



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH

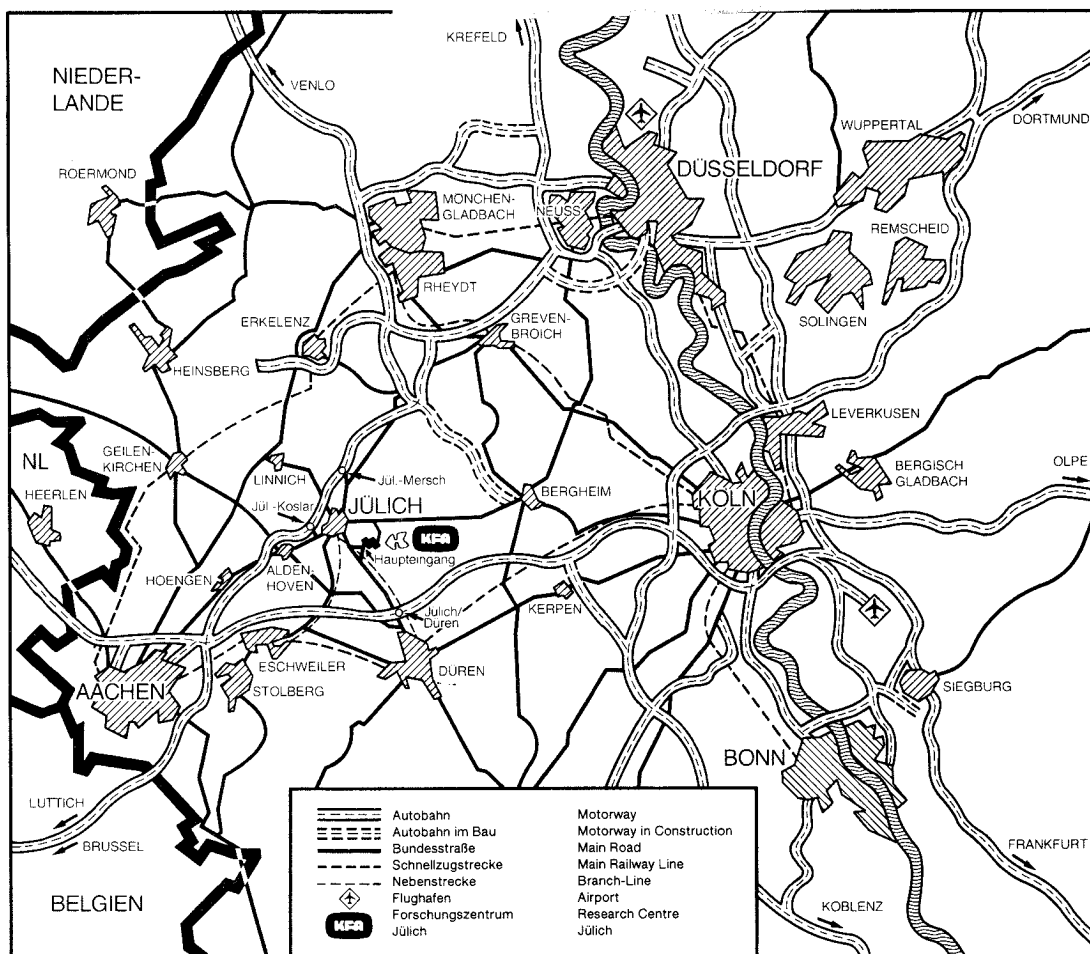
Institut für Schicht- und Ionentechnik

**Supraleitende Schalter aus gestapelten
Niob-Mikrobrücken**

von

Thomas Becker

Jül-2398
November 1990
ISSN 0366-0885



Als Manuskript gedruckt

Forschungszentrum Jülich: Berichte Nr. 2398
 Institut für Schicht- und Ionentechnik Jül-2398

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK · Forschungszentrum Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 024 61/61-0 · Telex: 833 556-70 kfa d · Telefax: 024 61/61-61 03

Supraleitende Schalter aus gestapelten Niob-Mikrobrücken

von

Thomas Becker

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Theoretische Überlegungen zum Verhalten von Mikrobrücken	4
2.1 Gleichspannungscharakteristik von Mikrobrücken	4
2.2 Hysterese in der U-I-Kennlinie	6
2.3 Thermisches Verhalten der Mikrobrücken	10
3. Präparation	15
3.1 Strukturierung der Brücken durch Ätzen	15
3.1.1 Deposition des Trilayers Nb/SiO ₂ /Nb durch Kathodenzerstäubung	15
3.1.2 Reaktives Ionenätzen	17
3.1.3 Elektronenstrahl-Lithographie	18
3.1.4 Strukturierung der unteren Anschlußflächen	18
3.1.5 Strukturierung der Brücken	23
3.1.6 Aufbringen der Kantenisolation	24
3.1.7 Strukturierung der oberen Anschlußflächen	27
3.2 Herstellung der Brücken mittels Lift-off	29
3.2.1 Strukturierung der unteren Anschlußflächen	29
3.2.2 Strukturierung der Brücken im Lift-off	30
3.3 Diskussion der beiden Verfahren	34
4. Messung	37
4.1 Meßelektronik und Probenhalter	37
4.2 Temperaturmessung	38
5. Gleichspannungsverhalten der Brücken	39
5.1 Kritischer Strom	39
5.2 Hysterese	41
5.3 Kennlinien	42
6. Temperaturverteilung in den Brücken	45
7. Mikrobrücken als Schalter	46
7.1 Thermisches Schalten	46
7.2 Magnetisches Schalten	49
7.3 Schalten durch Hf-Einstrahlung	51
7.4 Stromverstärkung	54
7.5 Schaltgeschwindigkeit	55
7.6 Packungsdichte	55
8. Anwendung als Flip-Flop	56

9. Zusammenfassung	59
10. Literaturverzeichnis	60
11. Anhang	62
11.1 Programm zur Berechnung der U-I-Kennlinie	62
11.2 Programm zur Berechnung der Temperaturverteilung	68
11.3 Schaltplan der Meßelektronik	76

1. Einleitung

Supraleitende elektronische Bauelemente gibt es in den verschiedensten Ausführungen. Mit SQUIDs lassen sich kleinste Magnetfelder messen. Detektoren, Mischer, Verstärker und digitale Schaltungen sind weitere Ausführungen solcher Bauelemente.

Die Vorteile bei der Verwendung von Supraleitern sind das niedrige Eigenrauschen, der Wegfall parasitärer Leitungsverluste in den Leiterbahnen und hohe Frequenzgrenzen im Betrieb.

Oft ist es sinnvoll oder erwünscht, mehrere Bauelemente untereinander schalten zu können, z. B. mehrere SQUIDs oder Detektoren mit einem Auslesesystem zu betreiben.

Wird der Umschalter bei Raumtemperatur, also außerhalb des Kryostaten mit den Detektoren betrieben, so werden einige Zuleitungen in den Kryostaten benötigt. Damit sind immer auch Verluste verbunden, so daß es sinnvoll ist, den Umschalter mit auf das Substrat zu integrieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, inwiefern sich supraleitende Schalter aus Niob-Mikrobrücken realisieren lassen. Dabei soll eine Brücke eine zweite schalten, d. h. in den resistiven oder normalleitenden Zustand bringen. Das Schaltverhalten soll charakterisiert werden.

Um den Platzbedarf in lateraler Richtung so klein wie möglich zu halten und eine gute Kopplung zwischen der treibenden und der zu schaltenden Brücke zu erreichen, ist es ein Ziel dieser Arbeit, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die beiden Mikrobrücken übereinander strukturiert werden können.

Im Folgenden wird die Präparation der Schalter mit möglichst optimierten Lithographieschritten vorgestellt und ihre Eigenschaften untersucht.

2. Theoretische Überlegungen zum Verhalten von Mikrobrücken

2.1 Gleichspannungscharakteristik von Mikrobrücken

Mikrobrücken gehören wie Tunnelkontakte und Supraleiter-Normalleiter-Supraleiter Pakete zu Bauelementen, die den Josephseffekt zeigen können.

Bei den Mikrobrücken ist es die schmale Leiterbahn oder Einschnürung zwischen den supraleitenden Anschlußflächen, die eine schwache Kopplung zwischen zwei Supraleitern bewirkt.

Kann diese Kopplung durch einen linearen Term in der Schrödingergleichung beschrieben werden, so gelten die Josephsongleichungen

$$I_s(t) = I_c \sin\{\varphi(t)\} \quad (1)$$

$$d\varphi/dt = 2eU(t) \cdot 2\pi/h \quad (2)$$

I_c ist der kritische Strom, der maximal im supraleitenden Zustand fließen kann und φ die Phasendifferenz der Wellenfunktion der Cooperpaare.

Anderson und Dayem [2.1] erklärten diesen Phasenschlupf in den Brücken mit einer periodischen Bewegung von Flußfäden. Likharev [2.2], Aslamasov und Larkin [2.3] und Rogalla [2.4] haben dieses Modell erweitert.

In einer Brücke aus einem Typ-II Supraleiter werden Flußfäden durch ein Feld $H > H_{c1}$ oder einen eingepprägten Strom $I > I_c$ erzeugt. Da die Flußfäden an Inhomogenitäten (z. B. normalleitende Einschlüsse, Korngrenzen und Dickenunterschiede in der Schicht) gepinnt werden, können Flußfäden schon bei kleineren Strömen erzeugt werden, beginnen aber erst bei größeren eingepprägten Strömen durch die Brücke zu laufen.

Durch den Strom wirkt auf die Flußfäden eine Lorentzkraft vom Betrag

$$F = j \cdot l \cdot \Phi_0, \quad (3)$$

die die Flußfäden senkrecht zur Stromrichtung bewegt. Dabei ist j die Stromdichte, l die Länge des Flußfadens und $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Vs das elementare Flußquant. Ist die Lorentzkraft größer als die Haftkraft der Pinningzentren auf die Flußfäden, so werden diese losgerissen und bewegen sich durch die Brücke. Dadurch tritt ein Spannungsabfall über der Brücke auf.

Löst man die Bewegungsgleichung der Flußfäden für den Fall einer viskosen Reibung, so erhält man für die U-I Abhängigkeit bei $I > I_c$ ein parabolisches Verhalten [2.5]:

$$U = k(I - I_c)^{1/2}, \quad (4)$$

wobei k eine Konstante ist.

Dieses Verhalten ist bei sehr schmalen Brücken und kleinen Strömen sowie bei Temperaturen nahe T_c zu beobachten, sofern die Brücken keine Hysterese in der U-I-Kennlinie zeigen.

2.2 Hysterese in der U-I-Kennlinie

Bei Brücken mit großem kritischen Strom oder beim Betrieb der Brücken bei Temperaturen deutlich unter T_c tritt eine Hysterese in der U-I-Kennlinie auf.

Wird der eingeprägte Strom erhöht, so wird die Brücke bei $I > I_c$ resistiv. Dabei springt die Brücke schlagartig aus dem spannungslosen in einen spannungsbehafteten Zustand.

Dieser Sprung ist nicht reversibel. Beim Verringern des Stroms fällt auch unterhalb I_c eine Spannung ab.

Erst bei Erreichen eines Stroms $I_{cmin} < I_c$ erfolgt der Rücksprung in den spannungslosen Zustand (Abb. 2.1).

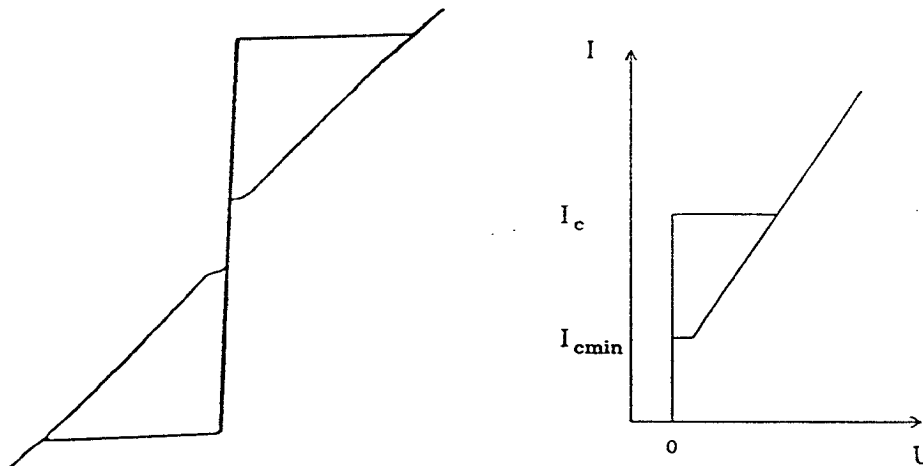


Abb. 2.1 Gemessene U-I-Kennlinie (linkes Bild) und schematische Darstellung (rechtes Bild)

Der bei der gemessenen Kennlinie auch im supraleitenden Zustand beobachtbare Spannungsabfall ist durch die Zuleitungen bedingt. Ihr Widerstand wurde von der verwendeten Meßelektronik mit gemessen. Der konstante Spannungsabfall wurde für die Auswertung subtrahiert.

Eine Hysterese in der U-I-Kennlinie zeigen auch Tunnelkontakte.

Zu ihrer Beschreibung schlug McCumber [2.6] 1968 das RCSJ-Modell (resistively and capacitively shunted junction) vor.

Der reale Josephsonkontakt wird durch eine Parallelschaltung von idealem Josephsonkontakt, ohmschem Widerstand und Kapazität beschrieben. Diese kann durch parallele Zuleitungen oder durch die Flächen eines Tunnelkontaktes gebildet werden.

Dann gilt für den Strom durch den Kontakt

$$I(t) = C \cdot dU/dt + U/R + I_c \sin(\varphi) \quad (5)$$

Setzt man

$$U = h/(4\pi e) d\varphi/dt \quad (2)$$

ein, so kann die Differentialgleichung numerisch integriert werden.

Definiert man β_c (McCumber-Faktor) zu

$$\beta_c = 4\pi e I_c C R^2 / h, \quad (6)$$

so sehen die U-I-Kennlinien in Abhängigkeit von β_c wie in Abb. 2.2a gezeigt, aus.

In der Abbildung sind die Kurven für die rücklaufende Kennlinie gezeichnet. Eine Hysterese erhält man, indem man im spannungslosen Zustand den Strom erhöht. Bei Erreichen von $\alpha = I/I_c = 1$ springt die Kennlinie auf den in Abb. 2.2a gezeigten Ast für das entsprechende β_c . Wird der Strom durch den Kontakt verringert, so folgt die Kennlinie dem gezeichneten Verlauf bis in den spannungslosen Zustand.

Eine Hysterese in der U-I-Kennlinie kann ebenso durch eine Serienschaltung einer Induktivität L mit einem idealen Josephsonkontakt und parallel dazu einem Widerstand beschrieben werden.

Das Verhalten von Punktkontakten läßt sich häufig durch dieses Modell beschreiben.

Für die Spannung über dem Kontakt gilt dann die Gleichung

$$U(t) = L \cdot dI/dt + h/(4\pi e) d\varphi/dt \quad (7)$$

mit

$$I(t) = h/(R \cdot 4\pi e) \cdot d\varphi/dt + I_c \sin\varphi \quad (8)$$

Diese Gleichungen können numerisch integriert werden; definiert man

$$\beta_L = h/(4\pi e L I_c), \quad (9)$$

so sehen die U-I-Kennlinien in Abhängigkeit von β_L wie in Abb. 2.2b gezeigt, aus.

Die Hysterese erhält man analog zu den Kurven für den kapazitiven Fall wie oben beschrieben.

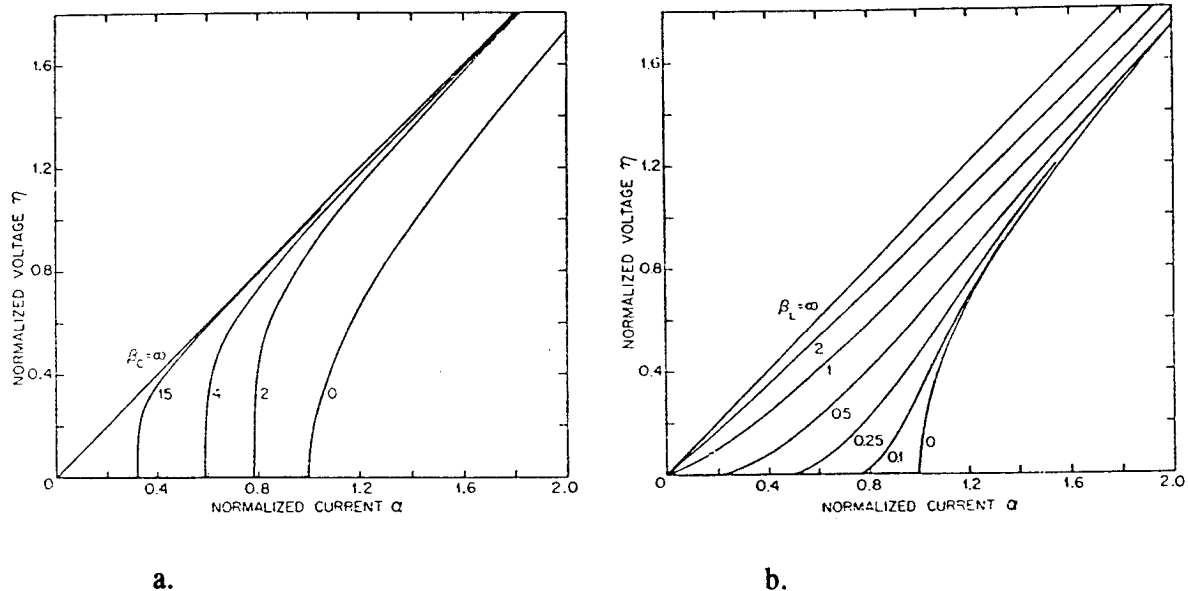


Abb. 2.2 U-I-Kennlinien in Abhängigkeit von β_c (a.) und β_c (b.) (nach [2.6]). $\alpha = I/I_c$ ist der normalisierte Strom und $\eta = U/U_c$ die normalisierte Spannung mit $U_c = I_c R_N$, wobei R_N der Normalwiderstand des Kontaktes ist.

Ist $\beta_c = 0$, so hat die U-I-Kennlinie keine Hysterese. Ab $\beta_c \geq 1$ tritt dann eine Hysterese auf. Der globale Verlauf der U-I-Kennlinie für Ströme $I > I_c$ lautet für den Fall einer parallel zum idealen Josephsonkontakt befindlichen Kapazität im Gegensatz zu Gleichung (4) :

$$U = R \cdot (I_c^2 - I^2)^{1/2} \quad (10)$$

Nimmt man aber für Brücken ein $\beta_c > 1$ an, so ergibt sich eine mehr oder weniger gute Übereinstimmung mit dem RCSJ-Modell. Dies führte lange zu der Annahme, die Hysterese in der U-I-Kennlinie der Brücken sei kapazitiv bedingt.

Nun ist für Brücken jedoch $\beta_c < 1$ [2.7], so daß nach dem oben beschriebenen Modell keine Hysterese auftreten sollte. Im Rahmen der Auswertung (Kap. 5.2) wird der Grund der Übereinstimmung näher erläutert.

Gubankov et al. [2.8] schlugen 1972 Aufheizeffekte zur Erklärung der Hysterese und des damit verbundenen Sprungs in der U-I-Kennlinie vor.

Bei Überschreiten von I_c wird die Brücke normalleitend und es fällt eine Spannung über ihr ab. Dabei wird die Energie $P = U \cdot I$ dissipiert. Dies führt zu einer lokalen Erwärmung in der Brücke und damit zu einem Ansteigen des Normalwiderstandes.

Die Temperaturänderung in der Brücke sei proportional zur dissipierten Energie $P=U \cdot I$:

$$T-T_b = \delta UI \quad (11)$$

mit T_b = Umgebungstemperatur.

Man erhält mit dem RSJ-Modell unter Einfluß der entstehenden Wärme für die Strom-Spannungs-Kennlinie [2.8]:

$$U^2 = I^2 R^2 - [I_c R - U \cdot I / I_t]^2 \quad (12)$$

wobei $I_t = (\vartheta \cdot \kappa)^{-1}$ ist mit

$$\kappa = K \cdot A \quad (13)$$

(K = thermische Leitfähigkeit und A = Fläche der erwärmten Region) und

$$\vartheta = dU_c / dT \quad (14)$$

Die so erhaltenen Kennlinien sind in Abhängigkeit von I_t in Abb. 2.3 dargestellt.

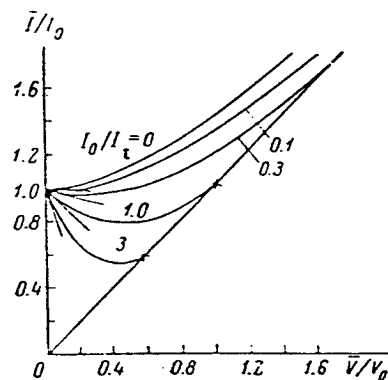


Abb. 2.3 U-I-Kennlinie in Abhängigkeit von I_c/I_t (nach [2.8]).

Je besser die thermische Leitfähigkeit ist, desto größer ist auch I_t . Aufgrund der besseren Wärmeabfuhr wird somit die Hysterese kleiner.

2.3 Thermisches Verhalten der Mikrobrücken

Bei der Berechnung der U-I-Kennlinie nach Gubankov wurde von der Annahme ausgegangen, daß die Umgebungstemperatur T nahe T_c liegt.

Im folgenden soll ein Modell vorgestellt werden, das es gestattet, sowohl die U-I-Kennlinie als auch die Temperaturverteilung einer Brücke bei beliebigen Temperaturen $T < T_c$ zu beschreiben.

Bremer und Newhouse [2.10] untersuchten 1958 im Rahmen ihrer Arbeiten über supraleitende Kryotron-Bauelemente erstmals die Ausbreitung großer "Hotspots", lokaler warmer Stellen in dünnen supraleitenden Schichten.

Skocpol et al. [2.11] nahmen für ihr Modell zur Beschreibung der U-I-Kennlinie die Entstehung eines Hotspots aufgrund joulescher Wärme in resistiven Brücken an.

Mit diesem Modell können die U-I-Kennlinien auch quantitativ recht gut beschrieben werden.

Bei Überschreiten von I_c wird die Brücke lokal resistiv. Die dort entstehende Wärme wird auf zwei Wegen abgeführt und zwar aufgrund der thermischen Leitfähigkeit des Films in die Anschlußflächen bzw. über die Oberfläche in das Substrat und in das Heliumbad.

Wegen der kleinen Dimensionen der Brücke im Vergleich zum Substrat wird angenommen, daß sich das Substrat auf Umgebungstemperatur befindet.

Für die thermische Leitfähigkeit K eines Niobfilms findet man $8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [2.12]. Der Wärmeleitkoeffizient α für Saphir ist $2 \cdot 10^4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Damit läßt sich eine thermische Ausheillänge ξ definieren:

$$\xi = (Kd/\alpha)^{1/2} \quad (15)$$

Mit den obigen Werten und einer Schichtdicke $d=33 \text{ nm}$ erhält man für $\xi \approx 3.6 \mu\text{m}$.

Um eine selbstkonsistente Lösung des Problems zu erhalten, wird die Wärmeleitungsgleichung aufgestellt und gelöst. Dabei wird für eine gegebene Größe des Hotspots der Strom errechnet, der die wie oben beschrieben abgeführte Wärme so generiert, daß ein Gleichgewicht entsteht.

Die Gleichung des Strom-Spannungsverlaufs bekommt damit Parameterform als Funktion der Größe des Hotspots.

Die Temperatúrausbreitung in den Film läßt sich in zwei Bereiche aufteilen:

In der Brücke selbst wird sich die Wärme in erster Näherung linear in Längsrichtung, in den Anschlußflächen dann radial ausbreiten (Abb. 2.4).

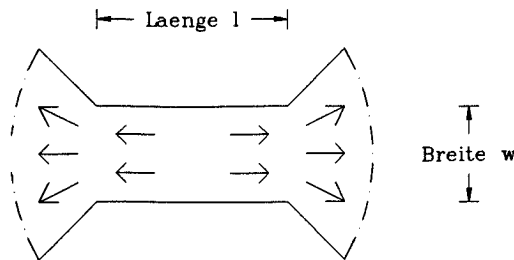


Abb. 2.4 Schematische Darstellung der Temperatúrausbreitung in einer Brücke und den Anschlußflächen.

Betrachtet sei eine Brücke der Länge l , Breite w und Dicke d . Die Grenze zwischen normalleitendem und supraleitendem Bereich (N/S-Interface) sei an der Stelle x_0 innerhalb der Brücke. Dann wird die Temperaturverteilung $T(x)$ längs der Brücke durch die Wärmeleitungsgleichung wie folgt beschrieben [2.11] (die Indizes S und N stehen für den supraleitenden und normalleitenden Bereich):

$$-K_N \cdot d^2 T / dx^2 + \alpha / d (T - T_b) = \rho [I / (wd)]^2 \quad (|x| < x_0) \quad (16)$$

$$-K_S \cdot d^2 T / dx^2 + \alpha / d (T - T_b) = 0 \quad (|x| > x_0) \quad (17)$$

Diese Gleichungen beschreiben vorwiegend den Temperaturverlauf in langen Brücken. Befindet sich das N/S-Interface jedoch nahe dem Brückenende, so muß die radiale Temperatúrausbreitung in die Anschlußflächen hinein mit berücksichtigt werden.

Bei kurzen Brücken befindet sich das N/S-Interface in der Regel in den Anschlußflächen. Eine mathematisch exakte Lösung der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung für die vorliegende Brückengeometrie ist äußerst schwierig. Die im folgenden gemachten Näherungen beschreiben jedoch die physikalischen Vorgänge und stehen im Einklang mit den experimentell gewonnenen Ergebnissen.

Wir nehmen einen eindimensionalen Wärmefluß in der Brücke selbst und eine radiale Ausbreitung der Wärme in den Anschlußflächen an.

In den Bereichen radialer Temperatursausbreitung lauten die Wärmeleitungsgleichungen:

$$-K(r^2 \cdot d^2T/dr^2 + r \cdot dT/dr) + \alpha/d \cdot r^2(T-T_b) = \rho[I/(\pi d)]^2 \quad (18)$$

(normalleitender Bereich)

$$-K(r^2 \cdot d^2T/dr^2 + r \cdot dT/dr) + \alpha/d \cdot r^2(T-T_b) = 0 \quad (19)$$

(supraleitender Bereich)

Die Lösungen dieser Differentialgleichungen enthalten die modifizierten Besselfunktionen mit den Argumenten r/β , wobei β die oben definierte thermische Ausheillänge ist.

An den Grenzen werden die Lösungen der Differentialgleichung für die lineare und die der radialen Ausbreitung so bestimmt, daß die Lösungskurven stetig aneinander anschließen.

Die Lösung der obigen Gleichungen stellt sich in den dimensionslosen Variablen $y=x/\beta$ und $s=r/\beta$ wie folgt dar:

Sei $y_1 = (l+w/2)/(2\beta)$, $s_1 = w/(2\beta)$ und $s_2 = r_0/\beta$.

Es gelten weiter folgende Abkürzungen:

$$A = (w/\beta)^2 \cdot [K_0(s_1) + \pi/2 \cdot K_1(s_1) \cdot \coth(y_1)]$$

$$B = (w/\beta)^2 \cdot [I_0(s_1) - \pi/2 \cdot I_1(s_1) \cdot \coth(y_1)]$$

$$F_I(s) = \pi^{-2} \cdot \int_{s_1}^s t^{-1} \cdot I_0(t) dt$$

$$F_K(s) = \pi^{-2} \cdot \int_{s_1}^s t^{-1} K_0(t) dt$$

$$C(s) = K_0(s) \cdot [1 + AF_I(s) - BF_K(s_2)]/A$$

$$D = 1 - BF_K(s_2) - AF_K(s_2) \cdot I_1(s_1)/K_1(s_1)$$

Damit ergibt sich für die Temperaturverteilung:

$(0 < y < y_1)$:

$$T(y) = T_b + (T_c - T_b) \{ K_0(s_1) + \pi/2 \cdot K_1(s_1) \cdot \coth(y_1) \cdot [1 - D \cdot \cosh(y)/\cosh(y_1)] \} [C(s_2) \cdot A]^{-1} \quad (20)$$

$(s_1 < s < s_2)$:

$$T(s) = T_b + (T_c - T_b) \{ C(s) - I_0(s) \cdot [F_K(s) - F_K(s_2)] \} \cdot [C(s_2) \cdot A]^{-1} \quad (21)$$

$(s_2 < s)$:

$$T(s) = T_b + (T_c - T_b) [K_0(s) / K_0(s_2)] \quad (22)$$

wobei $I_0(x)$, $I_1(x)$, $K_0(x)$ und $K_1(x)$ die modifizierten Besselfunktionen sind.

Die Temperaturverteilung ist konsistent mit dem Strom

$$I(r_0) = [K \cdot d^2 \cdot (T_c - T_b) / \rho]^{1/2} C(s_2)^{-1/2} \quad (23)$$

Der Widerstand der normalleitenden Region wird abgeschätzt zu

$$R(r_0) = (\rho/d) [l/w + 1/2 + 2/\pi \cdot \ln(2r_0/w)] \quad (24)$$

Dann errechnet sich die über dem Kontakt abfallende Spannung zu

$$U(r_0) = I(r_0) R(r_0) \quad (25)$$

Die U-I-Kennlinie und die Temperaturverteilung in der Brücke lassen sich aus den obigen Gleichungen numerisch berechnen (Abb. 2.5)

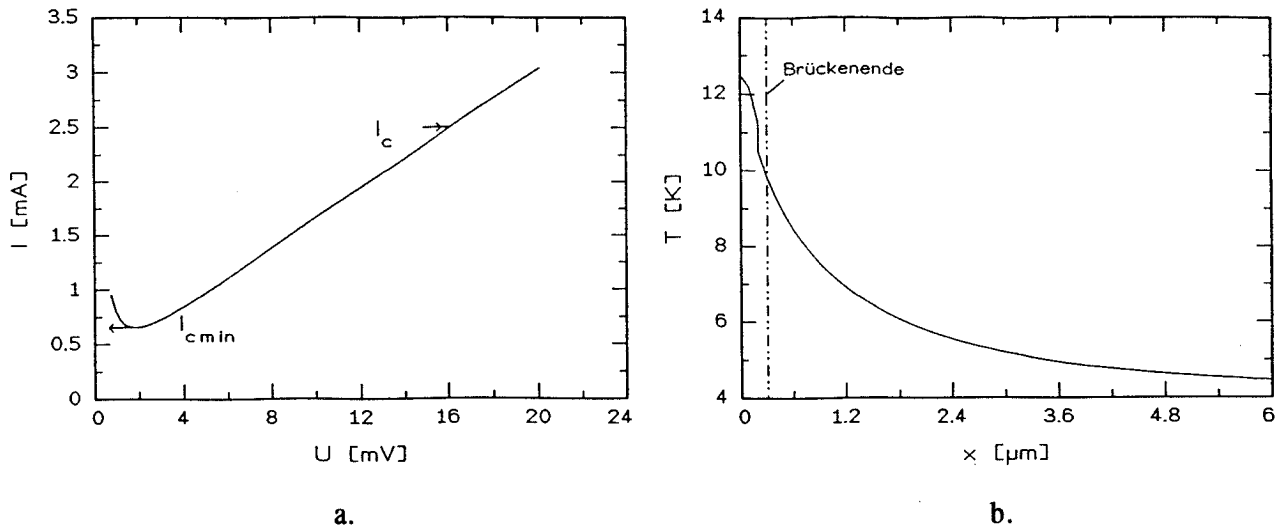


Abb. 2.5 U-I-Kennlinie (a.) und Temperaturverteilung in einer Brücke (b.) nach dem Hotspotmodell. Der kritische Strom I_c und der Rücksprung I_{cmin} sind in a. durch Pfeile, das Brückenende in b. durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.

(Das Programm zur Berechnung der Kurven ist im Anhang ausgedruckt.)

Für die Abhängigkeit von I_{cmin} von der Temperatur findet man:

$$I_{cmin} \approx (Kd^2 T_c / \rho)^{1/2} (1-t)^{1/2} \quad (26)$$

mit $t = T/T_c$.

3. Präparation

Wie in der Einleitung schon erwähnt, soll ein supraleitender Schalter aus zwei Mikrobrücken realisiert werden.

Um eine möglichst gute Kopplung der treibenden und der zu schaltenden Brücke zu erreichen, sollten die beiden Brücken direkt übereinander liegen. Die zwei supraleitenden Schichten sind durch eine Isolatorschicht getrennt. Dadurch reduziert sich auch der Platzbedarf des Schalters in lateraler Richtung.

Bei typischen Abmessungen der Brücken von $300 \times 300 \text{ nm}^2$ ist die Positionierung der zweiten Brücke nach der Strukturierung der ersten schwierig. Beide Brücken wurden daher in einem Schritt aus einem Trilayer Nb/SiO₂/Nb strukturiert.

Prinzipiell sind dazu zwei Verfahren möglich: Ätzen der Brücken oder eine Strukturierung mittels der Lift-off Technik. Beide Verfahren wurden durchgeführt und werden im folgendenden näher erläutert und am Ende zusammenfassend diskutiert.

3.1 Strukturierung der Brücken durch Ätzen

3.1.1 Deposition des Trilayers Nb/SiO₂/Nb durch Kathodenzerstäubung

Als Substrate werden $5 \times 25 \text{ mm}^2$ große, polierte Saphirplättchen verwendet. Diese werden vor dem Aufbringen der Schichten gründlich in einer Reinigungslösung (Mucosol) und Aceton gesäubert, um Schmutz und Fett zu entfernen.

Die Deposition der Schichten findet in einer turbomolekular gepumpten Vakuumapparatur (Leybold Z400) statt. In der Anlage befindet sich ein von außen bedienbarer Drehteller, an dem die Kathoden montiert sind. Damit ist es möglich, verschiedene Materialien nacheinander auf ein Substrat zu zerstäuben.

Es wurden drei Kathoden eingebaut: Eine Magnetron-Kathode zur Gleichspannungszerstäubung von Niob und je eine Kathode zur Hochfrequenzzerstäubung von Siliziumdioxid und Aluminium. Die Kathoden und Substrathalter sind wassergekühlt, um die beim Zerstäuben anfallende Wärme abzuführen.

Als Gas für die Zerstäubung wird Argon verwendet. Der Druck im Rezipienten kann dabei eingestellt und über eine Regelung konstant gehalten werden.

Zum Zerstäuben wird ein Plasma im Rezipient gezündet, so daß die Argonatome ionisiert werden. Beim Gleichspannungszerstäuben liegt das Target auf negativem Potential, so daß die Argonionen auf das Target beschleunigt werden. Dadurch werden Atome bzw. Moleküle des Targetmaterials herausgeschlagen und setzen sich auf dem Substrat ab.

Um eine höhere Zerstäubungsrate zu erhalten, sind in die Kathode zwei konzentrisch angeordnete Magnete eingebaut.

Zerstäubt man mit einer Hf-Spannung, so bildet sich aufgrund der unterschiedlichen Beweglichkeit der Argonionen und der Elektronen ein Potential aus, das Rückschlüsse auf die Zerstäubungsrate zuläßt.

Nach dem Einlegen der gereinigten Substrate auf die Substrathalter wird der Rezipient auf einen Hintergrunddruck von $3 \cdot 10^{-4}$ Pa abgepumpt.

Die Zerstäubung von Niob erfolgt bei einem Argondruck von 0.4 Pa. An die Kathode wird eine Gleichspannung angelegt und die Leistung so eingestellt, daß ein Strom von 750 mA fließt. Um die Oberfläche des Targets von Nioboxid und Adsorbaten zu reinigen, wird Niob über einem freien Substratplatz 3 min. lang vorzerstäubt.

Bei den oben angegebenen Parametern beträgt die Aufstäubrate von Nb $1.6 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Zum Zerstäuben von Siliziumdioxid wird ein Argondruck von 2 Pa eingestellt. Da SiO_2 ein Isolator ist, wird eine Hochfrequenzspannung ($f = 13.56 \text{ MHz}$) an die Kathode angelegt und so ein Plasma gezündet. Die angelegte Spannung beträgt 1.5 kV bei einem Kathodenstrom von 180 mA. Es bildet sich ein DC-Potential von 1 kV. Die Oberfläche des SiO_2 -Targets wird vor der Schichtdeposition 6 min. lang durch vorzerstäuben gereinigt.

Die Aufstäubrate von SiO_2 beträgt $0.33 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Vor dem Aufbringen der Schichten werden die Substrate 2 min. lang durch Ionenätzen von adsorbiertem Wasser gereinigt. Dazu wird ein Argondruck von 0.4 Pa eingestellt. Mittels Hochfrequenzspannung wird eine Plasmaentladung gezündet und die Leistung so eingestellt, daß ein DC-Potential von 800 V entsteht.

Anschließend werden nacheinander 20 s lang Nb, 6 min lang SiO_2 und wieder 20 s lang Nb zerstäubt. Damit erhält man auf den Substraten ein Schichtpaket von 32 nm Nb, 120 nm SiO_2 und 32 nm Nb.

3.1.2 Reaktives Ionenätzen

Prinzipiell sind drei Methoden zum Ätzen des Nb/SiO₂/Nb Sandwiches anwendbar. Beide Materialien, Nb und SiO₂, lassen sich in einer Mischung von 30% HF, 30% HNO₃ und 40% H₂O ätzen (sog. naßchemisches Ätzen). Diese hat jedoch den Nachteil, daß sie isotrop ätzt und somit ein Unterätzen nicht vermieden werden kann. Damit lassen sich schmale Strukturen wie z.B. die Brücken mit Breiten von 300 nm und kleiner nicht definiert herstellen. Außerdem greift die Ätzlösung den Fotolack stark an, so daß u. U. der Lack schneller weggeätzt ist als die Schichten.

Besser geeignet sind Trockenätzverfahren, da sie anisotroper ätzen.

Eine Möglichkeit ist das Ionenstrahlätzen, bei dem Argonionen beschleunigt und auf das Substrat geschossen werden. Die Schichten werden dadurch abgestäubt.

Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Brücken wurden reaktiv ionengeätzt.

Dazu wird das Substrat auf eine wassergekühlte Kathode gelegt, die in einer Vakuumkammer montiert ist. Die Kammer wird auf einen Hintergrunddruck < 0.1 Pa abgepumpt. Danach wird das Ätzgas, hier Schwefelhexafluorid, bis zu einem Druck von 20 Pa eingelassen. Durch Anlegen einer Hochfrequenzspannung ($f = 13.56$ MHz) wird eine Plasmaentladung gezündet. Dadurch wird SF₆ z. B. in SF₄ und SF₂ aufgespalten. Die zu ätzenden Materialien reagieren -falls chemisch möglich- mit den SF₂-Molekülen zu Fluoriden, Nb z.B. zu NbF₅. Ist der Dampfdruck dieser Materialien hoch genug, verlassen sie die Oberfläche und werden von der Vakuumpumpe abgesaugt. So wird Schicht für Schicht abgetragen. In geringem Maße findet dazu noch ein Abstäuben durch die beschleunigten Gasionen statt.

Niob, SiO und SiO₂ lassen sich auf diese Weise ätzen, Saphir (Al₂O₃) und Al nicht und wirken so als Ätzstopper.

Sowohl der Fotolack als auch der elektronenstrahlempfindliche PMMA werden mitgeätzt (PMMA: $1.5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$; Fotolack: $0.8 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$). Dies ist bei der Wahl der Lackdicke mit zu berücksichtigen.

Da die Fluormoleküle auch mit der Wandung der Kammer und der Kathode reagieren oder sich Ätzrückstände auf ihr niederschlagen, muß die Kammer regelmäßig gereinigt werden, um die Ätzung nicht zu verlangsamen oder gar zu verhindern. Dies führt dann dazu, daß der Fotolack abgestäubt wird bzw. durch zu große Wärme abdampft, bevor die Schicht durchgeätzt ist.

Niob ätzt sich unter obigen Parametern mit $0.28 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ und SiO₂ mit $0.33 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.1.3 Elektronenstrahl-Lithographie

Beim Belichten von Strukturen in Sub- μm Bereich stoßen optische Belichtungsgeräte an ihre (physikalischen) Grenzen.

Neben apparativen Gegebenheiten ist ihre Auflösung durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt. Der in unserem Institut verwendete Maskenbelichter zum Beispiel kann noch Strukturen bis $2\ \mu\text{m}$ auflösen. Er arbeitet bei einer Wellenlänge von $\lambda = 411\ \text{nm}$. Der ultraviolette Linienbereich der Quecksilberdampflampe kann hier nicht genutzt werden, da die Optik nicht aus UV-durchlässigem Quarzglas besteht. Kommerziell erhältliche Maskenbelichter erreichen mit der i-Linie des Quecksilbers ($\lambda = 365\ \text{nm}$) noch Auflösungen von $0.5\ \mu\text{m}$ [3.1].

Man erhält eine bessere Auflösung, indem man zu kürzeren Wellenlängen geht. Belichter, die mit Röntgenstrahlen arbeiten, erreichen Auflösungen bis $0.1\ \mu\text{m}$ [3.2]. Auch Synchrotronstrahlung kann zur Belichtung kleiner Strukturen eingesetzt werden.

Als weitere, und von uns genutzte, Belichtungsart bietet sich ein gezielt gesteuerter Elektronenstrahl an. Bei einer Beschleunigungsspannung von $100\ \text{kV}$ lassen Auflösungen bis $15\ \text{nm}$ erreichen [3.3].

Wir verwenden ein konventionelles Rasterelektronenmikroskop (Philips SEM 525 M) für unsere Belichtungen. Bei einer Beschleunigungsspannung von $20\ \text{kV}$ können so Strukturen kleiner $100\ \text{nm}$ erzeugt werden.

In die Säule des Mikroskops ist ein Kondensator eingebaut, durch dessen Platten die Elektronen hindurchfliegen. Durch Anlegen einer Spannung von $12.6\ \text{V}$ kann der Strahl gegen die Wand der Säule ausgetastet werden.

Im Institut wurde (in Anlehnung an [3.5] und [3.6]) ein rechnergesteuertes Graphiksystem entwickelt und an das Mikroskop angepaßt. Mit ihm können Strukturen, die sich aus Rechtecken und auf der Spitze stehenden Quadraten zusammensetzen lassen, mit dem Elektronenstrahl geschrieben werden. So ist es möglich, ein Feld von 4096×4096 Punkten verkleinernd auf das Substrat abzubilden. Die Größe eines Punktes beträgt bei 503-facher Vergrößerung $54 \times 46\ \text{nm}$.

Um diese kleinen Strukturen schreiben zu können, muß der verwendete Lack sowohl elektronenstrahlempfindlich sein als auch die nötige Auflösung besitzen. Diese Anforderungen erfüllt Polymethylmetacrylat (PMMA), der auch zum Belichten bei UV-Licht mit kurzer Wellenlänge und Röntgenstrahlen eingesetzt wird.

Wird der PMMA belichtet, so brechen die Elektronen oder Photonen die chemischen Bindungen der Moleküle auf. Das mittlere Molekulargewicht wird so reduziert. Beim Entwickeln in einem geeigneten, molekulargewichtselektiven Lösungsmittel wird an den belichteten Stellen der Lack entfernt.

3.1.4 Strukturierung der unteren Anschlußflächen

Zur späteren Kontaktierung werden an die Brücken $1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$ große Anschlußflächen strukturiert. Da die kleinsten Abmessungen dieser Struktur in der Größenordnung μm liegen, können sie fotolithographisch erzeugt werden (Abb. 3.1).

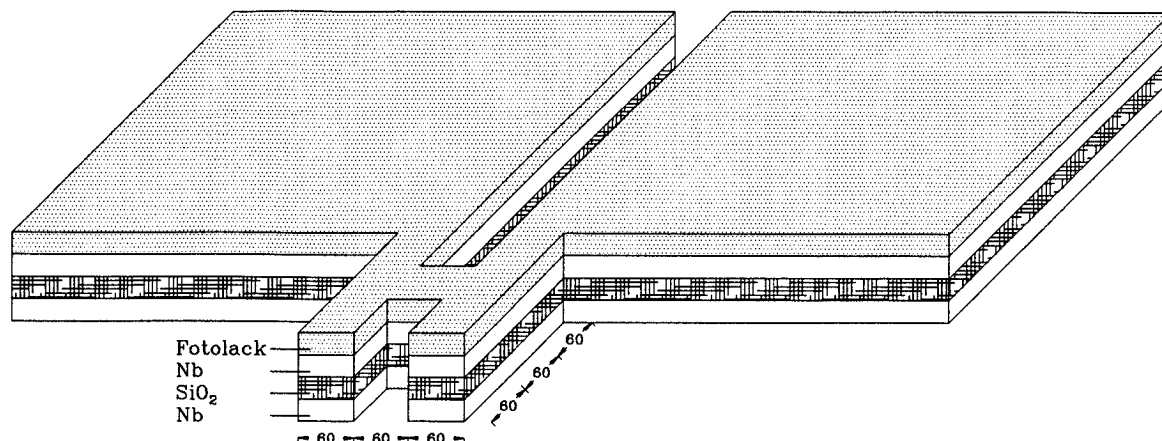


Abb. 3.1 Struktur des Trilayers Nb/SiO₂/Nb nach dem ersten Ätzen. Die Anschlußflächen sind 1.6 mm lang. Die Maße in der Zeichnung sind in μm angegeben.

Auf das Schichtpaket wird ein Positivlack (Shipley AZ 1350) mit einer Drehzahl von $1500 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ aufgeschleudert. Der Lack wird anschließend in einem Ofen 15 min. lang bei 70°C getrocknet. Um die Dicke der Lackschicht zu erhöhen, wird nach dem Trocknen ein weiteres Mal Lack aufgeschleudert und ebenfalls 15 min. getrocknet.

Man erhält so eine Lackdicke von 750 nm, die erforderlich ist, da beim reaktiven Ionenätzen (vgl. 3.1.2) auch der Lack angegriffen wird.

Die Gesamtzeit von 30 min. zum Trocknen sollte nicht wesentlich überschritten werden, da sich der Lack ansonsten nur schlecht entwickeln und nach den weiteren Schritten wieder entfernen läßt.

Die Belichtung des Lacks erfolgt in einem Projektions-Maskenbelichter. Die Maske wurde im Institut im Maßstab 1:10 gezeichnet und entsprechend verkleinernd auf Planfilm abfotografiert. Als geeignetes Filmmaterial erwies sich der Agfa Litex 081 p; Einschlüsse im Film waren jedoch immer vorhanden. Durch gezieltes Überbelichten (Belichtungszeit 60 s) wurden die Einschlüsse durch Beugung "überstrahlt".

Der Übergang zwischen hell und vollständig geschwärzt ist ungefähr $0.5 \mu\text{m}$ breit. Er ist jedoch klein gegenüber der kleinsten Struktur, so daß die "Unschärfe" in der Breite in Kauf genommen werden kann.

Die Verwendung dieser Fotomasken hat gegenüber kommerziell erhältlichen Masken auf Glas-trägern den Vorteil, daß sie schnell zur Verfügung stehen und so etwaige Layoutänderungen schnell berücksichtigt werden können.

Nach dem Belichten wird der Fotolack 10 s lang in 0.2 molarer Natronlauge entwickelt. Die Entwicklung wird mit destilliertem Wasser gestoppt und das Substrat gründlich abgespült. Dabei darf keine NaOH mehr auf der Schicht verbleiben, da die eingetrockneten Rückstände den Ätzbvorgang behindern. Anschließend wird die Schicht mit Stickstoff trockengeblasen.

Nun wird die belichtete Struktur, wie in 3.1.2 beschrieben, reaktiv ionengeätzt. Bei den angegebenen Schichtdicken und Ätzraten dauert der Vorgang ungefähr 10 min. Ist dabei die Wasserkühlung der Kathode nicht eingeschaltet wird das Substrat so warm, daß der Fotolack abdampft, bevor die Schichten durchgeätzt sind.

Der Ätzbvorgang stoppt automatisch auf dem Al_2O_3 -Substrat.

Der restliche Lack wird nun in Aceton entfernt und das Substrat wieder gründlich mit destilliertem Wasser gespült.

Nach diesem Schritt wird die untere Niobschicht für die Anschlußflächen der unteren Brücke freigelegt.

Auf die Probe werden erneut zwei Schichten Fotolack aufgeschleudert. Das "H" in der Struktur wird abgedeckt und der Rest im Maskenbelichter belichtet (Abb.3.2). Nach dem Entwickeln wird die Struktur in SF_6 reaktiv geätzt. Der Ätzbvorgang geschieht diesmal mit Sichtkontrolle, da die Ätzung ja nicht auf der unteren Niobschicht stoppt. Das Ätzen der unterschiedlichen Schichten ist sehr gut zu beobachten, da Niob hellgrau ist und SiO_2 seine Farbe mit der Dicke aufgrund von Interferenz ändert. SiO_2 ist bei 120 nm blau und wird bei sich verringernder Schichtdicke violett und schließlich schmutzig-braun. Der Farbumschlag nach dem Durchätzen der SiO_2 -Schicht ist gut zu sehen. Die Ätzung wird gestoppt und der Photolack in Aceton entfernt.

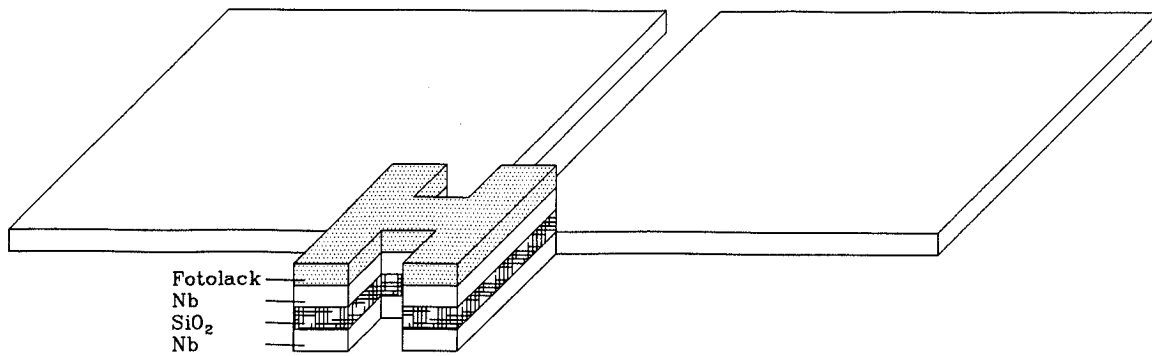


Abb. 3.2 Freigeätze untere Anschlußflächen. In das "H" wird später die Brücke strukturiert.

Die so definierte Fläche, auf der die beiden durch den Isolator getrennten Schichten Niob stehen bleiben, beträgt 0.01 mm^2 . Damit ist die Wahrscheinlichkeit relativ klein, daß in dem Isolator ein Loch und damit ein Kurzschluß zwischen den zwei Brücken ist.

3.1.5 Strukturierung der Brücken

Die so präparierte Struktur wird nun mit dem elektronenstrahlempfindlichen PMMA (Molekulargewicht: 950K) beschichtet. Dazu wird der Lack mit $4000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ auf das Substrat aufgeschleudert.

Nach dem Aufbringen wird der Lack 30 min. in einen 170°C heißen Ofen gebracht, um auspolymerisieren zu können.

Da auch PMMA beim Ionenätzen angegriffen wird, wird eine zweite Schicht aufgeschleudert und polymerisiert. Man erhält so eine Lackdicke von $1.2 \text{ } \mu\text{m}$.

Vor dem Belichten muß das Substrat im Elektronenmikroskop so positioniert werden, daß die zu belichtende Struktur in den Verbindungssteg des "H" (vgl. Abb. 3.2) geschrieben werden kann. Dabei ist darauf zu achten, daß das PMMA nicht schon beim Betrachten und Positionieren der Probe belichtet wird.

Es zeigt sich, daß ein kurzes Betrachten ($< 30 \text{ s}$) der Probe im "TV-Mode" (625 Zeilen/Bild und 50 Bilder/s) bei 503-facher Vergrößerung keinen Einfluß auf die Belichtung hat.

Das Substrat ist mit dem Substrathalter auf einem in x/y-Richtung verschiebbaren und drehbaren Tisch im Mikroskop montiert. Die Steuerung des Tisches erfolgt von außen mit einer Genauigkeit von $1 \text{ } \mu\text{m}$.

Die Grobpositionierung erfolgt bei kleiner Vergrößerung (125-fach) unter Betrachtung im TV-Mode so, daß der zu belichtende Bereich auf dem Bildschirm sichtbar ist. Bei 503-facher Vergrößerung wird dann der Steg, in den die Brücke belichtet werden soll, in waagerechter Richtung in die Bildschirmmitte und in senkrechter Richtung an die obere Bildschirmkante bewegt. Danach wird der Elektronenstrahl ausgetastet (vgl. 3.1.3) und das Substrat um $(-119) \text{ } \mu\text{m}$ in x-Richtung und $(-63) \text{ } \mu\text{m}$ in y-Richtung verschoben. Die Verschiebung wurde einmal ausgerechnet und es zeigt sich, daß die Positionierung im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit reproduzierbar ist.

Nun wird die Brücke mit Hilfe der oben beschriebenen Elektronenstrahl-Lithographie belichtet. Die Struktur besteht aus zwei auf der Spitze stehenden Quadraten mit einer Kantenlänge von $4.6 \text{ } \mu\text{m}$, wobei der Abstand der Spitzen die Brückenbreite definiert. Um den Steg vollständig aufzutrennen, werden die Quadrate durch Rechtecke der Größe $6.5 \times 33 \text{ } \mu\text{m}^2$ verlängert (Abb. 3.3).

Typische Belichtungszeiten sind $70 \text{ } \mu\text{s}$ bei einem Strahlstrom von 30 pA . Damit ergibt sich bei einem Durchmesser des Elektronenstrahls von 50 nm eine Dosis von $1.1 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$.

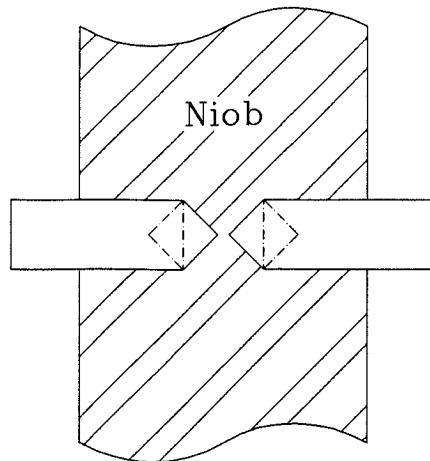


Abb. 3.3 Mit dem Elektronenstrahl belichtete Struktur der Brücke.

Nach dem Belichten wird der PMMA in einer Mischung von 1 Teil Methyl-Isobutyl-Keton (MIBK) und 3 Teilen Iso-Propanol 5 s lang entwickelt.

Die Entwicklung wird mit destilliertem Wasser gestoppt und das Substrat mit Stickstoff trockengeblasen.

Schließlich wird die Struktur in SF_6 reaktiv ionengeätzt.

Der restliche PMMA wird in Aceton, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme eines Q-Tip, entfernt.

Die geätzte Struktur ist in Abb. 3.4 skizziert.

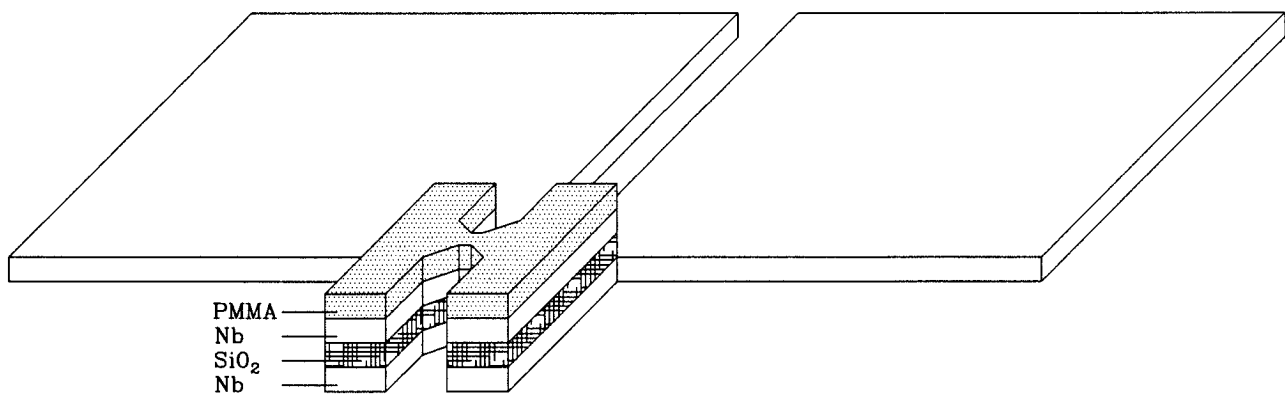


Abb. 3.4 Fertig geätzte Struktur der Brücken mit den unteren Anschlußflächen.

3.1.6 Aufbringen der Kantenisolation

Um einen Kurzschluß der noch aufzubringenden oberen Anschlußflächen mit der unteren Niob-schicht zu vermeiden, müssen die Kanten isoliert werden. Dazu wird über die Brückenregion SiO₂ gedampft, in das zwei $15 \times 22 \mu\text{m}^2$ große Fenster definiert werden, durch die die oberen Anschlußflächen mit der Brücke Kontakt bekommen (Abb. 3.5).

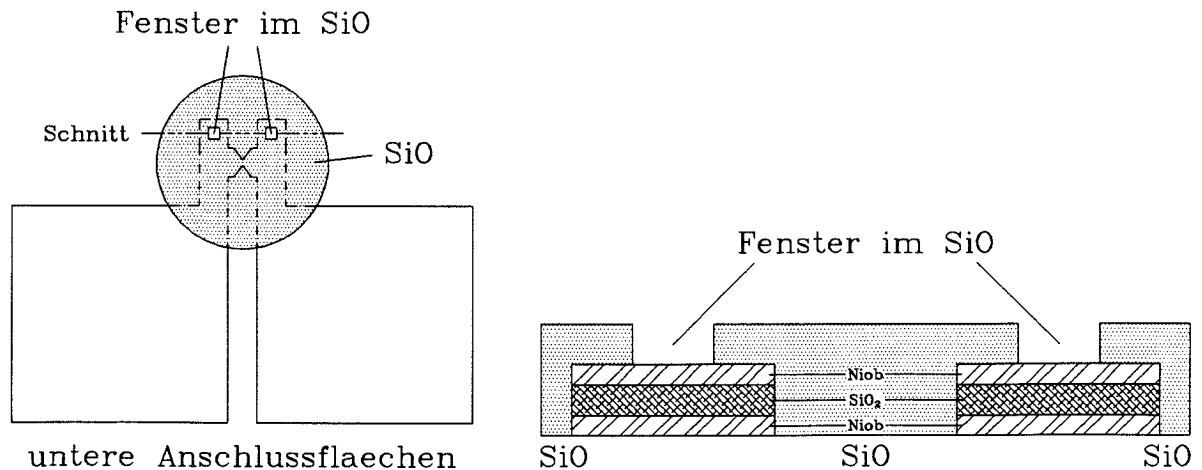


Abb. 3.5 Schematische Darstellung der Kantenisolation. Das linke Bild zeigt eine Draufsicht, das rechte den mit einer gestrichelten Linie markierten Schnitt durch die Fenster.

Die Strukturierung erfolgt in einem Lift-off Schritt. Dabei wird eine Schicht aus dem gewünschten Material auf den belichteten und entwickelten Lack gebracht. Wird das Substrat nun in Aceton gelegt, so hebt der Lack das auf ihm befindliche Material mit ab. Das aufgebrachte Material bleibt nur in den belichteten Feldern stehen.

Das Substrat wird also erneut mit dem Fotolack AZ 1350 beschichtet und im Maskenbelichter belichtet. Die Maske für die Fenster im SiO wurden mit dem Elektronenstrahl geschrieben und ebenfalls im Lift-off hergestellt.

Nach dem Entwickeln wird das Substrat in eine Aufdampfanlage (Varian VE-10) eingebaut. Die Aufdampfanlage ist eine öldiffusionsgepumpte Vakuumapparatur mit einer Glasglocke als Rezipient. In ihr wurde ein Substrathalter isoliert eingebaut, so daß eine Hochfrequenzspannung angelegt werden kann. Das zu verdampfende Material wird aus einer Wolframwendel, durch die ein Strom von bis zu 100 A geschickt werden kann, verdampft.

Ist der Rezipient auf $2 \cdot 10^{-3}$ Pa abgepumpt, wird Argongas bis zu einem Druck von 5 Pa eingelassen und mittels der angelegten Hochfrequenz für 2 min. ein Plasma gezündet. Die Hf-Leistung wird auf 35 W eingestellt. Wie beim Kathodenzerstäuben beschrieben, muß auch hier das Substrat von den Adsorbaten gereinigt werden, da das SiO sonst nicht richtig haftet und sich während der folgenden Prozeßschritte wieder ablöst.

Nach dem Reinigen wird der Argonfluß gestoppt und der Rezipient auf den ursprünglichen Druck evakuiert.

Jetzt werden 250 nm SiO auf das Substrat gedampft.

Nach dem Abkühlen (10 min.) wird das Substrat ausgebaut und in Aceton gelegt. Dabei nimmt der sich lösende Lack das auf ihm befindliche SiO mit weg.

Auf dem Substrat wird, wie Abb. 3.5 zu sehen, nur der runde Ausschnitt (mit Ausnahme der Fenster) bedampft. Versuche, der Einfachheit halber die gesamte obere Hälfte des Substrats mit SiO zu bedampfen, führten zu keinem befriedigendem Ergebnis. In diesem Fall befindet sich unter dem gesamten Bereich der noch zu strukturierenden Anschlußflächen SiO. Beim Bonden zum Kontaktieren der Anschlußflächen mit dem Probenhalter löst sich der Aluminiumdraht mit dem Niob und dem darunter befindlichen SiO wieder ab, da SiO nicht sehr gut auf dem Saphirsubstrat haftet.

3.1.7 Strukturierung der oberen Anschlußflächen

Als letzter Schritt müssen nun noch die oberen Anschlußflächen aufgebracht werden. Dies geschieht wiederum im Lift-off, um eine Schädigung der bisherigen Struktur zu vermeiden. Das Substrat wird mit Fotolack beschichtet und mit der Maske (Abb. 3.7) belichtet.

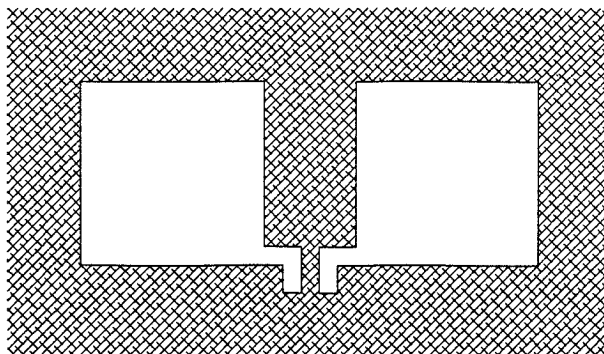


Abb. 3.7 Maske für die oberen Anschlußflächen. Die schraffierte Fläche ist geschwärzt, so daß die helle Struktur belichtet wird.

Nach dem Entwickeln und Trocknen wird die obere Schicht Niob aufgestäubt.

Dazu wird eine öldiffusionsgepumpte Anlage (Balzers BA 360) verwendet. In ihr ist eine Magnetronkathode zum Gleichspannungszerstäuben von Niob eingebaut.

Der Rezipient wird auf $1 \cdot 10^{-4}$ Pa abgepumpt und der Druck gegebenenfalls mit Hilfe einer mit flüssigem Stickstoff gefüllten Kühlfalle bis auf $< 1 \cdot 10^{-5}$ Pa reduziert.

Nun wird Argon bis zu einem Druck von 0.4 Pa eingelassen und durch Anlegen einer Hochfrequenzspannung am Substrathalter für 2 min eine Plasmaentladung gezündet. Die Hf-Leistung wird auf 35 W eingestellt.

Neben dem Entfernen der Adsorbate ist es in diesem Fall wichtig, in den Fenstern für die Kontaktierung der oberen Brücke das Nioboxid zu entfernen. Dieses bildet sich spontan an der Luft und ist somit nicht zu vermeiden. Entfernt man die Oxidschicht nicht, so bilden die Schichten in den Fenstern einen Nb/Nb₂O₅/Nb Tunnelkontakt, dessen Kennlinie die der Brücke überlagert.

Zum Zerstäuben wird mit einer Gleichspannung an der Kathode eine Plasmaentladung gezündet. Die Leistung wird so eingestellt, daß ein Strom von 300 mA fließt. Man erhält eine Zerstäubungsrate für Niob von $0.5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Niob wird 5 min. lang vorzerstäubt, während das Substrat durch einen Shutter abgedeckt ist. Danach wird der Shutter weggedreht und 90 s lang Niob auf das Substrat zerstäubt.

Der Fotolack wird schließlich in Aceton entfernt und so die oberen Anschlußflächen strukturiert.
Die fertige Struktur zeigt Abb. 3.8.

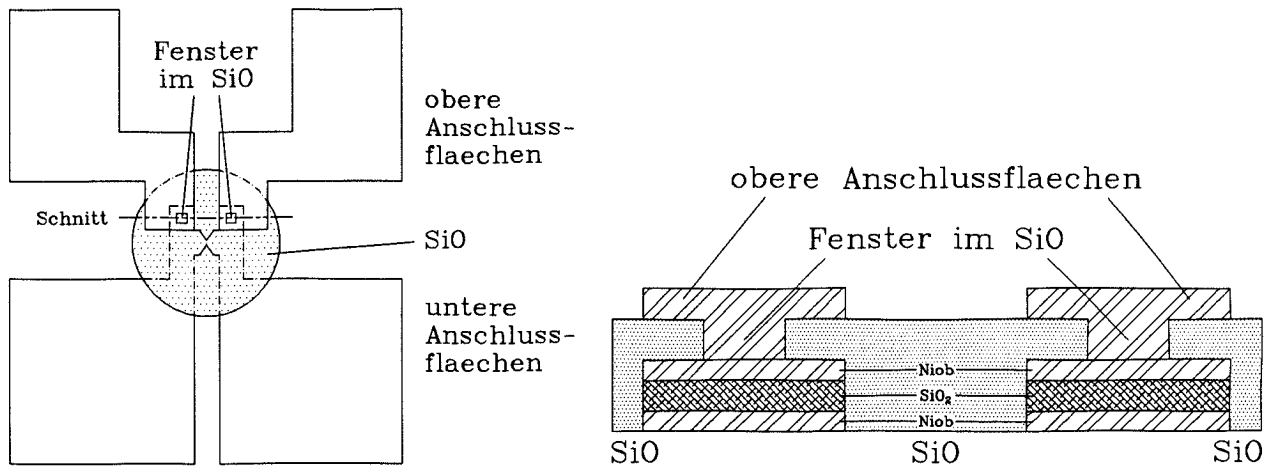


Abb. 3.8 Fertige Struktur des Schalters. Das linke Bild zeigt eine Draufsicht, das rechte einen Schnitt durch die Fenster in der Kantenisolation.

3.2 Herstellung der Brücken mittels Lift-off

3.2.1 Strukturierung der unteren Anschlußflächen

Auf ein sorgfältig gereinigtes Substrat aus Al_2O_3 wird mit den in 3.1.7 beschriebenen Parametern 40 nm Niob zerstäubt. Aus dieser Schicht werden die unteren Anschlußflächen strukturiert.

Dazu wird das Substrat mit dem Fotolack AZ 1350 beschichtet. Nach dem Trocknen wird der Lack 60 s lang belichtet und in 0.2 molarer NaOH entwickelt.

Die Struktur kann nun entweder reaktiv in SF_6 oder naßchemisch in einer Mischung von 30% HF, 30% HNO_3 und 40% H_2O geätzt werden. Da die Strukturen relativ groß ($> 50 \mu\text{m}$) sind und ein Unterätzen in Kauf genommen werden kann, bietet es sich an, naßchemisch zu ätzen. In diesem Fall dauert der Ätzvorgang ca. 2 s, während das reaktive Ionenätzen mit dem Abpumpzyklus ca. 35 min dauert.

Ätzt man naßchemisch, so ist die Ätzung sorgfältig zu beobachten und nach dem Durchätzen der Schicht sofort mit destilliertem Wasser zu stoppen, da auch der Fotolack mitgeätzt wird und die Schicht unter Umständen geschädigt wird. Abb. 3.9 zeigt die geätzte Struktur.

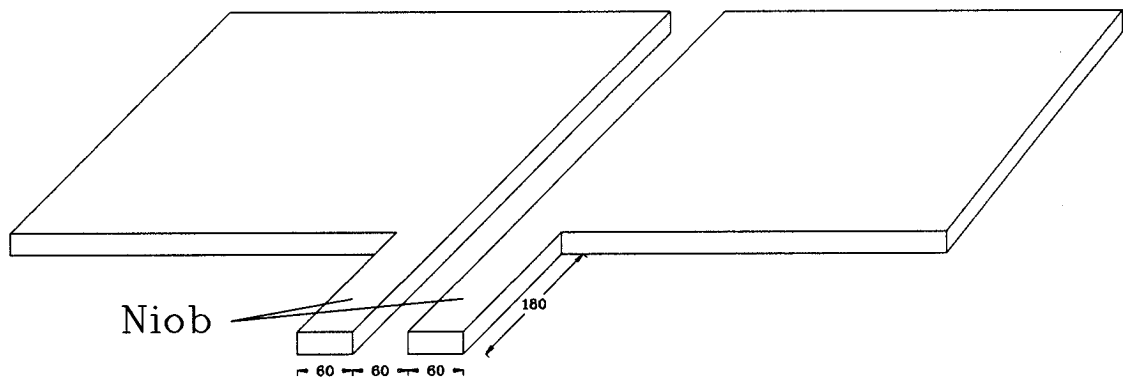


Abb. 3.9 Struktur der unteren Anschlußflächen. Die Maße auf der Zeichnung sind in μm angegeben.

3.2.2 Strukturierung der Brücken im Lift-off

Im Gegensatz zum Ätzen werden beim Lift-off die Stellen, an denen das aufzubringende Material auf dem Substrat bleiben soll, belichtet (vgl. 3.1.6). Entfernt man nach dem Aufbringen der Schicht den Fotolack z. B. in Aceton, so wird die Schicht an den Stellen, an denen sich der Lack befindet, mit weggenommen.

Dabei ist entscheidend, daß die Schicht an den Kanten sauber abreißt. Ansonsten bleiben entweder Reste zurück oder die Schicht wird auch im Bereich der Struktur mit abgelöst. Dieser Vorgang wird umso kritischer, je kleiner die zu erzeugenden Strukturen sind.

Bei Brücken mit Abmessungen in der Größenordnung von 300 nm führt dies entweder zu undefinierten Brückenbreiten oder sofort zu einer Zerstörung der Brücke.

Es ist also zum einen darauf zu achten, daß der Fotolack nicht dünner ist als die aufgebrachte Schicht. Sonst ist die Schicht auf dem Lack zusammenhängend (Abb. 3.10a) und reißt an der Kante unsauber ab.

Zum anderen sollten die Kanten des entwickelten Lackes möglichst steil oder sogar überhängend sei. Die Schicht ist sonst wiederum zusammenhängend, da sich das Material auch auf der schrägen Kante niederschlägt (Abb. 3.10b). Beim Lösen des Lackes ergeben sich die gleichen Probleme wie oben beschrieben.

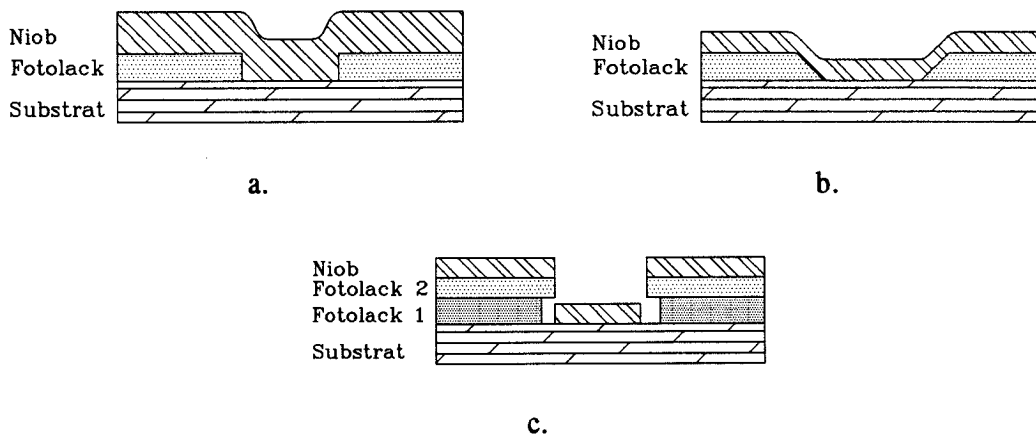


Abb. 3.10 Verschiedene Lackstrukturen beim Lift-off: Die zu strukturierende Schicht (hier: Niob) ist dicker als der Lack (a.); der Lack hat schräge Kanten (b.); zwei Lacksorten unterschiedlicher Empfindlichkeit, man erhält eine überhängende Kante (c.) (näheres im Text).

Gut für den Lift-off Prozeß eignet sich ein Schichtsystem verschiedener Lacke. Dazu wird als untere Schicht ein Lack mit höherer Empfindlichkeit, als obere einer mit geringerer Empfindlichkeit aufgebracht. Belichtet und entwickelt man nun, so ist der untere Lack etwas überbelichtet und wird stärker entwickelt als der obere. Die Struktur wird dadurch unten breiter, so daß man eine überhängende Kante erhält (Abb. 3.10c). Die aufzubringende Schicht haftet nun nicht an der Lack-

kante; man erhält eine gut definierte Struktur.

Die Breite der Struktur wird im Wesentlichen von der "Öffnung" im oberen Lack bestimmt, sieht man von geringen Abweichungen aufgrund von Streuung oder durch schräges Auftreffen der zerstäubten Atome oder Moleküle ab.

Zum Belichten werden die Brückenstrukturen auch hier mit dem Elektronenstrahl in Polymethylmetacrylat geschrieben. Die beiden Lackarten, die zusammen nach dem Entwickeln die oben beschriebenen Kanten bilden, sind PMMA mit unterschiedlichem Molekulargewicht. Als untere Schicht wird PMMA mit einem Molekulargewicht von 50 K mit $4000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ aufgeschleudert und 30 min. bei 170°C polymerisiert.

Danach wird der auch für das Ätzverfahren verwendete PMMA mit Molekulargewicht von 950 K ebenfalls mit $4000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ aufgeschleudert und 30 min. bei 170°C polymerisiert.

Man erhält so eine Schichtfolge von 150 nm $\text{PMMA}_{50\text{K}}$ und 600 nm $\text{PMMA}_{950\text{K}}$.

Während der Elektronenstrahl-Lithographie lädt sich das isolierende Substrat auf. Dies führt zu einer Ablenkung bis hin zum Austasten des Elektronenstrahls.

Um dies zu vermeiden, wird der PMMA vor dem Belichten einige nm dick mit Kupfer bedampft. In diesem Fall muß auf das vorherige Reinigen durch Ionenätzen verzichtet werden, da die im Plasma vorhandenen Elektronen den PMMA diffus belichten würden.

Die Kupferschicht ist so dünn, daß die Elektronen den Lack noch gut belichten können.

Die zu belichtende Struktur ist in Abb. 3.11 gezeigt. Sie ist wieder aus Rechtecken und auf der Spitze stehenden Quadraten zusammengesetzt. Der Überlapp der Quadrate definiert hier die Brückenbreite.

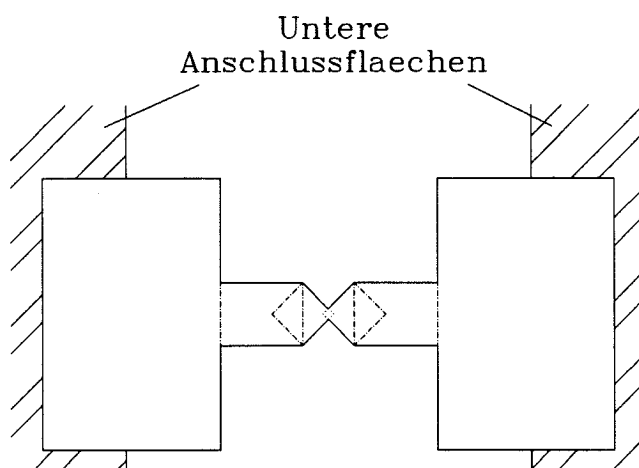


Abb. 3.11 Mit dem Elektronenstrahl belichtete Struktur der Brücke und der Flächen zur Kontaktierung.

Die rechtwinklig an die eigentliche Struktur angesetzten Rechtecke dienen zur Kontaktierung der oberen Brücke. Der Steg in der Verlängerung der Brücke ist zu schmal, um in dem SiO zur Kantenisolation fotolithographisch die $22\text{ }\mu\text{m} \times 15\text{ }\mu\text{m}$ großen Anschlußfenster für die obere Brücke zu definieren.

Es wird mit einer Belichtungszeit von $150\text{ }\mu\text{s}$ pro Punkt bei einem Probenstrom von 30 pA und einer 503-fachen Vergrößerung belichtet.

Vor dem Entwickeln wird die Kupferschicht in einer gesättigten FeCl_3 -Lösung entfernt. Diese greift den PMMA nicht an.

Die Entwicklung erfolgt wie in 3.1.5 beschrieben.

Das so vorbereitete Substrat wird in die Vakuumanlage zum Aufbringen des Trilayers gebracht. Die Deposition der Schichten erfolgt im Wesentlichen mit den in 3.1.1 beschriebenen Parametern. Es sei hier nur auf die Änderungen eingegangen:

Das Substrat muß vor dem Aufbringen der Schichten sorgfältig ionengeätzt werden, da die untere Niobschicht durch den Kontakt mit dem Sauerstoff in der Luft oxidiert ist und nach dem Aufstäuben von Niob ein Tunnelkontakt entstehen würde.

Sowohl beim Ionenätzen als auch bei der Schichtdeposition ist darauf zu achten, daß das Substrat nicht zu warm wird.

Ansonsten versetzen sich die zwei Schichten PMMA gegeneinander, so daß man zwei um $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ verschobene Strukturen erhält. Damit ist aber häufig ein Kurzschluß verbunden, da sich das SiO_2 nicht mehr zwischen beiden Schichten befindet.

Die Wasserkühlung des Substrathalters reicht nicht aus, die anfallende Wärme ausreichend abzuführen. Daher muß der Prozeß immer wieder durch Pausen unterbrochen werden.

Es ergibt sich folgender Ablauf:

- Das Ionenätzen wird alle 30 s für 1 min unterbrochen.
- Niob wird wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben zerstäubt.
- Das SiO_2 -Target wird beim Zerstäuben jede Minute für 1.5 min weggedreht, so daß sich das Substrat abkühlen kann.

Nach der Schichtdeposition wird der PMMA in Aceton entfernt und die Brücke so im Lift-off strukturiert (Abb. 3.12).

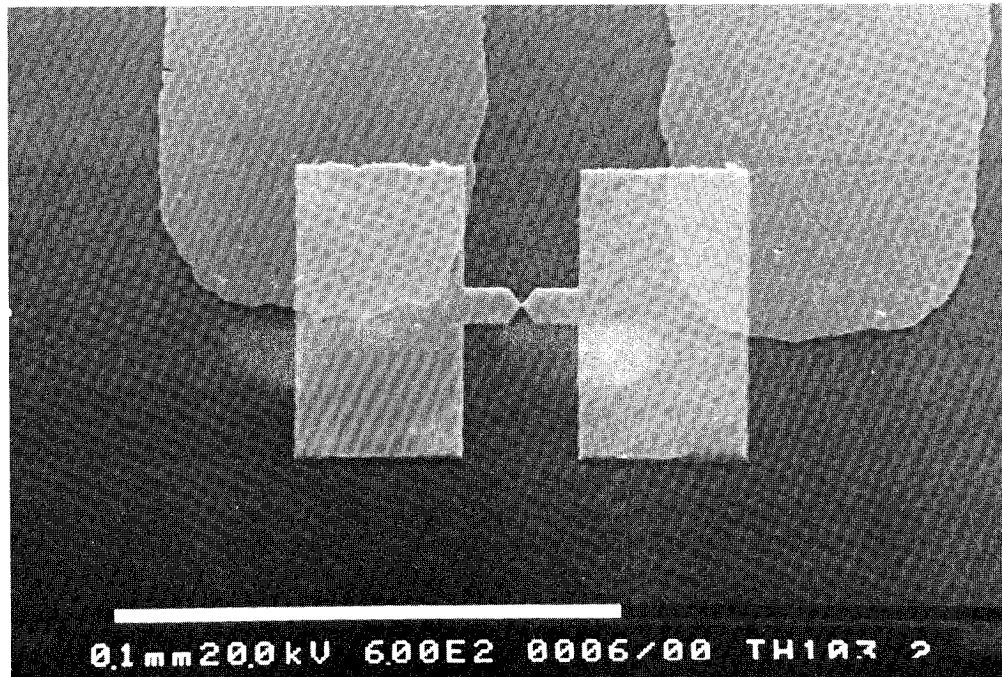


Abb. 3.12 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der im Lift-off hergestellten gestapelten Mikrobrücken.

Die Kantenisolation und das Aufbringen der oberen Anschlußflächen erfolgen wie in den Kapiteln 3.1.6 und 3.1.7 beschrieben.

3.3 Diskussion der beiden Verfahren

An dieser Stelle sei auf die Probleme der einzelnen Verfahren kurz eingegangen:

Werden die Brücken reaktiv ionengeätzt, so treten einige Schwierigkeiten auf.

Aufgrund der sehr schmalen Strukturen verringert sich die Ätzrate, da die Reaktionsprodukte nicht mehr so schnell entfernt werden wie bei großen Flächen. Da der PMMA mit einer Rate von etwa $1.5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ ebenfalls geätzt wird, ist unter Umständen der Lack vor dem Durchätzen der Schicht abgetragen.

Hinzu kommt, daß der PMMA über der Brücke dünner ist als an den übrigen Stellen. Der Grund dafür ist der sogenannte Proximity-Effekt: Die Belichtung erfolgt überwiegend durch die langsamen Elektronen, die schnellen werden von dem Substrat gebremst reflektiert und verbreitern so den eigentlich belichteten Punkt. Beim Entwickeln werden nun die durch die Rückstreuелеktronen belichteten Stellen etwas mit entwickelt. Dadurch ist der PMMA im Bereich der Brücke nicht mehr dick genug, um während der Ätzung stehen zu bleiben. Die obere Brücke wird so mit weggeätzt. Eine dritte Schicht PMMA aufzuschleudern bringt Probleme mit dem Verhältnis Strukturbreite zu Lackdicke mit sich. Man würde beim Entwickeln sehr schräge Kanten erhalten.

Senkrecht sind die Kanten wegen des Proximity-Effekts allerdings auch so nicht. Durch das Mitätzen des Lacks erhält man dadurch eine immer schmäler werdende Struktur mit dem Ergebnis, daß die Brücken nach unten trapezförmig breiter werden.

Abhilfe könnte ein Ätzstopper, z.B. Aluminium, bringen.

Dazu wird in situ nach der Deposition des Trilayers 6 nm Aluminium auf das Substrat zerstäubt. Wie bereits erwähnt, ist in der Vakuumapparatur eine entsprechende Kathode eingebaut.

Zerstäubt wird bei einem Argondruck von 2 Pa mittels Hochfrequenz. Die Leistung wird so eingestellt, daß ein DC-Potential von 1.5 kV anliegt. Man erhält eine Zerstäubungsrate von $0.5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Da sich Aluminium in NaOH ätzen läßt, wird die Al-Schicht beim Entwickeln des Fotolacks mit weggeätzt. Dadurch wird das Strukturieren der Anschlußflächen nicht behindert.

Nach dem Entwickeln des PMMA muß die Aluminiumschicht in NaOH geätzt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß im Bereich der Brücke das Aluminium nicht durch Unterätzen mit weggenommen wird.

Der darauffolgende Ätzvorgang mit SF_6 erwies sich jedoch als problematisch. Die Ätzrate war drastisch verschlechtert, so daß der PMMA völlig weggeätzt wurde (und somit auch die nicht durch den Ätzstopper geschützten Anschlußflächen).

Die angeätzten Stellen in der Nähe der Brücke sahen meistens schwarz aus. Es ist möglich, daß das Aluminium während des Polymerisierens des PMMA bei 170°C zu Teil in die Niobschicht diffundiert ist und beim Kontakt mit dem Fluor Aluminiumfluorid gebildet hat, welches nicht abdampft.

Die Schwierigkeiten beim Lift-off Prozeß liegen im Wesentlichen in der Versetzung der Lackschichten auf Grund zu hoher Substrattemperaturen (Abb. 3.13).

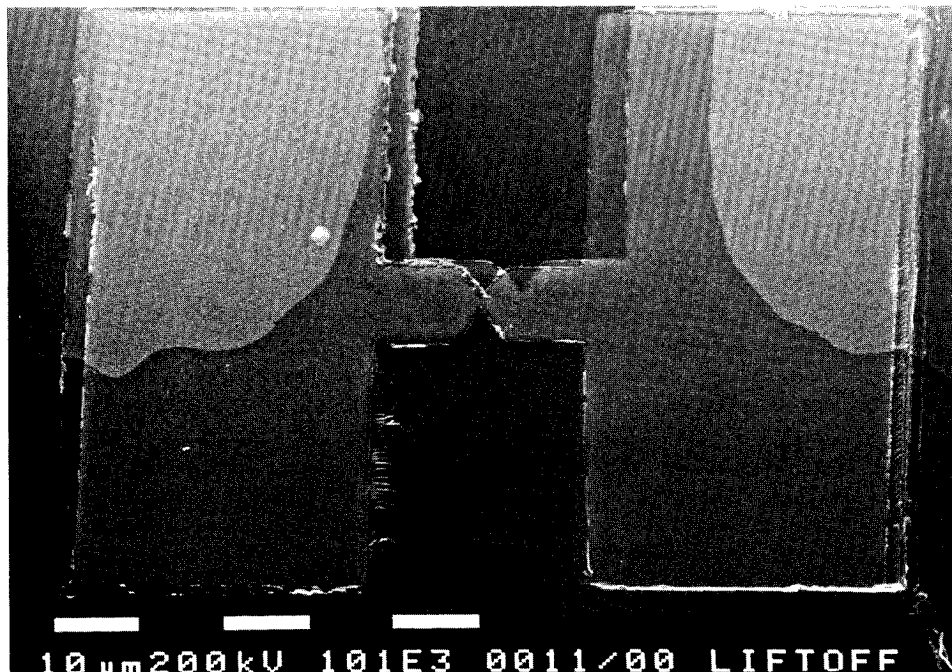


Abb. 3.13 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Versetzungen der Lackschichten aufgrund zu hoher Substrattemperaturen.

Eine mögliche Ursache dafür sind Spannungen in den Lackschichten. Darauf deuten auch beobachtete Verformungen der Anschlußflächen hin, die zum Teil zusammengezogen sind. Ein weiteres Problem sind ungenaue Abreißkanten nach dem Lift-off. Hängengebliebene Niobreste können Kurzschlüsse oder undefinierte Brückenbreiten hervorrufen. Ebenso sind die Versetzungen häufig Ursache von Kurzschlüssen.

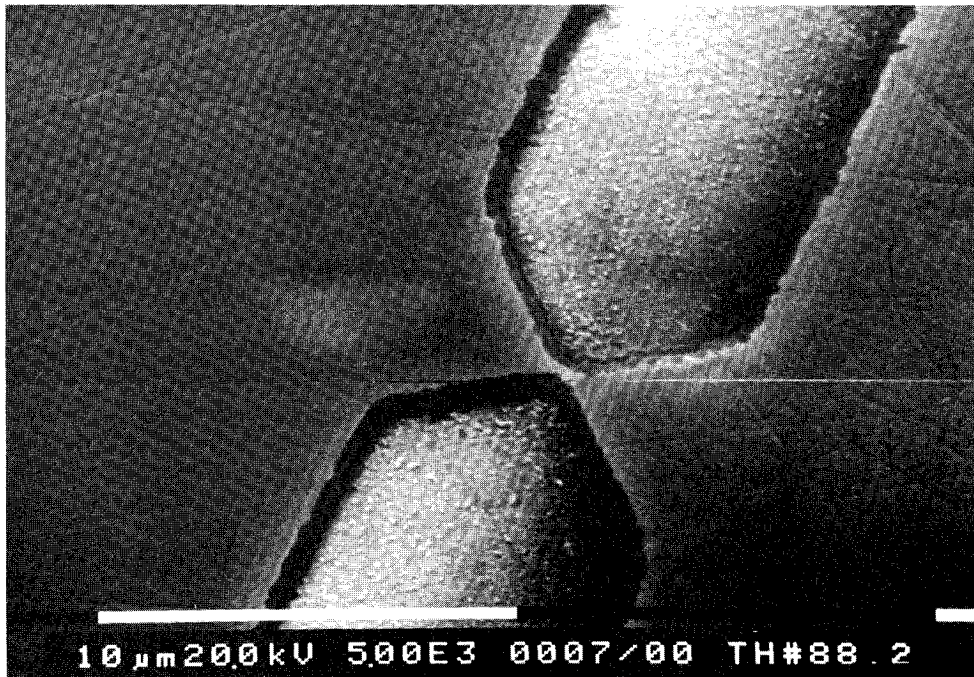


Abb 3.14 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der geätzten Brückenstruktur. Man erkennt deutlich die nach unten größer werdende Breite der Brücken.

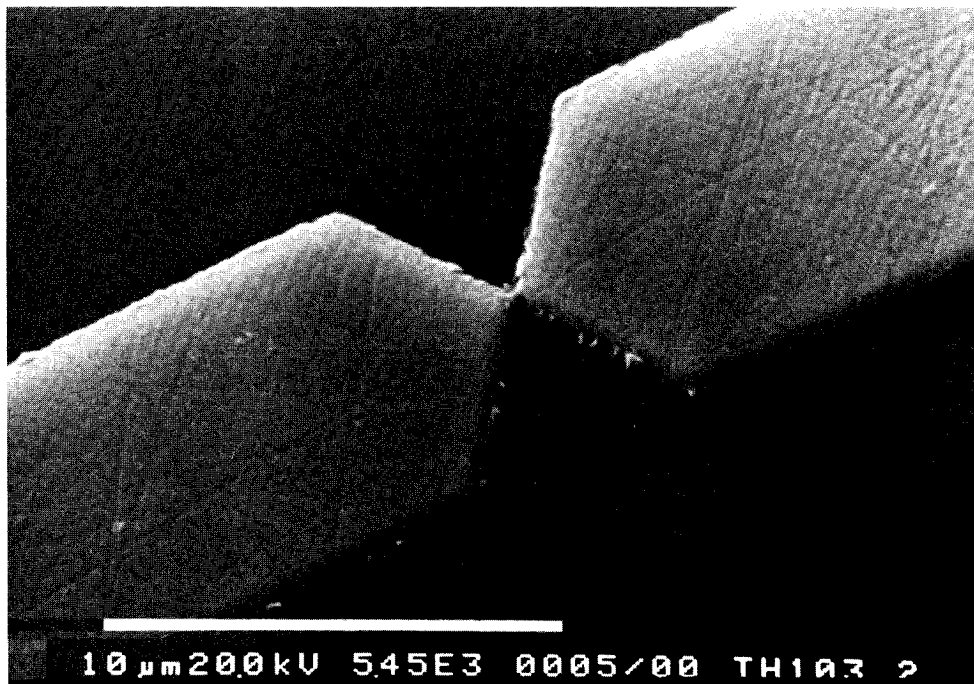


Abb. 3.15 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der im Lift-off hergestellten Brückenstruktur.

4. Messung

4.1 Meßelektronik und Probenhalter

Die Elektronik besteht im Wesentlichen aus zwei Stromquellen und bietet die Möglichkeit, die U-I-Kennlinie auf einem Oszillographen und einem x-y-Schreiber darzustellen.

Die eine Stromquelle liefert einen kontinuierlich einstellbaren Strom von 0 mA bis 40 mA. Sie liefert den Strom für die treibende Brücke.

Die andere Stromquelle wird von einem Dreiecksgenerator angesteuert. Damit kann ein zeitlich veränderlicher und zu 0 symmetrischer Strom von maximal ± 20 mA in die zu messende Brücke eingeprägt werden.

Sowohl der maximale Strom als auch die Frequenz des Dreiecksgenerators sind regelbar.

Der Dreiecksgenerator kann abgeschaltet werden, so daß die Möglichkeit besteht, einen konstanten Strom in die Brücke einzuprägen und sich so auf der Kennlinie an einen festen Punkt zu setzen.

Beide Stromquellen können wechselseitig sowohl auf die untere als auch auf die obere Brücke geschaltet werden. Damit können beide Brücken gemessen werden, ohne sie aus dem Heliumbad zu nehmen und neu zu kontaktieren.

Die zum eingeprägten Strom proportionale Spannung wird über einen Operationsverstärker und einen Tiefpaß auf einem Oszillographen und einem x-y-Schreiber dargestellt, ebenso die über der Brücke abfallende Spannung.

Die Brücken sind sehr empfindlich gegen statische Aufladungen. Schon das Anschließen eines Kabels kann zum Durchbrennen der Brücken führen. Um die Zuleitungen zu den Brücken möglichst kurz zu halten, wurde die Elektronik in den Probenhalter integriert. Zur netzunabhängigen Spannungsversorgung werden NiCd-Akkumulatoren verwendet. Beim Umschalten der Stromquellen ist darauf zu achten, daß die Brücken über einen Widerstand an Masse liegen, so daß eventuell auf den Meßkabeln befindliche Ladungen abfließen können. Die Leitungen zu den peripheren Geräten sind durch Operationsverstärker abgekoppelt.

Der Probenhalter besteht aus dem Gehäuse für die Elektronik und einem daran angebrachten Edelstahlrohr von 20 mm Durchmesser. Am Ende des Rohres wird die auf einer kupferbeschichteten Platine montierte Probe eingebaut. Die Kontaktierung der Anschlußflächen auf dem Substrat mit der Platine erfolgt durch Bonden mit Al-Drähten (Abb. 4.1).

Substrat



Cu-kaschierte
Platine



Ge-Widerstand

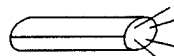


Abb. 4.1 Explosionszeichnung der Probenhalteranordnung. Die Klammern zum Fixieren des Substrats auf der Platine sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

Als mechanischer Schutz wird eine Messinghülle über das Substrat geschraubt. Da die Brücken mit einer I_c -Änderung auf Magnetfelder reagieren, wurde um die Hülle eine Bleifolie als magnetische Abschirmung gelötet (Blei: $T_c = 7.2$ K).

Die Zuführung von der Elektronik zu den Brücken besteht aus Koaxialkabeln zur Abschirmung von Streufeldern.

4.2 Temperaturmessung

Die Messungen der Brückenkennlinien und des Schaltverhaltens der Brücken erfolgten in der Regel in flüssigem Helium bei 4.2 K.

Um jedoch die Abhängigkeit des kritischen Stroms von der Temperatur messen zu können, wurde ein Germaniumwiderstand als Temperaturfühler in den Probenhalter eingebaut.

Dazu wurde in die Platine, die die Probe aufnimmt, ein Loch geschnitten und der Widerstand über eine Feder gegen das Substrat gedrückt. Die Temperatur kann so in Höhe und in direktem Kontakt mit dem Substrats gemessen werden (vgl. Abb. 4.1).

Der Germaniumwiderstand wurde in einem Verdampferkryostaten kalibriert. Die Temperatur konnte mit Hilfe eines Dampfdruckthermometers bestimmt werden. Trägergas war im Bereich von 14 - 20 K Wasserstoff, im Bereich von 2.9 - 4.2 K Helium.

Die Meßpunkte in diesen Bereichen wurde durch eine Ausgleichsfunktion untereinander verbunden.

Die Temperatur wird durch Messen des Spannungsabfalls über dem Widerstand in einer Vierpunktmessung bei konstantem eingepprägtem Strom bestimmt.

5. Gleichspannungsverhalten der Brücken

5.1 Kritischer Strom

Der kritische Strom eines Supraleiters ist unter anderem von der Temperatur abhängig. Für einen eindimensionalen Supraleiter beschreibt die Ginzburg-Landau Theorie diese Abhängigkeit mit folgender Gleichung:

$$I_c(T) \propto (1+t^2)^{1/2} (1-t^2)^{3/2}, \quad (24)$$

wobei $t = T/T_c$ die reduzierte Temperatur ist [5.1].

Für Temperaturen nahe T_c verhält sich der kritische Strom von Mikrobrücken wie

$$I_c(T) \propto (1-t)^\alpha. \quad (25)$$

Der Exponent α variiert dabei zwischen 1 und 2.5.

Ist $\alpha = 2.5$, so verhält sich die Brücke wie ein inhomogener Typ-II Supraleiter [5.2].

Viele Arbeitsgruppen beobachteten überwiegend Brücken mit einem α gleich oder etwas kleiner als 2.5, so auch Jahn und Kao [5.3] an Brücken aus Zinn, wobei ihre Brücken $1 \mu\text{m}$ breit waren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Brücken strukturiert, bei denen $1.1 \leq \alpha \leq 2.3$ ist.

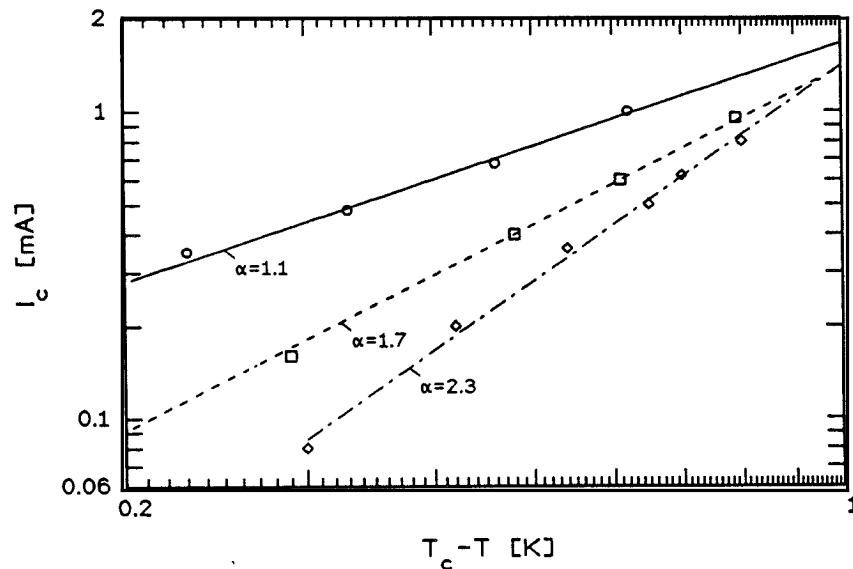


Abb. 5.1 Temperaturabhängigkeit des kritischen Stroms I_c für einige Mikrobrücken. Die Linien zeigen den Verlauf $I_c \propto (T_c - T)^\alpha$.

Trägt man den kritischen Strom gegen T_c -T doppelt-logarithmisch auf, so entspricht die Steigung der Kurve dem Exponent α . Einige der gemessenen $I_c(T)$ -Kurven mit verschiedenen α sind in Abb. 5.1 zu sehen.

Eine eindeutige Abhängigkeit des Exponenten α von der Brückenbreite ist in unserem Fall nicht zu beobachten, da sowohl die Brücke mit $\alpha=1.1$ als auch die mit $\alpha=2.3$ 300 nm breit sind. Die Brücke mit $\alpha=1.7$ ist 500 nm breit. Prinzipiell beobachtet man für Brücken breiter als 300 nm einen Exponenten $\alpha > 1.5$.

Die Änderung des unteren kritischen Stroms I_{cmin} mit der Temperatur ist nicht so stark wie die des kritischen Stroms I_c . Den typischen Verlauf beider Kurven zeigt Abb. 5.2.

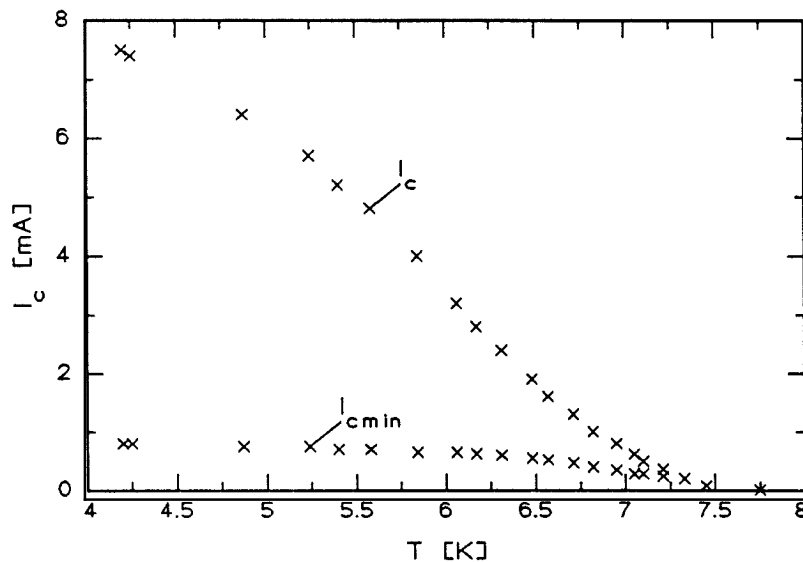


Abb. 5.2 Temperaturänderung des unteren kritischen Stroms I_{cmin} und des kritischen Stroms I_c einer Probe mit der Temperatur. Die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit ist deutlich zu sehen.

5.2 Hysterese

Alle im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Brücken zeigen eine Hysterese in der U-I-Kennlinie. Bei Brückenbreiten von 300 nm beträgt der kritische Strom typisch 5 mA. Aber auch Brücken mit einem kritischen Strom von 0.7 mA zeigen noch eine Hysterese.

Wie schon in Kapitel 2.3 gezeigt, kann die Dissipation im resistiven Zustand zu einer lokalen Temperaturerhöhung in der Brücke führen.

Dadurch erhöht sich der Widerstand in der Brücke, so daß auch ein Strom kleiner I_c ausreicht, die zur Temperaturerhöhung notwendige Wärme zu generieren. Die Brücke bleibt auch unterhalb von I_c normalleitend.

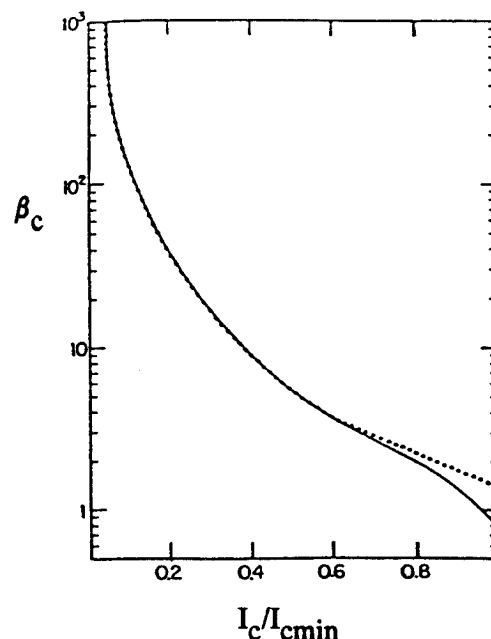
Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, wurde die Hysterese in der U-I-Kennlinie lange Zeit auf das Vorhandensein einer Kapazität zurückgeführt.

Zur Kontrolle der Übereinstimmung mit dem Modell von Stewart und McCumber wird in der Regel der Quotient I_{cmin}/I_c gegen den Logarithmus von $\beta_c = 4\pi e I_c R^2 C / h$ (McCumber-Faktor) aufgetragen. Die Kapazität wird dabei so abgeschätzt, daß sich eine möglichst gute Übereinstimmung der experimentellen mit der theoretischen Kurve ergibt.

Das Verhältnis I_{cmin}/I_c der hier gemessenen Brücken liegt zwischen 0.07 und 0.63. Nach dem obigen Modell entsprechen diese Werte Kapazitäten von 0.3 pF bis 5.5 fF.

Fulton [5.4] zeigte nun, daß sich die McCumber-Kurve bis $I_{cmin}/I_c = 0.8$ in sehr guter Übereinstimmung wie $I_{cmin}/I_c \propto I_c^{-1/2}$ verhält (Abb. 5.3).

Abb. 5.3 Die durchgezogene Linie zeigt β_c gegen I_{cmin}/I_c aufgetragen; die Punkte zeigen ein Verhalten $I_c^{-1/2} \propto I_{cmin}/I_c$ (nach [5.4])



Genau diese Abhängigkeit erhält man jedoch auch, wenn die Brücke ein $I_c(T)$ Verhalten

$$I_c(T) \propto (1-T/T_c)$$

zeigt und I_{cmin} sich nach dem Hotspotmodell (Gleichung 23) wie

$$I_{cmin}(T) \propto (1-T/T_c)^{1/2}$$

mit der Temperatur ändert.

Abb. 5.4 zeigt die Kurve $I_c^{-1/2}$ gegen I_{cmin}/I_c aufgetragen verglichen mit den Werten einer Brücke. Man erkennt eine gute Übereinstimmung der Werte.

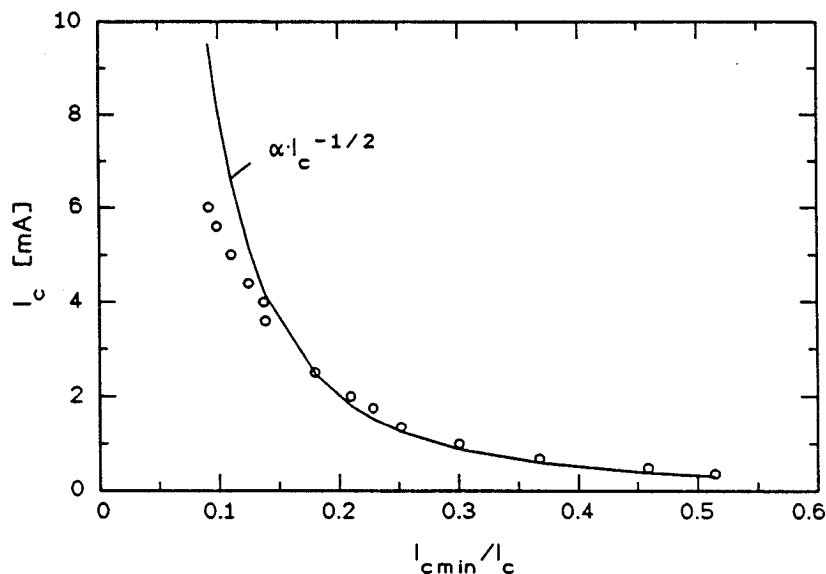


Abb. 5.4 Die durchgezogene Linie zeigt ein Verhalten von $I_c^{-1/2} \propto I_{cmin}/I_c$. Die Punkte sind die Meßergebnisse einer Probe.

Eine Übereinstimmung mit der McCumber-Kurve muß also noch nicht bedeuten, daß die Hysterese in der Kennlinie der Brücken auf eine Kapazität zurückzuführen ist.

Fulton [5.5] zeigte 1974, daß die Hysterese nicht kapazitiv bedingt ist, indem er auch beim Überlagern des eingepprägten Stroms mit einem Wechselstrom von einigen MHz eine Hysterese in der U-I-Kennlinie beobachtete.

Dies sollte nur dann der Fall sein, wenn die Frequenz des Wechselstroms vergleichbar mit der charakteristischen Zeit τ (10^{-12} s mit den bei Fulton gegebenen Parametern) des McCumber-Modells ist.

5.3 Kennlinien

Abb. 5.5 zeigt mit einigen nach dem Hotspotmodell berechnete Kurven, wie sich I_{cmin} in Abhängigkeit von der Brückenbreite und -länge verhält.

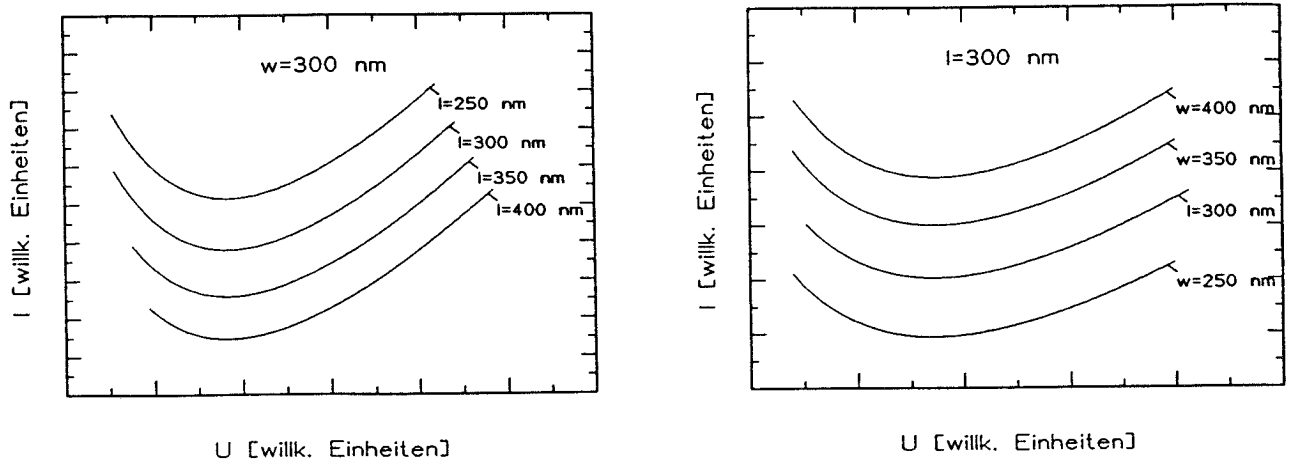


Abb. 5.5 U-I-Kennlinien in der Nähe des unteren kritischen Stroms I_{cmin} . Das linke Bild zeigt Kennlinien für Brücken bei gleichbleibender Breite; das rechte Bild für Brücken bei gleichbleibender Länge.

Für größer werdende Länge bei gleichbleibender Breite sollte I_{cmin} kleiner werden, da die Wärme weniger gut in die Anschlußflächen abgeleitet wird und damit ein geringerer Strom notwendig ist, einen Hotspot zu generieren.

Mit einer Vergrößerung von I_{cmin} ist zu rechnen, wenn die Breite der Brücke bei gleichbleibender Länge vergrößert wird. Durch die bessere Wärmeabfuhr sinkt die Temperatur in der Brücke schon bei größeren Strömen unter T_c .

Dieses Verhalten wird durch die Rechnungen bestätigt.

Den Vergleich einer gemessenen U-I-Kennlinie (Kreise) mit dem Hotspotmodell (durchgezogene Linie) zeigt Abb. 5.6.

Die theoretischen Kurve wurde mit Hilfe der Gleichungen (23), (24) und (25) berechnet.

Im resistiven Bereich der Kennlinie wurde der spezifische Widerstand ρ angefitet. Danach wird die thermische Leitfähigkeit K so gewählt, daß die theoretische Kurve bei I_{cmin} ein Minimum hat.

Die Abhängigkeit der Kurve von dem Wärmeübergang in des Substrat und in Helium ist dabei klein, da aufgrund der Abmessungen der Brücke die meiste Wärme in die Anschlußflächen abgeleitet wird.

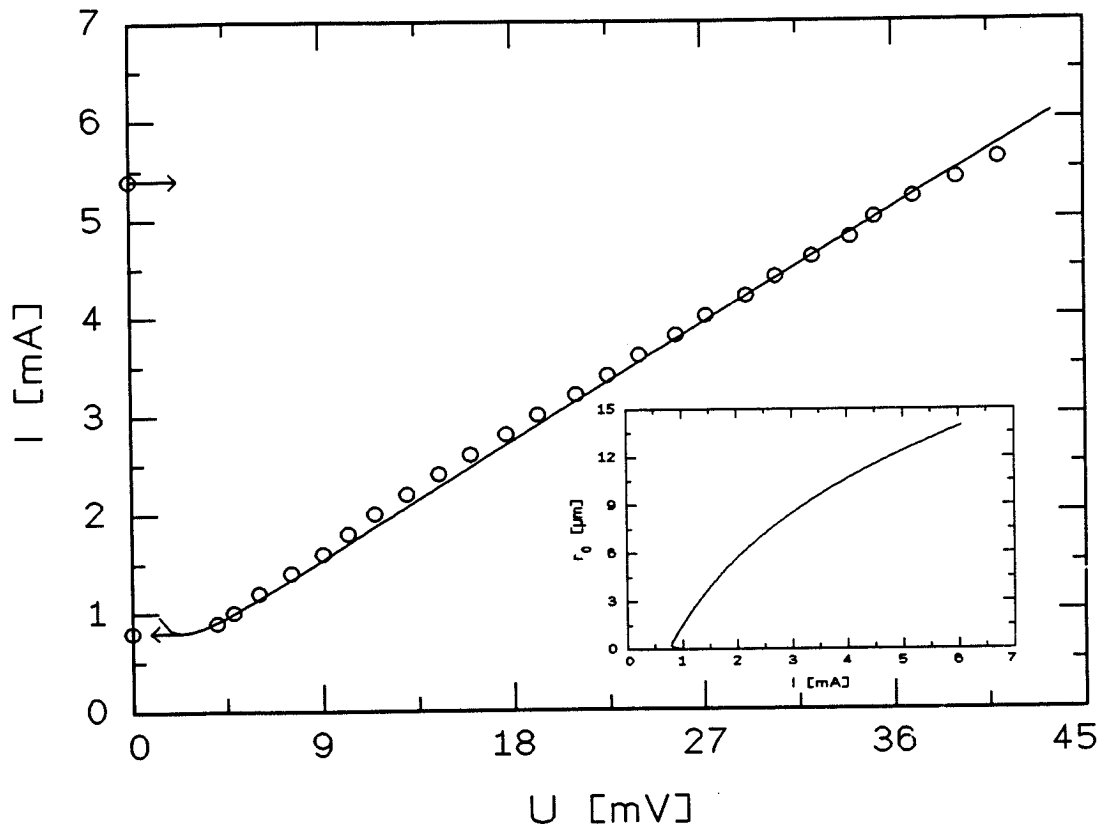


Abb. 5.6 Vergleich einer gemessenen U-I-Kennlinie (Kreise) mit einer nach dem Hotspotmodell berechneten Kennlinie (durchgezogene Linie). I_c und I_{cmin} sind jeweils durch Pfeile gekennzeichnet. Die kleine Abbildung zeigt den Radius des zum jeweiligen Strom gehörenden Hotspots.

Man erhält für den in Abb. 5.6 gezeigten Verlauf $\rho = 54 \mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ und $K = 8.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Diese Werte stimmen mit denen in der Literatur recht gut überein [2.12].

Die Pfeile geben den Sprung in den resistiven Zustand bei I_c und den Rücksprung in den spannungslosen Zustand bei I_{cmin} an.

In der kleinen Abbildung ist der dem jeweiligen Strom entsprechende Radius des Hotspot aufgetragen.

6. Temperaturverteilung in den Brücken

Mit Hilfe der Gleichungen (20) - (22) läßt sich aufgrund des Wärmetransports die Temperaturverteilung in der Brücke und den angrenzenden Bereichen der Anschlußflächen ausrechnen.

Abb. 6.1 zeigt einige Temperaturverteilungen für unterschiedliche Hotspot-Radien.

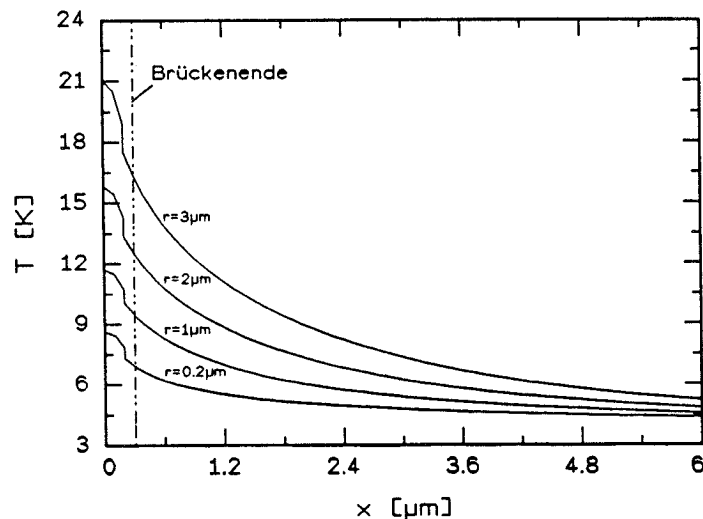


Abb. 6.1 Temperaturverteilung in einer Brücke für verschiedene Hotspotradien r .

Der Nullpunkt auf der Abszisse entspricht dem Mittelpunkt der Brücke. Das Brückenende ist durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.

Es zeigt sich, daß die Temperatur mit Größerwerden des Hotspots rasch ansteigt. Erreicht die Temperatur in der Brücke den Schmelzpunkt von Niob ($T=2741\text{ K}$), so brennt die Brücke durch. Für die in Abbildung 5.6 gezeigte Kurve wäre dies bei einem eingepreßten Strom von 16 mA der Fall.

Allerdings weichen die Rechnungen für hohe Temperaturen von den tatsächlichen Werten vermutlich ab.

Zum einen wird der spezifische Widerstand als konstant angenommen, er müßte durch eine Funktion der Temperatur ersetzt werden.

Zum anderen fängt das flüssige Helium bei höheren Temperaturen an, Blasen zu bilden. Dadurch wird der Wärmeleitkoeffizient größer [6.1], so daß die Brücke bei gegebenem Strom nicht so heiß wird.

7. Mikrobrücken als Schalter

Die Schaltzustände einer Brücke seien wie folgt definiert:

"Aus" entspricht einer normalleitenden oder resistiven, "Ein" einer supraleitenden Brücke. Dabei ist es von Vorteil, wenn der Normalwiderstand so groß wie möglich ist. Die hier gemessenen Brücken hatten Normalwiderstände von $6\ \Omega$ - $12\ \Omega$, durch Hintereinanderschalten mehrerer Brücken lassen sich auch größere Widerstände erreichen.

Eine Brücke kann durch verschiedene äußere Einflüsse normalleitend oder resistiv werden:

- Thermisch durch Überschreiten der kritischen Temperatur
- magnetisch durch Erzeugen von Flußfäden in der Brücke
- durch Hochfrequenzeinstrahlung

Diese drei Prozesse wurden auf ihre Eignung zum Schalten einer Brücke untersucht.

7.1 Thermisches Schalten

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden zwei Brücken, durch eine Isolierschicht getrennt, direkt übereinander präpariert.

Wird in eine der Brücken nun ein Strom eingeprägt und überschreitet dieser I_c , so wird die Brücke normalleitend. Dabei verursacht die dissipierte Energie eine Temperaturerhöhung in der Brücke.

Wie oben gezeigt, wird die Temperatur schnell recht hoch. Dadurch wird auch die zweite Brücke, die ja nur durch $120\ \text{nm}\ \text{SiO}_2$ von der ersten getrennt ist, erwärmt.

Die Temperatur ist dabei lokal größer als die kritische Temperatur, so daß die Brücke normalleitend wird. Sie wird also geschaltet.

Der Umschaltpunkt ist der kritische Strom der treibenden Brücke.

Gemessen wurde der Schaltvorgang, indem in die zu schaltende Brücke ein Strom kleiner I_c eingeprägt und der Übergang in den resistiven Zustand beobachtet wurde.

Dieser Übergang erfolgte nicht langsam durch eine Reduzierung von I_c der zu schaltenden Brücke bei Erhöhung des Stroms über I_c durch die treibende Brücke. Die zu schaltende Brücke springt schlagartig in den resistiven Zustand.

Daraus folgt, daß die erzeugte Temperatur in der treibenden Brücke so groß ist, daß am Ort der zu schaltenden Brücke T_c überschritten wird.

Wird der Strom durch die treibende Brücke zurückgenommen, so bleibt diese auch unterhalb von I_c aufgrund der Hysterese resistiv. Am Zustand der zu schaltenden Brücke ändert sich zuerst nichts. Ab einem bestimmten Strom wird in der Kennlinie der zu schaltenden Brücke eine Hysterese sichtbar, wobei mit Verringerung des Stroms durch die treibende Brücke der kritische Strom der zu schaltenden wächst (Abb. 7.1).

Die Temperatur am Ort der zu schaltenden Brücke ist dann kleiner als T_c , jedoch größer als die Badtemperatur von 4.2 K.

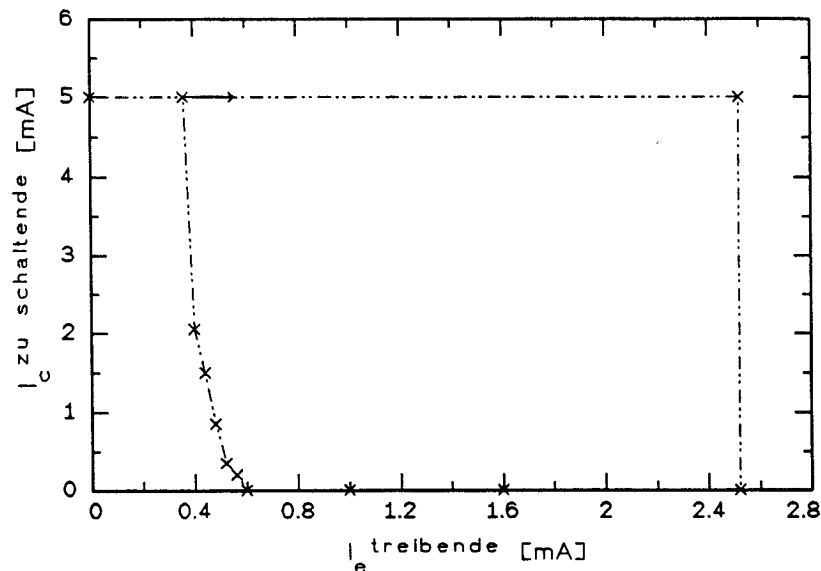


Abb. 7.1 Verlauf des kritischen Stroms einer zu schaltenden Brücke in Abhängigkeit von dem Strom durch die treibende Brücke. Die Durchlaufrichtung der Kurve ist durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Diese Änderung des kritischen Stroms mit der Temperatur ist ein weiterer Hinweis auf die thermische Natur der Hysterese.

Wird bei der treibenden Brücke I_{cmin} erreicht, so wird diese supraleitend und damit auch die zu schaltende Brücke.

Es besteht aber auch die Möglichkeit, daß die Temperatur an der zu schaltenden Brücke bis zum Erreichen von I_{cmin} der treibenden Brücke größer als T_c ist. Dann zeigt die zu schaltende Brücke auch beim Verringern des Stroms durch die treibende Brücke keine Hysterese in ihrer U-I-Kennlinie. Der Rücksprung in den spannungslosen Zustand erfolgt schlagartig. Die Kurve in Abb. 7.1 hat dann die Form eines Rechtecks. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn eine Brücke mit großem kritischem Strom eine mit kleinem kritischen Strom schaltet.

Aufgrund der Hysterese verhalten sich die Brücken für eingeprägte Ströme $I_{cmin} < I_e < I_c$ wie ein Speicher. Der Betriebsstrom der zu schaltenden Brücke reicht aus, den Hotspot aufrecht zu erhalten, auch wenn die treibende Brücke wieder supraleitend ist.

Der "Speicher" kann durch eine kurzzeitige Reduzierung des eingepprägten Stroms unter I_{cmin} wieder zurückgesetzt werden.

Dieses Problem tritt auch bei Verwendung von Tunnelkontakten als kryoelektronische Bauelemente auf [7.1].

Im getakteten Betrieb (z.B. Computer) kann ein solches Bauelement mit jedem Zyklus zurückgesetzt werden. Ebenso lassen sich Frequenzteiler aufbauen, da in jeder Periode ein Nulldurchgang erfolgt.

7.2 Magnetisches Schalten

Neben der Temperatur ist der kritische Strom eines Josephson-Kontaktes auch vom Magnetfeld abhängig.

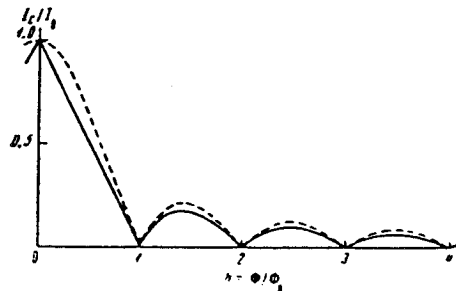


Abb. 7.2 Abhängigkeit des kritischen Stroms I_c vom magnetischen Fluß durch den Kontakt. Aufgetragen ist $I_c(\Phi)/I_c(\Phi=0)$ gegen den auf Φ_0 normalisierten Fluß.

Wie in Abb. 7.2 zu sehen ist, oszilliert der kritische Strom periodisch mit Φ/Φ_0 , wobei Φ der Fluß durch den Josephsonkontakt und $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Vs das elementare Flußquant ist.

Likharev konnte zeigen, daß im Fall einer breiten Brücke die Abnahme von $I_c(\Phi)$ bis zu einem äußeren Feld $\Phi/\Phi_0 = 1$ linear verläuft [7.2].

Um diesen Effekt zum Schalten einer Brücke zu nutzen, sollte die treibende Brücke in der zu schaltenden einen Fluß $\Phi = n \cdot \Phi_0$, n ganzzahlig, erzeugen.

Für eine grobe Abschätzung der dazu nötigen Felder und Ströme sei die Brücke als ein stromdurchflossener Draht angenommen.

Dann ist das Magnetfeld im Abstand r vom Leiter

$$H = I/(2\pi r). \quad (28)$$

Die Feldlinien verlaufen als konzentrische Kreise um den Leiter. Solch ein Feld wird von beiden Brücken erzeugt, wenn sie von einem Strom durchflossen werden. Das von der treibenden Brücke erzeugte Magnetfeld dringt seitlich in die zu schaltende Brücke ein und verursacht einen Fluß

$$\Phi = \mu_0 \cdot I \cdot l \cdot d / (2\pi r) \quad (29)$$

durch die Brücke der Länge l und Dicke d .

Um einen Fluß $n \cdot \Phi_0$ zu erzeugen, ist ein Strom

$$I = n \cdot 2\pi r \Phi_0 / (\mu_0 \cdot l \cdot d) \quad (30)$$

erforderlich.

Für eine Brücke der Länge 300 nm und einer Dicke von 33 nm ergibt sich ein Strom von 110 mA bei einem Abstand der Brücken von 100 nm und ein Strom von 130 mA bei einem Abstand von 120 nm.

Diese Ströme liegen jedoch weit über den kritischen Strömen der hier betrachteten Brücken.

Vor einer signifikanten magnetischen Beeinflussung wird also der kritische Strom der treibenden Brücke erreicht und so die andere Brücke thermisch geschaltet.

7.3 Schalten durch Hf-Einstrahlung

Die dritte Möglichkeit, eine Brücke in den resistiven Zustand zu versetzen ist die Einstrahlung einer Hochfrequenz-Strahlung. Bei hohen Frequenzen (typ. 10 GHz) zeigt der kritische Strom in Abhängigkeit von der Hf-Leistung ein oszillierendes Verhalten ähnlich einer Besselfunktion [2.5]. Zu niedrigen Frequenzen (typ. $f < 5$ GHz) hin fällt I_c monoton mit steigender Hf-Leistung. Ab einer bestimmten Leistung ist die Brücke dann resistiv.

Strahlt man die Hochfrequenz von außen ein, so ist zum Einkoppeln in die Brücke eine Antenne oder Streifenleitung erforderlich. Diese sind bei der Applikation die größenbestimmenden Elemente. Um eine Verkleinerung des Bauelements zu erreichen ist es sinnvoll, den Oszillator mit auf das Substrat zu integrieren. Damit kann man auch die sonst notwendigen Hf-taugliche Zuleitungen in den Kryostaten vermeiden.

Hier bietet sich als Oszillator die Verwendung einer Brücke als Josephson-Relaxations-Oszillator (JRO) an.

Ein hysteretischer Josephson-Kontakt kann im Falle einer Parallelschaltung mit einer Induktivität anfangen, elektrisch zu schwingen. Zimmerman und Silver [7.3] beobachteten diesen Effekt erstmals, Vernon und Petersen [7.4] identifizierten die Schwingungen als Relaxations-Oszillationen.

Um einen JRO zu erhalten, wird eine der Brücken mit einem Widerstand und einer Induktivität parallelgeschaltet (Abb. 7.3).

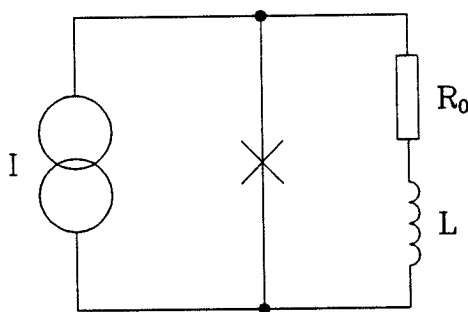


Abb. 7.3 Beschaltung eines Josephsonkontaktes als JRO

Wird nun ein Strom $I_e > I_c$ eingeprägt, so wird die Brücke resistiv mit einem Normalwiderstand R_N . Es fällt eine Spannung $U = I_e R_N$ über dem Kontakt ab. Daher beginnt ein Strom durch die Induktivität zu fließen, der exponentiell ansteigt. Der Strom durch die Brücke fällt dadurch exponentiell ab. Ist dieser unter I_{cmin} gefallen, wird die Brücke wieder supraleitend und von dem eingeprägten Strom abzüglich des in der Induktivität selbstinduzierten Stroms durchflossen. Wird der kritische Strom wieder erreicht, beginnt der Zyklus von neuem.

Man erhält als Frequenz der Schwingung

$$f = R_0 / L [\ln \{ (I_e - I_C) / (I_e - I_{Cmin}) \}]^{-1} \quad (31)$$

und als Ausgangsleistung

$$P_A = I_e^2 R_0^2 / (\pi R_N) \quad (32)$$

[2.5].

Ausführlich werden die Relaxations-Oszillatoren u.a. in den Arbeiten von M. Mück [2.5] und F. Peter [7.5] beschrieben.

Die von einem JRO erzeugte Hf-Leistung kann mittels entsprechend dimensionierter Kondensatoren ($\approx 10 \text{ pF}$) in die schaltende Brücke eingekoppelt werden.

Um die Schaltung kompakt zu halten, wird eine der übereinander strukturierten Brücken als Oszillator geschaltet. Die Induktivität wird dabei durch einen Aluminium-Bonddraht gebildet. Es wurden Frequenzen von einigen 10 MHz gemessen.

Die Hochfrequenzeinstrahlung in die zu schaltende Brücke kann nun auf zwei Arten erfolgen:

Zum einen über eine kapazitive Kopplung. Diese ist jedoch ziemlich schwach, da die Brücken gegeneinander eine Kapazität von $C \approx 1 \text{ pF}$ haben. Damit ergibt sich eine Impedanz von $X_C \approx 1 \text{ k}\Omega$ bei $f = 100 \text{ MHz}$, die groß ist verglichen mit dem Widerstand der Brücke ($R \approx 5 \Omega$).

Um eine optimale Leistungsankopplung zu erhalten, sollte die Impedanz so groß wie der Widerstand der Brücke sein.

Zum anderen ist die Länge der Brücke ($l \approx 300 \text{ nm}$) klein gegen die Wellenlänge der Hochfrequenz ($\lambda = 3 \text{ m}$). Man erhält so nur eine schwache elektrische Ankopplung und da der Strom durch die Brücke beim Betrieb als Oszillator maximal der kritische Strom ist, ist das erzeugte Magnetfeld nicht groß genug, die Brücke zu schalten. Somit ist auch ein Schalten über Einstrahlung einer Hochfrequenz uneffektiv.

Beim Betrieb einer der Brücken als JRO zeigt sich nun generell, daß der Schaltvorgang bei größeren eingepprägten Strömen einsetzt als im Fall thermischen Schaltens.

Damit reduziert sich die Stromverstärkung (kritischer Strom der zu schaltenden Brücke dividiert durch den kritischen Strom der treibenden Brücke; vgl. Kapitel 7.4) erheblich, so daß der Verstärkungsfaktor meist kleiner als 1 wird.

Da der JRO erst bei Strömen $I_e \geq I_c$ schwingt, die Brücken jedoch wie in 7.1 beschrieben beim Überschreiten von I_c der treibenden Brücke schalten, ist eine Verbesserung der Stromverstärkung auch nicht zu erwarten.

Offensichtlich reichen die Frequenz oder die Leistung der von dem JRO emittierten Hochfrequenz nicht zum Schalten der Brücke aus.

Daß die Brücke auch thermisch nicht sofort schaltet, kann wie folgt erklärt werden:

Die Brücke ist nur für die Zeit τ_1 normalleitend, für die Dauer τ_2 ist sie supraleitend. Damit erhält man im Mittel an der zu schaltenden Brücke eine zu geringe Temperatur, um sie zu schalten. Erst bei einem Anstieg des Tastverhältnisses τ_1/τ_2 bei höheren eingepprägten Strömen (Abb. 7.4) wird die Temperatur an der zu schaltenden Brücke so hoch, daß sie resistiv wird.

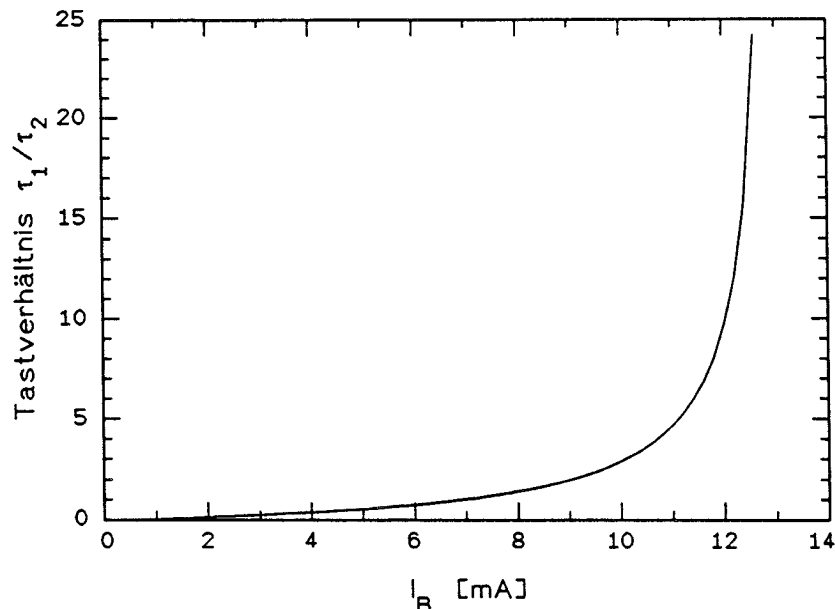


Abb. 7.4 Tastverhältnis τ_1/τ_2 für einen JRO in Abhängigkeit vom eingepprägten Strom (nach [7.5]).

Wegen der gegenseitigen thermischen Beeinflussung der Brücken im resistiven Fall überwiegen aber immer die thermischen Effekte.

7.4 Stromverstärkung

Neben dem eigentlichen Schalten einer Brücke ist auch eine eventuell auftretende Stromverstärkung von Interesse. Nur so lassen sich z.B. digitale Schaltungen realisieren.

Die Stromverstärkung β des Schalters aus zwei Brücken sei wie folgt definiert:

Der maximale Strom, den eine Brücke im supraleitenden Zustand tragen kann, ist der kritische Strom. Wie in den vorigen Kapiteln gezeigt, ist der Schaltpunkt der Brücken der kritische Strom der treibenden Brücke. Damit ergibt sich die Stromverstärkung β als

$$\beta = I_c^s / I_c^t \quad (33)$$

definiert, wobei s für die zu schaltende und t für die treibende Brücke steht.

Die Stromverstärkungen der im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Brücken reicht von 1.5 bis 10.7. Da der Strom, der zum Schalten benötigt wird, gleich dem kritischen Strom der treibenden Brücke ist, ist die Verstärkung umso größer, je weiter die kritischen Ströme der Brücken auseinanderliegen.

In der Regel war der kritische Strom der unteren Brücken etwas größer, so daß mit der oberen die untere geschaltet wurde.

Da der kritische Strom von Mikrobrücken nicht exakt durch die Geometrie bestimmt werden kann, sondern stark vom unterschiedlichen Pinnigverhalten der Flußfäden abhängt, streut die Größe der Verstärkung auch bei Brücken gleicher Abmessungen.

Dies bedingt dann auch Probleme in der Realisierung von Schaltungen mit Arrays von Brücken. Die Schaltungen müssen so "tolerant" ausgelegt sein, daß die Streuung der kritischen Ströme in Kauf genommen werden kann.

7.5 Schaltgeschwindigkeit

Für die Realisierung von Bauelementen mit Mikrobrücken als Schalter ist auch die Schaltgeschwindigkeit von Interesse. Da die Schaltprozesse überwiegend thermischer Natur sind, ist die thermische Relaxationszeit der zeitbestimmende Faktor.

Für den Einschaltvorgang ist im Fall des thermischen Schaltens die Zeit maßgeblich, die die von der treibenden Brücke generierte Wärme benötigt, die zu schaltende Brücke zu erreichen. Nimmt man eine Ausbreitung der Wärme mit Schallgeschwindigkeit an, so ergibt sich bei einem Abstand der Brücken von $d = 120 \text{ nm}$ eine Einschaltdauer

$$\tau_e \approx d/v = 120 \text{ nm} / 5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 24 \text{ ps} \quad (34a)$$

Der Ausschaltvorgang wird von der Zeit bestimmt, die benötigt wird, die entstandene Wärme abzuführen.

Eine einfache Abschätzung mit der thermischen Ausheillänge ξ (Gleichung 13) liefert (Wärmeausbreitung mit Schallgeschwindigkeit):

$$\tau_a \approx \xi/v = 5 \mu\text{m} / 5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ ns} \quad (34b)$$

7.6 Packungsdichte

Für Applikationen ist neben Verstärkung und Schaltgeschwindigkeit auch die maximale Integrationsdichte interessant. Sie wird von der Größe der Bauelemente, der elektrischen Kontaktierung und der gegenseitigen Beeinflussung bestimmt.

Die Abmessungen der Brücken liegen in der Größenordnung von $300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$. Dazu kommen noch zwei Zuleitungen je Ebene.

Die gegenseitige Beeinflussung ist im wesentlichen durch die Ausbreitung der im resistiven Zustand entstehenden Wärme bestimmt. Anhand der berechneten Temperaturverteilung läßt sich die Entfernung von der Brückenmitte feststellen, bei der die Schicht wieder Badtemperatur angenommen hat. Für $I_e = 2 \text{ mA}$ ist dies bei einem Radius von $r = 20 \mu\text{m}$, für $I_e = 4 \text{ mA}$ bei $r = 30 \mu\text{m}$ der Fall. Je kleiner also die Betriebströme gewählt werden können, desto größer ist die realisierbare Packungsdichte.

8. Anwendung als Flip-Flop

Wie schon in 7.1 erwähnt, stellen die Brücken aufgrund ihrer Hysterese bei eingepprägten Strömen $I_{cmin} < I_e < I_c$ einen Speicher dar, der durch ein Absinken des Betriebsstroms unter I_{cmin} gelöscht wird.

Als Anwendung von gestapelten Brücken als Schalter wird im folgenden ein Flip-Flop vorgestellt. Im Gegensatz zu den meisten Schaltungen mit Tunnelkontakten [7.1] muß der Betriebsstrom hier nicht getaktet werden, um das Flip-Flop zurück zu setzen.

Zwei Schalter werden, wie in Abb. 8.1 skizziert, hintereinandergeschaltet. Über den Widerstand R wird mit einer Spannungsquelle ein Strom eingepragt.

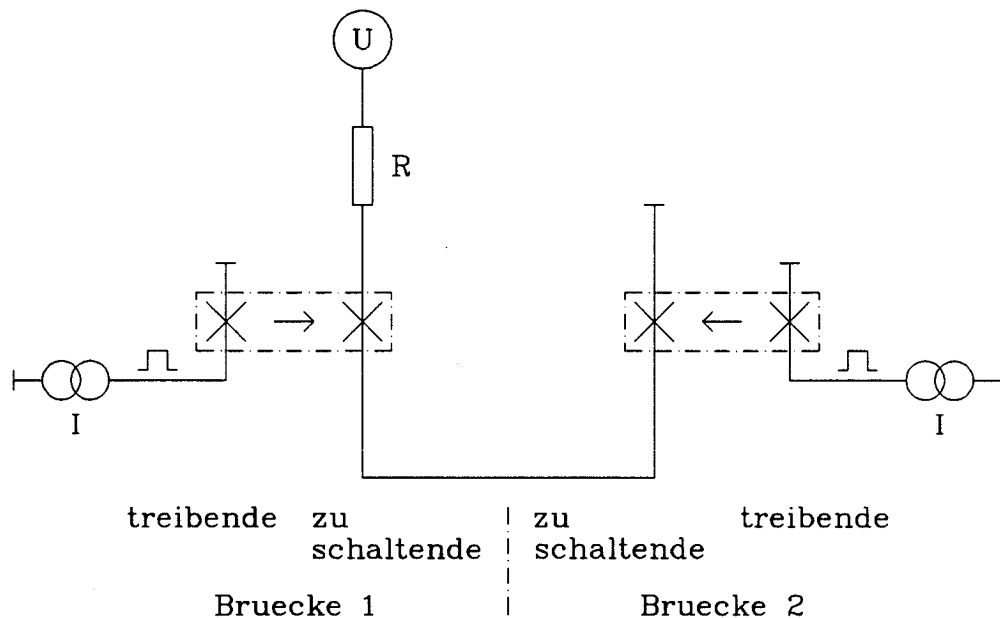


Abb. 8.1 Schematische Darstellung eines Flip-Flops mit Schaltern aus gestapelten Mikrobrücken.
Die durch eine gestrichelte Linie eingerahmten Brücken sind übereinander strukturiert.

Der Zustand "1" wird durch den Spannungsabfall über der zu schaltenden Brücke im resistiven Zustand dargestellt; kein Spannungsabfall bedeutet "0", die Brücke ist supraleitend.

Der eingepragte Strom wird über die Wahl von R und U so eingestellt, daß er kleiner ist als der kleinste kritische Strom der Brücken:

$$U < R \cdot \min[I_c^1, I_c^2] \quad (35)$$

Nach dem Einschalten sind beide Brücken supraleitend; die Schaltung wird durch einen Stromimpuls in die treibende Brücke 1 initialisiert. Brücke 1 ist somit resistiv.

Damit die Schaltung in diesem Zustand bleibt, muß der Strom, jetzt bestimmt durch R und R_N^1 , größer als I_{cmin}^1 sein (sonst wird Brücke 1 wieder supraleitend):

$$U > (R + R_N^1) I_{cmin}^1 \quad (36)$$

Wird nun ein Impuls auf die treibende Brücke 2 gegeben, so wird Brücke 2 resistiv.

Damit Brücke 1 wieder supraleitend werden kann, muß die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$U < (R + R_N^1 + R_N^2) I_{cmin}^1 \quad (37)$$

Der Impuls in die treibende Brücke 2 muß so lange dauern, bis die Brücke 1 supraleitend wird, also in der Größenordnung der thermischen Relaxationszeit (Gleichung (34)).

Das Zurücksetzen erfolgt nun analog mit Brücke 1.

Ungleichung 33 verallgemeinert sich zu:

$$U < (R + R_N^1 + R_N^2) \cdot \min[I_{cmin}^1, I_{cmin}^2] \quad (38)$$

Da I_{cmin} der Brücken nicht unterschritten werden darf, wenn nur eine resistiv ist, aber der Strom durch die Brücken kleiner I_{cmin} sein muß, wenn beide resistiv sind, müssen Widerstand R und Spannung U sehr sorgfältig bestimmt werden. I_{cmin} der beiden Brücken sollte nicht zu weit auseinander liegen.

Da die Normalwiderstände der Brücken relativ klein sind, ergeben die obigen Bedingungen typische Werte von $R = 2 \, \Omega$ und $U = 10 \, \text{mV}$.

Die beschriebene Schaltung wurde mit zwei ausgewählten Schaltern aufgebaut. Als Spannungsquelle wird eine regelbare Spannungsquelle mit nachgeschaltetem Spannungsteiler verwendet. Da die Schaltung im ganzen niederohmig ist, muß auch der Spannungsteiler niederohmig gewählt werden. Verwendet wird ein $0.01 \, \Omega$ Widerstand, so daß die Spannungsänderung bei einer Laständerung vertretbar klein bleibt.

Die treibenden Brücken werden über eine durch einen Pulsgenerator mit einstellbarer Pulsdauer gesteuerte Stromquelle betrieben.

Der Betrieb der Schaltung war aufgrund der externen Strom- und Spannungsquellen nicht unproblematisch. Um den Widerstand R für die Parameter der Brücken einstellen zu können, wurde er als veränderbarer Widerstand ebenfalls extern realisiert. Damit hat man allerdings relativ lange Zuleitungen zum Substrat, so daß deren Widerstand von 1.3Ω vergleichbar mit dem von $R=2 \Omega$ ist.

Trotz sorgfältiger Schutzmaßnahmen sind die treibenden Brücken, vermutlich aufgrund statischer Aufladung oder Stromspitzen, zerstört worden, bevor genauere Aussagen über das Verhalten des Flip-Flop gemacht werden konnten.

Zur besseren Handhabung der Schaltung sollte für weitere Versuche die Spannungsquelle und der Widerstand R mit auf dem Substrat integriert werden. Dadurch werden die Widerstände der Zuleitungen vernachlässigbar klein.

Die gepulsten Stromquellen sind so auszulegen, daß Stromspitzen beim Impulsanstieg und -abfall möglichst vollständig vermieden werden.

9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein supraleitender Schalter aus gestapelten Mikrobrücken hergestellt und charakterisiert.

Um eine möglichst gute Kopplung der treibenden mit der zu schaltenden Brücke zu erreichen, wurden beide übereinander strukturiert.

Dabei wurden zwei Verfahren zur Präparation vorgestellt:

Reaktives Ionenätzen der Brücken und eine Strukturierung durch einen Lift-off Prozeß.

Es konnten gestapelte Brücken mit Breiten kleiner als 300 nm mittels Lift-off hergestellt werden.

Alle im Rahmen dieser Arbeit präparierten Brücken zeigten eine Hysterese in der U-I-Kennlinie. Sie ist thermisch bedingt. Der Rücksprung in den supraleitenden Zustand bei I_{cmin} wird von dem Hotspot-Modell nach Skocpol gut beschrieben.

Verschiedene Mechanismen zum Schalten einer Brücke wurden untersucht. Es zeigte sich, daß die Brücken bei gestapelter Anordnung überwiegend aufgrund thermischer Effekte schalten.

Die realisierten Schalter hatten eine Stromverstärkung von 1.5 bis 10.7 bei Normalwiderständen von $6\ \Omega$ bis $12\ \Omega$. Damit lassen sich kryoelektronische Bauelemente schalten und digitale Schaltungen realisieren.

Als Anwendung wurde zwei Schalter zu einem Flip-Flop zusammengeschaltet. Im Gegensatz zu den meisten Schaltungen mit Tunnelkontakten konnte auf einen getakteten Betrieb des Flip-Flop verzichtet werden. Problematisch war in diesem Zusammenhang die große Empfindlichkeit der Brücken gegenüber statischen Aufladungen und Stromspitzen.

Die größten Probleme bei der Realisation größerer Schaltungen ergeben sich aufgrund der Streuung des kritischen Stroms bei sonst gleichen Abmessungen der Brücken. Die Schaltungen müssen so "tolerant" ausgelegt sein, daß diese Streuung in Kauf genommen werden kann.

10. Literaturverzeichnis

- [2.1] P. W. Anderson und A. H. Dayem, Phys. Rev. Lett. **13**, 195 (1964)
- [2.2] K. K. Likharev, Sov. Phys. JETP **34**, 906 (1972)
- [2.3] L. G. Aslamasov und A. I. Larkin, Sov. Phys. JETP **41**, 381 (1975)
- [2.4] H. Rogalla, Habilitationsschrift, Institut für Angewandte Physik, Gießen 1986
- [2.5] M. Mück, Dissertation, Gießen 1987
- [2.6] D. E. McCumber, J. Appl. Phys. **39**, 3113 (1968)
- [2.7] K. K. Likharev, Rev. Mod. Phys. **51**, 101 (1979)
- [2.8] V. N. Gubankov, K. K. Likharev und N. M. Margolin, Sov. Phys. Solid State **14**, 819 (1972)
- [2.9] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. Schrieffer, Phys. Rev. **103**, 1175 (1957)
- [2.10] J. W. Bremer und V. L. Newhouse, Phys. Rev. Lett. **1**, 282 (1958)
- [2.11] W. J. Scocpol, M. R. Beasley und M. Tinkham, J. App. Phys. **45**, 4054 (1974)
- [2.12] Landolt-Börnstein, Band II, Springer 1968
- [3.1] Okazaki et al., J. Vac. Sci. Technol. **B7**, 667 (1989)
- [3.2] Heuberger, J. Vac. Sci. Technol. **B6**, 107 (1988)
- [3.3] Chen et al., J. Vac. Sci. Technol. **B6**, 2009 (1988)
- [3.4] T. Bohl, Diplomarbeit, Gießen 1982
- [3.5] J. Rühl, Diplomarbeit, Gießen 1984

- [5.1] P. G. De Gennes, "Superconductivity of Metals and Alloys" (Benjamin, New York 1966)
- [5.2] A. I. Larkin und Y. N. Ovchinnikov, Sov. Phys. JETP **38**, 854 (1974)
- [5.3] M. T. Jahn und Y. H. Kao, J. Low. Temp. Phys. **13**, 175 (1973)
- [5.4] T. A. Fulton, Phys. Rev. **B7**, 1189 (1973)
- [5.5] T. A. Fulton, J. Appl. Phys. **45**, 2283 (1974)
- [6.1] P. Grassman und A. Karagounis, Proceedings of the Fifth International Conference on Low Temperature Physics and Chemistry (University of Wisconsin Press, Madison, 1958), S.41
- [7.1] W. Y. Lum, H. W. Chan und T. Van Duzer, ASC **76**, 48 (1976)
- [7.2] K. K. Likharev, Sov. Phys. JETP **34**, 906 (1972)
- [7.3] J. E. Zimmerman und A. H. Silver, Phys. Rev. Lett. **19**, 14 (1967)
- [7.4] F. L. Vernon und R. J. Pedersen, J. Appl. Phys. **39**, 2661 (1968)
- [7.5] F. Peter, Diplomarbeit, Jülich 1990

11. Anhang

11.1 Programm zur Berechnung der U-I-Kennlinie von Mikrobrücken nach dem Hotspot-Modell

REM BERECHNUNG DER U-I-KENNLINIE NACH DEM HOTSPOT-MODELL

```
CLS
DEFDBL F-G, I, K-L, P
DIM f(35): DIM p(35): DIM g(36)
DIM uu(1002): DIM rr(1002)
```

label1:

REM LADEN DER LETZTEN EINGABEN

```
OPEN "i", #1, "c:\techplot\arbprg\hotspot.hlp", 256
INPUT #1, nn%, w, l, d, r, tc, tb, a, k, xa, xe, sc
INPUT #1, datei$, datei2$
CLOSE
```

REM EINGABEROUTINE

```
PRINT "ANZAHL DER SUMMATIONEN (< 34):("; nn%; ")"; : INPUT n1$
IF n1$ = "e" THEN GOTO label6
IF n1$ <> "" THEN nn% = VAL(n1$)
PRINT "BREITE(nm):("; w / 1E-09; ")"; : INPUT w1$
IF w1$ <> "" THEN w = (VAL(w1$)) * 1E-09
PRINT "LAENGE(nm):("; l / 1E-09; ")"; : INPUT l1$
IF l1$ <> "" THEN l = (VAL(l1$)) * 1E-09
PRINT "DICKE(nm):("; d / 1E-09; ")"; : INPUT d1$
IF d1$ <> "" THEN d = (VAL(d1$)) * 1E-09
PRINT "SPEZ.WID.(*1E-09):("; r / 1E-09; ")"; : INPUT r1$
IF r1$ <> "" THEN r = (VAL(r1$)) * 1E-09
PRINT "Tc:("; tc; ")"; : INPUT tc1$
IF tc1$ <> "" THEN tc = VAL(tc1$)
```

```
PRINT "BADTEMPERATUR:("; tb; ")"; : INPUT tb1$
IF tb1$ <> "" THEN tb = VAL(tb1$)
PRINT "TEMP.KOEFF.SUBSTR.(A):("; a; ")"; : INPUT a1$
IF a1$ <> "" THEN a = VAL(a1$)
PRINT "TEMP.KOEFF.ANSCHL.(K):("; k; ")"; : INPUT k1$
IF k1$ <> "" THEN k = VAL(k1$)
PRINT "ANFANGSWERT:("; xa; ")"; : INPUT xa1$
IF xa1$ <> "" THEN xa = VAL(xa1$)
PRINT "ENDWERT:("; xe; ")"; : INPUT xe1$
IF xe1$ <> "" THEN xe = VAL(xe1$)
PRINT "ANZAHL DER SCHRITTE:("; sc; ")"; : INPUT sc1$
IF sc1$ <> "" THEN sc = VAL(sc1$)
PRINT "AUSGABEFILE U(I):("; datei$; ")"; : INPUT datei1$
IF datei1$ <> "" THEN datei$ = datei1$
PRINT "AUSGABEFILE I(R0):("; datei2$; ")"; : INPUT datei3$
IF datei3$ = "e" THEN GOTO label6
IF datei3$ <> "" THEN datei2$ = datei3$
```

REM SPEICHERN DER LETZTEN EINGABEN

```
OPEN "o", #1, "c:\techplot\arbprg\hotspot.hlp", 256
PRINT #1, nn%; w; l; d; r; tc; tb; a; k; xa; xe; sc; datei$;
      ", "; datei2$
CLOSE
```

```
datei1$ = "c:\techplot\daten\thomas\hotspot\" + datei$
datei3$ = "c:\techplot\daten\thomas\hotspot\" + datei2$
```

```
OPEN datei1$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "BEGIN"
```

```
pi = 3.141593
n = SQR(k * d / a)
s1 = w / 2 / n
y1 = (1 + w / 2) / 2 / n
sw = (xe - xa) / sc
```

REM FAKULTAET BIS nn%+1; PHI BIS nn%+1

```
FOR i = 0 TO nn%
f(0) = 1
f(i + 1) = f(i) * (i + 1)
p(0) = 0
p(i + 1) = p(i) + 1 / (i + 1)
NEXT i
```

REM BERECHNUNG VON c0 UND c1

IF s1 < 5 THEN GOTO label2

```
REM NAEHERUNG FUER S1>5
c0 = SQR(pi / 2 / s1) * EXP(-s1)
c1 = c0
GOTO label3
```

label2:

```
c = .577216
kh = 0
lh = 0
FOR i = 0 TO nn%
kh = kh + 1 / (f(i) * f(i)) * (2 * LOG(s1 / 2) + 2 * c
- 2 * p(i)) * (s1 / 2) ^ (2 * i)
lh = lh + 1 / (f(i) * f(i + 1)) * (2 * LOG(s1 / 2) + 2 * c
- p(i) - p(i + 1)) * (s1 / 2) ^ (2 * i + 1)
NEXT i
c0 = (-1 / 2) * kh
c1 = 1 / 2 * lh + 1 / s1
```

label3:

REM BERECHNUNG VON I(R0)

```
h = 0
FOR j = xa TO xe STEP sw
```

REM BERECHNUNG VON c2

IF (j / n) < 5 THEN GOTO label4

REM NAEHERUNG FUER (r0/n)>5

c2 = SQR(pi / 2 / j * n) * EXP(-j / n)
GOTO label5

label4:

c = .577216
kh = 0
lh = 0
FOR i = 0 TO nn%
kh = kh + 1 / (f(i) * f(i)) * (2 * LOG(j / n / 2) + 2 * c
- 2 * p(i)) * (j / n / 2) ^ (2 * i)
NEXT i
c2 = (-1 / 2) * kh

label5:

REM BERECHNUNG VON I0

i0 = LOG(j / n) - LOG(s1)
FOR i = 1 TO nn%
g(1) = 1
g(i + 1) = i * g(i)
g(i + 2) = (i + 1) * g(i + 1)
i0 = i0 + 1 / (f(i) * g(i + 1) * 2 ^ (2 * i) * 2 * i)
* ((j / n) ^ (2 * i) - s1 ^ (2 * i))
NEXT i

c3 = SQR(k * d ^ 2 * (tc - tb) / r) * 1 / SQR(c2)
* ((n / w) ^ 2 * 1 / (c0 + pi / 2 * c1
* (EXP(-y1) / (EXP(y1) - EXP(-y1)) * 2 + 1))
+ 1 / pi ^ 2 * i0) ^ (-1 / 2)

```
wid = (r / d) * (1 / w + .5 + 2 / pi * LOG(2 * j / w))  
u = c3 * wid
```

```
REM I[mA]; U[mV]
```

```
u = u * 1000  
c3 = c3 * 1000  
uu(h) = u: rr(h) = j / .000001
```

```
PRINT u; c3; rr(h)
```

```
PRINT #1, u; c3
```

```
h = h + 1
```

```
NEXT j
```

```
PRINT #1, "END"  
CLOSE
```

```
REM ANLEGEN EINER u(R0)-DATEI
```

```
OPEN "o", #1, datei3$  
PRINT #1, "BEGIN"  
FOR i = 0 TO (h - 1)  
PRINT #1, uu(i); rr(i)  
NEXT i  
PRINT #1, "END"  
CLOSE
```

```
GOTO label1
```

```
label6:
```

REM AUFRUF DES TECHPLOT-HAUPTMENUES

```
OPEN "mail.sys" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "p.exe"
CLOSE
OPEN "system\temail.sys" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "arb"
CLOSE

END
```

11.2 Programm zur Berechnung der Temperaturverteilung in Mikrobrücken nach dem Hotspot-Modell

REM BERECHNUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH DEM HOTSPOT-MODELL

CLS

DEFDBL A-H, K-S, U-Z

DIM f(35): DIM p(35): DIM g(36)

DEF fncoth (y) = EXP(-y) / (EXP(y) - EXP(-y)) * 2 + 1

DEF fncosh (y) = (EXP(y) + EXP(-y)) / 2

label1: CLEAR

REM AUFRUF DER LETZTEN EINGABEN

OPEN "i", #1, "c:\techplot\arbprg\tempvert.hlp"

INPUT #1, nn%, w, l, d, r, tc, tb, a, k, xa, xe, sc, r0

INPUT #1, datei\$

CLOSE

REM EINGABEROUTINE

PRINT "ANZAHL DER SUMMATIONEN (< 34):("; nn%; ")"; : INPUT n1\$

IF n1\$ = "e" THEN GOTO label6

IF n1\$ <> "" THEN nn% = VAL(n1\$)

PRINT "BREITE(nm):("; w / 1E-09; ")"; : INPUT w1\$

IF w1\$ <> "" THEN w = (VAL(w1\$)) * 1E-09

PRINT "LAENGE(nm):("; l / 1E-09; ")"; : INPUT l1\$

IF l1\$ <> "" THEN l = (VAL(l1\$)) * 1E-09

PRINT "DICKE(nm):("; d / 1E-09; ")"; : INPUT d1\$

IF d1\$ <> "" THEN d = (VAL(d1\$)) * 1E-09

PRINT "SPEZ.WID.(*1E-09):("; r / 1E-09; ")"; : INPUT r1\$

IF r1\$ <> "" THEN r = (VAL(r1\$)) * 1E-09

PRINT "Tc:("; tc; ")"; : INPUT tc1\$

IF tc1\$ <> "" THEN tc = VAL(tc1\$)

```
PRINT "BADTEMPERATUR:("; tb; ")"; : INPUT tb1$
IF tb1$ <> "" THEN tb = VAL(tb1$)
PRINT "TEMP.KOEFF.SUBSTR.(A):("; a; ")"; : INPUT a1$
IF a1$ <> "" THEN a = VAL(a1$)
PRINT "TEMP.KOEFF.ANSCHL.(K):("; k; ")"; : INPUT k1$
IF k1$ <> "" THEN k = VAL(k1$)
PRINT "RADIUS HOTSPOT R0:("; r0; ")"; : INPUT r0$
IF r0$ <> "" THEN r0 = VAL(r0$)
PRINT "ANFANGSWERT:("; xa; ")"; : INPUT xa1$
IF xa1$ <> "" THEN xa = VAL(xa1$)
PRINT "ENDWERT:("; xe; ")"; : INPUT xe1$
IF xe1$ <> "" THEN xe = VAL(xe1$)
PRINT "ANZAHL DER SCHRITTE:("; sc; ")"; : INPUT sc1$
IF sc1$ <> "" THEN sc = VAL(sc1$)
PRINT "AUSGABEFILE TEMPERATUR:("; datei$; ")"; : INPUT datei1$
IF datei1$ = "e" THEN GOTO label6
IF datei1$ <> "" THEN datei$ = datei1$
```

REM ABSPEICHERN DER LETZTEN EINGABEN

```
OPEN "o", #1, "c:\techplot\arbprg\tempvert.hlp"
PRINT #1, nn%, w, l, d, r, tc, tb, a, k, xa, xe, sc, r0,
      datei$
CLOSE
```

```
datei1$ = "c:\techplot\daten\thomas\hotspot\" + datei$
```

```
OPEN datei1$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "BEGIN"
```

```
pi = 3.141593
c = .577216
n = SQR(k * d / a)
s1 = w / 2 / n
s2 = r0 / n
y1 = (1 + w / 2) / 2 / n
sw = (xe - xa) / sc
```

REM FAKULTAET BIS nn%+1; PHI BIS nn%+1

```
FOR i = 0 TO nn%
f(0) = 1
f(i + 1) = f(i) * (i + 1)
p(0) = 0
p(i + 1) = p(i) + 1 / (i + 1)
NEXT i
```

REM BERECHNUNG VON c0[=K0(S1)] UND c1[=K1(S1)]

IF s1 < 5 THEN GOTO label2

REM NAEHERUNG FUER S1>5

```
c0 = SQR(pi / 2 / s1) * EXP(-s1)
c1 = c0
GOTO label3
```

label2:

```
kh = 0
lh = 0
FOR i = 0 TO nn%
kh = kh + 1 / (f(i) * f(i)) * (2 * LOG(s1 / 2) + 2 * c
    - 2 * p(i)) * (s1 / 2) ^ (2 * i)
lh = lh + 1 / (f(i) * f(i + 1)) * (2 * LOG(s1 / 2) + 2 * c
    - p(i) - p(i + 1)) * (s1 / 2) ^ (2 * i + 1)
NEXT i
c0 = (-1 / 2) * kh
c1 = 1 / 2 * lh + 1 / s1
```

label3:

REM BERECHNUNG VON $c3 [=K0(S2)]$

IF $s2 < 5$ THEN GOTO label7

REM NAEHERUNG FUER $S2 > 5$

$c3 = \text{SQR}(\pi / 2 / s2) * \text{EXP}(-s2)$
GOTO label8

label7:

$c3 = 0$
FOR $i = 0$ TO $nn\%$
 $c3 = c3 + 1 / (f(i) * f(i)) * (2 * \text{LOG}(s2 / 2) + 2 * c - 2 * p(i)) * (s2 / 2) ^ (2 * i)$
NEXT i
 $c3 = (-1 / 2) * c3$

label8:

REM BERECHNUNG VON $I0(S1)$ UND $I1(S1)$

$i0 = 1$
 $i1 = 1$
FOR $i = 1$ TO $nn\%$
 $g(1) = 1$
 $g(i + 1) = i * g(i)$
 $g(i + 2) = (i + 1) * g(i + 1)$
 $i0 = i0 + 1 / (f(i) * g(i + 1)) * (s1 / 2) ^ (2 * i)$
 $i1 = i1 + 1 / (f(i) * g(i + 2)) * (s1 / 2) ^ (2 * i + 1)$
NEXT i

REM BERECHNUNG VON A UND B

$aa = (w / n) ^ 2 * (c0 + \pi / 2 * c1 * \text{fncoth}(y1))$
 $bb = (w / n) ^ 2 * (i0 - \pi / 2 * i1 * \text{fncoth}(y1))$

REM BERECHNUNG VON FI(S2) UND FK(S2)

```
fi = 1 / pi ^ 2 * (LOG(s2) - LOG(s1))
fk = -1 / pi ^ 2 * (1 / 2 * ((LOG(s2)) ^ 2 - (LOG(s1)) ^ 2)
    + (-LOG(2) + c) * (LOG(s2) - LOG(s1)))
FOR i = 1 TO nn%
fi = fi + 1 / pi ^ 2 * 1 / (f(i) * g(i + 1) * 2 ^ (2 * i)
    * 2 * i) * (s2 ^ (2 * i) - s1 ^ (2 * i))
fk = fk - 1 / pi ^ 2 * (1 / (f(i) ^ 2 * 2 ^ (2 * i) * 2 * i)
    * (s2 ^ (2 * i) * (LOG(s2) - 1 / 2 / i) - s1 ^ (2 * i)
    * (LOG(s1) - 1 / 2 / i) + (-LOG(2) + c - p(i))
    * (s2 ^ (2 * i) - s1 ^ (2 * i))))
NEXT i
```

REM BERECHNUNG VON D

```
dd = 1 - bb * fk - aa * fk * i1 / c1
```

REM BERECHNUNG VON C(S2)

```
cs2 = c3 * (1 + aa * fi - bb * fk) / aa
```

REM BERECHNUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG

```
FOR j = xa TO xe STEP sw
```

```
y = j / n
```

REM BERECHNUNG VON FI(Y), FK(Y) UND IO(Y)

```
IF y = 0 THEN GOTO label9
fiy = 1 / pi ^ 2 * (LOG(y) - LOG(s1))
fky = -1 / pi ^ 2 * (1 / 2 * ((LOG(y)) ^ 2
    - (LOG(s1)) ^ 2) + (-LOG(2) + c)
    * (LOG(y) - LOG(s1)))
ioy = 1
```

```
FOR i = 1 TO nn%
fiy = fiy + 1 / pi ^ 2 * 1 / (f(i) * g(i + 1)
      * 2 ^ (2 * i) * 2 * i) * (y ^ (2 * i)
      - s1 ^ (2 * i))
fky = fky - 1 / pi ^ 2 * (1 / (f(i) ^ 2 * 2 ^ (2 * i)
      * 2 * i) * (y ^ (2 * i) * (LOG(y) - 1 / 2 / i)
      - s1 ^ (2 * i) * (LOG(s1) - 1 / 2 / i) + (-LOG(2)
      + c - p(i)) * (y ^ (2 * i) - s1 ^ (2 * i))))
ioy = ioy + 1 / (f(i) * g(i + 1) * 2 ^ (2 * i))
      * y ^ (2 * i)
NEXT i
```

label9:

REM BERECHNUNG VON K0(Y)

IF y = 0 THEN GOTO label5

IF y < 5 THEN GOTO label4

REM NAEHERUNG FUER Y>5

c2 = SQR(pi / 2 / y) * EXP(-y)

GOTO label5

label4:

kh = 0

FOR i = 0 TO nn%

kh = kh + 1 / (f(i) * f(i)) * (2 * LOG(y / 2) + 2 * c
 - 2 * p(i)) * (y / 2) ^ (2 * i)

NEXT i

c2 = (-1 / 2) * kh

label5:

REM BERECHNUNG VON C(Y)

cy = c2 * (1 + aa * fiy - bb * fk) / aa

REM UNTERSCHIEDUNG DER VERSCHIEDENEN BEREICHE

IF 0 <= y AND y < y1 THEN GOTO temp1

temp5:

IF s1 < y AND y <= s2 THEN GOTO temp2

IF s2 < y THEN GOTO temp3

GOTO temp4

REM AUSGABE IN μm !

temp1:

tt = tb + (tc - tb) * (c0 + 1 / 2 * pi * c1 * fncoth(y1)
* (1 - dd * fncosh(y) / fncosh(y1))) / (cs2 * aa)

PRINT #1, (j / .000001); tt

PRINT j, tt

GOTO temp5

temp2:

tt = tb + (tc - tb) * (cy - i0y * (fky - fk)) / cs2

PRINT #1, (j / .000001); tt

PRINT j, tt

GOTO temp4

temp3:

tt = tb + (tc - tb) * c2 / c3

PRINT #1, (j / .000001); tt

PRINT j, tt

temp4:

NEXT j

PRINT #1, "END"

CLOSE

GOTO label1

label6:

REM AUFRUF DES TECHPLOT-HAUPTMENUES

OPEN "mail.sys" FOR OUTPUT AS #1

PRINT #1, "p.exe"

CLOSE

OPEN "system\temail.sys" FOR OUTPUT AS #1

PRINT #1, "arb"

CLOSE

END

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Schicht- und Ionentechnik des Forschungszentrums Jülich GmbH angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Heiden für die Anregung zu dieser Arbeit, die Unterstützung und sein Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Herrn Dr. H. M. Mück danke ich für die Betreuung dieser Arbeit, die Hilfestellungen und die zahlreichen interessanten Diskussionen.

Für die Hilfe bei den präparativen Arbeiten bedanke ich mich bei Frau B. Sonnenschein und Herrn G. Hallmanns.

Den Mitarbeitern der feinmechanischen Werkstatt unter Leitung von Herrn H. M. Schwan danke ich für die Ausführungen der mechanischen Arbeiten.

Stellvertretend für die in der Elektronikwerkstatt ausgeführten Arbeiten bedanke ich mich bei Herrn R. Otto.

Weiterhin danke ich Frau K. Barthels für die Herstellung der Masken und die Anfertigung der Fotos.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für die hilfreichen Diskussionen, die Unterstützung und das gute Arbeitsklima bedanken.

