

# Kapitel 1

## Einleitung

Photonische Bauelemente auf Halbleiterbasis mit dem Hauptziel der Generation von Licht wurden im Rahmen dieser Arbeit an Leuchtdioden, kantenemittierenden Lasern und VCSELn untersucht.

Leuchtdioden gehören zu den ältesten photonischen Bauelementen. Sie dominieren den Weltmarkt für optoelektrische Halbleiter in Stückzahl und Umsatz. Gegenüber Glühlampen besitzen diese eine wesentlich höhere mittlere Lebensdauer. Leuchtdioden sind gegenwärtig die optoelektronischen Bauelemente mit dem größten Marktanteil. Obwohl dieser Typ von Bauelement schon länger als Halbleiterlaser technologisch optimiert und in großer Stückzahl produziert wird, bleiben wichtige charakteristische Parameter, wie die Effizienz der Konversion von elektrischer in optische Leistung hinter denen des Lasers zurück. Um die Lichtausbeute der Leuchtdioden weiter zu erhöhen werden gegenwärtig texturierte und pyramidenstumpfförmige Konzepte untersucht [1,2].

Stimulierte Emission wurde bereits 1962 mit Halbleiterbauelementen erreicht [3,4]. Die stetige Optimierung dieser Halbleiterlaser führte beispielsweise zu großen Lebensdauern, guter Hochfrequenz- und Abstrahlcharakteristik, aber auch zu hohen Ausgangsleistungen und verschiedenen Emissionswellenlängen über einen großen spektralen Bereich. Die Anwendungen dieser Laser finden sich in der Telekommunikation, Datenspeicherung, zum optischen Pumpen von

Festkörper- und Faserlasern, in der Sensorik bzw. Meßtechnik und zur Materialbearbeitung.

Halbleiterlaser werden heute in einer Vielzahl von technischen Systemen eingesetzt. Die bedeutendsten Einsatzfelder liegen in der optischen Nachrichtentechnik und der Unterhaltungselektronik. Mit diesen äußerst unterschiedlichen Anwendungsbereichen sind auch sehr verschiedene Anforderungen an die Eigenschaften der Laser verbunden. Während bei optischen Fernverbindungsnetzen, aufgrund von Dispersion und Dämpfung des Lichtes in der Faser, Laser mit einer Emissionswellenlänge von  $1.3\ \mu\text{m}$  bzw.  $1.5\ \mu\text{m}$  gefordert sind, können in Kurzstreckenverbindungen Laser mit Emissionswellenlängen unter  $1100\ \text{nm}$  verwendet werden [5]. Aufgrund des spektral abhängigen Fokussdurchmessers und der damit verbundenen Auflösungsbegrenzung für Schreib- und Lesegeräte, werden in der Drucktechnik und für optischen Datenspeicher Laser mit noch kleineren Emissionswellenlängen benötigt.

Die Erzeugung von Licht einer bestimmten Wellenlänge durch optische Rekombination von Ladungsträgern im Halbleiter bedarf einer der *Bandlücke* äquivalenten Energie. Diese energetische Bandlücke hängt von der Zusammensetzung des Halbleitermaterials ab. Das hier betrachtete Materialsystem InGaAs/AlGaAs, abgeschieden auf GaAs-Substraten, eignet sich für die Herstellung von Laserdioden mit Emissionswellenlängen von etwa  $700\ \text{nm}$  bis etwa  $1100\ \text{nm}$ .

Für Kantenemittierende Halbleiterlaser wurden maximale Ausgangsleistungen von mehr als  $10\ \text{W}$  und höchste Konversionseffizienzen über  $60\ \%$  erreicht [6–8]. Bei vertikalemittierenden Lasern wurden an monomodigen Bauelementen maximal  $4,4\ \text{mW}$  und bei multimodigem Betrieb über  $100\ \text{mW}$  mit elektrisch gepumpten Bauelementen ohne zusätzliche Optik gemessen [9–12]. Ein weitergehender Vergleich der hier erzielten Kenndaten mit Literaturwerten werden in den einzelnen Abschnitten aufgeführt. Zur Herstellung der Proben wurde eine Feststoffquellen Molekularstrahlepitaxieanlage verwendet.

# Kapitel 2

## Materialeigenschaften der III-V Halbleiter

### 2.1 Binäre Verbindungshalbleiter

Mit der grundlegenden Arbeit von *H. Welker* in den Labors der Siemens-Schuckertwerke in Erlangen begann 1952 die Erforschung von aus Gruppe III und V im Periodensystem der Elemente bestehenden Verbindungshalbleitern [13]. In den selben Labors erfolgten durch *K.G. Günther* 1958 erste Versuche, dieses Material epitaktisch abzuscheiden [14].

Zur Gruppe III im Periodensystem der Elemente gehören *Bor (B)*, *Aluminium (Al)*, *Gallium (Ga)*, *Indium (In)* und *Thallium (Tl)*. Die Wahrscheinlichkeit 3-wertige chemische Verbindungen zu bilden, nimmt von Bor bis zum Thallium allmählich ab. Letzteres besitzt stabilere einwertige Verbindungen. Die Schmelzpunkte nehmen von Bor ( $\approx 2400^\circ\text{C}$ ) über Aluminium ( $660^\circ\text{C}$ ) bis Gallium ( $29,8^\circ\text{C}$ ) zuerst ab, steigen aber bei Indium ( $156^\circ\text{C}$ ) und Thallium ( $305^\circ\text{C}$ ) wieder an [15]. Bor wird im III-V Materialsystem als Bornitrid-Verbindung wegen seiner sehr hohen Temperaturbeständigkeit und guten elektrischen Isolatoreigenschaft in der Prozeßtechnik häufig verwendet. Bei epitak-

tischem Wachstum von Halbleitern wird elementares Bor dabei hauptsächlich aus Trimethylboran (TMB) gewonnen [16–18]. Diese Verbindung wird in einer Reinheit von 5N<sup>1</sup>, d.h. (99,999 %) angeboten [19].

Aluminium ist chemisch ein sehr unedles Metall und bildet an der Luft sofort eine Oxidschicht. Die gegenwärtig kommerziell verfügbare Reinheit von elementarem Aluminium beträgt 99,99995 % (6N5). Bei dieser Nomenklatur sind hauptsächlich metallische Verunreinigungen enthalten. So bleiben viele Nichtmetalle<sup>2</sup>, z.B. Sauerstoff dabei unberücksichtigt [20].

Gallium gilt als sehr seltenes Metall mit der Besonderheit des niedrigen Schmelzpunktes (*“schmilzt in der Hand”*). Die kommerziell erhaltbare Reinheit ist sehr hoch<sup>3</sup> (7N+) und durch die technische Nachweisbarkeitsgrenze der metallischen Verunreinigungen bestimmt [20–22]. Bezüglich Reinheit verhalten sich Indium und Gallium ähnlich. Thallium ist sehr giftig und von geringer technischer Bedeutung. Diesem Element ist in den vergangenen Jahren im Zusammenhang mit optischen Bauelementen für Wellenlängen um 1300 nm erhöhte Aufmerksamkeit zugekommen [23–27]. Dabei wurde auch die Reinheit von elementarem Thallium in den letzten Jahren erhöht (6N) [20,28].

Die Gruppe V des Periodensystems umfaßt die Elemente *Stickstoff (N)*, *Phosphor (P)*, *Arsen (As)*, *Antimon (Sb)* und *Wismut (Bi)*. Die Wahrscheinlichkeit chemischer Verbindungen mit der Wertigkeit 5 nimmt von Stickstoff zu Wismut hin ab. 3-wertige Wismut-Verbindungen sind weitaus beständiger als 5-wertige. Stickstoff kann mit extrem hoher technischer Reinheit (9N) hergestellt werden. Aufgrund der großen Bindungsenergie des Stickstoffmoleküls N<sub>2</sub>, besitzt atomarer Stickstoff nur eine geringe Einbauwahrscheinlichkeit in die Halbleiteroberfläche. Über eine Plasmaquelle kann dieses aber zerlegt und in epitaktische Schichten effizient eingebaut werden.

Beim Phosphor existieren mit weißem, rotem und schwarzem Phosphor drei Modifikationen. Letztere ist nur unter relativ großem Aufwand herstellbar und besitzt deshalb nur eine geringe technische Bedeutung. Weißer Phosphor ist sehr giftig, riecht knoblauchartig und ist chemisch sehr reaktionsstark. Dieser kann sich schon bei  $\approx 60^\circ\text{C}$  entzünden. Roter Phosphor ist reaktionsschwach, geruchlos und wird als ungiftig bezeichnet. Dieser besitzt eine Entzündungstemperatur von mehr als  $400^\circ\text{C}$ . Die weiße Modifikation bildet sich aus rotem

---

<sup>1</sup> “5N” steht dabei für die Anzahl von 5 Neunen

<sup>2</sup>H, B, C, N, O, F, P, S, Cl, I, At

<sup>3</sup>wird teilweise als 8N verkauft

z.B. durch Destillation oberhalb von  $280^{\circ}\text{C}$ . Weißer Phosphor wandelt sich bei Raumtemperatur langsam in roten Phosphor um. Dies kann bei höheren Temperaturen deutlich beschleunigt werden. Roter Phosphor wird mit einer technischen Reinheit von maximal 7N kommerziell angeboten [22]. Sowohl Arsen als auch Antimon (*lat. Stibium*) besitzen mehrere Modifikationen, welchen aber keine weitere Bedeutung zukommt. Arsen ist in der Reinheit 7N5 (99,999995 %) und Antimon als 7N erhältlich [29,30]. Wismut (*lat. bismutum*) -Vorkommen sind sehr selten. Zu Wismut-haltigen III-V Halbleiter existieren bisher nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen [31,32].

### 2.1.1 Kristallstruktur und Gitterkonstante

Mit Ausnahme der Nitride kristallisieren die meisten III-V Halbleiter in der Zinkblendestruktur. Abb. 2.1 zeigt schematisch den Aufbau dieser Gitterstruktur.

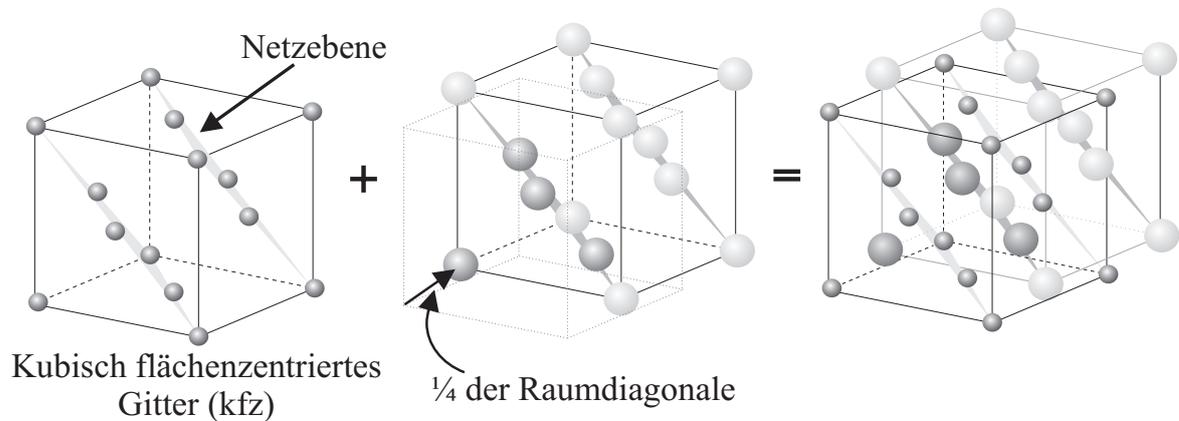


Abb. 2.1: Schematischer Aufbau der Zinkblendestruktur, wie sie aus zwei, um ein Viertel in Richtung der Würfeldiagonale gegeneinander verschobene, kubisch flächenzentrierte (kfz) Gitter aufgebaut ist. Es bilden sich Netzebenen mit hoher flächenbezogener Dichte an Atomen.

Diese lässt sich durch zwei, um ein Viertel in Richtung der Würfeldiagonale gegeneinander verschobene, kubisch flächenzentrierte (kfz) Gitter aufbauen. Dabei besteht jeweils eines aus Atomen der Gruppe V bzw. Gruppe III im Periodensystem. Diese Struktur ist der Diamantstruktur sehr ähnlich, wobei im Fall von Diamant, beide kfz-Gitter aus Kohlenstoffatomen bestehen. Das