

Kapitel 1

Einleitung

Der technische Fortschritt im letzten Jahrhundert basierte hauptsächlich auf den Entwicklungen im elektronischen Bereich. Mit der Entdeckung der Halbleiter und dem damit verbundenen Transistoreffekt konnte die Vakuumröhre durch Halbleitertransistoren ersetzt werden. Durch die Integration war es möglich, immer mehr Transistoren auf kleinster Fläche unterzubringen, was zu der Entstehung von integrierten Schaltkreisen (ICs) führte. Daraus wurde innerhalb weniger Jahrzehnte eine neue Technologie geschaffen, auf der heutzutage große Teile unseres Lebens basieren. Computer, Steuerungs-, Unterhaltungs- und Telekommunikationselektronik sind nur wenige Beispiele dafür. Die Integration dieser Technologie stößt mittlerweile schon fast an physikalische Grenzen und es werden immer wieder neue Mittel und Wege gefunden, den Fortschritt weiter voranzutreiben.

Parallel zu dieser Entwicklung wurde in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Laser-Effekt realisiert. Doch die Laserentwicklung kam nur sehr zögerlich voran. Lasersysteme (z.B. für Materialbearbeitung, spektroskopische Anwendungen usw.) bestanden aus Gas- bzw. Festkörperlaser. Diese sind groß, teuer und ineffizient und außerdem sehr wartungsintensiv. Mit der Entwicklung des Halbleiterlasers bestand erstmals die Möglichkeit, Strom direkt in Licht umzuwandeln, was sehr hohe Effizienzen, aber auch geringe Preise zulässt. Langsam etablierte sich dieser neue Lasertyp und fand Einzug in bestehende Anwendungen, wie z.B. Materialbearbeitung, Medizintechnik, Spektroskopie, Holographie usw. und verdrängt teilweise andere Lasersysteme. Zusätzlich wurden mit dem Halbleiterlaser neue Anwendungen möglich. Die Signalübertragung mittels optischer Faser revolutionierte die Telekommunikation, zog ein exponentielles Wachstum nach sich und ist heutzutage aus Internet, Datenfernübertragung, Digital-Fernsehen und Telefon nicht mehr wegzudenken. Dieser Trend wird in Zukunft weiter anhalten und wird, wenn auch etwas gebremst, sich weiter bis auf Chipebene durchsetzen. Erste Ansätze zur optischen Integration zeigen auch auf diesem Gebiet ein großes Potenzial, wobei es hier jedoch noch keine konkreten Umsetzungen gibt. Weitere Anwendungen, die erst mit der Entwicklung des Halbleiterlasers entstanden und heute im alltäglichen Leben weit verbreitet sind, sind zum Beispiel CD-Player, Laserpointer und Scansysteme an Supermarktkassen. Auch beim optischen Pumpen von Festkörperlaser hat der Halbleiterlaser Einzug gehalten. Großes Potenzial besitzt der Halbleiterlaser in der Displaytechnik, wobei er nicht nur mit anderen Lasersystemen, sondern auch mit ganz anderen Technologien konkurriert. Welches System sich durchsetzen wird, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. In der Medizintechnik werden ebenfalls neue Laserverfahren zur Diagnose und Behandlungen von Krankheiten getestet.

Zukünftig wird es auch immer neue Anwendungen für Laser geben, wobei der Halbleiterlaser aufgrund seiner großen Flexibilität sich immer stärker durchsetzen wird. Die Wellenlänge kann in weiten Bereichen (nahes Ultraviolett bis fernes Infrarot) frei gewählt werden, die optische Ausgangsleistung kann von wenigen Milliwatt bis etliche Kilowatt betragen, Dauerstrichbetrieb (cw) bis zu einer Modulierbarkeit von mehreren 10 GHz sind möglich und die Strahleigenschaften können variiert werden bis hin zum nahezu perfekten Gaußstrahl. Kleine Baugrößen, hohe Effizienzen und gute Lebensdauereigenschaften sind weitere Vorteile. Außerdem werden Halbleiterlaser auf Waferenebene hergestellt, was große Stückzahlen und geringe Preise erlaubt.

Motivation

In dieser Arbeit werden kantenemittierende Hochleistungs-Laserdioden untersucht, die im infraroten Bereich (980 nm) emittieren. Die Laserstruktur aus AlGaAs/GaAs mit InGaAs-Quantenfilm basiert auf einem GaAs-Substrat und die Herstellung der Laser entspricht gängigen Halbleitertechnologien. Das Ziel ist die Steigerung der Effizienz, der maximalen Ausgangsleistung und Verbesserung weiterer Laserparameter. Dabei wird großer Wert auf eine Verbesserung der Strahleigenschaften gelegt, was gleichzeitig eine Erhöhung der Brillanz bedeutet. Dies ist ein Maß dafür, wie gut das Licht fokussiert werden kann und die damit verbundene maximale Intensität pro Fläche. Halbleiterlaser mit guten Strahlqualitäten, sogenannte Singlemode-Laser, haben eine limitierte Brillanz, da die maximale Ausgangsleistung durch physikalische Effekte (COMD) begrenzt ist. Breitstreifenlaser hingegen können etliche Watt Ausgangsleistung haben, zeigen aber aufgrund ihrer schlechten Strahleigenschaften ebenfalls eine geringe Brillanz.

Mit instabilen Resonatoren, einem Konzept, das hohe Leistungen mit verbesserter Strahlqualität verbindet, kann die Brillanz deutlich gesteigert werden. Die Herstellung von instabilen Resonatoren ist nahezu identisch zum Herstellungsprozess für konventionelle Breitstreifen-Laserdioden. Allerdings ist ein zusätzlicher Prozessschritt erforderlich, da die gespaltenen Resonatorspiegel durch zylindrisch gekrümmte Spiegel ersetzt werden. Dafür muss ein geeigneter Trockenätzprozess entwickelt werden, der außerdem eine einfache monolitische Integration von Laser und Monitorphotodiode erlaubt.

Anwendungen für Hochleistungs-Laserdioden mit verbesserten Strahleigenschaften und 980 nm Wellenlänge liegen in der Telekommunikation, Materialbearbeitung und Medizintechnik.

Gliederung

Die theoretischen Grundlagen zur Laserphysik im zweiten Kapitel dieser Arbeit wurden bewusst kurz gehalten und können in der dort angegebenen Literatur im Detail nachgelesen werden. Um so detaillierter wird im dritten Kapitel die Optimierung der Epitaxie sowohl theoretisch als auch experimentel beschrieben. Das Ziel ist ein reproduzierbarer Epitaxieprozess, der epitaktische Schichtstrukturen mit hoher optischer Ausgangsleistung und guten optischen Eigenschaften liefert. Das darauf folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung des Trockenätzprozesses, der für die Herstellung von kantenemittierenden Laserdioden mit geätzten Spiegelfacetten benötigt wird und somit unumgänglich für die Realisierung von instabilen Resonatoren ist. Dieser Trockenätzprozess wird in das gängige Herstellungsverfahren für Breitstreifen-Laserdioden

implementiert, auf welches im 5. Kapitel näher eingegangen wird. Im Anschluss findet sich die Charakterisierung der Hochleistungs-Laserdioden. Dort lässt sich auch die hohe Qualität des hier entwickelten Epitaxiematerials und des Herstellungsprozesse erkennen. Es wird auch gezeigt, dass Laser mit trocken geätzten Laserfacetten keinerlei Nachteile gegenüber Lasern mit gespaltenen Facetten haben und somit durchaus für den Einsatz als instabile Resonatoren geeignet sind. Die Theorie von instabilen Resonatoren und der damit verbundenen Erhöhung der Brillanz wird zusammen mit den experimentellen Ergebnissen im 7. Kapitel vorgestellt. Die hier hergestellten und charakterisierten Laserdioden wurden auch für die Kopplung in Multi- und Singlemodedfasern herangezogen, was beachtliche Ergebnisse lieferte. Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Trends für Hochleistungs-Laserdioden. Der Anhang enthält Details zur Epitaxie und Technologie, gefolgt von einer kurzen Beschreibung über die Entwicklung von sättigbaren Absorbern, die für Laser-Projektionsverfahren benötigt werden.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Funktion eines Lasers

Schon 1917 sagte Einstein in seinen Postulaten [1] die stimulierte Emission voraus, aber erst 1960 gelang es Maiman, den ersten Laser zu demonstrieren [2]. Laser bedeutet eine Lichtverstärkung durch stimulierte Emission (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Ein Laser zeichnet sich dadurch aus, dass die spektrale Breite des emittierten Lichtes sehr schmal ist (zeitliche Kohärenz) und dass die Abstrahlcharakteristik einmodig oder zumindest nahezu beugungslimitiert ist (räumliche Kohärenz). Die Entstehung der Kohärenz in Lasern kann durch die stimulierte Emission erklärt werden, bei der angeregte Ladungsträger unter Einwirkung anderer Photonen rekombinieren und dabei Photonen entstehen, die dieselbe Ausbreitungsrichtung und Phase haben, wie die anregenden Photonen. Damit dieser Prozess zustande kommt, bedarf es einer kontinuierlichen Energiezufuhr, die ausreicht, um eine Besetzungsinversion zu erzeugen. Neben der Lichtverstärkung, die im sogenannten aktiven Medium stattfindet, ist jedoch auch ein Resonator Voraussetzung für das Zustandekommen der kohärenten Strahlung. In diesem bleiben die Photonen durch Mehrfachreflexion für die stimulierte Emission erhalten. Nur ein Teil wird durch die Grenzflächen (teildurchlässige Spiegel) des Resonators ausgekoppelt und stellt das Ausgangslicht des Lasers dar. Somit besteht also ein Laser aus einem aktiven Medium, in dem die stimulierte Emission stattfindet, welches sich innerhalb eines Resonators befindet.

Die aktiven Medien können aus verschiedenen Materialien bestehen, wie z.B. Gasen, Festkörperkristallen oder Halbleitern. Gaslaser bestehen aus einer Röhre, die an beiden Enden mit speziellen Spiegeln versehen ist und somit den Resonator darstellt. Als aktives Medium dient hier ein Gas (z.B. Ar, CO₂) oder Gasgemisch (z.B. He und Ne), das in die Röhre eingebracht wird. Die Energiezufuhr geschieht üblicherweise durch Blitzlampen oder andere Lichtquellen, kann aber auch durch Wärmezufuhr geschehen. Gaslaser zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr hohe Leistungen bei guten Strahlqualitäten haben. Der Nachteil ist jedoch, dass sie sehr schlechte Effizienzen haben, dass die Wellenlänge durch das verwendete Gas festgelegt ist und dass sie nicht modulierbar sind. Bei Festkörperlasern ist das aktive Medium ein Kristall (z.B. Rubin, Nd:YAG), welcher sich in einem Resonator mit externen Spiegeln befindet. Gepumpt wird dieser Laser ebenfalls durch andere Lichtquellen, wobei sich Halbleiterlaser als Pumplichtquellen wegen der spektralen Schmalbandigkeit besonders gut eignen. Der Vorteil von Festkörperlasern liegt ebenfalls in der guten Strahlqualität und den sehr hohen Energiedichten in ultrakurzen

Lichtpulsen. Nachteilig ist auch hier die Festlegung der Wellenlänge durch den verwendeten Kristall und die schlechte Effizienz. Ein weiterer entscheidender Nachteil, wie auch bei Gaslasern, sind die große Bauform und die hohen Kosten.

Halbleiterlaser zeichnen sich durch sehr gute Effizienz, geringe Größe, Verfügbarkeit von Wellenlängen über einen sehr weiten spektralen Bereich und den geringen Preis aus. Bei Halbleiterlasern besteht das aktive Medium, sowie der Resonator aus einem direkten Halbleiter (z.B. GaAs/AlGaAs, InP/InGaAsP) und ist relativ leicht in großen Stückzahlen herstellbar. Die Energiezufuhr geschieht durch Strom, was eine direkte Wandlung von energiereichen Ladungsträgern in Licht ermöglicht, ohne den Umweg über eine zweite optische Pumpquelle.

2.2 Kantenemittierende Halbleiterlaser

Man unterscheidet bei den Halbleiterlasern zwischen vertikal- und kantenemittierenden Lasern. Die Vertikalemitter (VCSEL) strahlen das Licht senkrecht zur aktiven Schicht ab und zeichnen sich durch gute Strahlqualität, gute Modulierbarkeit und geringe Kosten aus. Jedoch sind sie in der maximalen Ausgangsleistung stark limitiert. In dieser Arbeit werden kantenemittierende Laser untersucht, bei denen das Licht parallel zur aktiven Schicht abgestrahlt wird. Physikalische Grundlagen und Details dieser Laser sind in [3] sehr schön beschrieben. Vorteile von Kantenemittern sind hohe Wirkungsgrade und Ausgangsleistungen bis in den Wattbereich. Buried-Heterostructure (BH) oder Ridge-Waveguide (RW) Laser zeigen sehr gute Strahlqualitäten und durch spezielle Wellenlängenselektionen, wie z.B. in Distributed-Feed-Back (DFB) Lasern, kann zusätzlich eine longitudinale Einmodigkeit erzielt werden. Dies ist jedoch hauptsächlich für die Telekommunikation interessant und wird hier nicht näher erläutert.

Zunächst muss das Halbleitermaterialsystem festgelegt werden, das schon von vornherein den möglichen Wellenlängenbereich vorgibt. Für Emissionswellenlängen im roten und infraroten Bereich bieten sich zwei verschiedene Halbleiter an, die auch als Substrate verfügbar sind: GaAs und InP. Auf diese Substrate werden mittels Epitaxie weitere Schichten aufgewachsen. Voraussetzung für eine gute Kristallqualität ist eine Gitteranpassung an das Substrat, d.h. es kommen nur Halbleiter mit der gleichen Gitterkonstante in Frage.

Beispielsweise wird der sichtbare rote Spektralbereich durch GaAs-gitterangepasstes InAlGaP abgedeckt. Für die Kommunikationswellenlängen bei 1.3 und 1.55 μm wird auf InP-Substrat angepasstes InGaAsP verwendet. Bei den Wellenlängen von 700 bis 870 nm kann AlGaAs benutzt werden, das bei jeder Zusammensetzung an GaAs annähernd gitterangepasst ist. Mit InGaAs kann in diesem Materialsystem der Wellenlängenbereich bis auf 1100 nm ausgeweitet werden. Allerdings ist InGaAs nicht gitterangepasst auf GaAs und kann somit nur bis zu einer bestimmten Schichtdicke verspannt auf GaAs aufgewachsen werden. Dies ist in Abbildung 2.1 dargestellt [4]. In dieser Arbeit wird das ternäre AlGaAs-Materialsystem mit InGaAs-Quantenfilm verwendet. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Materialsystems ist der Brechungsindex, da er entscheidenden Einfluss auf die Wellenführung hat. Der Brechungsindex des AlGaAs-Materialsystems ist stark von der Wellenlänge und der Zusammensetzung des Halbleiters abhängig, was in Abbildung 2.2 gezeigt ist. Es gibt jedoch auch ein anderes Materialsystem, das diesen Wellenlängenbereich abdeckt und aus InGaAsP/InGaP mit InGaAs-Quantenfilm besteht und auf GaAs-Substrat gitterangepasst ist [5, 6]. Ein Vorteil dieses Materialsystems ist, dass es kein Aluminium enthält und damit einige Eigenschaften etwas besser sind. Allerdings ist die Epitaxie komplizierter, da es sich um ein quaternäres System handelt.

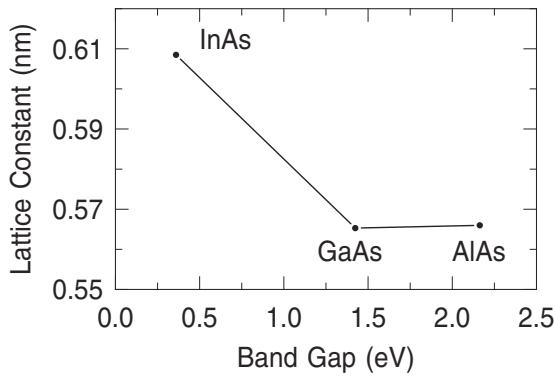


Abbildung 2.1: Gitterkonstante in Abhängigkeit der Bandlückenenergie von GaAs, AlAs, InAs und deren ternäre Verbindungen AlGaAs und InGaAs.

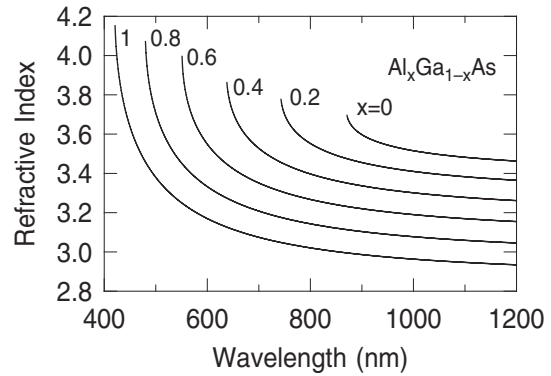


Abbildung 2.2: Brechungsindex von AlGaAs in Abhängigkeit vom Al-Anteil und der Wellenlänge.

Bei der Herstellung von kantenemittierenden Laserdioden werden mittels Epitaxie auf einem Halbleitersubstrat (Wafer) Halbleiterschichten unterschiedlicher Dicke und Zusammensetzung aufgewachsen. Diese Schichten bilden die aktive Schicht und den transversalen Wellenleiter. Bei der nachfolgenden Technologie werden neben der Definition des aktiven Streifens auch die Metallisierung für die elektrischen Kontakte auf Ober- und Unterseite des Wafers aufgebracht. Durch kristallorientiertes Spalten des Wafers wird der Resonator erzeugt, wobei die Grenzflächen zwischen Halbleiter und Luft die Spiegel darstellen.

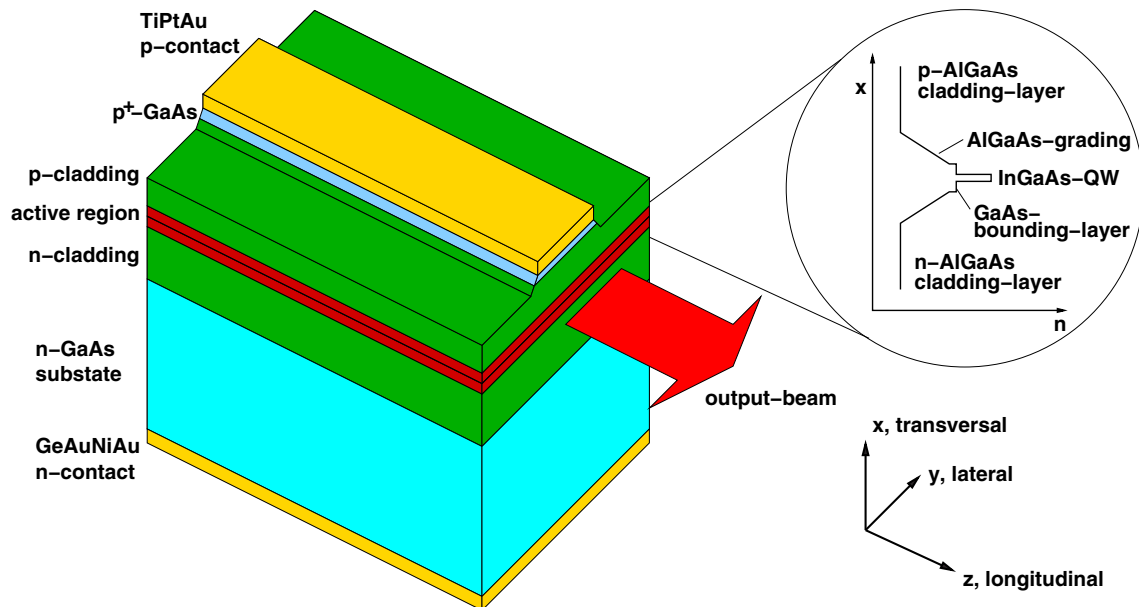


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer kantenemittierenden Laserdiode mit aktiver Zone, Cladding und Kontakten, sowie den Laserspiegeln an Vorder- und Rückseite. Die elektrischen Kontakte befinden sich an Ober- und Unterseite des Lasers. Außerdem ist der Brechungsindexverlauf um die aktive Zone herum dargestellt, der im wesentlichen die transversale Wellenführung bestimmt.

In Abbildung 2.3 ist eine kantenemittierende Laserdiode mit aktiver Zone, Cladding und Kontakten dargestellt. Die gespaltenen Laserspiegel befinden sich an Vorder- und Rückseite und die Metallisierung für die elektrischen Kontakte an Ober- und Unterseite des Lasers. Außerdem ist der Verlauf des Brechungsindex der Schichten um den aktiven Bereich dargestellt.

2.3 Fabry-Perot-Resonator

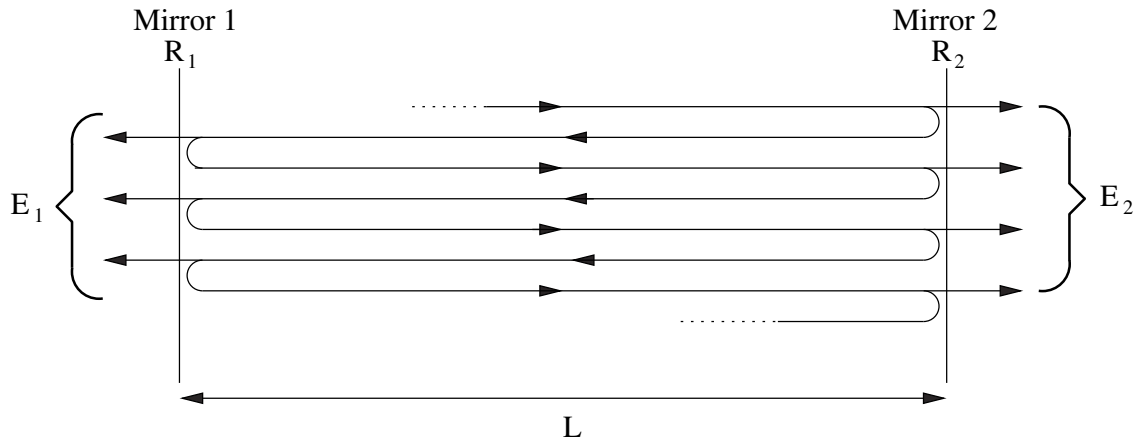


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Fabry-Perot-Resonators der Länge L mit den Spiegeln 1 und 2, welche jeweils die Reflektivitäten R_1 und R_2 aufweisen.

Der Resonator einer kantenemittierenden Laserdiode wird durch die gespaltenen Grenzflächen von Halbleiter und Luft gebildet. Diese haben eine Reflektivität R von ca. 30 %, wenn sie nicht beschichtet sind. Die Länge L des Resonators wird durch den Abstand der Spiegel bestimmt. Ein solcher Resonator mit planparallelen Spiegeln wird auch Fabry-Perot-Resonator genannt. Man kann für den Resonator eine Bedingung für die Laseroszillation definieren [7], die besagt, dass die Intensität und Phasenlage einer Welle nach einem Umlauf im Resonator gleich bleibt, obwohl Verluste durch Auskopplung und durch Absorption α_i im Resonator entstehen. Diese Bedingung lautet

$$R \cdot e^{2\gamma L} = 1 \quad (2.1)$$

mit der Ausbreitungskonstanten $\gamma = \frac{g - \alpha_i}{2} - j\frac{2\pi n}{\lambda}$. Hierbei ist λ die Emissionswellenlänge und n der Brechungsindex des Lasers. Aus der Amplitude bzw. dem Realteil von Gleichung 2.1 ergibt sich die Schwellbedingung, die den erforderlichen Gewinn g festlegt, um die Verluste zu kompensieren. Dies ist in Abschnitt 3.3 noch näher beschrieben. Der Imaginärteil bzw. die Phase ergibt die Resonanzbedingung

$$\frac{4\pi nL}{\lambda_m} = 2m\pi \quad \text{mit} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

die die möglichen diskreten Wellenlängen λ_m bzw. longitudinalen Moden im Resonator festlegt. Für den Modenabstand $\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m-1}$ gilt

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2Ln}. \quad (2.3)$$