

Kapitel 1

Einleitung

Der Halbleiterlaser blickt auf eine rasante Entwicklungsgeschichte zurück. Die ersten Halbleiterlaser waren Kantenemitter: Beinahe gleichzeitig zeigten vier Forschergruppen 1962 Laseraktivität auf GaAs [1, 2, 3, 4]. Diese Bulk-Laser emittierten bei 880 nm. Durch die hohe Schwellstromdichte war nur gepulster Betrieb bei tiefen Temperaturen möglich. Bereits ein Jahr später machte die Herstellung von Heterostrukturen den Laserbetrieb bei Raumtemperatur gepulst möglich [5, 6], ein weiteres Jahr später im Dauerstrichbetrieb [7]. Seither wurden die elektrischen und vor allem optischen Eigenschaften der Laserdioden ständig weiterentwickelt.

Begleitet und teilweise erst ermöglicht wurden diese Verbesserungen durch kleinere und größere Modifikationen der Abscheideverfahren zur Herstellung der einkristallinen Halbleiterschichten. Mit Hilfe dieses als Epitaxie¹ bezeichneten Vorgangs werden auf einkristallines Substrat geeignete Materialien so aufgebracht, daß sie das Kristallgitter des Substrats fortsetzen. Dabei können sie eine andere Bandlücke und andere elektrische Eigenschaften besitzen. Nur dadurch ist die Herstellung moderner Laserdioden möglich. Heute gibt es Halbleiter-Laserdioden für verschiedenste Wellenlängen.

Eine spezielle Form der Halbleiterlaser stellen die Vertikallaserdioden (VCSEL²) dar. Ihre Entwicklung ist in den letzten zehn Jahren rasch vorangeschritten. Diese Bauelemente, die 1979 von Iga [8] vorgeschlagen, aber erst 1989 bei AT&T realisiert wurden [9, 10], sind inzwischen so ausgereift, daß sie in unterschiedlichen Ausführungen kommerziell erhältlich sind. Sie sind durch die mittlerweile gezeigte hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu einer ernstgenommenen Alternative der kantenemittierenden Laserdioden geworden. In der Unterhaltungselektronik, beispielsweise als Abtastlaser in CD-Spielern, und zur optischen Datenkommunikation auf kurzen und mittleren Strecken, wo es auf hohe Geschwindigkeit bei geringen Systemkosten ankommt, werden heute vielfach VCSEL verwendet.

Vergleicht man kantenemittierende Laserdioden mit Vertikalemittlern, so stellt die extrem kurze Gewinnzone von wenigen zehn Nanometern eine Designgrenze dar, die bisher kaum durchbrochen worden ist. Dies stellt eine obere Grenze für den Umlaufgewinn dar. Beim Kantenemitter dagegen läßt sich der Umlaufgewinn

¹griechisch: Abscheidung dünner Schichten

²Vertical Cavity Surface Emitting Laser

durch Abspalten von Lasern in verschiedenen Längen sehr leicht variieren.

Bevor die Braggspiegel so weit entwickelt waren, daß das elektrische Pumpen der Quantenfilme einen Laserbetrieb ermöglichte, wurden optisch gepumpte Bauelemente hergestellt [11, 12]. Bei diesen wurden erfolgreich mehrere Quantenfilme in benachbarten Maxima des Stehwellenfelds plaziert, um den Gewinn zu erhöhen. Wird dagegen elektrisch gepumpt, ändern sich die Verhältnisse. Aufgrund der Diffusionskonstanten der Ladungsträger können zwar mehrere nahe beieinanderliegende Quantenfilme mit einem p-n-Übergang gepumpt werden. Im resonanten Fall aber sind die Quantenfilme zu weit voneinander entfernt, um effizient von einem p-n-Übergang gepumpt werden. Dennoch wurde auch dieses Konzept verfolgt [13].

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Kaskadierung wird eine Möglichkeit aufgezeigt, durch separate p-n-Übergänge mehrere aktive Bereiche zu pumpen. Dadurch erwartet man eine entscheidende Steigerung des Gewinns pro Umlauf. Die einzelnen Bereiche werden jeweils durch Tunnelioden miteinander verbunden.

Ein anderer Ansatz, um hohe Lichtleistung bei guter Strahlqualität zu erhalten, sind optisch gepumpte Quantenfilme mit einem rückwärtigen Spiegel und einem externen dielektrischen Frontreflektor. Durch die lateral homogene Anregung skaliert die Leistung dieser VECSEL³ in erster Näherung mit der Anregungsfläche.

Zur Gliederung der Arbeit:

Verschiedene Epitaxieverfahren haben sich etabliert. Die beiden Verfahren Metallorganische Gasphasenepitaxie und Molekularstrahlepitaxie, die zur Herstellung von Laserdioden eingesetzt werden, sollen in Kapitel 2 vorgestellt werden. Dabei wird bei der Molekularstrahlepitaxie ein besonderes Augenmerk auf die Handhabung und notwendige Reinheit des Arbeitsablaufs gelegt werden.

Zur Herstellung von Laserdioden sind verschiedene Bausteine notwendig, auf die in Kapitel 3 eingegangen wird: Die aktive Zone, die oft aus einem oder mehreren Quantenfilmen besteht, außerdem beim Vertikallaser ein Schichtpaket, das den Spiegel bildet und eine Stromführung, die sich als Oxidblende realisieren läßt. Zur in dieser Arbeit vorgestellten Kaskadierung sind Tunnelioden erforderlich. Hierfür muß der Halbleiter besonders hoch dotiert werden. Speziell die n-Dotierung von GaAs scheint nur bis zu einer gewissen Grenze möglich zu sein. Als n-Dotierstoff wird in dieser Arbeit Silizium eingesetzt. Neben der üblichen Aggregatform, kristallinem Silizium, das aus einer Effusionszelle verdampft wird, wird auch die Verwendung von Siliziumtetrabromid untersucht.

Die Umsetzung und Anwendung dieser Bausteine in kaskadierten Vertikalemittern und in optisch gepumpten Laserdioden wird in Kapitel 4 gezeigt. Zunächst wird ein einstufiges Bauelement vorgestellt, um die kaskadierten VCSEL mit diesem vergleichen zu können. Dann wird an kaskadierten Lasern mit zwei Stufen diskutiert, ob sich unterschiedliche Tunnelioden auf die elektrischen und optischen Eigenschaften auswirken. Mit Hilfe dreistufiger Bauelemente soll die Wirksamkeit der Kaskadierung untersucht werden.

Bei den optisch gepumpten VECSEL gilt es, herauszufinden, ob es möglich ist, bei guter Strahlqualität eine hohe Ausgangsleistung zu erreichen.

³Vertical External Cavity Surface Emitting Laser

Kapitel 2

Epitaxieverfahren

Zur Herstellung optischer Sendeelemente, also Leuchtdioden moderner Bauart und Laserdioden, werden heutzutage im wesentlichen zwei Epitaxieverfahren angewandt. Die metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE¹) benutzt metallorganische Verbindungen als Ausgangsmaterialien, der Wachstumsprozess findet typischerweise im Druckbereich von einigen zehn bis einigen hundert Torr statt, dem sogenannten Grobvakuum (GV) [14].

Die Molekularstrahlepitaxie (MBE²) dagegen ist ein Hochvakuumprozeß. Der Hintergrunddruck der Wachstumskammer liegt um 10^{-10} Torr, die während des Kristallwachstums auftretenden lokalen Materialflüsse gehen nicht über den 10^{-5} Torr-Bereich hinaus. Dieser Druckbereich wird als Ultrahochvakuum bezeichnet. In den folgenden Abschnitten soll auf die beiden Verfahren MOVPE und MBE gesondert eingegangen werden.

2.1 Metallorganische Gasphasen-Epitaxie

Die MOVPE hat sich mit der Verfügbarkeit metallorganischer Verbindungen als Variante der Gasphasenepitaxie (VPE³) entwickelt. Beim Vorgänger, der Chlor-VPE, wurden die Gruppe-III-Elemente als Chlorverbindungen bereitgestellt, was durch lange Reaktionszeiten im Reaktor scharfe Grenzflächen von Heterostrukturen verhinderte.

Die MOVPE wird heute in großem Umfang zur Produktion von Laserdioden auf Indiumphosphid (InP) und Galliumarsenid (GaAs) eingesetzt. Mit InP als Substratmaterial und Indiumgalliumarsenid (InGaAs) bzw. Indiumgalliumarsenidphosphid (InGaAsP) als aktivem Material erschließt sich der für Kommunikationsanwendungen wichtige Wellenlängenbereich um 1.3 und 1.55 μm . GaAs deckt mit Indiumgalliumphosphid den roten sichtbaren Spektralbereich ab und mit GaAs bzw. InGaAs als optisch aktivem Material den Wellenlängenbereich von 850 bis über 1100 nm.

¹Metall-Organic Vapor phase epitaxy, gelegentlich auch OMVPE = Organo-Metallic VPE, oder als MOCVD = Metall organic chemical vapor deposition) ist gebräuchlich

²Molecular Beam Epitaxy

³Vapor phase epitaxy

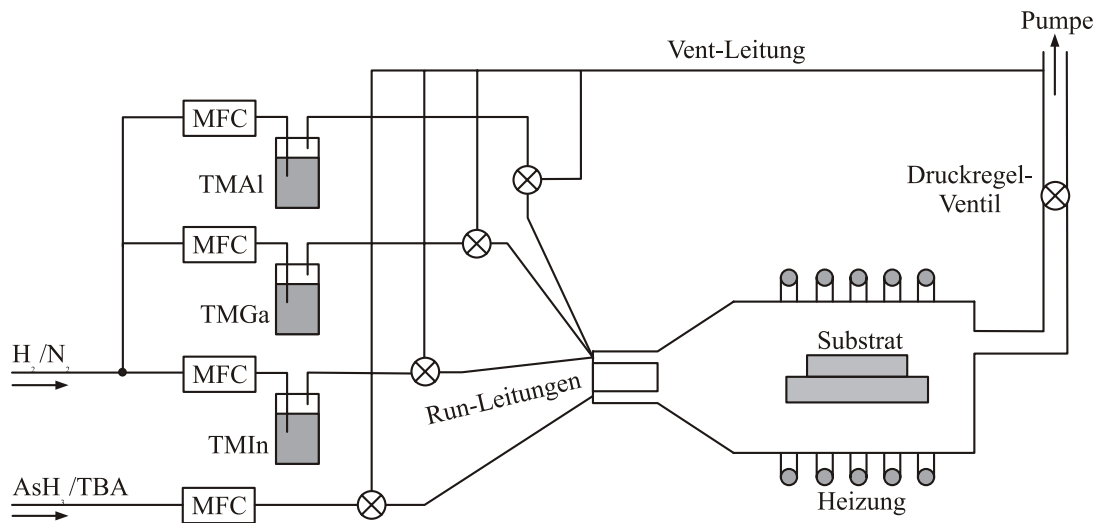


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines MOVPE-Reaktors zur III-V-Epitaxie auf GaAs

Andere Anforderungen stellt die Epitaxie im AlGaInN-System. Dies ist ein von MOVPE stark dominierter Wellenlängenbereich: Die Herstellung von Galliumnitrid-Leucht- [15] und Laserdioden [16] für den ultravioletten und blauen sichtbaren Spektralbereich erfolgt fast ausschließlich in MOVPE-Reaktoren, auch wenn neuerdings eine in der MBE gewachsene resonante LED gezeigt wurde [17].

Hier soll jedoch, da sich auch das in der Arbeit beschriebene MBE-Wachstum auf GaAs als Substratmaterial konzentriert, die MOVPE dieses Materialsystems näher beschrieben werden. Unterschieden wird zwischen Atmosphären-Druck-MOVPE, die bei ca. 750 Torr stattfindet, und der heute bevorzugten Niederdruck-MOVPE, bei der mit Reaktor-Drücken zwischen 10 und 100 Torr gearbeitet wird.

Der prinzipielle Aufbau eines MOVPE-Reaktors für das GaAs-System ist in Abb. 2.1 skizziert.

2.1.1 Quellmaterialien

Das benötigte Gruppe-V-Element Arsen wird in Form von Arsin (AsH_3) injiziert, geregelt mit Hilfe eines Massenflussreglers (MFC⁴). Als Alternative zum hochgiftigen Arsin wird mittlerweile auch Tertiärbutylarsin (TBA, $\text{H}_2\text{AsC}_4\text{H}_9$) eingesetzt. Es verfügt über eine verbesserte Einbaueffizienz und ist auch ökonomisch interessant, da aufgrund der geringen Giftigkeit keine so strengen Sicherheitsauflagen wie für Arsin erfüllt werden müssen. Diese umweltverträglichere Variante wurde lange Zeit nicht eingesetzt, da TBA nicht in der notwendigen Reinheit synthetisiert werden konnte. Es wurde mittlerweile gezeigt, daß die Materialqualität der mit TBA hergestellten Schichten im klassischen GaAs und InP System konkurrenzfähig ist [18].

Die Gruppe-III-Elemente Aluminium, Gallium und Indium werden als Tri-Methyl-

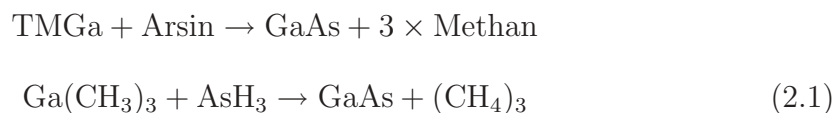
⁴Mass flow controller

Indium (TMIn), -Aluminium (TMAI) bzw. -Gallium (TMGa) in Edelstahlbehältern (Bubblern) bereitgestellt. Durchflossen werden diese Metallorganika, die, bis auf TMIn, bei Raumtemperatur bereits flüssig sind, vom Trägergas Stickstoff (N_2) oder Wasserstoff (H_2). Da sich Verunreinigungen der Quellmaterialien gravierend auf die Schichtqualität auswirken, ist auch die Reinheit der Trägergase von großer Bedeutung. So wird der verwendete hochreine Wasserstoff typischerweise noch mit Hilfe einer Palladiumzelle vorgereinigt, bevor er die Bubbler durchströmt. Die Bubbler müssen auf einer definierten Temperatur gehalten werden, um konstante Flußverhältnisse zu ermöglichen. Daher werden sie üblicherweise in einem Wasserbad temperiert. Auch die Reinheit der Quellen selbst ist entscheidend, will man optoelektronische Bauelemente von höchster Qualität herstellen. So läßt sich in letzter Zeit durch eine TMIn-Quelle mit verbesserter Reinheit die Qualität der mit MOVPE hergestellten optoelektronischen Bauelemente deutlich steigern, wie Maclean et al. 2001 an Photolumineszenz-Proben zeigten [19].

2.1.2 Wachstumsbedingungen

Thermodynamisch betrachtet findet die Gasphasenepitaxie in einem Ungleichgewichtsprozeß statt, erzeugt durch Übersättigung der Gasphase. Durch das Bestreben, das Gleichgewicht herzustellen, wird der Festkörper aus der Gasphase abgeschieden. Es kann nicht mehr Festkörper abgeschieden werden, als zum Erreichen des Gleichgewichts notwendig ist. So ist die abgeschiedene Menge begrenzt durch die Gasmenge, die den Reaktor durchströmt und die Thermodynamik, also die Druck- und Temperaturverhältnisse im Reaktor.

Die grundsätzliche Reaktionsgleichung der AlGaAs-MOVPE ist in Gleichung 2.1 am Beispiel des Galliums als Gruppe-III-Element beschrieben.



TMGa als Galliumquelle und Arsin werden zugeführt, Methan (CH_4) als Abfallprodukt entweicht. In dieser Gleichung sind alle Stoffe bis auf das auf dem Wafer abgeschiedene GaAs gasförmig. Da im realen Epitaxieprozeß nicht nur Gleichung 2.1 abläuft, sondern auch viel ungenutztes Prozessgas, besonders Arsin, entweicht, ist eine aufwendige Abgasreinigung notwendig.

Die Flußrate des Metallalkyls TMGa in den Reaktor läßt sich nach Gleichung 2.2 abschätzen [20]:

$$F_{\text{TMGa}} = \frac{\varepsilon F_{\text{Hydrogen}} P_{\text{TMGa}}}{P_{\text{Bublertotal}} - P_{\text{TMGa}}} \quad (2.2)$$

Hier stellt ε die Bubblereffizienz dar, die bei typischen Bedingungen als nahe an 1 angenommen werden kann [21]. P_{TMGa} ist der gesättigte Dampfdruck von TMGa, $P_{\text{Bublertotal}}$ der Druck im Bubbler und F_{Hydrogen} die Flußrate des Trägergases Wasserstoff. Die Flußrate der Aluminiumverbindung TMAI dagegen läßt sich nicht so einfach bestimmen wie die des TMGa. Gallium tritt im TMGa fast ausschließlich als Monomer, also $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ auf, während Aluminium auch als Dimer $(\text{CH}_3)_6\text{Al}_2$

auftritt, was berücksichtigt werden muss [22]. Die Wachstumsrate ist typischerweise linear abhängig vom Partialdruck der Metallalkyle, was für AlGaAs auf die Wachstumsrate g von

$$g = A_1 P_{\text{TMGa}} + A_2 P_{\text{TMAI}} \quad (2.3)$$

führt, in der A_1 und A_2 die jeweiligen Proportionalitätskonstanten darstellen. Die Verhältnisse im realen GaAs-Reaktor sind um einiges komplizierter, sie sollen an dieser Stelle allerdings nicht näher betrachtet werden, eine detaillierte Untersuchung findet sich bei Mountziaris et al. [23]. Typisch für MOVPE-Epitaxie von AlGaAs sind Wachstumsraten zwischen 3 und 4 $\mu\text{m}/\text{Stunde}$.

Gerade für komplizierte Schichtfolgen wie VCSEL müssen Schichtzusammensetzungen und Wachstumsraten genau bekannt sein. Durch moderne, optische In-situ Schichtdickenkontrolle mit Reflektometer und RAS (Reflektions-Anisotropie-Spektroskopie) ließ sich die Kalibration derart vereinfachen, dass mit Hilfe einer einzigen, einstündigen Kalibrationsschicht die Wachstumsparameter für eine komplette VCSEL-Struktur bestimmt werden können [24].

Im letzten Jahrzehnt hat sich die MOVPE als Produktionsmaschine für elektronische und optoelektronische Bauelemente bewährt [22]. Durch in-situ Wachstumskontrolle, verbesserte Reinheit der Quellmaterialien und verfeinerte theoretische Modelle ist die MOVPE in der Lage, auch komplizierte Schichtstrukturen in großen Stückzahlen bei guter Qualität zu realisieren [25].

2.2 Molekularstrahl-Epitaxie

Das Verfahren der Molekularstrahlepitaxie wurde in den Siebziger Jahren entwickelt. Stellvertretend sei hier der erste mit MBE hergestellte Doppel-Heterostrukturlaser genannt [26]. Heutige Produktionsmaschinen haben mit den Vakuumkammern dieser Tage nur noch wenig gemeinsam, geblieben ist das Wachstumsprinzip: Im Ultrahochvakuum (UHV) werden einkristalline Schichten abgedehnt.

2.2.1 Anforderungen an das Vakuum

Die wichtigste Eigenart des MBE-Wachstums ist der Molekültransport zum Substrat als gerichteter Strahl. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, die Vakuumbedingungen zu untersuchen, die der gerichtete Strahl benötigt.

Die mittlere freie Weglänge L und die Anzahl der Moleküle pro Volumen sind zwei eng miteinander verknüpfte Größen, die bei der Ermittlung geeigneter MBE-Bedingungen hilfreich sind. Die mittlere freie Weglänge ist als der Abstand definiert, den ein Molekül durchschnittlich zwischen zwei Kollisionen mit je einem anderen Molekül zurücklegt. Sie ergibt sich in einem idealen Gas zu

$$L = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n d^2} , \quad (2.4)$$

wenn die Gasmoleküle sich ebenso schnell bewegen wie das betrachtete Teilchen [27], was im Molekülstrahl durchaus angenommen werden kann. Hierbei ist d der Durchmesser des Moleküls und n die Konzentration der Moleküle im Vakuum. Diese ist über die Gleichung

$$n = \frac{p}{k_B T} \quad (2.5)$$

mit der Temperatur T und dem Druck p verknüpft, k_B ist die Boltzmannkonstante⁵. Durch Einsetzen in Gleichung 2.4 ergibt sich für die freie Weglänge

$$L = 3.11 \times 10^{-24} \frac{T}{pd^2} . \quad (2.6)$$

Als Grenzbedingung für die minimale freie Weglänge, bei der MBE-Wachstum möglich ist, kann man die mittlere freie Weglänge mit dem Arbeitsabstand gleichsetzen. Der Arbeitsabstand zwischen Effusions- oder Crackerzelle und Substrat bei der verwendeten Riber-Anlage beträgt 13 cm.

Werden der Molekülstrahl und der Restgas-Hintergrund der Einfachheit halber als die Mischung zweier Gase angenommen, so ergibt sich für die mittlere freie Weglänge L nach Dushman [28] zu

$$\frac{1}{L} = \sqrt{2}\pi n_b d_b^2 + \pi n_g \left(\frac{d_b + d_g}{2} \right)^2 \sqrt{1 + v_g^2/v_b^2} . \quad (2.7)$$

n_b , d_b und v_b sind Konzentration, Durchmesser und Durchschnittsgeschwindigkeit der Molekularstrahlen, während sich n_g , d_g und v_g auf das Restgas beziehen.

Da die Geschwindigkeit der Molekülstrahlen viel größer ist als die der Restgasmoleküle, kann die Gleichung vereinfacht werden zu

$$\frac{1}{L} = \sqrt{2}\pi n_b d_b^2 + \pi n_g \left(\frac{d_b + d_g}{2} \right)^2 . \quad (2.8)$$

Somit ergibt sich der zulässige Hintergrunddruck p_g aus 2.5 und 2.8 zu

$$p_g = k_B T \frac{L^{-1} - \sqrt{2}\pi n_b d_b^2}{\pi \left(\frac{d_b + d_g}{2} \right)^2} . \quad (2.9)$$

Der aufgrund der freien Weglänge erlaubte Hintergrunddruck für das Wachstum von GaAs läßt sich folgendermaßen abschätzen: Für eine Wachstumsrate von 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ beträgt der typische Molekülfluß $1 \times 10^{19} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ für Gallium [29], der Durchmesser $d_g = 2.6 \times 10^{-10} \text{m}$. Die Moleküle des Hintergrunds können in dieser Abschätzung nicht im Einzelnen berücksichtigt werden. Wird als Hintergrundgas Luft angenommen, liegt d_g bei $3.74 \times 10^{-10} \text{m}$.

Das führt auf einen erlaubten Maximaldruck von $p_g = 2.4 \times 10^{-4} \text{Torr}$.

Man sieht, daß diese Druckbedingung relativ leicht zu erfüllen ist, man also im MBE-Reaktor generell vom Strahlencharakter der Quellen ausgehen kann. Diese

⁵ $k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$

Bedingung ist für das Wachstum qualitativ hochwertiger Halbleiterschichten allerdings bei weitem nicht ausreichend. Bei diesen Hintergrunddrücken um 10^{-4} Torr würden noch zu viele Fremdatome in die Schicht eingebaut.

Als Kriterium für ausreichende Schichtqualität kann ein Einbauverhältnis von Nutz- zu Störatomen von 10^5 angesetzt werden [30]. Das bedeutet bei einer Wachstumsrate von einer Monolage pro Sekunde entsprechend die Abscheidung einer Monolage Fremdatome in 10^5 Sekunden, entsprechend knapp 28 Stunden. Die Abschätzung am GaAs-Beispiel führt zur Forderung nach einem maximalen Hintergrunddruck im unteren 10^{-9} Torr-Bereich [30].

2.2.2 Die Einbauprozesse auf dem Wafer

Aus der eben erwähnten großen freien Weglänge resultiert, daß es kaum Untersuchungen über Vorgänge, die sich zwischen den Effusionszellen und dem Substrat abspielen, gibt. Die Wahrscheinlichkeit, daß sich bereits hier verschiedene Spezies treffen und nennenswert interagieren, ist zu gering [30]. Auf der Substratoberfläche aber spielen sich verschiedene Prozesse ab. Die wichtigsten sind die *Adsorption* der Atome oder Moleküle, die auf das Substrat auftreffen, dann eventuell die *Zerlegung und Wanderung* auf der Oberfläche, bevor entweder der *Einbau ins Kristallgitter* oder die thermische *Desorption* nicht eingebauter Moleküle folgen.

Die grundlegenden Überlegungen zu diesen Vorgängen stammen von Foxon und Joyce [31, 32] und sollen hier kurz erwähnt werden, insoweit sie zum Verständnis der realisierten Strukturen notwendig sind.

Bei der Adsorption werden die physikalische Adsorption oder Physisorption und die chemische Adsorption, auch Chemisorption, unterschieden. Bei der Physisorption gibt es keinen Elektronentransfer zwischen dem adsorbierten Atom und der Oberfläche, die Kopplung erfolgt ausschließlich durch van-der-Waals Kräfte. In diesem schwach gebundenen Zustand können die Atome leichter auf der Oberfläche wandern, aber auch eine Desorption ist wahrscheinlicher als wenn, wie bei der Chemisorption, eine chemische Kopplung durch Elektronenaustausch stattgefunden hat. Von den Wachstumsparametern wie der Substrattemperatur, aber auch den eingesetzten Materialien, hängt es ab, in welchem Maß die Atome auf der Substratoberfläche einen energetisch günstigeren Platz als den Ort der Adsorption wählen können. Höhere Temperaturen ermöglichen mehr Umbauprozesse, allerdings steigt auch die Desorptionsrate an. Gerade bei konkurrierenden Spezies ist die Temperatur des Substrats von entscheidender Bedeutung. Als Beispiel sei das simultane Angebot von Arsen und Phosphor zur Bildung von InGaAsP auf InP genannt. Während die Gruppe-III-Elemente zu einem hohen Prozentsatz eingebaut werden, sind Phosphor und Arsen im Überfluß vorhanden und konkurrieren um den gleichen Gitterplatz. Da der Haftungskoeffizient von Arsen viel größer ist als der von Phosphor und somit die Phosphordesorption höher ist, ist das Wachstumsfenster, also der Bereich der möglichen Parameter, sehr eng [33].

Auch beim Wachstum von GaAs-Schichten für Quantenfilme wird die erhöhte Desorption in Kauf genommen, wie in Abschnitt A.1 kurz angesprochen wird.

Die Substrattemperatur ist auch einer der Parameter, die festlegen, in welcher

Wachstumsmode der Kristall wächst. Im meist erwünschten *Frank-van der Merwe Modus* folgt eine glatte Atomlage auf die nächste, ohne daß sich Wachstumsinseln wie beispielsweise im *Volmer-Weber Modus* bilden. Für eine Übersicht der verschiedenen Wachstumsmoden sei auf [34] verwiesen. Die realen Wachstumsbedingungen enthalten Komponenten aller Wachstumsmoden. Es gilt, durch geeignete Parameterwahl die erwünschten Moden zu bevorzugen.

2.2.3 Anlagenbeschreibung

Die verwendete MBE-Anlage vom Typ 32P wurde von der französischen Firma Riber hergestellt. Sie ist für die Epitaxie von Substraten mit einem Durchmesser von bis zu drei Zoll ($d = 3'' \approx 75 \text{ mm}$) ausgelegt. Dadurch ist sie nicht auf reine Forschungsaufgaben beschränkt, sondern eignet sich auch für industrielle Vor- und Kleinserien. Die Anlage wurde zunächst mit Arsen-Zellen als Gruppe-V-Quelle betrieben. Der Nachteil dieser Zellen war die geringe Standzeit der Arsenzellen, so daß die Anlage oft zur Befüllung geöffnet werden mußte. Aus diesem Grund, und um das Quellenmaterial Phosphor zur Verfügung zu haben, wurde die Anlage umgebaut und mit einem Arsin (AsH_3)- und Phosphin (PH_3)- Gassystem ausgestattet. Mit dieser Gasquellen-Molekularstrahlanlage war es möglich, auf Indium-Phosphid basierende Laserdioden herzustellen [33]. Durch den Einsatz von Gasquellen erhöht sich der Materialdurchsatz, deshalb war das ursprüngliche Pumpensystem der Anlage, das aus einer Ionengetter- und kleineren Kryopumpe bestand, nicht ausreichend. Daher wurde die Kryopumpe durch ein leistungsfähigeres Modell⁶ ersetzt. Die Ionengetterpumpe machte einer leistungsstarken Turbomolekularpumpe⁷ Platz. Als weitere Pumpe kann das Kühlschild betrachtet werden, mit dem die Kammer ausgekleidet ist. Es wird von flüssigem Stickstoff durchflossen.

Mit der Entwicklung von Arsen-Crackerzellen, die über ein Dosierventil verfügen, stand eine Technik zur Verfügung, die eine hohe Standzeit der Anlage ohne die Nachteile des Arsin versprach, die in Abschnitt A.1 noch angesprochen werden. Da zu diesem Zeitpunkt kein Bedarf für Phosphor mehr bestand, wurde der AsH_3/PH_3 -Gasinjektor durch einen Arsen-Cracker ersetzt.

Die schematische Darstellung der MBE in Abb. 2.2 zeigt zentral die Wachstumskammer in der Draufsicht, rechts abgehend die Turbopumpe und oben im Bild den Zellenflansch mit den Effusionszellen. Die Belegung der Zellenports wird in Abschnitt 2.2.5 angerissen werden.

In der Abbildung ragt der Manipulator von links in die Wachstumskammer. Dieser läßt sich so schwenken, daß das Substrat mittels der Transferstange auf die Substratheizung aufgesetzt werden und dann in die Wachstumsposition zu den Effusionszellen hin gedreht werden kann. Außerdem ist er mit einer Ionisationsmeßröhre ausgestattet, mit der die Materialflüsse der Zellen vor der Epitaxie kalibriert werden können. Um der Schichtdicke und -zusammensetzung eine Rotationssymmetrie zu geben, rotiert das Substrat während der Epitaxie.

⁶Modell FIRST, Hersteller: Leybold

⁷Modell TPU 1600, Hersteller: Pfeiffer Vacuum