

4 Technologie der Wanderwellenmodulatoren

Im folgenden Kapitel sollen die technologischen Schritte zur Herstellung der vertikalen Wanderwellenmodulatoren mit Koplanarleitungsstruktur beschrieben werden. Wegen der hohen Anforderungen, die an die Qualität der Halbleiterschichten gestellt werden müssen, kommen für die Erzeugung der Schichtstruktur nur wenige Verfahren, wie zum Beispiel das Molekularstrahl-Epitaxieverfahren (Molecular Beam Epitaxy, MBE) in Frage. Für die anschließende Strukturierung der hergestellten Schichtstruktur, die Erzeugung der Doppelgrabenstruktur sowie die Aufbringung der Metallisierungen wurden lithographische Standardverfahren verwendet.

4.1 Epitaxie

Für das epitaktische Wachstum der Schichten in der Molekularstrahl-epitaxie-Anlage wird ein semiisolierendes (001)-orientiertes GaAs-Substrat verwendet. Um eine möglichst versetzungsfreie epitaktische Struktur zu erhalten, wird im ersten Schritt auf das Substrat eine dicke Puffer-Schicht (Dicke ≈ 500 nm) aus reinem GaAs aufgebracht. Aufsetzend auf diesem Puffer werden dann die weiteren Schichten, GaAs, AlAs, $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ und $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, epitaxiert. Zur Erzielung von n-dotierten Schichten wird eine Siliziumdotierung verwendet. Für die verschiedenen Materialsysteme werden unterschiedliche Substrattemperaturen benutzt. Höhere Substrattemperaturen verringern im allgemeinen die Anzahl von Fehlstellen der epitaktischen Schichten, dies gilt aber nicht in einem verspannten Materialsystem wie InGaAs-Schichten auf GaAs-Substrat. In diesem Materialsystem bedeutet epitaktisches Wachstum, daß die auf GaAs realisierten InGaAs-Schichten aufgrund ihrer im Vergleich zu GaAs höheren Gitterkonstante verspannt sind [78, 53]. Ist die Schichtdicke der InGaAs-Schicht größer als die kritische Schichtdicke, so relaxiert die Schicht durch Einbau von Versetzungen und das einkristalline Kristallgitter wird gestört. Die kritische Schichtdicke für InGaAs-Schichten auf GaAs-Substrat hängt außer von der Indium-Konzentration in den Schichten auch entscheidend von den Epitaxieparametern, wie zum Beispiel der Substrattemperatur ab [79]. Hier hat es sich gezeigt, daß eine geringere Substrattemperatur zu einer höheren kritischen Schichtdicke und einer niedrigeren Anzahl von Versetzungen führt. Deshalb wurde die Substrattemperatur bei der Epitaxie der $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ -Schichten auf 480°C gesenkt. Für die Epitaxie

der $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ -Barrieren wird eine Substrattemperatur von 580°C gewählt. Die Silizium-Dotierung der n^+ -GaAs-Kontaktschicht beträgt $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ und die der n^- -GaAs-Deckschicht $1 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$.

Die Materialabscheidung einer MBE-Anlage ist nicht vollständig homogen über dem Substratdurchmesser. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Substraten handelt es sich um 2- oder 3-Zoll-Wafern. Um homogenere Schichtdicken zu erhalten wird deswegen der Substrathalter während des epitaktischen Wachstums rotiert. Dennoch erhält man im allgemeinen einen radialen Gradienten von etwa 3%/cm [10] in den aufgetragenen Schichtdicken über die Fläche des Substrats, rotationssymmetrisch zur Drehachse der Waferhalterung.

4.2 Prozessierung

Die Strukturierung der epitaktischen Schichtstrukturen zu den fertigen Bauelementen erfolgt mit Methoden der GaAs-Standardtechnologie. Die verschiedenen Prozeßschritte sind:

- (1) Definieren des Mesarückens durch Einbringen einer Doppelgrabenstruktur,
- (2) Aufdampfen des metallischen Innenleiters der koplanaren Leitung,
- (3) Erzeugung der Massekontaktierungen,
- (4) Passivierung der Ätzkanten,
- (5) Politur der Substratunterseite und
- (6) Entspiegelung der Substratunterseite.

Für die photolithographischen Prozeßschritte wurden elektronenlithographisch erstellte Chrommasken, ein Spezialphotolack (AZ-5214) und eine Quecksilberdampfampe verwendet. Mit dieser Technik lassen sich Strukturen bis in die Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ erzielen.

- (1) Im ersten Prozeßschritt wird die Doppelgrabenstruktur realisiert. Dazu wird Photolack aufgeschleudert, getrocknet, belichtet und entwickelt (siehe z. B. [20]). Mit einer Standard-Politurätze für GaAs, $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ im Verhältnis 8:1:1, wird die Grabenstruktur geätzt. Wichtig ist hierbei, die Tiefe des Ätzgrabens zu kontrollieren, damit der Boden des Ätzgrabens die n^+ -Kontaktschicht freilegt. Die Kontrolle des Materialabtrags erfolgt mit einem im Fachgebiet entwickelten optischen Meßverfahren [21, 22]. Die verwendete Ätzlösung erzeugt schwach abfallende Ätzflanken mit einem Winkel zur Horizontalen kleiner 90° (positive Ätzflanken), was verhindert, daß der später aufgetragene Massekontakt an der Ätzkante abreißt. Nach dem Ätzvorgang wird der Photolack durch Kochen in Azeton von der Probenoberfläche gelöst.

(2) Das Aufbringen des Innenleiterkontaktes der koplanaren Leitung erfolgt im zweiten Prozeßschritt. Mit einem photolithographischen Prozeß wird die gesamte Probe bis auf den zu metallisierenden Bereich des Innenleiters auf dem Mesarücken mit Photolack abgedeckt. Hierzu wird ein Negativprozeß verwendet, der negative Flankensteigungen (Winkel der Ätzflanke zur Horizontalen größer 90°) im Photolack erzeugt. Diese negativen Flankensteigungen führen dazu, daß der anschließend aufgedampfte Metallfilm an den Photolackkanten abreißt. Der freigelassene Teil des Mesarückens wird mit einer Ammoniakätze, $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ im Verhältnis 2:1:300, von Oberflächenoxiden befreit und in der Metallisierungskammer im Hochvakuum mit Aluminium bedampft. Die Probe wird dann in kochendem Azeton von der Photolackschicht befreit. Hierfür ist es wichtig, daß der Metallfilm an der Photolackkante abgerissen ist. Mit dem Photolack wird auch die überschüssige Metallschicht abgehoben („Lift-Off-Prozeß“).

(3) Im dritten Prozeßschritt werden die Massekontakte aufgebracht. Auch hier wird ein photolithographischer „Lift-Off-Prozeß“, vergleichbar dem vorhergehenden, verwendet. Mit dem Photolack wird der erstellte Innenleiterkontakt und die gewünschten Spalte der erstellten Koplanarleitung abgedeckt. Für den ohmschen Kontakt wird als Metallisierung eine Chrom/Gold-Schicht verwendet. Hierzu wird zuerst eine etwa 20nm-dicke Chromschicht zur Verbesserung der Haftung und anschließend eine etwa 200nm-dicke Goldschicht aufgebracht. Nach dem Lift-Off-Prozeß ist die Koplanarleitung fertig strukturiert.

(4) Um Leckströme über die Oberfläche der Ätzkanten des Mesarückens zu vermindern, werden die Ätzkanten im vierten Technologieschritt mit einer Siliziumoxyd-Passivierung versehen. Dazu wird photolithographisch die Probe bis auf die Ätzflanken des Mesarückens in einem Negativprozeß mit Photolack beschichtet. Anschließend wird die Probe mit Siliziumoxyd bedampft. In dem folgenden „Lift-Off-Prozeß“ wird dann der Photolack mit dem überschüssigen Siliziumoxyd von der Probenoberfläche entfernt. Die Siliziumoxydschicht vermindert die freien Oberflächenzustände und damit die Leckströme über die Oberfläche bei Anlegen einer Spannung an die koplanare Leitung.

(5) Da die optische Einstrahlung durch die Substratseite erfolgen soll, wird im fünften Schritt die rauhe Substratunterseite mit einem mechanischen Polierverfahren poliert. Hierzu wird die Probe mit einer Suspension aus Al_2O_3 der Korngröße $1\mu\text{m}$ auf hartem Tuch geläpft und anschließend in zwei Politurvorgängen mit Diamantpasten der Korngrößen $1\mu\text{m}$ und $0,25\mu\text{m}$ auf weichem Tuch fein poliert, so daß die Oberfläche bei Betrachtung optisch glatt erscheint.

(6) Im letzten Schritt wird die Substratunterseite dielektrisch entspiegelt um störende Reflexionen von der Oberfläche zu vermeiden. Die Entspiegelung wird in einem im Fachgebiet entwickelten Verfahren optisch kontrolliert und erfolgt durch Aufdampfen von Siliziumoxyd (Brechungsindex $n \approx 1,9$) der Schichtdicke $\lambda_{0z}/4n_{\text{SiO}_x}$ auf die Substratoberfläche. Dazu wird die Substratunterseite der Probe in einer Vakuumanlage mit Siliziumoxyd bedampft. Die Schichtdicke der aufgetragenen Siliziumoxydschicht wird optisch mit einer GaAs-Laserdiode überwacht. Der Laserstrahl wird auf die Substratmitte unter einem Winkel (typischerweise etwa 45°) eingestrahlt und mit einer Photodiode wird die reflektierte Leistung detektiert. Das einfallende Laserlicht wird sowohl am Übergang Luft-Siliziumoxyd als auch am Übergang Siliziumoxyd-GaAs-Substrat reflektiert. Aufgrund der Interferenz zwischen den beiden Teilstrahlen ergeben sich Maxima und Minima in der gemessenen reflektierten Leistung in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Siliziumoxyd-Schicht. Mit dieser Entspiegelungstechnik läßt sich der Reflexionsfaktor des Übergangs Luft/GaAs für eine vorgegebene Wellenlänge von etwa 0,32 auf unter 0,02 drücken [80].

Die Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die Abmessungen der prozessierten Bauelemente:

Breite des Mesarückens m	Innenleiterbreite w	Spaltbreite s	Leitungslänge l
6-24 μm	2-20 μm	6 μm	30-5000 μm
50 μm	35 μm	12 μm	120-3000 μm

Tabelle 4.1: Abmessungen der prozessierten Koplanar-Bauelemente

Während die Spaltbreite s für alle Bauelemente mit Innenleiterbreiten bis 20 μm konstant gehalten wurde, wurde die Innenleiterbreite w (und damit auch die Breite des Mesarückens $m = w + 4 \mu\text{m}$) in den Schritten 2, 4, 6, 8, 10, 12 μm variiert. Die Längen der gefertigten Leitungen variierten zwischen 30 μm und 5000 μm und decken damit den Bereich von quasi-diskreten Bauelementen bis hin zu verteilten Bauelementen ab.

Die Charakterisierung der Koplanar-Bauelemente erfolgt nach verschiedenen Prozeßschritten während der Prozessierung der Schichtstrukturen zu den fertigen Wanderwellenmodulatoren.

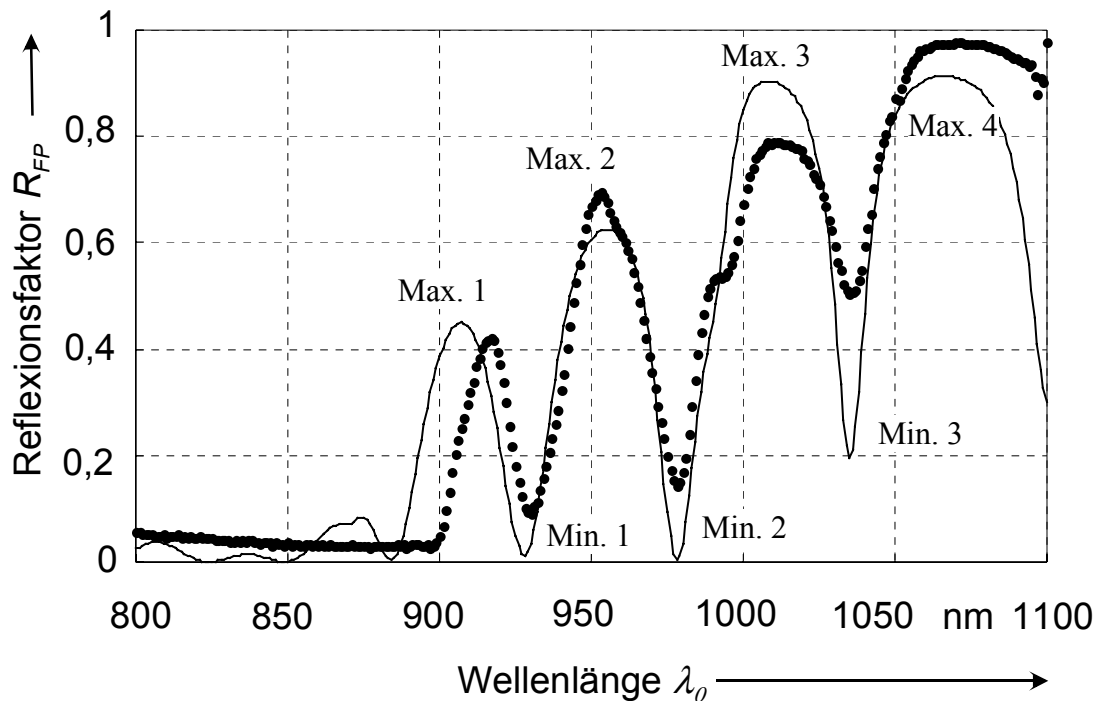


Abbildung 4.1: Gemessene Reflexionscharakteristik des fertigen passiven Bauelements (gestrichelte Kurve) verglichen mit einer Modellrechnung (durchgezogene Kurve). Innenleiterbreite $w=35 \mu\text{m}$, Spaltbreite $s=12 \mu\text{m}$ und Leitungslänge $l=350\mu\text{m}$.

Neben den Standard-Untersuchungsverfahren bei der Molekularstrahl-Epitaxie, wie RHEED-Messung und Photolumineszenz-Charakterisierung der gewachsenen Schichten wird das Lichtleistungs-Reflexionspektrum $R_{FP}(\lambda)$ der Schichtstruktur aufgenommen und mit den numerisch ermittelten Vorgaben verglichen. Für das Aufnehmen der Reflexionscharakteristik wird ein herkömmlicher Monochromatormessplatz verwendet, wie er zum Beispiel in [16] beschrieben wird. Anhand dieser Reflexionscharakteristiken kann ein geeigneter Probenort für die weitere Prozessierung der Probe gewählt werden.

Nach der Prozessierung der Doppel-Ätzgrabenstruktur und dem Aufbringen der Metallkontakte wird erneut ein Reflexionsspektrum $R_{FP}(\lambda)$ der Probe aufgenommen und mit der numerischen Modellrechnung verglichen. Dieser Vergleich ist für eine Schichtstruktur in der Abb. 4.1 dargestellt (Parameter der Schichtstruktur in Kapitel 2.1). Die Wellenlängen von Minima und Maxima der Modellrechnung stimmen im Wellenlängenbereich zwischen 900 und 1100 nm gut mit denen der gemessenen Reflexionscharakteristik überein. Die quantitativen Werte des Reflexionsfaktors differieren allerdings zum Teil erheblich zwischen Modellrechnung und Experiment (siehe Tabelle 4.2). Diese Abweichung der Modellrechnung von der experimentell gewonnenen Refle-

	Lage der Wellenlängenextrema			$R_{FPextr.}$		
	$\lambda_{Struktur}$	λ_{Modell}	Abw.	Struktur	Modell	Abw.
Max. 1	917nm	908nm	1,0 %	0,46	0,42	8,7 %
Min. 1	930nm	928nm	0,2 %	0,09	0,01	89 %
Max. 2	953nm	955nm	-0,2 %	0,69	0,63	8,7 %
Min. 2	979nm	979nm	0 %	0,12	0,001	100 %
Max. 3	1009nm	1011nm	-0,2 %	0,79	0,91	15 %
Min. 3	1035nm	1035nm	0 %	0,50	0,19	62 %
Max. 4	1075nm	1067nm	0,7 %	0,98	0,92	6,1 %

Tabelle 4.2: Vergleich der gemessenen Reflexionscharakteristik einer realisierten passiven (spannungslosen) Schichtstruktur (Werte siehe Kapitel 2.1) mit der Modellrechnung; verglichen wird die Wellenlänge der Maxima und Minima sowie die Größe der Reflektivität in den Extrema. Abw. gibt die prozentuale Abweichung der gerechneten Werte (Modell) von den experimentell ermittelten Werte (Struktur) an.

xionscharakteristik ist auf Ungenauigkeiten im Schichtwachstum und in der Bestimmung des Reflektionsfaktors R_{HL-AL} des Halbleiter-Aluminium-Übergangs zurückzuführen. Die Reflektivität dieses Übergangs wird durch Oberflächenrauhigkeiten und Diffusion von Metall in den Halbleiter beeinflusst.

Bei Wellenlängen kleiner als 900 nm ist die Absorption in dem GaAs-Substrat so groß, daß Interferenzeffekte keine Rolle mehr spielen und die Reflektivität allein durch die entspiegelte Probenunterseite gegeben ist. Die Reflektivität dieses Übergangs beträgt bei 900 nm etwa 3 % gegenüber 30 % bei nicht entspiegelter Oberfläche. In der gemessenen Reflexionscharakteristik ist bei einer Wellenlänge von 990 nm ein charakteristischer Knick zu erkennen. Dieser Knick in der Reflexionscharakteristik wird durch die hohe Absorption bei der Exzitonenresonanz hervorgerufen, die zu einer starken Änderung der optischen Eigenschaften des Materials bei den zugehörigen Wellenlängen führt. Anhand dieser abschließenden Charakterisierung der gefertigten Proben können Bauelemente für die weiteren experimentellen Untersuchungen ausgewählt werden. Auch erhält man über diese Messungen eine direkte Rückkopplung auf Änderungen, die in der Probentechnologie bei Reproduktion auftreten.