

---

# Kapitel 1

## Einleitung

In der heutigen Industriegesellschaft sind Halbleiterlaserdioden weit verbreitet. Die wohl bekannteste Anwendung von Laserdioden ist die optische Datenspeicherung in Form der CD (*compact disc*) bzw. der DVD (*digital versatile disc*). Als Strahlungsquelle für die Schreib-/Leseeinheiten werden hier Halbleiterlaserdioden mit Emissionswellenlängen von 780 nm bzw. 650 nm verwendet. Von wirtschaftlich enormer Bedeutung ist auch die optische Nachrichtentechnik, bei der Halbleiterlaserdioden zur Übertragung von Informationen eingesetzt werden. Desweiteren kommen Halbleiterlaserdioden in einer Vielzahl weiterer Applikationen zum Einsatz wie beispielsweise in Laserdruckern, in der Meßtechnik, zum Pumpen von Festkörperlasern und in der Materialbearbeitung.

Die Vorteile von Halbleiterlaserdioden sind vielfältig, und durch die rasante technologische Entwicklung in den letzten Jahren wurden ihre Eigenschaften stetig verbessert. So besitzen Halbleiterlaserdioden den höchsten Wirkungsgrad aller Lasersysteme. Konversionseffizienzen von über 60 % wurden bereits realisiert [1]. Sie sind kostengünstig, nahezu wartungsfrei und haben eine kompakte Bauform.

Halbleiterlaserdioden mit trockenengeätzten Resonatorspiegeln verfügen über eine Reihe entscheidender Vorteile im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauelementen, deren Spiegelfacetten durch kristallorientiertes Brechen erzeugt werden. Die konventionelle Herstellungsmethode liefert zwar äußerst glatte Spiegel, weitere Prozeßschritte wie Spiegelbeschichtung und Charakterisierung müssen aber an einzelnen Barren vorgenommen werden. Dies ist mit einer Vielzahl an manuellen Arbeitsschritten verbunden, was zu verminderter Ausbeute und hohen Kosten führt. Bei Laserdioden mit trockenengeätzten Resonatorspiegeln hingegen können sämtliche Herstellungsschritte auf dem unzerlegten Wafer vorgenommen werden. Zudem bietet dieses Konzept die Möglichkeit, die Bauelemente auf Waferebene zu testen [2].

Auch in der optischen Nachrichtentechnik bietet der Einsatz der Trockenätztechnologie zahlreiche Vorteile. Wegen des hohen Kostendrucks und der stetig wachsenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit optischer Komponenten und Systeme werden zunehmend mehrere unterschiedliche Bauelemente auf einem Substrat gefertigt [3]. Eine der Schlüsseltechnologien zur Verwirklichung solcher monolithisch integrierter optischer Schaltungen ist die Herstellung von trockenengeätzten Spiegeln [2]. Durch diese können zum Beispiel sehr kurze Laserdioden [4] mit extrem hoher Bandbreite realisiert werden [5].

Herkömmliche kantenemittierende Breitstreifenlaser liefern zwar hohe optische Ausgangsleistungen, wegen der geringen lateralen Modenselektion und aufgrund von Filamentierung ist die Strahlqualität aber unbefriedigend. Halbleiterlaserdioden mit lateraler Indexführung, wie *ridge waveguide* Laser oder *burried heterostructure* Laser hingegen haben bei üblichen Betriebsbedingungen hervorragende Strahleigenschaften. Die verfügbaren Ausgangsleistungen sind aber wegen der hohen optischen Leistungsdichten an den Austrittsfacetten und wegen der Rückwirkung von Ladungsträgerinjektion und Erwärmung auf die Wellenführung auf einige hundert Milliwatt beschränkt.

Für eine Vielzahl von Applikationen, wie beispielsweise die Materialbearbeitung, sind allerdings hohe optische Ausgangsleistungen bei gleichzeitig guter Strahlqualität notwendig. Ein Konzept zur Erzeugung hoher Ausgangsleistungen bei gleichzeitig guter Strahlqualität sind Halbleiterlaserdioden mit instabilen Resonatoren. Durch das Einfügen von optischen Elementen, die eine Defokussierung der im Resonator umlaufenden Welle bewirken, kommt es zu einer Aufweitung der Wellenfront, die der Filamentbildung entgegenwirkt [6]. Da trocken-geätzte Spiegelflächen nicht an Kristallebenen hoher Symmetrie gebunden sind, ist deren laterale Form und Orientierung frei wählbar. So können durch konvex gekrümmte Spiegel Laserdioden mit instabilen Resonatoren realisiert werden. Dieses Resonatorkonzept wird sehr häufig bei Gaslasern und gepulsten Festkörperlasern angewendet [7]. Auch bei Halbleiterlasern wurde dieser Ansatz bereits erfolgreich demonstriert [8], [9].

Einen Sonderstellung nehmen kantenemittierende InGaN/AlGaN-Laserdioden ein. Die Erzeugung qualitativ hochwertiger Resonatorspiegel durch kristallorientiertes Brechen ist in diesem Materialsystem auf Substratmaterialien wie SiC und GaN beschränkt. Bei dem am häufigsten verwendeten c-orientierten Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ist es dagegen nicht möglich. Durch die Fehlorientierung von Substrat und epitakischer Schichtfolge treten an der Bruchkante Stufen auf, die die Reflektivität mindern und zusätzliche optische Verluste bewirken. Geätzte Spiegel sind hier eine vielversprechende Alternative.

## Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Herstellung und die Charakterisierung kantenemittierender Breitstreifenlaserdioden mit trocken-geätzten Resonatorspiegeln. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Implementierung eines Trockenätzprozesses, der die Verwirklichung qualitativ hochwertiger Spiegel im Materialsystem InGaAs/AlGaAs ermöglicht. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird gezeigt, daß das Konzept trocken-geätzter Laserspiegel auch auf das Materialsystem InGaN/AlGaN übertragbar ist.

Grundlegende Ätzmechanismen wie chemischer und physikalischer Abtrag und das Zusammenwirken dieser beiden Prozesse werden in Kapitel 2 vorgestellt. Daran schließt die Erläuterung verschiedener Trockenätzverfahren, wie reaktives Ionenätzen und Plasmaätzen, an. In Kapitel 3 wird auf die Besonderheiten des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ionenstrahlsystems eingegangen. Die spezifischen Vorteile von Ionenstrahlätzverfahren werden erörtert.

Kapitel 4 beschreibt die Herstellung eines Mehrlagenlacksystems, das als Ätzmaske für die Spiegelätzungen vorzugsweise eingesetzt wird. Sehr ausführlich wird in Kapitel 5 das Trockenätzen von GaAs mit Chlor untersucht. Die grundlegenden Reaktionsprozesse beim chemisch unterstützten bzw. reaktiven Ionenstrahlätzen werden präsentiert. Verschiedene Mechanismen, die das Profil der Seitenwände beeinflussen, werden diskutiert.

Das Ätzverhalten von GaN ist Gegenstand von Kapitel 6. Auch hier wird vor allem auf die Herstellung senkrechter Seitenflanken durch chemisch unterstütztes Ionenstrahlätzen eingegangen. Die materialspezifischen Eigenheiten von GaN werden erläutert.

Die Funktionsweise und die technologische Realisierung gewinngeführter Laserdioden im Materialsystem InGaAs/AlGaAs werden in Kapitel 7 vorgestellt. Die verschiedenen Prozessschritte bei der Herstellung solcher Bauelemente werden detailliert beschrieben.

Kapitel 8 beinhaltet die Charakterisierung von Breitstreifenlaserdioden mit trockenengeätzten Spiegeln. Schwellstrom und Effizienz dieser Bauelemente sind vergleichbar mit denen konventionell hergestellter Breitstreifenlaser. Desweiteren werden exemplarisch zwei Beispiele für die erweiterte Funktionalität, die durch den Einsatz von Trockenätztechniken in der Optoelektronik möglich sind, aufgezeigt. So kann durch die monolithische Integration eines Diodenlasers und einer Photodiode die optische Ausgangsleistung des Lasers im Betrieb überwacht werden. Als zweites Beispiel wird eine Laserdiode mit externem Spiegel vorgestellt.

Halbleiterlaserdioden mit gekrümmten Auskoppelspiegeln sind Inhalt von Kapitel 9. Mit Hilfe konkav gekrümmter Spiegel werden instabile Resonatoren realisiert, die zu einer Verbesserung des Abstrahlverhaltens der Bauelemente führen. Der Beschreibung der theoretischen Grundlagen folgt die Präsentation einiger Meßergebnisse.

Auch bei der Herstellung von Laserdioden im Materialsystem InGaN/AlGaN kommt dem Trockenätzen eine entscheidende Bedeutung zu. In Kapitel 10 wird anhand eines optisch gepumpten Lasers gezeigt, daß die Qualität der geätzten Facetten auch in diesem Materialsystem so gut ist, daß sie als Resonatorspiegel eingesetzt werden können.

## Kapitel 2

# Grundlagen des Trockenätzens

Das Ätzen ist ein wesentlicher Technologieschritt bei der Prozessierung von Halbleitern [10]. Neben den häufig verwendeten naßchemischen Verfahren, die sich durch niedrige Kosten, hohe Ätzraten, geringe Materialschädigung und hohe Selektivitäten auszeichnen [11], werden bei der Bearbeitung von Halbleitern vermehrt Trockenätzverfahren eingesetzt. Außer Vorteilen wie gute Automatisierbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit bietet die Trockenätztechnologie die Möglichkeit, Material anisotrop zu entfernen. Dies macht sie bei der Herstellung von Submikrometer-Strukturen unverzichtbar. Desweiteren ermöglichen Trockenätzverfahren die Strukturierung von chemisch stabilen Materialien wie Diamant oder GaN, die naßchemisch gar nicht bzw. nur unzureichend geätzt werden können.

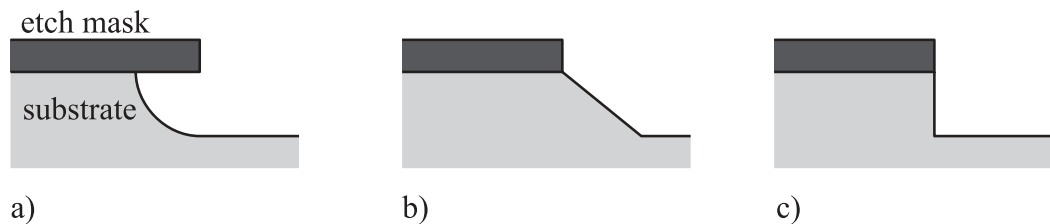


Abbildung 2.1: Querschnitt durch ein a) isotropes, b) kristallorientiertes und c) anisotropes Ätzprofil.

Abbildung 2.1 zeigt schematisch verschiedene Profile, welche durch unterschiedliche Ätzverfahren erzeugt wurden. Isotroper Materialabtrag, wie in a) dargestellt, ist für chemisches Ätzen typisch. Der Ätzangriff erfolgt sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung und bewirkt eine Unterätzung der Maske. Häufig wird beim chemischen Ätzen auch ein bevorzugter Materialabtrag in einer bestimmten Kristallrichtung, wie in b) angedeutet, beobachtet, während andere Kristallrichtungen nur sehr langsam oder gar nicht geätzt werden. Auch die Dotierung von Halbleitern zeigt oft einen Einfluß auf die Abtragsrate. Chemisches Ätzen kann sowohl in wässrigen Lösungen (naßchemisch) als auch in einer reaktiven Gasatmosphäre (trockenchemisch) erfolgen.

Anisotropes Ätzen, bei dem der vertikale Abtrag schneller erfolgt als der horizontale, erfordert spezielle Trockenätzverfahren. Abbildung 2.1 c) zeigt ein völlig anisotropes Profil. Die Seitenwand ist senkrecht, ein horizontaler Ätzangriff hat nicht stattgefunden, so daß die Struktur der Maske exakt in das darunterliegende Substrat übertragen wurde. Solche Profile eignen sich in hervorragender Weise zur Verwirklichung von Resonatorspiegeln für Laserdioden, deren Herstellung Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist.

Durch eine geeignete Wahl der Reaktionsbedingungen kann beim Trockenätzen neben der Flankenform auch die Abtragsrate verschiedener Materialien stark beeinflußt werden, so daß dieses äußerst flexible Verfahren sehr häufig bei der Herstellung elektronischer und optischer Halbleiterbauelemente eingesetzt wird.

## 2.1 Das Plasma

Ein Plasma ist ein teilweise ionisiertes Gas und kann in drei Teilsysteme, Elektronen, Ionen und Neutralgas unterteilt werden [12]. Technisch erzeugt werden Plasmen in den meisten Fällen durch das Anlegen hoher elektrischer Feldstärken an ein Gas. In diesem Fall spricht man von Gasentladung. Daneben besteht auch die Möglichkeit, durch Zuführen von thermischer Energie eine Ionisierung zu erreichen.

Charakteristische Größen eines Plasmas sind die Dichte  $n_x$  und die Temperatur  $T_x$  der einzelnen Teilsysteme. Während bei thermisch erzeugten Plasmen die Teilsysteme die gleiche Temperatur  $T_x$  und damit die gleiche mittlere kinetische Energie  $kT_x$  aufweisen, sind Niederdruck-Gasentladungen, wie sie für Ätzanwendungen eingesetzt werden, durch stark unterschiedliche Temperaturen gekennzeichnet. Aufgrund ihrer geringen Masse werden Elektronen durch elektrische Felder wesentlich stärker beschleunigt und nehmen folglich mehr Energie auf. Typische Energien für Elektronen in Niederdruckplasmen liegen im Bereich 2–8 eV, was Temperaturen  $T_e$  von etwa 20000 bis 80000 K [13] entspricht. Demgegenüber weichen die Temperaturen des Neutralgases  $T_g$  und die der Ionen  $T_i$  nur geringfügig von der Umgebungstemperatur ab, weshalb man von kalten Plasmen spricht [14]. Der Energietransfer durch elastische Stöße zwischen den Elektronen und den Ionen bzw. Neutralteilchen ist aufgrund des großen Massenunterschieds und der kleinen Stoßwahrscheinlichkeit in Niederdruckplasmen gering.

Inelastische Stöße zwischen Elektronen und dem Neutralgas führen zur Bildung von Ionen und reaktiven Teilchen und gleichen damit die Verluste durch Reaktion und Rekombination aus. Die wichtigsten dieser Mechanismen werden nun am Beispiel von Chlor vorgestellt. Alle Prozesse setzen eine gewisse Schwellenergie des Elektrons voraus [15],[16].

- Ionisierung

Der für die Erzeugung von Elektronen und Ionen wichtigste Prozeß ist die Ionisierung durch Elektronenstoß. Die Ionisierungsenergie für Chlor beträgt 13,01 eV.



- Elektronenstoßdissoziation

Durch die Zerlegung molekularer Gase entstehen meist hoch reaktive Fragmente. Diese Spezies sind bei vielen Ätzprozessen von entscheidender Bedeutung, da sie chemisch wesentlich reaktiver sind als ihr Muttergas. Um eine Dissoziation von  $\text{Cl}_2$  zu erreichen, muß dem Molekül mindestens die Bindungsenergie von 2,475 eV zugeführt werden.



- Anregung und Relaxation

Durch den Zusammenstoß eines Elektrons mit einem Atom kann ein Elektron einer inneren Schale auf eine höhere Schale angehoben werden. Bei molekularen Gasen können zusätzlich Schwingungen angeregt werden. Die Relaxation aus dem angeregten Zustand erfolgt unter Emission von elektromagnetischer Strahlung. Dieser Prozeß ist für das Leuchten im Plasma verantwortlich.

