

Abschlussbericht zum

Verbundprojekt: Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland - Module Quanten- und neuromorphes Computing - FMD-QNC –

AP1.3 – Neuromorphe Plattform auf Basis von RRAM auf 200 nm

Förderempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Peter Grünberg Institut, JARA Institut Energy Efficient Information Technology (PGI-10)

Förderkennzeichen: 16ME0833

Projektlaufzeit: 01.12.2022 bis 31.12.2025

Berichtszeitraum: 01.12.2022 bis 31.12.2025

Autoren: Dr. Vikas Rana und Prof. Dr. Regina Dittmann

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 KURZBERICHT

1. Ursprüngliche Aufgabenbeschreibung und wissenschaftlich-technischer Ausgangspunkt
2. Projektdurchführung
3. Wichtigste Ergebnisse

Teil 2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

1. Einleitung
2. Wissenschaftliche und technische Ergebnisse
3. Erreichung der Meilensteine
4. Übergang zum operativen Einsatz
5. Wesentliche Posten des Jahresabschlusses
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit
7. Publikationen
8. Zusammenfassung und Ausblick

TEIL I KURZBERICHT

1. Ursprüngliche Aufgabenbeschreibung und wissenschaftlich-technischer Ausgangspunkt

Ziel der FMD-Aktivitäten im Bereich Neuromorphes Computing (NC) ist eine leistungsoptimierte Entwicklung von dedizierter, neuromorpher Hardware, z. B. auf Basis von analogen oder mixed-signal-Schaltungsansätzen und/oder mit neuartigen Rechnerarchitekturen (in-memory-computing) als anwendungsoptimierte Schaltungen. Ein umfassendes Angebot für solche kundenspezifischen neuromorphen Schaltungen war zu Projektbeginn nicht bekannt. Für die Integration neuer Materialien für NC sind in erster Linie Lücken hinsichtlich der skalierbaren Abscheidung und Strukturierung dünner Funktionsmaterialien für 200 mm Wafer zu schließen, wodurch neue Materialien bzw. Materialvariation kundenspezifisch und damit hochgradig flexibel auf Bauteillevel evaluiert werden können. Damit war das Ziel des hier beschriebenen Arbeitspakets AP1.3 „Neuromorphe Plattform auf Basis von RRAM auf 200 mm“ eine industriekompatible Fertigungslinie für CMOS-integrierte neuromorphe Systeme der nächsten Generation aufzubauen, indem die bestehenden 200-mm-Wafer-Beschichtungsanlagen für die Integration von Resistive Random Access Memory (RRAM), auch bekannt als memristive Bauelemente, erweitert wurden. Diese Bauelemente sind Teil einer Schlüsseltechnologie für zukünftige neuromorphe Rechnerarchitekturen, bei denen Speicher- und Rechenfunktionen miteinander vereint werden können, um die Recheneffizienz und -leistung zu verbessern (Rechnen-im-Speicher). Dieses Arbeitspaket wurde gemeinsam von der IHP GmbH – Leibniz-Institut für Hochleistungsmikroelektronik/Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik und dem Forschungszentrum Jülich, Peter Grünberg Institut PGI-10, durchgeführt. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit war das Forschungszentrum Jülich für die Spezifikation, Beschaffung, Installation, Qualifizierung und Integration der erforderlichen Infrastruktur zur Dünnschichtabscheidung verantwortlich, einschließlich der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) von Metallen, der PVD von Metalloxiden und eines automatisierten Wafer-Handhabungssystems.

Bis zum Projektende wurde am Forschungszentrum Jülich eine voll funktionsfähige 200-mm-Wafer-Prozesslinie für die Backend-of-Line (BEOL)-Integration von RRAM-Materialstapeln eingerichtet. Diese Anlage bildet die technologische Grundlage für die Herstellung von CMOS-integrierten memristiven Bauelementen und stellt einen wichtigen Schritt in Richtung skalierbarer neuromorpher Hardwareplattformen und zukünftiger fortschrittlicher Halbleitersysteme dar.

2. Projektdurchführung

Zu Beginn des Projekts wurden die wissenschaftlichen und technischen Anforderungen an die drei zentralen Anlagekomponenten – nämlich Metall-PVD, Metalloxid-PVD und das 200-mm-Wafer-Handhabungssystem – definiert und in detaillierte technische Spezifikationen umgesetzt. Auf der Grundlage dieser Spezifikationen wurden die Anlagen nach einem Vergabeverfahren letztendlich bei den Herstellern FHR Anlagenbau GmbH (Metall- und Metalloxid-PVD-Systeme) und Adenso GmbH (Wafer-Handler) beschafft. Parallel zu den Beschaffungsmaßnahmen wurde die bestehende Gebäudeaufteilung zwischen Grauraum und Reinraum durch Wandversetzung angepasst, um die neuen Anlagen aufzunehmen. Dies umfasste Anpassungen an den Gebäudeanschlüssen, der Versorgungsinfrastruktur mit Kälte und Prozessgasen, den Installationen und den Integrationsschnittstellen, die für eine nahtlose Einbindung in die bestehende 200-mm-Prozessumgebung erforderlich waren.

Nach der Lieferung wurden alle Systeme installiert, in Betrieb genommen und in einen Prozesscluster integriert. Die technische Abnahme und die Anlagenqualifizierung wurden erfolgreich abgeschlossen, einschließlich der Überprüfung des Zusammenspiels zwischen den einzelnen Teilsystemen. Eine erste Prozessvalidierung belegte die Fähigkeit zur Abscheidung und Verarbeitung der für die Herstellung memristiver Bauelemente erforderlichen Materialstapel. Das Metall-PVD-System wurde für die CMOS-kompatible Abscheidung von TiN-, Al-, Ti- und Ta-Metallelektroden optimiert, während die Metalloxid-PVD-Plattform für die Abscheidung von TaOx-, AlOx- und TiOx-Dünnschichten vorbereitet wurde – einem wichtigen Funktionsmaterial für RRAM-basierte neuromorphe Bauelemente. Im Ergebnis wurde eine voll funktionsfähige und qualifizierte 200-mm-Abscheidungsplattform errichtet, welche die technologische Grundlage für die Integration memristiver Bauelemente in CMOS-BEOL-Prozessabläufen bildet.

3. Wichtigste Ergebnisse

Das Arbeitspaket AP1.3 wurde erfolgreich abgeschlossen. Alle geplanten Projektziele und Meilensteine wurden vollständig erreicht. Die wichtigsten Ergebnisse des Projekts sind:

- Die erforderliche Prozess- und Versorgungsinfrastruktur wurde im Hinblick auf die Integration von Metall-PVD, Metalloxid-PVD und Handler angepasst und erweitert.
- Alle drei Anlagen wurden geliefert, installiert und erfolgreich in die bestehende 200-mm-Prozessumgebung integriert.
- Die einzelnen Komponenten wurden zu einem voll funktionsfähigen Anlagencluster zusammengefasst.
- Die technische Abnahme und die Inbetriebnahme wurden erfolgreich abgeschlossen.
- Die Abscheidungsraten von Ta, TaOx, TiN, Al, AlOx, Ti und TiOx wurden optimiert, um eine gute Homogenität über den gesamten 200-mm-Wafer zu erzielen. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für dieser Optimierung zusammengestellt.
*Die Homogenität für Titanoxid war mit der vorhandenen Messtechnik nicht bestimmbar.

	Ta	TaOx	TiN	Al	AlOx	Ti	TiOx
Abscheidungsrate (nm/min)	19,3	1,2	3,7	16,2	0,5	12,6	0,5
Dicke (nm)	116	36	110	97	54	101	10
Homogenität (%)	±3,2	±1,2	±3,4	±3,7	±3,3	±6,0	n.M.*

- Der Anlagencluster konnte nur mit eingeschränkter Funktion der Automatisierung in Betrieb genommen werden. Im Endabnahmeprotokoll wurde dies als geringfügiger Mangel dokumentiert. Im Rahmen des Abnahmeprozesses war ein technisches Problem im Zusammenhang mit dem automatisierten Wafer-Handhabungssystem aufgetreten. Der automatische Wafertransfer zwischen allen Prozesskammern ist deshalb bis zur Mängelbeseitigung nicht möglich. Grund ist eine Inkompatibilität der Kommunikationsschnittstellen zwischen den verschiedenen Kammersteuerungssystemen. Dieser Mangel wird in Kürze behoben sein, und die Anlage wird bald für weitere Forschungs- und Technologieentwicklungsaktivitäten im vollen Umfang zur Verfügung stehen.

Die neue Infrastruktur ermöglicht die Abscheidung von funktionalen Materialschichten wie Metallelektroden-Dünnschichten und Metalloxid-Funktionsschichten auf 200-mm- -

Wafers mit industriekompatibler Homogenität und bildet damit eine wichtige Grundlage für die Entwicklung zukünftiger neuromorpher Hardware auf Basis von ReRAM Bauteilen.

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojekts wurde eine 200-mm-Wafer-Bearbeitungsplattform für die Herstellung neuromorpher Hardware auf RRAM-Basis erfolgreich eingerichtet und in Betrieb genommen. Alle Projektmeilensteine wurden erreicht, und das Cluster-Tool für die Abscheidung ist nun in Betrieb. Die Schlüsselprozesse für die hochgradig homogene Abscheidung von Metall- und Metalloxid-Dünnschichten auf 200-mm-Wafern wurden entwickelt und qualifiziert, wodurch die Herstellung memristiver Bauelemente auf CMOS-Substraten im Wafermaßstab ermöglicht wird. Diese Infrastruktur ermöglicht als Teil einer neuromorphen Prozesskette die Herstellung neuromorpher Chips für F&E und Prototypentwicklung im Rahmen der Folgeaktivitäten des qnc-moduls der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland.

TEIL II EINGEHENDE DARSTELLUNG

FMD-QNCMODUL | NC | AP1.3 Neuromorphe Plattform auf Basis von RRAM auf 200 mm

1. Einleitung

Die Forschungszentrum Jülich GmbH ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft und eine bedeutende interdisziplinäre Forschungseinrichtung, die sich mit wissenschaftlichen und technologischen Herausforderungen in den Bereichen Information, Energie und Klima sowie Bioökonomie befasst. Sie vereint Fachwissen aus den Naturwissenschaften, den Lebenswissenschaften und den Ingenieurwissenschaften mit modernster wissenschaftlicher Infrastruktur und Hochleistungsrechnertechnik.

Innerhalb des Forschungsbereichs Information hat sich das Peter-Grünberg-Institut (PGI) im FZJ strategisch auf zwei Zukunftstechnologien fokussiert: Quantencomputing und Neuromorphes Computing. Insbesondere im Neuromorphen Computing (NC) wurde eine eng zusammenarbeitende Kette von Forschungsaktivitäten gebildet, die den gesamten Stack von Materialforschung für memristive Bauteile, dedizierter Messtechnologie, CMOS-Integration, Chipdesign, Architekturen, Hardware-Software Ko-Design und neuromorpher Systemarchitektur bis hin zum Softwareökosystem abbildet. Gerade im Materialforschungsbereich wurde über Jahrzehnte hinweg eine große Expertise im Bereich der resistiv schaltenden Oxidmaterialien aufgebaut und gleichzeitig ein Prozess Know-How erarbeitet, wie diese Materialien zum schichtweisen nanoskaligen Aufbau der RRAM-Bauteile bestehend aus Metallelektrodenmaterial, Metalloxidmaterialschichten und Metallelektrodenmaterial Backend-of-Line auf CMOS-Substrat abgeschieden und anschließend strukturiert werden können.

Im Rahmen des FMD-module QNC-Projekts wurde vom JARA Institut Energy Efficient Information Technology (PGI-10) das Arbeitspaket AP1.3 gemeinsam mit der IHP GmbH – Leibniz-Institut für Hochleistungsmikroelektronik/Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik – geplant und durchgeführt.

Am Forschungszentrum Jülich wurden dazu in einem Reinraumgebäude des PGI-10 strategische Investitionen in moderne Dünnschichtabscheidungssysteme und in eine automatisierte Wafer-Handling-Infrastruktur getätigt, um die Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur für CMOS-kointegrierte neuromorphe Systeme zu stärken. Das Hauptziel bestand darin, die Prozessinfrastruktur und die technologischen Fähigkeiten zu etablieren, die für die Backend-of-Line-Integration (BEOL) von RRAM-Bauelementen (Resistive Random-Access Memory) auf industriell gefertigten 200-mm-CMOS-Substraten erforderlich sind.

Folgende Anlagen wurden beschafft und in der Einrichtung installiert:

1. **System zur physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) von Metallen für 200-mm-Wafer**
Ein PVD-System zum Aufbringen metallischer Schichten, die für RRAM-Elektrodenstrukturen und zugehörige Dünnschichtstapel erforderlich sind.
2. **System zur physikalischen Gasphasenabscheidung von Metalloxiden für 200-mm-Wafer**
Ein spezielles PVD-System zur Abscheidung funktionaler Metalloxidschichten, die in resistiven Schalt- und memristiven Bauelementen verwendet werden.
3. **Automatisierte 200-mm-Wafer-Handhabungsplattform**
Ein Wafer-Handhabungssystem zum Transport von 200-mm-Wafern zwischen den einzelnen Abscheidungsmodulen und zur Integration der Komponenten in eine gemeinsame Cluster-Tool-Umgebung.

Im Rahmen des FMD-QNC-Projekts wurden die wissenschaftlichen und technischen Anforderungen an das Metall-PVD-System, das Metalloxid-PVD-System und den Wafer-Handler systematisch definiert und in detaillierte Gerätespezifikationen umgesetzt. Diese Spezifikationen bildeten die Grundlage für die Beschaffung, die Auftragsvergabe, den Systemaufbau und die Werksabnahme. Parallel dazu wurde die bestehende Infrastruktur, insbesondere das CVD-System am Forschungszentrum Jülich, an die neuen Anlagen angepasst, einschließlich der Vorbereitung der Aufstellungsflächen, der technischen Versorgungsleitungen und der für die anschließende Cluster-Integration erforderlichen Schnittstellen.

Nach der Lieferung wurden die Systeme installiert und an die bestehende Labor- und Prozessinfrastruktur angeschlossen. Die Installation erfolgte in enger Abstimmung mit den Anlagelieferanten, den Anlagenbau-Teams und den zuständigen Prozessexperten, um die Einhaltung der relevanten technischen, prozessbezogenen und sicherheitstechnischen Anforderungen zu gewährleisten. Das Metall-PVD-System, das

Metalloxid-PVD-System und der Wafer-Handler wurden anschließend zu einem kombinierten 200-mm-Abscheidungscluster integriert, wie in Abbildung 1 dargestellt.

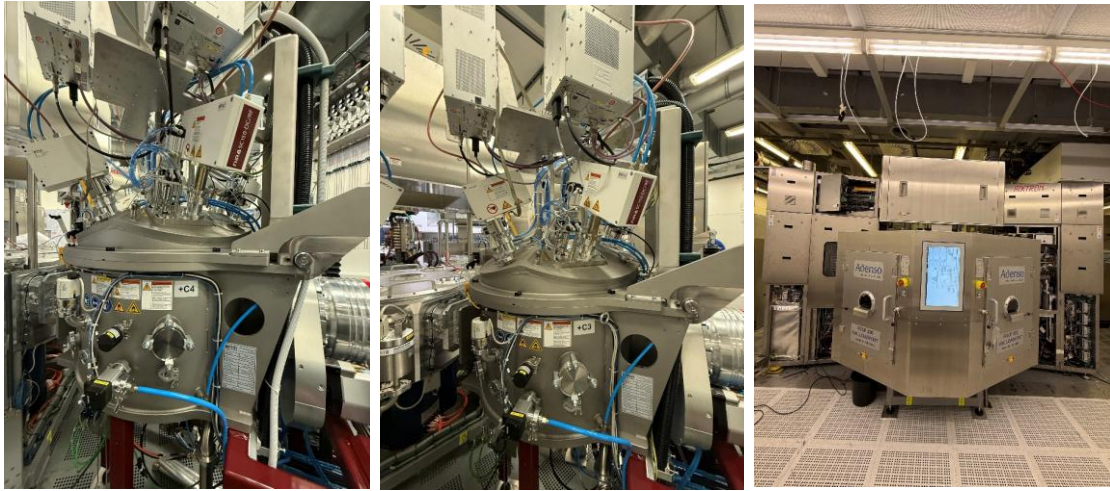


Abbildung 1 zeigt den neu installierten Abscheidungscluster am PGI-10 der Forschungszentrum Jülich GmbH aus verschiedenen Perspektiven v.l.n.r bestehend aus der Metall-PVD-Kammer, der Metalloxid-PVD-Kammer und dem robotergestützten Wafer-Handhabungssystem. Der automatisierte Handler transportiert 200-mm-Wafer unter Vakuum zwischen der Ladeschleuse und den einzelnen Prozessmodulen und ermöglicht so eine kontaminationsfreie Waferbearbeitung sowie vollständig integrierte Arbeitsabläufe bei der Dünnschichtabscheidung. Die Clusterarchitektur ermöglicht die Herstellung komplexer mehrschichtiger Metall- und Metalloxid-Stapel, die für die Entwicklung fortschrittlicher RRAM- und neuromorpher Bauelemente erforderlich sind.

Die neu installierten Anlagen stärken die Kapazitäten zur Bearbeitung von 200-mm-Wafern erheblich und schaffen eine moderne Technologieplattform für die Entwicklung von Speichertechnologien der nächsten Generation am Forschungszentrum Jülich. Die neue Infrastruktur ermöglicht die Herstellung fortschrittlicher metallischer und Metalloxid-Dünnschichtmaterialien, die für RRAM-Bauelemente benötigt werden, welche als zentrale Bausteine für zukünftige neuromorphe Rechensysteme gelten. Durch die Bereitstellung einer industriell relevanten 200-mm-Fertigungsumgebung schafft die Anlage eine Grundlage für die Entwicklung CMOS-kompatibler nichtflüchtiger Speichertechnologien für zukünftige energieeffiziente neuromorphe Rechensysteme. Die neu installierte Infrastruktur erweitert die technologischen Fähigkeiten des Forschungszentrums Jülich im Bereich neuartiger Speicherbauelemente und neuromorpher Hardware erheblich und bietet eine nachhaltige Plattform für die Prototypenentwicklung, die gemeinsame Forschung mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie sowie den Transfer innovativer Technologien in praktische Anwendungen. Folglich stellt diese Investition einen wesentlichen Beitrag zum FMD-QNC-Projekt dar und stärkt Deutschlands Position als führender Standort für neuromorphes Rechnen, fortschrittliche Mikroelektronik und nichtflüchtige Speichertechnologien der nächsten Generation.

2. Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Im Rahmen des FMD-QNC-Projekts (AP1.3) hat das Forschungszentrum Jülich die Beschaffung, Installation, Integration und Inbetriebnahme fortschrittlicher Metall-PVD- und Metalloxid-PVD-Anlagen erfolgreich abgeschlossen.

Diese Investitionen wurden getätigt, um die technologische Infrastruktur für die Entwicklung von RRAM-Bauelementen der nächsten Generation und CMOS-integrierter neuromorpher Rechenhardware zu stärken. Diese Bauelemente gelten als Schlüsselkomponenten für zukünftige neuromorphe Rechensysteme, da sie synaptische Funktionen nachbilden können und gleichzeitig eine hohe Energieeffizienz und Skalierbarkeit bieten. Die Leistung und Zuverlässigkeit dieser Bauelemente hängen entscheidend von der Qualität, Reproduzierbarkeit und Prozesskontrolle der abgeschiedenen Elektroden- und Schaltmaterialien ab. Zur Unterstützung dieser Forschungsaktivitäten wurden moderne PVD-Anlagen zur Abscheidung metallischer Elektroden und funktionaler Metalloxidschichten auf industriell relevanten 200-mm-Wafern installiert. Die neuen Anlagen bieten hochpräzise Abscheidungsbedingungen und ermöglichen so die Herstellung komplexer Mehrschichtstapel mit hervorragender Gleichmäßigkeit, Reproduzierbarkeit und Materialreinheit. Diese Fähigkeiten sind unerlässlich für die Untersuchung neuartiger Materialsysteme (wie TaOx, TiOx, HfOx), die Optimierung der Bauelementleistung und die Etablierung zuverlässiger Fertigungsprozesse für den zukünftigen Technologietransfer.

Über die Unterstützung aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten hinaus bilden die neuen PVD-Anlagen eine langfristige Technologieplattform für die Materialforschung, den Bau von Bauelement-Prototypen, Kooperationsprojekte mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie sowie die Weiterentwicklung von CMOS-kointegrierter neuromorpher Hardware. Die verbesserte Infrastruktur ermöglicht eine schnelle Bewertung neuer Materialkombinationen und beschleunigt den Übergang von der grundlegenden Materialforschung hin zu Demonstrationen funktionsfähiger Bauelemente und zur Integration auf Systemebene.

Die neuen Geräte leisten somit einen wichtigen Beitrag zum übergeordneten Ziel des FMD-QNC-Projekts, nämlich dem Ausbau der deutschen Forschungsinfrastruktur und der technologischen Führungsrolle in den Bereichen neuromorphes und Quantencomputing.

2.1 Spezifikation und Beschaffung

Zu Beginn des Projekts wurden die wissenschaftlichen und technischen Anforderungen an die drei zentralen Geräte – Metall-PVD, Metalloxid-PVD und Roboterhandler – systematisch erarbeitet. Die Anforderungen wurden in fundierte Spezifikationen umgesetzt und dienten als Grundlage für die Beschaffung, die Auftragsvergabe und die Werksabnahme. Die Meilensteine AP1.3.4, AP1.3.7 und AP1.3.10 im Bereich Spezifikation und Beschaffung wurden vollständig erreicht.

2.2 Infrastrukturmaßnahmen

Die notwendigen Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen an der bestehenden Infrastruktur wurden zwischen der Auftragsvergabe und der Lieferung durchgeführt. Dazu gehörten die Vorbereitung der Aufstellungsflächen, die Anpassung der Versorgungsanschlüsse sowie organisatorische und technische Vorbereitungen für die anschließende Cluster-Integration. Alle notwendigen Voraussetzungen für die Installation und den Betrieb wurden termingerecht geschaffen.

2.3 Lieferung, Installation und Cluster-Integration

Nach der Lieferung der Geräte wurden die Systeme angeschlossen, in die bestehende Labor- und Prozessinfrastruktur integriert und als Gerätecluster in Betrieb genommen. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten wurden erfolgreich hergestellt. Die Integration wurde unter Berücksichtigung technischer, sicherheitsrelevanter und prozessbezogener Anforderungen abgeschlossen. Die Meilensteine AP1.3.5, AP1.3.8 und AP1.3.11 für Lieferung und Integration wurden erfolgreich erreicht.

2.4 Abnahme und Qualifizierung

Die geplanten Abnahmeverfahren wurden erfolgreich abgeschlossen, gefolgt von einer umfassenden technischen und verfahrenstechnischen Qualifizierung des Anlagenclusters. Die Funktionalität der einzelnen Systemkomponenten sowie deren integrierter Betrieb wurden durch den vordefinierten Abnahmetest (PAT) verifiziert. Im Rahmen des Abnahmeprozesses wurde ein verbleibendes technisches Problem im Zusammenhang mit dem automatisierten Wafer-Handhabungssystem identifiziert. Konkret ist der automatische Wafertransfer zwischen allen Prozesskammern derzeit aufgrund von Inkompatibilitäten der Kommunikationsschnittstellen zwischen den verschiedenen Kammersteuerungssystemen eingeschränkt. Dieses Problem beeinträchtigt die grundlegende Funktionalität der Abscheidungsanlagen nicht und wurde im Abnahmeprotokoll als geringfügiger Mangel dokumentiert. Es wird erwartet, dass durch ein Software-Update und eine Systemoptimierung die vollautomatische Wafertransferfunktion in Kürze wiederhergestellt wird. Nach Abschluss dieser Maßnahmen wird der Anlagencluster vollständig für den routinemäßigen Dünnschichtabscheidungsbetrieb und für Prozessentwicklungsaktivitäten im vollautomatischen Modus vorbereitet sein.

2.5 Abscheidung von Dünnschichten

Im Rahmen des PAT (Prior Acceptance Test) wurde eine Reihe von Dünnschichtabscheidungsverfahren unter Verwendung sowohl der neu installierten Metall-PVD- als auch der Metalloxid-PVD-Anlagen erfolgreich durchgeführt. Ziel dieser Experimente war es, die Funktionsfähigkeit, die Prozessstabilität und die Abscheidungsleistung der Anlagen unter realistischen Betriebsbedingungen zu überprüfen. Die Abscheidungsverfahren für metallische und Metalloxid-Dünnschichten sind repräsentativ für Materialsysteme, die in RRAM-Technologien zum Einsatz kommen. Zur Bewertung der Leistung des Metalloxid-PVD-Systems wurden die Dünnschichtdicke und die Gleichmäßigkeit mittels spektroskopischer Ellipsometrie charakterisiert. Abbildung 2 zeigt den Ellipsometrie-Messaufbau und einen 200-mm-Wafer, auf dem eine 20 nm dicke TaOx-Dünnschicht abgeschieden wurde. Die ellipsometrische Analyse bestätigte die erfolgreiche Abscheidung der angestrebten Dicke und belegte die Fähigkeit des Systems, gleichmäßige und gut kontrollierte Oxidschichten auf industriell relevanten 200-mm-Wafern herzustellen. Diese Ergebnisse bestätigen die Eignung des Metalloxid-PVD-Systems für die Herstellung funktionaler Oxidschichten, die für RRAM-Bauelemente auf dem 200-mm-Wafer erforderlich sind.

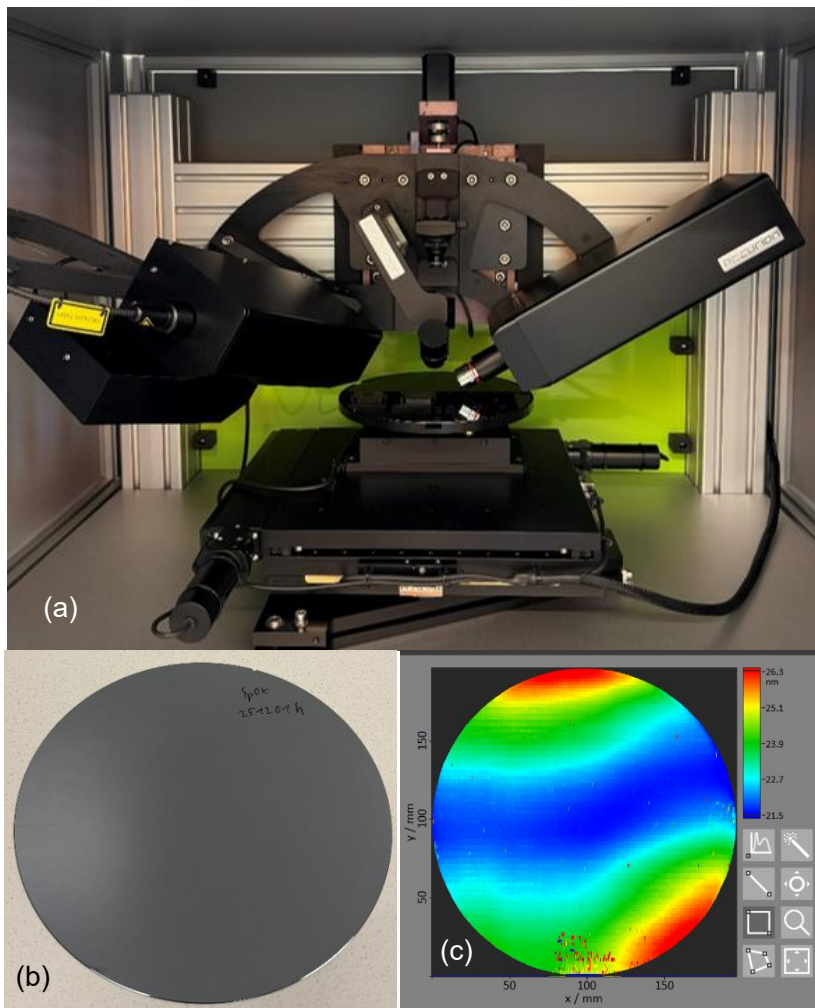
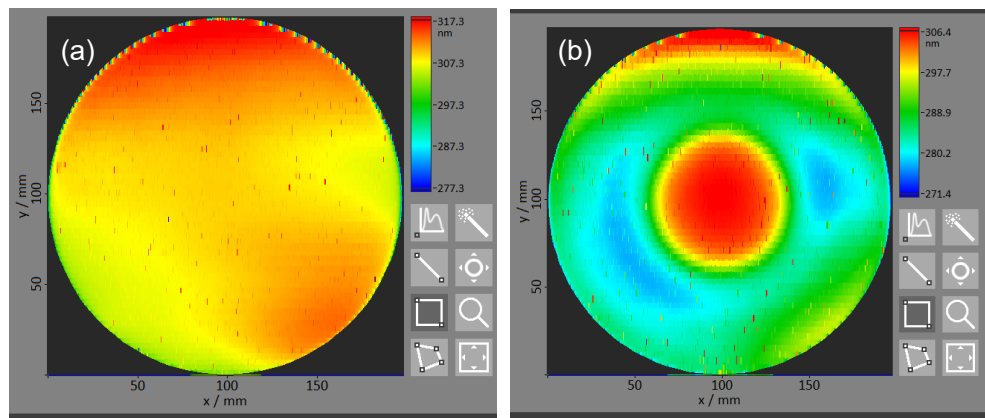


Abbildung 2(a,b) zeigt den Aufbau für die Ellipsometrie-Messung sowie einen 200-mm-Wafer, auf den mithilfe des Metalloxid-PVD-Systems eine 20 nm dicke Tantaloxid (TaOx)-Dünnschicht aufgebracht wurde. Der abgeschiedene Film wurde mittels spektroskopischer Ellipsometrie charakterisiert, um die Filmdicke und die Gleichmäßigkeit über den gesamten Wafer hinweg zu bewerten. (c) zeigt die Ellipsometrie-Messergebnisse der abgeschiedenen TaOx-Schicht. Die Messdaten bestätigen die erfolgreiche Abscheidung der angestrebten Filmdicke und belegen die Fähigkeit des

Metalloxid-PVD-Systems, gleichmäßige und gut kontrollierte Oxid-Dünnschichten herzustellen.

Anschließend wurde die Funktionsfähigkeit der Vorsputterkammer bewertet. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurde ein 200-mm-Siliziumwafer mit einer 300 nm dicken, thermisch gewachsenen SiO_2 -Schicht in der Vorsputterkammer bearbeitet. Die Oxidschichtdicke wurde vor und nach der Bearbeitung mittels Ellipsometrie gemessen. Die beobachtete Verringerung der SiO_2 -Dicke bestätigt die Ätzleistung der Kammer und belegt ihre Wirksamkeit bei der Oberflächenvorbereitung und -reinigung vor der Dünnschichtabscheidung. Solche Schritte zur Oberflächenvorbereitung sind unerlässlich, um reproduzierbare Prozessbedingungen und ein qualitativ hochwertiges Dünnschichtwachstum für RRAM-Bauelemente zu gewährleisten.



Die Leistungsfähigkeit des Metall-PVD-Systems wurde durch die Abscheidung einer 100 nm dicken Ti-Schicht auf einem 200-mm-Siliziumwafer überprüft. Zur Charakterisierung der Schichtdicke wurde eine Lift-off-Struktur hergestellt, um eine klar definierte Stufenkante auf der Waferoberfläche zu erzeugen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wurde die Schichtdicke durch Messung der resultierenden Stufenhöhe mit einem Oberflächenprofilometer vom Typ Dektak bestimmt. Die Messungen bestätigten die erfolgreiche Abscheidung der angestrebten Ti-Dicke und belegten die Fähigkeit des Metall-PVD-Systems, eine genaue, gleichmäßige und reproduzierbare Metallabscheidung auf 200-mm-Wafern zu erzielen.

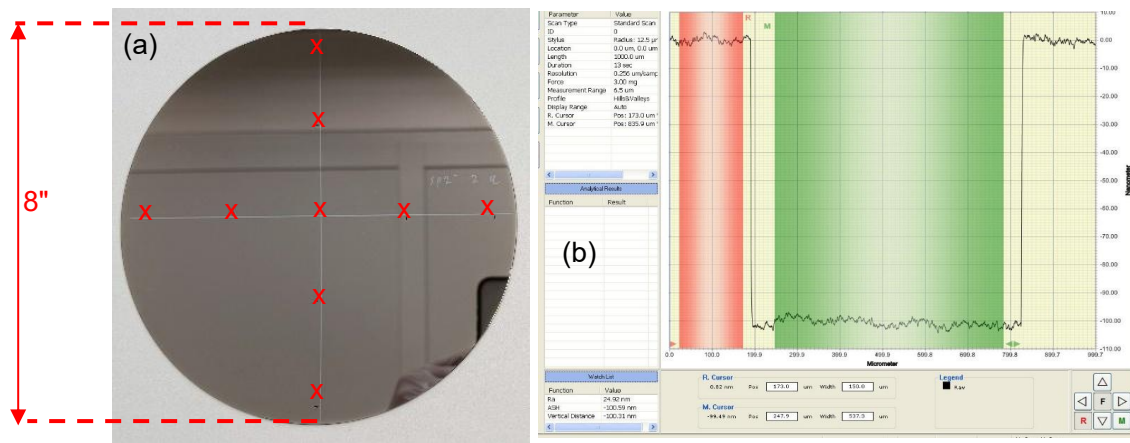


Abbildung 4(a,b) zeigt einen 200-mm-Siliziumwafer, auf den mithilfe des Metall-PVD-Systems eine 100 nm dicke Ti-Schicht aufgebracht wurde. Um eine genaue Charakterisierung der Schichtdicke zu ermöglichen, wurde ein Lift-off-Verfahren eingesetzt, um eine definierte Stufenkante auf der Waferoberfläche zu erzeugen. Der daraus resultierende Höhenunterschied zwischen den beschichteten und unbeschichteten Bereichen wurde anschließend mit einem Dektak-Oberflächenprofilometer gemessen, wodurch die Dicke der abgeschiedenen Ti-Schicht präzise bestimmt werden konnte.

Über die in diesem Bericht dargestellten repräsentativen Abscheidungsversuche hinaus wurden umfangreiche Prozessoptimierungs- und Qualifizierungsmaßnahmen für eine Reihe von Metall- und Metalloxidmaterialien durchgeführt, die für die Herstellung von RRAM-Bauelementen relevant sind. Insbesondere wurden die Abscheidungsprozesse für Ta, TaOx, TiN, Al, AlOx, Ti und TiOx auf den neu installierten Anlagen systematisch entwickelt und optimiert, wie in Tabelle 1 dargestellt. Die wichtigsten Prozessparameter, darunter Sputterleistung, Kammerdruck, Gaszusammensetzung, Substratposition und Abscheidungszeit, wurden so angepasst, dass reproduzierbare Abscheidungsraten und eine hervorragende Dickengleichmäßigkeit über den gesamten 200-mm-Wafer erreicht wurden.

Tabelle 1 fasst die Dicke, die Gleichmäßigkeit innerhalb des Wafers und die Abscheidungsraten zusammen, die für eine Reihe von Metall- und Metalloxid-Dünnschichten erzielt wurden, die mit den neu installierten Metall-PVD- und Metalloxid-PVD-Anlagen abgeschieden wurden. Die Ergebnisse belegen die Fähigkeit der Anlagen, hochwertige Dünnschichten mit ausgezeichneter Prozesskontrolle und Gleichmäßigkeit über 200-mm-Wafer hinweg herzustellen.

	Ta	TaOx	TiN	Al	AlOx	Ti	TiOx
Abscheidungsrate (nm/min)	19,3	1,2	3,7	16,2	0,5	12,6	0,8
Dicke (nm)	116	36	110	97	54	101	10
Homogenität (%)	±3,2	±1,2	±3,4	±3,7	±3,3	±6,0	-

Insgesamt belegen die PAT-Ergebnisse die erfolgreiche Inbetriebnahme und Qualifizierung beider Abscheidungssysteme. Die Metall-PVD- und Metalloxid-PVD-Anlagen erfüllten die festgelegten Anforderungen an die Abscheidungsleistung und

Prozesskontrolle und schufen damit eine robuste Plattform für die Dünnschichtverarbeitung zur Entwicklung fortschrittlicher RRAM-Technologien und CMOS-kointegrierter neuromorpher Rechenhardware am Forschungszentrum Jülich.

3. Erreichen der Meilensteine

Im Rahmen des Arbeitspakets AP1.3 wurden die ersten drei Meilensteine dem „ IHP GmbH zugewiesen, während die übrigen Meilensteine in der Verantwortung des Forschungszentrums Jülich lagen. Der vorliegende Bericht fasst den Umsetzungsstand der am Forschungszentrum Jülich durchgeführten Aktivitäten gemäß dem ursprünglichen Arbeitsplan und den Projektmeilensteinen zusammen. Alle geplanten Aktivitäten wurden erfolgreich abgeschlossen, und alle Meilensteine wurden innerhalb der Projektlaufzeit vollständig erreicht. Das Metall-PVD-System, das Metalloxid-PVD-System und die automatisierte 200-mm-Wafer-Handhabungsplattform wurden erfolgreich beschafft, installiert, integriert und qualifiziert. Die daraus resultierende Infrastruktur und die damit verbundenen Prozessentwicklungen erfüllten die festgelegten technischen Anforderungen und verbesserten die Dünnschicht-Verarbeitungsfähigkeiten von PGI-10 erheblich.

Die abschließenden Abnahmetests bestätigten den erfolgreichen Betrieb der Abscheidungssysteme und wiesen die erforderliche Schichtdickenkontrolle sowie die Gleichmäßigkeit auf Wafer-Ebene nach. Der integrierte Abscheidungscluster ist derzeit im halbautomatischen Modus in Betrieb. Um einen vollautomatischen Betrieb zu ermöglichen, ist ein Software-Update für das Clustersystem erforderlich. Der Anlagenhersteller arbeitet aktiv an dem Update, und eine Lösung wird in Kürze erwartet.

Nr.	Meilenstein / Ergebnis	Status
AP1.3.4	Metall-PVD-System: Spezifikation, Beschaffung und Aufbau	Erreicht
AP1.3.5	Metall-PVD-System: Lieferung und Integration in den Cluster	Erreicht
AP1.3.6	Metall-PVD-Anlage: Inbetriebnahme und Prozessqualifizierung	Erreicht
AP1.3.7	Metalloxid-PVD-Anlage: Spezifikation, Beschaffung und Bau	Erreicht
AP1.3.8	Metalloxid-PVD-Anlage: Lieferung und Integration in den Cluster	Erreicht
AP1.3.9	Metalloxid-PVD-Anlage: Inbetriebnahme und Prozessqualifizierung	Erreicht
AP1.3.10	Wafer-Handler: Spezifikation, Beschaffung und Bau	Erreicht
AP1.3.11	Wafer-Handler: Lieferung und Integration in den Cluster	Erreicht
AP1.3.12	Wafer-Handler: Qualifizierung und Inbetriebnahme	Erreicht

4. Übergang zum operativen Einsatz

Die erfolgreiche Werksabnahme, die Cluster-Integration und die Entwicklung des Dünnschichtabscheidungsverfahrens belegen die Betriebsfähigkeit der implementierten Infrastruktur. Die im Rahmen des Projekts etablierten technischen Schnittstellen, die Anlagenintegration und die Prozessketten sind vorhanden und wurden durch Abscheidungsversuche und Prozessqualifizierungsmaßnahmen erfolgreich validiert. Das Metall-PVD-System, das Metalloxid-PVD-System und die Wafer-Handling-Plattform wurden vollständig installiert, integriert und in Betrieb genommen. Erste Abscheidungsläufe wurden erfolgreich durchgeführt und bestätigen die Funktionsfähigkeit der Abscheidungsmodule sowie der gesamten Prozessumgebung. Die derzeitige Handler-Software ist noch nicht in der Lage, zuverlässig mit allen Komponenten des Cluster-Tools zu kommunizieren, was den vollautomatischen Cluster-Betrieb einschränkt. Daher wird das System derzeit im halbautomatischen Modus betrieben, während der Anlagenlieferant Korrektur -Software-Updates implementiert. Trotz dieser vorübergehenden softwarebedingten Einschränkung wurden alle wesentlichen Projektziele erreicht, und die Infrastruktur ist für weitere Prozessentwicklungs- und Qualifizierungsaktivitäten voll funktionsfähig. Der langfristige Betrieb der Infrastruktur wird durch die etablierten internen Wartungs-, Sicherheits-, Qualitätssicherungs- und Betriebsverfahren geregelt, wodurch eine nachhaltige und zuverlässige Nutzung der Anlagen für die zukünftige RRAM- und neuromorphe Hardwareforschung gewährleistet wird.

5. Wesentliche Finanzielle Posten

Posten	Gesamtbudget	Ausgaben
Personalkosten	529.342,00 €	
Materialkosten	153.000,00 €	
FE Fremdleistungen	0 €	
Reisekosten	0 €	
Investitionen	1.967.000,00 €	
Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	176.000,00	
Gesamt	2.825.342,00 €	2.92 Mio €

Die Mehrkosten sind im Bereich Investitionen und Personal angefallen, es wurden dazu Umwidmungen zwischen den Kostenposition „Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten“ in andere Kostenarten vorgenommen, aber keine zusätzlichen Mittel beantragt.

6. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit

Das Forschungszentrum Jülich ist eines der führenden interdisziplinären Forschungszentren Europas und Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft. Seine Aufgabe besteht darin, durch Forschung in den Bereichen Informationstechnologien, Energie und nachhaltige Technologien wichtige gesellschaftliche Herausforderungen anzugehen und gleichzeitig der nationalen und internationalen Forschungsgemeinschaft eine wissenschaftliche Infrastruktur auf dem neuesten Stand der Technik zur Verfügung zu stellen. Das Forschungszentrum erfüllt die Grundsätze von Forschungs- und Wissensvermittlungsorganisationen durch:

- unabhängige wissenschaftliche Forschung an der Spitze zukünftiger Informationstechnologien, insbesondere im Bereich des Quanten- und neuromorphen Rechnens
- Zusammenarbeit mit Universitäten, Forschungsinstituten und Partnern aus der Industrie auf nationaler und internationaler Ebene.
- Offene Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse durch Publikationen, Technologieplattformen und kooperative Forschungsaktivitäten.
- Technologietransfer und Innovationsförderung für die Industrie durch gemeinsam genutzte Forschungsinfrastrukturen und gemeinsame Entwicklungsprojekte.

Diese im Rahmen des FMD-QNC-Projekts getätigte Investition hat die technologischen Fähigkeiten des JARA Instituts Energy Efficient Information Technology PGI-10 erheblich gestärkt und so kann es zusammen mit dem IHP eine Linie auf Basis von 200mm Wafern für die neuromorphe Bauteilforschung und Entwicklung bis hin zu Prototypen in F&E Projekten für FMD Kunden im Bereich Forschung, KMU und Start-ups bereitstellen. Insbesondere die Installation fortschrittlicher Metall-PVD-, Metalloxid-PVD- und automatisierter Wafer-Handhabungssysteme schuf eine einzigartige Infrastruktur für die Backend-of-Line-Integration resistiver Speicherbauelemente auf 200-mm-Wafern. Diese Investitionen waren unerlässlich, um die Entwicklung von CMOS-kompatiblen RRAM-Technologien zu ermöglichen, die einen zentralen Hardware-Baustein für zukünftige neuromorphe Rechensysteme darstellen. Die neu geschaffenen Prozessfähigkeiten schließen die Lücke zwischen der Grundlagenforschung im Bereich der Materialwissenschaften und der skalierbaren Halbleiterfertigung und unterstützen damit den Übergang von Demonstrationen im Labormaßstab zur industrierelevanten Fertigung in Pilotlinien.

In diesem Sinne hat das Projekt die strategischen Kompetenzen Deutschlands und Europas im Bereich der Rechentechnologien der nächsten Generation erheblich gestärkt. Durch die Bereitstellung einer hochmodernen Fertigungsinfrastruktur für die Integration neuartiger Speicherbauelemente mit fortschrittlichen CMOS-Technologien stärkt das FMD-QNC-Projekt Forschungsaktivitäten in den Bereichen neuromorphes Rechnen,

energieeffiziente KI-Hardware und neuartige Rechnerarchitekturen, die über herkömmliche Systeme, die auf der von-Neumann-Architektur beruhen, hinausgehen. Somit stellt das FMD-QNC-Projekt einen entscheidenden Schritt zum Aufbau einer nachhaltigen europäischen Technologiebasis für zukünftige neuromorphe und Edge-AI-Hardwaresysteme dar und trägt direkt zur Stärkung der technologischen Souveränität in der fortgeschrittenen Mikroelektronik bei.

8. Veröffentlichung und Nutzung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projekts entstehen keine Veröffentlichungen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließende Bewertung

Die Aktivitäten des Arbeitspakets AP1.3 wurden erfolgreich abgeschlossen, und alle geplanten Meilensteine wurden vollständig erreicht. Das Metall-PVD-System, das Metalloxid-PVD-System und die automatisierte 200-mm-Wafer-Handhabungsplattform wurden spezifiziert, beschafft, abgenommen, installiert und in die bestehende Infrastruktur von PGI-10 integriert. Die abschließenden Abnahmetests belegten den erfolgreichen Betrieb des Anlagenclusters, einschließlich der Abscheidung repräsentativer Metall- und Metalloxid-Dünnschichten mit der erforderlichen Dickenkontrolle und Gleichmäßigkeit auf Wafer-Ebene.

Die neu geschaffene Infrastruktur stärkt die Kompetenzen des Forschungszentrums Jülich im Bereich der fortschrittlichen Dünnschichtverarbeitung für neue nichtflüchtige Speichertechnologien erheblich. Insbesondere bildet sie die technologische Grundlage für die Entwicklung memristiver Bauelemente und CMOS-kompatibler neuromorpher Hardware und unterstützt sowohl die Materialforschung als auch die Bauelementintegration auf industriell relevanten 200-mm-Wafern.

Diese Plattform eröffnet zudem neue Möglichkeiten für die gemeinsame Forschung mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie und wird durch den offenen Zugang zu modernsten Halbleiterfertigungsanlagen dazu beitragen, die Technologieentwicklungszyklen zu beschleunigen. In einem nächsten Schritt wird der Anlagenpark für die Bearbeitung von 200-mm-CMOS-Wafern qualifiziert, die von der IHP GmbH hergestellt werden, wodurch die Integration fortschrittlicher Speichermaterialien und -bauelemente in industriell relevante Prozessabläufe ermöglicht wird. Diese Fähigkeit wird die Grundlage für zukünftige nationale und internationale Forschungsprojekte im Bereich des neuromorphen Rechnens und fortschrittlicher Speichertechnologien bilden. Die Infrastruktur soll die Entwicklung und Herstellung von Prototypen neuromorpher Chips unterstützen, Technologiedemonstrationen ermöglichen und die Zusammenarbeit innerhalb des deutschen und europäischen Forschungsökosystems für Halbleiter stärken.

Langfristig wird die Plattform als zentrale Forschungs- und Innovationsinfrastruktur für die Erforschung neuartiger Materialien, Bauelementkonzepte und Systemarchitekturen für

energieeffizientes Rechnen dienen. Durch die Ermöglichung der Entwicklung und Prototypenerstellung von neuromorpher Hardware der nächsten Generation werden die im Rahmen von FMD-QNC getätigten Investitionen der Wissenschaft, Forschungsorganisationen und der Industrie dauerhafte Vorteile bieten und gleichzeitig Deutschlands technologische Führungsrolle bei zukünftigen Rechentechnologien stärken.