

1 Einleitung

Zahlreichen Studien zufolge besitzt die Photonik ein Entwicklungspotenzial, das mit dem der Elektronik im vergangenen Jahrhundert vergleichbar ist [1],[2],[3]. In Bereichen wie der optischen Datenübertragung und -speicherung hat sich der LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) als hochwertige Photonenquelle bewährt und steht inzwischen als Massenprodukt zur Verfügung. Als Beispiele sind Glasfasernetze, CD- und DVD-Spieler zu nennen. Laser haben aber auch in andere Bereiche längst Einzug gehalten: Aus der Drucktechnik, Medizintechnik, Materialbearbeitung, Messtechnik, Spektroskopie, Meteorologie und Holographie ist der Laser nicht mehr wegzudenken. Desweiteren stellen Laser Schlüsselkomponenten für Projektionsanwendungen, in der Sensorik und bei der Steuerung von Fertigungsprozessen dar. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl weiterer Anwendungen, insbesondere im Bereich der Wissenschaft.

Heute stehen für unterschiedlichste Anwendungen verschiedene Lasertypen wie Halbleiterlaser, Gaslaser, Festkörperlaser und Farbstofflaser zur Verfügung. Allen Lasern gemein ist die Aussendung von Strahlung, die gebündelt, monochromatisch (Licht einer Wellenlänge, „Farbe“) und zeitlich kohärent (Lichtwellenzüge mit gleicher Frequenz und Phasenbeziehung) ist. Die Güte der Bündelung der Laserstrahlung wird auch als Strahlqualität oder räumliche Kohärenz bezeichnet. Für die meisten Anwendungen ist die Strahlqualität des Lasers neben der zur Verfügung stehenden Leistung ein wichtiges Kriterium. Weitere Kriterien für ein Lasersystem sind sein Preis, aber auch seine Effizienz. Üblicherweise besitzen Gaslaser eine gute Strahlqualität, sind jedoch groß, ineffizient und wartungsintensiv. Halbleiterlaser dagegen sind kompakt, vielseitig, vergleichsweise günstig, effizient und langlebig, zeigen jedoch nur bei kleinen Leistungen gute Strahlqualitäten. Die Strahlqualität von Festkörperlaser ist hingegen üblicherweise auch bei höheren Leistungen gut, in der Wahl der Emissionswellenlänge ist man jedoch durch diskrete atomare Übergänge festgelegt.

Der Halbleiter-Scheibenlaser, auch VECSEL (*Vertical External Cavity Surface Emitting Laser*) genannt, nimmt eine Zwitterstellung zwischen Halbleiterlaser und Festkörperlaser ein [4],[5]. Der Systemaufbau ähnelt Festkörper-Scheibenlasern, als Gewinnmedium wird jedoch ein Halbleiter verwendet. Damit besitzt der Halbleiter-Scheibenlaser sowohl Eigenschaften des Festkörperlaser, als auch Eigenschaften des Halbleiterlaser: gute Strahlqualität auch bei hohen Ausgangsleistungen und eine weitgehend freie Wahl der Emissionswellenlänge.

Als einziger halbleiterbasierter Laser besitzt der Halbleiter-Scheibenlaser einen natürlichen externen Resonator. Werden in diesen Resonator zusätzliche optische Elemente, beispielsweise Etalons oder nichtlineare Kristalle, eingefügt, können die Eigenschaften des Laserstrahls gezielt modifiziert werden. Außerdem kann die Emissionswellenlänge durch einen nichtlinearen Konversionsprozess effizient halbiert werden. Dieser Prozess wird auch als Frequenzverdopplung bezeichnet. Darüber hinaus kann der Laser durch passive Modenkopplung mit einem sättigbaren Halbleiterabsorber zum Pulsieren gebracht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein auf dem etablierten Materialsystem InGaAs/GaAs basierendes Halbleiter-Scheibenlaser-System aufgebaut und untersucht. Dabei konnten Ausgangsleistungen von bis zu 3,6 W erzielt werden. Die Emissionswellenlänge dieser Scheibenlaser liegt bei knapp unter 1000 nm. Anschließend wurde das Konzept auf das Materialsystem GaAsSb/GaAs übertragen und damit die weltweit ersten im Wellenlängenbereich um 1200 nm emittierenden Halbleiter-Scheibenlaser demonstriert. Schwerpunkte der Arbeit liegen im Design der Schichtstrukturen, den technologischen Prozessen und in der Aufbau- und Verbindungstechnik zur thermisch optimierten Montage der Laserchips.

Als Anwendungsbeispiel wird die Frequenzverdopplung beim Halbleiter-Scheibenlaser gezeigt. Damit lässt sich die infrarote Laserstrahlung des Scheibenlasers effizient in sichtbare Laserstrahlung umwandeln. Es konnten blau, blau-grün, gelb und orange emittierende Scheibenlaser hergestellt werden. Einen Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten bietet die Demonstration mittels sättigbaren Absorbern passiv modengekoppelten Halbleiter-Scheibenlasern, die typischerweise bei Wiederholraten um 2 Gigahertz Pulslängen von einigen Pikosekunden liefern. Dabei wurden Durchschnittsleistungen von mehreren 100 mW erreicht.

2 Prinzip des Halbleiter-Scheibenlasers

In diesem Kapitel werden der prinzipielle Aufbau und die allgemeinen Eigenschaften eines optisch gepumpten Halbleiter-Scheibenlasers beschrieben. Darüber hinaus wird ein Vergleich mit Festkörper-Scheibenlasern und elektrisch gepumpten oberflächenemittierenden Halbleiterlasern (VCSEL, *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) vorgenommen, sowie die wesentlichen Unterschiede herausgearbeitet. Der Halbleiter-Scheibenlaser wird auch VECSEL (*Vertical External Cavity Surface Emitting Laser*) oder OPSL (*Optically Pumped Semiconductor Laser*) genannt [5].

2.1 Aufbau eines Scheibenlasers

Der prinzipielle Aufbau eines Scheibenlasers ist in Abbildung 1 dargestellt. Das laseraktive Medium wird optisch durch einen Pumplaser angeregt, dessen Wellenlänge unter der des Scheibenlasers liegt. Im laseraktiven Medium (Scheibe) wird die Pumplaserstrahlung absorbiert, d.h. die Photonen des Pumplaserstrahls generieren dort Ladungsträger. Die stimulierte Rekombination dieser Ladungsträger im Laserresonator führt zur Ausbildung der Lasermode.

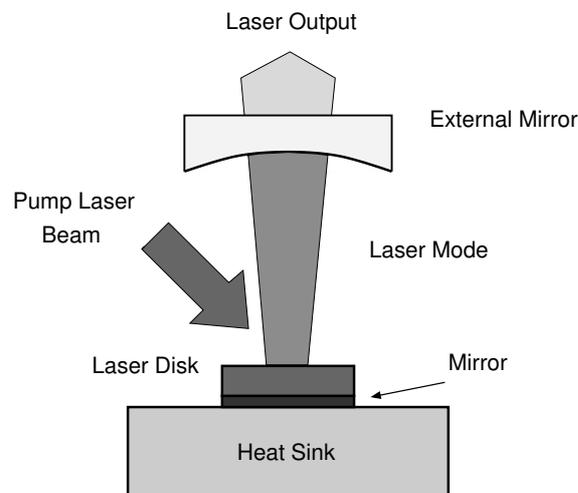


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Scheibenlasers.

Das laseraktive Medium besteht im Falle eines Halbleiter-Scheibenlasers aus einer Vielzahl aufeinanderfolgender, unterschiedlich zusammengesetzter, undotierter Halbleiterschichten. Darin ist eine Sequenz äquidistant angeordneter Quantenfilme, die zwischen Absorptionsschichten eingebettet sind, enthalten, sowie eine Folge alternierender Halbleiterschichten, die einen hochreflektierenden Bragg-Reflektor bilden. Dieser wird durch AlAs/GaAs-Vielfachschichten, meist mit einer optischen Dicke von $\lambda/4$, realisiert. In Kapitel 3 wird detailliert auf die Struktur und in Kapitel 5.2 auf die Herstellung der Halbleiter-Schichtfolge eingegangen.

Beim Festkörper-Scheibenlaser besteht das laseraktive Medium aus einem dotierten Festkörperkristall. Bekannte Vertreter dieser Materialfamilie sind dotierte Yttrium-Aluminium-Granate (YAG, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) und Yttrium Vanadate (YVO_4). Als Dotierstoffe dienen meist Neodym und Ytterbium. Man kennzeichnet solche Laserkristalle mit Nd:YAG oder Yb:YVO₄. Der Laserresonator wird aus einem externen konkaven Spiegel und einem ebenen Bragg-Spiegel gebildet, der sich zwischen dem laseraktiven Medium und der Wärmesenke befindet. Beide Spiegel werden beim Festkörper-Scheibenlaser durch elektrische Vielfachschichten realisiert.

2.2 Eigenschaften

Bei richtiger Dimensionierung und Justage des stabilen sphärisch-planaren Resonators wird die Ausbildung der transversalen Grundmode erreicht, die sich durch ein ideales Strahlprofil auszeichnet. Das Strahlprofil bestimmt die Strahlqualität des Laserstrahls und damit die Fokussier- und Kollimierbarkeit, sowie die verfügbare Leistungsdichte im Strahl. In Kapitel 4 werden Scheibenlaserresonator und Strahlausbreitung behandelt.

Durch den relativ geringen Umlaufgewinn und die hohen Spiegelreflektivitäten besitzt der Halbleiter-Scheibenlaser eine enorme Leistungsüberhöhung im Resonator. Er verfügt als einziger Halbleiterlaser über einen natürlichen externen Resonator. In diesen können zusätzliche optische Elemente, z.B. Etalons oder doppelbrechende Filter, eingebracht werden, die die spektralen Eigenschaften gezielt beeinflussen oder, im Falle nichtlinearer Kristalle, eine effektive nichtlineare Frequenzkonversion (Frequenzverdopplung) ermöglichen. In Kapitel 7 wird der Prozess der Frequenzverdopplung des Halbleiter-Scheibenlaser behandelt.

2.3 Vergleich mit Festkörper-Scheibenlasern

Festkörper-Scheibenlaser [6] werden, wie der Halbleiter-Scheibenlaser, optisch gepumpt. Durch die Scheibengeometrie kann die unvermeidliche Verlustwärme homogen abgeführt werden, was eine thermische Linse im laseraktiven Material verhindert, die die Strahlqualität beeinträchtigt. Vergleicht man die Eigenschaften eines Festkörper-Scheibenlasers mit denen eines Halbleiter-Scheibenlasers, ergeben sich für den Halbleiter im Wesentlichen folgende Vorteile:

- Die Laserwellenlänge ist gezielt einstellbar
- Ein großer Absorptionskoeffizient
- Eine große spektrale Absorptionsbandbreite
- Preisgünstige Herstellbarkeit als Massenprodukt

Wie bei allen Halbleiterlasern kann beim Halbleiter-Scheibenlaser die Emissionswellenlänge durch das Design der Quantenfilme epitaktisch in einem weiten Bereich eingestellt

werden. Beim Festkörper-Scheibenlaser hingegen ist man auf die atomaren Übergänge der verwendeten seltenen Erden beschränkt. Der Absorptionskoeffizient der Fundamentalabsorption des Halbleiters ist wesentlich größer als der des Festkörpers. Beim Festkörper-Scheibenlaser ist daher zum Erreichen einer ausreichend hohen Absorptionseffizienz ein aufwändiger Mehrfachdurchgang des Pumplichts notwendig. Die spektrale Absorptionsbandbreite beim Halbleiter ist epitaktisch einstellbar und vor allem wesentlich größer als beim Festkörpermaterial. Daher spielen die genaue spektrale Lage des Emissionsmaximums und die spektrale Bandbreite des Pumplasers beim Halbleiter-Scheibenlaser eine geringere Rolle. Wie in der Halbleitertechnik üblich, lassen sich auch Scheibenlaser-Halbleiterstrukturen bei industrieller Massenfertigung prinzipiell preiswert flächig herstellen.

2.4 Vergleich mit VCSEL

Gegenüber dem konventionellen, elektrisch gepumpten, vertikal emittierenden Halbleiterlaser, dem VCSEL, zeichnet sich der Halbleiter-Scheibenlaser vor allem durch folgende Eigenschaften aus:

- Eine wesentlich höhere Ausgangsleistung durch Flächenskalierbarkeit
- Ein externer Resonator

Beim VCSEL kann die Ausgangsleistung durch Flächenskalierung nicht ohne Einbußen in Bezug auf die Strahlqualität erhöht werden. Eine homogene Injektion von Ladungsträgern in den aktiven Bereich ist für aktive Durchmesser oberhalb von etwa $100\ \mu\text{m}$ kaum noch möglich, da entsprechende transparente Kontakte technologisch nicht realisierbar sind [7]. Beim optischen Pumpen hingegen können mit geeigneten Pumpquellen auch große Flächen homogen gepumpt werden. Die Strahlqualität bleibt dabei hervorragend, da bei entsprechender Dimensionierung des Resonators nur die räumliche Grundmode existiert.