

1 Einleitung

Die Photonik wird als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts angesehen. Schon jetzt wächst der weltweite Photonikmarkt um durchschnittlich 7,5 % pro Jahr – doppelt so stark wie das weltweite Bruttoinlandsprodukt [1]. Ein Verzicht auf das Werkzeug „Licht“ ist schon heute in der Medizintechnik, der Kommunikationstechnik oder der Fertigungstechnik nicht mehr vorstellbar. Die treibende Kraft hinter diesem Entwicklungsmotor ist der Laser. Dieses Konzept ermöglicht es, Licht mit unübertroffenen hohen Wirkungsgraden und einzigartigen Eigenschaften zu erzeugen. Seit der ersten experimentellen Demonstration des Lasers von Theodor Maiman vor über 50 Jahren [2] wurde das Konzept auf vielfältige Weise umgesetzt und auf verschiedene Anwendungen angepasst. Hieraus resultiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Laserklassen. Eine noch relativ junge Klasse sind die in dieser Arbeit untersuchten Halbleiter-Scheibenlaser, auch Vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) genannt.

Das Grundkonzept des VECSELS wurde erstmals 1997 von Kuznetsov et al. demonstriert [3]. Die Kombination der Ansätze zweier unterschiedlicher Lasertypen – der Oberflächen emittierenden Quantenfilmlaser (Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL)) [4], [5] und der Scheibenlaser (Solid-State-Disk Laser) [6], [7] – ergibt ein System mit variabler Emissionswellenlänge, hoher Ausgangsleistung und guter Strahlqualität. Die Verknüpfung dieser Eigenschaften macht den VECSEL einzigartig. Bis heute wurden VECSEL in einem Emissionsbereich von 615 nm [8], [9] bis über 5 μm [10] demonstriert. Die Erweiterung der Laserkavität um nichtlineare Komponenten zur Frequenzmischung ermöglicht eine Vergrößerung des Emissionsbereichs vom Ultra-Violetten (338 nm) [11] bis in den Terahertz-Bereich (300 μm) [12]. Zudem kann der VECSEL mit einem sättigbaren Absorber-Spiegel (engl. Semiconductor Saturable Absorber Mirror) innerhalb der Kavität der VECSEL modengekoppelt werden. Dies ermöglicht die Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen mit hohen Ausgangsleistungen [13], [14] und hohen Repetitionsraten [15]. Darüber hinaus wurde erst

kürzlich der Pulsbetrieb ohne zusätzliche Komponenten innerhalb der Kavität demonstriert [16], [17]. Abseits der Modenkopplung können VECSEL über Filter in den Einfrequenz-Betrieb gebracht werden [18], [19]. Zusammen mit den hohen Ausgangsleistungen und der guten Strahlqualität eröffnen die verschiedenen Betriebsarten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten [20]–[23]. Die Familie der VECSEL könnte längerfristig zahlreiche bestehende Lasertypen durch ein einzelnes System ersetzen. Auf diese Weise werden viele Konzepte und Herstellungstechniken unabhängig von der späteren Anwendung und somit mehrfach verwendbar. Das Wärmemanagement ist eines dieser zentralen unabhängigen Konzepte mit weitreichendem Einfluss.

In allen Systemen limitiert die Erwärmung im VECSEL-Chip die maximale Ausgangsleistung, da das Halbleitersystem empfindlich auf Temperaturerhöhungen reagiert. Folglich ist zum Erreichen hoher Ausgangsleistungen ein gutes thermisches Management unumgänglich. In dieser Arbeit werden die Grundlagen für die Berechnung und Auslegung von effektiven Kühlsystemen vermittelt und ein thermisches Modell für einen VECSEL erstellt. Das Modell wird mit experimentellen Daten überprüft und das Wärmemanagement entscheidend verbessert. Diese Verbesserungen ermöglichen es erstmals, die Ausgangsleistung eines VECSELs auf über 100 W zu steigern [24].

Für das Verständnis der Modelle und der experimentellen Messtechniken sind Grundlagen aus verschiedenen Teilbereichen erforderlich. In der Einführung wird zunächst das Grundkonzept des Lasers und darauf aufbauend die zentrale Komponente – der VECSEL – näher erläutert (Kap. 2). In diesem Zusammenhang werden ebenfalls die unterschiedlichen Wärmemanagement-Konzepte vorgestellt, die bei der Kühlung von VECSELn zum Einsatz kommen. Die Berechnung dieser Kühlkonzepte stellt neben dem Laser einen weiteren wichtigen Teilbereich dar. Die hierfür erforderlichen Grundlagen und Gleichungen sind unabhängig vom eigentlichen Laserbetrieb und werden in dem sich anschließenden Kapitel zusammengefasst (Kap. 3). Dies beinhaltet zudem die unterschiedlichen Ansätze mit denen numerische Modelle berechnet und analytische Modelle aufgestellt werden können. Der Vergleich dieser theoretischen Modelle mit Messergebnissen bildet einen der zentralen Punkte dieser Arbeit. Die experimentelle Umsetzung erfordert einen Laseraufbau mit Kühlung und die Anwendung mehrerer Messmethoden. Die Vorstellung dieser experimentellen Methoden reiht sich in die Folge der Grundlagenkapitel ein (Kap. 4).

Alle Ergebnisse dieser Arbeit sind in einem Kapitel gebündelt (Kap. 5). Dies beginnt mit der thermischen Berechnung des VECSELs und einem analyti-

schen Modell für den Wärmefluss. Über das Modell hinaus werden ebenfalls die Grundlagen einer effektiven Kühlung vermittelt (Kap. 5.1). Die bestehenden Messmethoden für den experimentellen Vergleich mit den theoretischen Modellen mussten zum Teil neu entwickelt und verbessert werden (Kap. 5.2–5.3). Der Ermittlung thermischer Widerstände kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu (Kap. 5.3). Innerhalb dieser Arbeit wird eine neue Messmethode für die Bestimmung thermischer Widerstände von VECSELn präsentiert. Die neuen Techniken ermöglichen einen präzisen Vergleich zwischen Wärmeflussmodellen und experimentell ermittelten thermischen Widerständen (Kap. 5.4). Die thermischen Berechnungen bestätigen die Verbesserung der Kühlung, mit denen die Ausgangsleistung erstmals auf über 100 W vergrößert werden konnte. Die genaue Verknüpfung zwischen erreichbarer Ausgangsleistung und thermischem Widerstand ist allerdings noch weitgehend unbekannt und kann experimentell nur schwierig bestimmt werden. Mithilfe von neu entwickelten Ansätzen wird versucht, diesen Zusammenhang näher zu beleuchten (Kap. 5.5). Anschließend sind die wesentlichen Ergebnisse noch einmal zusammengefasst (Kap. 6). Anhand der thermischen Modelle können zudem die Schwachstellen des Wärmemanagements bestimmt und die Auswirkung von Konfigurationsänderungen berechnet werden. Die Erörterung dieser Verbesserungen sowie ihre Auswirkungen auf die Ausgangsleistung bilden den Abschluss dieser Arbeit (Kap. 7).

Die Resultate dieser Arbeit zeigen, dass die Entwicklung von VECSELn bereits große Fortschritte gemacht hat, aber noch am Anfang eines langen Weges steht. Das Wärmemanagement ist auf diesem Weg ein wichtiger Begleiter und wird in zukünftigen Konzepten einen immer größeren Stellenwert einnehmen.





2 Vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL)

Der in dieser Arbeit untersuchte Vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) ist ein aus mehreren Einzelkomponenten bestehendes System. Erst das Zusammenwirken dieser Komponenten ergibt die besonderen Eigenschaften dieses Lasers. Für das Verständnis der Zusammenhänge ist es jedoch wichtig, zunächst das Konzept, das allen Lasern zugrunde liegt, zu verstehen. Auf dieser Basis wird dann der VECSEL mit seinen Einzelkomponenten und den daraus resultierenden Eigenschaften vorgestellt.

Die im vorherigen Absatz verwendete Abkürzung „Laser“ steht für die englische Bezeichnung Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Die stimulierte Emission von Strahlung ist hierbei der entscheidende Prozess, welcher die einzigartigen Eigenschaften des Lasers und dessen emittierter Strahlung bestimmt. In einem geeigneten Verstärkungsmedium stimulieren Photonen die Erzeugung neuer Photonen. Bei diesem Prozess werden die Eigenschaften des anregenden Photons kopiert. In der Wellenbetrachtung entstehen zwei Wellen mit der gleichen Frequenz und Phasenlage. Die Energie für diesen Prozess wird entweder durch elektrisches Pumpen oder durch optisches Pumpen mit Licht niedriger Qualität bereitgestellt. Um den Effekt der Verstärkung zu vergrößern, wird das Verstärkungsmedium von Spiegeln umschlossen. Durch diese werden die Photonen (Wellen) nach Verlassen des Verstärkungsmediums reflektiert. Durch eine geeignete Krümmung der Spiegel wird das Licht immer wieder in sich selbst zurückgeworfen und es bildet sich ein stabiler Strahlverlauf, der Laserstrahl.

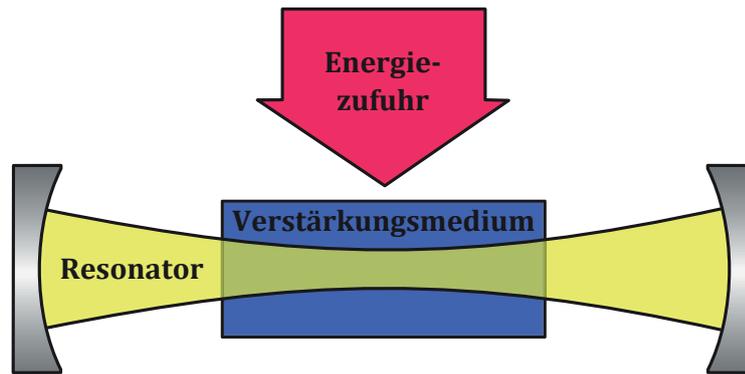


Abbildung 2.1: Grundkomponenten eines Lasers: Verstärkungsmedium, Resonator und Energiezufuhr (Pumpquelle).

Zusammengefasst ergibt sich das für alle Laser gültige Schema in Abbildung 2.1. Ein Laser besteht demnach aus den drei Grundkomponenten:

1. Verstärkungsmedium
2. Energiezufuhr (Pumpquelle)
3. Resonator

Die Gliederung der folgenden Unterkapitel orientiert sich an der Aufteilung des VECSELs in diese drei Grundkomponenten. Die Beschreibung beginnt mit der wichtigsten Komponente, dem optisch gepumpten Verstärkungsmedium – dem VECSEL-Chip. Das Gesamtkonzept VECSEL besteht jedoch aus mehr, als den für die Verstärkung benötigten Komponenten. Während der Laseremission wird ein Teil der Leistung in Wärme umgesetzt. Die effiziente Kühlung – das Wärmemanagement – ist direkt in das VECSEL-Konzept integriert. Die Erklärung unterschiedlicher Kühlungskonzepte folgt in Kapitel 2.2. Im Anschluss wird auf den speziellen Herstellungsprozess der Chips eingegangen, der für das Wärmemanagement entscheidend ist. Für einen funktionsfähigen Laser ist zudem eine zusätzliche Grundkomponente notwendig, der Resonator. Im letzten Kapitel wird der in dieser Arbeit verwendete Resonator vorgestellt und seine Eigenschaften zusammengefasst.

2.1 Das Verstärkungselement

Im Jahr 1960, dem Geburtsjahr des Lasers, war der Mangel an bekannten Materialien, die sich für die Verstärkung von Photonen eignen, die größte Hürde



für die experimentelle Realisierung eines Lasers. Maiman verwendete einen mit Cr^{3+} -Ionen dotierten Al_2O_3 Kristall (Rubin) der über Blitzlampen gepumpt wurde [2]. Die Cr^{3+} -Ionen werden durch Absorption des Lichtes der Blitzlampen in einen höheren energetischen Zustand gehoben, in dem sie für längere Zeit verweilen können. Bei Verlassen dieses angeregten Zustandes geben die Ladungsträger ihre Energie in Form von Strahlung ab – der spontanen Emission. Durch hohe Anregungsdichten kann auf Grund der langen Lebensdauer ein Ladungsträgerüberschuss gegenüber dem Grundzustand erreicht werden. Diese Umverteilung nennt man Besetzungsinversion. Der Überschuss an Ladungsträgern ist die Grundbedingung für die Verstärkung von Licht (stimulierten Emission).

Mehr als 50 Jahre nach der Entwicklung des ersten Lasers steht heute ein breites Spektrum an Materialien zur Verfügung, die bei optischer oder elektrischer Anregung Licht verstärken und sich somit als laseraktive Materialien eignen. Der Großteil dieser Entwicklung kann auf Verbesserungen im Wachstum von kristallinen Strukturen unter kontrollierten Laborbedingungen zurückgeführt werden. Durch diese Prozessoptimierungen lassen sich mittlerweile Halbleiter mit kontrollierten Materialzusammensetzungen, nahezu perfekter Kristallqualität und auf der Nanometer-Skala definierten Schichtdicken herstellen. Die meisten der heute verwendeten optischen Komponenten basieren auf III/V-Halbleitern. Über die Verhältnisse der Materialzusammensetzung dieser Halbleiter kann nicht nur die Lichtabsorption beeinflusst, sondern auch die Emission spektral verschoben werden. Für eine Kombination unterschiedlicher Halbleiter muss die Gitterkonstante der Kristalle jedoch nahezu identisch sein. Die Gitterkonstante wird maßgeblich durch das Trägersubstrat festgelegt. Dies bestimmt somit auch die Halbleiter, welche auf das Substrat gewachsen werden können. Beim Materialsystem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, das annähernd die gleiche Gitterkonstante wie GaAs besitzt, kann mit steigendem Aluminiumanteil die Bandkante von 1,43 eV bis ~ 2 eV eingestellt werden [25]. Ein anderes verwendetes System ist $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ [26]. Dieses lässt sich durch Anpassung der Indium- und Phosphorkonzentrationen gitterangepasst auf GaAs mit einer Bandkante zwischen 1,4 eV und 1,9 eV wachsen [27]. Ist die Bedingung der Gitteranpassung nicht erfüllt, treten schon bei geringen Schichtdicken Verspannungen im Kristall auf, die zu Defekten innerhalb der Schicht führen. Die Variationsmöglichkeiten vieler anderer Halbleiter werden hierdurch stark eingeschränkt. Abhilfe schafft der Quantenfilm (engl. Quantum Well, QW), eine Schicht, die wenige

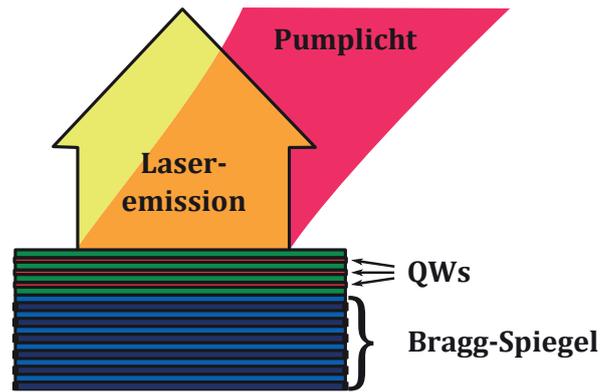


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines VECSELs bestehend aus der Verstärkungs-Region mit den Quantenfilmen (QWs) und dem Bragg-Spiegel.

Nanometer dick ist. Dies ist so dünn, dass die Schicht auch gitterfehlangepasst ohne Defekte gewachsen werden kann. Die in den QWs eingefangenen Ladungsträger können spontan und stimuliert Photonen emittieren und eignen sich daher hervorragend für die Verstärkung von Licht.

Ein VECSEL-Chip besteht aus einem Halbleiterschichtstapel, der mehrere Quantenfilme enthält (Abb. 2.2). Zusätzlich beinhaltet dieser Schichtstapel einen Bragg-Reflektor – einen aus mehreren alternierenden Halbleiterschichten bestehenden hochreflektierenden Spiegel. Der Chip stellt somit nicht nur die Verstärkung zur Verfügung, sondern bildet auch einen Teil des Laserresonators. Das Gesamtsystem erhält seine besonderen Eigenschaften aus der Kopplung dieser beiden Bereiche [3], [28]. Die zur Verstärkung notwendige Energie wird durch optisches Pumpen bereitgestellt. Im Folgenden werden die grundlegenden Eigenschaften der Einzelkomponenten – Quantenfilm und Bragg-Spiegel – und ihr Zusammenwirken im Gesamtsystem erklärt.

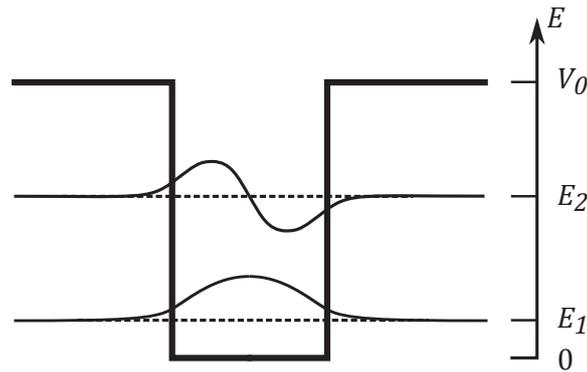


Abbildung 2.3: Stabile Zustände innerhalb eines Potenzialtopfes mit der endlichen Höhe V_0 . Die ersten beiden Zustände mit den dazugehörigen Wellenfunktionen sind an den Energien E_1 und E_2 eingezeichnet.

2.1.1 Quantenfilme

Die Ladungsträger in einem Halbleiter können auch als Wellen betrachtet werden. Für Elektronen und Löcher ergeben sich für die „de Broglie Wellenlänge“ Werte im Bereich von wenigen zehn Nanometern. Für freie Elektronen ist die Wellenlänge gegeben durch

$$\lambda_{deB} = \frac{h}{\sqrt{2mk_B T}} \quad (2.1)$$

mit der Temperatur T , der Boltzmannkonstante k_B und der Masse m [29]. Für das GaAs-System ergibt sich mit der effektiven Masse der Elektronen $0,067m_0$ bei 300 K die „de Broglie Wellenlänge“ zu 42 nm. Strukturen die kleiner als diese Wellenlänge sind, weisen eine starke Wechselwirkung mit den Ladungsträgern auf. Genau dieser Effekt wird im Quantenfilm ausgenutzt, um die Emissionseigenschaften zu beeinflussen. Der Film besteht aus einem Halbleiter, dessen Bandkante kleiner ist als die des ihn umgebenden Materials (Barriere). Die hierdurch gebildete Struktur wird auch als Potenzialtopf bezeichnet (Abb. 2.3). Innerhalb dieses Topfes treten für die Teilchen stabile Zustände auf, die über die Lösung der Schrödingergleichung berechnet werden können [30]. Die Lösungen sind stehende Wellen innerhalb des Potenzialtopfes. Für einen unendlich hohen Potenzialtopf ergeben sich Lösungen mit den Knotenpunkten der Wellen an den Topfkanten. Durch die endliche Höhe V_0 ragt die Welle über den Topfrand hinaus bis in die Barriere. In Abbildung 2.3 sind exemplarisch die ersten beiden Zustände mit den Energien E_1 und E_2 eingezeichnet, die Ladungsträger in den Quantenfilmen (QW) einnehmen können.

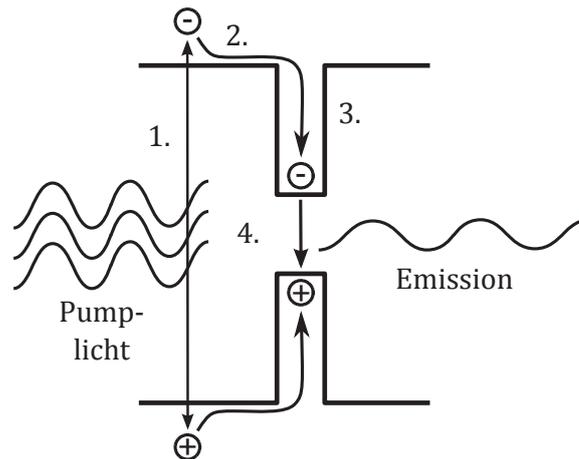


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von Ladungsträgererzeugung und -einfang in einem Quantenfilm mit Barriere, anhand des schematischen Verlaufs der Bandkante von Leitungs- und Valenzband.

Um Ladungsträger innerhalb des Potenzialtopfes einzufangen, müssen diese mindestens auf das Energieniveau eines stabilen Zustandes im QW angehoben werden. Hierfür gibt es unterschiedliche Konzepte. Das bei VECSELn am häufigsten angewendete Verfahren ist das optische Pumpen der Barriere (Abb. 2.4). Die Photonenenergie (Wellenlänge) des Pumplichtes muss hierfür oberhalb der Bandlücke liegen. Nur dann werden durch die Absorption innerhalb der Barriere Elektronen-Loch-Paare erstellt (Schritt 1). Im Anschluss an die Erzeugung verringern die Ladungsträger ihre Energie unter Abgabe von Wärme bis sie einen besetzbaren Zustand nahe der Bandkante annehmen (Schritt 2). Dieser Vorgang wird auch als Relaxieren bezeichnet. Die Ladungsträger sind jetzt immer noch beweglich und werden beim Auftreffen auf den Quantenfilm eingefangen (Schritt 3). Hierbei geben sie erneut die Energiedifferenz in Form von Wärme an den Halbleiter ab. Die Zeitskalen für die Schritte eins bis drei sind wesentlich kürzer als die mögliche Verweildauer der Ladungsträger in den Quantenfilmen. Die Rekombination (Schritt 4) der Elektronen-Loch-Paare aus einem der langlebigen Zustände im QW ist strahlend und kann für die Verstärkung von Licht genutzt werden.