf amorphe pin-Dioden mit dreigeteilter i-Schicht angewendet. Über die Sammlung der Ladungsträger entscheidet auch für dieses Bauelement das Produkt aus Lebensdauer, Beweglichkeit der Ladungsträger und elektrische Feldstärke ($\mu\tau E$). So dehnt sich mit zunehmender Sperrspannung der Bereich der Sammlung in den hinteren Teil des Bauelements aus. Neben dem elektrischen Feldverlauf innerhalb der Struktur wird die Farbtrennung durch Unterschiede der $\mu\tau$ -Produkte in den einzelnen Bereichen bestimmt. Bereits die Abb. 4.1 in Kapitel 4 hat gezeigt, daß mit abnehmendem Bandabstand auch die ambipolare Diffusionslänge zurückgeht, welche ein Maß für das Produkt aus Ladungsträgerbeweglichkeit und Lebensdauer der Minoritätsladungsträger ist. Die reduzierte ambipolare Diffusionslänge wird hervorgerufen durch eine erhöhte Defektdichte im Material. Dies wird deutlich durch die in Abb. 6.1c dargestellte Defektdichteverteilung innerhalb der Struktur. Berechnet wurde die Verteilung der Defektdichte in Anlehnung an das Defekt-Pool-Modell. Auf das numerische Simulationsmodell, welches Basis dieser Berechnung war, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Es wird an dieser Stelle aber auf die Arbeiten von Zimmer [Zimmer99] und Stiebig [Stiebig97] verwiesen. Bei der Defektdichteverteilung in Abb. 6.1c handelt es sich um die selbstkonsistente Gleichgewichtsdefektverteilung einer π i π n-Struktur (A) auf die im weiteren noch eingegangen wird. Im vorderen Teil des Bauelements wird die Defektdichteverteilung hauptsächlich durch positiv geladene Defekte bestimmt, wohingegen im hinteren Teil die negativ geladenen Defekte überwiegen. Die Summe der Defekte nimmt von der p- zur n-Schicht zu, entsprechend nimmt das $\mu\tau$ -Produkt ab. Legt man 0V oder eine kleine negative Spannung an das Bauelement an, so werden Ladungsträger aus dem Bereich I (Abb. 6.1a) extrahiert, wohingegen die photogenerierten Ladungsträger in Bereich II und III rekombinieren. Erhöht man die angelegte Sperrspannung über der Diode, so steigt das elektrische Feld in der Absorberschicht an und Ladungsträger aus der zweiten i-Schicht werden miteingeesammelt. Dies führt dazu, daß sich die spektrale Empfindlichkeit zu größeren Wellenlängen hin verschiebt. Es werden also die photogenerierten Ladungsträger aus den Bereichen I und II eingesammelt, wohingegen die Ladungsträger aus dem Bereich III immer noch rekombinieren. Legt man eine hohe Sperrspannung an das Bauelement an, so werden nahezu alle photogenerierten Ladungsträger in der gesamten i-Schicht extrahiert. Dies führt zu einer weiteren Zunahme der spektralen Empfindlichkeit im Bereich größeren Wellenlängen.

Nachdem das Detektorkonzept vorgestellt wurde, soll im Weiteren auf die charakterisierten Strukturen eingegangen werden.

6.2 Experiment / Bauelementdesign

Alle Strukturen, die in diesem Kapitel untersucht wurden, besitzen eine dreigeteilte i-Schicht. Wie auch die bereits untersuchten π i π n- und π i π n-Sensoren sind auch die π i π n-Strukturen auf Glassubstraten der Dicke 1.1mm hergestellt worden. Die Glassubstrate sind beschichtet mit einer 90nm dicken SnO_2 -Schicht aus transparentem leitfähigen Oxid, welche als Kontaktschicht dient. Für die hier untersuchten Strukturen sind die p- und n-Schichten jeweils identisch⁴⁵. Die Dicke der p-Schicht beträgt 15nm und die der n-Schicht 20nm. Die genauen Angaben über die einzelnen Strukturen und deren Eigenschaften wie Schichtdicken, Material und Bandlücke befinden sich in Tab. 6.1.

⁴⁵ Lediglich für die Struktur D wurde eine 20nm dicke mikrokristalline n-Schicht eingesetzt.

Struktur	$\neg$	Region I	Interface	Region II	Interface	Region III	Interface
Material Schichtdicke Bandabstand	A	a-Si(C):H 100nm 1.9eV	a-SiGe:H 15nm	a-SiGe:H 60nm 1.68eV	a-SiGe:H 5nm	a-SiGe:H 75nm 1.55eV	a-SiGe:H 15nm
Material Schichtdicke Bandabstand	B	a-Si(C):H 120nm 2.0eV		a-Si:H ¹ 90nm 1.8eV	a-SiGe:H 15nm	a-SiGe:H 120nm 1.66eV	a-SiGe:H 15nm
Material Schichtdicke Bandabstand	C	a-Si(C):H 110nm 2.0eV	a-Si:H ² 10nm	a-Si:H ¹ 90nm 1.8eV	a-SiGe:H 15nm	a-SiGe:H 120nm 1.66eV	a-SiGe:H 15nm
Material Schichtdicke Bandabstand	D	a-Si(C):H 110nm 2.0eV	a-Si:H ² 10nm	a-Si:H ¹ 90nm 1.8eV		μ c-Si:H 1250nm	

Tab. 6.1: Depositionsbedingungen der unipolaren Sensoren auf der Basis einer pin-Struktur.

¹⁾ $\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/4$ ²⁾ die Siliziumschicht wurde in einer Depositionskammer abgeschieden, in der ausschließlich n-Schichten hergestellt werden. So ergibt sich eine Hintergrunddotierung der Schicht. Im Weiteren wird auch von einer v-Schicht gesprochen.

Struktur A besteht im vorderen Teil der Absorberschicht aus einer kohlenstofflegierten Schicht mit einer Bandlücke von 1.9eV. An die 100nm dicke a-Si(C):H-Schicht schließt sich eine a-Si(Ge):H-Schicht an. Um Barrieren zwischen den einzelnen Bereichen der i-Schicht zu vermeiden, sind für die Strukturen A, B und C dünne Interfaceschichten von 5-15nm zwischen den eigentlichen Absorberbereichen eingefügt worden, in denen der Bandabstand der Schichten angepaßt wurde. Aus diesem Grund schließt sich an die kohlenstofflegierte Schicht mit einer Bandlücke von 1.9eV eine Schicht von 15nm an, in der der Bandabstand auf 1.68eV absinkt. Der Bandabstand von 1.68eV wird über 60nm beibehalten, um dann innerhalb von 5nm auf 1.55eV abzufallen. Das Minimum der Bandlücke wird über 75nm beibehalten. Auf den letzten 15nm der i-Schicht nimmt der optische Bandabstand dann wieder von 1.55eV auf 1.75eV zu. Insgesamt beträgt die Schichtdicke der Absorberschicht von Struktur A 270nm. Das Schichtpaket wird mit einer 20nm dicken amorphen n-Schicht abgeschlossen. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Depositionsrezepten für die p- und n-Schicht handelt es sich um „Standard“-Rezepte, welche auch für andere Anwendungen wie Einfach- oder Stapelsolarzellen eingesetzt werden.

Für die Struktur B ist die Bandlücke im Bereich I auf 2.0eV vergrößert worden, um das Maximum der spektralen Empfindlichkeit im Kurzschlußfall zu kleineren Wellenlängen hin zu verschieben. Im Bereich II wurde eine wasserstoffverdünnte [$\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/4$] Schicht eingesetzt, die bei einer Temperatur von $T=140^\circ\text{C}$ abgeschieden wurde. Hierbei handelt es sich um eine Niedertemperaturschicht, wie sie auch in Kapitel 5 eingesetzt wurde. In Bereich III wurde, wie auch schon für die Struktur A, eine a-Si(Ge):H-Schicht implementiert. Jedoch ist der Bandabstand im Vergleich zu Struktur A größer. Als Folge des größeren Bandabstands wurde die Schichtdicke in Bereich III erhöht. Struktur C ist analog zu Struktur B deponiert worden, lediglich im Bereich zwischen I und II ist eine 10nm dicke v-Schicht⁴⁶ eingefügt worden. Die v-Schicht wurde hergestellt in einer Depositionskammer, in der zuvor eine amorphe n-Schicht unter Standardbedingungen abgeschieden wurde. Ziel dieser weiteren Schicht ist die Beeinflussung des elektrischen Feldverlaufs innerhalb der i-Schicht.

⁴⁶ Bei einer v-Schicht handelt es sich um eine sehr schwach n-dotierte Schicht.

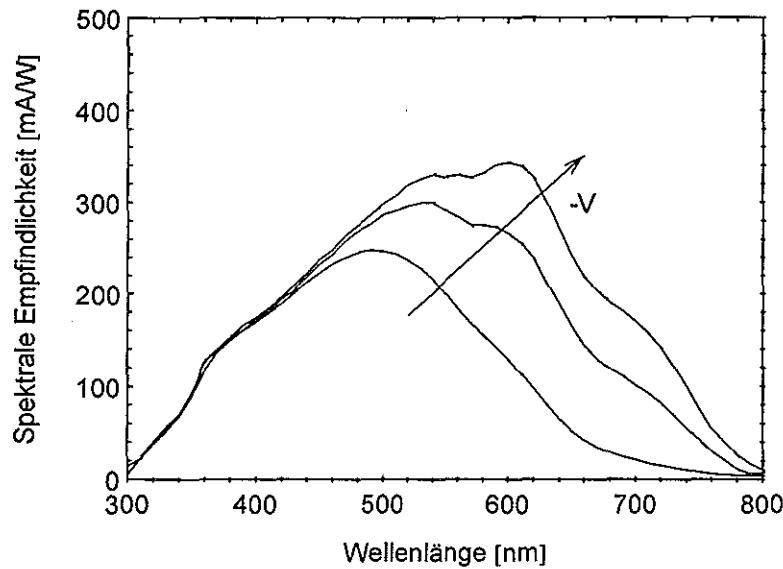


Abb. 6.2: Gemessene spektrale Empfindlichkeit und Absorption der Struktur A für die Spannungen (0V, -0.4V, -1.0V). Die eingezeichnete Gerade entspricht einer Absorption von 1, also der vollständigen Absorption des Lichts im Schichtsystem.

Bei Struktur D handelt es sich um eine Diode, bei der die Bereiche I und II der Absorberschicht identisch zu Struktur C realisiert wurden, lediglich der Bereich III ist durch eine mikrokristalline Siliziumschicht mit einer Schichtdicke von 1250nm ersetzt worden. Dieses Schichtpaket wurde abgeschlossen mit einer 20nm dicken mikrokristallinen n-Schicht. Zum Thema mikrokristallines Silizium sei auf das Kapitel 5.2 verwiesen.

In Abb. 6.2 ist die spektrale Empfindlichkeit der Struktur A dargestellt. Im Kurzschlußfall liegt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit bei 500nm. Die Ladungsträger, welche im Bereich II und III generiert werden, tragen in diesem Fall nicht zum Stromtransport bei, sie rekombinieren aufgrund des zu kleinen Produktes aus Ladungsträgerbeweglichkeit, Lebensdauer und elektrischer Feldstärke. Im Fall einer Biasspannung von $U = -0.4V$ schiebt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit von 500nm auf 530nm. In diesem Fall rekombinieren die generierten Ladungsträger in Bereich III der Absorberschicht, wohingegen die Ladungsträger aus Bereich I und II eingesammelt werden.

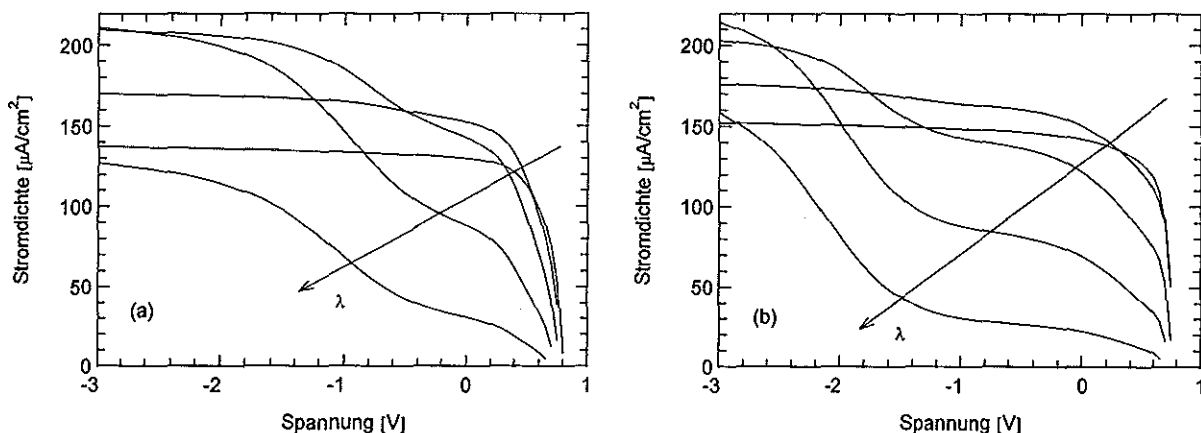


Abb. 6.3: Gemessene monochromatische I/U-Kennlinien für die Struktur B (a) und die Struktur C (b) für eine Photonenflußdichte von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Variiert wurde die Wellenlänge von 450nm, 500nm, 550nm, 600nm nach 650nm.

Erhöht man die angelegte Spannung ($U = -1.0\text{V}$) weiter, so schiebt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit nach 600nm . Unterstützt wird die Sammlung für hohe negative Spannungen durch eine deutliche Schichtdickeninterferenz, die für eine Wellenlänge von 600nm auftritt.

In Abb. 6.3a und 6.3b sind monochromatische I/U-Kennlinien für die Strukturen B und C dargestellt. In den beiden Abb. 6.3a und 6.3b ist jeweils der Betrag des Stroms aufgetragen. Die Messungen wurden unter Beleuchtung mit einem Photonenfluß von $10^{15}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ Photonen durchgeführt, wobei die Halbwertsbreite der Interferenzfilter für die Wellenlängen 450nm , 500nm , 550nm , 600nm und 650nm jeweils 20nm betrug. Die Zunahme der Wellenlänge wird in Abb. 6.3a und 6.3b durch die Peilspitze angedeutet. Im Kurzschlußfall ist der extrahierte Strom für die Beleuchtung mit der Wellenlänge 500nm für beide Sensoren maximal. Lediglich im Bereich positiver Spannungen ist ein Maximum des Photostroms für eine Wellenlänge von 450nm zu beobachten. In diesem Fall befindet sich die Diode im Generationsbetrieb. Für die Struktur B ist der Photostrom bei Beleuchtung mit Licht der Wellenlänge von 500nm bis ca. -0.5V höher als der Photostrom für eine Wellenlänge von 550nm . Im Gegensatz dazu ist für die Struktur C der Übergang der Empfindlichkeit von 500nm zu 550nm erst bei $U = -1.75\text{V}$ zu beobachten. Der Unterschied im spannungsabhängigen Sammelverhalten ist auf die zusätzlich eingebrachte v -Schicht in Struktur C zurückzuführen. Ziel der zusätzlich eingebrachten v -Schicht ist es, durch eine Variation des elektrischen Feldes die Sammeleffizienz des Detektors im Kurzschlußfall zu kleineren Wellenlängen hin zu erhöhen.

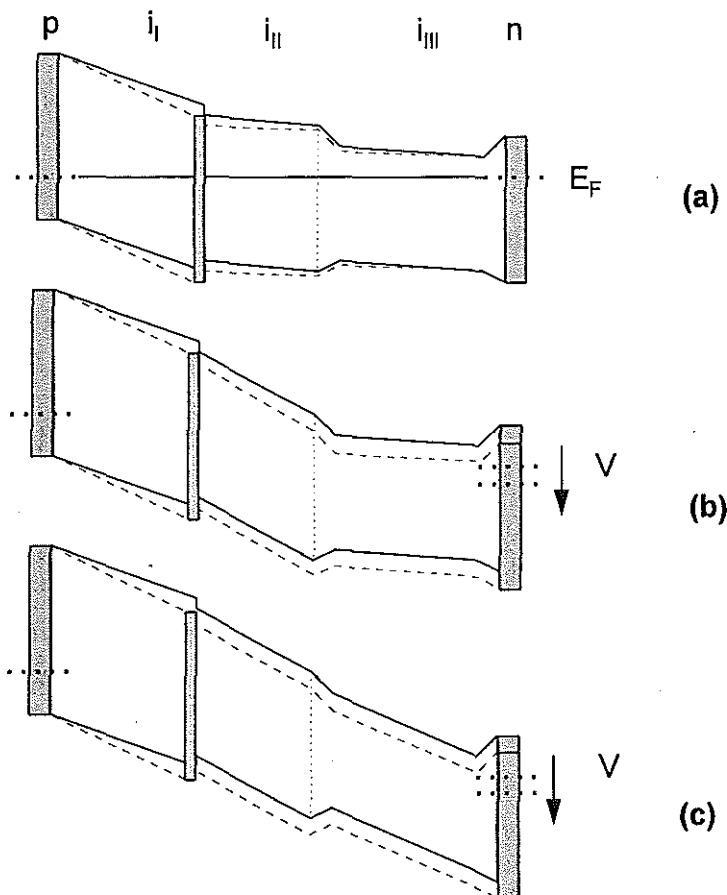


Abb. 6.4: Schematischer Bandverlauf der $piin$ -Strukturen B (durchgezogene Linie) und C (gestrichelte Linie) für den Kurzschlußfall (a), den Fall mittlerer negativer Spannungen (b) und den Fall hoher negativer Spannungen (c).

Der Unterschied der beiden Strukturen wird in Abb. 6.4 verdeutlicht. Der schematische Bandverlauf für Struktur B (C) ist als durchgezogene (gestrichelte) Linie dargestellt. Die zusätzlich eingebrachte v-Schicht für Struktur C führt zu einer Potentialverschiebung im Bereich der v-Schicht und somit zu einem Anstieg des internen elektrischen Feldes im Bereich I. Im Kurzschlußfall wird somit das elektrische Feld im hinteren Bereich zugunsten des elektrischen Feldes im vorderen Teil des Bauelements verschoben. Für die Extraktion von Ladungsträgern aus dem hinteren Teil des Bauelements muß somit eine höhere Spannung an das Bauelement gelegt werden. Dies soll in Abb. 6.4b durch den Spannungspfeil angedeutet werden. Um Ladungsträger aus dem Bereich I und II einzusammeln, muß die Sperrspannung, welche an die Strukturen angelegt wird, für Struktur C höher sein als für Struktur B. Entsprechendes gilt für hohe Sperrspannungen (Abb. 6.4c). Auch in diesem Fall muß für Struktur C die extern angelegte Spannung höher sein als für Struktur B, um die photogenerierten Ladungsträger aus dem Bereich I, II und III zu extrahieren. Das hier für die I/U-Kennlinien dargestellte Verhalten läßt sich auch bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit beobachten. So ergeben sich für die beiden Strukturen die Farbspannungen 0V, -1.4V, -3.0V (Struktur B) und 0V, -2.0V, -3.6V (Struktur C).

Neben der Farbtrennung kommt bei der Realisierung der Sensoren der Dynamik eine entscheidende Bedeutung zu. Für pin-Dioden, die als Schwarz/Weiß-Sensoren eingesetzt werden, läßt sich ein Dynamikumfang⁴⁷ von 100dB [Powell92, Weisfield93] und höher erreichen. Limitiert wird die Dynamik für die untersuchten Sensoren hauptsächlich durch den Dunkelstrom, da sich der Photostrom unter Beleuchtung mit 1000lx Weißlicht für die drei Strukturen A, B und C nur unwesentlich ändert. Der Dunkelstrom wiederum wird bestimmt von thermisch generierten Ladungsträgern. Er folgt hierbei der Proportionalität

$$I_d \propto \int_0^d \int_E N(E, x) \cdot e^{\left(\frac{E-E_B}{kT}\right)} dE dx \quad \text{Gl. 6.1}$$

Hierbei ist $N(E, x)$ die Defektdichteverteilung als Funktion der Energie und Position. E_B ist der Bandabstand der Absorberschicht. Die Dunkelströme der drei Strukturen A, B und C sind in Abb. 6.5 gezeigt. Aufgrund der hohen Defektdichte im hinteren Bereich des Bauelements steigt der Dunkelstrom für die Struktur A stark an. Struktur B zeigt einen reduzierten Dunkelstrom aufgrund des größeren Bandabstandes und damit verbunden einer geringeren Defektdichte im hinteren Bereich des Bauelements, wohingegen die Gesamtdicke der Absorberschicht von 270nm auf 360nm zunimmt. Trotz des identischen Bandabstands und der gleichen Schichtdicken liegt der Dunkelstrom von Struktur C niedriger als der Strom von Struktur B. Dies ist auf das erhöhte elektrische Feld im vorderen und das gesenkte elektrische Feld im hinteren Bereich des Bauelements C im Vergleich zu Struktur B (Abb. 6.4) zurückzuführen. Lediglich im Bereich kleiner Spannungen liegt der Dunkelstrom für Struktur C oberhalb der Ströme von Struktur A und B. Für die Struktur A ergibt sich somit ein Dynamikumfang von >85dB im relevanten Spannungsbereich von 0V bis -1.0V. Da sich der Spannungsbereich für die Strukturen B und C von 0V bis -3.0V bzw. -3.6V erstreckt, liegt trotz des geringeren Dunkelstroms der Struktur B der Dynamikumfang von Struktur B mit >80dB unterhalb des Wertes von Struktur A. Für Struktur C ergibt sich ein Dynamikumfang von >100dB. Aufgrund des reduzierten Dynamikumfangs von Struktur B wird im weiteren das Verhalten der Strukturen A und C diskutiert.

⁴⁷ In Kapitel 4.5 ist Gl. 4.4 angegeben, welche die Dynamik des Sensors definiert.

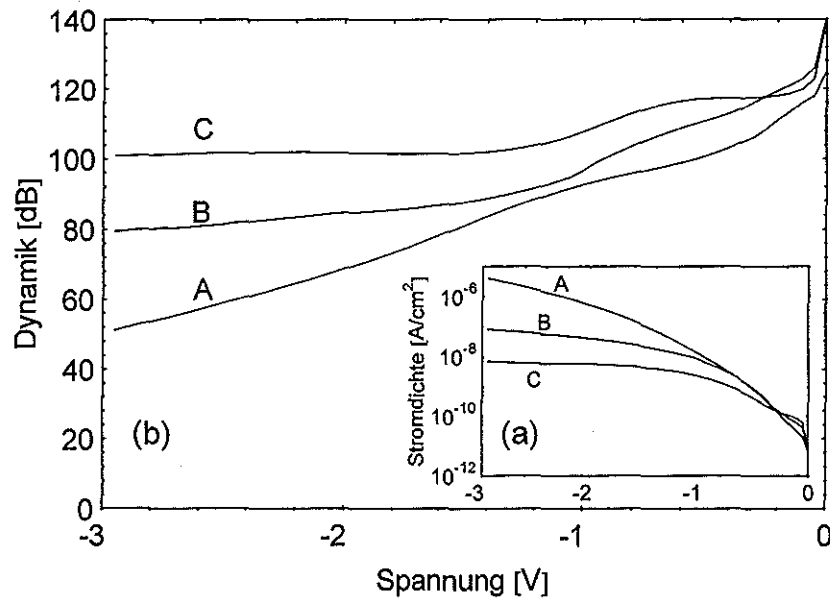


Abb. 6.5: Dunkelstrom (a) und Dynamik (b) für die p-i-i-n-Strukturen A, B und C.

Bisher sind in den Kapitel 6.1 und 6.2 stationäre experimentelle Ergebnisse der untersuchten p-i-i-n-Strukturen vorgestellt worden. Im folgenden Kapitel 6.3 soll ein optisches Simulationsmodell vorgestellt werden. Dieses Modell erlaubt die Untersuchung des optischen Verhaltens der Bauelemente. Weiterhin liefert es Möglichkeiten der Vorhersage von experimentellen Ergebnissen.

6.3 Optisches Vielschichtmodell

Das optische Vielschichtmodell, das in diesem Kapitel vorgestellt werden soll, geht auf die Arbeiten von Stiebig [Stiebig94] und Meer [Meer94] zurück. Es erlaubt die Beschreibung der optischen Generation in einem Multischichtsystem, aber auch die Interpretation von Reflexionsdaten. Die Reflexionsdaten ermöglichen wiederum einen Rückschluß auf die exakten Schichtdicken der Schichtfolge, so daß eine Vorhersage der spektralen Empfindlichkeit möglich wird. Neben den genannten Möglichkeiten erlaubt das Modell ferner die Bestimmung der optischen Generation als Eingangsgröße für die numerische Simulation von amorphen und mikrokristallinen Bauelementen. Nur bei einer hinreichend genauen optischen Beschreibung eines Vielschichtsystems ist es möglich, genaue Aussagen über das optoelektronische Verhalten des Bauelements zu treffen. Da an dieser Stelle nicht auf den Zusammenhang zwischen optischer und optoelektronischer Simulation eingegangen werden kann, wird auf die Arbeiten von Stiebig [Stiebig94] verwiesen.

Durch den Vergleich von experimentellen und numerischen Reflexionsdaten erlauben die Berechnungen einen Rückschluß auf die im Schichtsystem implementierten Schichtdicken. Obwohl für die eingebauten Schichten die jeweiligen Depositionsraten bekannt sind, unterscheiden sich die „wirklichen“ Schichtdicken zum Teil deutlich von den gewünschten Schichtdicken. Insbesondere bei dünnen Schichten tritt dieses Problem deutlich hervor. Verantwortlich für diese Differenzen zwischen erwarteter und realisierter Schichtdicke sind neben den Abweichungen, die sich bei der Bestimmung der Depositionsrate einstellen, die Substrate, auf denen die Schicht aufgebracht wird⁴⁸. So nimmt beispielsweise die Depositionsrate zu, wenn die amorphen Schichten statt auf einem Glassubstrat auf einem TCO beschichteten Glassubstrat hergestellt werden. Zurückführen läßt sich der Unterschied der Wachstumsrate auf die Plasmabedingungen während der Nukleation der Schicht⁴⁹. Ähnliche Abweichungen treten bei gesputterten Zinkoxid-Schichten auf. So unterscheiden sich die Depositionsraten von auf Glas gesputterten Schichten deutlich von Schichten, die auf einem amorphen Schichtsystem aufgebracht werden. Auf die Vorgänge während der Abscheidung, also die Zersetzung des Depositionsgases Silan und dem damit verbundenen Einfluß des Substrats kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden [Luft93]. Das gleiche gilt für den Sputterprozeß.

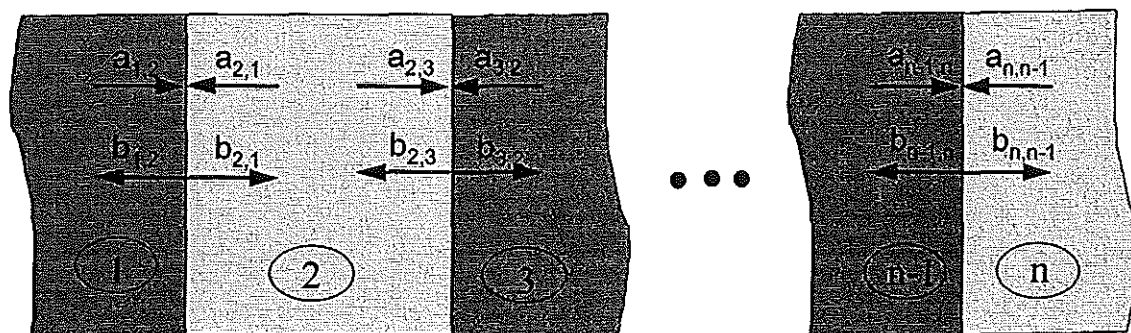


Abb. 6.6: Darstellung eines Multischichtsystems mit n -Schichten.

⁴⁸ Es existieren noch weitere Faktoren, die Einfluß auf die Depositionsrate und auch auf die Eigenschaften der realisierten Schicht nehmen.

⁴⁹ Hierbei ist auch zu berücksichtigen, daß sich die optischen Eigenschaften als Funktion der Schichtdicke ändern können. Siehe hierzu die Arbeit von Hapke [Hapke95], die sich mit der Deposition von mikrokristallinen Siliziumschichten beschäftigt.

Jede Schicht innerhalb eines Schichtsystems hat einen Einfluß auf die optischen Eigenschaften des Systems. Dieser Tatsache wird Rechnung getragen, indem für jede Schicht ein wellenlängenabhängiger komplexer Brechungsindex in den Berechnungen berücksichtigt wird. Bestimmt werden diese Parameter durch Messungen der optischen Eigenschaften von Einzelschichten mittels Transmissions- und Reflexionsmessungen, Ellipsometriedaten und Constant-Photocurrent-Method (CPM) bzw. Photodeflektionsspektroskopiemessungen (PDS). Durch diese unterschiedlichen Meßverfahren ist es möglich, optische Daten für eine Schicht in einem Energiebereich von ca. 0.7eV bis 5eV zu bestimmen.

Was die Beschreibung der elektromagnetischen Welle innerhalb des Schichtsystems anbelangt, so wird in diesem eindimensionalen Simulationsmodell kohärente Wellenausbreitung unter Berücksichtigung von Light-Trapping⁵⁰ angenommen. Auf Lichtstreuung innerhalb des Schichtstapels wird bei den Berechnungen nicht eingegangen. An späterer Stelle in diesem Kapitel und in Kapitel 7 bis 9 wird noch intensiv diese Problematik und die damit verbundene Wechselwirkung von Bauelementdesign und spektraler Empfindlichkeit diskutiert.

Zur Beschreibung der Ausbreitung der elektromagnetischen Welle im Schichtsystem dient die Wellentheorie unter Berücksichtigung der Randbedingung, daß die Tangentialkomponente des elektrischen und magnetischen Feldstärkevektors am Übergang zweier Schichten stetig ist. Hierbei wird von senkrechtem Lichteinfall ausgegangen. Die optischen Eigenschaften lassen sich nun durch eine Summation des reflektierten und des transmittierten Anteils ermitteln, wobei der direkte Lichteinfall wie auch der mehrmalige Lichtdurchlauf der Welle berücksichtigt wird. Durch die Einführung eines Matrixformalismus läßt sich die Lösung eines solchen Problems deutlich vereinfachen. Siehe hierzu die Darstellung eines Multischichtsystems mit n Schichten in Abb. 6.6. Der Vektor $(a_{1,2}, b_{1,2})$ stellt den Eingangsvektor des Systems dar, wobei $a_{1,2}$ der Amplitude des Feldes entspricht, welches zum ersten Interface hin läuft. Bei nicht invertierten Strukturen ist dies in der Regel der Luft/Glas-Übergang. Für invertierte Strukturen ist dies der Luft/TCO-Übergang. $b_{1,2}$ ist entsprechend die Amplitude des Feldes, welches das Schichtsystem verläßt. $b_{1,2}$ beschreibt somit den reflektierten Anteil der elektrischen Feldstärke. Entsprechend gilt das $a_{n-1,n}$ die Amplitude des Signals der n -ten Schicht und somit der Ausgangsvektor ist, wohingegen $b_{n-1,n}$ die Amplitude des Signals ist, welches am $n-1/n$ -ten Interface reflektiert wird. Aufgrund der Tatsache, daß kein Licht von der Rückseite in die Struktur einfällt, wird $a_{n,n-1}=0$ angenommen. So erhält man für jeden Übergang zwischen zwei Schichten eine 2×2 Matrix. Diese wird mit einer Transmissionsmatrix multipliziert, die die Absorption und die Phasenverschiebung innerhalb der Schicht berücksichtigt. Anschließend wird die Matrix wieder mit einer Übergangsmatrix multipliziert. Für ein komplettes Schichtpaket ergibt sich so eine Kettenmatrix, welche sukzessive nach den Variablen b aufgelöst wird.

⁵⁰ Wird Licht, welches bereits ein- oder mehrfach innerhalb des Schichtsystems reflektiert wurde, aufgrund von Totalreflektion am Austritt des Schichtsystems durch den Frontkontakt gehindert, so spricht man von Light-Trapping. In diesem Fall durchläuft das Licht die Struktur so lange, bis es vollständig absorbiert ist.

6.4 Optische Modellierung

Die gemessene Reflexion der Strukturen A, B und C und die simulierte Reflexion der Struktur A ist in Abb. 6.7 dargestellt. Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und experimentellen Daten der Struktur A. Die Simulation erlaubt die exakte Bestimmung der Schichtdicken der Einzelschichten der Struktur A. Im Wellenlängenbereich zwischen 380nm und 500nm wird die Reflexion von der TCO- und der p-Schicht bestimmt. Hierbei sind alle drei Strukturen A, B und C auf untexturiertem⁵¹ TCO der Schichtdicke 90nm deponiert worden. Die Lage des Maximums der Reflexion wird von der TCO-Schichtdicke bestimmt, wohingegen die Amplitude von der p-Schichtdicke beeinflusst wird. Für größere Wellenlängen beobachtet man je nach Schichtdicke der Absorberschicht mehr oder weniger ausgeprägte Interferenzen. Ein Vergleich von Struktur B und C zeigt, wie in der Tab. 6.1 angegeben, daß beide Strukturen identische Schichtdicken besitzen. Die Position der Interferenzminima und -maxima stimmen exakt überein. Lediglich die Amplituden der Interferenzen weisen kleine Abweichung auf. In Abb. 6.8 ist die gemessene und simulierte Reflexion der Struktur D dargestellt. Bei einem Vergleich der Strukturen A, B und C mit der Struktur D ist neben der deutlich höheren Gesamtschichtdicke von Struktur D zu berücksichtigen, daß eine mikrokristalline Schicht sehr rauh auf dem Substrat aufwächst. Aufgrund der Rauigkeit der Schichten und der damit verbundenen Streuung des Lichts ist sowohl die diffuse als auch die spekulare Reflexion bestimmt worden. Zur Bestimmung der diffusen Reflexion wurde eine Ulbrichtkugel eingesetzt. Die Kugel ist innenseitig mit einem nahezu idealen Reflektor beschichtet, so daß davon ausgegangen werden kann, daß eine homogene Strahlverteilung in der Kugel vorliegt und so von einem Teil der Kugelfläche auf die Gesamtreflexion geschlossen werden kann. Vergleicht man für Struktur D die Messungen mit und ohne Ulbrichtkugel, so nimmt die durchschnittliche Reflexion für Wellenlängen zwischen 600nm und 700nm um ca. 70% zu, wobei aber die Amplitude der Reflexion und damit der Einfluß der Schichtdickeninterferenzen deutlich zurückgeht. Betrachtet man den Absolutwert der Reflexion, so fällt auf, daß es sich bei diesem Schichtsystem um einen guten Absorber handelt. Nur sehr wenig Licht verläßt das Bauelement wieder. Ein Vergleich mit Abb. 6.7 zeigt, daß dies für die Strukturen A, B und C nicht der Fall ist. Vergleicht man allerdings die rein optischen Daten (Reflexion) von Struktur D mit der gemessenen spektralen Empfindlichkeit, so spiegeln diese die hohe Absorption für hohe Wellenlängen nicht wider. Obwohl die Absorption im Bereich zwischen 700nm und 800nm bei 85% ($A=1-R-T$) liegt, zeigt sich in der Quantenausbeute lediglich eine Sammlung von 15% bis 20% (Abb. 6.11). Der große Unterschied zwischen den rein optischen und optoelektronischen Eigenschaften läßt sich auf zwei mögliche Einflußfaktoren zurückführen. Entweder sind die Transporteigenschaften des Materials in Bereich III noch sehr schlecht oder ein sehr großer Teil des Lichts wird im Rückkontakt absorbiert. Auf dieses Problem wird an späterer Stelle noch detailliert eingegangen (Kapitel 9). Weiterhin ist in Abb. 6.8 die simulierte Reflexion der Struktur D unter Berücksichtigung kohärenter Wellenausbreitung eingezeichnet. Neben den stark ausgeprägten Interferenzstrukturen fällt der starke Anstieg der simulierten Reflexion für größere Wellenlängen auf. Ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigt, daß die Differenz aus Simulation und Experiment auf Streuprozesse innerhalb des Schichtstapels zurückzuführen sein muß.

⁵¹ Glatte TCO-Schichten werden auch als untexturierte TCO-Schichten bezeichnet.

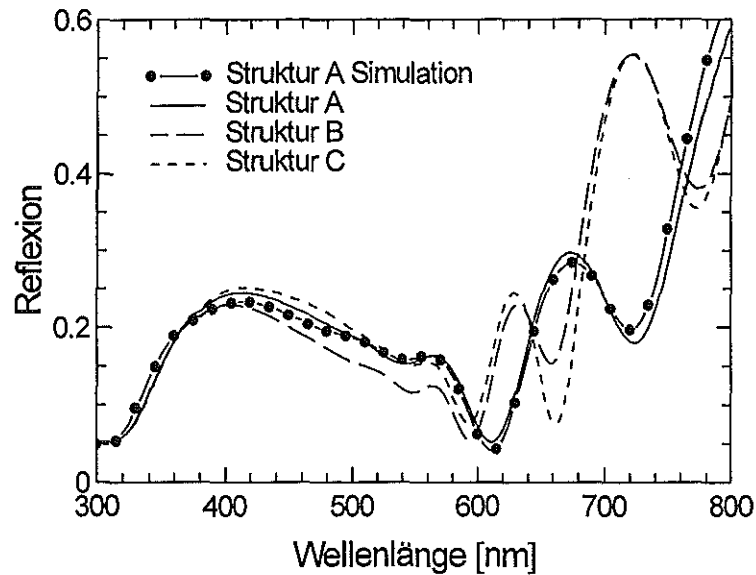


Abb. 6.7: Gemessene und simulierte Reflexion der Strukturen A, B und C.

Die Frage nach dem Verbleib des Lichts kann hiermit aber immer noch nicht beantwortet werden. Aus diesem Grund wird im folgenden die Generation innerhalb der Struktur A und D näher untersucht.

Unter Berücksichtigung der exakten Schichtdicken der einzelnen Schichten des Sensors ist in Abb. 6.9 die simulierte Generation der Struktur A als Funktion des Ortes dargestellt. Aufgetragen ist die Generationsrate für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 650nm. Der Übergang der einzelnen i-Schichten innerhalb des Absorbers ist gekennzeichnet durch Sprünge im komplexen Brechungsindex, die zu Sprüngen in der simulierten Generation führen. Die stark wellenlängenabhängige Absorption von amorphem Silizium wird in Abb. 6.9 deutlich. Vergleicht man das Integral der Generation in den einzelnen Bereichen des Absorbers, so ergibt sich wellenlängenabhängig der normierte Photostrom als Funktion der Teilbereiche.

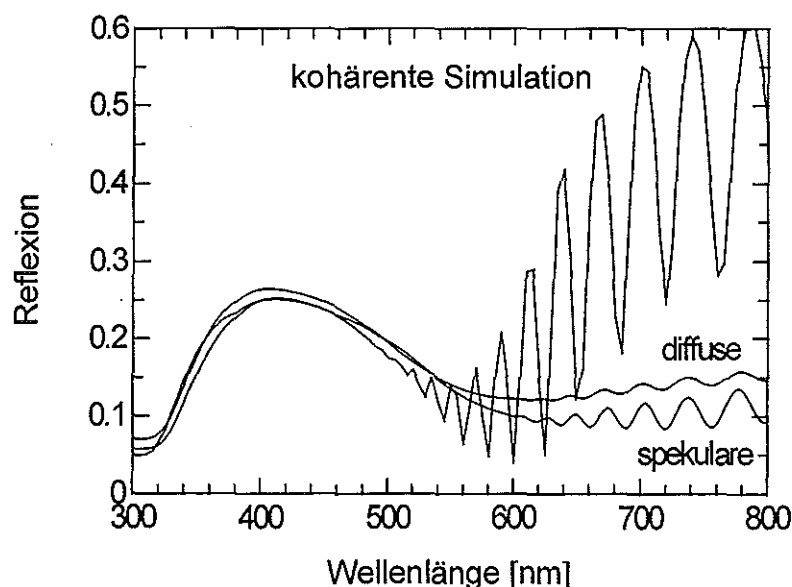


Abb. 6.8: Gemessene spekulare und diffuse Reflexion der Struktur D. Weiterhin eingezeichnet ist die simulierte spekulare Reflexion unter Berücksichtigung kohärenter Wellenausbreitung.

Vergleicht man das Integral der Generation in den einzelnen Bereichen, so ergibt sich für die Wellenlänge 450nm ein Verhältnis der Generation $i_I : i_{II} : i_{III}$ von 1 : 0.06 : 0.005. Für grünes Licht (550nm) liegt das Verhältnis bei 1.36 : 1 : 0.78 und für rotes Licht (650nm) bei 0.11 : 0.36 : 1. Es fällt auf, daß mehr grünes Licht in Bereich I absorbiert wird als in Bereich II. Dies erklärt die Aufweitung der spektralen Empfindlichkeit der Struktur A im Kurzschlußfall und damit die hohe Halbwertsbreite der Blauempfindlichkeit (Abb. 6.2). Vergleicht man weiter die Separation in den einzelnen Gebieten, so fällt der geringe Kontrast unter Beleuchtung mit grünem Licht auf. In Abb. 6.10 ist die spektrale Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge für die Bereiche I, die Summe der Bereiche I und II und die Summe aus allen drei Bereichen dargestellt. Weiterhin sind die gemessenen Empfindlichkeiten des Sensors A aufgetragen.

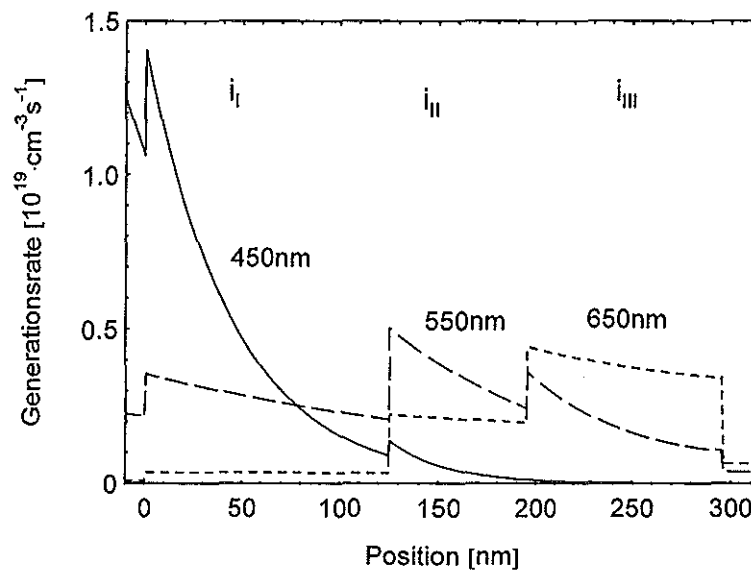


Abb. 6.9: Numerisch simulierte Generationsrate als Funktion der Position für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 650nm für die Struktur A für die Photonenflußdichte $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

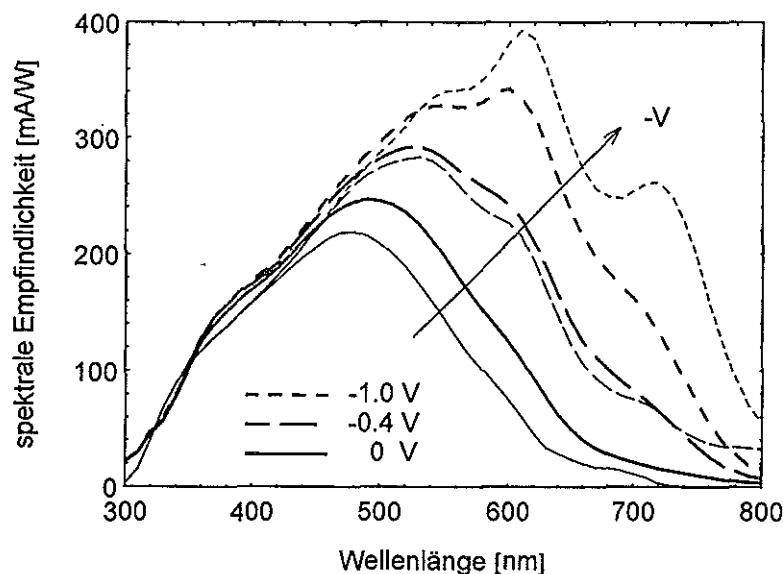


Abb. 6.10: Vergleich der optisch simulierten (fein gezeichnete Linien) spektralen Empfindlichkeit mit den experimentell (dick gezeichnete Linien) ermittelten Daten für die Struktur A.

Vergleicht man die rein optische Simulation mit den experimentellen Daten, so werden im Kurzschlußfall bereits Ladungsträger aus dem Bereich II extrahiert, wohingegen für hohe Sperrspannungen aufgrund von Rekombinationsverlusten nicht alle Ladungsträger aus dem Bauelement extrahiert werden. Diese Simulationen geben für den Fall hoher Sperrspannung eine maximal erreichbare Extraktion an.

Die für Struktur A vorgenommene Betrachtung läßt sich auch auf die Struktur D übertragen. Unter Berücksichtigung der Schichtparameter, welche in Abb. 6.8 zur Simulation der Reflexion verwendet wurden, ist die optische Generation in den einzelnen Bereichen integriert worden (Abb. 6.11). Ein Vergleich mit den experimentellen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung der spektralen Empfindlichkeiten, obwohl zwischen der simulierten Reflexion und der gemessenen Reflexion eine große Differenz vorlag. Insbesondere für den Kurzschlußfall liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment vor. Fast keine Ladungsträger aus dem Bereich II werden unter diesen Bedingungen eingesammelt. Die für die Struktur A angegebene Obergrenze der Extraktion, die sich aus den Berechnungen ableiten läßt, kann nicht auf die Struktur D übertragen werden, da die Rauigkeit der Schichten im Simulationsmodell nicht berücksichtigt wird. Für die Struktur A kann allerdings von einem vollständig glatten Schichtsystem ausgegangen werden, so daß sich mittels der Simulation eine Obergrenze der Generation bestimmen läßt.

Der Vergleich der simulierten und gemessenen spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 6.11 führt zu der Vermutung, daß das Licht, welches bis zum Rückkontakt gelangt, zwar reflektiert wird, aber aufgrund der geringen Reflexion des Rückkontaktes ebenfalls dort absorbiert wird. Ein Rückkontakt mit verbesserten Reflexionseigenschaften sollte zu einer Zunahme der Empfindlichkeit für größere Wellenlängen führen. Somit wird die Empfindlichkeit für größere Wellenlängen durch die optischen Eigenschaften des Rückkontaktes limitiert. Allgemein läßt sich an dieser Stelle feststellen, daß der Optik innerhalb des Schichtsystems eine große Bedeutung zukommt, insbesondere bei Verwendung von mikrokristallinen Siliziumschichten.

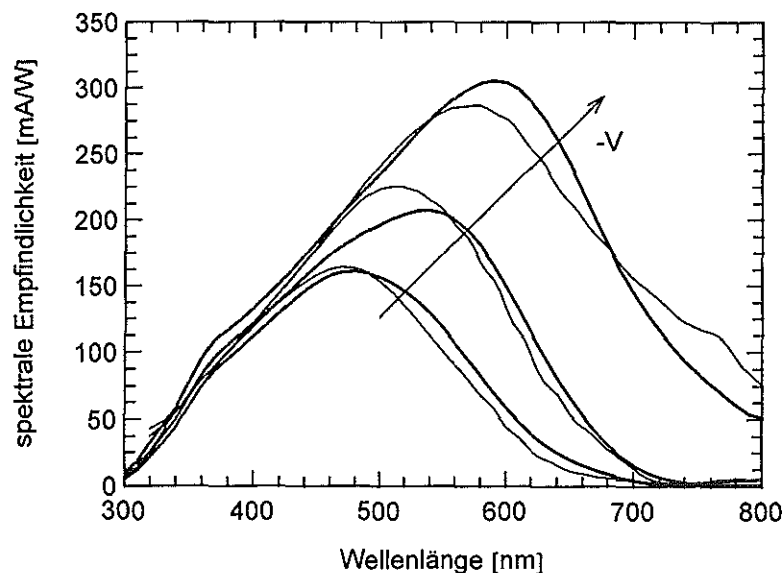


Abb. 6.11: Vergleich der optisch simulierten (dünne Linien) spektralen Empfindlichkeit mit den experimentell ermittelten Daten (dick gezeichnete Linien) für die Struktur D (0V, -0.8V, -3.0V).

Aufgrund der deutlich reduzierten Absorption im sichtbaren Bereich des Spektrums läßt sich nur eine hohe optische Schichtdicke⁵² unter Verwendung einer erhöhten optischen Weglänge erzielen. Der Einfluß des Rückkontaktes auf die spektrale Empfindlichkeit wird im Kapitel 9 unter Berücksichtigung einer invertierten Schichtfolge diskutiert. Ohne den Ergebnissen aus Kapitel 9 vorzugreifen, läßt sich sagen, daß die Untersuchungen an invertierten Sensoren den Einfluß des Rückkontaktes auf die spektrale Empfindlichkeit bestätigen. Mit deutlich verbessertem Rückreflektor steigt auch die spektrale Empfindlichkeit für größere Wellenlängen deutlich an.

6.5 Lineare Unabhängigkeit

Ohne die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe ist eine Zerlegung der gemessenen Sensorsignale für die drei Spannungen in die drei Kanäle R, G und B nicht möglich. In Abb. 6.12 und 6.13 ist die spektrale Empfindlichkeit der Strukturen C und D mit und ohne Biasbeleuchtung dargestellt. Struktur C besitzt Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 500nm (0V), 540nm (-2.0V) und 610nm (-3.6V) in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der monochromatischen I/U-Kennlinien des Bauelements (Abb. 6.3). Unter monochromatischer Beleuchtung mit Biaslicht der Wellenlänge 450nm und 650nm läßt sich sowohl im Kurzschlußfall als auch im Fall hoher Sperrspannung keine biaslichtinduzierte Veränderung der spektralen Empfindlichkeit beobachten. Für die mittlere Biasspannung von $V = -2.0V$ zeigt die Struktur C hingegen eine deutliche Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit von den Biaslichtbedingungen und somit eine Abhängigkeit der Grünempfindlichkeit von der Generation im Bereich I und III. Hervorgerufen wird diese Abhängigkeit durch die Umladung von Defektzuständen im hinteren wie im vorderen Teil des Bauelements, durch die zusätzliche Generation von Ladungsträgern. Für blaues Biaslicht (450nm) werden hauptsächlich Zustände im Bereich des p/i-Interfaces umgeladen, so daß das elektrische Feld im vorderen Teil des Bauelements absinkt. Dies führt zu einem Rückgang der Empfindlichkeit im Bereich zwischen 380nm und 450nm. Der Rückgang des elektrischen Feldes im vorderen Bereich führt zwangsläufig zu einem Anstieg des elektrischen Feldes im mittleren und hinteren Teil der Absorberschicht. Dies verursacht einen Anstieg der spektralen Empfindlichkeit für Wellenlängen größer als 560nm. Für rotes Biaslicht zeigt sich ein nahezu umgekehrtes Verhalten. Biaslicht der Wellenlänge 650nm führt zu einem Anstieg des elektrischen Feldes im vorderen Bereich und zu einem Rückgang des elektrischen Feldes im hinteren Bereich des Bauelements. Dies wird durch den Anstieg der spektralen Empfindlichkeit im Bereich zwischen 380nm und 450nm und den Rückgang der Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich größer 520nm deutlich. Unter Beleuchtung mit grünem (550nm) Biaslicht, nicht eingezeichnet in Abb. 6.12, ist lediglich im Wellenlängenbereich um 550nm aufgrund erhöhter Rekombination im Bereich II ein Rückgang der Empfindlichkeit zu beobachten. Für den restlichen Wellenlängenbereich ist nahezu keine Variation der spektralen Empfindlichkeit festzustellen.

Das Verhalten der spektralen Empfindlichkeit für die Struktur D ist in Abb. 6.13 zu beobachten. Auch für diesen Sensor ist eine deutliche Abhängigkeit der Farbtrennung vom zusätzlichen Biaslicht zu beobachten. Beim Vergleich der beiden Strukturen ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Absorberschichtdicke für Struktur C 360nm beträgt, wohingegen die Schichtdicke der Struktur D nahezu 1.5µm beträgt. Weiterhin ist der Unterschied im

⁵² Produkt aus dem Realteil des komplexen Brechungsindex und der Schichtdicke.

Transportverhalten der Ladungsträger von mikrokristallinem und amorphem Silizium zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist neben dem sich verschiebenden Maximum der spektralen Empfindlichkeit mit zunehmender Sperrspannung im Wellenlängenbereich zwischen 380nm und 450nm ein Anstieg der spektralen Empfindlichkeit zu beobachten. Hieraus folgt, daß unter Kurzschlußbedingungen nicht alle Ladungsträger aus dem Bereich I der Absorberschicht extrahiert werden und Rekombinationsverluste den Transport der Ladungsträger behindern. Erst die Zunahme des externen elektrischen Feldes sorgt für die Extraktion sämtlicher Ladungsträger aus dem Bereich I. Diese Nichtlinearität wird unter Beleuchtung mit Biaslicht noch stärker hervorgehoben.

Im Kurzschlußfall liegt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit für Struktur D bei 480nm und schiebt bei $V = -0.8V$ auf 540nm. Bei einer weiteren Zunahme der angelegten Spannung schiebt das Maximum der Empfindlichkeit bis auf 600nm. Auf den Einfluß der Schichtrauigkeiten und den Unterschied zwischen rein optischer Betrachtung (Reflexionsmessung) und optoelektronischen Eigenschaften (spektrale Empfindlichkeit) wurde bereits im vorhergehenden Kapitel eingegangen, so daß an dieser Stelle auf eine eingehende Betrachtung verzichtet werden kann. Der Verlauf der spektralen Empfindlichkeit zeigt, daß der Einfluß der Schichtdickeninterferenzen aufgrund der Rauigkeit der Schichten deutlich reduziert ist. Im Fall der Beleuchtung von Struktur D mit zusätzlichem Biaslicht (die Bedingungen sind identisch mit denen in Abb. 6.12) ist für diese Struktur bereits im Kurzschlußfall eine deutliche Abweichung der spektralen Empfindlichkeit, hervorgerufen durch die zusätzliche Generation, zu beobachten. Für Biaslicht der Wellenlänge 450nm ist über den vollständigen Wellenlängenbereich ein Anstieg der Empfindlichkeit zu beobachten. Im Fall einer roten Biasbeleuchtung (650nm) erfolgt ein ähnliches Verhalten, wie bereits für Struktur C beschrieben. Die elektrische Feldstärke im vorderen Bereich des Bauelements steigt an, somit auch die Empfindlichkeit für Wellenlängen bis 550nm. In diesem Fall ist für Struktur C und D ein Elektronen limitierter Transport anzunehmen. Elektronen rekombinieren über Defektzustände auf ihrem Weg von Bereich I zum Rückkontakt.

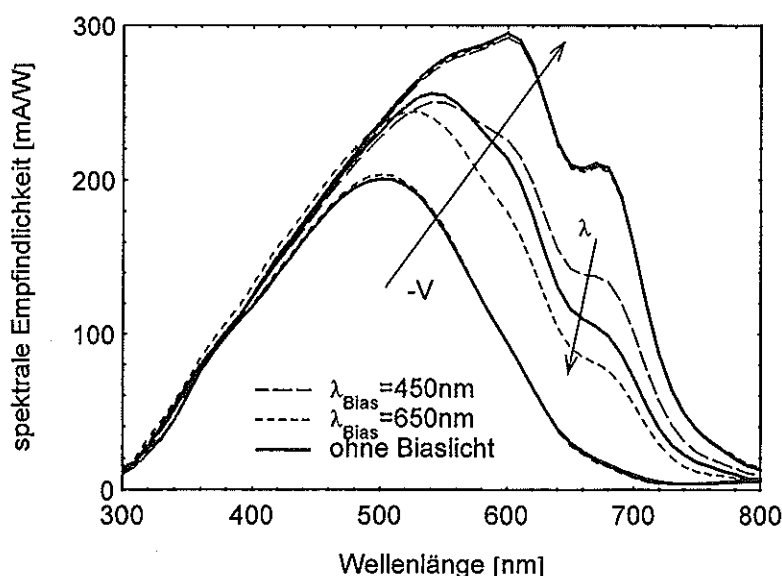


Abb. 6.12: Spektrale Empfindlichkeit der Struktur C für die Spannungen 0V, -2.0V und -3.6V mit und ohne Biaslicht der Intensität $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen für die Wellenlängen 450nm und 650nm.

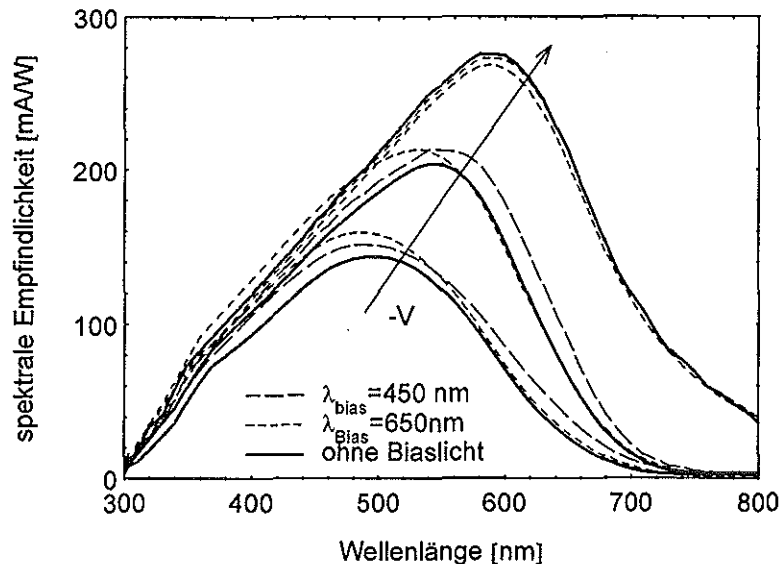


Abb. 6.13: Spektrale Empfindlichkeit der Struktur D für die Spannungen $0V$, $-0.8V$ und $-3.0V$ mit und ohne Biaslicht der Intensität $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen für die Wellenlängen 450 nm und 650 nm .

Obwohl im Fall mittlerer Sperrspannung ein Vergleich der beiden Strukturen C und D naheliegt, ist doch zu berücksichtigen, daß der Transport in mikrokristallinem Material noch Gegenstand kontroverser Diskussion ist und kein allgemein akzeptiertes Transportmodell existiert. Ein Vergleich der Strukturen C und D unter Biasbeleuchtung läßt die nachfolgenden Schlußfolgerungen zu: Beide Strukturen sind stark biaslichtabhängig, wobei bereits die Spannungsabhängigkeit der Empfindlichkeit im Bereich zwischen 380 nm und 450 nm als Indikator für die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe dienen kann. Hier zeigt die Struktur C bessere Eigenschaften als die Struktur D. Eine linear unabhängige Generation dreier spektraler Verläufe ist nur möglich, wenn die interne Feldverteilung maßgeblich durch das externe elektrische Feld bestimmt wird und somit der Einfluß zusätzlich umgeladener Defektzustände unterdrückt wird. Weiterhin sollte der Unterschied des Lebensdauer-Beweglichkeits-Produkts in den einzelnen Bereichen möglichst groß sein. Struktur A erfüllt diese Bedingungen besser als Struktur C und D. Weiterhin beträgt die gesamte Absorberschichtdicke nur 270 nm (Tab. 6.1 und Abb. 6.1). Die lineare Unabhängigkeit der Struktur A soll im Folgenden intensiv untersucht werden, wobei neben der Wellenlänge des Biaslichts auch dessen Intensität variiert wurde. In Abb. 6.14a und Abb. 6.14b ist die spektrale Empfindlichkeit der Struktur A mit (450 nm und 650 nm) und ohne Biaslicht der Photonenflußdichte $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dargestellt. Die Intensität des Biaslichts mit der Wellenlänge 450 nm und 650 nm ist damit 10 und 100 fach höher als die Intensität des Meßsignals. Unter blauer Biasbeleuchtung kommt es, wie schon für die Strukturen C und D beschrieben, zu einer Zunahme der spektralen Empfindlichkeit im Bereich größerer Wellenlängen. Der Photostrom im Kurzschlußfall für die Meßsignalwellenlänge 600 nm steigt für eine Intensität von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen um 10% an, wohingegen die Zunahme bei $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen 20% beträgt. Dieser Effekt nimmt mit größerer Wellenlänge zu. Im Fall der Wellenlänge 740 nm (Biaslicht 450 nm) beträgt die Abweichung für einen Photonenfluß von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen 100% und für $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen 200%. Absolut betrachtet nimmt der Stromzugewinn für eine mittlere Sperrspannung von $-0.4V$ stärker zu als für den Kurzschlußfall. Relativ betrachtet ist der Stromgewinn allerdings kleiner als im Kurzschlußfall.

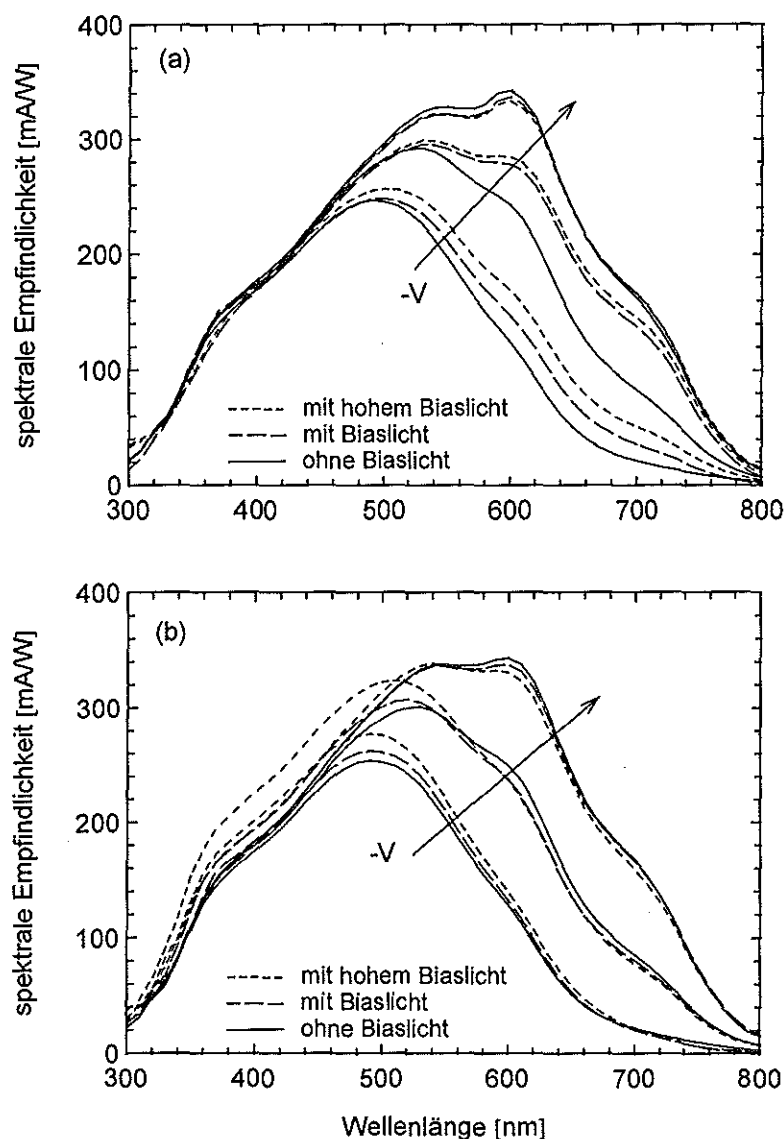


Abb. 6.14: Gemessene spektrale Empfindlichkeit der Struktur A für die Spannungen 0V, -0.4V und -1.0V mit und ohne Biaslicht der Intensität $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen (mit Biaslicht) und $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen (mit hohem Biaslicht) für die Wellenlängen 450nm (a) und 650nm (b).

Im Fall einer Biasbeleuchtung mit der Wellenlänge 650nm (Abb. 6.14b) steigt die spektrale Empfindlichkeit im Bereich zwischen 380nm und 500nm an. Das zusätzliche Biaslicht sorgt für eine Umladung innerhalb des kompletten Absorbers und als Folge steigt das elektrische Feld über der i-Schicht an, so daß die Rekombinationsverluste zurückgehen und mehr Ladungsträger aus der Absorberschicht extrahiert werden. Im Fall der Beleuchtung mit $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen steigt die gemessene Quantenausbeute für die Wellenlänge von 500nm über den Wert an, der als maximale optische Empfindlichkeit ermittelt wurde. Die interne Quanteneffizienz steigt in diesem Fall über 100%. Für diese Intensität des Biaslichts ($10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) werden mehr Ladungsträger extrahiert als vom Meßsignal generiert werden. Ungeachtet der Aufspaltung der spektralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit des Biaslichts zeigt die Struktur A die beste Biaslichtunterdrückung der hergestellten Proben.

Ein weiterer Aspekt, der neben der Farbtrennung, der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe und der Dynamik berücksichtigt werden muß, ist die lineare Korrelation zwischen eingestrahltm Photonenfluß und generiertem Photostrom. Das Verhältnis zwischen Photostrom und der Generationsrate (G) folgt hierbei der Proportionalität:

$$I_{Phot} \propto G^\gamma \quad \text{Gl. 6.2}$$

Idealerweise ist $\gamma=1$. Abweichungen von diesem Verhalten je nach gewählten Beleuchtungsbedingungen sind für alle Dioden auf der Basis von amorphem Silizium zu beobachten. Für sehr geringe Intensitäten sinkt γ unter eins, da der Dunkelstrom den Transport dominiert. Für hohe Intensitäten sinkt γ ebenfalls unter eins. In diesem Fall kommt es zur Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus, die zu einer erhöhten Rekombination führt, so daß der Photostrom nicht in gleichem Maße zunimmt wie die Intensität. Für die hier untersuchten Proben ist ein Abknicken der Photostromkennlinie als Funktion des Photonenflusses für geringe Intensitäten im Bereich zwischen $10^{10}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ und $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ Photonen zu beobachten, je nach Dunkelstrom des Sensors. Das Abknicken für hohe Intensitäten tritt für die hier untersuchten Sensoren nicht auf, da die zum Aufspalten der Quasi-Fermi-Niveaus notwendige Intensität typischerweise über $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ Photonen liegt. Für amorphe aber auch amorphe Siliziumkohlenstoff legierte Dioden⁵³ sind Werte für γ nahe bzw. gleich 1 publiziert worden [Akiyama91, 93], je nach Wellenlänge und Maximum der spektralen Empfindlichkeit. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit entspricht hierbei jeweils der Wellenlänge maximaler Extraktion. Für die hier realisierten Farbsensoren liegt der Wert geringfügig unterhalb von 1. So liegt der Wert für die Struktur A für die Wellenlängen 450nm (0V), 550nm (-0.4V) und 650nm (-1.0V) bei 0.98, 0.965 und 0.93 im Photonenflußbereich zwischen $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ und $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Hierbei nimmt mit zunehmender Extraktion aufgrund des höheren Feldes innerhalb der Absorberschicht auch γ zu.

6.6 Zusammenfassung der stationären Ergebnisse

In den Kapiteln 6.1 bis 6.5 wurden die stationären Eigenschaften unterschiedlicher unipolarer Bauelemente vorgestellt. Trotz des unterschiedlichen Designs und der unterschiedlichen Materialien, die als Absorber eingesetzt wurden, zeigen die Bauelemente eine nahezu identische Farbtrennung. Somit sind der Optimierung der Bauelementstruktur enge Grenzen gesetzt. Insbesondere unter Berücksichtigung der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe treten Abweichungen in der Farbtrennung auf. Als aussichtsreichste Struktur hat sich die Struktur A erwiesen. Die Struktur besitzt einen Dynamikumfang von >85dB im Spannungsbereich bis -1.0V und zeigt die besten Ergebnisse bei Untersuchungen zur linearen Unabhängigkeit. Dennoch zeigt auch dieses Bauelement für hohe Biasbeleuchtung eine Abhängigkeit der Farbtrennung von Umladevorgängen. Zur Optimierung sollte weiterhin versucht werden, die Gesamtschichtdicke des Absorbers zu reduzieren, wobei gleichzeitig die Differenz des Produkts aus Lebensdauer und Beweglichkeit der Ladungsträger maximal sein sollte.

⁵³ Hiermit ist jeweils der Absorberbereich gemeint.

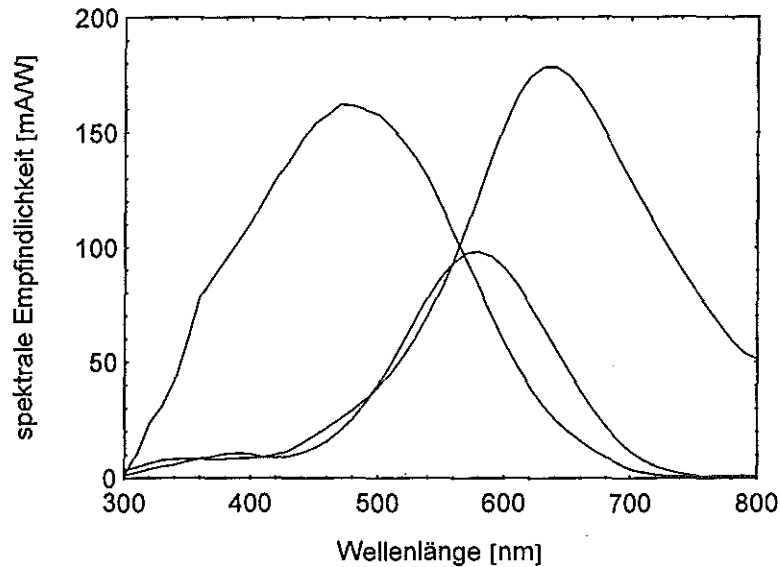


Abb. 6.15: Gemessene spektrale Empfindlichkeiten der Struktur D nach Transformation mit der Gl. 6.3.

Geht man im Folgenden davon aus, daß die in den Kapiteln 6.1 bis 6.5 vorgestellten Strukturen die Generation linear unabhängiger Verläufe ermöglichen, so kann die gemessene spektrale Empfindlichkeit als Superposition der spektralen Empfindlichkeit eines RGB-Signals betrachtet werden. Hierbei ergeben sich die Verläufe in Abb. 6.15 nach der Gleichung.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DSR(V_R) - DSR(V_G) \\ DSR(V_G) - DSR(V_B) \\ DSR(V_B) \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6.3}$$

Mithin läßt sich die spektrale Empfindlichkeit in ein RGB-Signal überführen. In Abb. 6.15 ist die spektrale Empfindlichkeit der Struktur D nach Berücksichtigung von Gl. 6.3 dargestellt. Exemplarisch ist die Struktur D gewählt worden, da für diese Struktur die Maxima der spektralen Empfindlichkeit von der Absorption in den einzelnen Bereichen und nicht durch Interferenzeffekte bestimmt werden. So ergibt sich eine FWHM (Full Width at Half-Maximum) für die Verläufe von 220nm, 137nm und 185nm. Die Maxima der Empfindlichkeit liegen bei 470nm, 580nm und 635nm. Ziel weiterer Arbeiten muß die Verbesserung der Farbtrennung und der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe sein. Bevor in Kapitel 6.9 das Bauelementverhalten von bipolaren und unipolaren Bauelementen verglichen wird, soll im Weiteren auf das transiente Verhalten von unipolaren Bauelementen eingegangen werden.

6.7 Transientes Verhalten

Ein wesentliches Kriterium bei der Analyse eines unipolaren Sensors ist das transiente Verhalten in Abhängigkeit unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen. Im folgenden Kapitel soll untersucht werden, in wieweit das transiente Verhalten von unipolaren Sensoren sich vom Verhalten bipolarer Bauelemente unterscheidet.

Es sind viele Publikationen bekannt, die sich mit der Untersuchung von transienten Phänomenen beschäftigen. So haben Nebel und Wang die transiente Antwort von amorphen Einzelschichten untersucht [Nebel89, Wang93]. Weiterhin sind experimentelle [Silver86, Street91, Street92, Becker94] und numerische [Shapiro88, Shapiro89] Untersuchungen an pin-Dioden bekannt. Bei diesen Arbeiten stand allerdings weder die Optimierung des transienten Verhaltens im Vordergrund, noch sind die Strukturen vergleichbar mit den Bauelementstrukturen dieser Arbeit. Vielmehr sollten die Transportmechanismen der Ladungsträger in den Schichten und Bauelementen untersucht werden. So werden Spannungstransienten fast ausschließlich an pin-Strukturen untersucht, wobei die Diode typischerweise im Dunkelfall in Vorwärtsrichtung geschaltet wird [Silver86, Shapiro88, Shapiro89, Street91, Street92, Becker94]. Auf dem Gebiet der Sensorik existieren deutlich weniger Publikationen die sich mit dem Phänomen der transienten Photostromantwort nach optischer Anregung [Stannowski96, Stannowski99] oder nach Wechsel der angelegten Spannung [Knipp98, Stiebig98] beschäftigen.

Neben dem Verständnis des Transports ist die Verbesserung des transienten Verhaltens der unipolaren Sensoren aus Tab. 6.1 Gegenstand der Untersuchung in diesem Kapitel. Exemplarisch werden einzelne Ergebnisse dieser Untersuchungen im Folgenden vorgestellt. Hierbei wird auf die Darstellung der transienten Antwort nach optischer Anregung näher eingegangen. Für Untersuchungen zum Spannungsschalten sei auf die Arbeiten von Stiebig [Stiebig98] verwiesen.

In Abb. 6.16a ist die transiente Photostromantwort der Struktur B nach Einschalten einer optischen Anregung der Wellenlänge 650nm dargestellt. Die Intensität beträgt ca. $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen. Als Anregungsmedium dient ein Leuchtdiodenarray. Die Anstiegszeit der Leuchtdioden beträgt 10µs. Aufgenommen wurden diese Messungen mittels einer Analog/Digital-Wandlerkarte.

Allgemein wird die Photostromantwort eines Sensors bestimmt durch die Dunkelzeit vor dem Einschalten der optischen Anregung, durch die angelegte Spannung, durch die Temperatur, durch die Intensität und die Wellenlänge der optischen Anregung. In den dargestellten Fällen betrug die Dunkelzeit jeweils 10s, bevor die Probe optisch angeregt wird. Es kann also von stationären Bedingungen ausgegangen werden. Bei der Meßtemperatur handelt es sich um Raumtemperatur (25°C).

Ähnlich wie für die in Kapitel 4 und 5 untersuchten nipiin- und piinip-Strukturen erfolgt in Abb. 6.16a nach dem Anstieg des Photostroms bedingt durch die Zeitkonstante der Meßanordnung der Übergang in einen quasi-stationären Wert. Dieser wird zwischen $4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ und 1ms unabhängig von der Spannung nahezu beibehalten. Im Zeitbereich zwischen 1ms und 20ms erfolgt dann eine abermalige deutliche Änderung des Photostroms. Dies führt zu einem Übergang in den stationären Wert. Bis zu einer Spannung von $>-0.8 \text{ V}$ nimmt der Betrag des Photostroms bei diesem Übergang ab, wohingegen der Photostrom für größere Spannungen zunimmt. Das Einschaltverhalten des Sensors korrespondiert mit dem Verhalten nach Abschalten der optischen Anregung. In diesem Fall ist auch bis zu einer Spannung von $>-0.8 \text{ V}$ eine Umkehr des Vorzeichens für den Abschaltstrom zu beobachten.

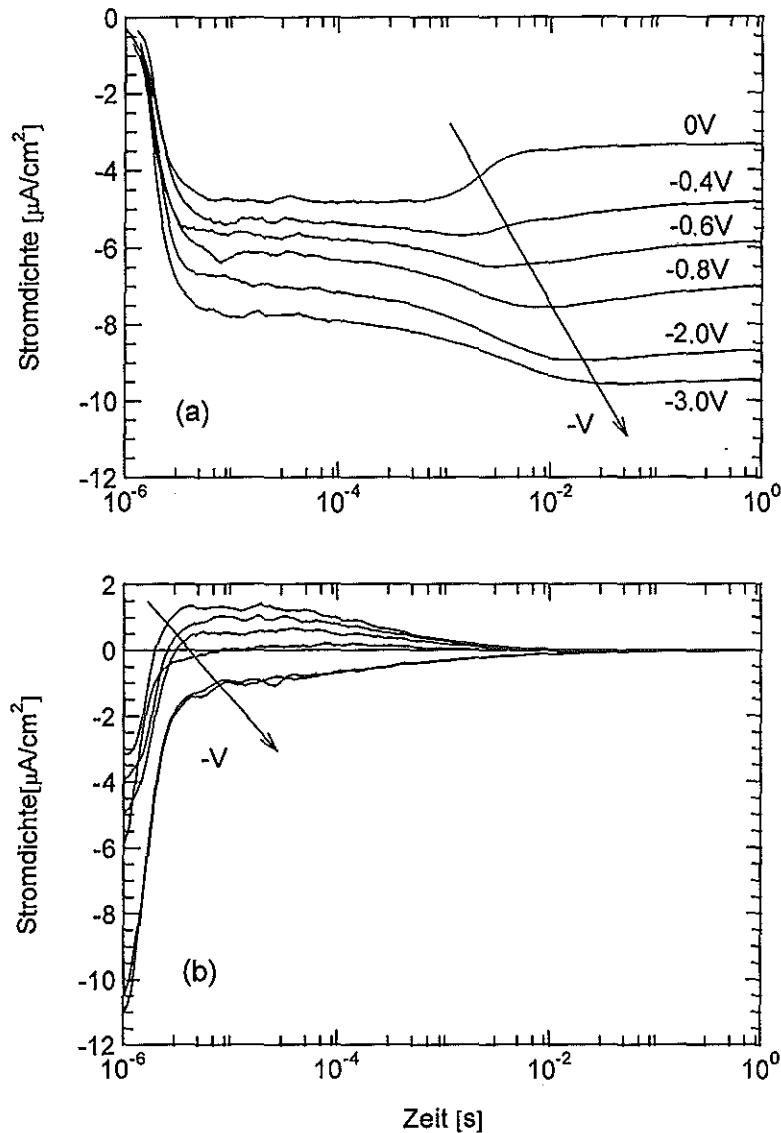


Abb. 6.16: Transiente Photostromantwort der Struktur B nach Einschalten (a) und Abschalten (b) einer optischer Anregung der Wellenlänge 650nm und Intensität ca. $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen für die angelegten Spannungen 0V, -0.4V, -0.6V, -0.8V, -2.0V und -3.0V.

Weiterhin ist für Struktur B in Abb. 6.16a zu beobachten, daß sich mit zunehmender Sperrspannung der Übergang in den stationären Wert zu höheren Zeiten verschiebt.

Numerische Simulationen der Photostromantwort nach optischer Anregung für amorphe Einfachdioden (pin-Dioden) zeigen, daß unter Kurzschlußbedingungen der Transport durch Löcher limitiert wird [Stannowski97, Brüggemann93]. Ein ähnliches Verhalten ist für die Struktur B nach Anlegen einer höheren Spannung zu beobachten. Der langsame Anstieg des Photostroms wird bestimmt durch thermisch generierte Löcher, die zur p-Schicht driften. Unter Kurzschlußbedingungen wird der Transport hauptsächlich durch das $\mu\tau$ -Produkt der Ladungsträger im hinteren Teil des Bauelementes vorgegeben. Der Rückgang des Photostroms nach etwa 3ms im Kurzschlußfall ist auf eine zunehmende Rekombination zurückzuführen, die sich aufgrund der Änderung des elektrischen Feldes einstellt. Hervorgerufen wird diese Änderung des Feldes durch Umladungen von Defektzuständen, die zu einem Rückgang der Extraktion aus dem hinteren Teil des Bauelementes führt. Für Bauelemente mit einem konstanten Produkt aus Beweglichkeit und Lebensdauer in der

Absorberschicht ist kein Rückgang der Photostromantwort für eine optische Anregung mit der Wellenlänge 650nm zu beobachten.

Vergleicht man die Photostromantwort der Struktur B (Abb. 6.16a) mit der Antwort der Struktur D (Abb. 6.17), so ist das Verhalten für den Kurzschlußfall und den Fall mittlerer negativer Spannungen analog. Lediglich für hohe negative Spannungen zeigt die Struktur D einen um eine Größenordnung schnelleren Übergang in den stationären Wert. Im Fall höherer Spannungen kann davon ausgegangen werden, daß der Transport der Ladungsträger durch den hinteren Bereich des Bauelements bestimmt wird und sich so die Verzögerungszeit der Struktur D deutlich absenkt. Auch für Struktur D ist nach Abschalten der optischen Anregung ein Vorzeichenwechsel des Photostroms zu beobachten. Auch in diesem Fall verhalten sich die Bauelemente identisch. Nach Abschalten der optischen Anregung für hohe Spannungen zeigt allerdings die Struktur D kein schnelleres Abklingverhalten als Struktur B.

Vergleicht man das Verhalten der Struktur D mit dem Verhalten einer komplett mikrokristallinen Diode mit konstanten Absorptionseigenschaften, so werden für eine vollständig mikrokristalline Diode bereits im Kurzschlußfall fast alle Ladungsträger extrahiert und der Verlauf ähnelt sehr dem Verlauf der Struktur D für hohe Biasspannungen. Eine Variation der Sperrspannung führt zu keiner nennenswerten Änderung des Verlaufs der Photostromantwort. Lediglich der Übergang in den stationären Wert verschiebt sich leicht zu kleineren Zeiten hin und die Extraktion der Ladungsträger aufgrund des höheren internen elektrischen Feldes nimmt leicht zu. Eine vollständig mikrokristalline Diode verhält sich nach Abschalten der optischen Anregung analog dem Verhalten beim Einschalten der optischen Anregung. So tritt für die vollständig mikrokristalline Diode beim Abschalten der optischen Anregung auch kein Wechsel des Vorzeichens des Photostroms auf.

Was die Verzögerungszeiten der transienten Photostromantwort anbelangt, so gilt für pin-Dioden ein ähnliches Verhalten wie für die nipi- und piinip-Strukturen. Der Quotient aus der Verzögerungszeit und dem Photonenfluß bzw. der optischen Generation ist nahezu konstant. Das heißt die Lichttransienten von pin-Dioden lassen sich ebenfalls über den Photostrom skalieren.

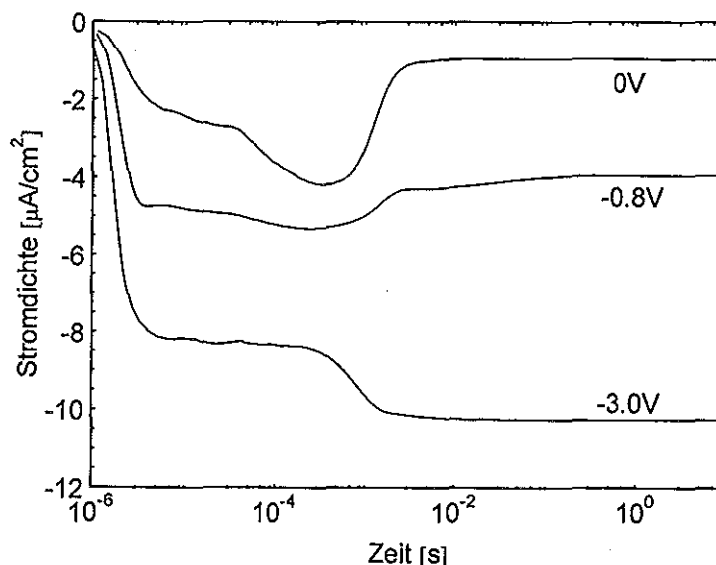


Abb. 6.17: Transiente Photostromantwort der Struktur D für eine Spannung von $-3.0V$ nach optischer Anregung mit der Wellenlänge 650nm und Intensität $ca. 10^{14} cm^{-2} s^{-1}$ Photonen.

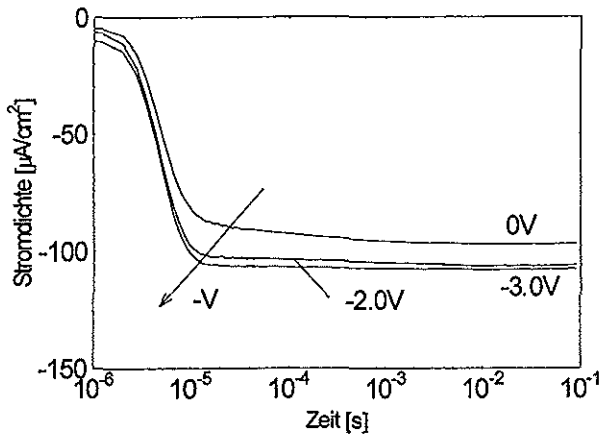


Abb. 6.18: Transiente Photostromantwort der Struktur C nach optischer Anregung mit der Wellenlänge 482nm und Intensität $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

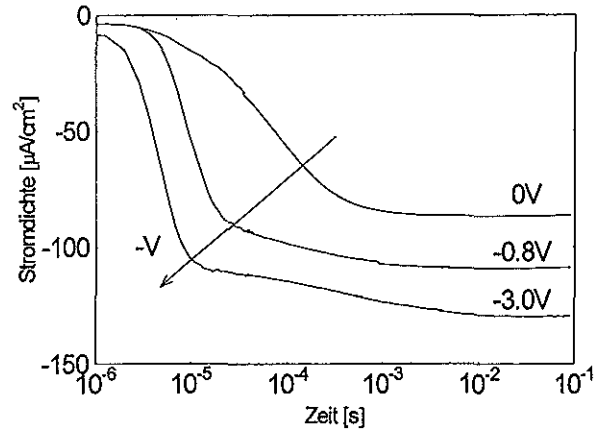


Abb. 6.19: Transiente Photostromantwort der Struktur D nach optischer Anregung mit der Wellenlänge 482nm und Intensität $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen.

In Abb. 6.18 und 6.19 ist die Photostromantwort der Detektoren C und D nach Anregung mit der Wellenlänge 482nm und $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Photonen gezeigt. Ein Vergleich der beiden Strukturen C und D zeigt einen deutlich verzögerten Anstieg des Photostroms insbesondere für hohe Sperrspannungen für die Struktur D. Ein Vergleich der stationären Photoströme mit den Ergebnissen der monochromatischen Messung zeigen eine gute Übereinstimmung. Der Vorteil, der sich für die Struktur D im Fall einer roten Beleuchtung zeigt, wird im Fall der Blauanregung nicht beobachtet. In diesem Fall verhält sich Struktur D deutlich schlechter als die Strukturen A bis C. Ein Vergleich der Struktur A bis C zeigt auch im Fall der optischen Anregung mit rotem Licht ein ähnliches Verhalten. Auch hier ist keine deutliche Variation der transienten Antwort als Funktion des geänderten Bauelementdesigns zu beobachten. Die transiente Antwort nach Abschalten der optischen Anregung zeigt für alle hier vorgestellten Strukturen (A bis D) einen stetigen Abfall des Photostroms. Für die Blaubeleuchtung gilt wie auch schon für die rote Beleuchtung, daß sich die Strukturen A, B und C analog verhalten, sowohl beim Einschalten als auch nach dem Abschalten der optischen Anregung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das im Kurzschlußfall auftretende Maximum des Photostroms für eine Beleuchtung mit rotem Licht auf die reduzierten Transporteigenschaften im hinteren Teil der Bauelemente zurückzuführen sind. Die Umkehr des Photostroms nach Abschalten der optischen Anregung ist ebenfalls auf diese Tatsache zurückzuführen. Für höhere Sperrspannungen wird der Transport durch die Löcher limitiert, die zur p-Schicht driften. Der Einsatz von mikrokristallinem Silizium führt lediglich für hohe Sperrspannungen bei gleichzeitiger roter Beleuchtung zu einer Verbesserung der transienten Antwort. Für den Fall der optischen Anregung mit blauem Licht ist für die untersuchten Strukturen ein stetiger Anstieg des Photostroms zu beobachten.

6.8 Zusammenfassung und Vergleich von unipolaren und bipolaren Sensoren

In den vorangegangenen Teilkapiteln wurden unterschiedliche unipolare Sensoren vorgestellt und anhand von stationären und transienten Ergebnissen verglichen.

Aufgrund des einfachen Aufbaus eines unipolaren Sensors und der einfachen Möglichkeit ein solches Bauelement mit einer Ausleseelektronik zu verbinden, handelt es sich bei diesem Zweipol-Bauelement um eine Alternative zu bipolaren Sensoren. Das bereits für bipolare Sensoren entwickelte Konzept der spannungsgesteuerten Ladungsträgersammlung konnte auf einen unipolaren Sensor übertragen werden. Neben der Farbtrennung, die Voraussetzung für die Generation eines RGB-Signals ist, müssen die spektralen Verläufe linear unabhängig sein. Die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe ist nur dann gewährleistet, wenn der elektrische Feldverlauf innerhalb eines unipolaren Sensors maßgeblich durch das extern angelegte Feld bestimmt wird und Umladevorgänge innerhalb des Bauelements einen reduzierten Einfluß auf die Feldverteilung haben. Dies läßt sich erreichen, indem die Absorberschichtdicke möglichst gering ist und die Differenz des $\mu\tau$ -Produkts in den einzelnen Bereichen möglichst groß ist.

Ungeachtet der zuvor beschriebenen Vorteile besitzt ein pin-Farbsensor mit separierter Absorberschicht auch Nachteile im Vergleich zu bipolaren Sensoren (Kapitel 4 und 5). So ist die Farbtrennung eng mit der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe verbunden. Simulationen von Herzog [Herzog98] zeigen zwar, daß unipolare Sensoren ähnliche Normfarbabstände (Kapitel 6.6 und 5) wie bipolare Sensoren besitzen, aber die Anforderung an die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe sind für einen unipolaren Sensor deutlich höher als für einen bipolaren Sensor.

Die beste realisierte Struktur (A) besitzt eine gute Farbtrennung mit Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 500nm, 530nm und 610nm. Die Dynamik dieser Diode liegt >85dB. Limitiert wird das Verhalten dieses Bauelements von der linearen Unabhängigkeit.

Erst die Integration eines unipolaren und bipolaren Sensors auf einer kristallinen Ausleseelektronik wird zeigen, wie sich die in diesem Kapitel aufgezeigten Randbedingungen im Zusammenwirken mit einer kristallinen Schaltung auswirken. Die Möglichkeit der einfachen Realisierbarkeit spricht für die Struktur, jedoch die eingeschränkte Farbtrennung macht deutlich, daß der Sensor nur in einem Bereich einsetzbar ist, wo keine hohen Anforderungen an die Farbauslösung gestellt werden.

Kapitel 7

Gestapelte Sensorstrukturen Vierpol-Bauelemente

In den Kapiteln 4 bis 6 wurden Sensoren vorgestellt, die die Generation eines RGB-Signals mit Hilfe einer Zweipol-Anordnung erlauben. Zweipol-Bauelemente sind allerdings dadurch begrenzt, daß die Sensorsignale zeitlich sequentiell ausgelesen werden. Weiterhin müssen die generierten Verläufe linear unabhängig sein. Das Problem der linearen Unabhängigkeit der spektralen Verläufe und der sequentielle Auslesensvorgang lassen sich umgehen, indem man mehrere separate Sensorstrukturen übereinander stapelt.

Als mögliche Struktur kommt ein Vierpol-Bauelement in Betracht, das aus einer Kombination gestapelter Dioden (pin- oder nip-) besteht. Bei einer Vierpol-Anordnung handelt es sich um die einfachste Struktur, bei der drei unabhängige spektrale Verläufe parallel ausgelesen werden können. Hierzu werden drei unabhängige Sensoren übereinander integriert und mit leitfähigen transparenten Kontaktschichten versehen. Eine solche Anordnung erlaubt das parallele Auslesen aller drei Kanäle. Somit wird der Farb-Aliasing oder Farbmoiré-Effekt ausgeschaltet und mit einer Aufnahme wird die Generation eines RGB-Signals möglich. Ein solches Bauelement läßt sich realisieren, indem drei Dioden vertikal übereinander integriert werden (Abb. 7.1a). Zwischen den Dioden werden jeweils transparente Kontaktschichten eingebracht.

Neben der Möglichkeit, die Anzahl der Kontakte des Bauelements und so die Anzahl der vertikal zu integrierenden Dioden zu erhöhen, können auch die amorphen pin Dioden, welche zwischen den transparenten Kontakten eingebracht werden, gegen pinip-Strukturen gewechselt werden (Abb. 7.1b). Ein solches Bauelement kann zwar nicht mehr parallel ausgelesen werden, jedoch eröffnet es die Möglichkeit, insgesamt 6 Sensorkanäle auszulesen. Somit erhöht sich die Anzahl der Kanäle, welche linear unabhängig voneinander ausgelesen werden können, von 3 auf 6 Kanäle. Grundsätzlich bietet eine Vierpol-Anordnung die Möglichkeit, drei linear unabhängige Kanäle mit einer Aufnahme zu generieren oder 6 Kanäle mit Hilfe von zwei Aufnahmen auszulesen. Die beiden Möglichkeiten, die sich aus einer Vierkontakt-Anordnung ergeben, werden in Kapitel 7 vorgestellt.

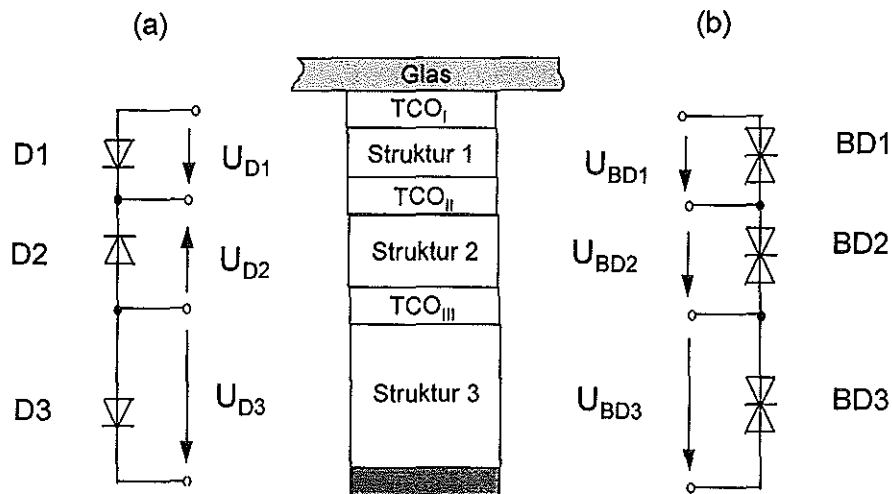


Abb. 7.1: Schematischer Aufbau eines Vierpol-Bauelements. Zwischen den transparenten Kontaktschichten werden entweder pin-Dioden (a) implementiert oder pinip-Strukturen (b) werden als lichtempfindliche Detektoren eingesetzt. Somit läßt sich ein 3- oder 6-Kanal-Sensor realisieren.

7.1 Der 3-Kanal-Sensor

Dieses Kapitel befaßt sich mit der Entwicklung und Optimierung eines 3-Kanal-Sensors. Das Kapitel ist so gegliedert, daß zuerst auf die experimentelle Realisierung und das Bauelementdesign eingegangen wird (Kapitel 7.1.1). Anschließend werden die stationären Bauelementeigenschaften vorgestellt (Kapitel 7.1.2). In Kapitel 7.1.3 wird die farbmétrische Auswertung der experimentell ermittelten spektralen Empfindlichkeiten vorgestellt. Ausgehend vom optischen Simulationsmodell, welches in Kapitel 6 vorgestellt wurde, soll in Kapitel 7.1.4 näher auf die optische Modellierung von 3-Kanal-Sensoren eingegangen werden. Zur Optimierung des Bauelements wird in Kapitel 7.1.5 der Einfluß der spektralen Empfindlichkeit der einzelnen Diode auf den Normfarbabstand untersucht. Die Optimierung wird in Kapitel 7.1.7 auf die Charakterisierung des Einflusses der TCO-Schichten auf Metameriefehler erweitert. Zuvor wird aber in Kapitel 7.1.6 auf die Dynamik der drei gestapelten Dioden des 3-Kanal-Sensors eingegangen. Diese muß bei der Verbesserung der farbmétrischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Zusammengefaßt wird dieser Teil der Arbeit in Kapitel 7.1.8.

7.1.1 Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign

Wie bereits in Abb. 7.1a schematisch dargestellt, besteht die im Folgenden beschriebene Struktur aus drei gestapelten pin-Dioden. Anhand eines pin/TCO/nip/TCO/pin Schichtsystems werden die Eigenschaften des Bauelements im Weiteren diskutiert und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Zur Vereinfachung der Nomenklatur werden die drei Dioden mit D1 bis D3 bezeichnet, wobei das Licht durch das Glassubstrat in den Sensor (Abb. 7.1a) eintritt.

Hergestellt wurde das komplexe Schichtsystem, bestehend aus 12 Halbleiterschichten, auf einem konventionellen Glassubstrat der Dicke 1.1mm. Die Schichtdicke der TCO_I -

Schicht beträgt 155nm (Abb. 7.1). Bei der zuerst aufgetragenen pin-Diode handelt es sich um eine Diode, bei der die Absorberschicht mit Kohlenstoff legiert wurde. So ergibt sich für den Absorber der Diode D1 eine optische Bandlücke von 2.0eV. Die Schichtdicke des Absorbers beträgt 85nm. Im Anschluß an die Deposition der n-Schicht wird eine 315 nm dicke TCO-Schicht aufgebracht. Die TCO-Schicht wird bei einer Temperatur von 150°C auf die Diode D1 gesputtert⁵⁴. Nach der Deposition der TCO-Schicht erfolgt die Abscheidung einer nip-Diode. Der optische Bandabstand und die Schichtdicke der Absorberschicht dieser Diode beträgt 1.9eV und 205nm. Die mittlere Diode wurde invertiert abgeschieden, damit jeweils gleiche Ladungsträger an den Kontaktschichten abfließen. Im Anschluß wird eine weitere TCO-Schicht mit einer Schichtdicke von ebenfalls 315nm aufgebracht. Für diese Schicht gelten identische Depositionsbedingungen wie für die TCO-Schicht zwischen der Diode D1 und D2. Als dritte Diode wird wieder eine pin-Diode aus amorphem Silizium deponiert. Die i-Schichtdicke dieser Diode beträgt 700nm. Das Schichtsystem wird mit einem Aluminiumrückkontakt abgeschlossen. Im Anschluß an die Herstellung des Multischichtsystems werden die einzelnen Dioden strukturiert, so daß die TCO-Schichten zur Charakterisierung kontaktiert werden können. Hierzu wurde ein 3-Masken Prozeß entwickelt. Die amorphen Schichten wurden in einem reaktiven Ionenätzschritt strukturiert, wohingegen die TCO-Schichten naßchemisch durch die Anwendung von stark verdünnter Salzsäure entfernt wurden.

7.1.2 Spektrale Empfindlichkeit

In Abb. 7.2 ist die absolute spektrale Empfindlichkeit der drei Dioden des Vierpol-Bauelements dargestellt. Vermessen wurden die drei Dioden unter Kurzschlußbedingungen. Die Maxima der spektralen Empfindlichkeit liegen für die Dioden D1, D2 und D3 bei 450nm, 560nm und 640nm. Die Halbwertsbreiten der drei Verläufe betragen 185nm, 125nm und 120nm. Vergleicht man die spektralen Empfindlichkeiten, so liegt das Verhältnis der Amplituden der Dioden von D1/D2/D3 bei 0.9/0.55/1. Somit ist trotz der unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten der unterschiedlichen Materialien innerhalb der einzelnen Bereiche unter Berücksichtigung der Schichtdicken eine sehr gute Aufteilung des einfallenden Lichts auf die einzelnen Dioden erzielt worden.

Vergleicht man die Schnittpunkte der normierten spektralen Empfindlichkeit, so liegen diese bei 0.65 zwischen der Diode D1/D2 und bei 0.75 zwischen der Diode D2/D3. Die Spitzen im Verlauf der spektralen Empfindlichkeit für die Diode D3 sind auf Interferenzeffekte innerhalb des Schichtstapels zurückzuführen. Im Zusammenhang mit dem 6-Kanal-Sensor (Kapitel 7.2) wird auf diese Effekte noch näher eingegangen.

Zur näheren Analyse der Absorption in den einzelnen Bereichen des Sensorstapels ist in Abb. 7.3 der Photostrom unter Kurzschlußbedingungen der drei Dioden für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 650nm aufgetragen. Die Wellenlängen des Meßlichts korrespondieren gut mit den Maxima der spektralen Empfindlichkeit. Aufgetragen ist der Photostrom unter Verwendung einer Photonenflußdichte von $10^{15} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ als Funktion der Teildioden. Man beobachtet, daß der Photostrom für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 650nm jeweils für die Dioden D1, D2 und D3 maximal ist. Dies war anhand der spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 7.2 auch zu erwarten.

⁵⁴ Auf den Sputterprozeß und die verwendeten Depositionsbedingungen kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Sämtliche während dieser Arbeit eingesetzten TCO-Schichten (Kapitel 7 bis 9) gehen auf die Arbeiten von O. Kluth, A. Löffl, B. Rech, H. Siekmann [Kluth97, Löffl97] zurück.

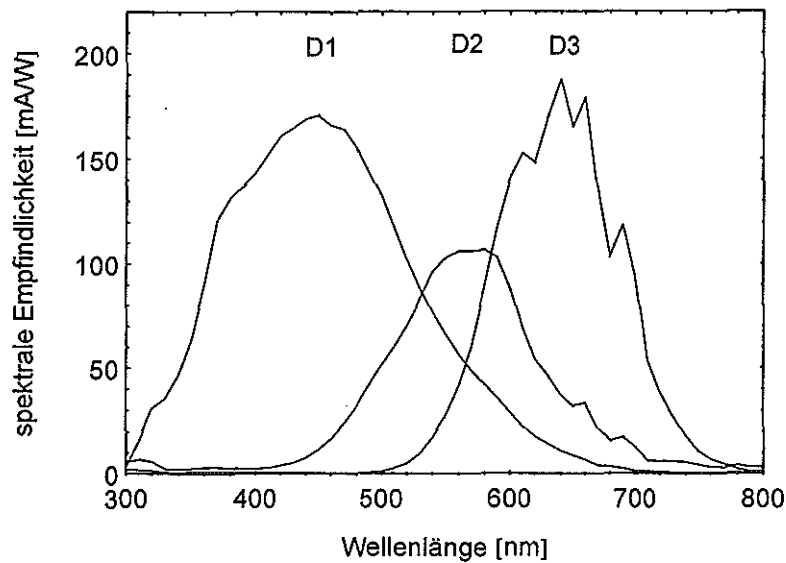


Abb. 7.2: Gemessene spektrale Empfindlichkeit eines Vierpol-Bauelements deponiert auf einem Glassubstrat. Die Struktur wurde realisiert in Anlehnung an den schematischen Aufbau des Bauelements in Abb. 7.1a. Alle drei Dioden wurden unter Kurzschlußbedingungen vermessen.

Vergleicht man nun den Photostrom einzelner Dioden für die Wellenlänge 450nm, so liegt der Photostrom der Diode D2 um den Faktor 17 unterhalb des Stroms für die Diode D1. Vergleicht man weiter den Photostrom der Diode D2 mit dem der Diode D3, so reduziert sich der Photostrom ein weiteres Mal um den Faktor 84. Insgesamt beträgt die Separation zwischen der Diode D1 und D3 unter Beleuchtung mit 450nm mehr als 3 Größenordnungen. Ein umgekehrtes, wenngleich nicht so ausgeprägtes Verhalten läßt sich für die Beleuchtung unter 650nm beobachten. Das Verhältnis zwischen der Diode D3 und D1 liegt bei diesem Vergleich bei 16. Das Bauelement zeigt also eine exzellente Separation des Lichts innerhalb der einzelnen Dioden.

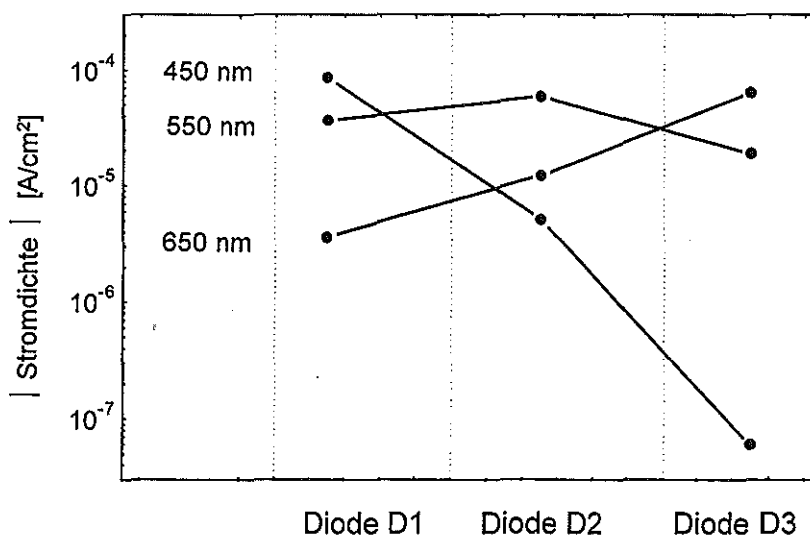


Abb. 7.3: Gemessener Photostrom der drei Dioden eines Vierpol-Bauelements für die Wellenlängen 450nm, 550nm und 650nm. Der Photostrom wurde ermittelt unter Verwendung einer Photonenflußdichte von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Vergleicht man nun das Verhalten für blau (450nm) und rot (650nm) mit dem Verhalten unter grüner (550nm) Beleuchtung, so ist für diesen Fall die schwächste Separation zu beobachten. Zwischen der Diode D2 und D1 liegt die Separation bei 1.6 und zwischen der Diode D2 und D3 bei 3. Mithin wird ein nicht zu vernachlässigender Teil des grünen Lichts in der Diode D1 absorbiert. Dies zeigt bereits die spektrale Empfindlichkeit der Diode D1 in Abb. 7.2 mit der Halbwertsbreite von 185nm.

7.1.3 Farbmétrische Auswertung des 3-Kanal-Sensors

In diesem Kapitel wird die spektrale Empfindlichkeit des vorgestellten Sensors (Abb. 7.2) mit der Empfindlichkeit des gestapelten kristallinen Detektors aus Kapitel 3.4.6 (Abb. 3.8) verglichen. Weiterhin wird das Verhalten des kommerziellen Scanners in Abb. 3.6 berücksichtigt. In Tab. 7.1 sind die Normfarbabstände für die drei Strukturen unter Verwendung eines Datensatzes von 69 Testfarben aus dem „Book of Colors“ von Munsell dargestellt. Weiterhin ist in der Tabelle die Standardabweichung des Normfarbabstands und der maximale Normfarbabstand angegeben. Die Charakterisierung erfolgt gemäß Kapitel 3.5 mittels einer 3x3-Matrix auf der Basis des „Munsell“-Datensatzes. Bei der Normfarbabstandsanalyse wurde jeweils auf eine 3x3 Transformationsmatrix zurückgegriffen. Weiterhin wird zur Charakterisierung und zum Test der Sensoren der gleiche Testfarbensatz verwendet. Die Möglichkeit, auch Mischterme aus den drei Eingangskanälen zu verwenden, wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Es kann aber auf die Arbeiten von Herzog [Herzog99] verwiesen werden. Die Auswirkung unterschiedlicher Test- und Charakterisierungsfarbsätze wurde ebenfalls von Herzog untersucht und dargestellt [Herzog99].

Ein Vergleich der drei Strukturen zeigt, daß der amorphe gestapelte Sensor bessere Eigenschaften als der kristalline Sensor besitzt, wobei dieser Unterschied nicht sehr groß ist. Für beide gestapelten Sensoren ist der Unterschied zu der mit Filtern beschichteten Struktur sehr deutlich. Bei diesem Vergleich muß allerdings berücksichtigt werden, daß es sich bei der realisierten gestapelten Struktur um kein farbmétrisch optimiertes Bauelement handelt, sondern vielmehr der Nachweis der Machbarkeit erbracht werden sollte. Hingegen kann für den Scanner mit Farbfiltern davon ausgegangen werden, daß es sich bei dieser Struktur um eine farbmétrisch optimierte Anordnung handelt. Um das spektrale Auflösungsverhältnis des amorphen 3-Kanal-Sensors zu verbessern, wird im Folgenden die Wechselwirkung der Bauelementparameter mit der spektralen Empfindlichkeit diskutiert.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
kristalliner 3-Kanal-Sensor	3x3	Munsell	Munsell	8.49	6.56	32.46
amorpher 3-Kanal-Sensor	3x3	Munsell	Munsell	7.12	6.14	26.76
kommerzieller Scanner (Sharp)	3x3	Munsell	Munsell	3.57	3.43	15.1

Tab. 7.1: Angegeben sind der ermittelte Normfarbabstand ΔE_{ab} , die Standardabweichung des Normfarbabstands und der maximale Normfarbabstand ΔE_{max} für einen kristallinen (Abb. 3.8) und einen amorphen 3-Kanal-Sensor (Abb. 7.2) unter Berücksichtigung von 69 Testfarben aus dem Munsell „Book of Colors“. Beide Sensoren sind farbmóiré frei. Weiterhin ist der Normfarbabstand für einen kommerziellen Scanner (Sharp, Abb. 3.6) eingetragen.

Ausgehend von den so gewonnenen Erkenntnissen sollen Zusammenhänge zwischen Bauelementparametern und dem Normfarbabstand ermittelt werden. Das angestrebte Ziel ist eine direkte Korrelation der Bauelementparameter mit dem Normfarbabstand zur Bestimmung weiterer Optimierungskriterien.

7.1.4 Optische Modellierung

Voraussetzung für die optische Simulation der Generation innerhalb des Bauelements ist die exakte Kenntnis der Schichtdicken jeder einzelnen Schicht. In Abb. 7.4 ist die gemessene Reflexion des kompletten Schichtsystems bis zu einer Wellenlänge von 1000nm aufgetragen. Darüber hinaus ist die simulierte Reflexion des Schichtsystems eingezeichnet. Ein Vergleich der beiden Kurven zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und optischer Simulation. Sämtliche Eigenschaften der gemessenen Reflexion konnten wiedergegeben werden. Vergleicht man die Reflexion dieses Schichtsystems mit der Reflexion einer einfachen pin-Diode, so ist eine eindeutige Korrelation zwischen einzelnen Bereichen der Reflexionskurve und einzelnen Schichten des Schichtpakets nur begrenzt möglich. Dennoch lassen sich drei Bereiche der Reflexion unterteilen. Für amorphe Einfach-pin-Dioden wie auch für diese Struktur wird die Reflexion bis zu einer Wellenlänge von 500nm von der TCO_I -Schichtdicke und den optischen Eigenschaften der p- und i-Schicht der ersten Diode bestimmt. Der Bereich zwischen 500nm und 650nm ist sehr sensitiv auf jede Änderung des Schichtsystems, da in diesem Bereich Mehrfachreflexionen einen deutlichen Einfluß auf die gemessene Reflexion haben. Nichtsdestotrotz hat die TCO_{II} -Schichtdicke und die Diode D2 einen zentralen Einfluß auf die Reflexion. Für Wellenlängen größer als 650nm wird die Reflexion hauptsächlich durch die Eigenschaften des gesamten Systems unter Berücksichtigung des Rückkontakts bestimmt. Ausgehend von den so bestimmten exakten Schichtdicken läßt sich nun der Einfluß der einzelnen Bauelementparameter (z.B. Schichtdicken und Bandabstände) auf die Farbtrennung untersuchen. Die Untersuchung soll allerdings im Weiteren exemplarisch auf drei Parameter beschränkt werden.

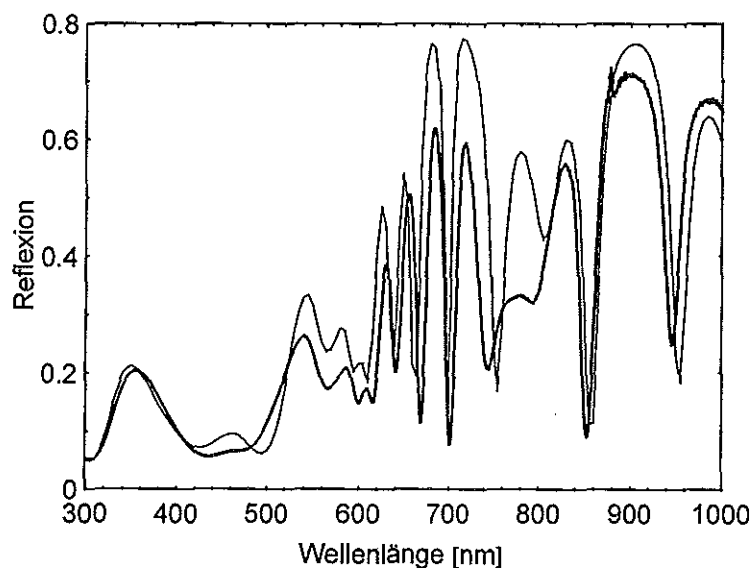


Abb. 7.4: Gemessene (dicke Linie) und simulierte (dünne Linie) Reflexion eines Vierpol-Bauelements. Bei den Verläufen handelt es sich um die Reflexion der Struktur in Abb. 7.2.

Hierbei wird der Einfluß der Schichtdicke des Absorbers der Diode D1 auf die Farbtrennung untersucht. Weiterhin wird der Bandabstand des Absorbers der Diode D1 variiert. Als drittes wird der Einfluß der TCO-Schichtdicke zwischen der Diode D1 und D2 diskutiert. Zur Verdeutlichung des Schichtaufbaus des hier untersuchten Sensors sei noch einmal auf die Abb. 7.1a und Abb. 7.2 verwiesen. Den amorphen Schichten der Diode D1 wird hierbei jeweils der Index I, den Schichten der Diode D2 der Index II und schließlich den Schichten der Diode D3 der Index III zugeordnet. Auf die Untersuchung der TCO_I-Schichtdicke wird an dieser Stelle verzichtet, da an anderer Stelle bereits ausführlich die Wechselwirkung zwischen TCO_I-Schichtdicke und der spektralen Empfindlichkeit als Funktion der i-Schichtdicke der Diode D1 diskutiert wurde [Knipp98b, Knipp98c]. Die Untersuchungen zeigen, daß für alle untersuchten i_I-Schichtdicken (25-95nm) die Halbwertsbreite der spektralen Empfindlichkeit der Diode D1 deutlich reduziert ist, wenn die TCO-Schichtdicke von 90nm auf 155nm ansteigt⁵⁵. Dieses Ergebnis ist bereits bei der Realisierung der Struktur in Abb. 7.2 berücksichtigt worden. Weiterhin wird auf die Untersuchung der Diode D3 verzichtet, da der Vergleich der Empfindlichkeiten für den kommerziellen Scanner mit der Empfindlichkeit der Abb. 3.6 nahelegt, daß sich der Normfarbabstand bereits durch Modifikation der spektralen Empfindlichkeit der Diode D1 und D2 deutlich verbessern läßt.

Vergleicht man die Normfarbabstände und die spektralen Empfindlichkeiten der beiden Systeme fällt auf, daß sich die Empfindlichkeit des Rotkanals (Abb. 3.6) kaum von der Empfindlichkeit der Diode D3 (Abb. 7.2) unterscheidet, obgleich der Unterschied im Normfarbabstand sehr deutlich ist. Dieser Sachverhalt legt nahe, daß das hauptsächliche Optimierungspotential bei der Diode D1 und D2 liegt. Es kann allerdings bereits an dieser Stelle festgehalten werden, daß eine Zunahme der i-Schichtdicke der Diode D3 und damit verbunden eine Zunahme der Empfindlichkeit für höhere Wellenlängen zu einer Verschlechterung des Normfarbabstands führt [Herzog98].

7.1.5 Einfluß des Bandabstands der Diode D1 auf das spektrale Verhalten

Die optischen Rechnungen in Abb. 7.5 zeigen, daß sich mit zunehmendem Bandabstand des Absorbers in der Diode D1 ein deutlich schmalerer Verlauf der spektralen Empfindlichkeit einstellt. Die Verläufe wurden jeweils normiert auf die spektrale Empfindlichkeit unter Verwendung einer 85nm dicken i-Schicht mit einem optischen Bandabstand von 2.0eV. Bei der 85nm dicken i-Schicht mit einem optischen Bandabstand von 2.0eV handelt es sich um die Schicht, die auch im realisierten Bauelement eingesetzt wurde. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit schiebt für die Struktur mit einem Bandabstand von 2.2eV beim Anstieg der Absorberschichtdicke von 35nm auf 95nm von 390nm nach 410nm (Abb. 7.5a). Für die Struktur mit dem Bandabstand von 2.0eV schiebt die Empfindlichkeit von 400nm ($d_i=35\text{nm}$) nach 430nm ($d_i=95\text{nm}$). Betrachtet man nicht das Maximum der spektralen Empfindlichkeit sondern den Schwerpunkt der Empfindlichkeit, so schiebt dieser unabhängig von Interferenzeffekten linear mit der Schichtdicke des Absorbers. Die Zunahme der Absorberschichtdicke um jeweils 10nm führt zu einer Verschiebung des Schwerpunktes um 2.5nm. Dies gilt für den untersuchten Absorberschichtdickenbereich von 35-95nm unabhängig davon ob der optische Bandabstand 2.0eV oder 2.2eV beträgt. Vergleicht man die Absolutwerte der Amplitude für die Generation in der Diode D1, so nimmt diese von 2.0eV nach 2.2eV um ca. 10% ab.

⁵⁵ Bei den gewählten TCO-Schichtdicken von 90nm und 155nm handelt es sich um kommerziell erhältliche Substrate, welche bereits mit einer TCO-Schicht versehen sind.

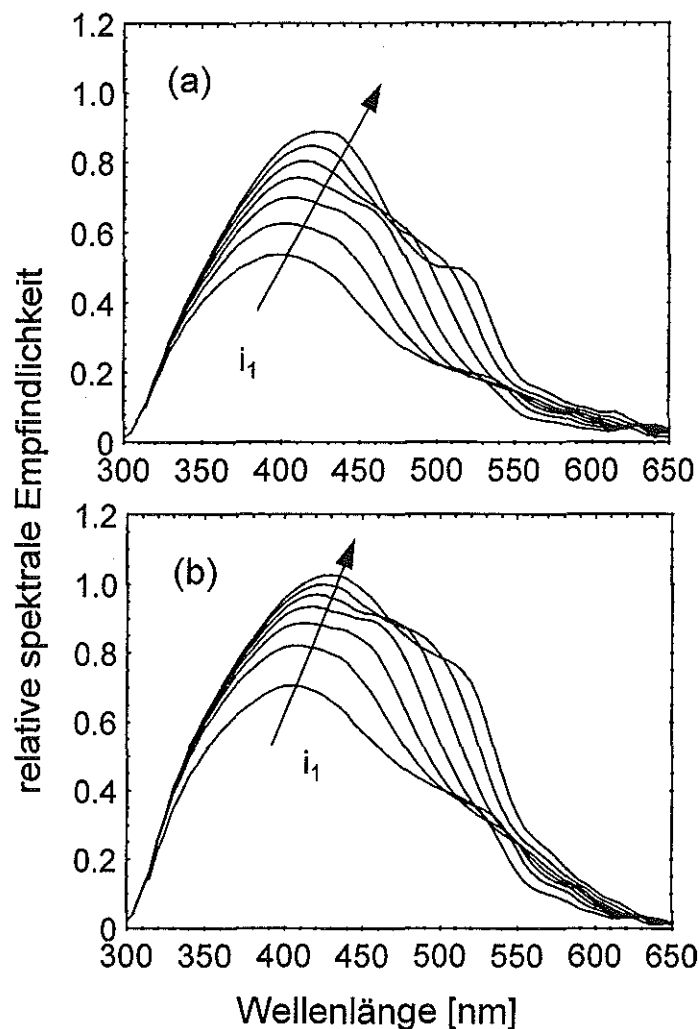


Abb. 7.5: Simulierte relative spektrale Empfindlichkeit der Diode D1 eines Vierpol-Bauelements als Funktion der i-Schichtdicke der Diode D1 für unterschiedliche Bandabstände 2.2eV (a) und 2.0eV (b). Die i-Schichtdicke wurde in 10nm Schritten von 35nm auf 95nm erhöht.

Was die Halbwertsbreite der spektralen Empfindlichkeit anbelangt, so ist diese in Abb. 7.6 als Funktion der i-Schichtdicke für Materialien mit einem Bandabstand von 2.0eV und 2.2eV aufgetragen. Für beide Strukturen existiert ein Minimum der Halbwertsbreite. Dieses liegt für das Absorbermaterial mit einem Bandabstand von 2.0eV bei 55nm und für 2.2eV bei 45nm. Bei einer weiteren Reduktion der i-Schichtdicke steigt die Halbwertsbreite für die beiden verwendeten Bandabstände wieder an. Allgemein läßt sich festhalten, daß mit ansteigendem Bandabstand die Halbwertsbreite sinkt. Weiterhin schiebt der Minimum der Halbwertsbreite zu kleineren i-Schichtdicken.

Durch die Berechnungen in Abb. 7.5 wird zwar der Einfluß der modifizierten Eigenschaften der Diode D1 auf die spektrale Empfindlichkeit deutlich, aber Rückschlüsse auf den Normfarbabstand sind so nicht möglich. Zu diesem Zweck ist in Abb. 7.7a der Normfarbabstand als Funktion der i-Schichtdicke der Diode D1 aufgetragen. Zur Berechnung des Normfarbabstands sei noch einmal auf Kapitel 3.5 verwiesen. Den Berechnungen liegt der Datensatz mit 1269 Testfarben [Parkinnen89] zugrunde.

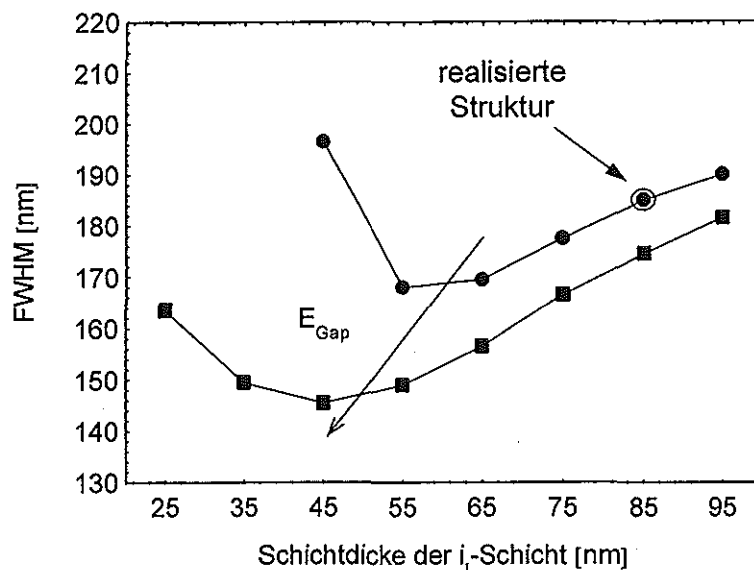


Abb. 7.6: Halbwertsbreite der simulierten spektralen Empfindlichkeiten der Diode D1 eines Vierpol-Bauelements als Funktion der i -Schichtdicke der Diode D1. Die Kreise entsprechen einer optischen Bandlücke von 2.0eV und die Quadrate einer Bandlücke von 2.2eV.

Als erstes fällt auf, daß der Normfarbabstand für die Schicht mit dem höheren Bandabstand in der Diode D1 geringer ist. Das Maximum des Normfarbabstands liegt für die Struktur mit einem optischen Bandabstand von 2.0eV bei 65nm Absorberschichtdicke und für eine Bandlücke von 2.2eV bei 55nm. Damit könnte man auf den ersten Blick den Eindruck gewinnen, daß eine minimale Halbwertsbreite einem Maximum des Normfarbabstands entspricht.

Berücksichtigt man neben den in Abb. 7.7b gezeigten Berechnungen zum Normfarbabstand weitere Rechnungen von Herzog [Herzog98], bei denen zwar die Absorbanz in der Diode D1 variiert wurde, aber die Empfindlichkeit der Diode D2 und D3 als konstant angenommen wurden, so zeigen diese, daß eine Reduktion der Halbwertsbreite der spektralen Empfindlichkeit für die Diode D1 zu einer Verschlechterung des Normfarbabstands führt. Wesentlich für die Verbesserung des Normfarbabstands scheint das Zusammenwirken der Empfindlichkeit der Diode D1 und D2 zu sein. Hieraus folgt, daß es ein optimales Design der Diode D1 gibt, bei dem sowohl die Empfindlichkeit der Diode D1 als auch der transmittierte Anteil des Lichts durch die Diode D1 berücksichtigt werden muß.

Dies wird deutlich, wenn man neben den Kenngrößen der Diode D1 auch den Schwerpunkt der Diode D2 als Funktion der Schichtdicke der Diode D1 aufträgt. So ist in Abb. 7.7a der Normabstand und in Abb. 7.7b der Schwerpunkt der spektralen Empfindlichkeit der Diode D2 als Funktion der i -Schichtdicke der Diode D1 aufgetragen. Die Abb. 7.7b zeigt, daß für eine i -Schichtdicke der Diode D1 von 45nm (2.2eV) bzw. 55nm (2.0eV) der Schwerpunkt der spektralen Empfindlichkeit der Diode D2 deutlich zu kleineren Wellenlängen schiebt. In diesem Fall geht die Absorption der Diode D1 zurück, wie dies auch die Ergebnisse aus Abb. 7.5a und Abb. 7.5b zeigen. Wesentlicher als der Rückgang des Schwerpunkts für geringere i -Schichtdicken der Diode D1 ist allerdings die Tatsache, daß im Bereich zwischen 55nm (2.0eV) bzw. 45nm (2.2eV) und 95nm der Schwerpunkt der spektralen Empfindlichkeit der Diode D2 fast konstant bleibt, obgleich der Schwerpunkt der Diode D1 jeweils um 2.5nm je 10nm i -Schichtdicke zunimmt.

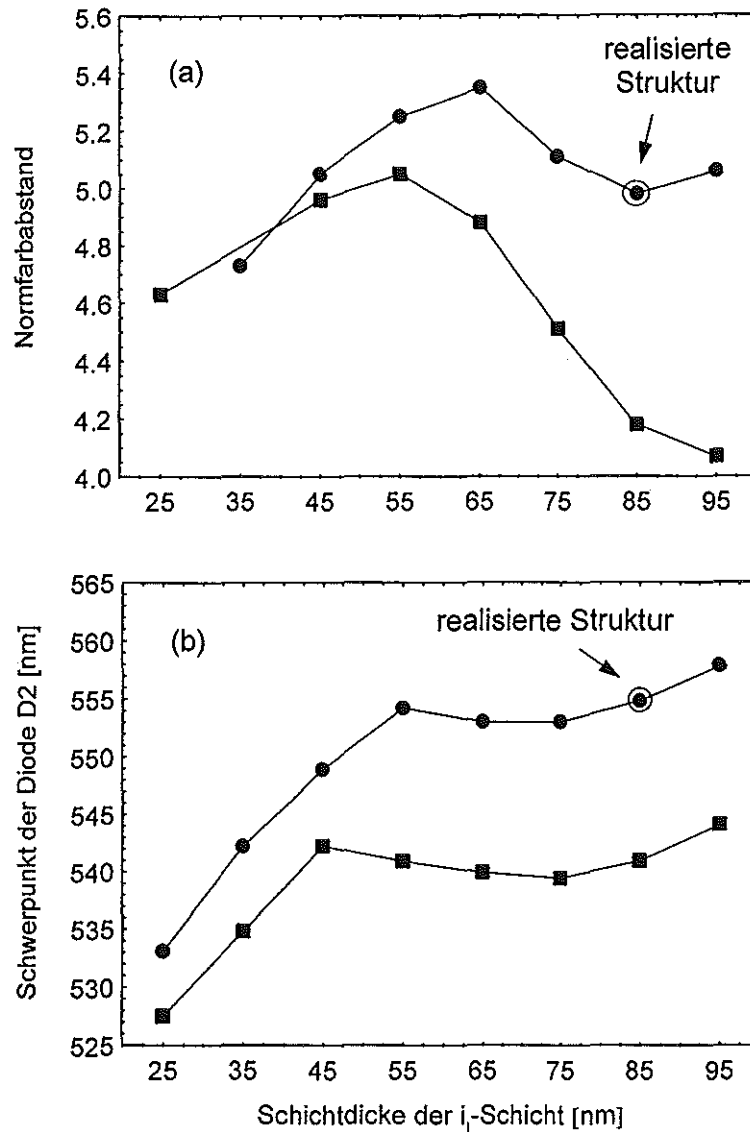


Abb. 7.7: Normfarbabstand (a) des Vierpol-Bauelements und Schwerpunkt (b) der berechneten spektralen Empfindlichkeit der Diode D2 als Funktion der Absorberschichtdicke von Diode D1 für die beiden Bandabstände 2.0 eV (Kreise) und 2.2 eV (Quadrate).

Berücksichtigt man den verschobenen Schwerpunkt der Diode D1, läßt sich folgern, daß der Überlapp der Empfindlichkeit der Diode D1 und D2 größer wird. So sinkt beispielsweise der Normfarbabstand von $\Delta E_{ab} < 5.0$ auf $\Delta E_{ab} < 4.2$, wenn die Schichtdicke der Diode D1 für eine optische Bandlücke von 2.2 eV von 55 nm auf 85 nm ansteigt.

Abschließend läßt sich zu Abb. 7.5 bis 7.7 zusammenfassen, daß eine möglichst geringe Halbwertsbreite der Diode D1 zu keiner Verbesserung des Normfarbabstands führt. Vielmehr sollte möglichst viel Licht in die Diode D2 transmittiert werden. Berücksichtigt man die realisierte Struktur, so ergibt sich genau für diesen Sensor ein Optimalwert des Normfarbabstands unter Verwendung einer Absorberschicht mit einem optischen Bandabstand von 2.0 eV. Darüber hinaus läßt sich die Halbwertsbreite durch den Einsatz eines größeren Bandabstandes abermals reduzieren. Diese Betrachtungen zeigen, daß mehrere Aspekte beim Design der Struktur mit dem Ziel eines reduzierten Normfarbabstands, berücksichtigt werden müssen. Die Diskussion des Normfarbabstands in Abhängigkeit der Bauelementparameter kann allerdings ohne Berücksichtigung weiterer Bauelementkenngrößen nicht erfolgen. So

wird der Dunkelstrom der Diode D1 und daraus resultierend die Dynamik der Diode D1 maßgeblich durch die Schichtdicke des Absorbers der Diode bestimmt. Somit ist die Dynamik bei der Diskussion des Bauelementdesigns von wesentlicher Bedeutung.

7.1.6 Dynamik

Die Dynamik der drei Dioden eines 3-Kanal-Sensors wird maßgeblich durch den Dunkelstrom der Dioden bestimmt. Dieser wiederum wird bei einer idealen Diode von den thermisch generierten Ladungsträgern bestimmt, die durch das extern angelegte elektrische Feld zu den Kontakten gelangen. Betrachtet man allerdings das Ersatzschaltbild einer Diode, so ist der idealen Diode immer ein Shuntwiderstand parallel geschaltet. Dieser Shuntwiderstand gewinnt in der Realität für dünne Dioden an Bedeutung. Im Fall der Diode D1, bei der die Absorberschicht nur 85nm beträgt, dominiert dieser Effekt den Dunkelstrom sogar. Entsprechend überlagert dieser Effekt auch den Einfluß eines geänderten Absorbermaterials auf den Dunkelstrom. Hervorgerufen wird dieser Shuntwiderstand durch lokale Kurzschlüsse des Dünnsystems. Mithin ist zwischen Farbtrennung und Dynamik der Diode D1 ein Kompromiß zu wählen.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge stellt die Struktur mit einer i-Schichtdicke von 85nm und einem optischen Bandabstand von 2.0eV einen guten Kompromiß dar. In Abb. 7.8 ist die Dynamik der drei Dioden dargestellt. Auch für diese Struktur gilt die Definition der Dynamik als Quotient des Photostroms unter 1000lx Weißlicht und dem Dunkelstrom. Der Dunkelstrom der Diode D1 ist wie beschrieben der limitierende Faktor der Dynamik. Ungeachtet des Einflusses des Shuntwiderstandes parallel zur Diode D1 liegt der Dynamikumfang bis zu einer Spannung von -0.5V oberhalb von 75dB.

Aufgrund der Limitierung der Dynamik durch die Diode D1 ist eine farbmétrische Optimierung der Diode D1 immer im Zusammenhang mit dem Verhalten im Dunkelfall zusehen. Dies gilt bei der realisierten Struktur nur für die Diode D1. Die Dioden D2 und D3 reagieren deutlich insensitiver auf eine Modifikation des Designs der Diode.

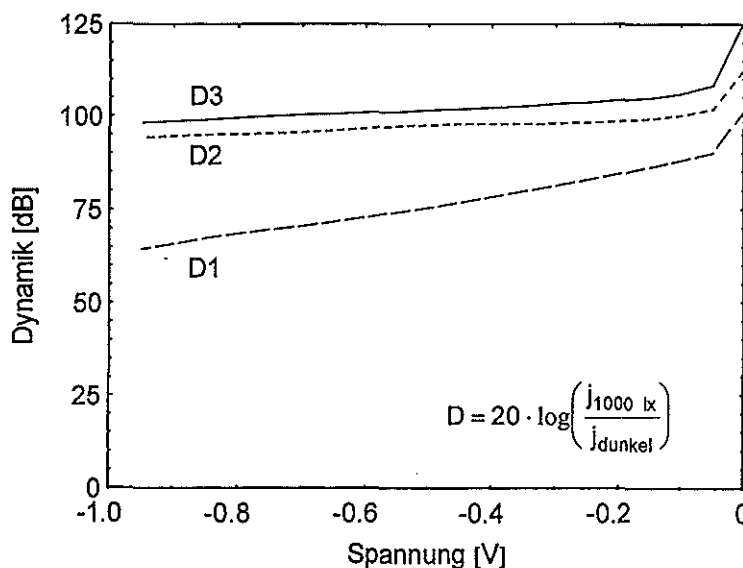


Abb. 7.8: Gemessene Dynamik der drei Dioden eines 3-Kanal-Sensors.

7.1.7 Simulation des Einflusses der TCO-Schichtdicke auf das spektrale Verhalten

Eine weitere Möglichkeit, den Normfarbabstand zu verbessern, besteht in der Modifikation der TCO_{II} -Schichtdicke. In Abb. 7.9 sind die spektrale Empfindlichkeit der Diode D2 und der Normfarbabstand als Funktion der TCO_{II} -Schichtdicke dargestellt. Bei dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, daß einerseits die spektrale Empfindlichkeit der D1-Diode aufgrund der Reflexion an den Interfacen $n_{\text{I}}/\text{TCO}_{\text{II}}$ sowie $\text{TCO}_{\text{II}}/\text{p}_{\text{II}}$ sich nur unwesentlich ändert und andererseits der Schwerpunkt der Empfindlichkeit der D3-Diode von einer Phasenverschiebung als Folge der TCO_{II} -Schichtdickenvariation unbeeinflusst bleibt, da in der D3-Diode über mehrere Knotenpunkte der Welle gemittelt wird. Nichtsdestotrotz wurden die Modifikationen der spektralen Empfindlichkeit in den Dioden D1 und D2 bei der Bestimmung des Normfarbabstands berücksichtigt. Es zeigt sich, daß bei einer Reduktion der TCO_{II} -Schichtdicke von 315nm (realisierte Struktur) auf 275nm der Normfarbabstand bis auf $\Delta E_{\text{ab}} < 3.5$ sinkt. Betrachtet man die Empfindlichkeit der Diode D2, so schiebt das Maximum von 520nm zu 560nm. Der optimale Wert liegt bei 545nm.

Neben der Tatsache, daß sich durch eine exakte Einstellung der Grünempfindlichkeit der Normabstand verbessern läßt, wird auch deutlich, wie sensitiv das Bauelement auf Schichtdickenschwankungen reagiert. Dies macht eine Optimierung des Bauelements äußerst schwierig, da insbesondere die TCO-Schichtdicke in einem gewissen Toleranzbereich während der Herstellung schwankt.

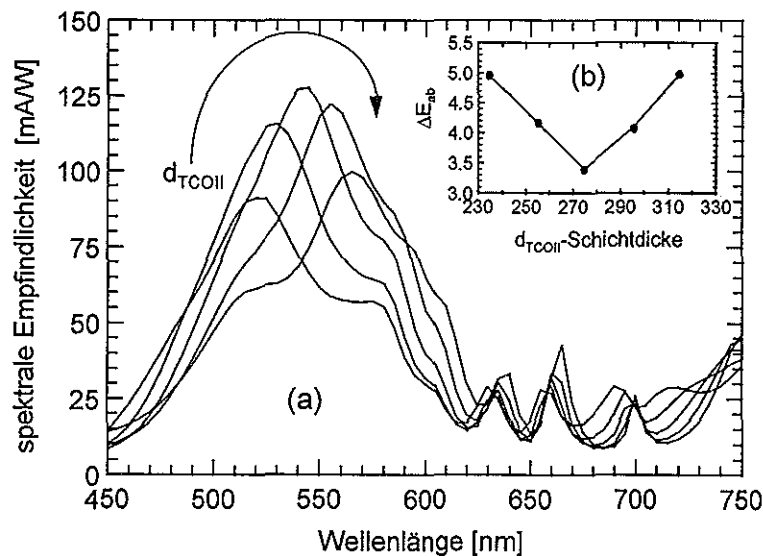


Abb. 7.9: Simulierte spektrale Empfindlichkeit der Diode D2 (a) eines Vierpol-Bauelements und Normfarbabstand (b) als Funktion der TCO_{II} -Schichtdicke.

7.1.8 Zusammenfassung

Bei der in diesem Kapitel vorgestellten Struktur handelt es sich um ein Bauelement, das neben der farbmoiréfreien Generation eines RGB-Signals das parallele Auslesen der drei Farbkanäle erlaubt. Dieses Bauelement liefert drei linear unabhängige Verläufe der spektralen Empfindlichkeit, wobei der ermittelte Normfarbabstand für diese Struktur besser ist als der für den gestapelten kristallinen Sensor. Die Maxima der spektralen Empfindlichkeit liegen bei

450nm, 560nm und 640nm, wohingegen die Halbwertsbreiten 185nm, 125nm und 120nm betragen. Die Dynamik der experimentell untersuchten Struktur liegt bei >75dB bis zu einer Spannung von -0.5V.

Weiterhin wurde der Einfluß von Bauelementparametern auf den Normfarbabstand untersucht. Dies erfolgte unter Nutzung des in Kapitel 6.3 vorgestellten optischen Simulationsprogramms und der farbmétrischen Charakterisierung in Kapitel 3.5. Hierzu wurde der Einfluß der Absorberschichtdicke und des Bandabstands der Diode D1 untersucht. Die optischen Simulationen in Zusammenarbeit mit einer farbmétrischen Analyse zeigt, daß sich durch einen Anstieg des optischen Bandabstands in der Diode D1 der Normfarbabstand von $\Delta E_{ab} < 5.0$ auf $E_{ab} < 4.2$ absenken läßt. Darüber hinaus wurde der Einfluß der TCO-Schichtdicke und dessen Wechselwirkung mit dem Normfarbabstand charakterisiert.

Bei dieser Struktur handelt es sich um einen neuartigen Sensor, der aufgrund seines Designs Vorteile im Vergleich zu Zweipol-Bauelementen bietet. Bedingt durch die höhere Anzahl an Bauelementkontakten sind allerdings neue Konzepte der Kontaktierung notwendig, um den Sensor als Teil eines Sensorarrays zu integrieren.

7.2 Der 6-Kanal-Sensor

Obwohl die Farbtrennung des in Kapitel 7.1 vorgestellten Sensors, verglichen mit den Eigenschaften von Zweipol-Bauelementen, verbessert werden konnte, zeigt die farbmimetische Analyse, daß der Normfarbabstand des 3-Kanal-Sensors über der Akzeptanzschwelle von $\Delta E=3$ [Keusen96a, Keusen96b] liegt. Neben der gezielten Optimierung der bereits bestehenden Struktur läßt sich die Farbauflösung verbessern, indem die Anzahl der Sensor-Kanäle erhöht wird. In diesem Fall verläßt man die Dreibereichsfarbaufnahme und geht zur multispektralen Aufnahme der Farbinformation über. Auf die Grundlagen der Multispektraltechnik und die unterschiedlichen Möglichkeiten der Farbaufnahme kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Vielmehr kann auf die Arbeit von Keusen und Hill [Keusen96a, Keusen96b, Hill98] verwiesen werden.

In diesem Kapitel soll die Realisierung und Charakterisierung eines 6-Kanal-Sensors vorgestellt werden. Der Sensor basiert ebenso wie der 3-Kanal-Sensor (Kapitel 7.1) auf einer Vierpol-Struktur. Aus diesem Grund werden die drei bipolaren Detektoren im weiteren auch mit BD1, BD2 und BD3 bezeichnet (Abb. 7.1b). Da die beiden Kanäle eines pinip-Sensors sequentiell ausgelesen werden, ergibt sich für einen 6-Kanal-Sensor, daß bei jedem Auslesevorgang jeweils nur drei Kanäle ausgelesen werden können. Dargestellt sind in Abb. 7.10 die drei gestapelten Sensorstrukturen, welche bei jedem Auslesevorgang die Generation von drei Sensorsignalen erlauben. Die Farbinformation wird an eine Verarbeitungselektronik weitergegeben, wobei diese sowohl in einem Pixel integriert als auch extern angeordnet sein kann. Wesentlich für die Generation eines RGB-Signals mit einem 6-Kanal-Sensor ist die Zwischenspeicherung der Sensorsignale, so daß nach jeweils zwei Auslesevorgängen 6 Farbinformationskanäle zur Verfügung stehen, die bei einer Rekonstruktion der Normspektralwerte oder auch des vollständigen Spektralverlaufs genutzt werden können. Diese werden im Fall der Rekonstruktion der Normspektralwerte durch eine 6×3 Transformation ermittelt.

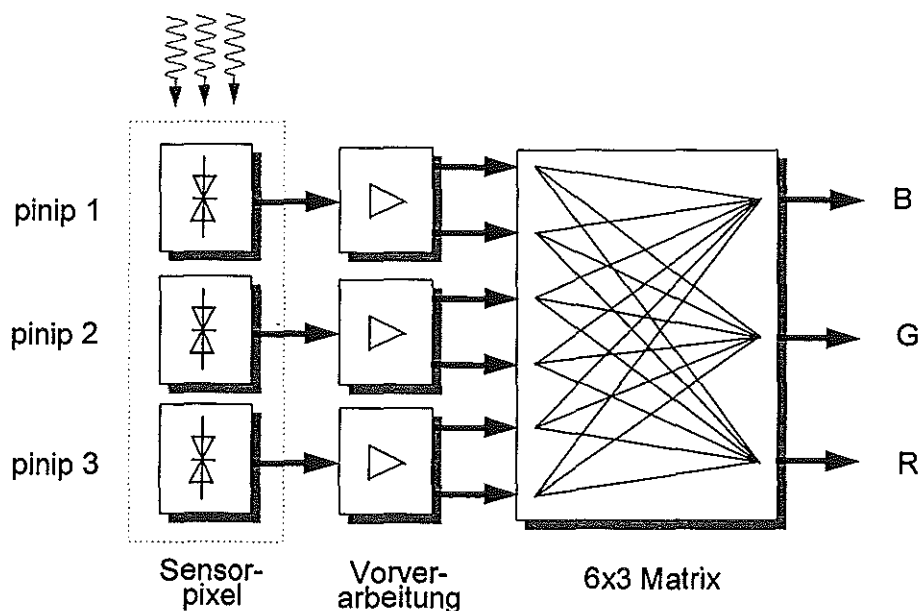


Abb. 7.10: Schematischer Aufbau eines 6-Kanal-Sensors auf der Basis einer Vierpol-Anordnung. Der Vorverarbeitung ist eine Matrixtransformation nachgeschaltet, die die 6 Sensorkanäle in ein RGB-Signal überführt.

7.2.1 Experimentelle Realisierung / Bauelementdesign

Der realisierte 6-Kanal-Sensor, dessen Struktur in Abb. 7.1b dargestellt wird, besteht aus drei gestapelten pinip-Strukturen, wobei der optische Bandabstand der einzelnen Absorberschichten von 2.2eV in der vorderen Diode der BD1-Struktur über 2.0eV, 2.0eV, 1.85eV, 1.75eV bis auf 1.65eV abnimmt. Die Schichtdicken der einzelnen Absorber betragen 35nm, 45nm, 100nm, 180nm, 350nm und 200nm. Für die p- und n-Schichten wurden wieder die „Standard“-Rezepte verwendet. Für die TCO-Schichten innerhalb des Schichtstapels gilt das gleiche wie für die TCO-Schichten in Kapitel 7.1. Ebenso wurde die Struktur mit Hilfe eines 3-Maskenprozesses strukturiert.

7.2.2 Stationäre Bauelementeigenschaften

In Abb. 7.11 ist die gemessene spektrale Empfindlichkeit des 6-Kanal-Sensors dargestellt. Legt man eine negative Spannung von -1.0V an die drei pinip-Strukturen an, so ergeben sich die gestrichelten Verläufe der spektralen Empfindlichkeit mit Maxima für die Wellenlängen bei 430nm, 530nm und 630nm. In diesem Fall befindet sich jeweils die Top-Diode der drei gestapelten pinip-Strukturen in Sperrbetrieb, wohingegen die Bottom-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird. Wie für die pinip-Struktur in Kapitel 5 bereits beschrieben, wird der Photostrom für negative Spannungen durch die photogenerateden Ladungsträger in der Top-Diode bestimmt. Nach dem Wechsel der angelegten Spannung auf 1.0V werden die Ladungsträger jeweils aus der Bottom-Diode der drei pinip-Strukturen eingesammelt. Es stellen sich die durchgezogenen Verläufe der spektralen Empfindlichkeit in Abb. 7.11 ein. In diesem Fall liegen die Maxima der spektralen Empfindlichkeit bei 490nm, 570nm und 690nm. Der Absolutwert der spektralen Empfindlichkeit der einzelnen Kanäle variiert um lediglich 45%. Im Vergleich zum 3-Kanal-Sensor läßt sich die Aufteilung des einfallenden Spektrums auf die 6 Dioden noch einmal verbessern.

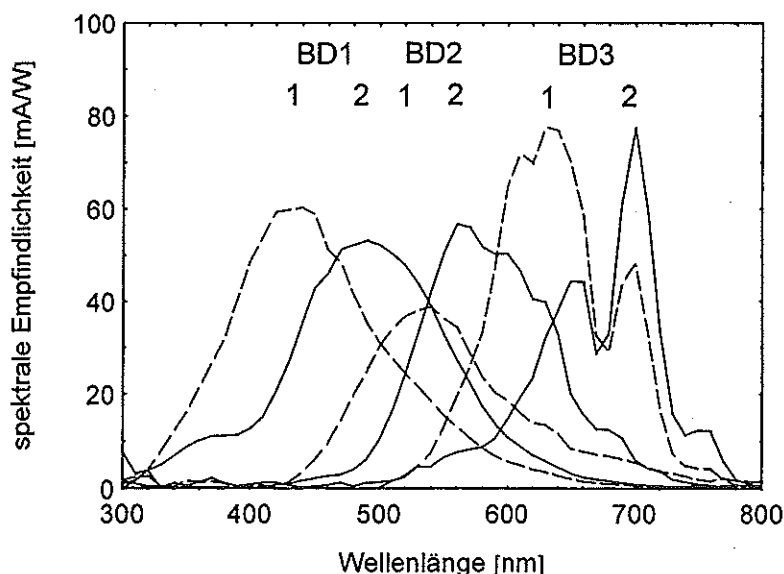


Abb. 7.11: Gemessene spektrale Empfindlichkeit des 6-Kanal-Sensors bestehend aus drei gestapelten pinip-Strukturen. Die gestrichelten Kurven wurden gemessen bei Anlegen einer Spannung von -1.0V, wohingegen die durchgezogenen Kennlinien im Fall einer angelegten Spannung von +1.0V gemessen wurde.

Die Halbwertsbreite der spektralen Empfindlichkeiten liegt bei 128nm, 133nm, 111nm, 120nm, 113nm und 116nm. Eine solch geringe Halbwertsbreite von 128nm und 133nm für die ersten beiden Kanäle läßt sich nur bei Verwendung von kohlenstofflegiertem Material mit einer optischen Bandlücke von 2.2eV und 2.0eV in den ersten beiden Dioden erzielen.

In Kapitel 7.1 wurde gezeigt, daß eine Reduktion der Absorberschichtdicke (Shunt-Problem) zu einem Anstieg des Dunkelstroms und damit verbunden zu einem Verlust der Dynamik führt. Für sehr dünne Dioden wird der Dunkelstrom durch einen Shuntwiderstand parallel zur idealen Diode bestimmt. Eine mögliche Erklärung für den Shuntwiderstand ist die Existenz von pin-holes (lokale Kurzschlüsse), die einen niederohmigen Übergang zwischen dem Front- und dem Rückkontakt ermöglichen. Dies wird auch durch das Verhalten von pinip-Strukturen bestätigt. Im Fall von pinip-Strukturen wird der Shuntwiderstand allerdings nicht durch die Schichtdicke des Absorbers der Einzeldiode bestimmt, sondern durch die Schichtdicke der gesamten pinip-Struktur. Trotz der deutlich reduzierten Absorberschichtdicke der Top-Diode der BD1-Struktur bei gleichzeitigem Anstieg des optischen Bandabstands liegt die Dynamik der BD1-Struktur bei >80dB. Die Gesamtschichtdicke der pin-Struktur im Fall des 3-Kanal-Sensors liegt bei 120nm, wohingegen die Schichtdicke der BD1-Struktur 130nm beträgt. Der Shuntwiderstand ist somit von der Gesamtschichtdicke des Systems abhängig und nicht von der Schichtdicke des Absorbers.

Vergleicht man die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Kanäle des 6-Kanal-Sensors so fällt auf, daß die Empfindlichkeiten der Kanäle 5 und 6 einen deutlichen Einfluß von Schichtdickeninterferenzen zeigen. Als Folge des Einflusses der Schichtdicke auf den Verlauf der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 5 und 6 führt eine geringe Variation der Schichtdicke zu einem deutlich veränderten Verlauf der Spektralcharakteristik. Dies bestätigen Messungen an deutlich unterschiedlichen Positionen des Substrats. Beeinflusst wird die spektrale Empfindlichkeit durch Schwankungen der Schichtdicke der TCO_{III}-Schicht und der BD3-Struktur. Die hierdurch verursachten Schichtdickeninterferenzen nehmen einen sehr starken Einfluß auf die Verläufe 5 und 6 der spektralen Empfindlichkeit. Somit sinkt die Reproduzierbarkeit und die Homogenität der Sensoren auf dem Glassubstrat. Die kohärente Wellenausbreitung innerhalb des gesamten Schichtsystems führt aufgrund von verstärkter Vielfachreflexion zu ausgeprägten Schichtdickeninterferenzen.

Vermeiden läßt sich der Einfluß der Schichtdickeninterferenz durch Nutzung von inkohärenter Wellenausbreitung in der BD3-Struktur. Inkohärente Wellenausbreitung innerhalb der BD3-Struktur läßt sich erreichen, indem das Licht beim Eintritt in die BD3-Diode gestreut wird. Als Streuer dient eine texturierte TCO-Schicht, welche zwischen der BD2- und BD3-Struktur eingebracht wird. Herstellen läßt sich eine texturierte Schicht, indem eine glatte TCO-Schicht in einem stark verdünnten Salzsäurebad texturiert wird. Je nach Ätzzeit und verwendetem Ausgangsmaterial läßt sich so die Textur der TCO-Schicht einstellen [Löfl97]. Auf die präparativen Bedingungen zur Texturierung einer TCO-Schicht soll hier nicht eingegangen werden [Kluth97]. In Abb. 7.12a und Abb. 7.12b sind zwei hochauflösende Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen einer glatten TCO-Schicht und einer anschließend aufgerauhten TCO-Schicht dargestellt. Man erkennt für die rauhe Struktur in Abb. 7.12b deutlich eine zufällig verteilte Anordnung von Mulden. Implementiert wurde eine solche Schicht, wie in Abb. 7.12b gezeigt, in die in Abb. 7.11 charakterisierte Struktur. Die Abb. 7.13 zeigt einen Vergleich der gemessenen Reflexion der Struktur aus Abb. 7.11 mit und ohne Textur der TCO-Schicht zwischen der BD2- und BD3-Struktur. Ab einer Wellenlänge von 570nm ist eine deutliche Glättung des Reflexionsverlaufs zu beobachten.

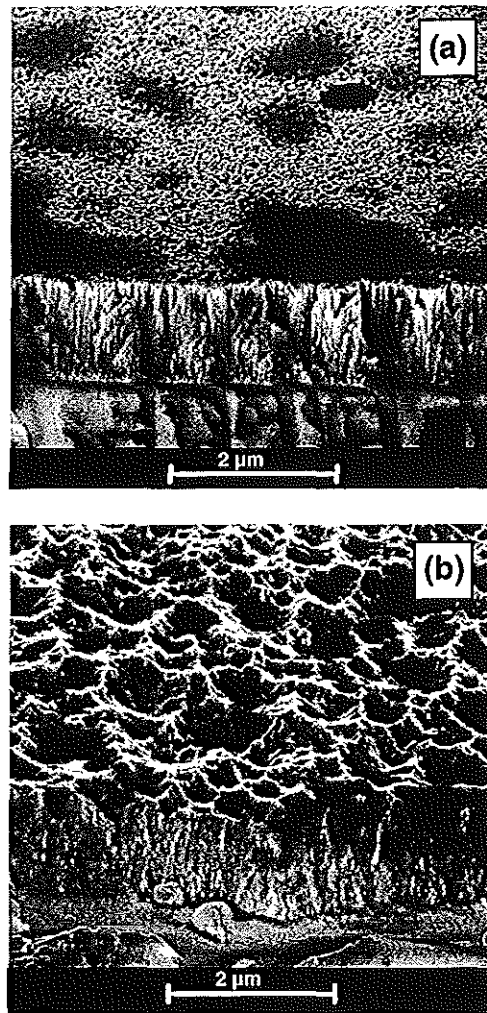


Abb. 7.12: Hochauflösende REM-(Rasterelektronenmikroskop)-Aufnahme einer gesputterten TCO-Schicht (a) und einer anschließend mit Salzsäure geätzten TCO-Schicht (b) [Kluth97].

Die Anzahl der auftretenden Minima und Maxima der Reflexion ab einer Wellenlänge von 570nm sinkt deutlich. Somit geht der Einfluß von Schichtdickenschwankungen auf die gemessene Reflexion deutlich zurück. Die Auswirkungen der Textur auf die optischen Eigenschaften zeigen sich auch in den optoelektronischen Eigenschaften des Sensors. Die gemessene spektrale Empfindlichkeit der modifizierten Struktur ist in Abb. 7.14 dargestellt. Auch in diesem Fall sind die Empfindlichkeiten der BD1-Struktur für eine Spannung von -1.0V gestrichelt dargestellt, wohingegen die durchgezogenen Linien die spektrale Empfindlichkeit für 1.0V beschreiben. Die Anzahl der Interferenzen der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 5 und 6 geht deutlich zurück. Lediglich die zwei korrespondierenden Interferenzen für eine Wellenlänge von 640nm und 690nm treten noch hervor.

Bereits die abfallende Flanke des Kanals 4 zeigt den Einfluß der texturierten Schicht. Der Anteil des durch die BD2-Struktur transmittierten Lichts, welches am Übergang zwischen BD2-Struktur/TCO_{II} reflektiert wird, geht zurück und damit zeigt die abfallende Flanke von Kanal 4 einen glatten Verlauf. Vergleicht man die Halbwertsbreite der beiden Strukturen aus Abb. 7.11 und Abb. 7.14, so stellt man fest, daß diese für den Kanal 5 von 123nm auf 113nm zurückgeht. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die stark ausgeprägte Interferenz für eine Wellenlänge von 700nm in Abb. 7.11. Für Kanal 6 steigt die Halbwertsbreite von 78nm auf 116nm an.

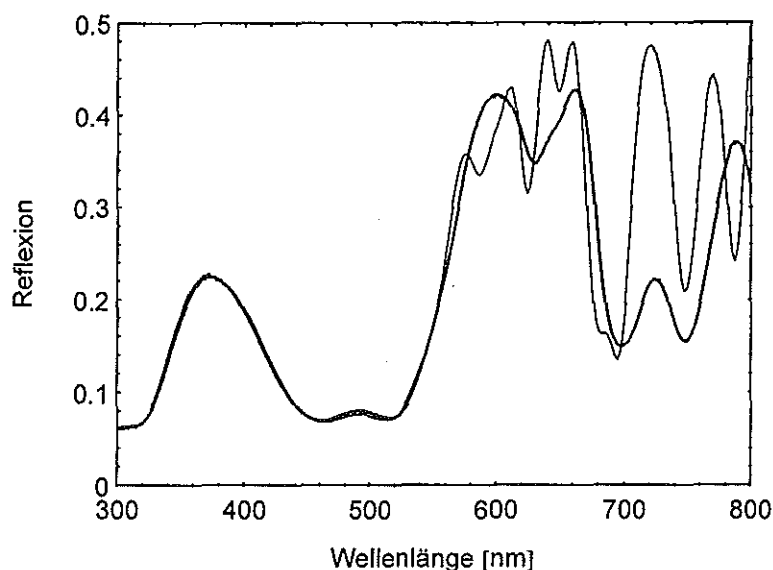


Abb. 7.13: Gemessene Reflexion eines 6-Kanal-Bauelements mit einer glatten (dünn gezeichnet) und einer rauhen (dick gezeichnete) TCO-Schicht zwischen der BD2- und BD3-Struktur.

Vergleicht man die Stromausbeute für die Kanäle 5 und 6, so steigt die Stromausbeute für Kanal 5 bei texturierter TCO-Schicht zwischen der BD2- und BD3-Struktur um 2% und für Kanal 6 um 18%. Fällt Licht durch die texturierte TCO_{III}-Schicht, so wird das Licht gestreut und legt einen effektiv längeren Weg in der Absorberschicht zurück. Das Licht, welches nicht beim ersten Durchlauf durch die pinip-Struktur absorbiert wird, wird zum Teil am Rückkontakt reflektiert. Ein anderer Teil wird im Rückkontakt absorbiert.

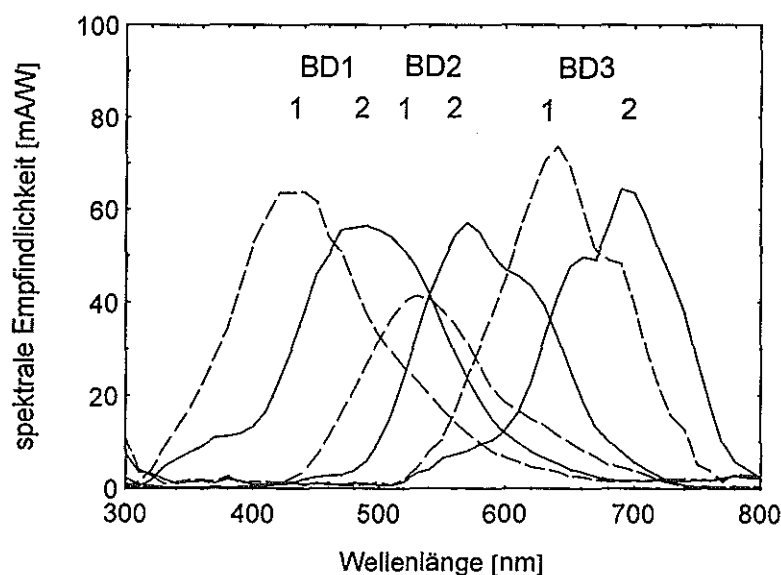


Abb. 7.14: Gemessene spektrale Empfindlichkeit des 6-Kanal-Sensors bestehend aus drei gestapelten pinip-Strukturen. Die gestrichelten Kurven wurden gemessen bei Anlegen einer Spannung von $-1.0V$, wohingegen die durchgezogenen Kennlinien im Fall einer angelegten Spannung von $+1.0V$ gemessen wurden. Im Gegensatz zur Abb. 7.11 ist die TCO-Schicht zwischen der BD2- und BD3-Struktur texturiert.

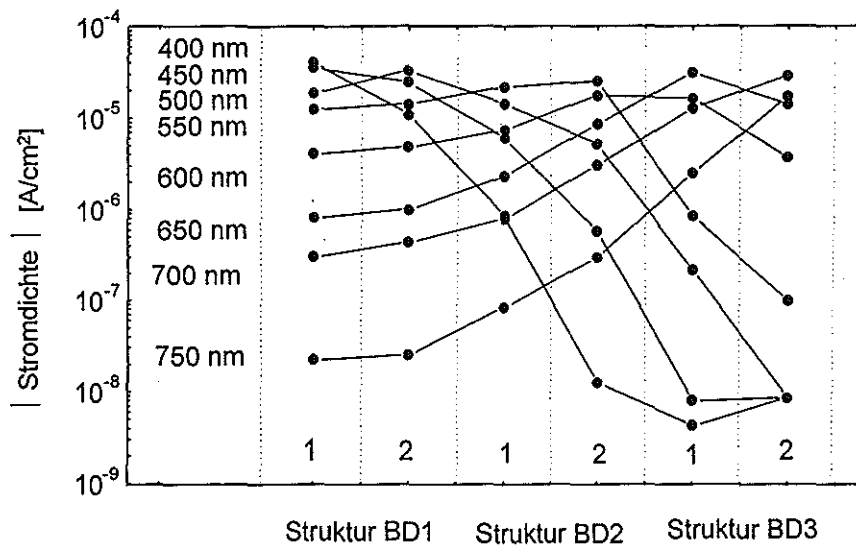


Abb. 7.15: Monochromatischer Photostrom der Teildioden eines 6-Kanal-Sensors für eine Photonenflußdichte von $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Der reflektierte Teil durchläuft ein zweites Mal die pinip-Struktur. Der auch bei diesem Durchlauf nicht absorbierte Teil des Lichts trifft wieder auf die texturierte TCO_{III} -Schicht. Im Vergleich zur Struktur mit einer glatten TCO_{III} -Schicht trifft ein größerer Teil des Lichts unter flachen Einfallswinkeln auf die TCO_{III} -Schicht, so daß das Licht nicht wieder transmittiert wird, sondern an der Schicht total reflektiert wird (Light-Trapping). Dies erklärt den Anstieg der Stromausbeute für die Kanäle 5 und 6.

Auch für dieses Bauelement läßt sich der monochromatische Photostrom als Funktion der Teildioden ermitteln. Die gute Aufteilung des Spektrums auf die einzelnen Dioden wird in Abb. 7.15 erkennbar. So sinkt der Photostrom für eine monochromatische Wellenlänge von 400nm um 4 Größenordnungen von der Top-Diode der BD1 zur Bottom-Diode BD3-Struktur. Für die Bottom-Diode der BD3-Struktur steigt der gemessene Strom aufgrund des höheren Dunkelstroms in dieser Teildiode wieder an. Der optische Bandabstand des Absorbers in der Bottom-Diode der BD3-Struktur beträgt 1.65eV, so daß die thermische Generation von Ladungsträgern in dieser Diode höher ist als in der Top-Diode der BD3-Struktur mit einem Bandabstand von 1.74eV. Vergleicht man den Photostrom der Top-Diode der BD1-Struktur für die Wellenlängen 400nm und 750nm, so steigt das Separationsverhältnis auf über 3 Größenordnungen an. Ein genau umgekehrtes Verhältnis ist für die Bottom-Diode der BD3-Struktur zu beobachten. Betrachtet man die Dynamik der drei gestapelten pinip-Struktur, so liegt diese im Bereich zwischen 80dB und 90dB je nach Teildiode. Die Top-Diode der DB1-Struktur ist bei dieser Betrachtung die begrenzen Diode. Im Weiteren wird die farbmetrische Auswertung des 6-Kanal-Sensors diskutiert.

7.2.3 Farbmetrische Auswertung des 6-Kanal-Sensors

Auch für den 6-Kanal-Sensor sind Berechnungen zum Normfarbabstand von Herzog [Herzog98] durchgeführt worden. Eine Darstellung der farbmetrischen Charakterisierung findet sich in Kapitel 3.5. So zeigen die ermittelten Werte in Tab. 7.2 eine deutliche Verbesserung des Normfarbabstandes im Vergleich zum 3-Kanal-Sensor. Für beide Strukturen liegt $\Delta E_{ab} \leq 1$. Der Normfarbabstand liegt mit $\Delta E_{ab} \leq 1$ im Bereich der Wahrnehmungsgrenze [Keusen96]. Verwendet man zur Berechnung des Normfarbabstands den Datensatz mit 1269 Testfarben [Parkkinen89], so sinkt der ermittelte Normfarbabstand noch weiter ab, wobei die relative Verbesserung nicht mehr so deutlich ist wie noch für den 3-Kanal-Sensor. Vergleicht man nun die beiden unterschiedlichen Detektoren, so zeigt der Sensor mit der texturierten TCO-Schicht zwischen der BD2- und BD3-Struktur eine etwas schlechtere Farbwiedergabe.

Hieraus lassen sich mehrere Konsequenzen ableiten: Die Texturierung von TCO-Schichten führt zu einer Erhöhung der effektiven Weglänge des Lichts im Bauelement. Dies führt zu einer Zunahme von optisch generierten Ladungsträgern. Als Folge steigt nicht nur die Amplitude der spektralen Empfindlichkeiten, sondern auch die Halbwertsbreite nimmt zu. Als Folge sinkt der Normfarbabstand. Gleichzeitig führt die texturierte Schicht zu einer deutlich homogenen Empfindlichkeit des Sensors als Funktion des Ortes auf dem Substrat. Damit steigt die Reproduzierbarkeit des Sensors und auch der Herstellungsprozeß wird robuster gegen kleine Schichtdickenschwankungen. Als Konsequenz des Light-Trappings muß die Absorberschichtdicke in diesem Fall für die BD3-Struktur reduziert werden. Allerdings existiert noch keine allgemeingültige optische Beschreibung, die die effektive Weglänge innerhalb des Schichtsystems als Funktion der Wellenlänge und der Oberflächentopologie berücksichtigt. Auf diesem Gebiet müssen noch Ansätze entwickelt werden, wie beispielsweise die Berücksichtigung von wellenlängenabhängigen Streufunktionen. Diese erlauben dann eine Simulation und Vorhersage der realisierten Strukturen unter Berücksichtigung inkohärenter Wellenausbreitung.

Bevor in Kapitel 8 auf die Eigenschaften eines weiteren gestapelten Sensors eingegangen wird, werden im Unterkapitel 7.2.4 die Ergebnisse des 6-Kanal-Sensors zusammengefaßt.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
6-Kanal-Sensor glattes TCO	3x6	Munsell	Munsell	0.83	0.67	2.87
6-Kanal-Sensor rauhes TCO	3x6	Munsell	Munsell	1.00	0.89	4.45

Tab. 7.2: Normfarbabstand, Standardabweichung und maximaler Normfarbabstand des 6-Kanal-Sensors auf der Grundlage der spektralen Empfindlichkeiten aus Abb. 7.11 und 7.14.

7.2.4 Zusammenfassung 6-Kanal-Sensor

Das in diesem Kapitel vorgestellte Vierpol-Bauelement besteht aus gestapelten pinip-Strukturen und erlaubt die Generation von 6 linear unabhängigen Verläufen der spektralen Empfindlichkeit. Aufgrund des Bauelementdesigns können allerdings immer nur drei der 6 Kanäle gleichzeitig ausgelesen werden. Ungeachtet dieses Nachteils liegt der ermittelte Normfarbabstand für dieses Bauelement bei $\Delta E_{ab} \leq 1$ und ist damit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze. Durch den Einbau einer texturierten Schicht im hinteren Teil des Bauelements läßt sich die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses verbessern. Hierbei wird die kohärente Wellenausbreitung in der BD1- und BD2-Struktur des Bauelements genutzt, wohingegen sich das Licht in der BD3-Struktur inkohärent ausbreitet. Die eingebaute TCO-Schicht führt zwar auch zu einem geringfügigen Anstieg des Normfarbabstands, aber dies wird durch den Vorteil kompensiert, daß sich die Struktur deutlich homogener und weniger anfällig auf Schichtdickenschwankungen herstellen läßt. In diesem Fall wird die spektrale Empfindlichkeit vorrangig durch die Absorption in den Teilbereichen und nicht durch stark ausgeprägte Interferenzeffekte bestimmt.

Mit diesem Bauelement steht eine Struktur zur Verfügung, die im Bereich hoher Farbauflösung eingesetzt werden kann. Aufgrund des Auslesemodus ist allerdings eine Ausleseelektronik erforderlich, wie sie für Zweipol-Sensoren eingesetzt wird. Hierzu sei auf den Anhang A.3 verwiesen. Wie schon für den 3-Kanal-Sensor beschrieben, sind neue Konzepte zur Kontaktierung des Bauelements notwendig. Eine Darstellung einer möglichen Kontaktanordnung findet sich bei [Stiebig97c].

Kapitel 8

Gestapelte Sensorstrukturen Das Fünfpol-Bauelement

Geht man von den Ergebnissen aus, die in Kapitel 7 beschrieben wurden, so liegt mit dem realisierten 6-Kanal-Sensor ein Bauelement vor, welches einen Normfarbabstand von $\Delta E_{ab} \leq 1$ besitzt. Der Normfarbabstand liegt damit im Bereich der Wahrnehmungsgrenze des Menschen. Als Nachteil dieser Struktur ist allerdings die Tatsache zu bewerten, daß jeweils nur 3 der 6 Kanäle parallel ausgelesen werden können. Dies schränkt den Anwendungsbereich des Sensors ein. So ist es in vielen Bereichen von Interesse, die gesamte Farbinformation mit einer Aufnahme zu erfassen.

Aus diesem Grund erfolgte die Entwicklung eines 4-Kanal-Sensors, welcher parallel ausgelesen werden kann. Somit können vier Farbkanäle mit einer Aufnahme generiert werden. Betrachtet man den möglichen Normfarbabstand einer solchen Struktur, so ist eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu einem 3-Kanal-Bauelement zu erwarten, wohingegen der Vergleich mit einem 6-Kanal-Sensor eine schlechtere Farbwiedergabe zeigt. In Abb. 8.1 ist der schematische Aufbau eines 4-Kanal-Sensors dargestellt. In Analogie zum 3-Kanal-Sensor (Abb. 7.1a) werden alternierend pin- und nip-Dioden auf dem Substrat abgeschieden, wobei die Dioden durch transparente Kontaktschichten separiert werden. Somit ist der 4-Kanal-Sensor ein 3-Kanal-Sensor, welcher um einen weiteren Kanal ergänzt wurde. Beim Design des Bauelements ist allerdings zu berücksichtigen, daß das einfallende Licht auf vier Dioden und nicht nur auf drei Dioden aufgeteilt werden muß. Die spektrale Empfindlichkeit wird hierbei nicht nur im Bereich größerer Wellenlängen um einen Kanal erweitert, sondern die Empfindlichkeit der einzelnen Kanäle wird spektral neu aufgeteilt. Die vier Sensorsignale werden anschließend mit Hilfe einer Matrixtransformation in ein RGB-Signal überführt. Die vier gestapelten Dioden werden im Weiteren mit D1 bis D4 bezeichnet. Hierbei ist die Diode D1 diejenige Diode, durch die das Licht in den Sensor einfällt.

Berücksichtigt man die technologischen und physikalischen Randbedingungen bei der Entwicklung und Realisierung eines solchen Sensors, so sind die Anforderungen an einen 4-Kanal-Sensor höher als an einen 3- oder 6-Kanal-Sensor auf der Basis eines Vierpol-Bauelements. Untersuchungen zum 3-Kanal-Sensor haben gezeigt, daß die Vorhersage der Bauelementeigenschaften durch Reflexionsprozesse innerhalb des Schichtsystems erschwert werden. Die Reflexion tritt hierbei vorrangig an den TCO/Halbleiterübergängen auf.

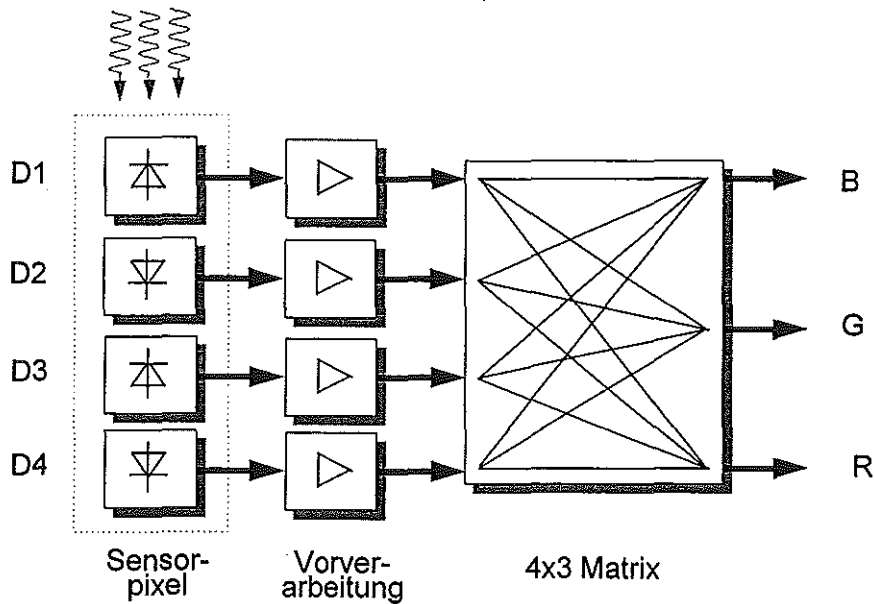


Abb. 8.1: Pixel eines 4-Kanal-Sensors mit angeschlossener Vorverarbeitung und einer anschließenden Farbraumtransformation zur Generation eines RGB-Signals.

Diese Problematik nimmt für einen 4-Kanal-Sensor noch weiter zu, da dem Schichtsystem ein weiterer TCO/Halbleiterübergang hinzugefügt wird. Aus technologischer Sicht ist ein Fünfpol-Bauelement aufwendiger als ein Vierpol-Bauelement, da die amorphen Schichten und die TCO-Schichten in unterschiedlichen Depositionsanlagen hergestellt werden. Dies macht für einen 4-Kanal-Sensor zwei weitere Systemtransferschritte notwendig.

Bevor in Kapitel 8.3 auf die Bauelementeigenschaften der realisierten Struktur eingegangen wird, soll zuvor anhand von optischen Simulationen in Kombination mit einer farbmimetrischen Charakterisierung die Wechselwirkung der spektralen Empfindlichkeit mit dem Normfarbabstand untersucht und Optimierungskriterien entwickelt werden. Ziel ist die Erstellung einer Korrelation zwischen Bauelementparametern und den farbmimetrischen Eigenschaften der Sensoren.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Absorbermaterialien im Bereich großer Bandabstände läßt sich die Halbwertsbreite der Blauempfindlichkeit (Kanal 1) nicht beliebig reduzieren, wie die Ergebnisse für den 3-Kanal-Sensor (Kapitel 7.1) schon gezeigt haben. Vergleicht man die Anforderungen an die vier Dioden eines 4-Kanal-Sensors, so sind diese für die Diode D1 am höchsten. Was die weitere Analyse des 4-Kanal-Sensors anbelangt, so unterscheiden sich die Optimierungskriterien von 3- und 4-Kanal-Sensoren deutlich.

8.1 Optische Modellierung

Vergleicht man den Verlauf der Normspektralwertkurven (Abb. 3.11) mit den möglichen Verläufen der spektralen Empfindlichkeit eines 4-Kanal-Sensors, so wird deutlich, daß der $\bar{z}$ -Verlauf am schlechtesten mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Materialien unter Berücksichtigung des beschriebenen Bauelementdesigns realisiert werden kann. Der Verlauf von $\bar{y}$ läßt sich hingegen deutlich besser reproduzieren. Berücksichtigt man diese Randbedingungen und die Tatsache, daß der $\bar{x}$ -Verlauf ein zweites Maximum im kurzwelligen Bereich besitzt, so bietet es sich an, den Kanal 3 des Sensors so zu optimieren,

daß er den $\bar{y}$ -Kanal nachbildet. Damit stehen der Kanal 1 und 2 zur Verfügung, um die spektrale Auflösung des $\bar{z}$ -Verlaufs und des zweiten Maximums des $\bar{x}$ -Verlaufs nachzubilden. Weiterhin steht der vierte Kanal des Sensors zur Detektion von rotem Licht ($\bar{x}$ -Verlauf, absolutes Maximum, Abb. 3.11) zur Verfügung. Die mit Hilfe des optischen Simulationsprogramms ermittelten spektralen Empfindlichkeiten einer solchen Struktur sind in Abb. 8.2 relativ aufgetragen. So ergeben sich Maxima der spektralen Empfindlichkeit der Kanäle 1 bis 4 für die Wellenlängen 420nm, 495nm, 565nm und 620nm. Die Halbwertsbreite der vier Verläufe liegt bei 172nm, 133nm, 130nm, 112nm. Verwendet wurden für die Simulation Absorbermaterialien mit einem optischen Bandabstand von 2.0eV, 1.9eV, 1.9eV und 1.74eV für die Dioden D1 bis D4. Der Verlauf der spektralen Empfindlichkeit von Diode D1 wurde auf minimale Halbwertsbreite bei möglichst hoher Transmission optimiert. Gleichzeitig sollte die Gesamtschichtdicke der Diode D1 möglichst hoch sein, um den Dunkelstrom aufgrund auftretender Shuntwiderstände möglichst gering zu halten. Um eine möglichst geringe Halbwertsbreite der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 1 bei gleichzeitig ausreichender Schichtdicke zu erzielen, wurden dickere dotierte Schichten im Design der Diode D1 berücksichtigt. Da gleichzeitig ein möglichst großer Teil des Lichts in die Diode D2 transmittiert werden sollte, wurde lediglich die p-Schicht dicker angenommen, da diese mit 1.9eV einen größeren optischen Bandabstand als die n-Schicht mit 1.74eV besitzt. Dies führte dazu, daß die erste Diode des 4-Kanal-Sensors als nip-Diode mit einer 45nm dicken p-Schicht in den Simulationen angenommen wurde. Vergleicht man die Amplituden der einzelnen Kanäle, so ergibt sich ein Verhältnis von $i_1 : i_2 : i_3 : i_4$ von 0.6/0.35/0.3/1.0. Die Amplitude variiert um einen Faktor von 3.3. Bestimmt wird das Separationsverhältnis von der Diode D4. Die Absorberschichtdicke für die Diode D4 beträgt 400nm. Als Material wurde amorphes Silizium mit einem Bandabstand von 1.74eV gewählt. Das Verhältnis der Amplituden läßt sich durch eine reduzierte i-Schichtdicke der Diode D4 verbessern. Gewählt wurde eine 400nm dicke i-Schicht in den Berechnungen, da durch eine dickere Absorberschicht der Einfluß von Schichtdickeninterferenzen reduziert werden kann. Weiterhin wurden zur Reduktion der Schichtdickeninterferenzen innerhalb der Struktur, hervorgerufen durch den Einsatz von glatten TCO-Schichten, insbesondere für die Kanäle 3 und 4 die simulierten Verläufe geglättet.

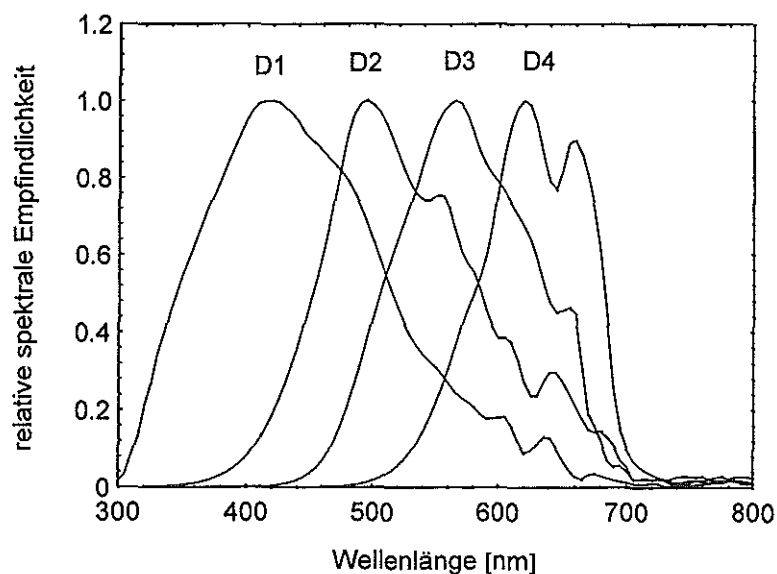


Abb. 8.2: Simulierte relative spektrale Empfindlichkeit eines 4-Kanal-Sensors.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
4-Kanal-Sensor Max. 2 Kanal 495nm	3x4	Munsell	Munsell	3.46	2.20	10.2
4-Kanal-Sensor Max. 2 Kanal 505nm	3x4	Munsell	Munsell	3.36	2.08	8.90
4-Kanal-Sensor Max. 2 Kanal 515nm	3x4	Munsell	Munsell	3.22	1.96	8.06
4-Kanal-Sensor Max. 4 Kanal 525nm	3x4	Munsell	Munsell	3.04	1.87	8.28

Tab. 8.1: Berechnete Normfarbabstände für die optisch simulierten spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 8.2. Variiert wurde die Lage der spektralen Empfindlichkeit des Kanals 2. Hierzu wurde die spektrale Empfindlichkeit ohne Berücksichtigung der Wellenausbreitung innerhalb des Schichtpakets jeweils um 10nm von ihrem Maximum bei 495nm nach 525nm verschoben. Die Kanäle 1, 3 und 4 wurden bei der Berechnung des Normfarbabstands als konstant angenommen.

Um im Folgenden den Einfluß der einzelnen Kanäle auf den Normfarbabstand zu untersuchen, wurden bei den ersten Berechnungen die Kanäle optisch unabhängig voneinander betrachtet. Ziel dieser Betrachtung war die Extraktion einzelner Parameter und deren Korrelation mit dem Normfarbabstand. Hierzu wurde in einem ersten Fall der zweite Kanal um jeweils 10nm zu höheren Wellenlängen hin verschoben. Somit verschiebt sich das Maximum der spektralen Empfindlichkeit des zweiten Kanals von 495nm nach 505nm, 515nm und 525nm. Die anderen drei Kanäle wurden in diesem Fall als konstant angenommen. Die optische Wellenausbreitung innerhalb des Schichtsystems wird bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Betrachtet man den Normfarbabstand in Tab. 8.1 so sinkt dieser, wenn das Maximum der spektralen Empfindlichkeit zu höheren Wellenlängen schiebt. Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, daß sich die Optimierungskriterien zwischen einem 3- und einem 4-Kanal-Sensor deutlich unterscheiden.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
4-Kanal-Sensor Max. 4 Kanal 620nm	3x4	Munsell	Munsell	3.46	2.20	10.2
4-Kanal-Sensor Max. 4 Kanal 610nm	3x4	Munsell	Munsell	3.01	2.06	9.51
4-Kanal-Sensor Max. 4 Kanal 600nm	3x4	Munsell	Munsell	3.93	4.61	24.4
4-Kanal-Sensor Max. 4 Kanal 590nm	3x4	Munsell	Munsell	9.00	9.57	55.3

Tab. 8.2: Berechneter Normfarbabstand für die optisch simulierten spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 8.2. Variiert wurde die Lage der spektralen Empfindlichkeit des vierten Kanals. Hierzu wurde die spektrale Empfindlichkeit ohne Berücksichtigung der Wellenausbreitung innerhalb des Schichtpakets jeweils um 10nm von ihrem Maximum bei 620nm nach 590nm verschoben. Die Kanäle 1, 2 und 3 wurden bei der Berechnung des Normfarbabstands als konstant angenommen.

So läßt sich der Normfarbabstand für einen 3-Kanal-Sensor verbessern, indem der Überlapp der Kanäle 1 und 2 unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzen vergrößert wird. Für den 4-Kanal-Sensor verbessert sich das Verhalten, wenn die spektrale Empfindlichkeit des zweiten Kanals zu höheren Wellenlängen verschiebt und so der Überlapp der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 1 und Kanal 2 kleiner und der Überlapp von Kanal 2 und Kanal 3 größer wird.

Geht man bei den optischen Berechnungen davon aus, daß der Kanal 3 die $\bar{y}$ -Kurve des Normspektralwertverlaufs nachbildet und Kanal 1 eine möglichst geringe Halbwertsbreite besitzen sollte, so bleibt als weitere zu untersuchende Größe die Empfindlichkeit des Kanals 4. Entsprechend läßt sich die spektrale Empfindlichkeit des vierten Kanals verschieben. In einer weiteren Berechnung wurden die Kanäle 1 bis 3 als konstant angenommen und lediglich der Verlauf der Empfindlichkeit des vierten Kanals zu kleineren Wellenlängen hin verschoben. So wurde das Maximum von 620nm nach 610nm, 600nm und 590nm verschoben. Die sich ergebenden Normfarbabstände befinden sich in Tab. 8.2. Entgegen den Variationen in Tab. 8.1 sind die Änderungen des Normfarbabstands in diesem Fall deutlich ausgeprägter. Der optimale Wert des Normfarbabstands stellt sich für ein Maximum der spektralen Empfindlichkeit bei 610nm für den vierten Kanal ein. Der erzielte Normfarbabstand liegt mit $\Delta E_{ab} = 3.01$ deutlich unterhalb der Werte aus Tab. 8.1. Damit liegen die spektralen Empfindlichkeiten im Bereich der Wahrnehmungsgrenze. Eine weitere Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit zu kleineren Wellenlängen führt zu einem drastischen Anstieg des Normfarbabstands bis auf $\Delta E = 9.00$. In diesem Bereich reagiert der Normfarbabstand sehr sensitiv auf Variationen der spektralen Empfindlichkeit.

Die bisher durchgeführten Simulationen erlauben zwar die Untersuchung des Einflusses der einzelnen Kanäle auf den Normfarbabstand, jedoch wurden die Kanäle als optisch unabhängig angenommen. Die generierten Signale des Bauelements sind zwar elektrisch linear unabhängig, jedoch wird die optische Generation innerhalb der einzelnen Dioden von der Wellenausbreitung im Schichtsystem bestimmt.

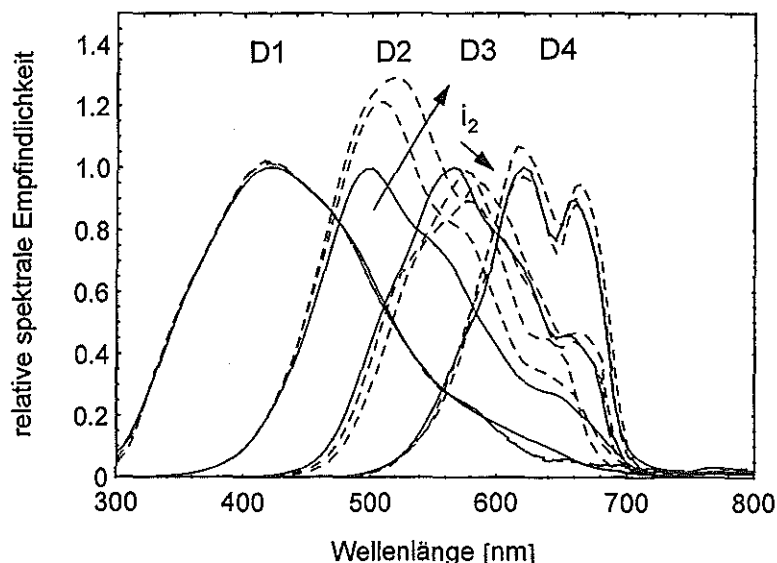


Abb. 8.3: Optisch simulierte relative spektrale Empfindlichkeit eines 4-Kanal-Sensors. Variiert wurde die Absorberschichtdicke der Diode D2 von 80nm (durchgezogene) auf 100nm und 120nm.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
4-Kanal-Sensor Abs. 2 Kanal 80nm	3x4	Munsell	Munsell	3.46	2.20	10.2
4-Kanal-Sensor Abs. 2 Kanal 100nm	3x4	Munsell	Munsell	3.49	2.25	10.4
4-Kanal-Sensor Abs. 2 Kanal 120nm	3x4	Munsell	Munsell	3.53	2.34	11.8

Tab. 8.3: Berechneter Normfarbabstand für die optisch simulierten spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 8.3. Variiert wurde die Absorberschichtdicke von Diode 2 von 80nm auf 100nm und 120nm.

Zu diesem Zweck wurden im Folgenden Simulationen der optischen Eigenschaften des Schichtsystems mit dem Ziel durchgeführt, die in Tab. 8.1 und 8.2 vorgenommene Variation der spektralen Empfindlichkeit nachzubilden. Auf dieser Grundlage ist dann wieder der Normfarbabstand bestimmt worden.

In Abb. 8.3 ist die relative spektrale Empfindlichkeit nach Variation der i-Schichtdicke der Diode D2 dargestellt. Hierzu wurde die i-Schichtdicke von 80nm auf 100nm und 120nm vergrößert. Man erkennt, daß sich durch die Variation der i-Schichtdicke der Diode D2 auch die spektrale Empfindlichkeit der dritten und vierten Diode ändert, wobei der Einfluß auf die spektrale Empfindlichkeit des Kanals 3 deutlich ausgeprägter ist als auf die Empfindlichkeit von Kanal 4. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 2 schiebt als Konsequenz der i-Schichtdickenvariation von 40nm um 20nm von 500nm nach 520nm. Ebenso schiebt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit für den dritten Kanal um 20nm von 565nm auf 585nm. Gleichzeitig nimmt die spektrale Empfindlichkeit für den zweiten Kanal um fast 30% zu, wohingegen die spektrale Empfindlichkeit für Kanal 3 um 5% zurückgeht. Betrachtet man allerdings den Schwerpunkt von Kanal 3, so schiebt dieser nur um 3nm zu höheren Wellenlängen, wobei gleichzeitig die Halbwertsbreite um 14nm zunimmt.

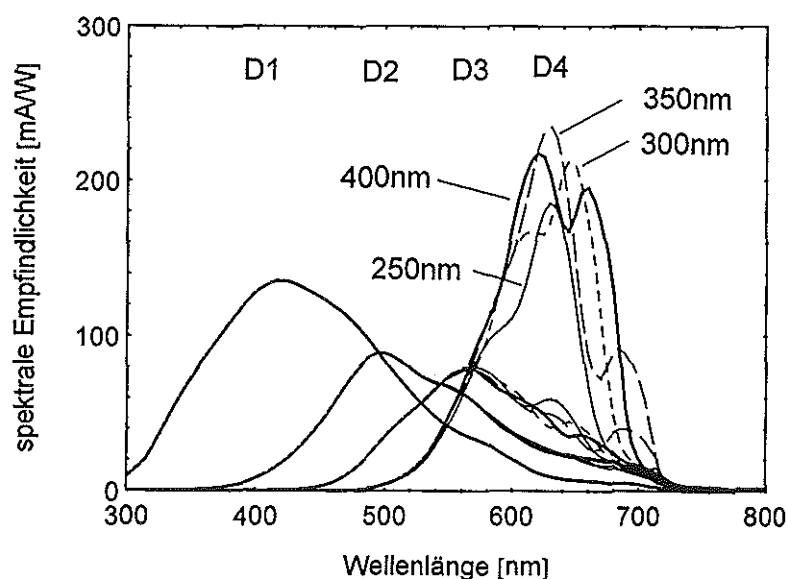


Abb. 8.4: Optisch simulierte spektrale Empfindlichkeit eines 4-Kanal-Sensors. Variiert wurde die Absorberschichtdicke der Diode D4 von 400nm auf 350nm, 300nm und 250nm.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE	σ	$\Delta E_{\max}$
4-Kanal-Sensor Abs. 4 Kanal 400nm	3x4	Munsell	Munsell	3.46	2.20	10.2
4-Kanal-Sensor Abs. 4 Kanal 350nm	3x4	Munsell	Munsell	3.26	2.13	11.3
4-Kanal-Sensor Abs. 4 Kanal 300nm	3x4	Munsell	Munsell	3.37	2.17	10.9
4-Kanal-Sensor Abs. 2 Kanal 250nm	3x4	Munsell	Munsell	2.77	1.80	9.3

Tab. 8.4: Berechneter Normfarbabstand für die optisch simulierten spektralen Empfindlichkeiten in Abb. 8.4. Variiert wurde die Absorberschichtdicke von Diode D4 von 400nm auf 350nm, 300nm und 250nm.

In Tab. 8.3 sind die Auswirkungen der Variation der Absorberschichtdicke der Diode D2 auf den Normfarbabstand dargestellt. Entgegen den Berechnungen in Tab. 8.1 ist keine Verbesserung des Normfarbabstands zu beobachten, obwohl das Maximum der spektralen Empfindlichkeit um 20nm zu höheren Wellenlängen schiebt. Vielmehr ist ein Anstieg des Normfarbabstands zu beobachten. Entgegen den Berechnungen aus Tab. 8.1 läßt sich die Ursache für die Verschlechterung nicht isoliert betrachten. Da der Verlauf der spektralen Empfindlichkeit von Kanal 4 von der Variation der Absorberschichtdicke der Diode D2 nahezu unbeeinflusst ist, bleibt als mögliche Ursache die geänderte Empfindlichkeit von Kanal 2 und 3. Auch wenn man den Schwerpunkt der spektralen Empfindlichkeiten oder die Halbwertsbreiten der Empfindlichkeiten berücksichtigt, ist keine klare Zuordnung zwischen der geänderten spektralen Empfindlichkeit und dem Normfarbabstand zu beobachten. Hierbei muß allerdings auch berücksichtigt werden, daß die Änderung des Normfarbabstands in Tab. 8.3 nur sehr gering ist und daß der Schwerpunkt bei der Berechnung in Tab. 8.1 um 30nm verschoben wurde, wohingegen der Schwerpunkt in Tab. 8.3 nur um 3nm verschoben wurde.

Eine entsprechende Simulation der Schichtdickenvariation in Analogie zu Tab. 8.2 wurde auch für den vierten Kanal durchgeführt. Die Variation der Schichtdicke der vierten Diode hat nur eine geringe Auswirkung auf die Empfindlichkeit der Dioden D1 bis D3. Die Gesamtaborption der vierten Diode wird zwar durch die i-Schichtdicke festgelegt, aber die Lage der Maxima wird bestimmt durch Interferenzstrukturen innerhalb der Absorberschicht. Dargestellt ist die spektrale Empfindlichkeit in Abb. 8.4. Die Absorberschichtdicke wurde in der Simulation von 400nm in 50nm Schritten auf 250nm reduziert. Das Maximum der Empfindlichkeit schiebt in diesem Zusammenhang von 620nm nach 630nm, 645nm und 630nm. Obwohl die Schichtdicke von 400nm um 150nm gesenkt wird, schiebt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit von 620nm zu höheren Wellenlängen. In Tab. 8.4 sind die Normfarbabstände der spektralen Empfindlichkeiten aus Abb. 8.4 dargestellt. Der Normfarbabstand sinkt von $\Delta E_{ab} = 3.46$ auf $\Delta E_{ab} = 2.77$ für eine Reduktion der Schichtdicke um 150nm. Für eine Schichtdicke von 300nm ist ein Anstieg des Normfarbabstandes zu beobachten, obgleich der Schwerpunkt der spektralen Empfindlichkeit in Abb. 8.4 mit abnehmender Schichtdicke stetig zu kleineren Wellenlängen schiebt. Betrachtet man allerdings die Lage der abfallenden Flanke⁵⁶ der spektralen Empfindlichkeit in Abb. 8.4, so schiebt diese von 682nm ($i_4=400\text{nm}$) auf 655nm ($i_4=350\text{nm}$), um dann wieder auf 670nm ($i_4=300\text{nm}$) anzusteigen. Anschließend schiebt die abfallende Flanke wieder nach 655nm

⁵⁶ Hierbei ist jeweils die Wellenlänge ermittelt worden, für die die spektrale Empfindlichkeit der abfallenden Flanke von Kanal 4 auf 50% absinkt.

($i_4=250\text{nm}$). Diese Betrachtung zeigt, daß der Normfarbabstand sehr sensitiv auf die abfallende Flanke des letzten Kanals reagiert. Dies gilt für den 3- aber auch für den 4-Kanal-Sensor.

8.2 Experiment / Bauelementdesign

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht der experimentelle Nachweis der Realisierbarkeit eines 4-Kanal-Sensors. Wie bereits die Realisierung des 6-Kanal-Sensors gezeigt hat, läßt sich durch den Einbau von texturierten TCO-Schichten die Reproduzierbarkeit erhöhen und damit der Einfluß der Schichtdickeninterferenzen reduzieren. So wurden in den Schichtstapel des 4-Kanal-Sensors zwei texturierte TCO-Schichten eingefügt. Diese wurden zwischen den Dioden D2/D3 und zwischen den Dioden D3/D4 eingebracht. Weiterhin ist mit dieser Struktur erstmals der Versuch unternommen worden, einen Sensor zu entwickeln, dessen Absorberschichten ohne den Einbau von Kohlenstoff oder Germanium realisiert wurden. Die Schichtenfolge des realisierten Sensors besteht aus Absorbermaterialien, deren optischer Bandabstand lediglich durch Variation der Abscheidetemperatur und der Wasserstoffverdünnung beeinflusst wurde. Im Hinblick auf die lichtinduzierte Alterung der amorphen Schichten (Staebler-Wronski-Effekt, Kapitel 4.6), welche mit hoher oder sehr hoher Wasserstoffverdünnung hergestellt wurden, läßt sich so die Stabilität verbessern (Kapitel 5.3 und 5.4). Für diese Niedertemperaturschichten liegen allerdings keine Daten der komplexen Brechungsindizes vor, so daß die Schichten bei der optischen Simulation nicht berücksichtigt werden konnten. Ebenfalls konnten die texturierten TCO-Schichten im Simulationsmodell nicht berücksichtigt werden. Dies zeigt, daß die optische Simulation nur zu Vorhersagen der realisierten Struktur eingesetzt werden können, wenn die notwendigen optischen Eingangsgrößen vorliegen und das Simulationsmodell eine hinreichend genaue Beschreibung der zu simulierenden Struktur erlaubt.

Die Bandabstände der Absorberschichten der Diode D1 bis D4 liegen bei 1.95eV, 1.85eV, 1.85eV und 1.75eV. Die Absorberschichtdicken wurden angenommen mit 35nm, 80nm, 180nm und 400nm. Für die p- und n-Schichten wurden wieder „Standard“-Rezepte eingesetzt. Die TCO_I - und TCO_{II} -Schicht wurden als glatte und die TCO_{III} - und TCO_{IV} -Schicht wurden als texturierte TCO-Schichten in den Schichtstapel implementiert.

8.3 Stationäre Bauelementeigenschaften

In Abb. 8.5 ist die experimentell ermittelte spektrale Empfindlichkeit des 4-Kanal-Sensors dargestellt. Die Maxima der spektralen Empfindlichkeit der Dioden D1 bis D4 liegen bei 460nm, 540nm, 610nm, 650nm. Die Halbwertsbreiten der vier spektralen Empfindlichkeiten liegen bei 198nm, 162nm, 155nm und 136nm. Bei der Betrachtung der spektralen Empfindlichkeiten der vier Kanäle fällt auf, daß der Absolutwert der Empfindlichkeit für die Diode D1 sehr hoch ist. So liegt das Verhältnis der Absolutwerte der spektralen Empfindlichkeit für $i_1 : i_2 : i_3 : i_4$ bei 1 : 0.47 : 0.56 : 0.5. Der hohe Absolutwert der spektralen Empfindlichkeit für den ersten Kanal ist zurückzuführen auf den Bandabstand der Absorberschicht der Diode D1. Aufgrund des geringen Bandabstands des Absorbers in der Diode D1, im Vergleich zu den Bandabständen der Bauelemente in Abb. 7.2 (Diode D1) und Abb. 7.14 (BD1-Struktur), steigt die Absorption deutlich an.

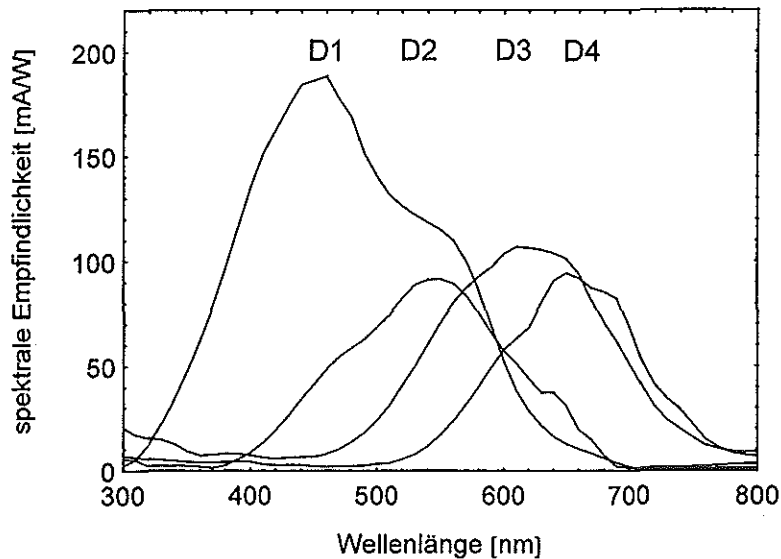


Abb. 8.5: Gemessene spektrale Empfindlichkeit eines 4-Kanal-Sensors.

Weiterhin fällt auf, daß die spektralen Verläufe, hervorgerufen durch den Einbau der texturierten TCO-Schichten keine ausgeprägten Einflüsse von Schichtdickeninterferenzen zeigen. Vergleicht man die Simulation mit dem Experiment so ist zu beobachten, daß die spektrale Empfindlichkeit der Kanäle 2 bis 4 zu höheren Wellenlängen schiebt. Dies wirkt sich auch auf den Normfarbabstand aus. Dieser wird in Tab. 8.5 angegeben. Ermittelt wurden die Normfarbabstände unter Verwendung des Munsell- und des Munsell Large-Datensatzes (Kapitel 3.5, [Herzog99]). Vergleicht man die Normfarbabstände der spektralen Empfindlichkeit des 4-Kanal-Sensors mit den ermittelten Werten für die optisch simulierten Strukturen (Kapitel 8.1), so sind die Werte für die experimentell realisierte Struktur schlechter. Zurückzuführen ist dies auf das Design der Diode D1. Zu viel Licht wird bereits in der Diode D1 absorbiert, so daß sich die spektrale Empfindlichkeiten zu größeren Wellenlängen verschieben. Weiterhin sind die Absorberschichten von Diode D3 und D4 zu dick. Bedingt durch den Einfluß der Streuung und des Light-Trappings kann die Schichtdicke dieser beiden Dioden reduziert werden.

Sensor	Dim.	char.	Test	ΔE_{ab}	σ	ΔE_{max}
3-Kanal-Sensor	3x3	Munsell	Munsell	7.12	6.56	32.46
3-Kanal-Sensor	3x3	Munsell Large	Munsell Large	4.02	4.72	45.82
4-Kanal-Sensor	3x4	Munsell	Munsell	3.91	3.20	19.6
4-Kanal-Sensor	3x4	Munsell Large	Munsell Large	2.68	3.15	40.0
6-Kanal-Sensor	3x6	Munsell	Munsell	1.00	0.89	4.45
6-Kanal-Sensor	3x6	Munsell Large	Munsell Large	0.7	0.66	11.39

Tab. 8.5: Berechneter Normfarbabstand für die spektralen Empfindlichkeiten der experimentell realisierten Strukturen: 3-Kanal-Sensor, 4-Kanal-Sensor und 6-Kanal-Sensor für den Datensatz aus dem „Book of Colors“ von Munsell (Munsell) und für den Datensatz von Parkkinen [Parkkinen89] (Munsell Large).

Weiterhin sind in Tab. 8.5 die Normfarbabstände des 3-Kanal-Sensors (Abb. 7.2) bestehend aus drei gestapelten pin-Dioden und des 6-Kanal-Sensor (Abb. 7.14) bestehend aus drei gestapelten pinip-Strukturen eingetragen.

Vergleicht man die Empfindlichkeit des 3-Kanal-Sensors mit der des 4-Kanal-Sensors, so wird die Verbesserung des Normfarbabstands deutlich. Wie die optischen Simulationen zum 4-Kanal-Sensor zeigen, besteht hier allerdings noch Optimierungspotential. Der 4-Kanal-Sensor stellt damit einen sehr guten Kompromiß zwischen einem 3-Kanal und 6-Kanal-Sensor dar. Der Nachteil des 6-Kanal-Sensors, daß zwei Auslesevorgänge notwendig sind, kann umgangen werden, wobei gleichzeitig der Anstieg des Normfarbabstand begrenzt werden konnte.

8.4 Zusammenfassung

Bei dem realisierten und in diesem Kapitel untersuchten 4-Kanal-Sensor handelt es sich um eine sehr komplexe Struktur, die aufgrund von Vielfachreflexionen innerhalb des Schichtsystems sehr hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Schichten stellt. Dennoch handelt es sich bei diesem Bauelement um das erste „wirkliche“ Bauelement, das mehr als drei Verläufe der spektralen Empfindlichkeit parallel auslesen kann. Erst diese Struktur hebt die Vorteile der vertikalen Integration der Sensoren hervor. Liegt der Farbfehler für den 3-Kanal-Sensor noch bei $\Delta E_{ab} = 7.12$, so sinkt der Normfarbabstand für diese Struktur bereits auf $\Delta E_{ab} = 3.91$.

8.5 Ausblick

Aufgrund des modularen Aufbaus des Sensors läßt sich als unterste Diode eines solchen Stapels eine Diode aus mikrokristallinem Silizium integrieren, so daß sich der Empfindlichkeitsbereich in den nahen infraroten Spektralbereich erweitern läßt. So sind Anwendungen denkbar, die sich mit der Analyse des infraroten Anteils des Lichts beschäftigen [Baronti98]. Im Bezug auf mikrokristallines Silizium sei auf die Arbeiten von Finger und Carius verwiesen [Finger97 Carius97]. Arbeiten zu mikrokristallinen Dioden finden sich bei Meier und Yamamoto [Meier96, Yamamoto97].

Es konnte in diesem wie auch schon in Kapitel 7 gezeigt werden, daß es möglich ist, einen Farb-Aliasing freien Sensor herzustellen, dessen Farbauflösung in den Bereich der Akzeptanzgrenze (4-Kanal-Sensor) aber auch in den Bereich der Wahrnehmungsgrenze (6-Kanal-Sensor) vorstößt. Ein solcher Sensor ist dort von besonderem Interesse, wo man gleichzeitig eine hohe Orts- und eine hohe Farbauflösung benötigt. Durch die vertikale Integration kann der Farb-Aliasing-Effekt ausgeschaltet und der Gray- oder Schwarz/Weiß-Aliasing-Effekt indirekt gesenkt werden. Da auf die nebeneinander angeordneten optischen Filter verzichtet werden kann, ermöglicht dies die Realisierung von Sensoren mit einer erhöhten Ortsauflösung. Damit sinkt der Gray- oder Schwarz/Weiß-Aliasing-Effekt. Weiterhin kann der Sensor mit einer Ausleseelektronik integriert werden. Dies ist möglich durch die geringen Herstellungstemperaturen des Schichtsystems. Damit werden Flächenfüllfaktoren möglich, die deutlich über denen liegen, die für kristalline Bildsensoren mit integrierter Verarbeitungselektronik möglich sind.

Für den 4-Kanal-Sensor gilt, wie schon für den 3- und 6-Kanal-Sensor, daß neue Konzepte entwickelt werden müssen, die Bauelementanschlüsse mit der Ausleseelektronik zu verbinden [Stiebig97c]. In diesem Bereich sind auch zukünftige Arbeiten anzusiedeln.

Kapitel 9

Invertierte Sensoren

Das Kapitel 9 befaßt sich mit der Umsetzung der in den Kapiteln 4 bis 8 entwickelten nichtinvertierten Sensoren im Hinblick auf eine invertierte Deposition. Allen nichtinvertierten Sensoren ist gemeinsam, daß das Licht durch die Schicht in das Schichtsystem eingekoppelt wird, die auch zuerst abgeschieden wurde. Von einer invertierten Struktur wird gesprochen, wenn das Licht durch die Schicht einfällt, welche zuletzt hergestellt wurde.

Die invertierte Herstellung eines Sensors setzt voraus, daß transparente leitfähige Schichten als Front- und metallbeschichtete Substrate als Rückkontakt zur Verfügung stehen. Die Bereitstellung dieser Front- und Rückseitenkontakte ist technologisch aufwendig. Im Gegensatz dazu wurden für die Herstellung nichtinvertierter Strukturen kommerzielle Substrate, welche mit einem transparenten Frontkontakt versehen sind, eingesetzt. Der Rückkontakt einer nichtinvertierten Struktur wird durch einen thermischen Aufdampfprozeß realisiert. Dies ermöglicht eine einfache Herstellung nichtinvertierter Strukturen.

Voraussetzung für die Kombination eines Detektorsystems mit einer Ausleseelektronik ist allerdings die invertierte Deposition des Schichtsystems auf einer Schaltungselektronik. Hierzu wird in einem ersten Herstellungsschritt die Ausleseelektronik realisiert und in einem zweiten Schritt das eigentliche Detektorsystem integriert.

In Abb. 9.1 ist ein schematischer Schichtaufbau eines vertikal integrierten Sensors auf einer Ausleseelektronik dargestellt. Auf eine Ausleseelektronik, die sowohl eine aktive als auch eine passive Pixelelektronik enthalten kann, wird zuerst eine Isolationsschicht aufgebracht. Diese kann in Form einer Polyimidschicht aufgeschleudert oder in Form einer Siliziumnitridschicht abgeschieden werden. Diese Schicht trennt das Detektorsystem von der Verarbeitungselektronik. Lediglich Kontaktlöcher werden geöffnet, welche zur Kontaktierung des Sensors mit der Ausleseelektronik dienen. In einem weiteren Schritt wird ein Metallrückkontakt aufgebracht und strukturiert. Anschließend wird das eigentliche Dünnschichtsystem abgeschieden. In einem letzten Schritt wird dann der Frontkontakt in Form einer ZnO-, SnO₂- oder ITO⁵⁷-Schicht hergestellt. Je nach herzustellendem Detektorsystem wird der transparente Kontakt ganzflächig realisiert, so daß alle Detektoren einen gemeinsamen Frontkontakt besitzen. Zur Vermeidung der Pixelkopplung kann das Schichtsystem aber auch strukturiert werden.

⁵⁷ Bei einer ITO-Schicht handelt es sich um eine Indiumzinnoxid-Schicht. Ebenso wie eine SnO₂- und eine ZnO-Schicht besitzt eine ITO-Schicht eine Bandlücke von $E_g \geq 3.3 \text{ eV}$.

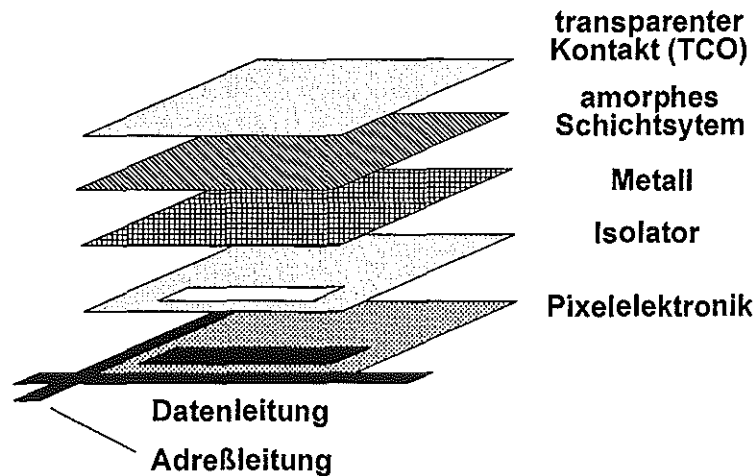


Abb. 9.1: Schematischer Aufbau eines Pixels eines zweidimensionalen Sensorarrays. Ein Pixel besteht aus einer amorphen, polykristallinen oder kristallinen Ausleseelektronik, einem Isolator (Polyimid, SiN_x), einem Metallrückkontakt, einem amorphen Schichtsystem und einem transparenten Frontkontakt.

Hierzu muß allerdings nach der Strukturierung des eigentlichen Halbleitersystems eine weitere Metallisierungsebene, die ebenfalls wieder strukturiert wird, aufgebracht werden.

Neben der umgekehrten Depositionsabfolge unterscheiden sich die Bauelementeigenschaften von invertierten und nichtinvertierten Strukturen in mehreren Punkten. Diese werden im Weiteren diskutiert. Im ersten Teil dieses Kapitels (Kapitel 9.1) werden die mechanischen Eigenschaften (Haftung) von invertierten Sensoren beschrieben. In einem zweiten Teil wird auf die geänderten elektrischen Eigenschaften eingegangen. In Kapitel 9.3 wird dann die Wellenausbreitung (optische Eigenschaften) innerhalb einer invertiert deponierten Struktur diskutiert. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Zusammenfassung (Kapitel 9.4).

9.1 Mechanische Eigenschaften

Ein wesentliches Hemmnis bei der Herstellung von invertierten Sensoren ist das Haftungsproblem. Je nach verwendetem Träger- und Rückkontaktmaterial lösen sich die Schichten nach der Herstellung wieder ab. Verantwortlich hierfür sind u.a. die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats und des Metallrückkontakts. Als Folge der thermischen Belastung bei der Abscheidung der Halbleiterschichten kommt es zu Verspannungen, welche zu einem Abplatzen der Schichten führt. Da in der Regel Glassubstrate mit einer thermisch aufgedampften Metallschicht als Rückkontakt eingesetzt werden, besteht das Hauptproblem der Haftung zwischen Glas und dem Metallrückkontakt. So zeigen Untersuchungen zur Haftung, daß insbesondere Silberschichten eine sehr schlechte Haftung auf Glassubstraten besitzen. Alternativ besitzen Chrom- oder Aluminiumschichten eine deutlich bessere Haftung. Hingegen besitzen diese beiden Metalle eine deutlich schlechtere Reflexion als Silber, so daß ein großer Teil des sichtbaren Lichts, welches den Rückkontakt erreicht, dort absorbiert wird. Zur Verbesserung der Reflexionseigenschaften wurden daraufhin Metallschichtsysteme aus Aluminium und Silber eingesetzt. Auf das Glassubstrat wurde zuerst eine Aluminiumschicht von einigen 100nm aufgebracht. Auf diese wurde wiederum eine dünne (ca. 100nm) Silberschicht aufgedampft.

9.2 Elektrische Eigenschaften

Dem Rückkontakt eines invertiert hergestellten Dünnschichtsensors kommt eine entscheidende Bedeutung zu. So hat der Rückkontakt nicht nur Einfluß auf die Reflexion der elektromagnetischen Welle, sondern auch auf die elektrischen Eigenschaften. Untersuchungen am Übergang zwischen dem Metallrückkontakt und der anschließend aufgetragenen Halbleiterschicht zeigen, daß sich die Reflexion, also damit die optischen Eigenschaften des Systems, durch die Kombination von Aluminium und Silber als Rückkontakt verbessern. Hingegen weichen die elektronischen Bauelementeigenschaften von den erwarteten Ergebnissen ab. Messungen mit Hilfe von Sekundär-Ionen-Massenspektroskopie (SIMS) an einem invertierten Schichtsystem zeigen, daß es zu einer Veränderung des Rückkontakts kommt. So beobachtet man eine Diffusion des Aluminiums durch die dünne Silberschicht von 100nm. Hierzu ist in Abb. 9.2 eine SIMS-Messung einer invertiert hergestellten Struktur dargestellt. Bei der Messung in Abb. 9.2 handelt es sich um eine Messung der Struktur A aus dem Kapitel 6, welche aber invertiert abgeschieden wurde. Auf das verwendete Meßverfahren kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Hierzu wird auf die Literatur von Wilson [Wilson89] verwiesen. In Abb. 9.2 wurde die Probe, nachdem der Frontkontakt naßchemisch entfernt wurde, mit positiven Cäsiumionen beschossen. Durch den Beschuß der Probe, welche sich auf einem definierten elektrischen Potential befindet, werden Ionen aus der Probe gelöst, deren Masse mit Hilfe eines Quadrupolmassenfilters bestimmt wird. Aufgrund der Masse läßt sich auf das abgetragene Element schließen. Aufgetragen ist in Abb. 9.2 das gemessene Konzentrationsverhältnis der einzelnen Elemente als Funktion der Abtragzeit. Die Abtragrate der einzelnen Materialien ist unterschiedlich, so daß anhand der Abtragzeit nicht direkt auf die Dicken der einzelnen Schichten geschlossen werden kann.

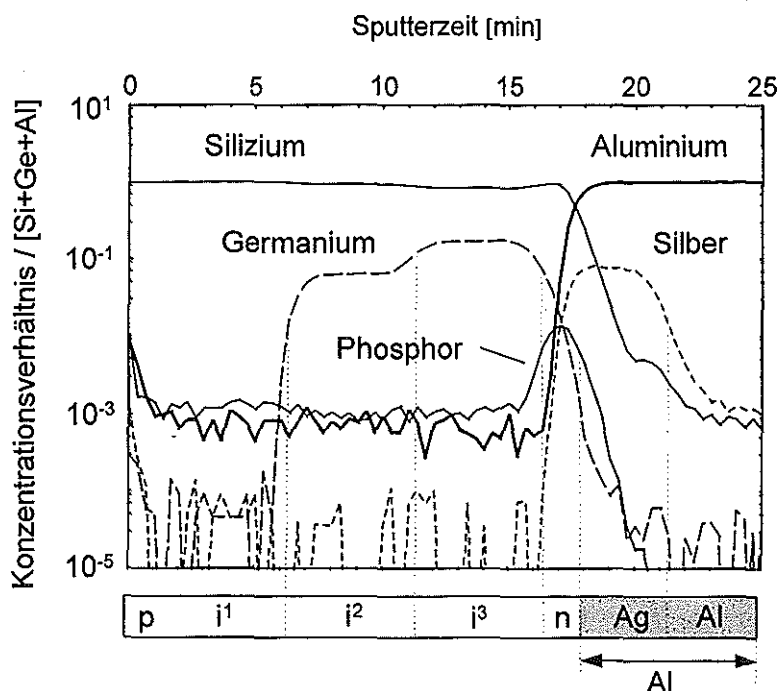


Abb. 9.2: Sekundär-Ionen-Massenspektroskopiemessung einer invertiert hergestellten pin-Struktur in Anlehnung an das Depositionsrezept von Struktur A aus Tab. 6.1. Beschossen wurde die Probe bei der Messung mit Cäsiumionen.

Zur besseren Darstellung wurden die gemessenen Konzentrationen jeweils auf die Summe der Silizium-, Germanium- und Aluminiumkonzentration normiert.

In Abb. 9.2 ist jeweils das normierten Konzentrationsverhältnis für Silizium, Germanium, Phosphor, Aluminium und Silber aufgetragen. Korrespondierend ist unterhalb des Graphen die Schichtfolge des Sensors dargestellt. Man erkennt, daß die Konzentration von Silizium fast über den vollständigen Bereich des amorphen Schichtsystems konstant ist. Lediglich im Bereich von i_3 , geht bedingt durch den Einbau von ca. 12% Germanium im Festkörper die Konzentration sehr leicht zurück. Betrachtet man die Konzentration von Germanium, so nimmt diese in Bereich 2 auf ca. 4.5% und in Bereich 3 auf 12% zu. Dies ist in Übereinstimmung mit den Angaben in Tab. 6.1⁵⁸. Das Hauptaugenmerk soll aber weniger auf die Germaniumkonzentration als vielmehr auf die Konzentration von Phosphor, Silber und Aluminium gelenkt werden. So erkennt man, daß Aluminium in die Silberschicht diffundiert ist. Die Aluminiumkonzentration ist im Bereich der eigentlichen Aluminiumschicht und im Bereich der Silberschicht nahezu konstant. Somit kommt auch die n-leitende Siliziumschicht mit Aluminium in Berührung. Berücksichtigt man, daß Aluminium ein Element der dritten Hauptgruppe des Periodensystems ist, so kann es als p-Dotierung eingesetzt werden. Neben einer möglichen Kompensation der in der n-Schicht befindlichen Phosphoratome kommt es weiterhin zu einer metallinduzierten Kristallisation. Dieser Effekt wurde bereits ausführlich untersucht von Haque [Haque94, Edelman97]. Bei einer Temperatur von ca. 150°C kommt es zu einer Wechselwirkung von Aluminium und der amorphen n-Schicht. Ab einer Temperatur von ca. 180°C beginnt dann die Kristallisation der amorphen Siliziumschicht [Haque94]. Als Folge entstehen am Rückkontakt Kristallite mit einer Größe von einigen 100nm. Da das Schichtsystem bei einer Temperatur von 210°C hergestellt wurde und das Schichtsystem dieser Temperatur mehrere Stunden ausgesetzt war, besteht eine große Evidenz, daß dieser Prozeß für die Verschlechterung der elektronischen Eigenschaften des Bauelements verantwortlich ist.

Als mögliche Diffusionsbarriere zwischen Rückkontakt und dem amorphen Schichtsystem läßt sich eine TCO-Schicht einsetzen. So haben sich unterschiedliche Publikationen mit der notwendigen TCO-Schichtdicke beschäftigt, welche erforderlich ist, die Diffusion von Al zu verhindern. So wird berichtet, daß auf Metallsubstraten TCO-Schichtdicken von 1µm notwendig sind, um die Eigenschaften der aufgetragenen Bauelemente zu verbessern [Goetz96]. Die Oberflächenrauigkeit des verwendeten Trägermaterials scheint hier eine entscheidende Bedeutung zu besitzen. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben eine deutliche Verbesserung der Bauelementeigenschaften bereits bei Verwendung einer TCO-Schicht von 100nm gezeigt. Als Rückkontaktsystem wurde ein Schichtsystem aus einer Aluminiumschicht von einigen 100nm, einer Silberschicht von ca. 100nm und einer 100nm dicken TCO-Schicht verwendet. Das Problem der metallinduzierten Kristallisation tritt auch bei anderen Metallen auf. So liegt die Temperatur für Silber deutlich über der Temperatur von Aluminium [Edelmann97]. Die Kristallisation einer amorphen Schicht ohne Wechselwirkung mit einer Metallschicht wird erst bei 550-600°C beobachtet [Yamauchi93]. So läßt sich durch die Implementierung einer TCO-Schicht zwischen dem Metallrückkontakt und dem eigentlichen amorphen oder mikrokristallinen Schichtsystem die Aluminiumdiffusion verhindern und auch die Reflexion kann verbessert werden.

Invertierte und nichtinvertierte Strukturen lassen sich auch im Hinblick auf veränderte Interface- und Volumeneigenschaften, hervorgerufen durch die umgekehrte Depositionsreihenfolge, untersuchen. Bisher wurde dieser Effekt allerdings überlagert vom Einfluß des

⁵⁸ Auf die Darstellung der Konzentration von Kohlenstoff und Bor ist in Abb. 9.2 verzichtet worden. Andere Messungen an dieser Probe zeigen aber, daß sich die erwarteten Konzentrationen einstellen.

Rückkontakts und den optischen Eigenschaften des gesamten Schichtsystems, so daß im Rahmen dieses Kapitels nicht auf diese Effekte eingegangen wird [Berkel93].

9.3 Optische Eigenschaften

Wie bereits in Kapitel 7.2 und 8 beschrieben, hat die Textur einer Schicht einen entscheidenden Einfluß auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle innerhalb des Schichtsystems. So wird Licht an rauen Schichten gestreut und es kommt je nach optischer Ausbreitung der Welle innerhalb des Schichtsystems auch zur Totalreflexion. Berücksichtigt man, daß sich die Rauigkeit des Substrats bei der Herstellung auf die Schichtenfolge überträgt, so wird deutlich, wie durch die Wahl des Substrats auf die Ausbreitung der Welle innerhalb der Struktur Einfluß genommen werden kann. Im weiteren wird am Beispiel einer pin-Struktur mit dreigeteilter Absorberschicht auf den Einfluß des Rückkontakts auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle innerhalb des Schichtsystems eingegangen.

In Abb. 9.3 ist die relative spektrale Empfindlichkeit einer pin-Struktur mit dreigeteilter Absorberschicht dargestellt. Bei der Struktur handelt es sich um die invertiert abgeschiedene Struktur D aus Kapitel 6 (Tab. 6.1). Aufgetragen ist in Abb. 9.3 die Empfindlichkeit bei Verwendung einer Chromschicht sowie einer Silber/TCO-Schicht⁵⁹ als Rückkontakt, wobei die TCO-Schicht mit Hilfe stark verdünnter Salzsäure texturiert wurde. Die Empfindlichkeit der Struktur auf einem Chromrückkontakt ist vergleichbar mit der Empfindlichkeit der Struktur D in Abb. 6.11, wobei die Reflexion der hier realisierten Struktur auf Chrom geringer als die Reflexion der Struktur mit einem Aluminiumrückkontakt ist.

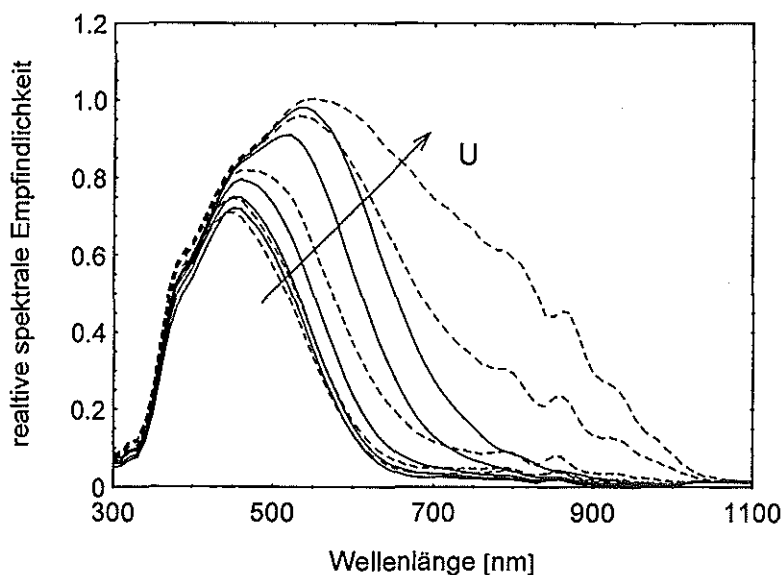


Abb. 9.3: Relative spektrale Empfindlichkeit der invertiert deponierten pin-Struktur mit dreigeteilter Absorberschicht in Anlehnung an Struktur D (Tab. 6.1) aus Kapitel 6. Die Struktur wurde auf einem Chrom (durchgezogene Linie) und auf einem Silber / texturierten TCO (gestrichelte Linie) Rückkontakt abgeschieden. Gemessen wurden die Empfindlichkeiten für die Spannungen 0V, -0.2V, -0.4V, -0.6V und -1.0V.

⁵⁹ Zwischen der Silberschicht und dem Glassubstrat wurde eine Haftvermittlerschicht eingefügt.

Bereits bei einer Spannung von -1.0V werden nahezu alle photogenerierten Ladungsträger eingesammelt. Ein Vergleich der beiden Strukturen zeigt den deutlichen Einfluß des Rückkontakts, insbesondere für höhere Wellenlängen. Der Unterschied der spektralen Empfindlichkeit ist zurückzuführen auf die Absorption im Chromrückkontakt. Rückblickend bestätigen dies die Untersuchung aus Kapitel 6. Mithin kann die Differenz aus der gemessenen Reflexion und der simulierten Reflexion der Struktur D in Abb. 6.8 auf die Absorption im Aluminiumrückkontakt zurückgeführt werden. Die spektrale Empfindlichkeit der Struktur D wird hauptsächlich durch die Absorption beim Einfachdurchlauf des Lichts bestimmt. Mehrfachdurchläufe spielen nur eine untergeordnete Rolle, da ein wesentlicher Teil des Lichts im Rückkontakt absorbiert wird. Die verbesserten Eigenschaften des Rückkontakts gewinnen dort an Bedeutung, wo die Absorptionslänge und damit die erforderliche Eindringtiefe der Photonen groß ist. Für mikrokristallines Material ist dies der Fall, welches als Absorber in Bereich 3 (Abb. 6.1a) implementiert wurde. So ist im Fall größerer Wellenlängen die Absorptionslänge für mikrokristallines Silizium größer als die Absorberschichtdicke der Struktur in Abb. 9.3. Mithin ist für die Absorption ein Mehrfachdurchlauf des Lichts notwendig. Wird das Licht noch gestreut und als Folge im Halbleiterschichtsystem eingefangen (Light-Trapping), so läßt sich das einfallende Licht besser nutzen.

Der hier vorgestellte Sensor zeigt somit einen Weg auf, die spektrale Empfindlichkeit zu größeren Wellenlängen hin auszudehnen. Mit der Anwendung von mikrokristallinem Silizium kann so der Bereich zwischen 700nm und 1050nm erschlossen werden. So läßt sich eine mikrokristalline Diode als vierte Diode beispielsweise in einen 4-Kanal-Sensor integrieren. Oder aber man ersetzt den sechsten Kanal eines 6-Kanal-Bauelements auf der Basis einer Vierpol-Anordnung durch einen Sensor, der im infraroten Spektralbereich empfindlich ist. Hierzu sind allerdings noch weitere intensive Arbeiten notwendig.

9.4 Zusammenfassung

Voraussetzung für die Realisierung eines Sensors als Teil eines „intelligenten“ Sensorsystems ist die Integration des eigentlichen Detektors auf einer Ausleseschaltung. Dies hat zur Folge, daß der Detektor invertiert auf einer solchen Schaltungselektronik integriert werden muß. Dieses Kapitel hat sich mit der Realisierung invertierter Sensorstrukturen befaßt. Hierzu wurden die notwendigen Modifikationen aufgezeigt, die ergriffen werden müssen, um das nicht invertierte Schichtsystem in ein funktionstüchtiges invertiertes System zu überführen.

Im wesentlichen standen die modifizierten optischen Randbedingungen im Mittelpunkt dieses Kapitels. Die aufgrund der invertierten Abscheidereihenfolge auftretenden Verschleppungen von Dotierstoffen oder die geänderten Wachstumsbedingungen aufgrund des geänderten Untergrundes wurden durch die modifizierten optischen Eigenschaften überlagert. In diesem Zusammenhang kommt der Wahl des Rückkontakts eine entscheidende Bedeutung zu.

Zukünftig muß die Lichtausbreitung unter Berücksichtigung von Lichtstreuung und Totalreflexion wesentlich intensiver betrachtet und auch beim Design der Bauelemente berücksichtigt werden. Hierzu ist es notwendig, sowohl wellenlängenabhängige als auch winkelabhängige Streufunktionen zu ermitteln, die beim Design invertierter Strukturen berücksichtigt werden müssen. Wichtig auf diesem Gebiet ist die Unterstützung des Experiments durch die optische Simulation. Hierzu müssen zukünftig Methoden entwickelt

werden, die eine Beschreibung texturierter Schichtsysteme erlauben, ohne daß der notwendige numerische Aufwand drastisch zunimmt.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Beschreibung von neuartigen Dünnschichtsensoren zur Farberkennung. Hierzu wurden unterschiedliche Sensorkonzepte auf der Basis amorpher und mikrokristalliner Dünnschicht-Technologie vorgestellt und deren Umsetzung beschrieben. Allen Sensoren, die im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurden, ist gemeinsam, daß die Farbinformation in der Tiefe des Bauelements detektiert wird. Damit kann der Farbmoiré- oder Farb-Aliasing-Effekt ausgeschaltet werden. Dieser tritt bei konventionellen Farbbildaufnehmersystemen auf, welche mit Hilfe einer Matrix aus optischen Filtern die Farbinformation in die Anteile rot, grün und blau zerlegen. Neben der Realisierung und Charakterisierung der Bauelemente stand die Optimierung der Farbtrennung im Mittelpunkt der Arbeit. Durch ein enges Zusammenspiel von Experiment und optischer Modellierung war es möglich, gezielt Dünnschichtsysteme zu realisieren und deren optisches und optoelektronisches Verhalten zu charakterisieren.

Weiterhin ist es erstmalig gelungen, ausgehend von den Materialeigenschaften unter Berücksichtigung des Bauelementdesigns, Korrelationen zwischen Bauelementparametern und farbmtrischen Kenndaten zu ermitteln. Dies erlaubt den quantitativen Vergleich der realisierten Sensoren mit anderen Sensorsystemen.

Ausgehend von den Bauelementeigenschaften einer *nipiin*-Struktur sind Randbedingungen ermittelt worden, die bei der weiteren Entwicklung alternativer Detektorstrukturen berücksichtigt wurden. Eine *nipiin*-Struktur besteht aus zwei antiseriell verschalteten Dioden, wobei die Farbtrennung auf der spannungsgesteuerten Sammlung der photogenerierten Ladungsträger beruht. So wird blaues Licht für positive Spannungen in der Top-Diode detektiert. Die von grünem und rotem Licht generierten Ladungsträger werden hingegen für negative Spannungen in der Bottom-Diode eingesammelt.

Weiterhin wurde eine *piinip*-Struktur realisiert, die ebenfalls wie die *nipiin*-Struktur auf einer antiseriellen Verschaltung zweier Dioden basiert. Dieses Bauelement besitzt allerdings im Vergleich zu einer *nipiin*-Struktur eine deutlich verbesserte Stabilität gegen lichtinduzierte Alterung. Erreicht wurde dies durch die Implementierung von Nieder-temperatur-Materialien und mikrokristallinem Silizium. Diese Materialien zeichnen sich durch eine höhere Stabilität bezüglich lichtinduzierter Alterung aus. Weiterhin unterscheidet sich eine *piinip*-Struktur dahingehend von einer *nipiin*-Struktur, daß blaues und grünes Licht in der Top-Diode detektiert wird. Bei diesem Bauelement wird lediglich rotes Licht in der Bottom-Diode eingesammelt. Da sich das zeitliche Verhalten des Photostroms von antiseriell

verschalteten Bauelementen nahezu linear mit der optischen Generation verhält, kann durch die Verwendung hoher Beleuchtungsstärken die Antwortzeit reduziert werden.

Alternativ zu den bipolaren Strukturen wurden unterschiedliche Sensoren auf der Basis einer pin-Struktur entwickelt, wobei die Absorberschicht dreigeteilt ist. Die Farbseparation wird hierbei durch den optischen Bandabstand und die Transporteigenschaften der Absorbermaterialien in den einzelnen Bereichen bestimmt. Hierzu nimmt sowohl der optische Bandabstand als auch das Produkt aus Beweglichkeit und Lebensdauer der Ladungsträger von der p- zur n-Schicht ab. Der Vorteil einer pin-Struktur liegt in der Kompatibilität zur CMOS-Technologie, da lediglich Betriebsspannungen einer Polarität zur Verfügung stehen müssen, um den Sensor auszulesen. So arbeitet sowohl eine CMOS-Schaltung als auch der Sensor mit unipolaren Betriebsspannungen.

Voraussetzung für die Generation der spannungsabhängigen spektralen Empfindlichkeit ist die lineare Unabhängigkeit der spektralen Verläufe. Hierzu wurden intensive Untersuchungen durchgeführt. Verbessern läßt sich die lineare Unabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit, indem der elektrische Feldverlauf innerhalb des Bauelementes maßgeblich durch das extern angelegte Feld und nicht durch Umladungsvorgänge im Bauelement bestimmt wird. Weiterhin läßt sich die lineare Unabhängigkeit von Bauelementen auf der Basis einer Zweipol-Anordnung verbessern, indem der Unterschied des $\mu\tau$ -Produktes in den einzelnen Bereichen des Absorbers möglichst groß ist.

Darüber hinaus wurden Sensoren entwickelt, die parallel ausgelesen werden können, indem mehrere Sensoren übereinander integriert wurden. Dies erlaubt die gezielte Optimierung der Bauelemente unter farbmtrischen Gesichtspunkten. So wurde ein 3-Kanal-Sensor ausgehend von einer Vierpol-Anordnung entwickelt der es erlaubt, die Farbinformation parallel auszulesen. Basierend auf der Vierpol-Anordnung, wie sie auch für den 3-Kanal-Sensor eingesetzt wurde, ist ebenfalls ein 6-Kanal-Sensor entwickelt worden. Dieser Sensor erlaubt mit zwei Auslesevorgängen die Generation von 6 linear unabhängigen Verläufen der spektralen Empfindlichkeit. Hierzu wurden die amorphen Dioden zwischen den Kontaktschichten gegen pinip-Strukturen ausgetauscht. Der für dieses Bauelement ermittelte Normfarbabstand liegt bei $\Delta E_{ab} \leq 1$. Damit konnte der Metameriefehler des Bauelements unter die Wahrnehmungsgrenze des Menschen gesenkt werden. Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit des Sensors wurden die transparenten Kontaktschichten des Bauelements texturiert. Somit können Schichtdickeninterferenzen, insbesondere für größere Wellenlängen unterdrückt werden. Um den Nachteil zweier Auslesevorgänge bei gleichzeitig guter Farbtrennung zu umgehen, wurde ein 4-Kanal-Sensor entwickelt. Er generiert vier Verläufe der spektralen Empfindlichkeit bei einem Auslesevorgang. So erreicht dieser Sensor die Akzeptanzgrenze des Normfarbabstandes von $\Delta E_{ab} = 3$.

Somit liegen unterschiedliche Konzepte für Dünnschichtsensoren zur Farberkennung vor. Diese lassen sich kostengünstig mit amorphen/mikrokristallinen Dünnschicht-Technologien herstellen. Unter Anwendung von optischen Simulationswerkzeugen und unter Nutzung der farbmtrischen Analyse lassen sich die Sensoren anwendungsspezifisch entwickeln und realisieren. Ziel weiterer Arbeiten muß die Umsetzung der hier entwickelten Sensoren in ein vollständiges Sensorsystem sein, das neben dem eigentlichen Sensor die Verarbeitungselektronik enthält. Aus heutiger Sicht erscheinen die gestapelten Sensoren als die am vielversprechendsten Strukturen für eine solche Umsetzung.

Ziel weiterer Arbeiten muß es sein die spektrale Empfindlichkeit des Sensors an die Empfindlichkeiten des farbmtrischen Standardbeobachters anzupassen. Weiterhin sollte versucht werden zur Reduktion der lichtinduzierten Alterung auf den Einbau von kohlenstofflegierten Materialien zu verzichten und diese zugunsten von Niedertemperaturmaterialien, welche bei hoher Wasserstoffverdünnung abgeschieden werden,

zu ersetzen. Weiterhin müssen die Untersuchungen zur Dynamik insbesondere von sehr dünnen Dioden weiter fortgesetzt werden. Diese Untersuchungen sind für die Optimierung der Dynamik der Top-Diode eines gestapelten Sensors notwendig. Vor allem muß aber die Kombination des eigentlichen Detektors mit einer kristallinen Ausleseschaltung im Mittelpunkt weiterer Arbeiten stehen.

Anhang A

Pixelschaltungen

In diesem Teil der Arbeit wird auf unterschiedliche Pixelschaltungen eingegangen, die im Zusammenhang mit den entwickelten Sensoren eingesetzt werden können. In Kapitel A.1 wird auf einen Passive-Pixel-Sensor (PPS) eingegangen, der als Integrations-Sensor eingesetzt wird. Ein solcher Sensor findet vorrangig dort seine Anwendung, wo sowohl die Ausleseelektronik als auch der eigentliche Detektor in Dünnschichttechnologie hergestellt werden. In Kapitel A.2 wird dann auf eine Pixelschaltung für Zweipol-Bauelemente, die mehr als einen Verlauf der spektralen Empfindlichkeit generieren, eingegangen. Die spektrale Empfindlichkeit wird also als Funktion der angelegten Spannung generiert. Mögliche Sensoren, die gemeinsam mit einer solchen Pixelschaltung eingesetzt werden können, sind nipiin- (Kapitel 4), piinip- (Kapitel 5) und pin-Sensoren, deren Absorberschicht dreigeteilt (Kapitel 6) ist. Eine mögliche Pixelschaltung für einen gestapelten Sensor wird in Anhang A.3 vorgestellt.

A.1 Passive-Pixel-Sensoren

In Abb. A.1 ist das Ersatzschaltbild eines zweidimensionalen Sensorarrays dargestellt. Bei der Schaltung handelt es sich um einen Passive-Pixel-Sensor (PPS, Kapitel 3.2.2). Eine solche Pixelschaltung wird eingesetzt für Dünnschicht-Sensorarrays aus amorphem Silizium. Die Kathode der Photodiode ist in Abb. A.1 mit der Biasleitung verbunden, wohingegen die Anode am Source-Anschluß des Dünnschichttransistors anliegt. Lediglich während der Integrationsphase wird der Transistor durchgeschaltet und die Ladung, die in der Photodiode gespeichert ist, fließt über die Datenleitung auf den Kondensator C_f . Für jede Datenleitung existiert eine separate Ausleseschaltung, so daß jeweils immer eine ganze Zeile oder Spalte ausgelesen werden kann. Im gesperrten Zustand beträgt der Sperrstrom über den Transistor zwischen 10^{-14} und 10^{-12} A. Im durchgeschalteten Zustand steigt der Strom über den Transistor auf 10^{-6} bis 10^{-4} A an. Durch den Spannungspuls, welcher den Pixeltransistor durchschaltet, kommt es zu einer Entladung der Photodiode. Weiterhin kommt es zu einem Entladestrom, der durch das Produkt aus Widerstand und Kapazität der Gateleitung bestimmt wird.

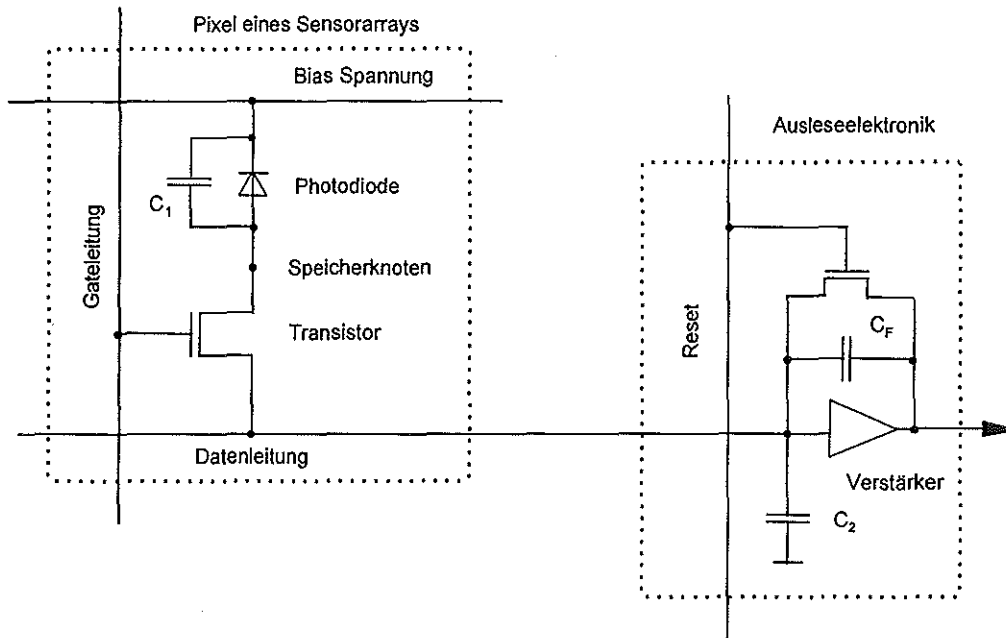


Abb. A.1: Prinzipielles Ersatzschaltbild eines Pixel eines Sensorarrays und dessen Ausleseelektronik in Anlehnung an Fujieda [Fujieda93].

Da die RC-Zeitkonstante des Transistors kleiner ist als die Zeitkonstante der Dioden, wird der Ladevorgang des Kondensators C_f erst gestartet, wenn der Entladevorgang der Gateleitung abgeschlossen ist. Somit beginnt die Integrationszeit (t_{int}) um die Zeit t_d verzögert. In dieser Zeit ist der Entladevorgang der Gateleitung, bestimmt durch das Produkt aus $R_G \cdot C_G$, beendet ($t_d \gg R_G \cdot C_G$). Zum Zeitpunkt t_d wird dann der Transistor parallel zum Kondensator C_f in Sperrbetrieb geschaltet. Es ergibt sich die folgende Beziehung für die transferierte Ladung:

$$Q = Q_0 \int_{t_d}^{t_d + t_{int}} e^{-\frac{t}{R_{on} C_1}} dt \quad \text{Gl. A.1}$$

Hierbei bezeichnet R_{on} den Durchgangswiderstand der Drain/Source-Strecke des Dünnschichttransistors. Q_0 ist gleich der transferierten Ladung zum Zeitpunkt $t = 0$. Diese wird bestimmt durch die Kapazität der Diode und die Beleuchtungsbedingungen. Der Transfer der Ladung von der Diode zum Kondensator C_f läuft in wenigen μs ab. In Abb. A. 1 ist noch die Kapazität C_2 dargestellt. Diese gibt die Eingangskapazität des Verstärkers an. Das bisher beschriebene Konzept zum Transfer der Ladung gilt für Schwarz/Weiß-Sensoren, aber auch für Farbsensoren, die mit optischen Filtern beschichtet sind.

A.2 Aktive-Pixel-Sensoren

Für Sensoren, die mehr als einen linear unabhängigen Verlauf der spektralen Empfindlichkeit generieren, ergibt sich ein gänzlich anderes Ausleseprinzip. In Abb. A.2 ist das prinzipielle Ersatzschaltbild für ein Pixel eines Sensorarrays auf der Basis eines Aktive-Pixel-Sensors (APS, Kapitel 3.2.2) dargestellt. In diesem Fall muß über den Photostrom des Detektors in der Pixelelektronik integriert werden. Im Gegensatz zum Detektionsprinzip in Abb. A.1 wird die Ladung, die durch die photogenerateden Ladungsträger erzeugt wird, nicht in der Diode gespeichert, sondern der Photostrom wird mit Hilfe eines kapazitiv gekoppelten Operationsverstärkers integriert und als Spannung, die proportional zur Intensität ist, an die Ausleseelektronik weitergegeben. Als mögliche Sensoren kommen Bauelemente in Betracht wie nipiin-, piinip- oder auch pin-Sensoren mit geteilter Absorberschicht. Im Gegensatz zu einem Passive-Pixel-Sensor, der je Pixel drei Zuleitungen besitzt, sind für einen Aktive-Pixel-Sensor 5 Zuleitungen erforderlich. So sorgen zwei Leitungen für die Stromversorgung des Operationsverstärkers, welcher das zentrale Element der Pixelelektronik ist. Eine weitere Leitung ist für die Spannungsversorgung jedes Pixels notwendig. Über diese Leitung, gemeinsam mit der U_{out} -Leitung, wird auch die integrierte Ladung an die Verarbeitungselektronik weitergegeben. Ausgelesen wird das Signal aber nur dann, wenn der Transistor am Ausgang des Operationsverstärkers durchgeschaltet ist. Weiterhin existiert neben den bereits genannten 5 Zuleitungen noch ein für alle Pixel gemeinsamer Frontkontakt.

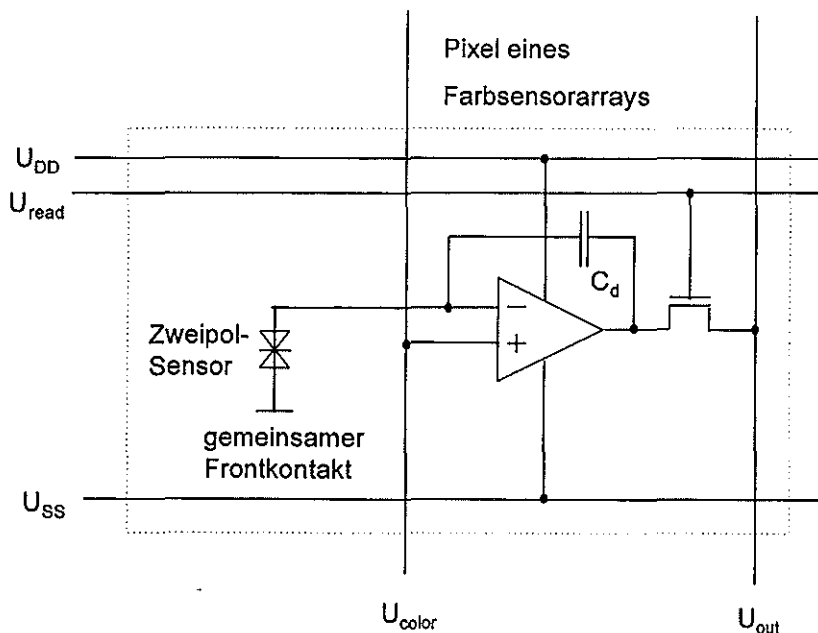


Abb. A.2: Prinzipielles Ersatzschaltbild eines Pixels eines Sensorarrays für einen Zweipol-Sensor in Anlehnung an Schulte [Schulte92].

A.3 Der 3-Kanal-Sensor

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Anhang A.1 und A.2 liegen eine Schaltung für einen Passive-Pixel-Sensors (PPS) und einen Aktive-Pixel-Sensors (APS) vor. Hierbei wurde der PPS als Integrations- und der APS als Nichtintegrations-Sensor betrieben. Geht man nun zu einem 3-Kanal-Sensor über wie er in Kapitel 7.1 vorgestellt wurde, so läßt sich dieser Sensor als Integrations-Sensor betreiben. Aufgrund der Tatsache, daß die drei Dioden allerdings antiseriell verbunden sind, läßt sich das Konzept aus Anhang A.1 allerdings nicht ohne Modifikationen des Schichtsystems oder der Ausleseelektronik übertragen. Als mögliche Alternative bietet sich eine Schaltung in Anlehnung an Anhang A.2 an. Alle drei Operationsverstärker einer möglichen Pixelschaltung arbeiten in diesem Fall als Transimpedanzwandler, so daß der Photostrom direkt innerhalb eines Pixels integriert wird (Abb. A.3). Durch drei Datenleitungen kann dann das RGB-Signal direkt an eine Verarbeitungselektronik weitergeleitet werden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Leitungen steigt hierdurch lediglich um weitere zwei Leitungen. Als Alternative zu der Möglichkeit, die Farbe jeweils über eine Datenleitung für rot, grün und blau zur Weiterverarbeitung zu transferieren, können die Daten auch über eine Leitung transferiert werden. Entweder sieht man in diesem Fall drei Gateleitungen vor oder aber man integriert einen Multiplexer in jedes Pixel, der die Daten über eine Spannung überträgt.

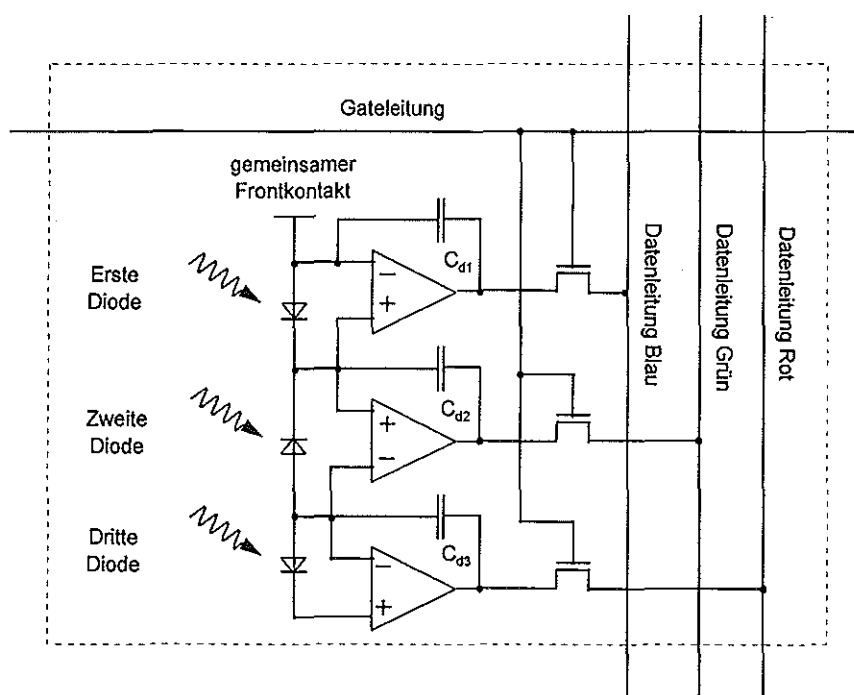


Abb. A.3: Schematische Darstellung einer Pixelschaltung für ein Vierpol-Bauelement unter Anwendung von Transimpedanzwandlern.

Literaturverzeichnis

- [Akiyama91] K. Akiyama, A. Takimoto, M. Miyauchi, Y. Kuratomi, J. Asayama, H. Ogawa, An new optical neuron for all-optical neural networks, Jap. J. Appl. Phys. Vol. **30**, 3887 (1991).
- [Akiyama93] K. Akiyama, A. Takimoto, A. Ogiwara, H. Ogawa, Hydrogenated amorphous silicon carbide photoreceptor for photoaddressed spatial light modulator, Jap. J. Appl. Phys. Vol. **32**, 590 (1993).
- [Aoyama96] T. Aoyama, K. Ogawa, Y. Mochizuki, N. Konishi, Inverse staggered poly-Si and amorphous Si double TFTs for LCD panels with peripheral driver circuits integration, Trans. Electron Dev. Vol. **43** No. 5, 701 (1996).
- [Barbier93] P.R. Barbier, G. Model, An synchronous image subtracting optically addressed spatial light modulator, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **297**, 993 (1993).
- [Baronti98] S. Baronti, A. Casini, F. Lotti, S. Porcinai, Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis, App. Optics, Vol. **37** No. 8, 1299 (1998).
- [Becker94] F. Becker, Ladungsträgertransport- und Rekombinationsuntersuchungen an pin-Dioden aus amorphem Silizium (a-Si:H) in Vorwärtsbetrieb, Dissertation, Universität Düsseldorf (1994).
- [Berkel93] C. van Berkel, M.J. Powell, A.R. Franklin, I.D. French, Quality factor in a-Si:H nip and pin diodes, J. Appl. Phys. **73** No. 10, 5264 (1993).
- [Berkel94] C. van Berkel, A-Si:H diodes for active matrix addressing, Opto electronics, Devices and Technologies, Vol. **9**, No. 3, 323 (1994).
- [Blecher95] F. Blecher, Charakterisierung der Pixelkopplung von Detektoren eines Farbsensorarrays, Diplomarbeit, Universität Siegen (1995).
- [Böhm98] M. Böhm, F. Blecher, A. Eckhardt, K. Seidel, B. Schneider, J. Sterzel, S. Benthien, H. Keller, T. Lule, R. Rieve, M. Sommer, B. van Uffel, F. Librecht, R.C. Lind, L. Humm, U. Efron, E. Roth, Image sensors in TFA technology - Status and trends, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (1998) in print.
- [Boyle70] W.S. Boyle, G.E. Smith, Bell Systems Technical Journal **49**, 587 (1970)

- [Brüggemann93a] R. Brüggemann, Modellierung von Photoleitung in amorphen Halbleitern und pin-Strukturen, Dissertation, Philips-Universität Marburg (1993).
- [Brüggemann93b] R. Brüggemann, C. Main, G.H. Bauer, Some aspects of the hole in the transient response of a-Si:H-diodes, *J. Non. Cryst. Solids* **164-166**, 459 (1991).
- [Caputo95] D. Caputo, G. de Cesare, F. Irrera, F. Lemmi, G. Masini, F. Palma, M. Tucci, Bias controlled amorphous Si/SiC:H photodiodes, *Sol. Stat. Phen.*, Vol. **44-46**, 943 (1995).
- [Caputo96] D. Caputo, F. Irrera, F. Palma, S. Rachele, M. Tucci, Amorphous silicon optical spectrum analyzer for visible range, *J. Non-Cryst. Solids* **198-200**, 1172 (1996).
- [Carius97] R. Carius, F. Finger, U. Backhausen, M. Luysberg, P. Hapke, L. Houben, M. Otte, H. Overhof, Electronic properties of micro-crystalline silicon, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **467**, 283 (1997).
- [Carlson76] D.E. Carlson, C.R. Wronski, *Appl. Phys. Lett.* **28**, 671 (1976).
- [Cesare94] G. de Cesare, F. Irrera, F. Lemmi, F. Palma, M. Tucci, A-Si:H/a-SiC:H heterostructure for bias-controlled photodetectors, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **336**, 885 (1994).
- [Cesare95] G. de Cesare, F. Irrera, F. Lemmi, F. Palma, Tunable photodetectors on amorphous Si/SiC heterostructures, *IEEE Trans Electron Devices* Vol. **42**, No. 5, 835 (1995).
- [Chang87] K.C. Chang, C.-Y. Chang, Y.K. Fang, S.C. Jwo, The amorphous Si/SiC heterojunction color-sensitive phototransistor, *IEEE, Electron Device Lett.* Vol. **8** No. 2 (64) 1987.
- [Chen96] S. Chen, I.C. Hsieh, Polysilicon TFT technology will solve problems of mobility, pixel size, cost and yield, *Solid State Technology*, **1**, 113 (1996).
- [Clough95] F.J. Clough, W.I. Milne, Amorphous silicon technology for the hardware implementation of artificial neural networks, *Sol. State Phen.* Vol **44-46**, 983 (1995).
- [D'Luna91] L.J. D'Luna, K.A. Parulski, A systems approach to custom VSLI for a digital color imaging system, *IEEE Solid-State circuits*, Vol. **26**, No. 5 (1991).
- [Edelman97] F. Edelman, R. Brener, C. Cytermann, R. Weil, C. Beneking, W. Beyer, W. Skrupa, R. Yankov, P. Werner, Al/ZnO/a-SiGe:H: A system protected by the ZnO buffer from metal-induced crystallization, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **467**, 741 (1997).
- [Engelhardt93] K. Engelhardt, P. Seitz, Optimum color filters for CCD digital cameras, *Applied Optics*, Vol. **32**, No. 16, 3015 (1993).
- [Fang91] Y.K. Fang, S.B. Hwqang, Y.W. Chen, L.C. Kuo, A vertical-type a-Si:H back-to-back schottky diode for high speed color image sensor, *IEEE*

- Electron Device Lett., Vol. 12, No. 4, 172 (1991).
- [Finger97] F. Finger R. Carius, P. Hapke, L. Houben, M. Luysberg, M. Tzolov, Growth and structure of microcrystalline silicon prepared with glow discharge at various plasma excitation frequencies, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 452, 725 (1997).
- [Fölsch95] J. Fölsch, Amorphe Silizium-Kohlenstoff-Filme für Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von Silylmethan, Dissertation Universität Stuttgart, 1995.
- [Frey86] H. Frey, G. Kienel, Dünnschicht Technologie, VDI-Verlag (1986).
- [Fujieda93] I. Fujieda, R.A. Street, R.L. Weisfield, S. Nelson, R. Nysten, V. Perez-Mendez, G. Cho, High sensitivity readout of 2D a-Si image sensors, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32, 198 (1993).
- [Giehl96] J. Giehl, Charakterisierung und analytische Modellierung von nipin-Farbsensoren auf der Basis von amorphem Silizium, Dissertation, Universität Siegen (1996).
- [Glassner95] A.S. Glassner, Principles of digital image synthesis, Band 1 & 2, Morgan Kaufmann Publishers, Inc. (1995).
- [Goetz96] M. Goetz, H. Keppner, P. Pernet, W. Hotz, A. Shah, Contamination problems of amorphous silicon nip solar cells on metal substrates, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 426, 89 (1996).
- [Hack93] M. Hack, P. Mei, R. Lujan, A.G. Lewis, Integrated conventional and laser re-crystallized amorphous silicon thin film transistor for large area imaging and display application, J. Non-Cryst. Solids 164-166 727 (1993).
- [Hapke95] P. Hapke, VHF-Plasmaabscheidung von mikrokristallinem Silizium ($\mu\text{c-Si:H}$): Einfluß der Plasmaanregungsfrequenz auf die strukturellen und elektrischen Eigenschaften, Dissertation RWTH Aachen (1995).
- [Haque94] M.S. Haque, H. A. Naseem, W.D. Brown, Interaction of aluminium with hydrogenated amorphous silicon at low temperatures, J. Appl. Phys. 75 (8), 3928 (1994).
- [Harder98] N. Harder, Elektrischer Transport in dotierten und undotierten mikrokristallinen Siliziumschichten, Diplomarbeit, Universität Leipzig (1998).
- [Hecht87] E. Hecht, Optics, Addison Wesley (1987).
- [Helmholtz62] H. von Helmholtz, Helmholtz's Treatise on physiological optics, J.P.C. Southall (ed.) Dover, New York, 1962/27.
- [Herzog98] P. Herzog, persönliche Mitteilung, 1998.
- [Herzog99] P. Herzog, D. Knipp, H. Stiebig, F. König, Characterization of novel three and six channel color moiré free sensors, Proc. SPIE 3648 (1999) in print.
- [Hill98] B. Hill, Multispectral color technology: a way toward high-definition

- color image scanning and encoding, Proc. SPIE 3049, 2 (1998).
- [Hoheisel98] M. Hoheisel, M. Argues, J. Chabbal, C. Chaussat, T. Ducourant, L. Fritsch, G. Hahm, H. Horbaschek, J. Michailos, R. Schulz, M. Spahn, V. Spinnler, G. Vieux, Amorphous silicon x-ray detectors, J. Non-Cryst. Solids. **227-230**, 1300 (1998).
- [Höhne97] N. Höhne, Photothermische Deflexions-Spektroskopie als Charakterisierungsmethode für Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von amorphem Silizium, Diplomarbeit, RWTH Aachen (1997).
- [Höhne98] N. Höhne, R. Carius, H. Wagner, Spectral response and loss mechanisms in amorphous silicon solar cells determined by photothermal deflection spectroscopy, Mat. Res. Soc. Symp. (1998) in print.
- [Hwang93] S.-B. Hwang, Y.K. Fang, K.-H. Chen, C.-R. Liu, J.-D. Hwang, M.-H. Chou, An a-Si:H/a-Si,Ge: bulk barrier phototransistor with a-SiC:H barrier enhancement layer for high-gain, IR optical detector, IEEE, Trans. Electron Devices Vol. **40**, No. 4, 721 (1993).
- [Jackson90] W.B. Jackson, Role of band-tail carriers in metastable defect formation and annealing in hydrogenated silicon, Phys. Rev. B, **41**, 1059 (1990).
- [Kaneko91] T. Kaneko, Y. Hosokawa, M. Tadauchi, Y. Kita, H. Andoh, 400dpi integrated contact type linear image sensors with poly-Si TFT's analog readout circuits and dynamic shift register, IEEE Trans Electron Devices Vol. **38**, No. 5 (1991).
- [Kanicki91] J. Kanicki, Amorphous and microcrystalline semiconductor devices: Optoelectronic devices, Artech House (1991).
- [Kempainen97] S. Kempainen, CMOS image sensors: Eclipsing CCDs in visual information, EDN Europe, 101 (1997).
- [Keppner97] H. Keppner, P. Torres, J. Meier, R. Platz, D. Fischer, U. Kroll, S. Dubail, J.A. Anna Selvan, N. Pellaton Vaucher, Y. Ziegler, R. Tschanner, Ch. Hof, N. Beck, M. Goetz, P. Pernet, M. Goerlitzer, N. Wyrsh, J. Veuille, J. Cuperus, A. Shah, J. Pohl, The „micromorph“ cell: A new way to high-efficiency-low-temperature crystalline silicon thin-film cell manufacturing?, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **452**, 865 (1997).
- [Keusen96a] T. Keusen, Multispektrale Farbanalyse, Dissertation, RWTH Aachen (1997).
- [Keusen96b] T. Keusen, Multispectral color system with an encoding format compatible with the conventional tristimulus model, Journal of Imaging science and technology, Vol. **40** No. 6, 510 (1996).
- [Klement97] U. Klement, D. Horst, F. Ernst, Microstructure of thin film photoconductors and its correlation with optical and electrical properties, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **452**, 925 (1997).

- [Kluth97] O. Kluth, A. Löffl, S. Wieder, C. Beneking, L. Houben, B. Rech, H. Wagner, S. Hoffmann, R. Waser, J. A. Selvan, H. Keppner, Texture etched Al-doped ZnO: A new material for enhanced light trapping in thin film solar cells, Proc. 26th IEEE PVSEC, 715 (1997).
- [Knipp95] D. Knipp, Transienter Bias-Response von Dünnschicht-Farbsensoren auf der Basis von amorphem hydrogenierten Silicium, Diplomarbeit, Universität Siegen (1995).
- [Knipp97] D. Knipp, H. Stiebig, J. Fölsch, R. Carius, H. Wagner, Improved concept for nipiin and piin color sensitive two-terminal devices with high linearity, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **467**, 931 (1997).
- [Knipp98a] D. Knipp, H. Stiebig, J. Fölsch, F. Finger, H. Wagner, Amorphous silicon based nipiin structure for color detection, J. Appl. Phys. Vol. **83**, No. 3, 1463 (1998).
- [Knipp98b] D. Knipp, H. Stiebig, O. Kluth, H. Wagner, Novel three dimensionally integrated thin film detector for digital signal processing, Material Science Forum Vols. **287-288**, 205, Trans. Tech. Pub. (1998).
- [Knipp98c] D. Knipp, H. Stiebig, B. Rech, H. Wagner, Low cost approach to realize novel detectors for color recognition, Proc. International Congress on Imaging Science (ICPS), Vol. 2, 350 (1998).
- [Kobayashi91] H. Kobayashi, J.L. White, A.A. Abidi, An active resistor network for gaussian filtering of images, IEEE Journal Solid-State-Circuits, Vol **26**, No. 5, 738 (1991).
- [Kramer93] J. Kramer, Photo-ASICs: Integrated optical meterology systems with industrial CMOS technology, Dissertation ETH Zürich, Schweiz (1993).
- [Löffl97] A. Löffl, S. Wieder, B. Rech, O. Kluth, C. Beneking, H. Wagner, Al-doped ZnO films for thin-film solar cells with very low sheet resistance and controlled texture, Proc. 14th European Photovoltaic Conference 2089 (1997).
- [Luft93] W. Luft, Y. Tsuo, Hydrogenated amorphous silicon alloy deposition processes, marcel Decker, Inc. (1993).
- [Lundszien96] D. Lundszien, Entwicklung von amorphen Silizium-Germanium-Legierungen für Stapelsolarzellen, Diplomarbeit, RWTH Aachen (1996).
- [McClellan98] McClellan, Schafer, Yoder, Digital Signal Processing: A multi media approach, Prentice Hall, New Jersey, Prentice Hall (1998).
- [Mahowald89] M.A Mahowald, C.A. Mead, Silicon Retina, Analog VLSI and Neural Systems, Addison-Wesley (1989).
- [Manabe91] S. Manabe, Y. Mastunaga, A. Furukawa, K. Yano, Y. Endo, R. Miyagawa, Y. Iida, Y. Egawa, H. Shibata, H. Hidetosi, N. Sakuma, N. Harada, A 2-million-pixel CCD image sensor overlaid with an amorphous silicon photoconversion layer, IEEE Trans. Electron

- Devices, Vol. 8, 8, 1765 (1991).
- [Mandl99] W.J. Mandl, Visible light imaging sensor with A/D conversion at the pixel, Proc. SPIE 3649 in print (1999).
- [Mead85] C.A. Mead, A sensitive electronic photoreceptor, Proc. Chapel Hill Conference on Very Large Scale Integration, Computer Science Press, 463 (1985).
- [Meer94] M. Meer, Beschreibung der optischen Eigenschaften einer Multilayerstruktur auf Basis a-Si:H für Anwendungen in Solarzellen und optischen Sensoren, Studienarbeit, Universität Siegen (1994).
- [Meer95] M. Meer, Optische Charakterisierung von Bauelementen aus amorphem Silizium, Diplomarbeit, Universität Siegen (1995).
- [Mei94] P. Mei, J.B. Boyce, M. Hack, R. Lujan, S.E. Ready, D.F. Fork, R.I. Johnson, G.B. Anderson, Grain growth in laser dehydrogenated and crystallized polycrystalline silicon for thin film transistors, J. Appl. Phys. **76** (5), 3194 (1994).
- [Meier96] J. Meier, P. Torres, R. Platz, S. Dubail, U. Kroll, J.A. Selvan, N. Pellaton, Vaucher, Ch. Hof, D. Fischer, H. Keppner, A. Shah, K.-D. Ufert, P. Giannoules, On the way towards high efficiency thin film silicon solar cells by „Micromorph“ concept, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **420**, 3 (1996).
- [Meynants98] G. Meynants, B. Dierickx, D. Scheffer, J. Vlummens, A wide range CMOS stereo camera, Proc. Advanced Microsystems for Automotive Applications 98, Berlin, Germany, 173 (1998).
- [Nebel89] C.E. Nebel, G.H. Bauer, Tail state distribution and trapping probability in a-Si:H investigated by time-of-flight experiments and computer simulations, Phil. Mag. **59**, 463 (1989).
- [Nicholls95] J.G. Nicholls, A.R. Martin, B.G. Wallace, Vom Neuron zum Gehirn, Gustav Fischer Verlag (1995).
- [Ogiers97] W. Ogiers, Survey of CMOS imagers, IMEC report P60280-MS-RP002 (1997).
- [Okamura94] M. Okamura, K. Kimura, S. Shirai, N. Yamauchi, A light-transmitting two-dimensional photodetector array using a-Si:H pin photodiodes and poly-Si TFT's integrated on a transparent substrate, IEEE Trans Electron Devices, Vol. **41**, No. 2, 180 (1994).
- [Otte97] M. Otte, Modellierung der Transporteigenschaften von hydrogeniertem mikrokristallinem Silizium, Dissertation, Universität Paderborn (1997).
- [Parkkinen89] J. Parkkinen, J. Hallkanien, T. Jaaskelainen, Characteristic spectra of munsell colors, Journal of the optical society of America A **6**, 318 (1989).
- [Poenar97] D.P. Poenar, R.F. Wolffenbuttel, Thin-film optical sensors with silicon compatible materials, Applied Optics, Vol **36**, No.21, 5109 (1997).

- [Powell92] M.J. Powell, I.D. French, J. R. Hughes, N.C. Bird, O. S. Davies, C. Glasse, J. E. Curran, Amorphous silicon image sensor arrays, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **258**, 1127 (1992).
- [Powell93] M.J. Powell, S.C. Deane, *Phys. Rev. B* **70**, 10815 (1993).
- [Rech96b] B. Rech, Solarzellen aus amorphem Silizium mit hohem stabilem Wirkungsgrad, Dissertation, RWTH-Aachen (1996).
- [Rech97] B. Rech, S. Wieder, C. Beneking, A. Löffl, O. Kluth, W. Reetz, H. Wagner, Texture etched ZnO:Al films as front contact and back reflector in amorphous silicon pin and nip solar cells, *Proc. of 26th IEEE PVSEC*, 619 (1997).
- [Redfield90] D. Redfield, R.H. Bube, Identification of defects in amorphous silicon, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 464 (1990).
- [Reider97] G.A. Reider, *Photonik - Eine Einführung in die Grundlagen*, Springer Verlag (1997).
- [Rieve96] P. Rieve, J. Giehl, Q. Zhu, M. Böhm, A-Si:H photo diode with variable spectral sensitivity, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **420**, 135 (1996).
- [Rossi95] M.C. Rossi, R. Vincenzoni, F. Galluzzi, n^+ -SnO₂/a-SiC:H/metal thin film photodiodes with voltage-controlled spectral sensitivity, *IEEE Trans Electron Devices*, Vol. **42**, No. 12, 2062 (1995).
- [Rössinger97] S. Rössinger, Experimentelle Untersuchung der optoelektronischen Kopplung zwischen einzelnen Detektoren von farbselektiven Photodiodenarrays, Diplomarbeit, Universität Köln (1997).
- [Sangster69] F.L.J. Sangster, K. Teer, *IEEE Journal Solid-State Circuits* **4**, 131 (1969).
- [Santos91a] P.V. Santos, W.B. Jackson, R.A. Street, An alternative model for the kinetic of light-induced defects in a-Si:H, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **15** (1991).
- [Santos91b] P.V. Santos, W.B. Jackson, A weak bond/dangling bond conversion model for light-induced defects in a-Si:H, *J. Non Cryst. Solids* **137&138**, 203 (1991).
- [Schmidt95] R.F. Schmidt, *Neuro- und Sinnesphysiologie*, Springer Verlag, 2. Auflage (1995).
- [Schneider97] B. Schneider, H. Fischer, S. Benthien, H. Keller, T. Lue, P. Rieve, M. Sommer, J. Schulte, M. Böhm, From the one transistor cell to a locally adaptive high dynamic range sensor, *Tech. Digest IEDM 97*, 209 (1997).
- [Schneider98] B. Schneider, P. Rieve, M. Böhm, Image sensors in TFA (Thin Film on ASIC) Technology, *Handbook of Computer Vision and Applications*, Academic Press, Boston (1998), in print.
- [Schulte92] J. Schulte, H. Fischer, Q. Zhu, J. Giehl, H. Stiebig, M. Böhm, A-Si:H on ASIC - A new approach to intelligent image sensing, *Micro System*

- Technologies 92, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 265 (1992).
- [Schulte96] J. Schulte, Intelligente Bildsensoren in TFA-Technologie am Beispiel eines Äquidensitenextraktors, Dissertation, Universität Siegen, 1996.
- [Schumm91] G. Schumm, G.H. Bauer, Equilibrium and non-equilibrium gap state distribution in a-Si:H, *J. Non-Cryst. Solids* **137&138**, 315 (1991).
- [Seitz93] P. Seitz, D. Leipold, J. Kramer, J.M. Raynor, Smart optical and image sensors fabricated with industrial CMOS/CCD semiconductor processes, *SPIE*, Vol. **1900**, 21 (1993).
- [Shapiro88] F.R. Shapiro, Y. Bar-Yam, Microscopic transient simulation of semiconductors and insulators, *J. Appl. Phys.* **64**, 2185 (1998).
- [Shapiro89] F.R. Shapiro, Y. Bar-Yam, M. Silver, Interpretation of transient currents in amorphous silicon hybriide pin and nin devices, *IEEE Trans. Electron Devices* **36**, 2785 (1989).
- [Silver86] M. Silver, D. Adler, M.P. Shaw, V. Cannella, Transport and the electronic structure in hydrogenated amorphous silicon, *Phil. Mag. Let.* **41**, 935 (1986).
- [Spear76] W.E. Spear, P.G. LeComber, *Phil. Mag.* **33**, 935 (1976).
- [Staebler77] D.L. Staebler, C.R. Wronski, Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 292 (1977).
- [Stannowski97] B. Stannowski, Transiente Photoströme in amorphen Dünnschicht-Halbleitern: Experiment und Simulation an pin-Solarzellen, Diplomarbeit, RWTH Aachen (1997).
- [Stannowski99] B. Stannowski, H. Stiebig, D. Knipp, H. Wagner, Transient photocurrent of three-color detectors based on amorphous silicon, *J. Appl. Phys.* (1999) in print.
- [Sterzel96] J. Sterzel, Charakterisierung von Detektoren aus amorphem Silizium mit einem verbesserten transienten Meßplatz, Diplomarbeit, Universität Siegen (1996).
- [Stiebig93] H. Stiebig, M. Böhm, Simulation of a-Si:H color sensors for application in intelligent sensor systems, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **297**, 963 (1993).
- [Stiebig94] H. Stiebig, A. Kreisel, K. Winz, M. Meer, N. Schultz, Th. Eickhoff, H. Wagner, Spectral response modelling of a-Si:H solar cells using accurate light absorption profiles, *Proc. First World Conference on Photovolataic Energy Conversion (WCPEC)*, 603 (1994).
- [Stiebig95a] H. Stiebig, F. Siebke, Improved analysis of the constant photocurrent method, *Phil. Mag. B*, **72**, 489 (1995).
- [Stiebig95b] H. Stiebig, J. Giehl, D. Knipp, P. Rieve, M. Böhm, Amorphous silicon three color detector, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **377**, 815 (1995).

- [Stiebig96a] H. Stiebig, F. Finger, T. Kulesa, F. Fölsch, F. Finger, H. Wagner, Transient photocurrent response of a-Si:H based three color nipin detector, *Non-Cryst. Solids* **198-200**, 1185 (1996).
- [Stiebig96b] H. Stiebig, D. Knipp, J. Fölsch, F. Finger, H. Wagner, Optimized three-color detector based on a-SiGe:H heterojunctions, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **420**, 153 (1996).
- [Stiebig96c] H. Stiebig, D. Knipp, J. Fölsch, F. Finger, H. Wagner, Novel multi spectral detectors based on a-Si:H thin film technology, *Kongreßband Opto 96*, Leipzig, Germany (1996) 19
- [Stiebig97a] H. Stiebig, M. Thönissen, M. Krüger, D. Knipp, G. Lerondel, H. Wagner, H. Lüth, *Optosensorik auf der Basis von amorphem und porösem Silizium, tm-Technisches Messen*, R. Oldenburg Verlag, Nr. 4, 136 (1997).
- [Stiebig97b] H. Stiebig, *Entwicklung und Beschreibung von optoelektronischen Bauelementen auf der Basis amorphem Siliziums*, Dissertation, RWTH-Aachen (1997).
- [Stiebig97c] H. Stiebig, D. Knipp, J. Fölsch, H. Wagner, DE: P 197 37 561.8 (21.08.97)
- [Stiebig98] H. Stiebig, D. Knipp, J. Zimmer, H. Wagner, Transient behavior of optimized nipiin three color detector, *IEEE Trans. Electron Device* Vol. **45** No. 7, 1438 (1998).
- [Stiles59] W.S. Stiles, J.M. Burch, NPL colour-matching investigation: Final report. *Optica Acta*, **6**, 1 (1959).
- [Street91a] R.A. Street, *Hydrogenated amorphous silicon*, Cambride University Press (1991).
- [Street91b] R.A. Street, M. Hack, Saturation and recovery kinetics of current -induced defects in a-Si:H, *J. Non-Cryst. Solids* **137&138**, 263 (1991).
- [Street92] R.A. Street, M. Hack, Transient forward bias response of amorphous silicon pin diodes, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **258**, 837 (1992).
- [Street93] R.A. Street, R. Weisfield, S. Nelson, P. Nylen, X. D. Wu, Page sized a-Si:H 2 dimensional imaging arrays, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **297**, 957 (1993).
- [Street95] R.A. Street, X. D. Wu, R. Weisfield, S. Ready, R. Apte, M. Nguyen, P. Nylen, Two dimensional amorphous silicon image sensor arrays, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **377**, 757 (1995).
- [Street98] R.A. Street, R.B. Apte, T. Granberg, P. Mei, S.E. Ready, K. S. Shah, R.L. Weisfield, High performance amorphous silicon image sensor arrays, *J. Non-Cryst. Solids* **270-230**, 1306 (1998).
- [Strüder98] L. Strüder, C. von Zanthier, *Elektronische Bildwandlung*, *Phys. Bl.* **54** Nr. 6, 519 (1998).
- [Stutzmann85] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai, Light induced metastable defects in hydrogenated amorphous silicon: A systematic study, *Phys.*

- Rev. **B** 32, 23 (1985).
- [Stutzmann87] M. Stutzmann, Weak bond-dangling bond conversion in amorphous silicon, Phil. Mag. B, Vol 56, No. 1, 63 (1987).
- [Stutzmann91] M. Stutzmann, J. Nunnenkamp, M. S. Brandt, A. Asano, M.C. Rossi, Accelerated metastable defect creation in a-Si:H by short light pulses, J. Non-Cryst. Solids **137&138**, 231 (1991).
- [Stutzmann97] M. Stutzmann, Microscopic aspects of the Staebler-Wronski Effect, Mat, Res, Soc, Symp, Proc. **467**, 37 (1997).
- [Takeuchi88] R. Takeuchi, M.-Tsumura, M. Tadauchi, H. Shio, Color image scanner with an rgb linear image sensor, Journal of Imaging Technology, **14**, 68 (1988).
- [Tsai87] H.-K. Tsai, S.-C. Lee, W.-L. Lin, An amorphous SiC/Si Two-Color-Detector, IEEE Electron Device Lett. Vol. **8**, No. 8, 365 (1987).
- [Tsai88] H.-K. Tsai, S.-C. Lee, Amorphous SiC/Si three-color detector, Appl. Phys. Lett. **52** (4), 275 (1988).
- [Tsukada79] T. Tsukada, T. Baji, Y. Shimomoto, A. Sanano, Y. Tanaka, H. Mutsumura, Y. Takasaki, N. Koike, T. Akiyama, New solid-state image pick up devices using photosensitive chalogenide glass film, IEDM Tech. Dig. 134 (1979).
- [Tsukada81] T. Tsukada, Solid-state color image using a-Si:H photoconductive Film, IEDM Tech. Dig. 479 (1981).
- [Yadid-Pecht91] O. Yadid-Pecht, R. Ginosar, Y. Shacham Diamond, A random access photodiode array for intelligent image capture, IEEE Trans. Electron Device Vol. **38** No. 8, 1772 (1991).
- [Yamaguchi92] M. Yamaguchi, Y. Kaneko, K. Tsutsui, Two-dimensional contact image sensor using amorphous silicon photo-transistors, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. **32** 458 (1993).
- [Yamamoto97] K. Yamamoto, T. Suzuki, M. Yoshimi, A. Nakajima, Optical confinement effect for below 5µm thin film poly-Si solar cell on glass substrate, Jpn. J. Appl. Phys. Vol 36 Part 2 No. 5A, L569 (1997).
- [Yamamoto98] K. Yamamoto, M. Yoshimi, T. Suzuki, Y. Tawada, T. Okamoto, N. Nakakima, Thin film poly-Si solar cell on glass substrate fabricated at low temperature, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. in print (1998).
- [Yamauchi93] N. Yamauchi, R. Reif, Polycrystalline silicon thin films processed with silicon ion implantation and subsequent solid-phase crystallization: Theory, experiments and thin-film transistor application, J. Appl. Phys. **75** (7), 3235 (1994).
- [Yang92] L. Yang, L. Chen, S. Wiedemann, A. Catalano, Mat. Res. Soc. Proc. **283**, 463 (1992).
- [Yang94a] J. Yang, X. Xu, S. Guha, Stability studies of hydrogenated amorphous silicon alloy solar cells prepared with hydrogen dilution, Mat. Res. Soc.

- Symp. Proc. **336**, 687 (1994).
- [Yang94b] L. Yang, L.-F. Chen, The effect of H₂-Dilution on the stability of a-Si:H based solar cells, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **336**, 669 (1994).
- [Yang98] J. Yang, A. Banerje, K. Lord, S. Guha, Correlation of component with high efficiency amorphous silicon alloy triple-junction solar cells and modules, Proc. 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, (1998) in print.
- [Wang93] Q. Wang, E.A. Schiff, Y.-M. Li, Electron time-of-flight measurements in a-Si_{1-x}C_x:H, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **118**, 519 (1993).
- [Weisfield92] R.L. Weisfield, High performance input scanning arrays using amorphous silicon photodiodes and thin-film-transistors, Mat, Res, Soc, Symp, Proc. **258**, 1105 (1992).
- [Weisfield93] R.L. Weisfield, A-Si:H linear and 2-D image sensors, J. Non-Cryst. Solids **164&166**, 771 (1993).
- [Wieczorek87] H. Wieczorek, Transiente Photoleitung an optoelektronischen Bauelementen aus amorphem Silizium, Dissertation Philipps-Universität Marburg, 1987.
- [Wieczorek91] H. Wieczorek, Transient currents in a-Si:H diodes, J. Non-Cryst. Solids **137&138**, 1309 (1991).
- [Wieder96] S. Wieder, Zum Einfluß der intrinsischen Absorberschicht auf Eigenschaften und Stabilität von Solarzellen aus amorphem Silizium, Diplomarbeit, RWTH Aachen (1996).
- [Wilson89] R.G. Wilson, F.A. Stevie, C.W. Magee, Secondary Ion Mass Spectrometry: A practical handbook for depth profiling and bulk impurity analysis, Jon Wiley & Sons (1989).
- [Winer90] K. Winer, Phys. Rev. B **41**, 12150 (1990).
- [Winstel86] G. Winstel, C. Weyrich, Optoelektronik II, Springer Verlag, Berlin, 1986.
- [Wyrsh96] N. Wyrsh, N. Beck, C. Hof, M. Goerlitzer, A. Shah, Correlation between transport properties of a-Si:H layers and cell performances incorporating these layers, J. Non-Cryst. Solids **198-200**, 238 (1996).
- [Wyszecki82] G. Wyszecki, W.S. Stiles, Color Science, John Wiley & Sons, U.S.A. (1982).
- [Zhu94] Q. Zhu, H. Stiebig, P. Rieve, J. Giehl, M. Sommer, M. Böhm, New type of thin film color image sensor, Mat, Res, Soc, Symp, Proc. **336**, 843 (1994).
- [Zhu97] Q. Zhu, Entwicklung eines TFA-Farbbildsensors auf der Basis on a-Si(C):H Multispektraldetektoren, Dissertation, Universität Siegen (1997).
- [Zimmer98a] J. Zimmer, Investigation of the electronic transport in pin solar cells based on microcrystalline silicon by 2D numerical modelling, Mat, Res,

Soc, Symp, Proc. 1998, in print.

[Zimmer98b] J. Zimmer, H. Stiebig, H. Wagner, Study of electronic transport in pin solar cells based on microcrystalline silicon, Proc. 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, (1998) in print.

[Zimmer98c] J. Zimmer, H. Stiebig, H. Wagner, A-SiGe:H based solar cells with graded absorption layer, J. Appl. Phys. Vol. **84**, No. 1, 611 (1998).

[Zimmer99] J. Zimmer, Optoelektronisches Verhalten von Dünnschichtbauelementen aus amorphem und mikrokristallinem Silizium, Dissertation, TU München (1999).

Mein herzlicher Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Heribert Wagner, Leiter der Abteilung Photovoltaik des Forschungszentrums Jülich, für die Betreuung dieser Arbeit. Weiterhin danke ich ihm, daß er die Entwicklung der Arbeit mit großem Interesse verfolgte und mir große Freiheiten bei der Bearbeitung des Themas gelassen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hill, Direktor des Instituts für Technische Elektronik der RWTH Aachen, für sein Interesse an der Thematik dieser Arbeit und die Übernahme des Co-Referates.

in besonderer Weise Herrn Dr.-Ing. Helmut Stiebig für die Betreuung dieser Arbeit. Darüber hinaus danke ich ihm für seine Aufmunterungen und sein großes Interesse am Fortgang der Arbeit.

Herrn Jürgen Zimmer, meinem Mitdoktoranden während der letzten drei Jahre, für die gute Zusammenarbeit und die vielen konstruktiven Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. Patrick Herzog für seinen Einsatz, seine stete Diskussionsbereitschaft und die wesentliche Unterstützung während des letzten Jahres meiner Arbeit. Ohne seinen Beitrag wären die Ergebnisse in Kapitel 7 und 8 nicht möglich gewesen.

Herrn Bernd Stannowski für die Unterstützung der Sensoraktivität. Weiterhin danke ich ihm für die Überlassung von transienten Simulationsergebnissen.

Herrn Dr. Fiedhelm Finger für die Möglichkeit Depositionen an der 6-Kammer-PECVD-Anlage durchführen zu dürfen und seine hilfreichen Anregungen zur Deposition von amorphen und mikrokristallinen Siliziumschichten.

Herrn Dr.-Ing. Joachim Fölsch für die Einführung in die Alchimie der Dünnschichtdeposition und sein stetiges Interesse an der Sensoraktivität.

Herrn Dr. Reinhard Carius für seine Hilfs- und Diskussionsbereitschaft.

Herrn Wilfried Reetz für die Unterstützung während der Messung der spektralen Empfindlichkeit. Herrn Franz Birmans und Josef Klomfaß danke ich für ihre Unterstützung bei der Lösung technischer Probleme.

Dank

Herrn Dr.-Ing. Joachim Fölsch, Dr. Peter Hapke, Andreas Lambertz, Dietmar Lundszen und Herrn Oliver Vetterl für die Überlassung von Depositionsrezepten.

Herrn Andreas Lambertz und Herrn Johannes Wolff für die stetige Unterstützung an der Depositionsanlage.

Herrn Dr. Bernd Rech, Oliver Kluth, Anton Löffl und Frau Hilde Siekmann für ihre Unterstützung und die Bereitstellung von transparenten Zinkoxidschichten.

Herrn Franz-Josef Schroeteler, Franzl Ringelmann und Frau Mona Nonn für die Hilfe im Reinraum und für die Bereitstellung von Masken.

Herrn Mathias Krause für seine Unterstützung während des letzten Jahres und seinen großen Einsatz für die Sensoraktivität.

Herrn Uwe Zastrow für die Durchführung der SIMS-Messungen.

Frau Andrea Mülheims für ihre Hilfe im Verwaltungsdschungel des Forschungszentrums. Weiterhin danke ich Ihnen für die Durchsicht des Manuskripts.

Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Büchner für sein stetiges Interesse an unserer Aktivität und die Anregung zu neuen Anwendungsfeldern.

Herrn Dr. Mostafa Ahmed für seine Unterstützung, nicht nur während der Zeit meines Aufenthalts in Ägypten.

meinen Eltern und meiner Schwester.

Allen, die mich in den letzten drei Jahren unterstützt haben.

Forschungszentrum Jülich



Jül-3684
August 1999
ISSN 0944-2952