Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Forschungsbericht / Abschlußbericht

Förderkennzeichen: 13N7155/0

Physikalische Technologien

Thema:

Herstellung und elektrische Charakterisierung von Anordnungen aus ultrakleinen metallischen Tunnelelementen

von

Dr. Thomas Wagner
Dipl.-Phys. Detlef Born

Projektleiter: PD Dr. habil. W. Krech

Januar 2001

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **4**

1.1 Aufgabenstellung 4

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens 4

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 5

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 5

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

2 Kurzer Abriß der Theorie des Einzelelektronen-Transistors **8**

3 Prinzip der SAIL-Strukturierung **11**

4 Präparation ultrakleiner SAIL-Tunnelkontakte **13**

5 Elektrische Charaktrisierung von SAIL-Proben **16**

5.1 Al/AlO$_x$/Al-SETs 16

5.1.1 Eigenschaften von Aluminium 16

5.1.2 Messungen 16

5.2 Al/AlO$_x$/Ta-SETs 19

5.2.1 Eigenschaften von Tantal 19

5.2.2 Messungen 19

5.3 Al/AlO$_x$/Cr-SETs 22

5.3.1 Eigenschaften von Chrom 22

5.3.2 Messungen 22

5.4 Nb/AlO$_x$/Nb-SETs 23

5.4.1 Eigenschaften von Niob 23

5.4.2 Messungen 23

6 Herstellung und Charakterisierung "exotischer" Einzelelektronen-Transistoren **25**

6.1 Titan als Elektrodenmaterial 25

6.2 Au/Alkylthiol/Au-SET 27

7 Schwierigkeiten bei der Herstellung ultrakleiner Tunnelkontakte nach der SAIL-Methode **28**

8 Alternative Strukturierungsmethode: Direktes Schreiben **30**

9 Herstellung von Einzelelektonen-Transistoren nach der Technik des direkten Schreibens **33**

9.1 Al/AlO_x/Al- und gemischte SETs 34

9.2 Nb/AlO_x/Nb-SETs 36

10 Elektrische Charakterisierung direkt geschriebener Proben **38**

11 Zusammenfassung **42**

11.1 Erzielte Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen 42

11.2 Fortschritte auf dem Arbeitsgebiet 43

Literatur **45**

Veröffentlichung der Ergebnisse **49**

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Im hier beschriebenen Vorhaben wurde am Institut für Festkörperphysik / FSU Jena der Transport einzelner Elektronen in Anordnungen aus ultrakleinen metallischen Tunnelkontakten untersucht. Die erforderlichen Arbeiten wurden im Zusammenwirken mit anderen Partnern im BMBF-Verbund "Einzelelektronenentunneln" durchgeführt. Sie konzentrierten sich insbesondere auf die Einführung und Etablierung neuartiger Verfahren zur Präparation nanoskaliger metallischer Tunnelkontakte. Diese Methoden (SAIL-Präparation "echter" Kantentunnel, direktes Elektronenstrahl-Schreiben; vgl. Abschn. 3 und 8), die wesentlich die Sputterdeposition der benötigten Metallschichten applizieren, sollten einerseits dazu beitragen, Nachteile der international als Standardtechnik praktizierten "Schattenbedampfung mit Schwebemaske" zu überwinden. Andererseits wurde das Ziel verfolgt, im Konsens mit anderen beteiligten Einrichtungen des Verbundes (PTB Braunschweig, Leica Lithographie Systeme Jena GmbH, RWTH Aachen, TU Ilmenau) einen Fächer von Möglichkeiten zu implementieren, die nicht nur für die sog. Einzelelektronik, sondern auch für andere Branchen der Festkörperelektronik bedeutsam sind.

Es versteht sich von selbst, daß die hergestellten Nanometerstrukturen (vorrangig Einzelelektronen-Transistoren mit kapazitivem Gate) im Hinblick auf die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen fortwährend elektrisch zu charakterisieren waren. Die benötigte Meßtechnik (Tieftemperaturkryostate, Meßelektronik) mußte im Berichtszeitraum hinsichtlich Nachweisempfindlichkeit und Bedienungskomfort ständig verbessert werden. Theoretische Untersuchungen haben die Deutung der experimentellen Resultate unterstützt.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Am Institut für Festkörperphysik / FSU Jena werden seit Beginn der 70er Jahre experimentelle und theoretische Arbeiten zur Entwicklung von Josephson-Tunnelelementen und deren Einsatz in der Präzisionsmeßtechnik durchgeführt. Daher lagen zu Beginn der Projektbearbeitung traditionell ausgewogene Erfahrungen bei der Schichtabscheidung und -strukturierung vor. Unmittelbare Vorarbeiten erfolgten bei der Realisierung der Zielstellungen des BMBF-Förderprojektes "Entwicklung ultrakleiner metallischer Tunnelelemente für den steuerbaren Einzelelektronentransfer" (13N6403/2). Sie beinhalteten die Einführung der o.g. SAIL-Technologie zur Präparation von Tunnelkontakten unter Zugriff auf Elektronenstrahllithographie, Ionenstrahlätz- und Sputterverfahren. Die Untersuchungen wurden durch Aktivitäten im DFG-Vorhaben "Ultrakleine Tunnelkontakte" (KR 1172/5-1) sowie im Rahmen von Qualifikationsarbeiten (Dissertationen) gestützt.

Darüber hinaus waren durch theoretische Betrachtungen (DFG-Vorhaben "Einzelelektronentunnelung": Kr 1172/1-1,2) hinreichende Vorkenntnisse zum physikalischen Verständnis der Dynamik des Einzelladungstransfers in Systemen aus kleinen metallischen Tunnel-

kontakten vorhanden. Diese Arbeiten haben die Konzipierung von Prototypen praktischer Funktionselemente sowie die Auswertung der Meßdaten befördert.

Die Versorgung mit kryogenen Medien aus der hauseigenen He4-Verflüssigungsanlage war durchgängig gesichert. Die kryoelektronische Meßtechnik mit ihrem Kernstück, einem kommerziellen He3/He4-Mischkryostaten (Kelvinox 400 mit 11T-Magnet; Fa. Oxford Instruments) funktionierte im wesentlichen problemlos.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung der Arbeiten erfolgte nach dem im Antrag enthaltenen Balkenplan. Es gab zeitweilige Verzögerungen, die auf Ausfällen der verfügbaren Strukturierungsanlagen am Institut für Angewandte Physik (IAP) / FSU Jena beruhten.

Schwerwiegender war folgender Umstand, der um die Mitte der Projektlaufzeit immer stärker den Fortgang der weiteren Untersuchungen beeinträchtigte: Die ursprünglich in die SAIL-Methode zur Präparation kleiner Tunnelkontakte gesetzten Erwartungen mußten vorerst auf Grund des nunmehr offenkundig erscheinenden Mangels an Reproduzierbarkeit aufgegeben werden. Wie bereits in der Zusammenfassung zum 2. Zwischenbericht (Zeitraum: 01.01.98 bis 31.12.1998) angedeutet wurde, traten die Schwierigkeiten vermutlich infolge von Redepositionseffekten beim Trockenätzen der Metallkanten auf. Da auch nach Beratung mit den Kooperationspartnern und weiteren Fachkollegen kein Ausweg gefunden wurde, haben wir im Planjahr 1999 als alternative Methode das sog. "direkte Elektronenstrahl-Schreiben" eingeführt. Letztere ist wesentlich durch die Beibehaltung wichtiger Vorteile der SAIL-Fabrikation (insbesondere der möglichen Sputterdeposition der Metallfilme), andererseits durch die Vermeidung der Redepositionseffekte charakterisiert.

Der entstandene Zeitverlust hat die Aufnahme der sehr aufwendigen Untersuchungen zur vorgesehenen Entwicklung und Charakterisierung von Tunnelanordnungen mit höheren Integrationsgrad (z.B. Elektronenfalle als Speicherelement, Logikbausteine vom CMOS-Typ) verhindert. Aus äußerst aktuellem Anlaß, nämlich der Einführung supraleitender Bausteine für das quantum computing, wurde andererseits die Herstellung sog. qubits vom Ladungstyp mit auslesendem Einzelelektronen-Transistor (Anordnungen mit moderatem Integrationsgrad) begonnen. Diese besitzen u.E. ein beträchtliches Zukunftspotential, das zu Beginn der Projektbearbeitung nicht bekannt war.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Mitte der 80er Jahre wurde durch Arbeiten zur Coulombblockade in kleinen Tunnelkontakten die Einzelelektronik als neuer Zweig der Festkörperelektronik begründet (s. z.B. [1]). Die Vorhersagen zum korrelierten Tunneltransfer einzelner Elektronen wurden dann

insbesondere an Doppelkontakten (mit Inselelektroden) bestätigt; frühzeitig wurden dazu schon elektronenstrahllithographische Strukturen verwendet [2]. Dabei gelang die Präparation kleiner Tunnelelemente im Sub-μm-Gebiet, die bei Unterdrückung des thermischen Rauschens und der Quantenfluktuationen die Demonstration inkrementaler Ladungseffekte gestatteten.

Aus Sicht der Antragsstellung waren uns gezielte Experimente nur mit Tunnelanordnungen möglich, die unter Verwendung elektronenstrahllithographischer Methoden hergestellt sind. Im Hinblick auf metallische Strukturen hatte die von Niemeyer [3] und Dolan [2,4] eingeführte "Schrägbedampfung mit Schwebemaske" weite Verbreitung gefunden. Sie wurde von Gruppen in Europa (Göteborg, Moskau, Saclay, Delft [5-10]) sowie in den USA ([11,12]) angewendet. Die Arbeitstemperaturen lagen, bedingt durch die Größe der Tunnelelemente, i.a. unter 50mK. Als Standardmaterial wurde praktisch durchweg Al benutzt, in Ausnahmefällen auch auf andere leicht verdampfbare Metalle zurückgegriffen, die keine starke thermische Belastung sowie mechanische Deformation der Schwebemasken hervorrufen (z.B. Pb [5], Cu [8], Au [12], auch Hf [13]). Sputtermethoden zur Schichtabscheidung lassen sich in Verbindung mit schwebenden Masken nicht anwenden. Der Versuch, mit Hilfe eines verbesserten (hitzebeständigen) Maskensystems die Schattenbedampfungstechnik auf Nb auszudehnen, wurde in dem Bericht [14] skizziert (vgl. auch [15]).

In jüngerer Zeit wurden verstärkt Anstrengungen unternommen, durch extreme Miniaturisierungs-Techniken sowohl Si-basierte (z.B. [16]) als auch metallische Anordnungen (etwa auf der Grundlage anodisch oxidierter Nb/NbO_x/Nb-Kontakte [17]) herzustellen, die bei Raumtemperatur funktionieren. Da sich diese Konzepte derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden, insbesondere noch kein ausreichend determiniertes Schaltverhalten vorliegt, dürfte der Weg zur technischen Serienreife – ebenso wie für konventionelle Einzelelektronen-Funktionselemente – noch weit sein.

Mit Bezug auf das hier zu berichtende Förderprojekt sollte schließlich folgende Feststellung ausgesprochen werden: Für eine spätere allgemeine Nutzung besteht u.E. nach wie vor großes sachliches Interesse an Alternativen zum Schrägbedampfungsverfahren. Sie sollten die Anwendung von Sputtertechniken mit einer breiten Materialauswahl (insbesondere unter Zugriff auf hochschmelzende Metalle) und lift-off Prozessen erlauben sowie die Reproduzierbarkeit und Integrationsfähigkeit erhöhen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen des Verbundes ausgeführt, speziell mit den in Strukturierungsprobleme invovierten Partnern (PTB Braunschweig, RWTH Aachen). Besonderen Stellenwert hatte die Kooperation mit dem Institut für Angewandte Physik / FSU Jena, das als Unterauftragnehmer der Firma Leica LS Jena GmbH sowohl die Ausstattung zur Strukturierung der Schichten als auch Personal (Strukturierungsspezialisten, technische Kräfte) zur Präparation der ultrakleinen Funktionselemente einbrachte. Ein reger wissenschaftlicher Erfahrungsautausch zu vielschichti-

gen Problemen existierte mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig; die Berechnung elektrodynamischer Eigenschaften (Kapazitäten und Ladungsverteilungen) eigener Tunnelstrukturen wurde durch das Institut für Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik / TU Ilmenau ausgeführt. Weitere nützliche Zusammenarbeiten gab es mit der RWTH Aachen und dem IPHT Jena e.V. In Fragen der Tieftemperaturtechnik stand uns nach wie vor die U Bayreuth mit Rat und Tat bei.

Die regelmäßigen, gut organisierten Treffen aller Verbundpartner sowie die durch das BMBF ermöglichten Konferenzbesuche trugen in spezifischer Weise zur Erkenntnisgewinnung bei.