

# Herstellung von Quanteneffekt-Bauelementen mittels projizierender Ionenlithographie

Friedrich Thalinger  
Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik, TU-Wien,  
1040 Wien

Im Rahmen der Diplomarbeit waren Elektroneninterferenz-Bauelemente zum Nachweis des Aharonov-Bohm-Effekts mittels der Ionenprojektionslithographie herzustellen. Dabei handelt es sich um lineare Strukturen mit ca. 200 nm Breite und 500 nm Länge und um Ringstrukturen mit einem mittleren Durchmesser von 1,6  $\mu\text{m}$  und einer Wandstärke von 200 nm. Zur Kontaktierung sind entweder sechsteilige oder zweiteilige Anschluß-Flächen in der Maske vorgesehen.

## 1. Theorie

Die theoretischen Grundlagen für die Quanteninterferenz-Phänomene wurden von Aharonov und Bohm [1] erarbeitet. In Folge des Wellencharakters der Elektronen kann eine Elektronenwelle in zwei kohärente Teilwellen aufgeteilt werden. Werden ihre Phasen auf ihren getrennten Wegen unterschiedlich verändert, ist nach ihrer Vereinigung eine Interferenz meßbar.

Die gezielte Veränderung der Phase kann über den magnetischen Fluß  $\Phi$  oder ein elektrostatisches Potential  $V$  erreicht werden. Der magnetische Effekt wurde in den letzten Jahren an vielen Halbleiter- und Metallstrukturen beobachtet [2], [3]. Der elektrostatische Effekt ist in Festkörpern jedoch noch nicht nachgewiesen.

Das Experiment zum magnetischen Phänomen besteht üblicherweise aus einer Messung des elektrischen Widerstandes als Funktion der magnetischen Induktion  $B$ . Dabei sind folgende Phänomene beobachtbar:

**Aharonov-Bohm-Effekt:** oszillatorischer Beitrag der Quanteneffekte zum Magnetowiderstand, der in Ringstrukturen beobachtet werden kann. Die Interferenz rührt von einem jeweils halben Umlauf der Teilwellen um den Ring her und hat eine Periodizität von  $\frac{h}{e}$  (= Flußquant).

**Negativer Magnetowiderstand:** Dieses Phänomen tritt in einzelnen linearen Leitern auf. Er entsteht durch die Superposition vieler  $\frac{h}{2e}$ -Effekte.

**Universelle Leitfähigkeitsfluktuationen:** Superposition von verschiedenen  $\frac{h}{e}$ -Oszillationen mit verschiedenen Perioden im linearen Leiter.

## 2. Maske

Die Herstellung der Submikrometer-Strukturen erfolgte mittels Ionenprojektions-Lithographie. Der dafür notwendige Entwurf der mesoskopischen Elemente stammt von Prof. Dr. Kuchar vom Ludwig Boltzmann Institut für Festkörperphysik. Als Maske wurde eine Nickel-Folien-Maske (Anfertigung der Firma Heidenhain) verwendet.

Bei den Ringstrukturen (Abb. 1) sind in der Open-Stencil-Maske Stege vorgesehen, die den Innenteil halten. Diese Stege wurden durch elektrostatisches Verschieben geschlossen. Durch

Mehrfachbelichtung resultierende Querschnittsänderungen wurden dabei in der Maske berücksichtigt.

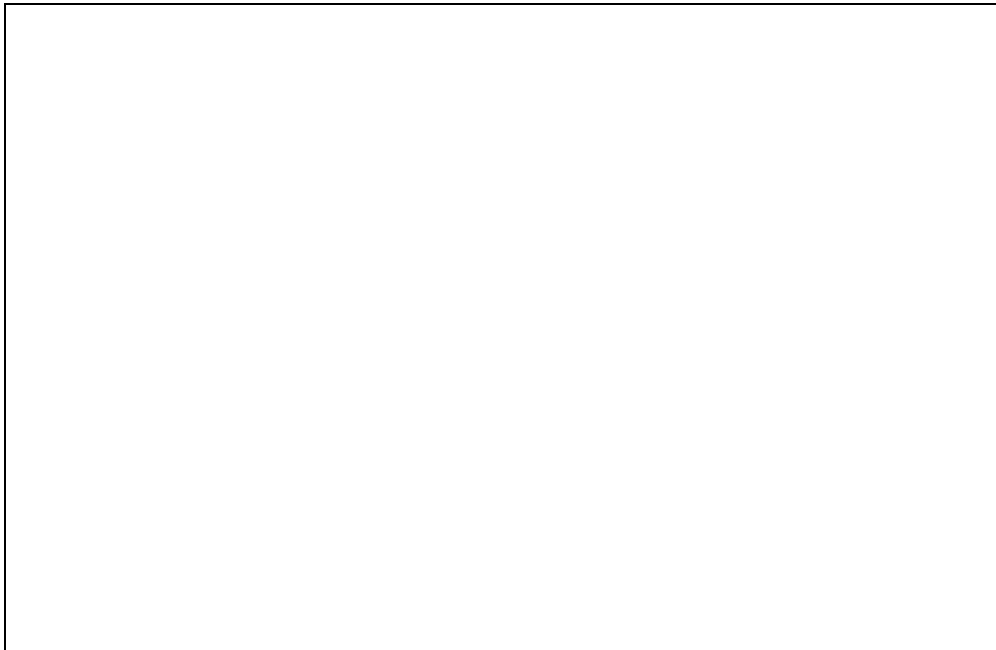


Abb. 1: Maskenbild eines Ringes mit sechsteiligem Anschluß

Da es in Folienmasken bei Strukturen mit extremen Dimensionsunterschieden zu Maskenverzerrungen kommt, wurden auf einer Maske Kontakte und Bauteile voneinander getrennt (Abb. 2). Durch elektrostatisches Steppen des Strahls kann man mit einer zweiten Belichtung die großen Strukturen über die kleinen legen. Dabei beträgt die Entfernung der Strahlverschiebung etwa 300  $\mu\text{m}$ .

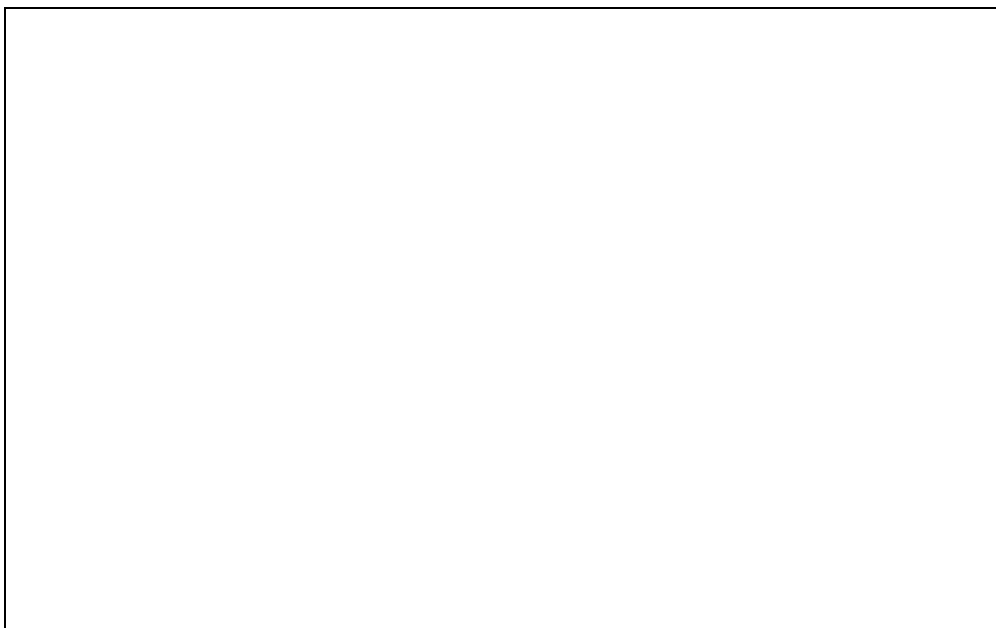


Abb. 2: Größenvergleich zwischen Bauteil und Kontaktflächen

### 3. Material

Die Bauelemente bestehen aus GaAs, wobei eine Si-dotierte, aktive Schicht auf einem halbisolierenden Substrat epitaktisch aufgewachsen wurde. Diese Materialkombination bildet eine Heterostruktur, d.h. an der Grenzschicht zwischen den Materialien bildet sich ein zweidimensionales Elektronengas mit großer Beweglichkeit und großer mittlerer freier Weglänge. Das ist für Quantenbauelemente notwendig, weil dadurch größere Bauelementeabmessungen und höhere Betriebstemperaturen möglich sind.

Die Epi-Schichten wurden am Institut für Mikroelektronik der Universität Linz mittels MOCVD ("Metal Organic Chemical Vapor Deposition") aufgewachsen.

Die Schichtdicken der drei Proben betragen: 64 nm, 73 nm und 91 nm. Die Dotierungskonzentration ist  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Alle drei Proben haben bei Raumtemperatur eine Ladungsträgerbeweglichkeit von  $2800 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Durch ungesättigte Valenzelektronen und Verunreinigungen (organische Lösungsmittel usw.) an der Oberfläche der epitaktischen Schicht ist die elektrisch aktive Dicke bei allen Proben um etwa 40 nm geringer als die physikalische.

### 4. Resistmaterialien

Im Rahmen des EUREKA-Projektes EU 50 wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Kalle-Hoechst am Institut Resistmaterialien auf Novolack-Basis für die Ionenbelichtung entwickelt. Die Belichtungen wurden mit dem Ionenprojektor ALPHA 5x der Gesellschaft für Mikroelektronik bei der Firma IMS (Ion Microfabrication Systems) in Wien durchgeführt.

Zur Herstellung der Quanteneffekt-Bauelemente wurden die Negativ-Resists RAY-PN und RAY-1005 verwendet, für die die Belichtungsparameter in Vorversuchen festzustellen waren. In Belichtungserien auf Si-Wafern mit variabler Ionendosis, Resistdicke und Entwicklungszeit wurden die optimalen Werte ermittelt. Danach erfolgt die Überprüfung der Parameter auf GaAs-Proben (ohne Heterostruktur).

### 5. Ätzen

Die Durchführung der Ätzungen erfolgte im RIE-Reaktor mit ECR-Quelle RIE 4000 "Version TU-Wien" bei der Firma Technics Plasma in München. Mit den Proben aus den Vorversuchen für die Resisttechnologie wurde die Maschine getestet und die Prozessparameter ermittelt. Als Ätzgas diente  $\text{BCl}_3$ . Ein ECR-Reaktor wurde gewählt, weil diese Ätzungen geringes Damage bei hoher Anisotropie garantiert. Die Ätztiefe sollte mindestens die doppelte Dicke der epitaktischen Schicht (etwa 200 nm) betragen. Tatsächlich realisiert wurden c.a. 500 nm. Typische Ergebnisse sind in Abb. 3 und Abb. 4 gezeigt.

Bei den Vorversuchen gelang es auch mit einer etwa 300 nm dicken Resistschicht bis zu 2 – 2,5  $\mu\text{m}$  tief zu ätzen.

Naßchemische Verfahren sind wegen des isotropen Ätzverhaltens in diesen Dimensionen völlig ungeeignet. Außerdem kann es bei kleinen Strukturen zu Schwierigkeiten mit dem Benetzen der Probe durch die wässrige Ätzlösung kommen.

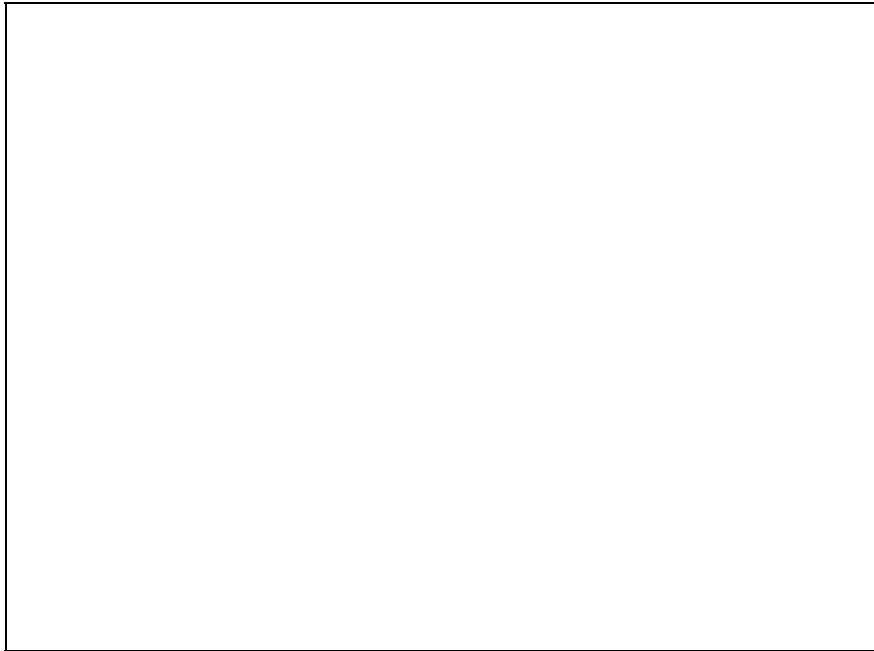


Abb. 3: Ringstruktur in GaAs geätzt.

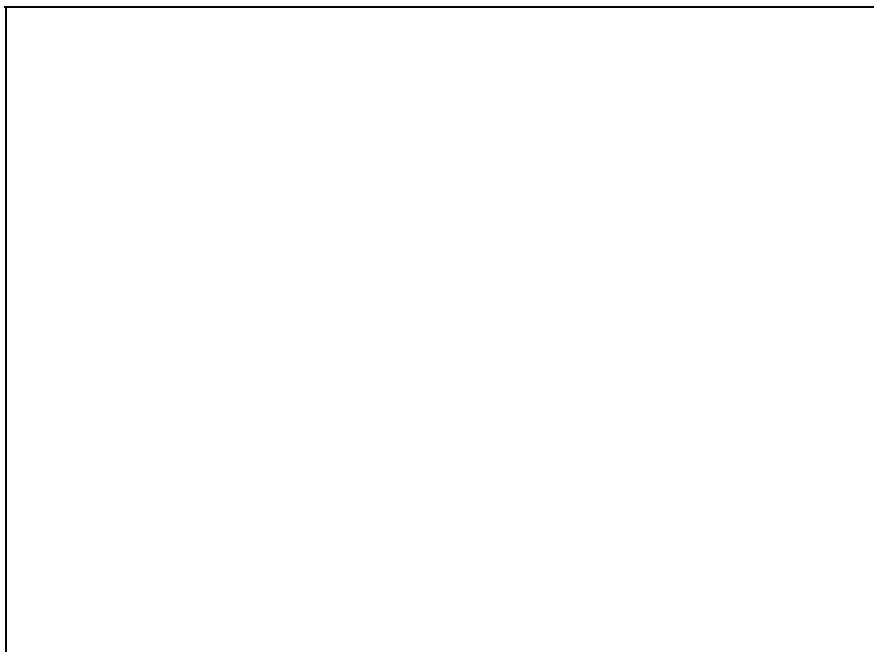


Abb. 4: Bauteil mit Anschlußflächen.

## 6. Kontaktierung

Um geeignete Flächen zum Kontaktieren der Proben mit Golddrähten zu schaffen, mußte auf die Kontaktflächen eine Gold-Germanium-Schicht zur Herstellung eines ohm'schen Kontaktes aufgedampft und einlegiert werden.

Da der Ionenprojektor nicht exakt auf eine Verkleinerung 5:1 eingestellt war, mußte durch Ausmessen der Maske und der belichteten Proben der Maßstabsfaktor ermittelt werden. Er betrug 5,16:1. Mit diesen Angaben wurde von Dr. P. Hudek an der Akademie der Wissenschaften in Bratislava eine CrO-Maske für optische Kontaklithographie angefertigt. Die Abdeckung der Submikrometerstrukturen erfolgte mit konventionellem Fotoresist (AZ 1370).

Die Gold-Germanium-Schicht wurde am Institut für Mikroelektronik an der Universität Linz von Dr. K. Lübke thermisch aufgedampft und durch Float-Off-Technik strukturiert. Danach wurde sie auf einer Heizplatte bei 430 °C in das GaAs-Substrat einlegiert. Abb. 5 zeigt einen Ausschnitt des Chip-Feldes mit den fertig kontaktierten Ringstrukturen.

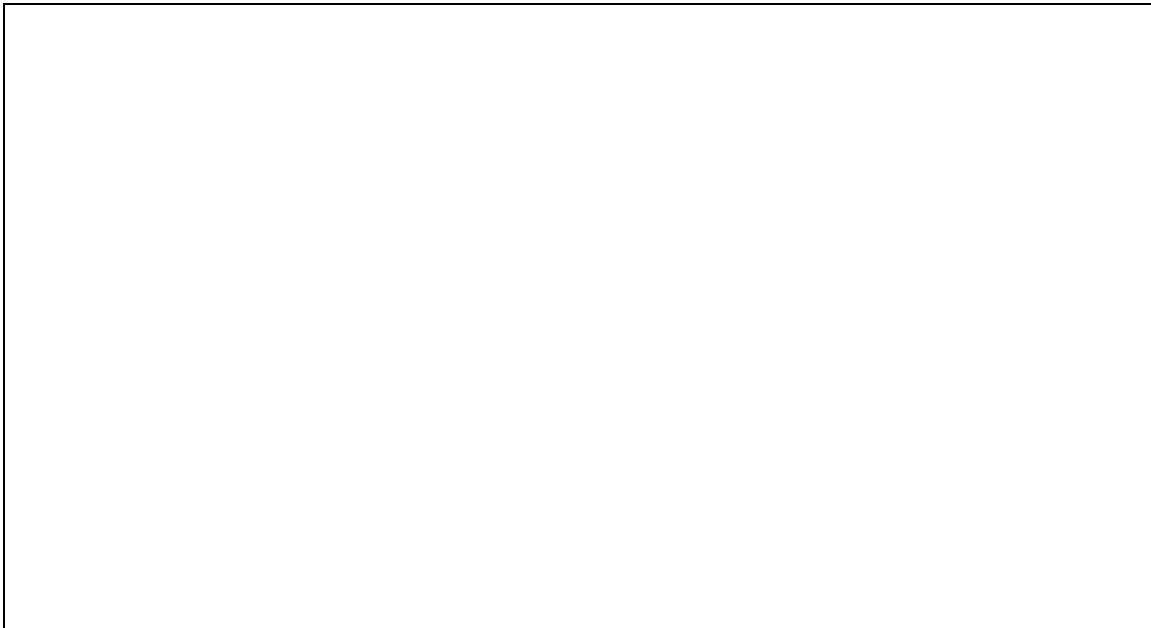


Abb. 5: Übersichtsaufnahme

## 7. Messungen

Die Messungen wurden am Ludwig Boltzmann Institut für Festkörper-physik von Prof. F. Kuchar durchgeführt.

Bei den Messungen bei Raumtemperatur wurde der Gleichstromwiderstand zwischen den Kontakten gemessen.

Dabei stellte man fest, daß der gemessene Widerstandswert um einige Zehner-potenzen ( $M\Omega$  statt  $k\Omega$ ) höher lag als der errechnete. Er zeigte aber, wie bei GaAs üblich, eine ausgeprägte Photo-Abhängigkeit.

Die Ursache dafür lag vermutlich im  $O_2$ -Plasmastricken des Foto-Resists. Dabei können durch Diffusion oberflächlich Sauerstoffatome in die epitaktische Schicht eingebaut werden, die dann als tiefe Donatoren wirken. Diese ergeben eine erhöhte Rekombinationsrate und schränken die Beweglichkeit der Elektronen ein.

Einen weiteren Einfluß könnte die Karbonisierung des Resists beim Ätz-prozeß haben, wobei Kohlenstoffatome eingebaut werden, die als Akzeptoren wirken. Dies kann man aber weitgehend ausschließen, da die Verkohlung des Ionen-optischen Lacks nur oberflächlich auftrat.

Ein Nachlegieren der Kontakte bei 450 °C verringerte den Gleichstrom-widerstand um zwei Zehnerpotenzen. Er ist aber immer noch zehnmal höher als der errechnete Wert.

### **Literaturverzeichnis**

- [1] Y. Aharanov, D. Bohm, Phys.Rev 115, 485 (1959).
- [2] H. Heinrich, G. Bauer, F. Kuchar (Hrsg.), "Physics and Technology of Submicron Structures", Springer Series in Solid State Sciences 83 (1988).
- [3] M.A. Reed, W.P. Kirk (Hrsg.), "Nansostructure Physics and Fabrication", Academic Press (1989).