

## 6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein neuartiges ultraschnelles Bauelement zur vertikalen optischen Modulation vorgestellt, ein vertikaler Wanderwellenmodulator auf der Basis verspannter InGaAs/GaAs-Vielfachquantenfilmstrukturen (MQW) als asymmetrischer Fabry-Perot-Resonator. Es wird die Eignung dieses Bauelements für die Realisierung eines hochfrequenten, optisch strahlsteuernden Elementes untersucht.

Die Entwicklung des Bauelements ging von den optimierten hochfrequenten vertikalen Modulatoren aus und kombinierte sie mit Mikrostreifenleitungen aus der MMIC-Technologie. Die bislang entwickelten vertikalen Modulatoren waren als diskrete Bauelemente konzipiert, bei denen aufgrund der kurzen Bauelementdimensionen die Wellenausbreitung der ansteuernden Mikrowelle weitestgehend vernachlässigt werden konnten. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der Kombination der vertikalen Modulatoren mit geeigneten elektrischen Kontaktierungen für die Mikrowellenansteuerung unter Berücksichtigung von Ausbreitungseffekten der Mikrowelle auf der Leitung. Es wird eine theoretische Beschreibung für die Mikrowellenausbreitung auf der koplanaren Mikrowellenleitung entwickelt, die die Leitungseigenschaften qualitativ richtig beschreibt und zur Berechnung der Leitungsdimensionierung herangezogen werden kann. Die Leitungen sind im Institut gefertigt und anschließend experimentell vermessen worden.

Die Schichtstruktur der vertikalen Modulatoren ist gegenüber dem herkömmlichen Design, wie es zum Beispiel in [38-46] beschrieben wird, grundlegend geändert worden. Der obere Bragg-Reflektor wird durch eine Metallisierung und die *p-i-n*-Diodenstruktur des Modulators durch eine Schottky-Diodenstruktur ersetzt. Die Einstrahlung des optischen Signals erfolgt durch das transparente *n*-dotierte GaAs-Substrat. Neben einer Vergrößerung der zur Modulation zur Verfügung stehenden Fläche gewinnt man so ein Bauelement, daß leichter integrierbar mit herkömmlichen MMIC-Schaltkreisen ist und insbesondere keine *p*-Dotierung mehr verlangt.

Der Entwurf der Wanderwellenmodulatoren erfolgt in zwei Schritten:

1. Im ersten Schritt wird die Schichtstruktur des Modulators festgelegt. Die Arbeitswellenlänge des Modulators bestimmt dabei die Schichtparameter für die Quantenfilmstruktur. Die Arbeitswellenlänge wurde mit etwa 1020 nm so gewählt, daß das GaAs-Substrat für diese Wellenlänge transparent ist und so die Einstrahlung durch das Substrat möglich ist. Die verspannten InGaAs/AlGaAs-Quantenfilmen werden dann so entworfen, daß große Änderungen der optischen Eigenschaften bei Änderung des

elektrischen Feldes erwartet werden können. Dies geschieht durch Berechnung der optischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Schichtdicke und Indiumgehalt des Quantenfilms und Aluminiumgehalt der Barrierenschichten.

2. Im anschließenden Entwurfsschritt wird der asymmetrische Fabry-Perot-Resonator, der aus dem unteren Bragg-Reflektor und der oberen Aluminium-Metallisierung gebildet wird, angepaßt an die Arbeitswellenlänge des Bauelementes. Die Resonanzbedingung des asymmetrischen Fabry-Perot-Resonators bestimmt bis auf ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge die optische Dicke des Resonanzraums, der von der Quantenfilmstruktur gebildet wird. Die Festlegung der Anzahl halber Wellenlängen, die im Resonator enthalten sein sollen, beruht auf einer Abwägung verschiedener Modulatorparameter, die sich gegeneinander beeinflussen, wie elektrische Feldstärke im Quantenfilm, Kapazität des Bauelementes, optische Weglänge und Finesse des Bauelementes. Technologisch ist die Dicke auf wenige Mikrometer begrenzt, da eine optimale epitaktische Schichterzeugung bei größeren Schichtdicken nicht mehr gewährleistet ist. In diesem Rahmen wird man im allgemeinen an die obere Grenzen der möglichen Schichtdicke gehen, da durch die größere Schichtdicke auch die optische Weglänge größer wird und damit die Finesse des Resonators verringert werden kann. Man benötigt weniger Halbleiterschichtpaare in den Bragg-Reflektoren, so daß hier die technologischen Anforderungen geringer werden. Die geringere Finesse des Resonators hat auch zur Folge, daß die Breite der optischen Resonanz größer wird und damit der nutzbare Wellenlängenbereich des Modulators. Der entworfene Modulator besteht aus 41 InGaAs-Quantenfilmen der Schichtdicke 7,5 nm mit einem Indiumgehalt von 20 % eingebettet zwischen AlGaAs-Barrieren mit 33 % Aluminiumgehalt.

Realisiert wird die Schichtstruktur dieses Modulators mit Hilfe von Molekularstrahlepitaxie und Standard-Halbleitertechnologie.

Anschließend erfolgt die Prozessierung der Schichtstruktur zu einem hochfrequenten Wanderwellenbauelement. Für die elektrische Kontaktierung wird dabei eine Mikrostreifenleitung verwendet, die mit herkömmlichen Hochfrequenzmeßköpfen angesteuert werden kann. Die verwendete Mikrowellenstreifenleitung kombiniert die Eigenschaften einer Mikrostreifenleitung und einer Koplanarleitung. Es wird eine numerische Beschreibung für diese Mikrowellenleitung entwickelt, die es erlaubt, wichtige Leitungseigenschaften über die Geometriedaten der Leitung zu berechnen. Insbesondere der Verzögerungsfaktor der Leitungen ist für das Design von Mikrowellenbauelementen von großer Bedeutung. Ein wichtiges Ergebnis sowohl der numerischen Beschreibung

als auch der experimentellen Ergebnisse ist, daß der Verzögerungsfaktor der hier entwickelten Mikrostreifenleitung in einem weiten Bereich über die Breite des Innenleiters der Leitung einstellbar ist.

Es werden Wanderwellenmodulatoren mit Bauelementlängen zwischen 20  $\mu\text{m}$  und mehreren Millimetern gefertigt. Die Breite des Innenleiters der gefertigten Modulatoren wird systematisch im Bereich zwischen 1,5  $\mu\text{m}$  und 12  $\mu\text{m}$  variiert, um den Einfluß der Bauelementabmessungen auf die Hochfrequenzeigenschaften der Modulatoren zu bestimmen.

Die gefertigten Modulatoren zeigen Reflexionsfaktoränderungen von 0,29 bei einer Wellenlänge 1019 nm. Der Kontrast bei dieser Wellenlänge beträgt 4,0 dB und die Einfügeverluste 3,2 dB. Die große Halbwertsbreite der optischen Resonanz von etwa 15 nm ist auf die geringe Finesse des optischen Resonators zurückzuführen. Die im herkömmlichen Design als diskrete Bauelemente gefertigten Modulatoren zeigen Modulationsgrenzfrequenzen von über 40 GHz. Die Grenzfrequenz dieser Bauelemente ist linear abhängig von der Bauelementfläche und damit der RC-Grenzfrequenz.

Die gefertigten Wanderwellenmodulatoren zeigen einen Anstieg des Verzögerungsfaktors mit Vergrößerung der Innenleiterbreite der Mikrowellenleitung. Experimentell wird der Verzögerungsfaktor in einem Bereich zwischen 4,7 und 8,7 über diesen Strukturparameter eingestellt. Bei diesen Modulatoren erzielt man eine deutliche Vergrößerung der 3dB-Grenzfrequenz, wenn die Modulatoren beidseitig mit Mikrowellenleitungen abgeschlossen werden. Die Grenzfrequenz bei vertikalen Wanderwellenmodulatoren ist nicht länger durch die äußeren Abmessungen des Bauelements bestimmt, sondern im wesentlichen stellt nun die Dämpfung der Mikrowelle auf der Mikrowellenleitung den bestimmenden Faktor dar. Gelingt es, die Mikrowellendämpfung der Streifenleitung zu verringern, so kann man Wanderwellenmodulatoren mit großer Länge herstellen, die dennoch für sehr hohe Modulationsfrequenzen ( $> 40$  GHz) geeignet sind.

Das Vorhandensein von ortsabhängigen Modulationsamplituden wird durch ein optoelektronisches Testverfahren auf Wanderwellenmodulatoren experimentell nachgewiesen. Auf einer 3,3 mm langen Leitung wird eine stehende Mikrowelle mit mehr als drei Wellenbäuchen erzeugt und die Änderung der optischen Modulation in Abhängigkeit von der örtlichen Mikrowellenfeldstärke gemessen. Diese Untersuchungen zeigen, daß mit weiter optimierten Modulatorstrukturen ein ultraschnelles optisches Steuern eines Laserstrahls (Beam-Scanner) möglich sein sollte. Dazu muß vor allem die Dämpfung der Mikrowelle bei Ansteuerungsfrequenzen von über 40 GHz geringer gehalten werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Ausbreitungseffekte der ansteuernden Mikrowellen auf vertikalen Hochfrequenzmodulatoren bei den heutigen hohen Grenzfrequenzen und den üblichen Bauelementdimensionen im allgemeinen berücksichtigt werden müssen. Die Einbeziehung dieser Effekte eröffnet neue Möglichkeiten, die zur Entwicklung neuartiger Bauelemente ausgenutzt werden können, wie zum Beispiel dem vorgeschlagenen hochfrequenten strahlsteuernden Element. Mit den weiter wachsenden Grenzfrequenzen der optoelektronischen Bauelemente werden Mikrowellenausbreitungseffekte in Zukunft immer wichtiger werden und das Zusammenwachsen von Mikrowellen- und optoelektronischen Bauelementen wird sicher die kommende Generation von photonischen Bauelementen prägen.