

# 1 Einführung

Als 1962 der erste Halbleiterlaser vorgestellt wurde [1], waren dessen Anwendungsbereiche noch nicht abzusehen. Inzwischen sind Halbleiterlaserdioden Grundlage alltäglicher Gebrauchsgegenstände vor allem bei der optischen Datenspeicherung, aber auch bei optischer Messtechnik, Displays und bei der optischen Datenübertragung. Gerade das letztere Gebiet birgt ein enormes Potenzial für die Ansprüche moderner Kommunikation. Während das Volumen zu übertragender Daten im Internet, aber auch in lokalen Netzwerken, explosionsartig steigt, liegt die theoretische Grenze des Datenvolumens über eine Glasfaser bei über 100 TBit/s [2]. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Signalquellen zur Ausnutzung der Möglichkeiten dieses Übertragungsmediums.

Die klassische Bauform der Halbleiterlaser als kantenemittierende Struktur, wobei das Licht parallel zu den Halbleiterschichten geführt und durch die beim Vereinzeln der Bauelemente entstehenden Bruchkanten ausgekoppelt wird, besitzt eine stark astigmatische Strahlkeule. Weil dies nur eine schlechte Einkopplung in die runde Geometrie von Glasfasern zulässt, wurde mit Nachdruck nach Alternativen gesucht. Das Ende der Siebziger-Jahre vorgeschlagene Konzept vertikal abstrahlender Laserdioden wurde auf der Basis von InP-Substrat schnell in Laserquellen mit 1.3  $\mu\text{m}$  Emissionswellenlänge umgesetzt [3]. Aufgrund des im Vergleich zur kantenemittierenden Bauweise sehr kurzen Resonators müssen statt einfacher Halbleiter-Luft-Übergänge hochreflektierende Spiegel eingesetzt werden. Das Wachstum solcher Bragg-Reflektoren einerseits und das der optisch aktiven Schichten andererseits stellt jeweils hohe Anforderungen an die Technologie.

Das auf GaAs basierende Materialsystem AlGaAs bietet gute Voraussetzungen für die Realisierung von Bragg-Reflektoren, weil es bei kaum vorhandener Gitterfehlانpassung an das Substrat vergleichsweise hohe Brechzahldifferenzen erlaubt. Mit GaAs als Grundlage auch des optisch aktiven Materials wurden hocheffiziente Vertikallaserdioden bei Emissionswellenlängen unter 1  $\mu\text{m}$  realisiert.

Die moderne Glasfaser mit ihrem Dispersionsminimum bei 1.3 $\mu\text{m}$  und dem Absorptionsminimum bei 1.55 $\mu\text{m}$  fordert andere Bauelementkonzepte für eine möglichst verlustarme Datenübertragung. Ein Ansatz, der die ausgereiften GaAs-basierten Bragg-Reflektoren mit InGaAsP-Quantenfilmen für Emissionswellenlängen um 1.55  $\mu\text{m}$  verbindet, ist das Wafer-Fusing. Mit dieser Technologie hergestellte Bauelemente zählen zu den weltbesten langwelligen Vertikallaserdioden [4, 5]. Dazu alternative Vorgehen basieren meist auf dem

etablierten Konzept der GaAs-Vertikallaser. Dabei wird die Emissionswellenlänge mit Hilfe von neuen Materialkompositionen in den Quantenfilmen von der GaAs-Bandlücke zu größeren Wellenlängen, d.h. zu 1.3 bzw. 1.55  $\mu\text{m}$ , verschoben. Die wichtigsten dieser Materialsysteme sind GaInNAs [6–8], hoch verspanntes InGaAs [9–11] und GaAsSb [12–14].

Diese Arbeit befasst sich mit der Etablierung und Optimierung von Technologieprozessen, die die Grundlage der verschiedenen Konzepte langwelliger Vertikallaserdioden darstellen.

Nach einer grundlegenden thematischen Einführung in Abschnitt 2 stellt Abschnitt 3 die durchgeführten Materialuntersuchungen vor. So ist für die Qualität von Bragg-Reflektoren und der damit hergestellten Bauelemente die Minimierung der optischen Verluste im Halbleiter entscheidend. Mit den im Abschnitt 3.3 dargestellten Untersuchungen der Absorption p-dotierten GaAs-Materials wurde eine Lücke im bisher bestehenden Bild der Verbindungshalbleiter geschlossen werden.

Die Präparationstechnologien, wie sie im Umfeld des Wafer-Fusing entwickelt wurden und im Abschnitt 4 dargestellt sind, eignen sich gleichermaßen etwa zur Verbesserung des Herstellungsprozesses konventioneller Vertikallaser. Dabei handelt es sich nicht nur um das anodische Oxidationsverfahren, mit dem das gezielte Abtragen von wenigen Nanometer dicken Halbleiterschichten möglich ist, sondern auch um verschiedene Reinigungs- und Ätzschritte.

Die im Abschnitt 6 demonstrierten, einmodig emittierenden Vertikallaserdioden mit hochverspannten InGaAs-Quantenfilmen profitieren von der etablierten Epitaxietechnik herkömmlicher InGaAs-Bauelemente. Durch Optimieren der Technologieschritte und der Schichtstruktur wird untersucht, inwieweit das Konzept mit einem erhöhten In-Gehalt auf größere Wellenlängen übertragen werden kann.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden die im Abschnitt 7 beschriebenen umfangreichen Untersuchungen an GaAsSb-Quantenfilmsystemen. Weil das Material bisher weit weniger untersucht ist als InGaAs, werden zunächst grundsätzliche Studien zur Bandstruktur angestellt. Anhand von Photolumineszenzspektren und vor allem von kantenemittierenden Laserdioden wird die Eignung des Systems für Vertikallaserdioden überprüft. Dabei wird das Design der optisch aktiven Schichten sowie der Bauelemente unter Berücksichtigung der jeweils auftretenden Verspannungen optimiert.

Abschnitt 8 fasst die einzelnen Ergebnisse zusammen und schließt diese Arbeit mit einem Ausblick auf denkbare zukünftige Entwicklungen ab.

## 2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Eigenschaften von Vertikallaserdioden vorgestellt. Ausgehend vom strukturellen Aufbau wird auf die speziellen Anforderungen an die Komponenten wie die Reflektoren oder den aktiven Bereich eingegangen. Hier werden auch Probleme, wie sie bei langwelligen Vertikallasern, d.h. bei Wellenlängen um 1300 nm bzw. 1550 nm, auftreten, dargestellt.

Die Forderung nach optischem Gewinn  $g$  im aktiven Material von Laserdioden, der gerade die entstehenden Verluste ausgleicht, führt zur sogenannten Schwellbedingung. Notiert man sie unter Annahme eines Bauelements ohne Materialverluste wie Streuung oder Absorption

$$g_{\text{th}} = -\frac{1}{L} \ln R, \quad (2.1)$$

so wird deutlich dass der aufzubringende Gewinn  $g_{\text{th}}$  auf der zur Verfügung stehenden Länge  $L$  die Spiegelverluste, die über die Reflektivität  $R$  gegeben sind, ausgleichen muss. Bei der im Vergleich zu kantenemittierenden Laserdioden sehr dünnen aktiven Zone müssen mittels eines geeigneten Designs hohe Reflektivitäten erreicht werden. Dafür werden Bragg-Reflektoren verwendet, wie sie in Abschnitt 2.1 näher beschrieben sind. Insgesamt ergibt sich der in Abb. 2.1 dargestellte Aufbau. Die aktive Zone, bestehend aus mehreren

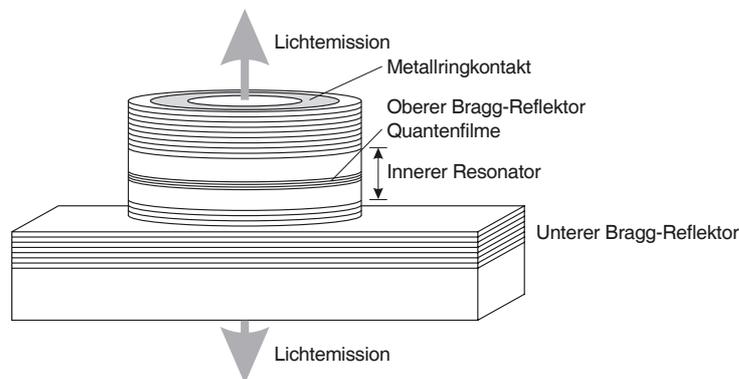


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Vertikallaserdiode. Der innere Resonator ist in Abb. 2.6 detailliert dargestellt.

Quantenfilmen und den zugehörigen Barrieren befindet sich in einer Kavität zwischen den beiden Bragg-Reflektoren. Die gesamte Struktur kann eine Dicke von 10  $\mu\text{m}$  oder mehr erreichen.

## 2.1 Bragg-Reflektoren

Bragg-Reflektoren bestehen aus einer Folge von Schichten mit abwechselnd niedriger bzw. hoher Brechzahl  $\bar{n}_l$  bzw.  $\bar{n}_h$  und jeweils einer Dicke, die einem Viertel der Wellenlänge im Halbleitermaterial entspricht. Damit erreicht man innerhalb eines Stopppandes mit spektral begrenzter Breite die im Vertikallaser geforderten hohen Reflektivitäten. Die Dicke  $L_B$  eines Bragg-Reflektors

$$L_B = M(d_l + d_h) = M \frac{\lambda}{4} \left( \frac{1}{\bar{n}_l} + \frac{1}{\bar{n}_h} \right). \quad (2.2)$$

ergibt sich aus der Anzahl der Spiegelpaare  $M$  und den Dicken der Einzelschichten  $d$ . Die Indizes kennzeichnen jeweils die Höhe der Brechzahl (“low” bzw. “high”). Die Reflektivität von Bragg-Reflektoren berechnet sich nach [15] zu

$$R = \left( \frac{1 - b}{1 + b} \right)^2. \quad (2.3)$$

Der Parameter  $b$  beschreibt das Produkt der Verhältnisse von niedriger zu hoher Brechzahl eines jeden Übergangs im Reflektor

$$b \equiv \prod_{i=0}^{2M} \left( \frac{\bar{n}_{l,i}}{\bar{n}_{h,i}} \right). \quad (2.4)$$

Dem Aufbau des Vertikallasers entsprechend ergeben sich von den Brechungsindizes der an den Bragg-Reflektor angrenzenden Schichten abhängige Formeln. Für Vertikallaser wie in Abschnitt 6, deren Kavität aus GaAs besteht, beginnen von innen aus gesehen beide Bragg-Reflektoren mit einer niedrigbrechenden Schicht. Der obere Spiegel grenzt an Luft, während der untere mit hochbrechendem GaAs-Substrat abschließt und demzufolge zu den  $M$  Spiegelpaaren eine zusätzliche niedrigbrechende AlGaAs-Schicht benötigt. In diesem Fall ergibt sich für den unteren (“bottom”) und den oberen Spiegel (“top”)

$$b_b = \frac{\bar{n}_l}{\bar{n}_c \bar{n}_s^2} \left( \frac{\bar{n}_l}{\bar{n}_h} \right)^{2M_b} \quad \text{bzw.} \quad b_t = \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_c} \left( \frac{\bar{n}_l}{\bar{n}_h} \right)^{2M_t}. \quad (2.5)$$

Die Indizes c und s stehen für das Material in der Kavität (“cladding”) und das Substrat. Im Fall der hier betrachteten Vertikallaser mit GaAs-basierten Bragg-Reflektoren und InP als Kavitätsmaterial ändern sich die Brechzahlverhältnisse. Der innere Resonator ist jetzt

höherbrechend als die Bragg-Reflektorschichten. Damit lauten die Formeln

$$b_b = \frac{\bar{n}_c \bar{n}_s}{\bar{n}_h^2} \left( \frac{\bar{n}_l}{\bar{n}_h} \right)^{2M_b} \quad \text{bzw.} \quad b_t = \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_s} \left( \frac{\bar{n}_l}{\bar{n}_h} \right)^{2M_t}. \quad (2.6)$$

Alle diese Betrachtungen sind auf den verlustfreien Fall beschränkt. Wenn Absorptionsverluste, wie sie beispielsweise im p-dotierten Halbleitermaterial aufgrund von freien Ladungsträgern auftreten (s. Abschnitt 3.3), berücksichtigt werden sollen, greift man auf die Theorie gekoppelter Moden [16] oder auf die Transfer-Matrix-Methode [17] zurück. Ein typisches mit [18] erstelltes Intensitätsreflexivitätsspektrum eines Bragg-Reflektors sowie der Einfluss von Absorption ist in Abb. 2.2 dargestellt.

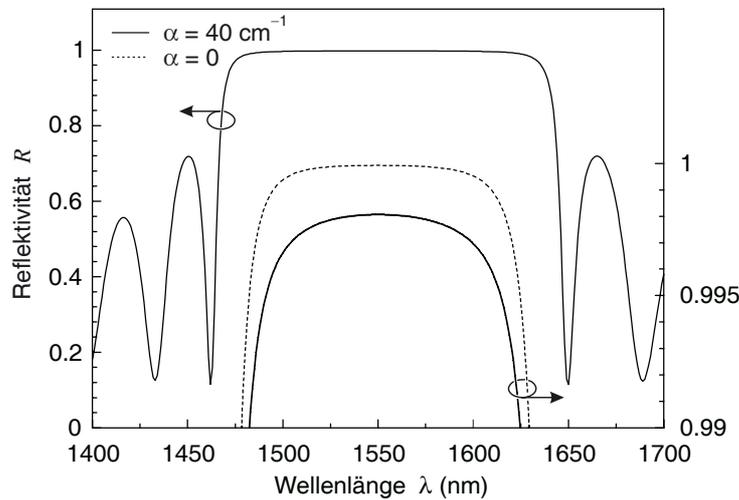


Abbildung 2.2: Spektraler Verlauf des Intensitätsreflexionsfaktors eines AlAs-GaAs-Bragg-Reflektors von einer InP-Kavität aus gesehen. Die Maximalreflektivität von 99.99 % reduziert sich bei einer Materialabsorption von  $40 \text{ cm}^{-1}$  auf 99.8 %.

Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Materialabsorption und der maximal erreichbaren Reflektivität ist in Abb. 2.3 aufgetragen [19]. Er verdeutlicht, dass die Reflektivität eines Bragg-Reflektors bei gegebener Absorption nicht beliebig weit erhöht werden kann, indem die Brechzahldifferenz vergrößert wird. Beispielsweise lässt sich mit AlAs-GaAs-Bragg-Reflektoren eine Reflektivität von 99.9 % erreichen, wenn die Absorptionsverluste  $\alpha = 7 \text{ cm}^{-1}$  bleiben.

Weil es sich bei Bragg-Reflektoren nicht um Spiegel mit einer starren Reflexionsebene handelt, sondern verteilte Rückkopplung auftritt, spricht man von einer Eindringtiefe  $l_{\text{eff}}$ . Damit kann im Modell der gesamte Reflektor durch ein Medium konstanter Brechzahl