

1 Einleitung

Die optischen Technologien haben in den letzten Jahren immer weiteren Einzug in die Signalübertragung gehalten. Neben dem klassischen Einsatz der Optik für die Fernübertragung in Glasfasersystemen geschieht heute auch die Übertragung von digitalen Signalen über kurze Entfernungen zunehmend auf optischem Wege [24]. Hier sind es neben der immensen Übertragungskapazität speziell die Unempfindlichkeit der optischen Signale gegenüber elektromagnetischen Feldern (Photonen tragen keine Ladung), die mögliche hohe Dichte von parallelen optischen Signalpfaden und der geringe Platzbedarf optischer Signalpfade, die optische Übertragungstrecken interessant erscheinen lassen [25-31]. Auch der Energieverbrauch einer optischen Signalübertragung ist für Entfernungen größer als einige hundert Mikrometer günstiger als der einer entsprechenden elektrischen Übertragung [30].

In jüngsten Forschungsansätzen wird überdies versucht, auch die Signalverarbeitung optisch zu realisieren, um so die Konvertierung zwischen elektrischen Signalen in der herkömmlichen Signalverarbeitung und den optischen Signalen der Signalübertragung zu vermeiden. Eines der wichtigen Grundelemente einer optischen Signalverarbeitung ist ein optisches strahlsteuerndes Element, das es erlaubt, den Weg eines optischen Signales zu steuern (Raumschalter). Erste strahlsteuernde Elemente sind in wellenleitender Geometrie als sogenannte optische Schalter bereits verwirklicht, und auch in der Freiraumoptik existieren verschiedene Ansätze für das räumliche Steuern eines optischen Strahls (englisch: optical beam steering, beam scanning). Diese Konzepte beruhen entweder auf einer Array-Anordnung von einzelnen Bauelementen, die jeweils dem optischen Strahl eine gewisse Phasenverschiebung aufmodulieren [32-34] oder auf einem Wanderwellenbauelement, das die räumlich unterschiedliche Phasenverschiebung des optischen Signals durch Wechselwirkung mit einer elektrischen Mikrowelle erzeugt [35] oder elektrisch gesteuerte Mikrospiegel [36].

In dieser Arbeit wird ein neuartiges ultraschnelles strahlsteuerndes Bauelement vorgeschlagen, daß aus einem lateral ausgedehnten vertikalen optischen Modulator besteht, der elektrisch mit einer Mikrostreifenleitung kontaktiert ist. Eine auf diese Streifenleitung eingekoppelte Mikrowelle breitet sich über die Leitung aus und erzeugt damit eine räumlich unterschiedliche elektrische Feldstärke E längs der Leitung. Über den elektrooptischen Mechanismus des Modulators wird diese Feldstärkeänderung in eine Änderung der Amplitude und Phase des reflektierten optischen Strahls übersetzt [37]. Diese räumliche Anordnung von reflek-

tierten Strahlen unterschiedlicher Amplitude und Phase kann sich dann im Fernfeld zu einem resultierenden Strahl mit einer bestimmten Ausbreitungsrichtung addieren. Geringe Änderungen der ansteuernden Mikrowellenfrequenz bewirken dann eine Richtungsänderung des reflektierten optischen Strahls.

Für die Realisierung dieses Elementes werden hier vertikale elektrooptische Modulatoren auf Quantenfilmbasis untersucht, die mit koplanaren Mikrostreifenleitungen elektrisch kontaktiert werden. Quantenfilme zeichnen sich durch eine starke Änderung der optischen Eigenschaften, des Absorptionskoeffizienten α und des Brechungsindex n , bei Anlegen eines elektrischen Feldes aus [38]. Eine steigende elektrische Feldstärke verursacht dabei eine Verschiebung der durch Exzitonresonanz bewirkte wellenlängenabhängigen Charakteristik des Absorptionskoeffizienten zu längeren Wellenlängen („Rotverschiebung“). Die Breite der Exzitonresonanz-Charakteristik und die Resonanzhöhe nimmt beim Anlegen eines elektrischen Feldes ab. Dieser Effekt wird als quantenunterstützter Stark-Effekt (englisch: Quantum Confined Stark-Effect, QCSE) bezeichnet. Viele moderne optoelektronische Modulatoren basieren auf diesem elektrooptischen Effekt, der sehr viel effizientere Änderungen der optischen Eigenschaften erlaubt, als vergleichbare Effekte in Volumenhalbleitern, wie z.B. dem Franz-Keldysh-Effekt [39]. Meist werden in Modulatoren Vielfach-Quantenfilm-Strukturen (englisch: Multiple-Quantum Well, MQW) eingesetzt, um so eine größere aktive Materialdicke zu erreichen.

Bei vertikalen Modulatoren auf Quantenfilmbasis sind die Wechselwirkungstrecken im allgemeinen kurz, da MQW-Materialien mit Epitaxieverfahren nur im Bereich einiger Mikrometer herstellbar sind. Um dennoch ausreichende Absorptions- bzw. Brechungsindexänderungen zu erzielen, baut man die MQW-Schichten in einen optischen Resonator hoher Güte ein, so daß sich eine effektive Wechselwirkungstrecke ergibt, die um ein Vielfaches größer ist, als die Schichtdicke des MQW-Gebietes. Der Resonator besteht im allgemeinen aus zwei dielektrischen Spiegeln, aufgebaut aus Halbleiterschichten unterschiedlicher Brechzahlen. Diese bilden einen Fabry-Perot-Resonator (FPR), dessen Resonanzraum aus einem MQW-Gebiet besteht. Die elektrische Struktur dieser Fabry-Perot-Modulatoren (FPM) ist üblicherweise die einer p-i-n-Diode, wobei der obere Spiegel hoch p-dotiert wird und der untere Spiegel und oft auch das Substrat hoch n-dotiert sind. Die intrinsische Region umfaßt das MQW-Gebiet. Das Anlegen einer Spannung an aufgebrachte Kontakte auf dem p- und n-Gebiet erzeugt dann ein elektrisches Feld fast ausschließlich im MQW-Gebiet. Bei optimaler Abstimmung des Resonators lassen sich mit diesen Fabry-Perot-Modulatoren (FPM) sehr hohe Kontrastwerte K_r (> 20 dB) (Definition siehe Gl. 5.2-2) bei kleinen

Spannungsänderungen ΔU (< 3 V) und sehr geringen Einfügeverlusten L_r ($< 1,5$ dB) (Definition siehe Gl. 5.2-1) erzielen [40]. Die 3dB-Grenzfrequenzen dieser Modulatoren liegen oberhalb von 20 GHz, daß heißt, die Frequenzen bei denen die optische Modulation (Definition siehe Gl. 5.4-4) um 3dB gegenüber der optischen Modulation bei niedrigen Frequenzen (quasistatisch) abnimmt.

Diese Modulatoren wurden im AlGaAs/GaAs-Materialsystem gefertigt und arbeiten bei einer Wellenlänge von $\lambda_0 \approx 870$ nm. Vergleichbare Ergebnisse bei anderen Wellenlängen sind mit vertikalen FPM bisher nicht erzielt worden. Dies hat mehrere Gründe:

Zum einen ist das epitaktische Wachstum im AlGaAs/GaAs-Materialsystem besonders einfach, da nur geringe Verspannungen zwischen AlGaAs- und GaAs-Schichten auftreten. Hochwertige und reproduzierbare Schichten können standardmäßig in vielen Epitaxieanlagen hergestellt werden. Zum anderen sind vertikale Modulatoren oft für den Einsatz in der Freiraum-Signalübertragung entwickelt worden, wo kürzere Wellenlängen als $1,5 \mu\text{m}$ und $1,3 \mu\text{m}$ wegen der einfacheren Technologie und der vorhandenen Silizium-Detektoren interessant sind. Eine ausführliche Einführung zu vertikalen bzw. oberflächenorientierten Modulatoren findet man zum Beispiel in [41].

Um FPM mit hohen optischen Modulationsgrenzfrequenzen zu realisieren, ist es nötig, sich detailliert mit den Hochfrequenzeigenschaften sowohl der zugrundegelegten Schichtstruktur als auch der lateralen Strukturierung und der Kontaktierung zu beschäftigen. Da, wie in Kapitel 2.2 näher ausgeführt, der elektrooptische Mechanismus des QCSE so schnell ist, daß er nicht als begrenzender Faktor für die optische 3dB-Grenzfrequenz der Bauelemente betrachtet werden muß, ist für die Entwicklung hochfrequenter Modulatoren die elektrische Grenzfrequenz bestimmend. Im allgemeinen wird dabei das Bauelement als konzentriertes Element in einer Mikrowellenverschaltung betrachtet. Um in diesem Fall zu höheren Grenzfrequenzen zu gelangen, ist es notwendig, die Kapazität C des Bauelementes zu verringern. Dazu vergrößert man einerseits die Dicke des intrinsischen Gebietes und verkleinert andererseits die Fläche der Diode. Außerdem versucht man, die parasitären Kapazitäten des Bauelementes und der Zuleitungen und Ankopplungen zu minimieren. Ist der Serienwiderstand des Modulators hinreichend klein, so läßt sich die elektrische 3dB-Grenzfrequenz des Modulators angeben als $f_{3dB} = 1/(2\pi RC)$, wobei R gegeben ist durch den Wellenwiderstand des verwendeten Mikrowellenaufbaus mit üblicherweise $R=50 \Omega$. In einer Reihe von Arbeiten werden hochfrequente vertikale Modulatoren dieser Bauform vorgestellt [41-48].

Die Verringerung der Bauelementdimensionen bei vertikalen Modulator-Bauelementen mit höheren Grenzfrequenzen sorgt im allgemeinen dafür,

daß Ausbreitungseffekte der erregenden Mikrowelle nicht beachtet werden müssen. Dies ist nicht mehr der Fall, wenn ausgedehnte Bauelemente wie Wellenleitermodulatoren oder Laserdioden hochfrequent betrieben werden sollen. Hier müssen die zunächst unerwünschten Ausbreitungseffekte berücksichtigt werden, wenn dies auch erst in jüngster Zeit vereinzelt durchgeführt wird [49].

Betrachtet man das Bauelement dagegen als Wanderwellenmodulator, so kann man den optischen Modulator als ein in eine Mikrowellenleitung eingebautes verteiltes Element auffassen. Die Größen R , L , C als Widerstand, Induktivität und Kapazität des konzentrierten Bauelements verlieren ihre Bedeutung und werden durch die Beläge R' , G' , L' und C' ersetzt. Ein Vorteil liegt hier klar auf der Hand: die Grenzfrequenz des Modulators hängt nicht mehr von seiner Länge ab. Dies sollte es generell möglich machen, ausgedehnte Modulatoren herzustellen, die dennoch eine hohe Modulationsgrenzfrequenz aufweisen [50]. In optischen Wellenleitern ist dieses Prinzip ebenfalls verwirklicht. Bei diesen Wanderwellenmodulatoren propagieren Mikrowelle und geführte optische Welle parallel durch das Bauelement. Um eine effiziente Kopplung der Mikrowelle an die optische Welle zu erreichen, müssen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der beiden Wellen gleich groß sein. Auch in vertikalen Modulatoren sollte es mit propagierenden Mikrowellen möglich sein, großflächige Bauelemente mit hohen Grenzfrequenzen zu realisieren. Solche Modulatoren, die in dieser Arbeit in Anlehnung an die Wellenleitermodulatoren als vertikale Wanderwellenmodulatoren bezeichnen werden sollen, sind bisher noch nicht realisiert worden.

Für die elektrische Kontaktierung bietet sich besonders die Koplantarleitung an, die sich auch in MMICs (englisch: Monolithic Microwave Integrated Circuit, Monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung) durchgesetzt hat. In der Arbeit von Kaiser [13] wird die Koplantarleitung als Element für MMICs beschrieben, die auch weitergehende Funktionen als die der bloßen Mikrowellenverbindung zwischen Bauelementen wahrnimmt. Eine Übersicht über Anwendungsmöglichkeiten von Koplantarleitungen in Mikrowellen- und optischen Bauelementen findet man zum Beispiel in [51, 52].

Mit den, in herkömmlichen optoelektronischen Bauelementen im allgemeinen unerwünschten Ausbreitungseffekten der eingekoppelten Mikrowelle lassen sich aber auch neuartige Bauelemente konzipieren, die aus diesen Effekten Nutzen ziehen. So lassen sich durch Mikrowellen-Resonanzen vertikale optische Modulatoren entwickeln, die für spezielle Mikrowellenfrequenzbereiche eine hohe Effektivität, zum Beispiel einen hohen Kontrast und niedrige Einfügeverluste besitzen. Diese Resonanz-Modulatoren können bei niedrigen Mikrowellenamplituden eingesetzt

werden um dennoch große Reflektionsänderungen zu erzielen. Einen weiteren Einsatzbereich stellen Modulatoren für hohe Frequenzen da. Durch die Resonanzüberhöhung der Mikrowellenamplitude lassen sich bei hohen Frequenzen die Reflektionsänderungen vergrößern. Die geringen Bandbreiten der Mikrowellenresonanzen erlauben es, Modulatoren zu entwickeln, die aus eingespeisten Mikrowellensignalen einzelne Frequenzbereiche herausfiltern und auf optische Signale aufmodulieren. Zum Beispiel lassen sich damit optoelektronische Bandpaßfilter realisieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, Voruntersuchungen für die Realisierung eines lateral verteilten vertikalen Wanderwellenmodulators als optisches strahlsteuerndes Element durchzuführen. Dazu werden vertikale Modulatoren im optischen Wellenlängenbereich um $1\ \mu\text{m}$ untersucht mit speziellem Augenmerk auf das Hochfrequenzverhalten dieser Bauelemente. Aus diesen Modulatoren werden dann lateral ausgedehnte vertikale Wanderwellenmodulatoren gefertigt, die anschließend mit speziellen Meßmethoden charakterisiert werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf den Wellenausbreitungseffekten der Mikrowellensignale auf den Wanderwellenmodulatoren.

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen des vertikalen Modulators mit einer asymmetrischen Fabry-Perot-Resonator-Struktur zusammengefaßt. Hier werden die Grundzüge des optischen Resonators dargestellt und die Berechnung der optischen Eigenschaften erläutert. Für das Verständnis der Modulatoren ist es außerdem wichtig, das verwendete MQW-Materialsystem näher zu beleuchten, wozu kurz auf die Eigenschaften der Quantenfilme und auf den QCSE eingegangen wird. Zur Berechnung des statischen elektrischen Feldes werden die Schichtstruktur mit den verwendeten Dotierungen und die Metall-Kontakte der verschiedenen Bauelemente zugrunde gelegt.

Anschließend wird im dritten Kapitel das Hochfrequenzverhalten der elektrischen Kontaktierung der Wanderwellenmodulatoren näher untersucht. Neben der Beschreibung der Koplantarleitung durch geeignete Ersatzschaltbilder wird auf spezielle Mikrowellenphänomene, wie Mikrowellen-Resonanzen und Verzögerungsfaktor der Leitung, eingegangen.

Die zur Herstellung der Wanderwellenmodulatoren verwendeten technologischen Schritte werden im vierten Kapitel zusammengestellt. Hier werden in kurzen Zügen die grundlegenden Prozessierungs- und Strukturierungsschritte für die Bauelement-Realisierung erläutert.

Die experimentellen Techniken, die eingesetzten Meßaufbauten und die experimentellen Ergebnisse der an den gefertigten Bauelementen durchgeführten Messungen werden im zentralen fünften Kapitel vorgestellt und diskutiert. Neben der statischen elektrischen und elektrooptischen Charakterisierung der Modulatoren werden mehrere hochfrequente Meßmethoden eingesetzt, die insbesondere das Ziel haben, die Einsatzmöglichkeiten dieser Modulatoren für ein ultraschnelles strahlsteuerndes Element zu untersuchen.