

1 Einleitung

Weltweit wächst der Bedarf an modernster Lasertechnologie (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER) in einer rasanten Geschwindigkeit. Der immer größer werdende Markt basiert zudem auf einer stetig wachsenden Anwendungsvielfalt. Als der erste funktionierende Laser am 16. Mai 1960 von Theodor Maiman und seinem Assistenten Charles Asawa demonstriert wurde [Mai60], gab es wie bei vielen Neuentdeckungen keine praktischen Anwendungen. Es handelte sich um einen optisch gepumpten Rubinlaser, der nur eine gepulste Emission zuließ. Die Grundlage des Lasers wurde jedoch schon 54 Jahre früher von Albert Einstein gelegt. Im Jahr 1916 beschrieb Einstein im Rahmen seiner Quantentheorie der Strahlung [Ein16] erstmals den Mechanismus der stimulierten Emission.

Neben den Festkörperlasern, zu denen der Rubinlaser zählt, etablierten sich auch Gas- und Halbleiterlaser. Bereits im Jahr 1953 unternahm John von Neumann eine theoretische Beschreibung des Halbleiterlasers, die allerdings erst im Jahr 1987 veröffentlicht wurde [Neu87]. Verschiedene Arbeitsgruppen standen Anfang der 60er Jahre weltweit in einem Wettstreit bei der Umsetzung des ersten Halbleiterlasers. Die ersten Konzepte basierten auf dem III/V-Verbindungshalbleiter GaAs. Im Jahr 1962 gelang Marshall I. Nathan bei IBM der erste Nachweis stimulierter Emission mit einer GaAs-Halbleiterlaserdiode [Nat+62]. Die Laserdiode emittierte bei einer Wellenlänge von 843,4 nm. Um Laserpulse von 50 ns erzeugen zu können, musste die Diode in flüssigem Stickstoff auf 77 K gekühlt werden. Der schnell folgende Vorschlag eines elektronischen Doppel-Heteroübergangs von Herbert Kroemer im Jahr 1963 [Kro63] brachte die Forscher einen Schritt näher an den kontinuierlichen Dauerstrichbetrieb bei Raumtemperatur. So konnte zwar der Dauerstrichbetrieb von Laserdioden, welche auf dem Doppel-Heteroübergang basierten, demonstriert werden. Jedoch mussten die Dioden nach wie vor auf 77 K gekühlt werden. Grund war die sehr schlechte Materialqualität des verwendeten GaAs, was zu großen optischen Verlusten innerhalb des Materials führte. Erst die Entwicklung der Flüssigphasenepitaxie ermöglichte das Wachstum qualitativ hochwertiger Halbleiterkristallschichten [Nel63]. Die Flüssigphasenepitaxie wurde später von der heute gängigen Molekularstrahlepitaxie (engl. Molecular Beam Epitaxy, MBE) und der metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD) abgelöst.

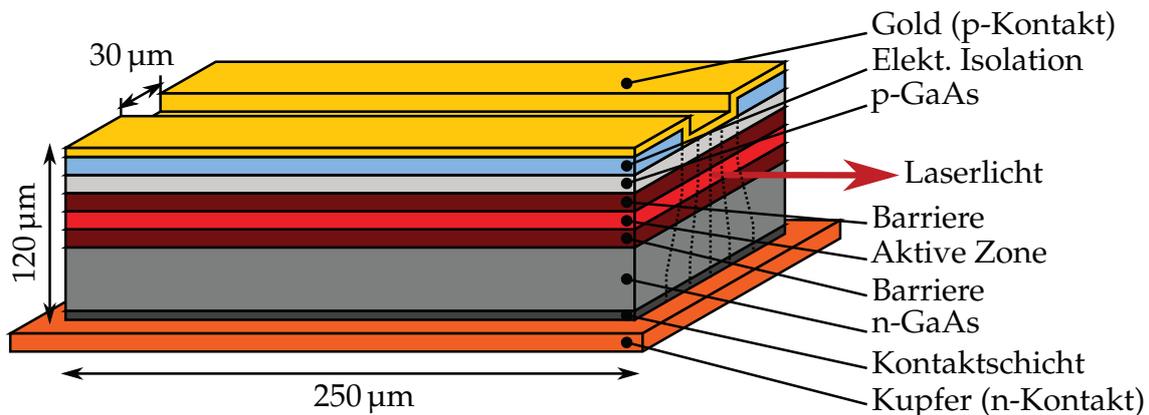


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines exemplarischen Kantenemitters. Das Laserlicht wird aus den Schnittkanten, senkrecht zur Stromrichtung (gestrichelte Linien) emittiert.

Die ersten bei Raumtemperatur und im Dauerstrichbetrieb funktionierenden Laserdioden waren so genannte Kantenemitter [Alf+70; Alf00]. Eine schematische Darstellung des ersten Kantenemitters [Alf00] ist in Abbildung 1.1 gegeben. Das Laserlicht wird aus den Schnittkanten des Halbleiters, senkrecht zum Diodenstrom und zur Wachstumsrichtung der Halbleiterschichten, emittiert. Die Strukturen und der elektrisch gepumpte aktive Bereich haben eine typische Länge von einigen 100 µm. Auf Grund der Länge des Kantenemitters und der entsprechend langen Verstärkungsstrecke reicht die durch die Reflektivität der Schnittkante gegebene Rückkopplung von ca. 30 % aus, um stimulierte Laseremission mit entsprechend hohen Ausgangsleistungen (bei heutigen typischen Dioden einige 10 mW) aufrecht zu erhalten. Diese Laser werden auch als Fabry-Pérot-Laser bezeichnet, da die gegenüberliegenden Schnittflächen ein optisches Fabry-Pérot-Filter [FP01] bilden, dessen Transmissionscharakteristik zusammen mit der spektralen Breite der Verstärkung die Emissionswellenlänge bestimmt. Der elektrische Pumpstrom wird mit Hilfe einer Isolationsschicht auf einen schmalen Streifen innerhalb der aktiven Zone komprimiert um die Pumpstromdichte zu erhöhen. Dadurch wird die benötigte Schwellstromdichte, ab welcher die stimulierte die spontane Emission überwiegt, gegenüber Lasern, welche über die gesamte Fläche elektrisch gepumpt werden, deutlich reduziert.

Mit Erreichen der stimulierten Laseremission im Dauerstrichbetrieb bei Raumtemperatur wuchs das Interesse an Halbleiterlasern in den verschiedensten Bereichen von Wissenschaft und Technik rasant an. Dies führte zugleich zur Forderung nach neuen Wellenlängen. Mit Hilfe neuer Materialsysteme konnten weite Teile des sichtbaren Spektrums und des Nahinfrarotbereichs abgedeckt werden. Die Halbleiterverbin-

ding InGaAsP wurde zu einem der wichtigsten Materialsysteme. Laserdioden mit einer aktiven Zone bestehend aus InGaAsP emittieren in einem Wellenlängenbereich um 1550 nm, der heute insbesondere zur optischen Datenübertragung genutzt wird. Mit dem ersten Konzept eines optischen Netzwerks, bestehend aus einer Laserdiode als Sender, einer Glasfaser als Übertragungstrecke und einer Photodiode als Empfänger, setzte Manfred Börner 1967 den Grundstein heutiger Telekommunikationstechnik [Bör67]. Die Übertragung mit den zu dieser Zeit erhältlichen Glasfasern war auf Grund großer Streuverluste auf kurze Strecken begrenzt [KH66]. Erst die sorgfältige Analyse der Verlustmechanismen in Glasfasern durch Charles Kuen Kao und seine Kollegen führte dazu, dass Glasfasern von nun an aus hoch reinem SiO₂ gefertigt wurden [KD68; WK69; JK69]. Mit einer Dämpfung von weniger als 0,2 dB/km bei einer Wellenlänge von 1550 nm konnten von nun an Daten über viele Kilometer übertragen werden. Dies beflügelte die optische Nachrichtentechnik, ein schnell wachsender Markt, dessen Kernelement Halbleiterlaserdioden waren und noch heute sind. Durch das nun immens gestiegene Interesse an Halbleiterlaserdioden wurden immer neuere Konzepte für Diodenlaser entwickelt, mit denen höhere Datenraten und längere Übertragungstrecken ermöglicht wurden.

Auf Grund der chromatischen Dispersion in Glasfasern wird die maximale Datenübertragungsrate von der spektralen Breite des emittierten Laserlichts limitiert [VP02]. Der wichtigste Schritt war daher die Entwicklung von Laserdioden, die ein Emissionsspektrum von hoher spektraler Reinheit besitzen. Sie emittieren in nur einer optischen Mode mit Bandbreiten im MHz-Bereich. Da beim herkömmlichen Fabry-Pèrot-Laser die longitudinalen Moden auf Grund des langen Resonators spektral dicht aneinander liegen (der Modenabstand verhält sich antiproportional zur Resonatorlänge), emittiert der Laser für gewöhnlich in mehreren longitudinalen Moden und damit bei mehreren Wellenlängen gleichzeitig. Es gibt zwei Möglichkeiten einen Laser zu entwickeln, der nur in einer longitudinalen Mode emittiert:

- die Implementierung einer wellenlängenselektiven Rückkopplung,
- die Verwendung eines kurzen Laserresonators.

Die Implementierung einer wellenlängenselektiven Rückkopplung in Kantenemittern ist technologisch leicht realisierbar [LKY77]. Bei einem Kantenemitter mit verteilter Rückkopplung (engl. Distributed Feedback Laser, DFB-Laser) wird ein über die Länge verteiltes wellenlängenselektives periodisches Gitter in den Halbleiter oberhalb der aktiven Zone implementiert [Nak73; Sod+87].

Ein im Vergleich zum Kantenemitter gänzlich unterschiedlicher technologischer Ansatz sind die Oberflächen-emittierenden Laserdioden mit Vertikalresonator (engl. vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL). Entgegen kantenemittierenden Laserdioden strahlen VCSEL senkrecht zur Halbleiteroberfläche ab. Der VCSEL benötigt

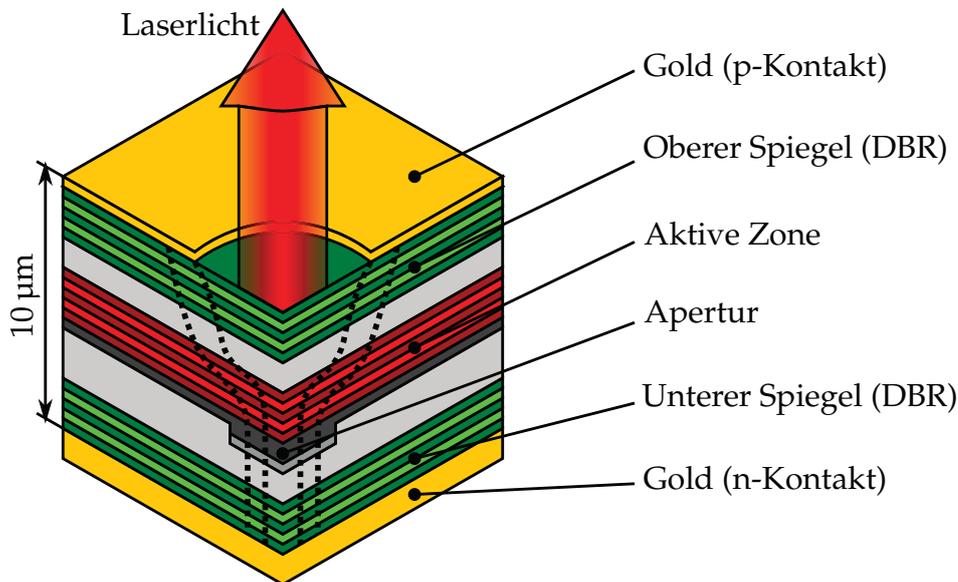


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung eines VCSEL. Das Laserlicht wird senkrecht zur Waferenebene, in Stromrichtung (gestrichelte Linie) emittiert.

daher keine als Spiegel fungierenden Schnittkanten, sondern spezielle Spiegel in Wachstumsrichtung der Halbleiterschichten. Nicht mehr die Distanz zwischen den Schnittkanten, sondern die Dicke der gewachsenen Schichten bestimmt beim VCSEL die Resonatorlänge. Und diese ist um eine bis zwei Größenordnungen kürzer als die Resonatorlänge konventioneller Kantenemitter. Der VCSEL emittiert auf Grund des sehr viel kürzeren Resonators mit typischen Längen von unter $10\ \mu\text{m}$ inhärent longitudinal einmodig¹ und benötigt keine zusätzliche wellenlängenselektive Rückkopplung.

Der Aufbau eines exemplarischen VCSEL ist in Abbildung 1.2 schematisch dargestellt. Der weltweit erste VCSEL wurde 1979 von Haruhisa Soda, Kenichi Iga, Chiyuki Kitahara und Yasuharu Suematsu vorgestellt [Sod+79; SMI83]. Auf Grund der Tatsache, dass sich das Laserlicht senkrecht zur Waferenebene ausbreitet, ist die durch die Dicke des aktiven Mediums vorgegebene Verstärkungsstrecke entsprechend kurz. Die Schwellstromdichte lag daher bei dem ersten VCSEL um Größenordnungen über der von zu dieser Zeit erhältlicher Kantenemitter. Zudem mussten die Laser auf Grund des benötigten großen Pumpstroms auf $77\ \text{K}$ gekühlt und gepulst betrieben werden. Einer der Hauptgründe war die zu geringe Reflektivität

¹Die spektrale volle Halbwertsbreite der Materialverstärkung ist deutlich schmaler als der Abstand benachbarter longitudinaler Moden. Daher kann nur eine longitudinale Mode ausreichend verstärkt werden.

der Spiegelflächen, welche zu Beginn durch einfache Metallschichten mit Reflektivitäten von $< 80\%$ realisiert wurden, die gleichzeitig als Diodenkontakt dienten. In Anbetracht der kurzen aktiven Zone werden jedoch typische Reflektivitäten von $> 99,5\%$ benötigt um die optischen Verluste pro Resonatorumlauf dem geringen Gewinn entsprechend anzupassen. Ein weiterer Nachteil entstand durch das Fehlen einer geeigneten Stromführung, welche den Pumpstrom auf ein kleines Modenvolumen einschränkt, sodass ein optimaler Überlapp zwischen Gewinn und optischer Feldverteilung gegeben ist. Die Implementierung auf Interferenz basierter hochreflektiver verteilter Bragg-Reflektoren (engl. distributed Bragg reflector, DBR) mit Reflektivitäten $> 99,5\%$, sowie die Einführung einer vergrabenen kreisrunden Heterostruktur zur Optimierung der Stromführung, ermöglichten fortan kontinuierliche Laseremission bei Raumtemperatur. Eine Zusammenfassung der Entwicklungsgeschichte des VCSEL mit ausführlicher Literaturrecherche bis zu heute aktuellsten Ergebnissen findet sich in [IKK88; Mic12].

Insgesamt ergeben sich durch die spezielle Bauweise des VCSEL einige Vorteile gegenüber typischen Kantenemittern:

- inhärent longitudinal einmodige Laseremission,
- schnelle direkte Modulierbarkeit der optischen Ausgangsleistung (z. B. zur optischen Datenübertragung),
- niedrige Laserschwelle von wenigen mA,
- insgesamt geringere Leistungsaufnahme bei typischen Betriebsströmen von wenigen 10 mA
- zirkulare, gering divergierende Abstrahlcharakteristik führt zu effizienter und kostengünstiger Faserkopplung,
- Bauelementprüfung direkt auf dem Wafer (keine Vereinzelung nötig),
- Fertigung von 2D-Laserrastern,
- einfache Implementierung mikro-elektromechanischer Systeme (MEMS), die in dieser Arbeit zur Steuerung der Emissionswellenlänge genutzt werden.

Insbesondere auf Grund der niedrigen Laserschwelle und schnellen direkten Modulierbarkeit der optischen Ausgangsleistung sind VCSEL eine immer stärker werdende Alternative zu den gewöhnlichen Kantenemittern, wie sie heute in optischen Langstreckennetzwerken angewandt werden [Won+12]. Grund dafür ist der immer größer werdende Datenverkehr, der die Installation von immer mehr und immer schnelleren Sende- und Empfangseinheiten nach sich zieht. Durch die parallele Datenübertragung auf verschiedenen Wellenlängenkanälen konnte die Bandbreite des

bestehenden Fasernetzes wesentlich erhöht werden ohne neue Glasfaserleitungen verlegen zu müssen. Zugleich haben sich die Anforderungen an die benötigten Laserdioden damit dramatisch verschärft. Dieses so genannte Wellenlängenmultiplexverfahren (engl. Wavelength Division Multiplexing, WDM) erfordert eine ganze Reihe von Lasern, die präzise auf den Wellenlängen der entsprechenden Kanäle senden. Insbesondere in dichten WDM Netzwerken (engl. Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) werden Laser mit einer stabilen Emissionswellenlänge benötigt, da der Kanalabstand teilweise unter 50 GHz bzw. 0,4 nm liegt. So kann zwar beim DFB-Laser die Wellenlänge präzise über die implementierte Gitterstruktur kontrolliert und über eine aktive Kühlung konstant gehalten werden. Es muss jedoch für jeden Wellenlängenkanal ein entsprechender Laser gefertigt und gelagert werden, was neben der hohen Leistungsaufnahme von Kantenemittern zu einer deutlichen Teuerung in Anschaffung, Lagerung und Betrieb führt. Diese neuen Anforderungen ließen die Nachfrage nach kompakten wellenlängenabstimmbaren Laserdioden aufkommen [Har00].

Die WDM-Kanäle liegen im definierten C-Band (engl. Conventional Band) zwischen 1530 nm–1565 nm oder im L-Band (engl. Long Band) zwischen 1565 nm–1625 nm. Idealerweise muss eine einzelne Laserdiode also einen enormen Wellenlängenbereich von mindestens 95 nm abdecken, sodass sie für jeden Kanal verwendet werden kann. Neben dem benötigten Abstimmbereich sollte eine abstimbare Laserdiode noch einige weitere Kriterien erfüllen. So sollte die Steuerung der Wellenlänge möglichst linear (zumindest monoton und hysteresefrei) mit nur einer Steuergröße regelbar sein, ohne dass sich die optische Ausgangsleistung mit der eingestellten Wellenlänge wesentlich ändert. Zudem muss insbesondere bei der Anwendung in WDM-Netzwerken (aber auch bei vielen anderen Anwendungen, wie z. B. der Gasspektroskopie) eine einmodige Laseremission über den gesamten Abstimmbereich gegeben sein [BAB05].

Herkömmliche DFB-Laser lassen sich auf Grund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex über einen Bereich von ca. 5 nm kontinuierlich abstimmen [Col+04]. Ein weiterer Mechanismus der zur Steuerung der Emissionswellenlänge genutzt werden kann ist die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Ladungsträgerdichte und damit vom Diodenstrom. So lässt sich die Wellenlänge wesentlich schneller als im thermischen Fall abstimmen. Besondere Kantenemitter erreichen einen kontinuierlichen Abstimmbereich von bis zu 10 nm [Tod+05]. Die Mechanismen sind jedoch durch die resultierende Eigenerwärmung des Bauteils begrenzt, da der Gewinn stark temperaturabhängig ist. Zudem existieren kommerziell erhältliche abstimbare DBR-Laser², die sich über einen Bereich von ca. 40 nm steuern lassen. Diese benötigen jedoch eine aufwendige Steuerelektronik, da für die Wellen-

²MAP (mTLG-B1) Tunable DBR Laser der Firma JDSU.

längenabstimmung eine Vielzahl von Parametern simultan geändert werden muss, was zudem eine zeitaufwendige Analyse des Parameterraums jedes einzelnen Lasers erfordert und sich entsprechend im Preis niederschlägt.

Eine Alternative bietet die mechanische Änderung der Resonanzwellenlänge. So kann die Emissionswellenlänge von Diodenlasern mit Hilfe eines zusätzlichen beweglichen externen Spiegels oder Gitters, über optische Rückkopplung, präzise geregelt werden. Zwischen zusätzlichem Spiegel bzw. Gitter sowie der Endfacette der Laserdiode wird ein zusätzlicher Resonator gebildet. Diese Anordnung bezeichnet man daher als Diodenlaser mit externem Resonator [FM11; LZ07] (engl. External-Cavity Diode Laser, ECDL) oder für den Spezialfall, dass der Diodenlaser ein VCSEL ist: VECSEL [Tro+04] (engl. Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser). Auf diese Weise sind deutlich größere Abstimmbereiche möglich. Da die gesamte Resonatorlänge auf Grund des extern angeordneten Spiegels bzw. Gitters auf eine Länge von einigen cm erweitert werden kann, ist eine schmale Linienbreite (die auf Grund der längeren Photonenlebensdauer nur wenige kHz beträgt) eines der herausragenden Merkmale dieser Laser. Nachteilig wirkt sich die Bauweise unter Verwendung teurer Optiken und makroskopischer Mechaniken auf den Preis und/oder die Geschwindigkeit der Wellenlängenregelung aus. Zudem hat der lange Resonator neben der vorteilhaften Linienbreite den Nachteil, dass der kontinuierliche Abstimmbereich (ohne longitudinalen Modensprung) auf Grund des entsprechend kurzen freien Spektralbereichs durch longitudinale Modensprünge gestört werden kann [Zor94]. Um dennoch kurze Resonatoren mit einer schnellen (einige ms) Wellenlängenabstimmung kombinieren zu können, bieten sich mikroelektromechanische Systeme (engl. Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) an. Basierend auf der etablierten Halbleitertechnologie können MEMS, in diesem Fall mikroelektromechanisch aktuiertbare Spiegelmembranen, mit Diodenlasern direkt zu kompakten Bauteilen integriert werden [LZ07]. Die Integration mit Kantenemittern erfordert jedoch wegen deren lateralen Aufbaus komplexere Systeme sowie eine hybride Integration des MEMS mit dem Laser. Hier bieten VCSEL auf Grund ihrer vertikalen Bauweise einen weiteren Vorteil in Hinblick auf die technologische Integrierbarkeit gegenüber Kantenemittern, da das MEMS direkt auf der Waferfläche der VCSEL prozessiert werden kann.

Der erste mikro-mechanisch steuerbare VCSEL wurde 1996 demonstriert [LMH96]. Der obere, fixe Spiegel üblicher VCSEL mit fester Wellenlänge wird durch eine bewegliche Spiegelmembran substituiert, welche zusammen mit dem Halbleiter einen Luftspalt mit aktiv kontrollierbarer Höhe einschließt (s. Abbildung 5.1). Durch die kontrollierte Auslenkung der Spiegelmembran lässt sich durch Ändern der Länge des Luftspalts, die Gesamtlänge des Resonators und damit die emittierte Resonanzwellenlänge kontrolliert steuern. Der erste MEMS-VCSEL basierte auf der Oberflächen-Mikromechanik (engl. surface-micromachining), eine kostengüns-

tige Technologie zur MEMS-Integration. Unter Verwendung einer im Laufe der Prozessierung zu entfernenden Opferschicht lässt sich der benötigte Luftspalt technologisch einfach und kostengünstig integrieren. Der Name entstammt der Tatsache, dass alle Prozessschritte von der Oberfläche des zu bearbeitenden Wafers durchgeführt werden.

Ausgangsleistung und Abstimmbereich waren jedoch insbesondere bei elektrisch gepumpten MEMS-VCSEL stark eingeschränkt [Vak+99; Mat+03; Bou+03; Syr+04; Sun+04; Kog+12]. Neue Weltrekorde in Hinblick auf Abstimmbereich und Ausgangsleistung konnten zunächst nur für optisch gepumpte VCSEL realisiert werden [Jay+12a; Jay+12b]. Hier gehen jedoch alle VCSEL-spezifischen Vorteile verloren, da ein zusätzlicher Kantenemitter als Pumpquelle benötigt wird. Zudem benötigen die gegebenen Lösungen einen zusätzlichen optischen Verstärker, sodass es sich bei dem gesamten Aufbau um keine voll integrierte Laserdiode handelt, als vielmehr um einen komplexen optischen Aufbau mit erheblich höheren Kosten und einer signifikant größeren Leistungsaufnahme. Diese sind insbesondere für Anwendungsfelder, wie z. B. die Telekommunikation, praktisch unbrauchbar und zielen auf medizinische Anwendungen wie die optische Kohärenztomografie ab. Parallel wurden VCSEL basierend auf einem Zwei-Chip-Konzept entwickelt [Rie+03; Rie+04; Kö+05; Kog+06]. Hier wird die Spiegelmembran in einem neben der VCSEL-Herstellung separaten Prozess, basierend auf der Volumen-Mikromechanik (engl. bulk micromachining), gefertigt. Diese Technologie erfordert den Zugang von beiden Waferseiten und ist daher meist technologisch aufwändiger als die Oberflächen-Mikromechanik. Abschließend muss die Spiegelmembran mit dem VCSEL manuell integriert werden, was einen großen Nachteil gegenüber der Oberflächen-Mikromechanik darstellt. Dennoch brachen VCSEL basierend auf dem Zwei-Chip-Konzept alle bis dahin bestehenden Rekorde (in Abstimmbereich, Ausgangsleistung usw.) elektrisch gepumpter VCSEL [Yan+09; Jat+09]. Auf Grund des zusätzlichen manuellen Integrationsschrittes ist sie in diesem Fall allerdings nur bedingt zur Massenfertigung geeignet.

Ziel und Gliederung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuartigen Technologie basierend auf der Oberflächenmikromechanik, welche die kostengünstige Fertigung wellenlängensteuerbarer VCSEL erstmals ermöglichen soll. Am Ende der Arbeit soll die Demonstration eines elektrisch gepumpten MEMS-VCSEL basierend auf der neu entwickelten Technologie stehen, welcher im Bereich um 1550 nm emittiert. Die benötigte bewegliche Spiegelmembran soll direkt auf dem VCSEL abgeschieden

und prozessiert werden. Zudem soll neben der im Zwei-Chip-Konzept etablierten elektrothermischen Aktorik auch eine schnellere elektrostatische Aktorik der Spiegelmembran implementiert und charakterisiert werden. Die neu entwickelten Laser sollen zudem die Rekorde der auf dem Zwei-Chip-Konzept basierten VCSEL halten oder sogar übertreffen und damit zugleich den Anforderungen moderner Telekommunikationsnetzwerke gerecht werden. Beispielhaft seien folgende Kenngrößen genannt, welche sich neben den Anforderungen der Telekommunikation aus den bisherigen Rekorden elektrisch gepumpter MEMS-VCSEL bei 1550 nm zusammensetzen und über den gesamten Abstimmbereich eingehalten werden:

- Weiter Abstimmbereich > 70 nm,
- spektrale Reinheit des Emissionsspektrums mit einer Nebenmodenunterdrückung > 40 dB,
- Ausgangsleistung > 1 mW,
- Schwellstrom < 10 mA über gesamten Abstimmbereich,
- Linienbreite < 100 MHz.

Zunächst soll die Technologie im Rahmen der Entwicklung aktiv steuerbarer wellenlängenselektiver Filter entwickelt und optimiert werden. Kapitel 2 befasst sich daher zunächst mit den theoretischen Grundlagen steuerbarer optischer Filter. Das Konzept eines mikro-elektromechanisch steuerbaren Filters sowie der gesamte Herstellungsprozess wird am Anfang von Kapitel 3 beschrieben. Anschließend werden die elektro-optischen Eigenschaften der neu entwickelten Filter quantitativ, sowohl für die elektrothermische als auch die elektrostatische Wellenlängensteuerung, dargestellt. Kapitel 3 schließt mit der praktischen Anwendung des Filters in einem mehrkanaligen WDM-Netzwerk.

Nach einer kurzen Übersicht über die Theorie aktiver Resonatoren in Kapitel 4, wird das Konzept sowie der grundlegende Aufbau und die technologische Umsetzung des hier entwickelten MEMS-VCSEL am Anfang von Kapitel 5 beschrieben. Weiterer Bestandteil des Kapitels ist die Darstellung der primären elektro-optischen Eigenschaften des Halb-VCSEL (VCSEL ohne Spiegelmembran) sowie die vollständige Charakterisierung eines elektrothermisch als auch elektrostatisch gesteuerten MEMS-VCSEL. Die Messergebnisse werden mit den Ergebnissen einer speziell entwickelten Simulationssoftware, basierend auf der Transfermatrixmethode, verglichen. Am Ende von Kapitel 5 steht die Erprobung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten MEMS-VCSEL in einem mehrkanaligen WDM-Netzwerk.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und kurz den bisherigen Ergebnissen aus anderen Arbeiten gegenübergestellt. Diese Arbeit schließt mit einem Ausblick über weiterführende, direkt anknüpfende Arbeiten zur Verbesserung



von Technologie und Performanz. In den Anhängen A, B, C und D finden sich zusätzliche Informationen über Technologie und Aufbau des MEMS-VCSEL. Die Arbeit wurde im Rahmen des DFG Graduiertenkollegs TICMO (GRK 1037) sowie dem EU-Projekt Subtune (FP7-ICT 40530) durchgeführt. Die für diese Arbeit verwendeten Halb-VCSEL wurden von Dipl.-Phys. Tobias Gründl, am Walter Schottky Institut der Technischen Universität München, Mitglied der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. M.-C. Amann, bereitgestellt.