

FP Tunnelodiode

aus NanoWiki, der freien Wissensdatenbank

Autor: Lüdtke, 19.10.2006

Inhaltsverzeichnis

- 1 Theorie
 - 1.1 Die Einzelbarriere
 - 1.2 Die Doppelbarriere: Resonantes Tunneln
- 2 Herstellung
 - 2.1 Molekularstrahlepitaxie
 - 2.2 Aufbau der Proben
 - 2.3 Ohmsche Kontakte und naßchemisches Ätzen
 - 2.4 Probenstrukturierung
- 3 Versuchsdurchführung
- 4 Versuchsauswertung
- 5 Versuchsbeschreibung zum Download

Theorie

Die Einzelbarriere

Eine einzelne Potentialbarriere ist ein einfaches quantenmechanisches System. Sie läßt sich realisieren, indem man eine dünne Schicht eines Halbleitermaterials mit einer größeren Bandlücke in eines mit einer kleineren Bandlücke einbettet (siehe Molekularstrahlepitaxie) Eine Möglichkeit ist, Aluminiumarsenid (AlAs) in Galliumarsenid (GaAs) einzuwachsen. Die Leitungsbandkante hat dann im Prinzip den in Abb. 1 gezeigten Verlauf. Die Quantenmechanik zeigt, daß ein Elektron aufgrund seiner Welleneigenschaft eine solche Potentialbarriere durchdringen kann:

Das Elektron dringt in den klassisch verbotenen Bereich der Barriere ein. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons innerhalb der Barriere nimmt exponentiell ab. Ist die Barriere aber genügend dünn, so daß die Aufenthaltswahrscheinlichkeit am Austritts-Rand noch nicht verschwunden ist, so ist das Elektron in der Lage, die Barriere ganz zu durchdringen. Diese endliche Durchgangswahrscheinlichkeit wird als Tunneleffekt bezeichnet.

Die quantenmechanische Beschreibung dieses Problems erfordert einen Ansatz für die Lösung der Schrödinger-Gleichung, der den einfallenden, den reflektierten und den transmittierten Anteil der Wellenfunktion enthält. Eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Barriere ist die Transmissionswahrscheinlichkeit. Ihre Ableitung kann über Lösen der Schrödingergleichung mit entsprechenden Randbedingungen erfolgen.

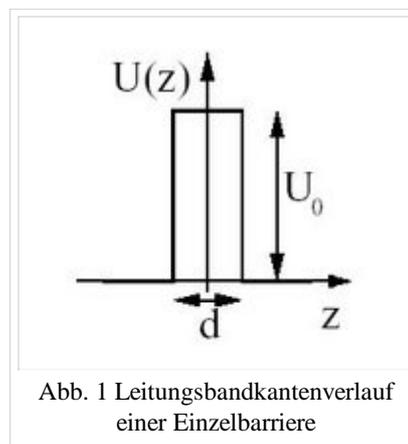


Abb. 1 Leitungsbandkantenverlauf einer Einzelbarriere

Die eindimensionale zeitunabhängige Schrödingergleichung lautet:

Dabei ist m^* die z-abhängige effektive Elektronenmasse, $U(z)$ das Potential, $\Psi(z)$ die Wellenfunktion und E die Energie.

Man erhält für eine rechteckige Barriere die Transmissionswahrscheinlichkeit:

mit $\kappa_z = (2m^*(U_0 - E_z)/\hbar^2)^{-1/2}$. Die Größe U_0 gibt die Barrierenhöhe an.

Die Doppelbarriere: Resonantes Tunneln

Das einfachste Beispiel einer resonanten Tunneliode hat i.A. folgenden Aufbau:

Eine undotierte Schicht, die den Potentialtopf bildet, ist zwischen zwei undotierten Barrieren eingebettet. Daran anschließend folgen stark dotierte Emitter und Kollektorkontakte. Die elektronischen Zustände in diesen sind Streuzustände mit kontinuierlicher Energieverteilung, während sich im Potentialtopf quasigebundene Zustände mit diskreten Energieniveaus ausbilden. Hier können sich Elektronen für eine für die Doppelbarrierenstruktur charakteristische Zeit ansammeln.

Eine typische Materialkombination besteht aus AlAs für die Barriere und GaAs für den Potentialtopf, sowie mit Silizium dotiertes GaAs für die Emitter- und Kollektorkontakte.

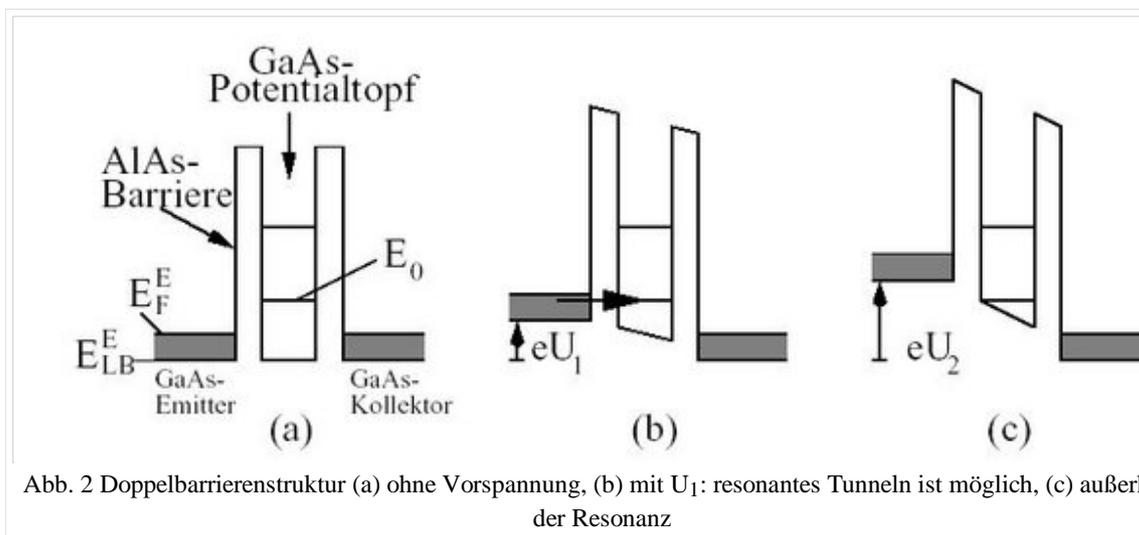


Abb. 2 Doppelbarrierenstruktur (a) ohne Vorspannung, (b) mit U_1 : resonantes Tunneln ist möglich, (c) außerhalb der Resonanz

Abbildung 2 zeigt eine Skizze des Leitungsbandkantenverlaufes (E_{LB}) einer solchen Doppelbarrierenstruktur. Für die folgenden Betrachtungen sind alle Energien auf die Energie an der Leitungsbandkante bezogen, es gilt also $E_{LB} = 0$. Die Elektronenzustände im Emitter sind bis zur Fermikante E_F^E besetzt (Abbildung 2 (a)). Das resonante Tunneln durch die Doppelbarriere findet statt, wenn die Energie der Leitungselektronen im Emitter (nahe der Fermikante) mit dem Energieniveau eines der quasigegebenen Zustände im Potentialtopf übereinstimmt.

Bei Anlegen einer Spannung an die Barriere verschiebt man das Emitterniveau zu höheren Energien. Sobald die Elektronenzustände des Emitters energetisch ein Energieniveau des Potentialtopfes E_0 erreichen, d.h. wenn

$$\alpha eU = E_F^E - E_0$$

beginnt ein Strom zu fließen (Abbildung 2 (b)). Es besteht eine Resonanz zwischen den Niveaus im Emitter und im Potentialtopf. Daher spricht man von einem resonanten Tunnelstrom. Der Faktor α berücksichtigt die Tatsache, daß nur ein Teil der zwischen Emitter und Kollektor angelegten Spannung U über der Barriere zwischen Emitter und Potentialtopf abfällt. In einfacher

Näherung ist bei symmetrischen Barrieren $\alpha = 1/2$, d.h. die Hälfte der angelegten Spannung fällt über jeweils einer Barriere ab. Tatsächlich müssen u.U. auch noch Spannungsabfälle an den Kontakten und Störungen im Potentialverlauf berücksichtigt werden. Der Strom nimmt mit wachsender Spannung zu, solange dem Energieniveau E_0 besetzte Zustände im dreidimensionalen Emittorkontakt gegenüberstehen. Aufgrund der über den Kontakten angelegten Spannung ist das Kollektorniveau so weit abgesenkt, daß den tunnelnden Elektronen immer unbesetzte Zustände zur Verfügung stehen. Das Heraustunneln aus dem Potentialtopf ist hier also immer möglich.

Bei weiterer Spannungserhöhung liegt die Energie des Zustandes im Potentialtopf unterhalb der Leitungsbandkante (Abbildung 2 (c)). Dann steht den Elektronenzuständen im Emitter kein Zustand innerhalb der Barrieren gegenüber, der Strom fällt auf Null. Dies ist bei Spannungswerten $\alpha eU = E_0$ der Fall.

Im folgenden wird eine einfache Erklärung für die in Abbildung schematisch dargestellte Kennlinie gegeben. Unter Annahme von Energieerhaltung und Impulserhaltung parallel zur Barriere kann die Energie der Elektronen im Emitter in zwei zu den Grenzflächen parallele Komponenten (x- und y-Richtung) und eine senkrechte Komponente (z-Richtung, Wachstumsrichtung) aufgeteilt werden:

$$E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m^*} + E_z, \quad E_z = \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*}$$

Die Bewegung parallel zur Grenzfläche kann durch eine ebene Welle mit $k_{||} = (k_x; k_y)$ beschrieben werden. Bei der Temperatur $T=0$ nehmen die Elektronen im dreidimensionalen Emitter Zustände ein, die im k-Raum als Punkte innerhalb einer Kugel mit dem Radius k_F (Wellenzahl an der Fermi-Fläche im Emitter) beschrieben werden können.

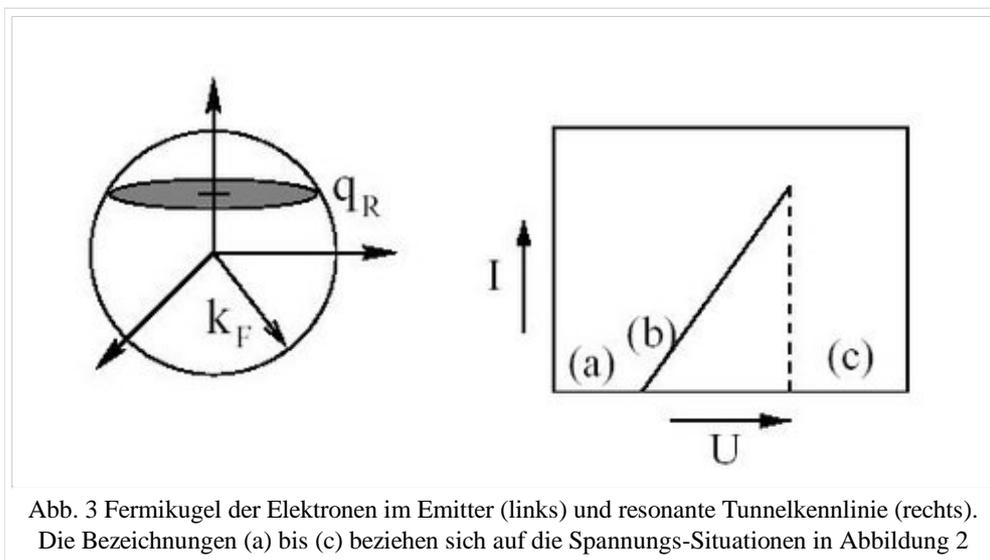


Abb. 3 Fermikugel der Elektronen im Emitter (links) und resonante Tunnelkennlinie (rechts). Die Bezeichnungen (a) bis (c) beziehen sich auf die Spannungs-Situationen in Abbildung 2

Mit Energie- (E_z) und Impulserhaltung ($k_x; k_y$) beim Tunneln in Zustände im Potentialtopf können die elektronischen Zustände durch eine Schnittfläche der Fermikugel mit der Ebene $k_z = q_R$ dargestellt werden, siehe dazu Abbildung 3. Dabei ist q_R der Wellenvektor, der zur Energie des resonanten Zustandes bezogen auf die Leitungsbandkante gehört. Über die Energieerhaltung $E_z = E_0 - E_{LB}^E$ folgt:

$$q_R = \frac{\sqrt{2m^*(E_0 - E_{LB}^E)}}{\hbar}$$

wobei E_0 die Energie des resonanten Zustandes im Potentialtopf und E_{LB}^E die Energie der Leitungsbandkante im Emitter ist. Der Tunnelstrom ist proportional zu der Schnittfläche der Ebene $k_z = qR$ mit der Fermikugel, also zu der Anzahl der Elektronen im Emitter, die tunneln können. Diese Fläche wächst von k_{zmax} bis $k_z = 0$. Der Tunnelstrom ist dann gegeben durch

$$I \propto \pi(k_F^2 - q_r^2) \propto (E_F^E - E_0) \propto U,$$

mit $E_F^E = E_F + E_{LB}^E$ als lokale Fermienergie im Emitter. Der Strom I wächst mit der angelegten Spannung U linear, bis E_0 unter die Leitungsbandkante fällt. Dann ist der Stromfluss wieder Null. Diese in Abbildung 3 angedeutete, dreieckige Tunnelkennlinie wird bei Raumtemperatur tatsächlich gemessen. Die Abweichung vom idealen Stromverlauf wird bewirkt durch eine Ladungsanhäufung im Potentialtopf. Weitere Aspekte zu resonanten Tunnelioden finden sich z.B. in [1,2]. Die exakte Bestimmung des Stromes erfordert die Kenntnis der Transmissionswahrscheinlichkeit.

Zusammenfassend sei festgehalten: **Resonantes Tunneln** kann immer dann stattfinden, wenn Elektronenzustände im Emitter energetisch auf der gleichen Höhe mit Energieniveaus im Potentialtopf sind und im Kollektor unbesetzte Zustände zur Verfügung stehen.

Herstellung

Molekularstrahlepitaxie

Die Molekularstrahlepitaxie ist ein Verfahren zum Wachstum einkristalliner Schichten von hoher Reinheit. Im Ultrahochvakuum (UHV) werden Strahlen von thermischen Atomen oder Molekülen auf ein geheiztes Substrat gerichtet. Bei geeigneter Wachstumstemperatur können die gemeinsam auftreffenden bzw. bereits adsorbierten Atome miteinander reagieren und homo- oder heteroepitaktische Schichten bilden. Mit Wachstumsraten von 1-10 $\mu\text{m/h}$ ist die Molekularstrahlepitaxie gegenüber anderen Verfahren (100 $\mu\text{m/h}$ bei Gasphasenepitaxie (VPE)) sehr langsam. Dies ist die Folge eines vergleichsweise geringen Materialangebotes im Atomstrahl, birgt aber folgende Vorteile in sich:

Dieses Epitaxieverfahren zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, Schichtdicken und Übergänge zwischen verschiedenen Schichten genau zu kontrollieren. Abrupte Übergänge von ein bis zwei Monolagen sind möglich. Die Zusammensetzung der Schichten, d.h. der prozentuale Anteil der jeweiligen Komponenten, und die Dotierungskonzentrationen können ebenfalls sehr genau eingestellt werden. Nachteil des sehr langsamen Schichtwachstums ist der geringe Durchsatz, so daß die MBE eher für Laboranwendungen geeignet ist, für kommerzielle Zwecke allerdings kaum in Frage kommt. Die großtechnische Produktion wird von metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOCVD) bestimmt.

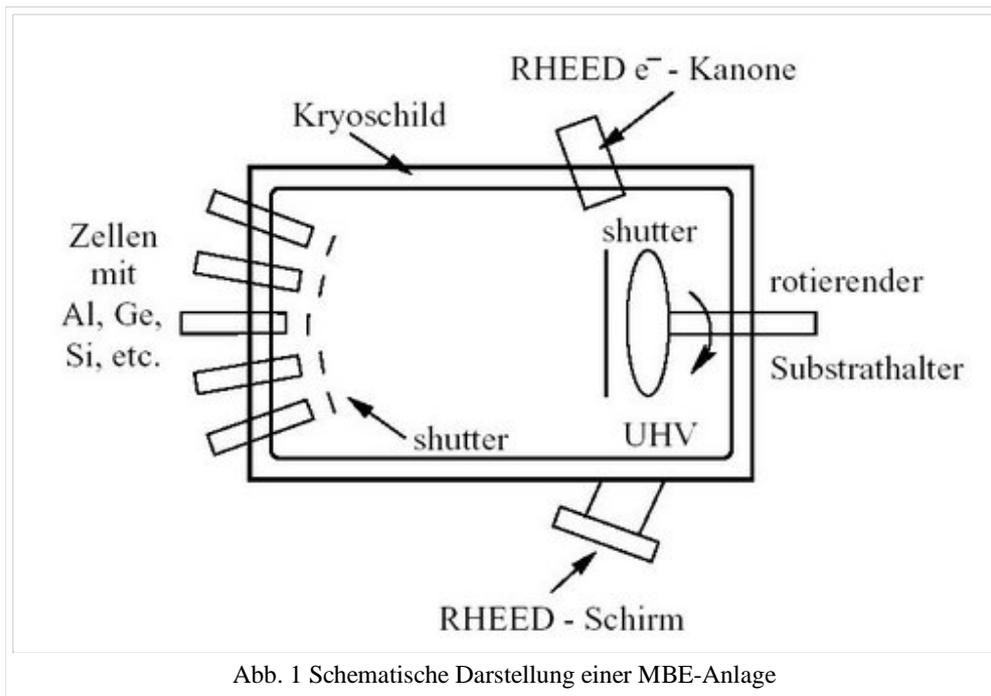


Abb. 1 Schematische Darstellung einer MBE-Anlage

Die Substrate (Halbleiter-Scheiben, Wafer) werden durch eine Schleuse in eine mit stickstoffgekühlten Schilden versehene UHV-Kammer eingeführt, vergl. Abbildung 1. Der Hintergrunddruck in der Wachstumskammer liegt unter 10^{-8} Pa. Zur Entfernung von Verunreinigungen, speziell von Sauerstoff, werden die Wafer bei 580-600°C ausgeheizt. Vor dem Wachstum der gewünschten aktiven Schichten kann man zunächst das Substratmaterial aufwachsen, um Verunreinigungen und Defekte zu vergraben. Die Substrathalter rotieren während des Wachstums (mit einigen Umdrehungen pro Minute), um einen gleichmäßigeren Materialauftrag zu erreichen.

Die Wachstumsmaterialien, die entweder als Elemente oder als Verbindungen vorliegen, verdampfen in geheizten Tiegeln (Effusionszellen). Mit Hilfe von Blenden (beam shutter) können die einzelnen Atom- oder Molekularstrahlen ein- und ausgeblendet und so die abrupten Übergänge eingestellt werden. Der Materialstrom kann zusätzlich über die Tiegeltemperatur geregelt werden. Der Fluß J wird unter der Annahme, daß zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase Gleichgewicht besteht, beschrieben durch:

$$J \sim pA / (l_{SZ}(MT))^{1/2}$$

Dabei ist p der Dampfdruck in der Effusionszelle, A die Fläche der Zellenöffnung, l_{SZ} der Abstand Zelle-Substrat, M das Molekulargewicht des verdampften Materials und T die Tiegeltemperatur. Bei steigender Tiegeltemperatur nimmt der Dampfdruck in der Effusionszelle zu. Da dieser direkt proportional zur Temperatur ist ($p \sim T$), nimmt somit der Materialfluss zu ($J \sim T^{-1/2}$).

Beim Wachstum von Galliumarsenid (GaAs) liegt das Quellmaterial Gallium in elementarer Form vor und bildet einen Atomstrahl, während das Arsen zusätzlich aus der III-V-Verbindung GaAs gewonnen werden kann. Im letzteren Fall liegt das Arsen in dimerer Form (As_2) vor, während bei der elementaren Arsenquelle Tetramere (As_4) den Molekularstrahl bilden. Das epitaktische Wachstum erfolgt in mehreren Schritten:

- Adsorption der entsprechenden Atome oder Moleküle, wobei ein Teil hiervon auch wieder desorbiert
- Migration auf der Kristalloberfläche; Dissoziation der Moleküle

- Inkorporation, d.h. Anlagerung einzelner Atome, bevorzugt an Stufen oder Kinken, oder Clusterbildung mehrerer Atome

Arsen hat einen sehr geringen Haftkoeffizienten (engl. sticking coefficient) oberhalb einer Substrattemperatur von 500°C. Es benötigt immer einen Ga-Partner zum Einbau in das Kristallgitter. Daher erfordert das GaAs-Wachstum ein Überangebot an Arsen; nicht eingebaute Atome desorbieren wieder von der Substratoberfläche. Die Wachstumsrate ist damit durch den Fluß von Ga-Atomen bestimmt.

Die Substrattemperatur ist eine weitere, das epitaktische Wachstum entscheidend bestimmende Größe. Bei zu geringen Temperaturen ist die Energie der beteiligten Materialien zu klein; Arsen muß z.B. bei der Adsorption dissoziieren können. Die Güte und Reinheit der Schichten wächst mit höheren Temperaturen, wobei allerdings eine obere Grenze durch die Desorption der Materialien gegeben ist. Eine den jeweiligen Anforderungen angepaßte Substrattemperatur muß eingestellt werden. Für Galliumarsenid liegt dieser Bereich zwischen 450°C und 650°C.

Galliumarsenid bietet viele Möglichkeiten zur Heteroepitaxie, d.h. zum Wachstum unterschiedlich zusammengesetzter Schichten. Herausragende Bedeutung hat hier die III-V-Verbindung Aluminiumarsenid (AlAs): Aufgrund der fast gleichen Gitterkonstanten von AlAs und GaAs ist gitterangepaßtes Wachstum möglich. Damit erhält man AlAs-Schichten auf GaAs mit sehr hoher Qualität. Außerdem kann über die Temperatur der Effusionszelle jede Konzentration x ($0 < x < 1$) im Mischkristall $Al_xGa_{1-x}As$ eingestellt werden.

Eine Dotierung des GaAs-Kristalls ist ebenfalls möglich. Ein häufig verwendeter Dotierstoff ist Silizium (Si). Die Konzentration der Si-Atome wird eingestellt über die Temperatur der Effusionszelle. Da das Wachstum in der MBE unter Ultrahochvakuum-Bedingungen stattfindet, können z.B. Massenspektrometrie und diverse Oberflächenanalysemethoden, wie Augerelektronenspektroskopie (AES (<http://de.wikipedia.org/wiki/Auger-Elektronen-Spektroskopie>)) und Beugung schneller Elektronen (RHEED (<http://de.wikipedia.org/wiki/RHEED>)) angewandt werden. So kann vor, während und nach der Ablagerung der Atome der Wachstumsprozeß beobachtet werden.

Die am häufigsten verwendete Analysemethode ist RHEED. Hierbei werden Elektronen hoher Energie (10-15 keV) mit sehr flachem Einfallswinkel auf die zu untersuchende Oberfläche geleitet. Die Elektronen haben in diesem Fall eine sehr geringe Eindringtiefe (1-2 Atomlagen). Das Beugungsmuster der reflektierten Elektronen wird auf der gegenüberliegenden Seite aufgenommen (Leuchtschirm oder Kamera). Aus dem Beugungsbild kann man auf die Oberflächengeometrie und -morphologie schließen.

Aufbau der Proben

Die Proben wurden an der PTB Braunschweig von den Herren Dr. Klaus Pierz und Holger Marx nach denen im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methoden gewachsen. In diesem Abschnitt wird kurz der Aufbau der zu untersuchenden Proben beschrieben.

Probenserie	P176
Substrat (wafer)	n ⁺ GaAs
Pufferschicht (buffer)	1µm n ⁺ GaAs 10 nm n GaAs 10 nm n ⁻ GaAs
Zwischenschicht (spacer)	4 nm GaAs
untere Barriere	3.4 nm AlAs
GaAs Schicht	5 nm GaAs
obere Barriere	3.4 nm AlAs
Zwischenschicht (spacer)	4 nm GaAs
Pufferschicht (buffer)	10 nm n ⁻ GaAs 10 nm n GaAs 500 nm n ⁺ GaAs

Abb. 2

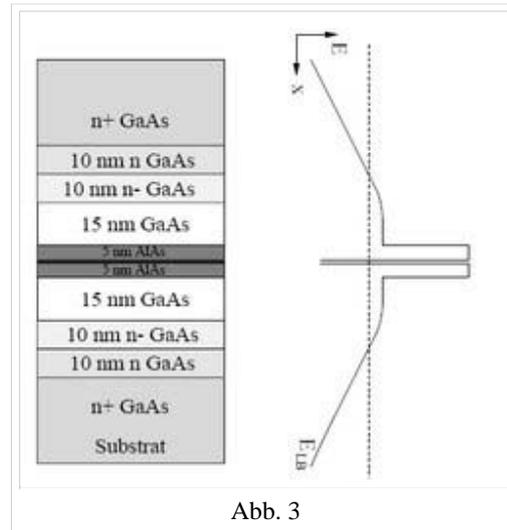


Abb. 3

Ausgangsmaterial für das Wachstum ist ein zwei Zoll großer GaAs-Wafer, der mit Silizium dotiert ist. Die Konzentration des Si beträgt $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (n⁺-Dotierung). Während des Wachstums wird der Waferhalter mit 11,8 U/min gedreht. Bei einer Temperatur von 560°C werden 300 nm weiteres GaAs mit dieser Dotierung aufgewachsen. Während des Wachstums der nächsten 200 nm wird die Temperatur stetig auf 600°C erhöht. Weitere 500 nm GaAs wachsen bei dieser Temperatur. Die Dotierung mit Si bleibt dabei konstant. Dann folgen jeweils 10 nm GaAs mit einer Dotierung von $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ bzw. $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (n-, bzw. n⁻-Dotierung). Diese insgesamt 1µm + 2x10 nm dicke GaAs-Pufferschicht (engl. buffer) mit einem Dotierungsgradienten dient zum Einwachsen eventueller Störungen im Kristall und schafft einen Übergang vom hochdotierten Bereich für ohmsche Kontakte zum nicht dotierten Bereich und der Tunneliode. Die untere Barriere aus AlAs ist 5 nm bzw. 4 nm dick. Anschliessend folgt eine 5nm dicke Schicht GaAs, die als Quantentopf dient. Dann folgen in umgekehrter Reihenfolge eine obere AlAs-Barriere (5 nm bzw. 6 nm dick), eine undotierte GaAs-Schicht, je 10 nm GaAs mit der entsprechenden Dotierung und abschließend wieder eine hochdotierte GaAs-Kontaktschicht. Diese obere Pufferschicht dient ebenfalls der Kontaktierung. Die Abfolge der einzelnen Schichten ist in der Abbildung 3 und in der Tabelle noch einmal zusammengestellt. Die Abbildung zeigt zusätzlich eine schematische Darstellung des Leitungsbandkanten-Verlaufes, wie er sich aus dem Dotierungsgradienten und der Barrierenstruktur ergibt.

Ohmsche Kontakte und naßchemisches Ätzen

Die GaAs-Proben sind nun vorhanden. Jetzt muß ein elektrischer Kontakt für Transportexperimente geschaffen werden. Das geschieht durch Aufbringen ohmscher Kontakte, und nasschemisches Ätzen. Anschliessend werden die Dioden gebondet.

Dieser Abschnitt soll kurz zwei für die Probenstrukturierung wichtige Aspekte darstellen: Die Herstellung der ohmschen Kontakte und das naßchemische Ätzen von Halbleitermaterialien.

Die Verbindung der Halbleiterstruktur mit der äußeren Schaltung erfolgt über ohmsche Kontakte. Sie sollen möglichst kleine, von der Stromrichtung unabhängige Widerstände darstellen und eine lineare Strom-Spannungscharakteristik aufweisen. Dies ist speziell bei tiefen Temperaturen nicht immer gegeben. Zwischen der Metallschicht und dem Halbleiter befindet sich immer eine Barriere, die zu einer Bandverbiegung führt. Das Fermi-niveau liegt ca. um 1/3 der Energielücke oberhalb der Valenzbandkante. Die Breite der Übergangsschicht ist von der Dotierung abhängig: Je höher die Dotierung, desto schmaler der Übergangsbereich. Der Kontaktwiderstand wird also kleiner, wenn der Halbleiter hoch dotiert ist ($\gg 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Eine isolierende Schicht zwischen dem Halbleiter und der Metallisierung muß vermieden werden. Daher wird die Halbleiteroberfläche vor dem Aufdampfen der Metalle immer etwas angeätzt, um eine evtl. gebildete Oxidschicht zu entfernen. Das Aufbringen der Metallschicht(en) erfolgt im Vakuum, wobei die Metalle aus geheizten Schichten (Widerstandsheizung) verdampft werden. Die hier verwendete Schichtenfolge ist 5 nm Nickel (Ni), 400 mg einer eutektischen Gold-Germanium-Mischung (AuGe) und 15 nm Ni. Da die Dampfdrücke von Au und Ge unterschiedlich sind, wird eine abgewogene Menge der eutektischen Mischung vollständig verdampft. Die verwendete Menge entspricht ungefähr einer Schichtdicke von 100 nm. Anschließend wird ein Temperschritt vorgenommen, der zur Erniedrigung des Kontaktwiderstandes führt: Das Probenstück wird dabei kurz ($\gg 30$ s) auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des AuGe-Eutektikums (360°C) aufgeheizt. Die Schmelze löst das Halbleitermaterial an. Bei diesem Legierprozess entstehen Ga-Vakanzen. Ge diffundiert in das GaAs, besetzt die Ga-Plätze und wirkt dort als Donator. Es entstehen Ge-Konzentrationen um 10^{19} cm^{-3} . Die untere Ni-Schicht verbessert die Benetzung der Halbleiteroberfläche mit dem Eutektikum. Die abschließende Ni-Schicht erhöht zusätzlich die Löslichkeit des GaAs. Das Legieren erfolgt unter Schutzgasatmosphäre, da bei den eingestellten Temperaturen sonst Oxidationsvorgänge stattfinden können. Verwendete Gase sind Wasserstoff, Stickstoff oder Formiergas (80 % N_2 , 20 % H_2).

Beim naßchemischen Ätzen wird die Oberfläche des Halbleiterkristalls durch stark reaktive Moleküle in der Ätzlösung angegriffen. Die Bindungen zwischen den Oberflächen-Atomen werden aufgebrochen und ersetzt durch Bindungen mit der reaktiven Komponente. Die Reaktionsprodukte werden aufgelöst oder verlassen das System als Gase.

Das naßchemische Ätzen von Halbleitermaterialien ist eine heterogene chemische Reaktion. Der Korrosionsvorgang verläuft in zwei Schritten: Im anodischen Schritt erfolgt die Oxidation des Metalls und im kathodischen Schritt die Reduktion des Oxidationsmittels. Der Ladungsaustausch bei der Oxidation von Halbleitern findet im wesentlichen über das Valenzband statt: Halbleiteratome, die oxidiert in Lösung gehen, geben Elektronen an das Valenzband ab. Es findet ein Austausch von Defektelektronen zwischen dem Oxidationsmittel und dem Valenzband des Halbleitermaterials statt. Dieser sog. Valenzbandmechanismus wird bei der Reaktion einer Vielzahl von Oxidationsmitteln zum Ätzen von GaAs beobachtet.

Die Reaktion läuft in folgenden Schritten ab:

- Andiffusion der Reaktanden/Oxidationsmittel
- heterogene Reaktion mit den Gitterbausteinen bzw. Oberflächenverbindungen
- Abdiffusion der Reaktionsprodukte

Man unterscheidet die reaktionskontrollierte Aulösung von der diffusionskontrollierten Aulösung. Beim ersten Mechanismus ist der die Geschwindigkeit bestimmende Schritt die chemische Reaktion der beteiligten Stoffe (Schritt (2)), während bei der zweiten die Diffusion der Materialien für den Ätzvorgang ausschlaggebend ist (Schritt (1) oder (3)). Verschiedene Kriterien bestimmen die Auswahl der geeigneten Ätzlösung. Der pH-Wert der Lösung muß eine ungehemmte Auflösung der Deckschichten gewährleisten. Wasserstoffperoxid (H_2O_2) greift in einem chemischen Auslösemechanismus direkt die GaAs-Halbleiteroberfläche an. Das dabei entstehende $\text{Ga}(\text{OH})_3$ ist in einem weiten pH-Bereich schlecht löslich, das Löslichkeitsminimum von AsO_2 liegt bei pH 4. Daher sollten die Ätzlösungen stark sauer bzw. alkalisch sein.

Die beim Ätzen entstehende Oberfläche kann je nach Ätzrezept unterschiedlich ausfallen. Bei Anwendung saurer H_2O_2 -Lösungen rauht die GaAs-Oberfläche im atomaren Maßstab auf, während alkalische H_2O_2 -Lösungen eine glattere Oberfläche liefern.

Wichtige Ätzmedien zur Strukturierung von GaAs sind säurehaltige Wasserstoffperoxidlösungen: Schwefelsäure (H_2SO_4) und Phosphorsäure (H_3PO_4) sind dabei die am häufigsten verwendeten

Säuren. Je nach Zusammensetzung des Systems Säure-H₂O₂-H₂O und Temperatur der Lösung werden unterschiedliche Ätzzraten und -profile erreicht. Es kommen mehrere Rezepte zur Anwendung:

- H₃PO₄:H₂O₂:H₂O = 3:5:40 und 3:1:50 mit Ätzzraten von 500 nm/min bzw. ca.100 nm/min bei 20°C.
- H₃PO₄:H₂O₂:CH₃CH₂OH = 1:1:3. Die Ätzzrate ist hier etwa 2 nm/min.

Alle Systeme ätzen auch AlAs, so daß ein Durchätzen der Barriere gewährleistet ist.

Probenstrukturierung

In diesem Abschnitt wird die Herstellung der Tunnelioden beschrieben. Sie wurden mit optischer Lithographie und naßchemischem Ätzen strukturiert. Zuerst wurde eine Maske für dieses Projekt entworfen. Die Maske, eine mit Chrom bedampfte Glasplatte, wurde mit Elektronenstrahlolithographie von Herrn Dr. Thomas Weimann, PTB Braunschweig, geschrieben. An den Stellen, an denen später die Dioden sein sollen, ist die Chromschicht, die Licht sehr stark absorbiert, noch vorhanden.

Auf der Maske sind insgesamt 6 x 8 Chips vorgesehen, auf denen jeweils mehrere Tunnelioden in unterschiedlichen Größen enthaltenen sind. In der Abbildung 1 ist einer dieser Chips skizziert. An den grauen Stellen ist auf der Maske Chrom vorhanden. Auf dem fertigen Chip sind dies auch die Stellen, die die Metallisierung enthalten. Die Dioden sind quadratisch. Die Kantenlängen betragen 10, 20, 40, 50, 80, 100, 150 und 200 µm (im Bild von links nach rechts). Die Chips wurden entsprechend der Matrixindizierung von 00 bis 75 durchnummeriert.

Die Proben durchliefen folgende Herstellungsschritte:

- Aufbringen einer Lackmaske
- Aufdampfen metallischer Kontakte
- Ätzen der Mesa
- Kontaktierung der Tunnelioden durch Legieren und Bonden

Die einzelnen Prozeßschritte sind in der Abbildung schematisch dargestellt

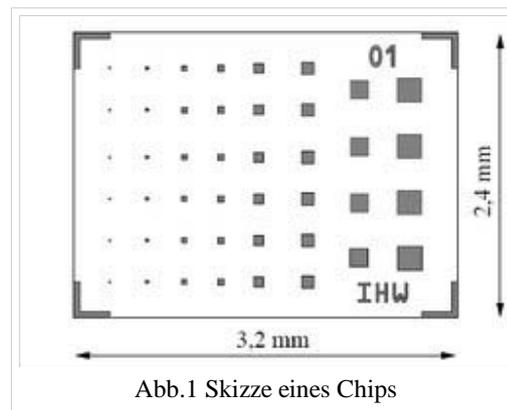


Abb.1 Skizze eines Chips

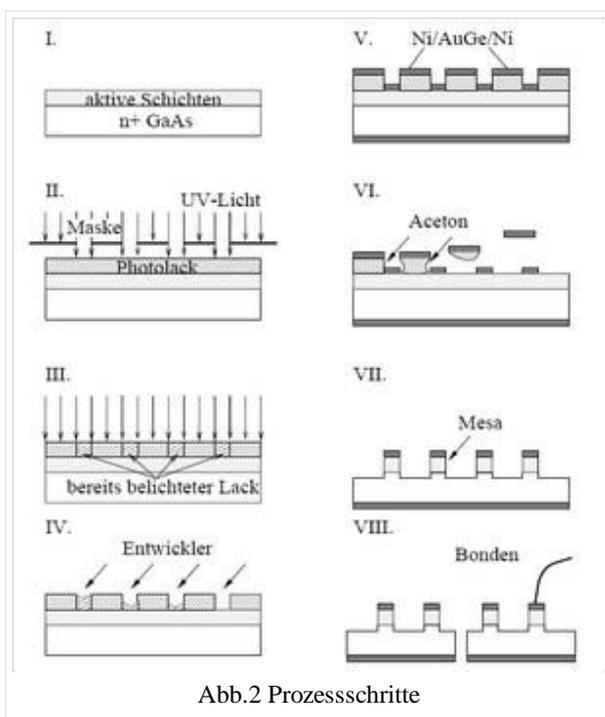


Abb.2 Prozessschritte

Das Probenstück, in der Regel ein Viertel-Stück eines 2-Zoll-Wafers, wird auf einer Lack-Schleuder mit Aceton ($\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$) und Iso-Propanol ($\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$) gereinigt. Die Probe wird dabei durch Vakuumsaugung auf dem Drehteller einer Schleuder gehalten und bei einer Drehzahl von ca. 4000 min^{-1} einige Male ca. 20 s lang mit Aceton gespült, im letzten Schritt zuerst mit Aceton und dann mit Iso-Propanol.

Das Beschichten mit Positiv-Photolack (Hoechst, AZ 5214 E) erfolgt bei 3500 min^{-1} (25 s). Dabei wird eine dosierte Menge Photolack auf das Probenstück gegeben und dieses zentrifugiert, so daß der Lack einen gleichmäßigen, dünnen Film bildet.

Nach dem Aufschleudern wird der Lack ca. 3 min bei 90°C ausgebacken, um die nicht belichteten Stellen resistenter gegen die im folgenden einwirkenden Chemikalien zu machen.

Die Belichtung des Lackes zur Strukturierung der Tunnelioden geschieht im Kontaktbelichtungsverfahren: Die Photomaske wird gegenüber der Probe im Maskaligner (Karl Suss) unter einem Mikroskop justiert. Dann wird die Probe in direkten Kontakt mit der Maske gebracht und durch diese hindurch mit UV-Licht belichtet (Abb. 2 II). Für das Aufdampfen der ohmschen Kontakte ist eine Negativ-Lackmaske notwendig. Das bedeutet, daß dort, wo im nächsten Schritt die Metallisierung aufgedampft werden soll, die Lackmaske Löcher haben muß. Der Rest muß mit Photolack bedeckt bleiben. Dies erreicht man entweder mit Negativ-Lack oder - bei Verwendung von Positiv-Lack - mit einem entsprechenden Verfahren, das hier Verwendung fand und kurz beschrieben wird:

Zuerst werden kurz (6 s) die Lackanteile belichtet, die bestehen bleiben sollen. Dann wird die Probe bei ca. 115°C 15 min lang gebacken. Zuletzt wird die gesamte Probe ohne Maske 20 s lang belichtet (Flutbelichtung, siehe Abb. 2 III.). Durch das Ausbacken der belichteten Struktur werden die oberen Schichten des Lackes resistenter gegen den anschließenden Entwicklungsprozeß.

Die photoaktive Komponente des Resists ändert beim Belichten ihre chemische Struktur, so daß sie im Entwickler gelöst werden kann. Die zuerst nicht belichteten Stellen werden beim Entwickeln ganz gelöst und die tiefer liegenden Lackschichten dann von dort aus etwas gelöst. Damit ergibt sich an den Kanten ein Unterschnitt, wie er in Abbildung 3 skizziert ist. Beim Aufdampfen der Metallschichten reißt der Metallfilm an diesen Kanten ab. Eine saubere Trennung zwischen den ohmschen Kontakten und den wieder abzulösenden Stellen erleichtert den Lift-off (das Abheben des Lackes mit der Metallisierung an den gewünschten Stellen).

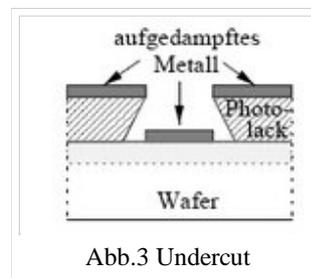


Abb.3 Undercut

Zum Entwickeln des Photolackes (Abbildung 2 IV) werden Entwickler (AZ-Developer) und deionisiertes Wasser zu gleichen Teilen gemischt und die Probe darin geschwenkt. Typische Entwicklungszeiten liegen hier bei 1 min. Anschließend wird mit deionisiertem Wasser (DIH_2O) 2 min gespült. Die Probe wird durch Anblasen mit (nachgereinigtem, gefiltertem) Stickstoff

getrocknet. Nun ist die Lackmaske für das Aufdampfen der Metallisierung (Abbildung 2 V) fertiggestellt.

Unmittelbar vor Einbau der Probe in die Aufdampfanlage werden Oxidschichten auf der Oberfläche durch kurzes Eintauchen in verdünnte Salzsäure ($\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$) entfernt. Anschließendes kurzes Abspülen mit DIH_2O und Trocknen mit Stickstoff stoppt diesen Ätzprozeß. Die Anlage verfügt über zwei Quellen, so daß die Schichtenfolge aus Nickel (5 nm), einer Gold-Germanium-Legierung (400 mg AuGe entsprechen einer Schichtdicke von 100 nm) und wieder Nickel (15 nm) in einem Schritt aufgedampft werden kann. Das Aufdampfen erfolgt bei Drücken um etwa 4×10^{-6} mbar. Zum Abheben der Lackschicht (Lift-off) wird die Probe in ein Acetonbad gelegt (vergl. Abbildung 2 VI.). Für das Bedampfen der Rückseite wird die Probe mit der bereits prozessierten Seite mit Photolack auf einem Glasträger befestigt (Trocknen des Lackes bei 85°C ca. 15 min). Dann folgen die oben beschriebenen Schritte Oxidentfernung und Aufdampfen der Schichtfolge Ni/AuGe/Ni mit den oben angegebenen Dicke

Zum naßchemischen Ätzen der Mesostruktur wird die Probe zwecks besserer Handhabung mit Photolack auf einen Glas-Objekträger geklebt. Der Prozess des Ätzens ist im vorigen Kapitel beschrieben. Nach dem Ansetzen der Lösung wird diese 15 min stehengelassen, damit sie Raumtemperatur annimmt, und die Komponenten sich gleichmäßig durchmischen können. Gelegentliches Rühren unterstützt diesen Prozeß. Beim Ätzen wird der Glasträger mit der Probe leicht geschwenkt, damit der Halbleiteroberfläche ständig Reaktanden zugeführt und Reaktionsprodukte von dort abgeführt werden. Die Ätzdauer richtet sich nach Rezept und erforderlicher Äztiefe. Um den Ätzprozeß zu stoppen, wird anschließend 5 min mit DIH_2O gespült und die Probe dann durch Anblasen mit Stickstoff getrocknet. Abbildung 2 VII. zeigt schematisch die geätzten Dioden.

Nach dem Lösen vom Objekträger in Aceton wird das Probenstück legiert. Dazu wird es im Legierofen plaziert und zuerst ca. 10 Minuten mit Formiergas umspült. Es findet ein ständiger Gasfluß statt, der verhindern soll, daß sich bei dem Temperschnitt in der Umgebung vorhandene Stoffe auf der Metalloberfläche anlagern und eingebunden werden. Während des eigentlichen Legierprozesses ist der Gasfluß etwas reduziert. Das Probenstück wird dann kurzzeitig auf 420°C erhitzt. Der Legierofen benötigte ca. eine Minute, um die Temperatur zu erreichen, sobald sie erreicht war, wurde die Heizung abgeschaltet und der Gasfluß wieder erhöht.

Durch Ritzen und Brechen wird die Probe dann in die einzelnen Chips geteilt. Diese werden mit Leitsilber in Chipcarrier geklebt, um die Unterseite der Proben zu kontaktieren. Der elektrische Anschluß auf der Oberseite der Dioden erfolgt durch Bonden mit Aluminiumdraht (vergl. Abbildung 2 VIII.). Der Draht (Durchmesser ca. $20 \mu\text{m}$) wird dabei mit einem Keil auf dem metallisierten Kontaktfleck aufgedrückt. Ultraschall-Vibrationen des Keils reißen die bei Aluminium vorhandene Oxidhaut auf und vermitteln den Kontakt zwischen Draht und Metallisierungsfläche (Ultraschall-Bonden). Die Probe ist nun fertiggestellt.

Versuchsdurchführung

- Sicherheitseinweisung vom Praktikumsbetreuer
- Führung durchs Institut
- Kurzes Antestat
- Proben auswählen und auf Funktionstüchtigkeit prüfen
- Transportmessung von 3 Proben bei Raumtemperatur
- 10 Hysteresemessungen an einer Diode bei Raumtemperatur
- Transportmessung bei 5 Temperaturen zwischen 5K und 270K in gleichmässigen Schritten
- Hysteresemessung für diese 5 Temperaturen an einer Diode
- Aufbau eines entdämpften Schwingkreises

Versuchsauswertung

1. Einführung in die Theorie
2. Beschreibung des Versuchsaufbaus inklusive Probenstab
3. Beschreibung der Proben (Schichtfolge, Größe und Anordnung der Dioden)
4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse
 - Umrechnung der Peakpositionen in Energie ($E = \alpha e V_{\text{Peak}}$ mit $\alpha = 0.5$ für symmetrische Barrieren)
 - Bestimmung der Breite L des Potentialtopfes (dazu: effektive Elektronenmasse GaAs $m^* = 0.067m$) und Vergleich mit der Schichtfolge
 - Vergleich verschiedener Dioden: Stromdichten, Peakpositionen, Peak-Valley-Verhältnis und sinnvolle graphische Darstellung
 - Temperaturabhängigkeit: Peakpositionen, Peak-Valley-Verhältnis, Steigung der Stufenkante
 - Spekulationen zur Hysterese
 - Beurteilung von Fehlern in den Messungen
5. Schwingkreis
6. Kommentare zum Versuch, Anregungen, Verbesserungsvorschläge

Versuchsbeschreibung zum Download

- Druckansicht
(http://www.nano.uni-hannover.de/local/NanoWiki/index.php?title=FP_Tunnelodiode&printable=yes)
- als dpf
- als doc

Von "http://www.nano.uni-hannover.de/local/NanoWiki/index.php/FP_Tunnelodiode"

- Diese Seite wurde zuletzt geändert um 14:32, 19. Okt 2006.