

Schlussbericht

im Verbundprojekt: „Vertikalemittierende Oberflächenlaser hoher Leistung, monomodig und stabilisiert“ im Verbund Qyro

Zuwendungsempfänger: TRUMPF Photonic Components GmbH

Förderkennzeichen: 13N16314

Förderzeitraum: 01.08.2022 – 31.07.2027

Projektlaufzeit (Teilvorhaben): 01.08.2022 – 31.12.2025

Berichtszeitraum: 01.08.2022 – 31.12.2025

Autoren: Julian Lindner, Holger Mönch, Tobias Pusch

1 Kurzbericht zur Veröffentlichung

Das Projekt Qyro erforscht die Grundlagen eines Kernspingyroscopes zum Einsatz in Satelliten einschließlich einer Demonstration im Weltraum. Die Anregung und Auslese der quantenmechanischen Zustände erfolgt dabei durch oberflächenemittierende Laser mit einer vertikalen Kavität (VCSEL). Der Projektpartner TRUMPF Photonic Components hat dafür neuartige VCSEL bei der geforderten Wellenlänge von 795nm erstellt. Die Skalierung der monomodigen Leistung auf die geforderten 2mW für die Auslese und 10mW für die Anregung überschreitet deutlich die bisherigen Grenzen und wurde durch die Anwendung neuartiger, konstruktiver Maßnahmen erreicht.

Die Stabilisierung einer ausgewählten Mode und des Polarisationszustandes wurde durch ein in die Auskoppelfacette integriertes Relief mit einer Gitterstruktur im Subwellenlängenbereich erreicht. Die Integration in den Herstellungsprozess beinhaltet die Passivierung der Halbleiterstruktur durch dielektrische Schutzschichten zum Schutz vor äußeren Einflüssen. Die für die Auslese erforderliche Ausgangsleistung von 2mW kann durch einen VCSEL in der Grundmode erreicht werden.

Die für die Anregung geforderten 10mW sind in der begrenzten Fläche der Grundmode nicht darstellbar. Daher wurde der neuartige Ansatz mit einer höheren Mode gewählt, die durch ein spezielles Relief stabilisiert wird. Konkret wurde eine in einer Richtung linear ausgedehnte Mode mit 8 Maxima durch ein angepasstes Relief mit Gitterstruktur bevorzugt. Bei der geforderten Leistung schwingt nur diese Mode an, während andere Moden mit z.B. 7 oder 9 Maxima unterdrückt werden.

Des Weiteren wurde der VCSEL mit einer dielektrischen Struktur zur Phasenkorrektur versehen. Dadurch gelang es, die abgestrahlte Leistung entlang der optischen Achse, senkrecht zur Chipoberfläche zu emittieren. Im Gegensatz zur genuinen Emission der

Mode höherer Ordnung mit zwei separaten Maxima außerhalb der optischen Achse ermöglicht das neue Konzept die einfache Nutzung der optischen Leistung im Gyroskop ohne zusätzliche, komplexe optische Systeme. Damit stehen sowohl für die Auslese als auch die Pumpquelle einfache Oberflächenemitter zur Verfügung. Dies vereinfacht den Aufbau und senkt die Kosten für ein Gyroskop.

Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass die geforderte Lebensdauer von 4500h im Dauerbetrieb deutlich überschritten wird. Tatsächlich zeigen die in mehreren Iterationen verbesserten Bauelemente eine so geringe Degradation, dass in Lebensdauertests noch keine Grenze der Lebensdauer ableitbar ist, sondern lediglich eine Untergrenze von >12000h angegeben werden kann.

Als Möglichkeit zur weiteren Erhöhung der Leistung wurden mehrere, vertikal gestapelte Aktivschichten untersucht und erfolgreich eingesetzt. Die besonderen Herausforderungen der relativ kurzen Wellenlänge von 795nm bedingen die Verwendung aluminiumhaltiger Schichten und damit einhergehender Verluste. Diese konnten so weit reduziert werden, dass auch im geforderten, kontinuierlichen Betrieb eine Verbesserung der maximalen Leistung erzielt wurde. Für den Einsatz im Gyroskop werden höhere Leistungen nicht benötigt und diese Technologie kam nicht zum Einsatz. Andere Anwendungen, insbesondere im gepulsten Betrieb, können aber in Zukunft von den erzielten Fortschritten profitieren.

Durch die Erfolge des Qyro Projekts stehen damit VCSEL für Kernspingyroscopie zur Verfügung. Die Möglichkeit der kostengünstigen Massenproduktion und die Kompaktheit der VCSEL ermöglichen in Zukunft den Einsatz solcher Gyroskope auch in alltäglicheren Anwendungen wie z.B. als Lagesensoren für autonome Fahrzeuge.

2 Zielsetzung und Lösungsansatz des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens ist die Erforschung und Bereitstellung geeigneter VCSEL als Pump- und Probe-Laser bei einer Wellenlänge von 795nm. Der VCSEL soll nur eine Mode aufweisen, linear-polarisiert und schmalbandig (<100MHz) sein. Benötigt wird eine Leistung von bis zu 10 mW. Da diese Anforderungen den bisherigen Stand der Technik um eine Größenordnung übersteigen wurden parallel verschiedene Ansätze zur Leistungssteigerung untersucht.

- Ein robustes Materialsystem für eine MQW Struktur bei 795nm.
- Verwendung einer Gitter-Relief Struktur auf der Auskoppelfacetten zur Stabilisierung von Mode und Polarisation.
- Eine Flächenskalierung des aktiven Bereichs entlang einer Dimension zur Leistungsskalierung und die Selektion einer Mode höherer Ordnung.
- Die Stapelung mehrerer Aktivschichten als alternativer Ansatz zur Leistungsskalierung.

Für alle Ansätze wurden komplette VCSEL Wafer gefertigt. Optimierungen wurden in mehreren Iterationen durch einen neuartigen Prozess zur Schnellprozessierung begleitet.

Die gefertigten Bauelemente erfüllen alle Anforderungen für die Anwendung im Gyroskop bzw. dem Satelliten. Eine große Zahl von Bauteilen wurde dem Konsortium zur Verfügung gestellt.

3 Wesentliche Arbeiten und Ergebnisse

In den Abschnitten 3.1 bis 3.6 werden die verwendeten Werkzeuge und Methoden erläutert. Ergebnisse werden in 3.7 und 3.8 vorgestellt. Abschnitt 3.9 beschreibt die erfolgreichen, aber letztendlich nicht verwendeten Arbeiten zur Stapelung von Aktivschichten während 3.10 weitere, nicht final ausgearbeitete Ansätze erläutert.

3.1 VCSEL Epitaxie bei 795nm

Das epitaktische Design besteht aus einem unteren n-dotierten verteiltem Bragg-Spiegel (distributed Bragg Reflector – DBR), kurz n-DBR, der 41 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ Spiegelpaare umfasst, und aus einem oberen p-dotierten p-DBR, der 21 Spiegelpaare der gleichen Schichtenfolge umfasst. Der elektrische Widerstand der DBR-Spiegel wird durch Gradierungsschichten reduziert. Modulationsdotierung in den Stehwellenminima wird verwendet, um die Absorption durch freie Ladungsträger zu minimieren. Die aktive Zone besteht aus drei 6,5-nm-dicken AlGaAs -Quantengraben mit niedrigem Aluminiumgehalt, die durch 33%- AlGaAs -Barrieren getrennt sind. Das Photolumineszenz-Spektrum (PL) weist das Maximum bei etwa 782 nm auf und ist somit gegenüber der Resonanz-Wellenlänge der Kavität blauverschoben. Aufgrund der verschiedenen Temperaturkoeffizienten kompensiert diese bewusste Verschiebung eine temperaturbedingte Leistungsreduktion mit einer Ziel-Umgebungstemperatur von etwa 30°C. Die Quantengraben sind im Bauch des Stehwellenfeldes platziert, während die Oxidationslage mit hohem Aluminiumgehalt oberhalb der aktiven Zone nahe am Knoten positioniert ist. Dies erlaubt eine moderate optische Führung und eine starke elektrische Führung für einen effizienten Laserbetrieb. Die Abschlusschicht oberhalb des p-DBRs besteht aus einer hochdotierten GaAs -Lage, die einen effizienten ohmschen Metall-Kontakt ermöglicht. Gleichzeitig ist die Lage bewusst eine Viertel-Materialwellenlänge zu dick gewählt, um bei anschließender Einbringung eines Oberflächenreliefs oder Gitter-Reliefs eine Modenselektion zu ermöglichen (siehe mehr dazu in Kap. 3.4).

Eine Kampagne zum Wachstum der epitaktischen Designs umfasst aufwendige Anlagenkalibration mit verschiedenen Teststrukturen wie verkürzten DBRs, verkürzte Kavitäten und spezielle Designs für die Kalibration des Photolumineszenz-Spektrums der aktiven Zone. Nach dem Wachstum beim Projektpartner FBH und der Lieferung findet bei TPC eine umfassende Eingangskontrolle der Wafer statt. An PL-Wafern werden PL-Messungen und Tieftemperatur-PL-Messungen durchgeführt. An den Wafern, die das epitaktische Design für die VCSEL aufweisen, werden Reflexionsmessungen zur Schichtdickenkontrolle, eCV-Messungen zur Bestimmung von aktiven

Dotierkonzentrationen und SIMS-Messungen zur Bestimmung von Atomkonzentrationen wie Zusammensetzung, Dotierung oder Verunreinigungen durchgeführt. Zudem werden die Wafer hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität, Partikeln und Krümmung charakterisiert. Danach wird noch eine Kantenoxidation zur Vorbestimmung der Oxidationsrate vorgenommen.

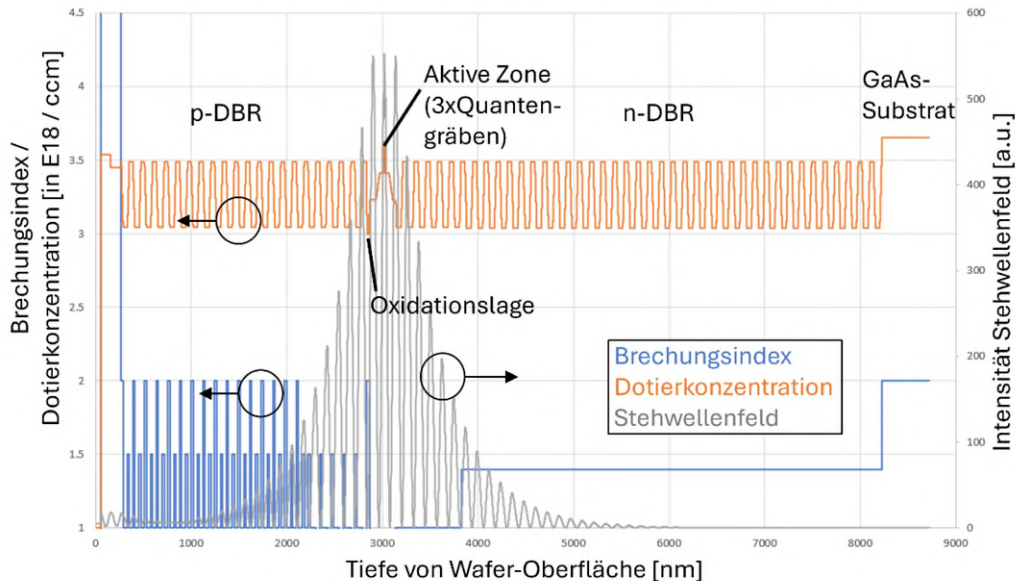


Abbildung 1: Epitaktisches Design für 795 nm VCSEL mit einer aktiven Zone und AlGaAs-Quantengraben. Berechnungen des Stehwellenfeldes basierend auf der Schichtenfolge über Transfer-Matrix-Methode.

Um bei dem langwierigen Thema Lebensdauer Alternativen zu explorieren, wurden bereits in den ersten Projektmonaten vom FBH zwei alternative aktive Zonen vorgeschlagen mit AlInGaAs- und GaInAsP-Quantengraben. In der ersten Kampagne wurden Wafer mit allen drei 795 nm Designs gewachsen. Bei SIMS-Messungen wurden dann jedoch sehr hohe Schwefelkonzentrationen in den Wafern detektiert, was mit einer Lebensdauerreduktion assoziiert ist. Entsprechend wurde die Kampagne am FBH wiederholt und über strenge Kontrollmessungen sichergestellt, dass sich die Schwefelkonzentrationen unterhalb der kritischen Schwellwertes befinden. In nachfolgenden Tests zur Lebensdauercharakterisierung wurde jedoch herausgefunden, dass die quaternären Quantengraben am schnellsten degradieren und die AlGaAs-Quantengraben am stabilsten sind. Entsprechend wurde von da an mit diesen weitergearbeitet.

Da an prozessierten VCSELn in Lebensdauerests ein Spannungsdrift beobachtet wurde, wurde ein neues epitaktisches Design erstellt, welches eine deutlich erhöhte Dotierung der Oxidationslage enthält und in dem deren Position mit dem innersten Spiegelpaar vertauscht wurde, um etwaige Lebensdauer-schädigenden Einflüsse zu minimieren. Das epitaktische Ausgangs-Design sowie die modifizierte Variante sind in Abbildung 2 vergleichend dargestellt. Wenngleich die optische und elektrische Führung der

modifizierten Epi-Variante sich später als reduziert herausgestellt haben, wurde der Spannungsdrift unter Kontrolle gebracht sowie die Lebensdauer deutlich verbessert.

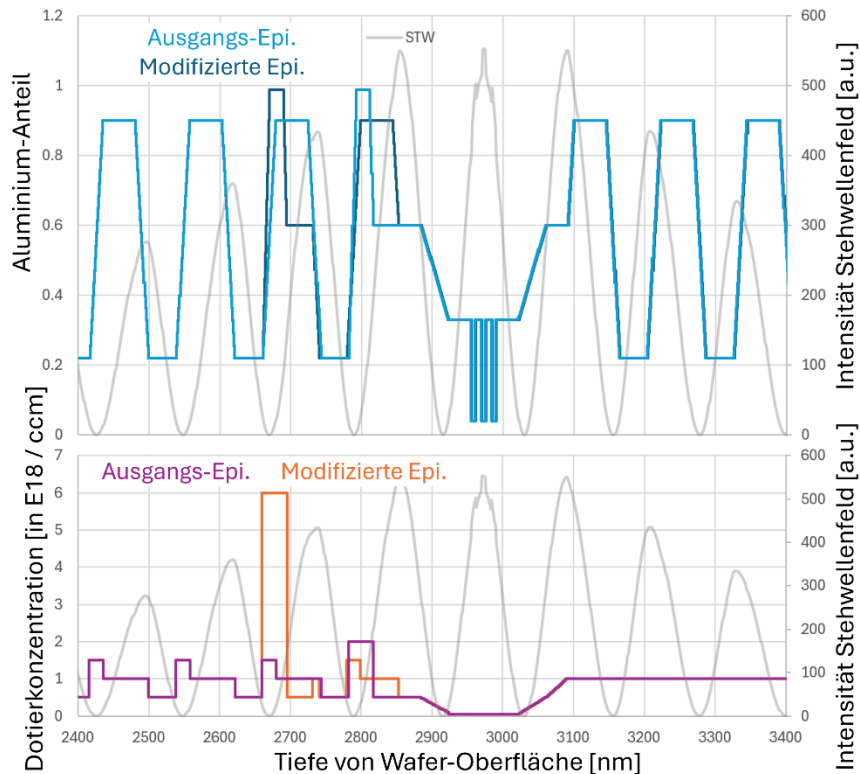


Abbildung 2: Vergleich des epitaktischen Ausgangs-Designs mit dem modifizierten Design, in dem die Oxidlage mit dem innersten p-DBR-Spiegelpaar vertauscht wurde und die höher dotiert wurde.

3.2 Prozessierung von Mustern im Projekt

Der Herstellungsprozess, im weiteren Prozessierung genannt, besteht aus mehreren Schritten, welche im Verlauf dieses Kapitels näher erklärt werden. Um die vom Projekt gestellten Anforderungen erfüllen zu können, nämlich für den Probe Laser eine moderate Ausgangsleistung im Bereich von 2 mW und für den Pump Laser eine für VCSEL hohe Ausgangsleistung von 10 mW bei gleichzeitigem Singlemode Verhalten, kleiner Linienbreite und stabiler Polarisierung, werden Tests an verschiedenen Chip Designs benötigt. Im Projekt Qyro wurden insgesamt 169 verschiedene Designs über 2 Maskeniterationen getestet, wobei man hier klar zwischen Designvariation zur Entwicklung des Probe VCSELS und Designs zur Entwicklung des Pump VCSELS unterscheiden kann. Lithografie Masken werden benötigt, um aus der vorhandenen Epitaxie Strukturen herauszuarbeiten.

Aufgrund bestehender Erfahrungswerte mit dem Chip Design eines Standard Single Emitters mit integriertem Gitterrelief (hohe Polarisationsstabilität, geringe Linienbreite, moderate Ausgangsleistung, gaußsches Strahlprofil) wurde dieser als erfolgsversprechend für die Anforderungen des Probe Lasers angesehen. Der Fokus lag hier auf der Optimierung der Ausgangsleistung bei gleichzeitigem Erhalt des Singlemode

Verhaltens via Durchmesser Variation der optischen Apertur im Bezug zum Gitterdurchmesser. Dies ist ausführlich in Kapitel 3.4 dargestellt.

Für den Pump VCSEL wurden 2 verschiedene Designansätze verfolgt. Zum einen eine Skalierung der Leistung über das Einfügen mehrerer parallel angelegter Mesen jeweils basierend auf dem Single Emitter Prinzip. Zum anderen einen länglichen Emitter mit größerer aktiver Zone bei der eine Mode höherer Ordnung stabilisiert wird.



Abbildung 3: Aufnahme eines Probe Lasers nach Bearbeitung im Vollprozess und Sägen

Die Prozessierung der verschiedenen Designs erfolgt mit denselben Prozessschritten. Zwei Arten von Prozessen wurden verwendet. Zum einen der Vollprozess, der mit dem normalen Prozess der Produktion vergleichbar ist. Dieser ist aufwändig und dauert im Schnitt zwischen 3-4 Monate je nach Komplexität des Designs. Abbildung 3 zeigt eine Mikroskop Aufnahme

eines fertig prozessierten Single-emitter Chips. Die gestrichelte Linie verdeutlicht die Lage des Querschnitts in Abbildung 4.

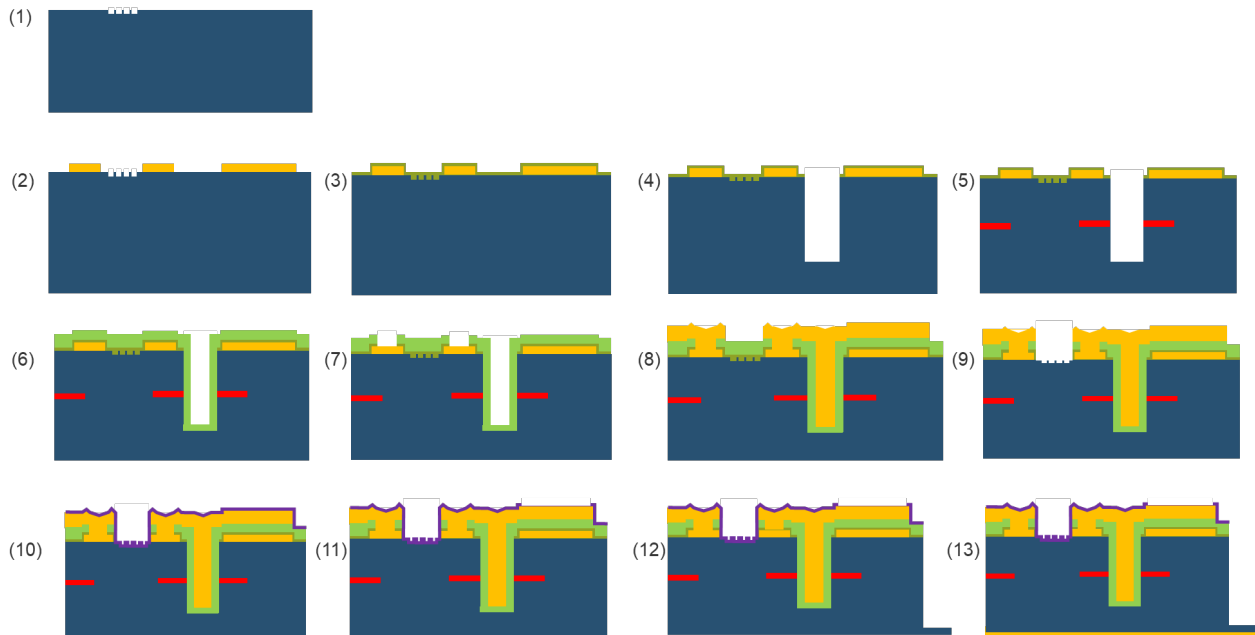


Abbildung 4: Darstellung der einzelnen Prozessschritte beim Vollprozess

Der Vollprozess ist in 13 einzelne Prozessschritte unterteilt. In Schritt (1) wird über Imprint Technologie ein Oberflächengitter in die GaAs Abschlusschicht eingebracht. Weitere Information zur Gitterauslegung sind im Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 beschrieben. Danach wird der Top Kontakt aufgedampft (2). Hierbei wird das Metall C-förmig um die Mesa gelegt und zusätzlich noch im Bereich des Bondpads platziert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Mesa am Ende des Prozesses

nicht der höchste Punkt ist, um Beschädigungen beim Bauteilpicken zu reduzieren. Nach dem Aufdampfen wird die gesamte Oberfläche mit einer SiN Schicht bedeckt (3), um das Halbleitermaterial bei den nächsten Schritten zu schützen. Im vierten Schritt (4) wird die Mesa bis unterhalb der aktiven Zone geätzt. Dies ist notwendig, um den Mesabereich vom umliegenden Bereich elektrisch zu entkoppeln und um die hochaluminiumhaltige Oxidationsschicht freizulegen, welche dann in Schritt (5) unter Wasserdampfatmosfera und hoher Temperatur oxidiert wird. Die dadurch entstandene sogenannte Oxidblende reduziert den leitfähigen Bereich in der Mesa und sorgt für eine Kanalisierung des Laserstroms in der Nähe der darunter liegenden aktiven Zone. Um den durch die Ätzung freigelegten Bereich für die weitere Prozessierung zu schützen, wird eine weitere SiN Schicht über dem gesamten Wafer abgeschieden (6). Für die Kontaktierbarkeit der Top Kontakte auf der Mesa muss über einen sogenannten PVIA Schritt das abgeschiedene SiN im Bereich der Top Kontakte entfernt werden (7) bevor im nächsten Schritt per Galvanik die Metallisierung des Bondpads, des Tracks und der Top Kontakte realisiert wird (8). Im Schritt (9) wird das SiN bei der Austrittsfacette entfernt und danach über eine mittels ALD (Atomic Layer Deposition) aufgebraute dünne vollflächige Schicht die Oberfläche zum Schutz vor Umwelteinflüssen versiegelt (10). Zum späteren Kontaktieren per Kontaktnadel oder Bonddraht muss das ALD beim Bondpad wieder entfernt werden (11). Nach diesem Schritt ist die Oberflächenstrukturierung des Chips abgeschlossen. Im vorletzten Schritt wird ein tiefer Graben zwischen den einzelnen Chips geätzt (Ätzung bis ins Substrat), um eine spätere Vereinzelung der VCSEL zu erleichtern (12). Als letzter Schritt wird der Rückseitenkontakt vollflächig aufgedampft (13).

Bei der im Projekt notwendigen Entwicklung ist die Nutzung des sehr zeitaufwändigen Vollprozesses nicht ideal. Um schneller Rückmeldung über die Qualität der Epitaxie und potenzieller Verbesserungen zu bekommen, wurde ein Kurzprozess, der sogenannte EQL (Epi Quicklot) verwendet. Dieser erstellt VCSEL Strukturen ohne Rücksicht auf Umweltstabilität, Lebensdauer und Vereinzelung. Die hierbei verwendete Maske besteht ausschließlich aus Single-emitter Strukturen mit variierendem Mesa Durchmesser. In Abbildung 5 ist ein Bild eines einzelnen Chips im Maskenfile zu sehen.

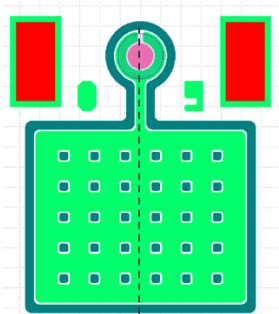


Abbildung 5 :
Maskenbild eines
Single-emitters für
den Kurzprozess.

Der EQL besteht aus nur vier einzelnen Prozessschritten und dauert nur 1-2 Wochen. Auf ein Gitterrelief wird verzichtet und direkt mit dem Aufbringen des Top-Kontakts, des Bondpads und des Tracks begonnen (1). Im zweiten Schritt wird die Mesa geätzt, wobei in diesem Fall die Ätzung nicht auf den Mesabereich beschränkt bleibt, sondern die komplette Struktur einmal umschließt und im Bondpadbereich noch zusätzliche Löcher geätzt werden (2). Danach (3) wird die Struktur oxidiert. Der hier verwendete Ätzgraben sorgt dafür, dass die Oxidationsschicht im gesamten Bondpad und Trackbereich vollständig oxidiert ist. Dadurch wird sichergestellt, dass der Stromfluss vom Bondpad über die Austrittsfacette

zur Rückseite fließt und nicht auf direktem Wege vom Bondpad in den Halbleiter. Im letzten Schritt (4) wird noch der Rückseitenkontakt aufgebracht.

Bei beiden Prozessen wird danach beim Wafermap-Test (WMP) die erste elektrische Charakterisierung durchgeführt. Dafür wird der Wafer per Vakuum Ansaugung auf einer temperaturgeregelten Oberfläche fixiert und die einzelnen Chips über Kontaktnadeln kontaktiert. Die Ausgangsleistung wird in eine Ulbricht-Kugel geleitet und dann von einer Photodiode gemessen. Zusätzlich ist es möglich spektrale Messungen durchzuführen. Diese Messung auf Waferlevel gibt eine erste Rückmeldung ob die prozessierten VCSEL Chips zufriedenstellende Performance zeigen. Tiefergehende Messungen wie Umweltstabilität und Lebensdauer können auf diesem Level nicht praktikabel durchgeführt werden (z.B. notwendige Befestigung von Bonddrähten, destruktive Messungen). Für eine weitere Evaluation werden einzelne VCSEL Chips auf Messboards aufgebaut. Zuvor müssen die auf dem Wafer befindlichen VCSEL Chips vereinzelt werden. Hierfür wird der Wafer oder Teile eines Wafers auf ein Tape geklebt, und dann entlang der geätzten Bereiche (siehe Schritt (12) im Vollprozess) gesägt. Das Tape sorgt dabei dafür, dass die VCSEL Chips in Position bleiben. Nach dem Sägen ist es dann möglich von dem Tape einzelne Chips zu picken.

3.3 Unterauftrag CNR zur Simulation

Mit dem italienischen CNR-IEIT (Institute of Electronics and Information and Telecommunications Engineering) in Turin wurde im Rahmen von Qyro eine Kooperation vereinbart. Die Arbeitsgruppe um Prof. Pierluigi Debernardi zeichnet sich seit 25 Jahren durch herausragende, theoretische Publikationen zu Polarisations- und Modenkontrolle bei VCSELn aus. Die bestehenden Simulationsumgebungen wurden im Rahmen der Kooperation weiterentwickelt und erfolgreich auf die in Qyro angedachten VCSEL angewandt.

Parameter für Gitter und Reliefs konnten durch Simulationen optimiert werden. Insbesondere die neuartige Fragestellung einer linearen Mode mit mehreren Maxima konnte so erstmals simuliert und verstanden werden. Die wesentliche mathematische Schwierigkeit besteht dabei in der nicht-rotationssymmetrischen Geometrie. Hervorzuheben ist hier der zuerst theoretisch vorhergesagte Vorteil einer Phasenkorrektur zur Verbesserung des Fernfeldes, welche im Projekt Qyro experimentell verifiziert werden konnte und Einzug in die finalen Demonstratoren im Satelliten findet. Diese Innovation wurde auch zum Patent angemeldet. Wesentliche Methoden und Ergebnisse sind in Veröffentlichungen und Doktorarbeiten zusammengefasst [1,2].

Die ebenfalls neue Verwendung gestapelter Aktivschichten konnte mit weiteren Simulationswerkzeugen in Turin untersucht und optimiert werden. So konnte insbesondere die Notwendigkeit des in Abschnitt 3.9 beschriebenen „Hole-Blocking-Layers“ vorhergesagt werden und durch die gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment die Skalierungsgrenzen von gestapelten Aktivschichten aufgezeigt werden.

Wesentliche Methoden und Ergebnisse sind in gemeinsamen Veröffentlichungen und Doktorarbeiten zusammengefasst [3] und werden in Abschnitt 3.9 näher erläutert.

3.4 Stabilisierung Monomode und Polarisation

Aufgrund ihrer kurzen effektiven Kavitätslänge von typischerweise etwa $1\mu\text{m}$ ist der spektrale Modenabstand von VCSELn so groß, dass sich nur eine longitudinale Mode im Wellenlängenbereich des Stoppbandes der hochreflektierenden DBR-Spiegel befindet. Nur diese erfüllt die Laserbedingungen einer optischen Verstärkung durch das optisch aktive Medium und einer zugleich starken optischen Rückkopplung durch die hohen Spiegelreflektivitäten. Daher werden VCSEL im Allgemeinen nur in einer einzigen longitudinalen Mode betrieben und sind somit in longitudinaler Richtung monomodig.

In VCSELn mit Oxidlage zur elektrischen und optischen Führung wird der Resonator lateral durch den bei der Oxidation herabgesetzten Brechungsindex der Oxidationslage definiert. Für rotationssymmetrische Resonatorgeometrien bilden sich vorzugsweise Laguerre-Gauß-Moden in dem effektiven Wellenleiter aus. Diese Moden haben verschiedene laterale Intensitätsprofile und einen entsprechenden Überlapp mit dem Innenbereich und dem blauverschobenen Außenbereich des Resonators, woraus sich eine spektrale Aufspaltung der Moden ergibt. Für viele Anwendungen wie in der Spektroskopie ist monomodiger Laserbetrieb erforderlich, das heißt Emission in ausschließlich einer transversalen Mode. Es existieren verschiedene Ansätze, mit denen ein solcher monomodiger VCSEL realisiert werden kann. Der einfachste Ansatz besteht darin, die Apertur so klein zu machen, dass lediglich die gaußförmige Grundmode anschwingen kann [3]. Typischerweise benötigen VCSEL dafür einen Aperturdurchmesser von etwa $3\mu\text{m}$. Die kleine Apertur führt jedoch auch zu einem hohen elektrischen Widerstand, welcher aufgrund der ausgeprägten strominduzierten Selbsterwärmung die maximal zu erzielende Ausgangsleistung reduziert. Eine der erfolgreichsten Techniken um inhärent multimodige VCSEL durch modenselektive Elemente monomodig zu machen sind sogenannte invertierte Oberflächenreliefs. VCSEL mit größerer Apertur werden auf den Auskoppel-DBRs mit einer zusätzlichen Viertel-Materialwellenlänge dicken epitaktischen Lage versehen, wodurch die Reflektivität des DBRs stark reduziert wird. Anschließend wird oberhalb der Apertur auf der Auskoppel-Facette ein Oberflächenrelief eingebracht, wo diese zusätzliche Lage lokal wieder entfernt wird. Durch diesen Vorgang ist die Reflektivität des DBRs nur lokal direkt oberhalb der Apertur stark erhöht, sodass die Grundmode genügend optische Rückkopplung erfährt, während transversale Moden höherer Ordnung mit größerer lateraler Ausdehnung eine erheblich reduzierte optische Rückkopplung erfahren und so unterdrückt werden.

Die transversalen Moden in VCSELn lassen sich weiter unterteilen in je zwei orthogonale, linear polarisierte Moden. Aufgrund der Rotationssymmetrie von VCSELn ist das Polarisationsverhalten von VCSELn instabil und Polarisationssprünge treten auf. Um eine Polarisationsrichtung zu bevorzugen, müssen polarisationsselektive Elemente eingeführt werden. Ein erfolgreicher Ansatz besteht in monolithischen Gittern, die auf der Auskoppel-

Facette des Lasers eingebracht werden und typischerweise eine Gitterperiode unterhalb der Materialwellenlänge haben [4]. Ein solches Gitter mit präzise gewählter Ätztiefe und Füllfaktor lässt sich als effektive Schicht beschreiben mit verschiedenen Brechungsindizes für die Moden mit den zwei verschiedenen Polarisationsrichtungen, wodurch eine Polarisationsrichtung eine starke Auskopplung und somit Unterdrückung erfährt und nur die andere Polarisationsrichtung anschwingen kann. Solche Gitter werden typischerweise per Elektronstrahl-Lithographie oder Nanoimprint Lithographie realisiert.

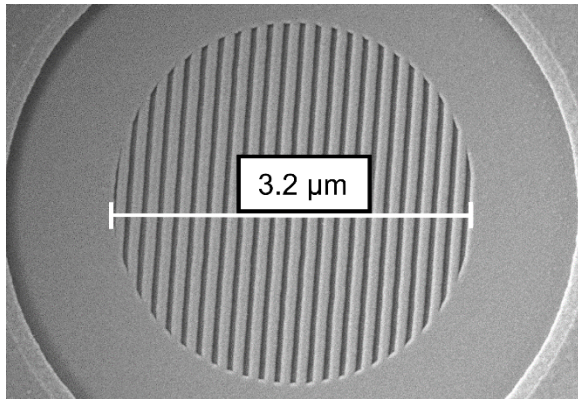


Abbildung 6: REM-Bild eines Gitter-Reliefs auf der Auskoppelfacette eines VCSELs zur Kontrolle der transversalen Moden und der Polarisierung

Für viele Anwendungen werden sowohl transversal monomodige als auch linear polarisierte VCSEL benötigt. Dafür hat sich der erfolgreiche Ansatz etabliert, ein invertiertes Oberflächenrelief und ein Gitter zu kombinieren. Diese Kombination besteht darin, statt des Reliefs ein Gitter lokal mit kleinem Durchmesser auf der Auskoppelfacette oberhalb der Apertur einzubringen, und wird entsprechend Gitter-Relief genannt. Dieser Ansatz wird im Projekt QYRO maßgeblich verwendet, um monomodige VCSEL mit linearer Polarisation herzustellen. Das REM-Bild eines realisierten Gitter-Reliefs aus dem Projekt QYRO ist in Abbildung 6 zu sehen.

3.5 Einzelemitter für Probe (Ergebnisse in 3.7)

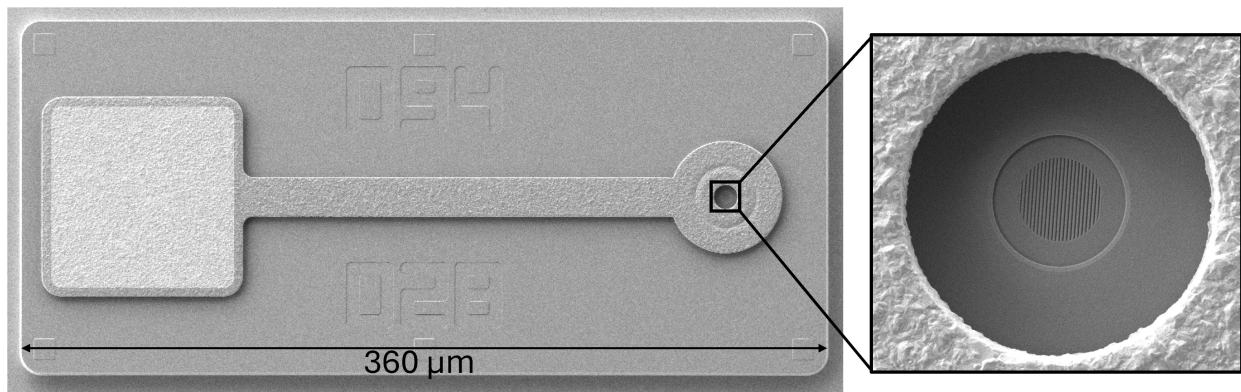


Abbildung 7: REM-Aufnahmen eines VCSEL-Chips mit Gitter-Relief zur Monomodens-Stabilisierung. Der gesamte Chip (links) und eine vergrößerte Aufnahme der Auskoppel-Facette.

Basierend auf den in Kap. 3.4 eingeführten Prinzipien der Moden- und Polarisations-Stabilisierung werden VCSEL mit Gitter-Reliefs entwickelt. Exemplarisch sind in Abbildung 8 REM-Aufnahmen vom gesamten Chip inklusive Bondpad, Stromzuleitung und Auskoppel-Facette dargestellt. Mit einem fokussierten Ionenstrahl wurde ein Schnitt durch den Bereich der Auskoppel-Facette vorgenommen. Die REM-Aufnahme in Abbildung 8 zeigt den Querschnitt durch die Schichtstruktur, wobei die Oxidapertur mit

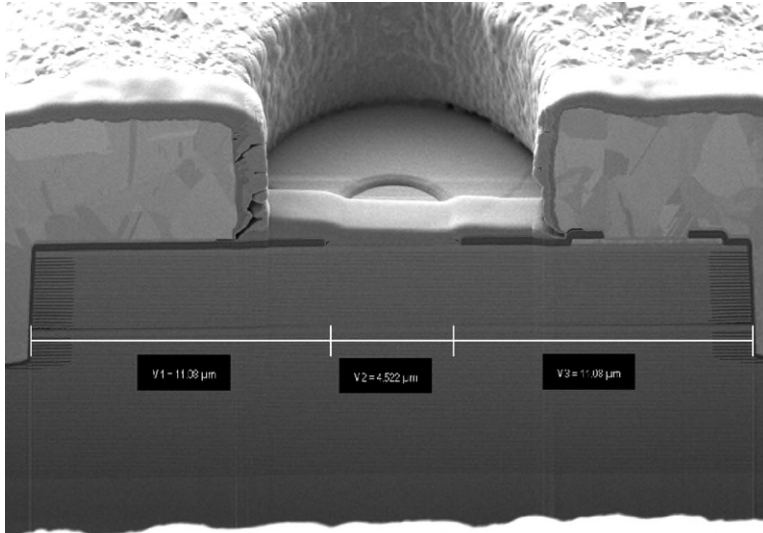


Abbildung 8: REM-Aufnahme des mit einem fokussierten Ionenstrahl (FIB) freigelegten Querschnitts des VCSELs mit Gitter-Relief im Bereich der Auskoppel-Facette. Die Oxidapertur ist mit 4.5 µm bemaßt.

4.5 µm bemaßt wurde und damit eine größere Fläche aufweist als das Relief. Diese 4.5 µm stellen den Bereich der Lichterzeugung dar, darüber befindet sich der p-DBR, darunter der n-DBR und das Substrat. Zu mehr Details hinsichtlich epitaktischem Design siehe Kap. 3.1, zu Chip-Design siehe Kap. 3.2.

3.6 Höhere Mode zur Leistungskalierung

Auch VCSEL mit größeren Aperturflächen und nicht-rotationssymmetrischen Aperturen bilden vielfältige

Moden aus. Diese Moden verlaufen nicht senkrecht zur Waferoberfläche sondern können auch durch Ebene Wellen beschrieben werden, die sich unter einem Winkel durch die Kavität bewegen [5]. Insbesondere stark elongierte Rechtecke erlauben verbesserte Strominjektion und Wärmeabfuhr und damit maximale Ausgangsleistung [6].

Durch Interferenz bilden sich Stellen mit erhöhter Intensität aus. Durch diese räumliche Charakteristik der verschiedenen Moden kann durch Gitter-Reliefs lokal die Reflektivität modifiziert und dadurch bestimmte Moden selektiert werden.

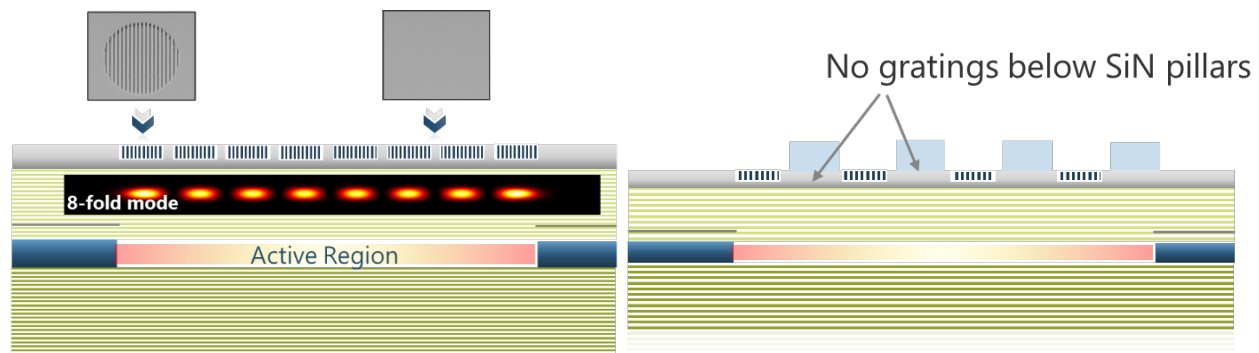


Abbildung 9: Illustration einer Struktur mit Gitter-Relief zur Stabilisierung einer Mode mit 8 Maxima entlang einer Linie. Links das gegenphasige Design und rechts das Design mit zusätzlichen SiN Pfeilern als Phasenmaske für gleichphasige Maxima und Emission auf der optischen Achse.

Diese Moden haben aufgrund der Gegenphasigkeit nebeneinander liegender abstrahlender Bereiche im Fernfeld die Hauptintensität symmetrisch außerhalb der optischen Achse angeordnet. Dies ist für viele Anwendungen, so auch für das Projekt QYRO, nicht ideal.

Theoretisch wurde vorhergesagt, dass durch eine gezielte Phasenverschiebung jedes zweiten auskoppelnden Bereichs das Fernfeld umgeformt und auf die optische Achse verlegt werden kann [1]. Dies wurde über SiN-Bereiche mit einer Dicke einer Viertelwellenlänge realisiert, die jedes zweite Gitter-Relief ersetzen [7].

Bei der genauen Auslegung der Reliefstruktur und der Wahl der optimalen Dicke der Elemente zur Phasenverschiebung waren die in 3.3 erwähnten Simulationsmodelle sehr hilfreich. Diese erlauben unter Einbeziehung der Selbsterwärmung auch eine Korrektur der „kalten“ Strukturen unter Berücksichtigung der sich bildenden thermischen Linse, welche das Modenprofil verzerrt.

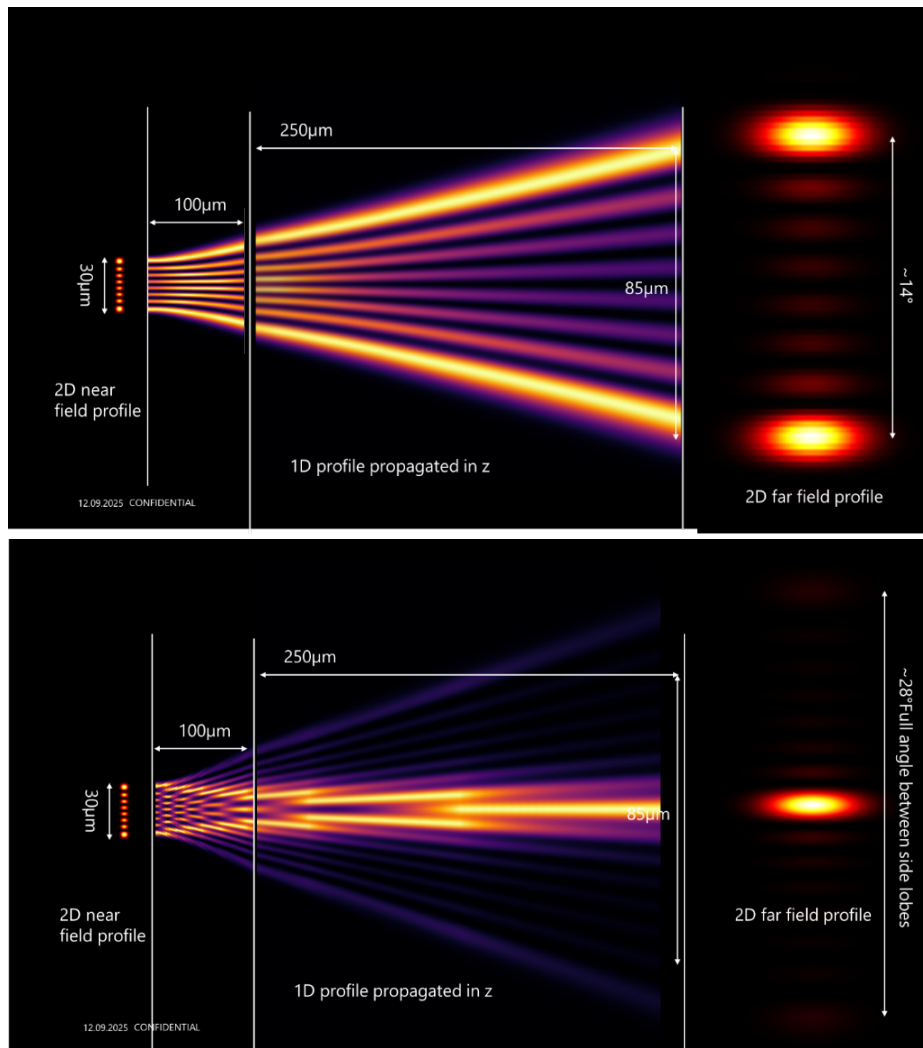


Abbildung 10: Strahlprofil in Abhängigkeit vom Abstand zum VCSEL. Oben bei dem üblichen gegenphasigen Modenprofil und unten bei einem korrigierten, gleichphasigen Profil.

Die in Abbildung 10 unten realisierte Abstrahlcharakteristik mit einem Maximum im Fernfeld ist optisch gut nutzbar und wird im Projekt Qyro verwendet.

3.7 Charakterisierung der Qyro Muster

Einzelemitter für Probe

Für den Einsatz als Probe in Qyro werden monomodige, polarisationsstabile VCSEL mit einer Ausgangsleistung von etwa 2 mW benötigt. Abbildung 11 illustriert anhand zweier Spektren einen multimodigen VCSEL mit zwei Transversalmoden hoher Intensität und einen monomodigen VCSEL mit einer stark dominanten Grundmode. Die Grenze, ab der von Monomodigkeit gesprochen wird, wird häufig bei einem Seitenmodenunterdrückungsverhältnis von 20 dB gezogen.

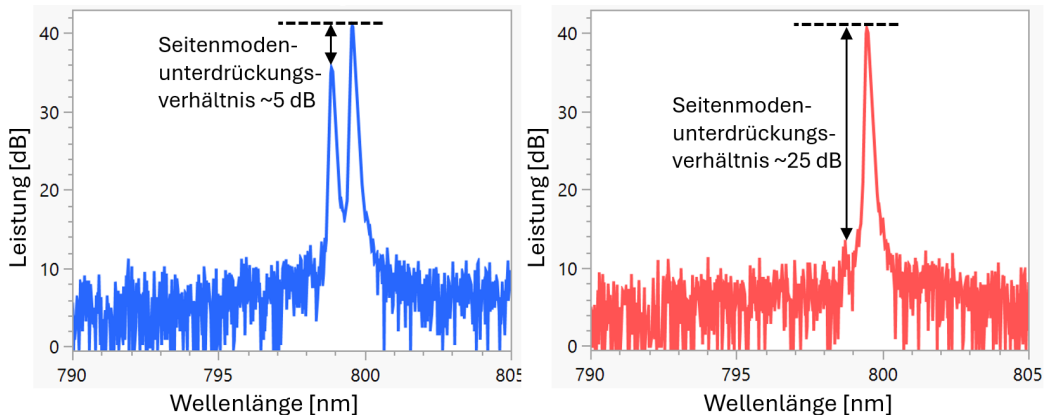


Abbildung 11: Spektren von Einzelemittlern zur Illustration des Seitenmodenunterdrückungsverhältnisses. Multimodiger VCSEL mit zwei intensiven Moden (link) und monomodiger VCSEL mit einem Seitenmodenunterdrückungsverhältnis von 25 dB (rechts).

Entsprechend Kap. 3.5 wurden Einzelemitter mit Variationen von Aperturdurchmesser zu Gitter-Relief-Durchmesser gefertigt. Abbildung 12 stellt LIV-Messungen für VCSEL mit einem Aperturdurchmesser von 4,5 μm und drei verschiedenen Gitter-Relief-Durchmessern dar. Die Messpunkte sind abhängig von der spektralen Information über die Leistung der Transversalmoden farblich kodiert – rot gefärbte Punkte repräsentieren Monomodigkeit während blaue Punkte eine Multimodigkeit darstellen. Dieser Graph illustriert somit wesentliche Design-Randbedingungen: Wird der Gitter-Relief-Durchmesser im Verhältnis zur Apertur zu groß gewählt, so ist der laterale, räumliche Überlapp mit anderen Moden höherer Ordnung zu ausgeprägt, sodass diese bei etwas höherem Pumpstrom anschwingen können. Wird hingegen das Gitter zu klein gewählt, ist der VCSEL zwar monomodig, jedoch vergrößert sich der Schwellstrom deutlich und die maximale Gesamtleistung und somit auch Effizienz wird reduziert.

In einer größeren Parameterstudie wurde der Aperturdurchmesser von 3,5 μm bis 5,5 μm variiert und die Gitter-Relief-Durchmesser von 3,0 μm bis 4,5 μm . Analog zu obiger Darstellung werden die LIV-Kurven und fein aufgelöste Spektren aufgenommen und bezüglich des Seitenmodenunterdrückungsverhältnisses ausgewertet. Es stellt sich heraus, dass grundsätzlich mit dem optimalen Gitter-Relief-Durchmesser bei all diesen Aperturdurchmessern mit dem optimalen Gitter-Relief ähnliche optische Ausgangsleistungen im monomodigen Betrieb realisierbar sind. Die Wahl des

bevorzugten Designs für die Probe-Anwendung wird für beide Parameter in der Mitte der oben genannten Parameterräume festgelegt. Zu kleine Aperturdurchmesser stellen wie bereits in Kap. 3.4 beschrieben ein Problem aufgrund der hohen Stromdichten dar und führen so zu beschleunigter Degradation. Zudem ist aufgrund der notwendigen kleinen Toleranzen die kontrollierte Produktion solcher kleiner Aperturdurchmesser schwierig. Auf

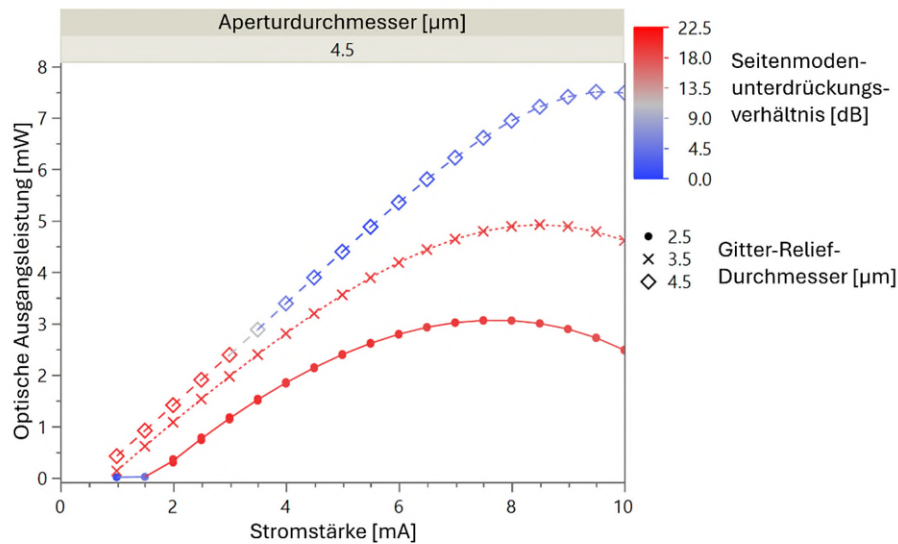


Abbildung 12: LIV-Kurven von VCSELn mit 4,5 µm Aperturdurchmesser und verschiedenen Grating-Relief-Durchmessern bei 20°C. Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis ist farbig hinterlegt.

der anderen Seite sollte der Aperturdurchmesser auch nicht zu groß werden, da die Modenausdehnung wurzelförmig mit dem Aperturdurchmesser skaliert und so das Gitter relativ kleiner sein muss, wodurch es zunehmend größere gepumpte aber ungenutzte Bereiche am Rand der Apertur gibt.

Messungen des als Optimum beschriebenen VCSEL-Designs sind in Abbildung 13 dargestellt. Für einen großen Temperaturbereich von 30°C bis 80°C sind Leistungen von 2 mW bis zu 4,5 mW erzielbar. Die dargestellten Spektren für verschiedene Stromstärken demonstrieren die Monomodigkeit des VCSELs.

Messungen des als

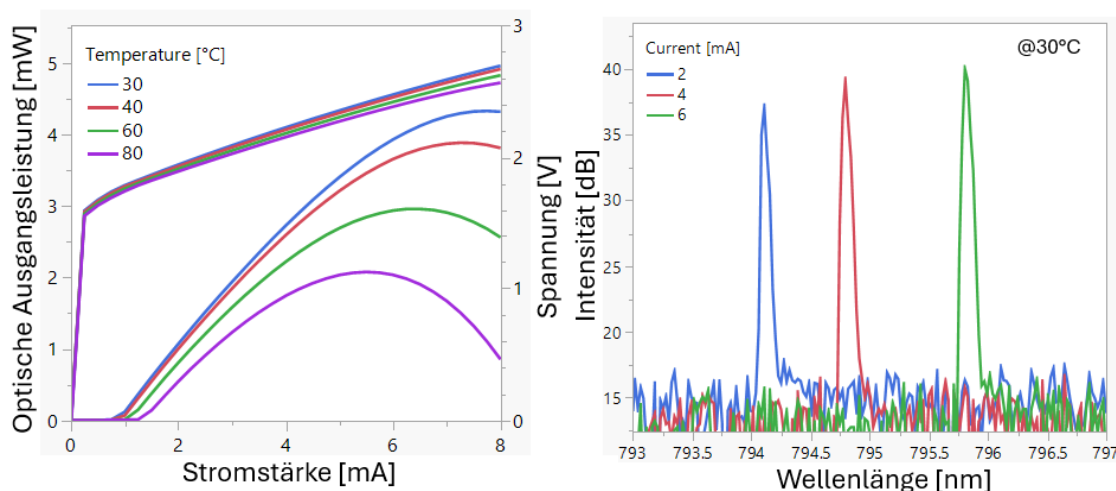


Abbildung 13: Elektro-optische Charakterisierung des VCSELs für Probe-Anwendung für verschiedene Temperaturen (links). Zudem sind die Spektren für 30°C bei verschiedenen Strömen dargestellt (rechts) und demonstrieren dessen Monomodigkeit.

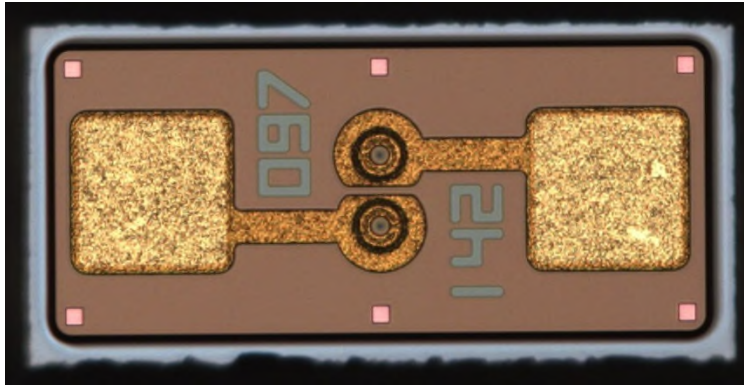


Abbildung 14: Chip mit zwei symmetrisch angeordneten VCSELn mit separaten Bondpads.

Aufgrund der für eine Weltraummission kritischen Frage nach Lebensdauer und Ausfallsicherheit wurde zusätzlich ein Chip entwickelt, der einen redundanten VCSEL in symmetrischer Anordnung enthält, siehe Abbildung 14. Tatsächlich konnte gezeigt werden, dass beide Mesen innerhalb der Messgenauigkeit der Spektrometer von etwa 0.1nm

identische spektrale und elektrooptische Eigenschaften aufweisen, was aufgrund der räumlichen Nähe der VCSEL-Mesa auf dem Wafer auch zu erwarten war. Damit gibt es mit dieser Art von Chip eine realistische Option, Redundanz direkt auf dem Chip zu verbauen und so die Ausfallsicherheit des Systems deutlich zu erhöhen.

Linienbreite und Polarisation

Kontinuierliche Messungen aller erstellten Wafer in der Fertigung erlauben hier nur einen ersten (zufriedenstellenden) Eindruck, genauere Messungen wurden für einzelne VCSEL durchgeführt:

- Die Linienbreite des VCSELs darf die Breite der Rubidium Zustände nicht überschreiten, im Idealfalle sollte sie nur wenige 100MHz betragen. Zur genaueren Messung wurde ein selbst-homodynes Experiment mit einer 1km langen Faser aufgebaut. Die Schwebungsfrequenz zwischen dem direkten Signal und dem deutlich mehr als die Kohärenzlänge verzögerten Signal erlaubt einen Rückschluss auf die Linienbreite/Kohärenzlänge. Messungen an VCSELn in der Fundamentalmode und einer stabilisierten Mode höherer Ordnung ergaben jeweils Linienbreiten in der Größenordnung von 10MHz. Damit wurde die Spezifikation deutlich übererfüllt.
- Die Messung der Polarisation ergab im Laboraufbau mit separatem Polarisator eine Unterdrückung der unerwünschten Polarisationsrichtung um >30dB. d.h. die Beimengung der unerwünschten Polarisation ist geringer als 0,1%. Im Gyroskop bei Qyro wäre dieser Anteil lediglich ein Verlust und somit sind 0.1% ein sehr gut innerhalb der Anforderungen liegender Wert. Die Linienbreite der nicht lasenden Mode ist übrigens wesentlich größer (mehrere GHz) als die oben erwähnte Linienbreite, was ein weiteres Indiz für die erhöhten Verluste darstellt, die durch das Gitter-Relief induziert werden.

Einzelemitter für Pump

Der VCSEL, der für den Einsatz als Pumplaser gedacht ist, benötigt eine hohe monomodige Ausgangsleistung von etwa 10 mW, was neue Konzepte gegenüber dem

rotationssymmetrischen VCSEL mit Gitter-Relief erfordert. Insbesondere bieten sich hier VCSEL mit großer Apertur und Gitter-Reliefs als Modenselektions- und kontrollelementen an. Wie bereits näher in Kap. 3.6 beschrieben, wird dafür eine längliche, rechteckige Mesa verwendet und eine Mode mit acht linear angeordneten Stellen hoher Intensität durch Gitter-Reliefs selektiert. Ein solcher VCSEL-Chip ist in Abbildung 15 dargestellt. Ebenfalls in Kap. 3.6 ist dargestellt, dass das Fernfeld dieses VCSELS ungünstig ist, da die Hauptintensität in zwei Strahlen unter einem Winkel von einigen Grad abseits der Strahlachse abgestrahlt wird. Um dieses Problem zu lösen, wurde jedes zweite Gitter-Relief durch eine SiN-Schicht entsprechender Dicke ersetzt. Dies verursacht eine Phasenverschiebung von 90° an jedem zweiten Maximum der Auskoppelung, wodurch in der Überlagerung im Fernfeld die Hauptintensität des Strahls auf der Strahlachse sitzt. Ein solcher VCSEL-Chip ist in Abbildung 15 rechts zu sehen.

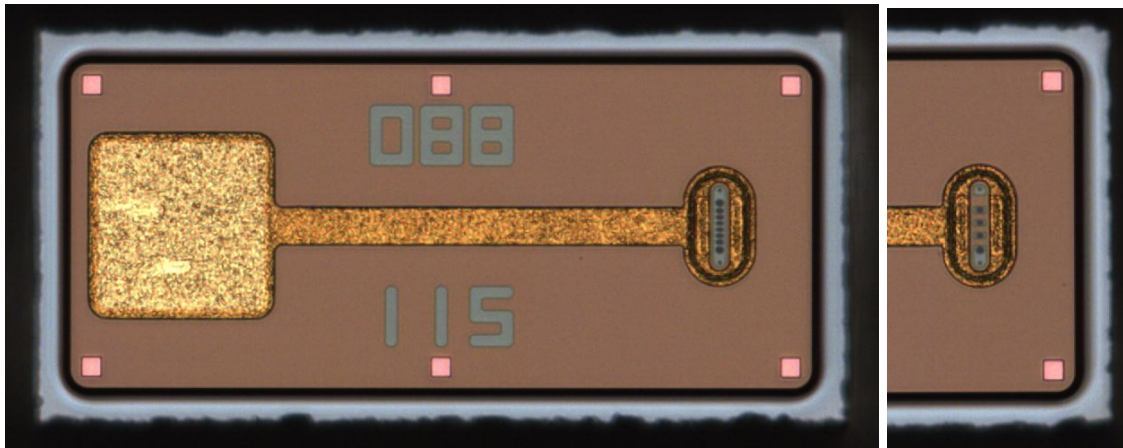


Abbildung 15: Foto eines Chips mit einem VCSEL großer OA und Gitter-Reliefs zur Kontrolle einer Mode höherer Ordnung. Rechts die Version mit Phasenverschiebungs-Bereichen zur Fernfeld-Umformung für eine höhere Intensität auf der Strahlachse

Die elektro-optischen Charakteristika beider VCSEL-Varianten sind in Abbildung 16 zu sehen. Während der VCSEL ohne Phasenkorrektur eine etwas höhere Ausgangsleistung zeigt und länger monomodig bleibt, können beide VCSEL-Designs eine monomodige Ausgangsleistung von über 10 mW erreichen und eignen sich somit für den Einsatz als Pumplaser im Projekt QYRO [8]. In Abbildung 17 sind die Fernfelder der beiden VCSEL-Designs bei 18 mA dargestellt und demonstrieren die vorher bereits diskutierten Fernfeld-Charakteristika. Polarisationsaufgelöste Nahfeldmessungen bei 30°C und 15 mA zeigen für beide VCSEL-Designs einen hohen linearen Polarisationsgrad nahe 100%.

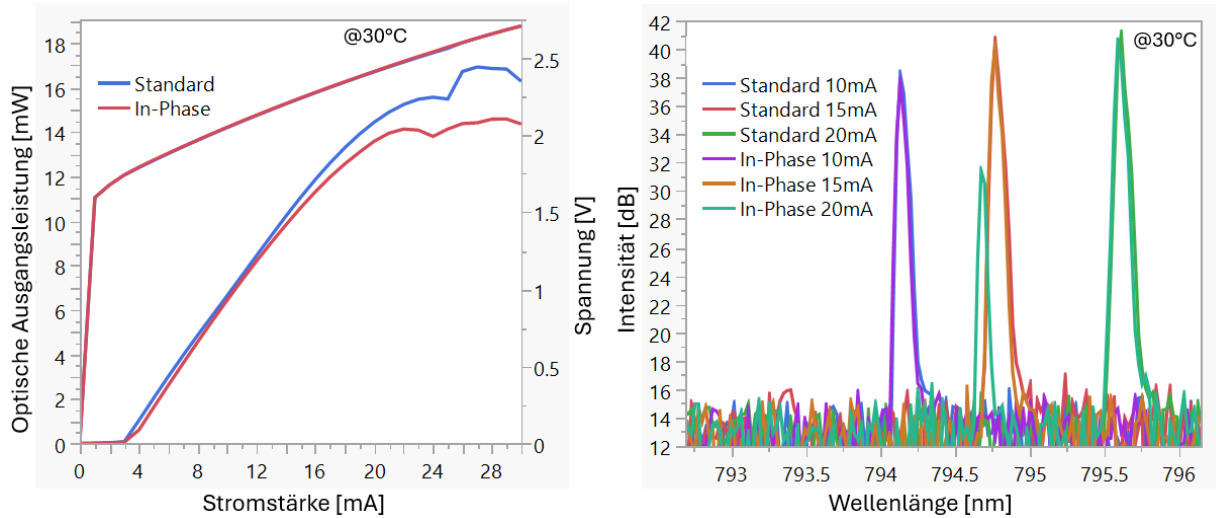


Abbildung 16: Elektro-optische Charakterisierung der VCSEL mit Kontrolle einer Mode höherer Ordnung (Standard-Version und phasenkorrigierter Variante mit Hauptintensität auf der Strahlachse). LIV-Kurven zeigen eine hohe Ausgangsleistung bis etwa 16 mA mit etwas verringerter Intensität der In-Phase-Variante (links). Die Spektren bei verschiedenen Strömen demonstrieren Monomodigkeit, wobei die In-Phase-Variante bei 20 mA bereits einen Multimoden-Übergang vollzogen hat (rechts).

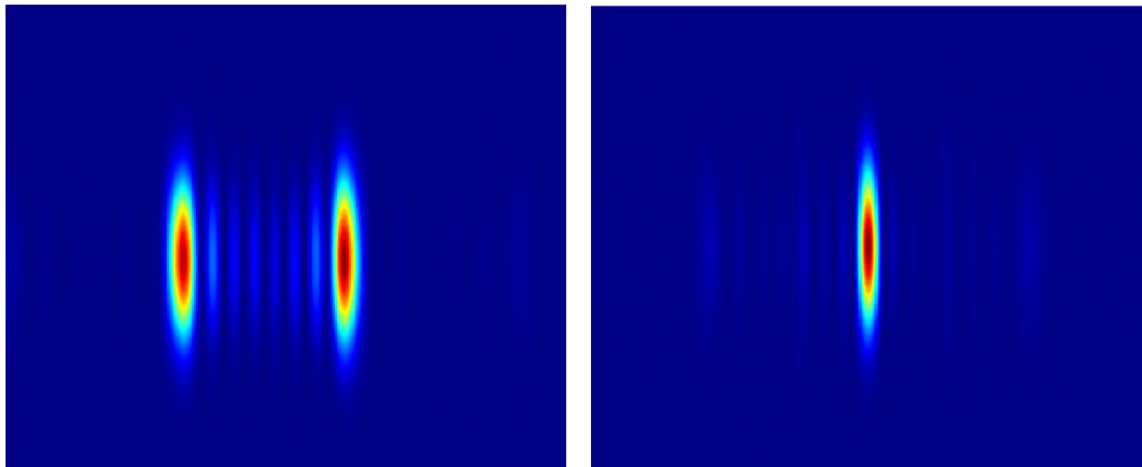


Abbildung 17: Gemessene Fernfelder der Standard-Version des VCSELs mit Stabilisierung der Mode höherer Ordnung mit zwei Teilstrahlen unter einem Winkel zur optischen Achse (links) sowie dem In-Phase-Design mit der Hauptintensität auf der optischen Achse (rechts) bei 18 mA.

3.8 Laser Qualifikation

Umwelt und Lebensdauertests wurden an einer reduzierten Auswahl von VCSELn durchgeführt. Nach dem Sägen können vom Tape einzelne Chips entnommen werden. Diese werden auf ein Messboard mit leitfähigem Kleber aufgeklebt. Der Topkontakt wird über Wirebonding hergestellt, bei dem ein Golddraht mittels Ultraschalls und Kräfteintrag mit dem Bondpad verbunden wird. Die für die Qualifikation verwendeten Boards werden jeweils mit 30 Bauteilen bestückt.

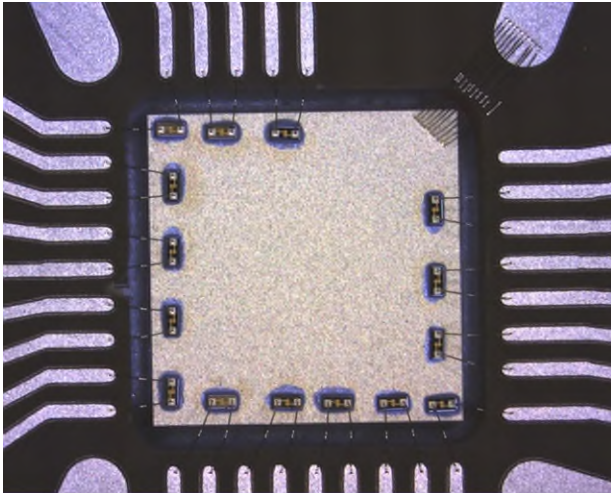


Abbildung 18: Aufnahme eines Messboards nach dem Bonding Prozess. Hier werden VCSEL mit 2 Topkontakten kontaktiert, sodass nur eine kleinere Anzahl an Bauteilen verwendet werden kann.

mit den aufgebauten VCSEL Chips in eine Kammer wo sie für 96 h einer Luftfeuchtigkeit von 85% und einer Temperatur von 130°C ausgesetzt sind. Die Laser sind während dieser Zeit nicht elektrisch aktiv. Nach dem Test wird das Board aus der Kammer genommen und ein weiteres Mal charakterisiert. Sind die Änderungen in der gemessenen Ausgangsleistung und der gemessenen Laserspannung kleiner als 10% gilt der Test als bestanden. Dieser Test wurde für das Design des Probe Lasers (single-emitter) und für das Design des Pump Lasers (Line-emitter) durchgeführt. Für beide Tests lag die Änderung nach der Beanspruchung bei < 5%. Somit konnte die Dichtigkeit, die für das Qyro Projekt verwendeten Chips bestätigt werden.

TESH

Bei einem TESH Test werden die montierten Laser zuerst elektropotisch charakterisiert. Anschließend wird in eine Kammer für 250 Zyklen die Temperatur zwischen -40°C und 120°C variiert, wobei die Temperatur bei den äußeren Extrempunkten jedes Mal für 10 Minuten gehalten wird. Die Laser sind während dieser Zeit nicht elektrisch aktiv. Nach dem Test werden die VCSEL ein weiteres Mal charakterisiert. Sind die Änderungen in der gemessenen Ausgangsleistung und der gemessenen Laserspannung kleiner als 10% gilt der Test als bestanden. Dieser Test wurde für das Design des Probe Lasers (single-emitter) und für das Design des Pump Lasers (Line-emitter) durchgeführt. Für beide Tests lag die Änderung nach der Beanspruchung bei < 5%. Somit konnte die Anforderung der Temperaturrobustheit bei Lagerung der für das Qyro Projekt verwendeten Chips bestätigt werden.

Lebensdauer

Für das Qyro Projekt müssen die Laser eine Lebensdauer von > 4500 h bei Arbeitsbedingungen erfüllen. Die Schwierigkeit beim Testen von langen Lebensdauern

Zur Bestimmung der Umweltstabilität müssen 2 Arten destruktiver Messungen durchgeführt werden. Zum einen der sogenannte HAST Test, bei dem die VCSEL Chips erhöhter Luftfeuchtigkeit und Temperatur ausgesetzt werden. Dieser Test zeigt, ob die Versiegelung des Chips vollständig ist. Zum anderen wird ein sogenannter TESH Test durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Laser nach der Lagerung bei hohen bzw. niedrigen Temperaturen zu prüfen.

HAST

Bei einem HAST Test werden die montierten Laser zuerst elektropotisch charakterisiert. Danach kommt das Board

liegt in der langen Testzeit, welche in einem sogenannten beschleunigten Lebensdauererprobungstest (Accelerated lifetime test, ALT) verkürzt werden kann. Hierbei werden VCSEL bei verschiedenen, erhöhten Stressbedingungen (Variation von Stresstrom und Stresstemperatur) getestet. Die Stressparameter müssen allerdings so gewählt werden, dass man sich im linearen Bereich der Laserkurve befindet, also ideal knapp unterhalb des Überroll-Punkts. Für eine aussagekräftige Matrix müssen mindestens 5 verschiedene Strom/Temperaturvariationen getestet werden. Ein typisches Fehlerkriterium ist hierbei eine Leistungsänderung an einem bestimmten Stromwert von $\geq 10\%$. Erst nach ausreichender Degradation ist es möglich ein Lebensdauermodell zu erstellen.

Es wurden ALT Tests für verschiedene Epi Designs mit einer aktiven Zone des Grunddesigns und modifiziertes Design (siehe auch Kap. 3.1) für den Probe und den Pump Laser durchgeführt. Für den Probe Laser mit dem Epi-Grunddesign konnte für das Zieldesign des Lasers mit $4,5\mu\text{m}$ optischer Apertur und $3,5\mu\text{m}$ Gitterdurchmesser mit den Arbeitsbedingungen 3 mA ($\sim 2\text{ mW}$) und 30°C Rückseitentemperatur für ein Konfidenzintervall von 95% eine erwartete Lebensdauer von 12000 Stunden ermittelt werden. Diese Variante übererfüllt bereits die Spezifikation.

Das modifizierte Epi Design mit verschobener Oxidblende wurde umgesetzt, um Spannungserhöhung zu korrigieren und eine evtl. noch höhere Lebensdauer zu realisieren. Dieses Design zeigt auch nach 5000 Stunden bei erhöhtem Stress keine ausreichende Degradation, um ein abschließendes Lebensdauermodell zu erstellen. Eine Messung bei vergleichbaren Stressbedingungen zeigt aber bereits deutlichen Fortschritt. Die zugehörigen LIVs nach Alterung bei 70°C und 4 mA sind in Abbildung 19 zu sehen. Die Modifikation der Oxidblende reduziert nicht nur signifikant die Degradation der Ausgangsleistung sondern auch den Anstieg der Spannung. Damit liegt die zu erwartende Lebensdauer der finalen Bauelemente bei $\gg 12000\text{h}$.

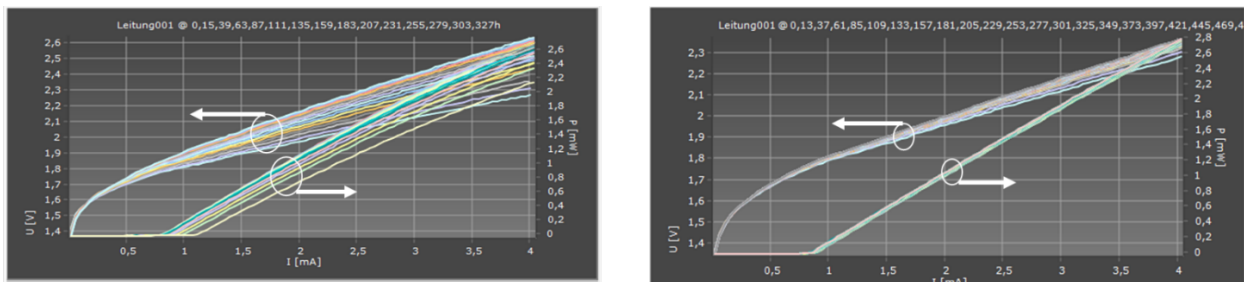


Abbildung 19: Exemplarische LIV des Einzelmitters für Probe, gemessen bei 40°C und 4 mA , nach erhöhtem Stress im ALT Test bei 70°C und 4 mA für das Grunddesign (links) und das modifizierte Design (rechts).

Auch für Tests an den Pump Laser Designs mit dem modifizierten Epi Design sehen wir nach 3700 h unter repräsentativen Stressbedingungen keinerlei Degradation sowie auch keine Änderung des Modenzustands. Die zugehörigen LIVs nach Alterung bei 40°C und 16 mA sind in Abbildung 20 zu sehen.

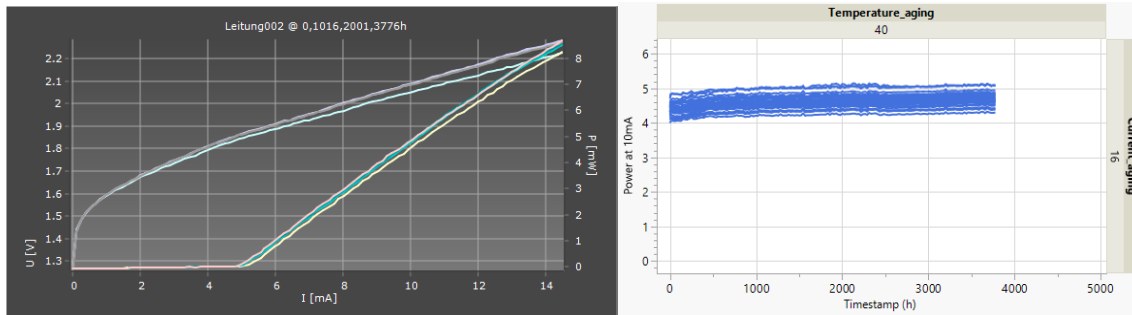


Abbildung 20: Exemplarische LIV des Pump VCSELS (links) und Leistung aller VCSEL auf einem Messboard (rechts), nach Alterung bei 40°C und 16 mA.

Zusammenfassend kann man sagen, dass für beide Anwendungen der VCSEL in Qyro eine kalkulierte Lebensdauer weit über der mindestens benötigten Lebensdauer von 4500 Stunden gezeigt werden konnte.

3.9 Vertikale Stapelung zur Leistungsskalierung

Ein Konzept, mit dem in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt wurden, ist die vertikale Stapelung mehrerer laseraktiver Bereiche, die über Tunnelnioden elektrisch miteinander verbunden werden. Dies hat zur Folge, dass pro eingebrachtem Elektron-Loch-Paar mehrere Photonen erzeugt werden können. Durch mehrere, gestapelte aktive Zonen ist insgesamt mehr aktives Medium mit entsprechender optischer Verstärkung vorhanden, wodurch die optische Rückkopplung, d.h. der Auskoppel-DBR in seiner Reflektivität und somit die Anzahl der Spiegelpaare reduziert werden kann. Es wurde publiziert, dass dies in extremen Ausführungen mit teilweise über 10 aktiven Zonen deutliche Steigerungen der Ausgangsleistung und Gesamteffizienz der VCSEL bewirken kann [9].

Für Wellenlängen unterhalb von 900 nm wurde jedoch bisher sehr wenig veröffentlicht. Je kürzer die Wellenlänge eines VCSELS, desto größer muss die Bandlücke der Quantengraben gewählt werden. Um Leckströme zu vermeiden, muss die Bandlücke der Barrieren entsprechend ebenfalls vergrößert werden. Damit die DBRs weiterhin transparent bleiben und um Band-zu-Band-Absorption im Sinne einer Doppelheterostruktur zu vermeiden, müssen auch die Bandlücken der Schichten mit niedrigem Aluminiumgehalt, d.h. kleiner Bandlücke entsprechend vergrößert werden. Eine Erhöhung des Aluminiumgehalts in diesen Schichten reduziert jedoch die elektrische und thermische Leitfähigkeit und reduziert den DBR-Kontrast, was eine grundsätzliche Herausforderung für VCSEL mit hoher Effizienz bei kurzen Wellenlängen darstellt.

Kontrolle der Oxidationsraten

Ein zu Anfang des Projekts wesentliches Problem bestand darin, dass die Oxidationslagen (je eine oberhalb jeder aktiven Zone) trotz gleicher Designs und gleicher Wachstumsbedingungen deutlich verschiedene Oxidationsraten aufwiesen. Tatsächlich zeigte insbesondere die Oxidationslage unterhalb der Tunnelnioden eine deutlich reduzierte Oxidationsrate, während die Oxidationslage oberhalb der Tunnelnioden

unbeeinträchtigt war. Es wurden viele verschiedene Teststrukturen gewachsen und eine Kantenoxidation durchgeführt, d.h. Oxidation eines Waferstücks, welches anschließend gespalten und dann unter dem Elektronenmikroskop die Oxidationsweite gemessen wird. Dadurch konnte der Einfluss von Gradierungsschichten um die Oxidationslage herum klar herausgearbeitet werden und eine Konfiguration gefunden werden, in der die Oxidationsraten der verschiedenen Oxidationslagen nahezu identisch sind. Dieses verbesserte Design wurde zum Patent angemeldet. Der Übergang von einer unkontrollierten Oxidation der unteren Oxidationslage hin zu einer deutlich verbesserten Kontrolle ist in Abbildung 21 exemplarisch dargestellt.

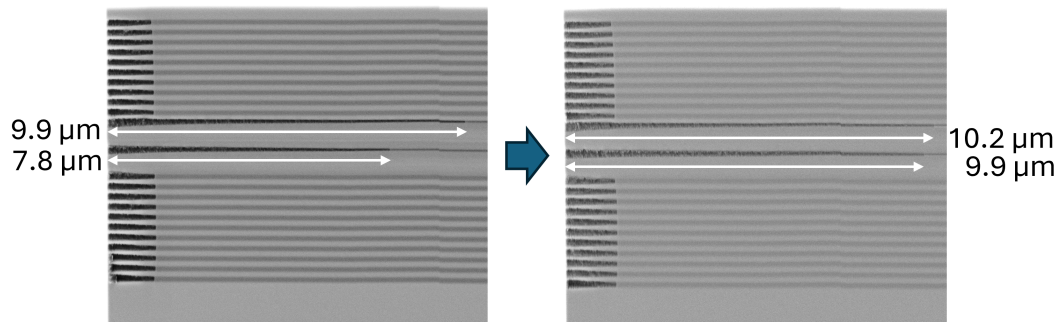


Abbildung 21: REM-Aufnahmen von kantenoxidierten Oxidations-Teststrukturen basierend auf vertikal gestapelten VCSELn mit reduzierten DBR-Spiegelpaaren und einer Tunnelodiode zwischen den Oxidationslagen. Eine deutlich reduzierte Oxidationsrate der unteren Oxidationslage ist in einer der ersten Strukturen zu sehen (links), während diese in einer der verbesserten Struktur nahezu identisch ist mit der oberen Oxidationslage (rechts).

In insgesamt 5 Iterationen wurden vielfältige Variationen von epitaktischen Designs durch das FBH gewachsen, mit anschließender Prozessierung mit dem neu entwickelten EQL Schnellprozess und experimenteller Evaluation durch TPC und begleitenden Simulationen durch das CNR.

Kontrolle von Leckströmen

Anfängliche Varianten von VCSELn mit vertikal gestapelten aktiven Zonen haben gegenüber dem Referenz-VCSEL mit nur einer aktiven Zone eine kaum erhöhte Steigung der Ausgangsleistung nach der Schwelle sowie ein frühes Überrollen mit deutlich reduzierter maximaler Ausgangsleistung und Gesamteffizienz gezeigt. Simulationen vom CNR haben darauf hingedeutet, dass erhebliche Leckströme von Löchern aus der oberen aktiven Zone in die Tunnelodiode dazu führen, dass fast nur die untere aktive Zone zur stimulierten Emission beiträgt, während die obere aktive Zone weitgehend inaktiv ist. Basierend darauf wurde eine Schicht zwischen Tunnelodiode und oberer aktiver Zone implementiert, die mit einer großen Stufe im Valenzband eine Energiebarriere für die Löcher darstellt, gleichzeitig durch ein Leitungsband beinahe ohne Stufe guten Elektronen-Transport aus der Tunnelodiode hinaus in die aktive Zone ermöglicht. Dies wurde in einer Variante durch eine dicke n-dotierte Lage mit großer Bandlücke realisiert, sowie in einer anderen Variante durch eine dünne Lage AlInGaP. Durch diese Maßnahme

wurde die VCSEL-Charakteristik erheblich verbessert – gegenüber der ersten gestapelten VCSEL ist die Laserschwelle etwas abgesunken, die Steigung der Ausgangsleistung wurde deutlich erhöht und die maximal erreichte Ausgangsleistung auf ein vergleichbares Niveau mit dem Referenz-VCSEL gesteigert (siehe Abbildung 22). Aufgrund der höheren Effizienz und Leistung wurde im Folgenden mit der AlInGaP-Lage gearbeitet.

Tunneldioden-Varianten

Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Design der Tunneldiode. Einerseits ist diese in sehr dünnen Bereichen sehr hoch p- und n-dotiert bis oberhalb von $1E19 \text{ cm}^{-3}$. Um starke Absorption durch die hohe Konzentration an freien Ladungsträgern zu vermeiden, muss die Tunneldiode im Knoten des Stehwellenfeldes platziert werden. Zudem ist die Materialwahl der Tunneldiode entscheidend. Ein Material mit einer kleinen Bandlücke ist für den Tunnelstrom und einen niedrigen Flächenwiderstand vorteilhaft, weshalb entsprechend für Wellenlängen oberhalb 900 nm GaAs verwendet wird. Wie die Kollegen vom CNR in Simulationen abschätzen konnten (siehe Kap. 3.3), würde jedoch eine GaAs-Tunneldiode mit starker Band-zu-Band-Absorption trotz der Positionierung im Knoten des Stehwellenfeldes in einem VCSEL bei 795 nm mit zwei aktiven Zonen eine drastische Absorption verursachen mit einer Reduktion der Ausgangsleistung um etwa den Faktor 2 bei der gleichen Stromstärke. Nach Literaturrecherche und Simulationen wurde vorwiegend Al_{0.25}Ga_{0.75}As für die Tunneldiode verwendet. Experimentell wurde in der zweiten Iteration für dasselbe epitaktische Design einmal 20% und einmal 25% AlGaAs für die Tunneldiode verwendet, jedoch wurden keine signifikanten Unterschiede in der LIV-Charakteristik beobachtet.

Auskopplung durch den oberen DBR

Wie bereits dargestellt, haben VCSEL mit gestapelten aktiven Zonen mehr Material zur optischen Verstärkung zur Verfügung, wodurch sie auch weniger optische Rückkopplung benötigen. Schwellgewinn-Berechnungen haben ergeben, dass für einen VCSEL mit zwei gestapelten aktiven Zonen statt der 21 Spiegelpaare für einen gleichen Schwellgewinn nur noch 18 Spiegelpaare benötigt werden. Für drei aktive Zonen sinkt diese Zahl auf nur noch 16 Spiegelpaare.

Messergebnisse und Einordnung

Unter Berücksichtigung der obigen Gesichtspunkte wurden VCSEL mit verschiedenen epitaktischen Designs hergestellt und charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen im Folgenden dargestellt werden.

Die elektro-optischen Messkurven der bei 25°C im Dauerstrich-Betrieb gemessenen VCSEL mit einem Aperturdurchmesser von 4 µm sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 zu sehen. Dargestellt sind der Referenz-VCSEL mit nur einer aktiven Zone ohne Tunneldiode sowie drei Varianten von VCSELn mit zwei gestapelten aktiven Zonen. Iteration 1 stellt jenen VCSEL mit zwei aktiven Zonen dar, bei dem die Steigung der optischen Ausgangsleistung etwa jener des Referenz-VCSELs entsprach und der ein sehr

frühes Überrollen mit einer insgesamt niedrigen Ausgangsleistung gezeigt hat. Iteration 2 hat demgegenüber eine dünne AlInGaP-Schicht zwischen Tunnelodiode und oberer aktiver Zone implementiert, um Leckströme zu reduzieren. Es ist eine leichte Absenkung der Schwelle im Vergleich zu Iteration 1 zu erkennen sowie eine deutlich erhöhte Steigung der Ausgangsleistung und ein späteres Überrollen, sodass bereits maximale optische Ausgangsleistungen wie vom Referenz-VCSEL erreicht werden. Iteration 3 schließlich hat statt der 21 nur noch 18 Spiegelpaare im p-DBR implementiert. Dementsprechend ist eine leichte Erhöhung der Schwelle und ein steilerer Anstieg der optischen Ausgangsleistung erkennbar. Letztlich wird eine größere Leistung als beim Referenz-VCSEL erzielt.

Abbildung 23 zeigt die zugehörigen Spannungs- und Gesamteffizienz-Kurven. Die Spannungskurven spiegeln die Photonenergie bei 795 nm von 1.56 eV wider, was sich in der verdoppelten Schwellenspannung äußert. Abgesehen davon verlaufen die Spannungskurven recht parallel, was einen moderaten Anstieg des differentiellen Widerstands impliziert.

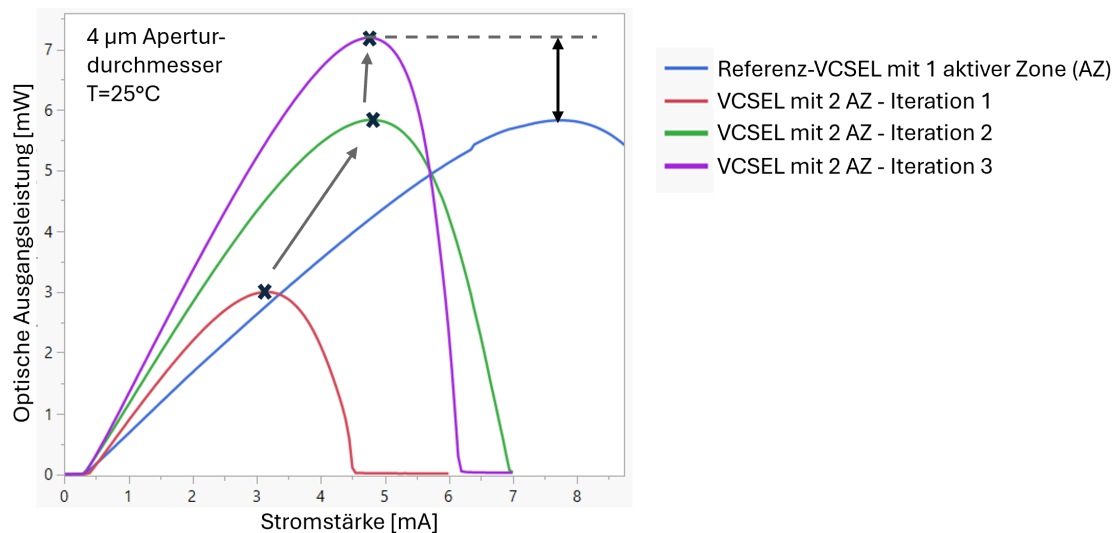


Abbildung 22: Vergleich der Leistungscharakteristik (LI-Kurven) von drei Iterationen von VCSELn mit zwei gestapelten aktiven Bereichen im Vergleich mit dem Referenz-VCSEL. Iteration 2 hat zusätzlich eine Lage zwischen Tunnelodiode und der oberen aktiven Zone implementiert, um Leckströme zu reduzieren. Für Iteration 3 wurde zusätzlich die Spiegelpaar-Zahl des oberen p-DBRs von 21 auf 18 reduziert.

Eine genauere Untersuchung an VCSELn mit 8 µm großen Aperturdurchmessern zeigte, dass der Anstieg des differentiellen Widerstandes von einer zu zwei gestapelten aktiven Zonen mit 21% bei ähnlichen Stromdichten leicht oberhalb der Werte einer GaAs-Tunnelodiode aus der Literatur mit 15% liegt. Dies zusammen mit dem verdoppelten Anstieg der optischen Ausgangsleistung mit dem Strom bestätigt die effiziente Implementierung der Tunnelodiode und der zweiten aktiven Zone in die VCSEL bei der kürzeren Wellenlänge von 795nm [10].

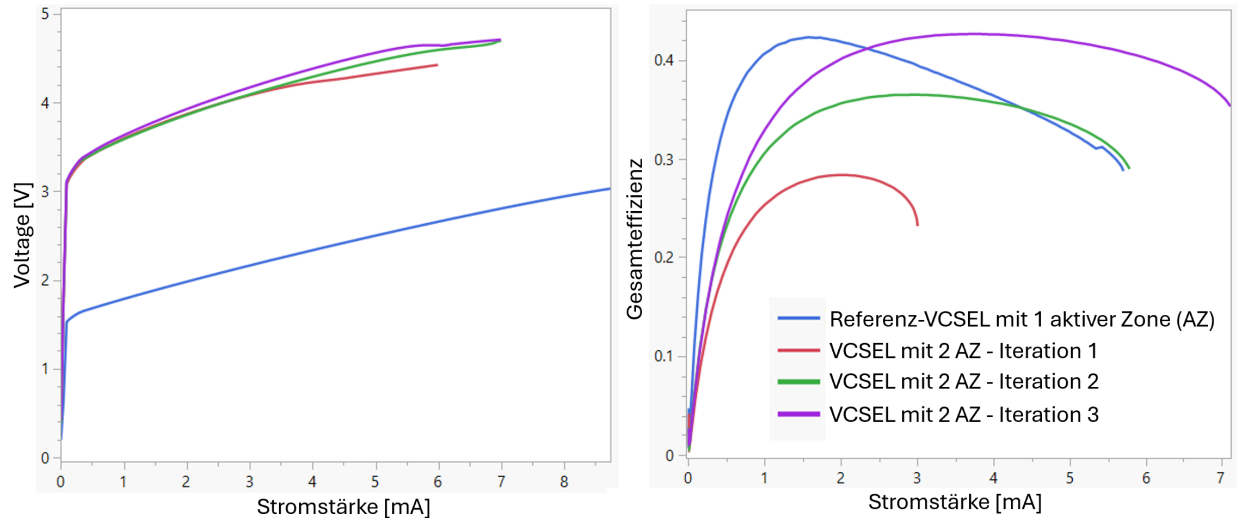


Abbildung 23: Spannungs-Charakteristika (links) sowie die Gesamteffizienz (rechts) der drei VCSEL mit zwei gestapelten aktiven Zonen sowie dem Referenz-VCSEL. Die Messungen wurden bei 25°C und an VCSELn mit 4 μm Aperturdurchmessern durchgeführt. Iteration 2 hat zusätzlich eine Lage zwischen Tunnelodiode und der oberen aktiven Zone implementiert, um Leckströme zu reduzieren. Für Iteration 3 wurde zusätzlich die Spiegelpaar-Zahl des oberen p-DBRs von 21 auf 18 reduziert.

In Abbildung 23 ist zudem sichtbar, dass die maximale Gesamteffizienz der VCSEL mit zwei gestapelten aktiven Zonen Iteration 3 sehr ähnlich jener des Referenz-VCSELS ist. Jedoch wird die maximale Gesamteffizienz bei höheren Stromstärken erreicht, was für einen deutlich effizienteren Betrieb der VCSEL bei höheren Ausgangsleistungen spricht. Gepulste Anwendungen könnten deutlich von der verdoppelten Steigung der Ausgangsleistung profitieren. Im Dauerstrichbetrieb scheinen jedoch die Effizienz- und Leistungssteigerungen für VCSEL durch gestapelte aktive Zonen bei solch kurzen Wellenlängen deutlich beschränkter zu sein als bei langen Wellenlängen >900 nm demonstriert wurde. Insofern bieten diese VCSEL mit mehreren gestapelten aktiven Zonen innerhalb von QYRO keinen relevanten Mehrwert, weshalb diese Art von VCSELn für die Verwendung im Projekt nicht in Betracht gezogen wird.

ALT Tests an Probe VCSELn ergeben für das Zieldesign des Lasers mit 4,5 μm optischer Apertur und 3,5 μm Gitterdurchmesser und den Arbeitsbedingungen 1,5 mA ($\sim 1,5$ mW) und 30°C Rückseitentemperatur für ein Konfidenzintervall von 95% eine erwartete Lebensdauer von 12000 Stunden. Da die interne Temperatur bei solch einem Epi Design wesentlich schneller mit steigendem Strom ansteigt als bei einer Epi mit nur einer aktiven Zone wirkt sich eine geringe Stromerhöhung deutlicher auf die Lebensdauer aus.

3.10 Strukturierte Tunnelioden und dielektrische Reliefs

Neben der Verwendung einer Oxidapertur kann der Strompfad auch durch eine strukturierte leitfähige Schicht, insbesondere eine strukturierte Tunnelodiode begrenzt werden. Wesentliche Vorteile sind die Modenselektion nahe der Aktivschicht und die Vermeidung gepumpter Bereiche außerhalb der eigentlichen Mode. Insbesondere für die

in Qyro verwendete Mode mit 8-Maxima verspricht dies eine effizientere Einbringung des Stroms, daher eine geringere Selbsterwärmung und somit eine höhere Ausgangsleistung.

Auch wenn die Ausgangsleistungen der oben beschriebenen VCSEL in Qyro bereits ausreichen, wurden doch erste Überlegungen und Versuche zum Einsatz von strukturierten Tunnelnioden angestellt. Die Epitaxie wird in der Nähe der Tunnelniodenschicht unterbrochen. Eine durch Ätzung strukturierte Schicht bietet neben der elektrischen Begrenzung auch eine optische Führung. Ggfs. kann sogar durch eine zweifache Strukturierung optische und elektrische Führung getrennt optimiert werden. Nach der Strukturierung und evtl. Reinigungsschritten wird die Epitaxie fortgesetzt.

Im Rahmen von Qyro wurden mit den am FBH vorhandenen Erfahrungen und technischen Möglichkeiten allerdings nur Vorversuche zur generellen Machbarkeit realisiert. Zusätzlich zu einer Ätzung der Tunnelnioden wurde auch eine Störung der Leitfähigkeit durch Implantation in Betracht gezogen. Außerdem war zusätzlich eine Oxidlage vorgesehen, um direkte Vergleichbarkeit zu zeigen und außerdem den verkürzten EQL Prozess bei TRUMPF nutzen zu können. Es stellte sich allerdings heraus, dass eine längere Prozessoptimierung benötigt würde und keine aussagekräftigen Ergebnisse vor Ausscheiden von TRUMPF möglich sind.

Die in der Vorhabensbeschreibung ebenfalls angedachte Strukturierung einer dielektrischen Schicht anstelle von GaAs wurde aus ähnlichen Gründen nur diskutiert und nicht realisiert. Zum einen funktioniert der Ansatz mit GaAs sehr gut und Verbesserungen werden eher nicht erwartet, zum anderen ist es nicht mit einem schnellen Versuch getan, wenn belastbare Ergebnisse im direkten Vergleich zu den in Qyro erstellten VCSELn angestrebt werden.

4 Zusammenfassung+Ausblick

VCSEL für die Verwendung als Pump und Probe Quellen eines Kernspingyroscopes zur Verwendung als Lagesensor in einem Satelliten wurden erfolgreich konzipiert, entwickelt und erstellt. Die geforderte Wellenlänge von 795nm ist im Vergleich zu gebräuchlicheren Wellenlängen von 940nm herausfordernd, da der erhöhte Bandabstand die Verwendung aluminiumhaltiger, epitaktischer Strukturen verlangt, die nicht nur schlechtere Effizienz bewirken, sondern auch kritischer in Bezug auf Lebensdauer sind. Gute Designs wurden gefunden, auf Lebensdauer getestet und erfolgreich in mehreren Iterationen optimiert.

Die bekannte Stabilisierung einer Fundamentalmode und deren Polarisierung durch Gitter-Reliefs wurde erfolgreich eingesetzt. Der Ansatz wurde für Moden höherer Ordnung erweitert, was eine Skalierung der monomodigen Ausgangsleistung auf >10mW erlaubt. Da die Verwendung einer nicht auf der Achse liegenden optischen Abstrahlung im Projekt kritisch gesehen wurde, wurde eine neuartige Erweiterung des Ansatzes mit einer Phasenkorrektur eingeführt und erfolgreich realisiert. Damit wurden alle Anforderungen im Projekt Qyro erfüllt.

4.1 Ausblick Qyro, Muster für Satelliten

Nach datenbasierter Vorselektion wurden vielfältige Muster für die Projektpartner innerhalb des Projekts QYRO bereitgestellt. Lieferungen an Q.ANT und TLB sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Für Q.ANT wurde etwa 1500 VCSEL für Probe- und Pump-Anwendung ausgewählt, die ein geeignetes Chip-Design, Ausgangsleistung und Wellenlänge aufweisen. Die zugehörigen Daten wurden aufbereitet und ebenfalls an Q.ANT übermittelt. An TLB wurden die übrigen, geeigneten Waferstücke und Tapes geschickt mit umfassender Datensammlung der elektro-optischen Charakteristik der einzelnen VCSEL-Chips. Die in der finalen Lieferung berücksichtigten Wafer lassen sich wie folgt einordnen:

- 20701_572A - Modifiziertes Epi-Design mit 1 aktiver Zone
- 20701_569A - Modifiziertes Epi-Design mit 1 aktiver Zone
- 20701_569B - Modifiziertes Epi-Design mit 1 aktiver Zone
- 20701_445G - Ausgangs-Epi-Design mit 1 aktiver Zone
- 20701_445F - Ausgangs-Epi-Design mit 1 aktiver Zone

Lieferung an	Wafer-ID	# Gelpacks	# VCSEL-Chips
Q.ANT	20701_569B	Probe-VCSEL: 13x	961
Q.ANT	20701_569B	Pump Gen2 (3x30µm ² Apert.): 9x	299
Q.ANT	20701_569B	Pump Gen2 (4x30µm ² Apert.): 9x	255

Lieferung an	Wafer-ID	# Tapes	# Nicht-vereinzelte Waferstücke
TLB	20701_572A	1	
TLB	20701_569A		20
TLB	20701_569B	4	
TLB	20701_445G		3
TLB	20701_445F		11

4.2 Veröffentlichungen und Patente, wissenschaftliche Ergebnisse

Sowohl die Nutzung einer Mode höherer Ordnung zur Leistungssteigerung als auch die Verwendung einer Phasenkorrektur stellen insbesondere bei der Wellenlänge von 795nm wissenschaftlich Neuheiten dar, wurden entsprechend publiziert und fließen in Doktorarbeiten ein [Lindner, Torelli]. Die Verwendung einer Struktur zur Phasenkorrektur wurde auch als Patentanmeldung eingereicht.

Die Untersuchung und Optimierung von VCSELn mit Tunnelioden, auch wenn sie letztendlich in Qyro nicht zur Anwendung kommt, wurde optimiert, ausführlich

beschrieben und ebenfalls in Doktorarbeiten untersucht [Lindner, Gullino]. Die Vermeidung ungleichmäßiger Oxidationsraten durch einen Gradienten im Aluminiumgehalt wurde ebenfalls zum Patent angemeldet.

Beide Ansätze bieten noch viel Potential für weitere wissenschaftliche Arbeiten. So wurden z.B. in Qyro vor allem linear angeordnete Moden höherer Ordnung untersucht, weitere Möglichkeiten bieten sich bei flächenhaften Anordnungen (Kreisringe wurden simuliert und erstellt, Kreuze zumindest simuliert, weitere Details werden publiziert [2,11]). Die Verwendung gestapelter Aktivschichten wird wesentlich attraktiver bei Anwendungen mit kurzen Pulsen und wurde in Qyro vor allem wegen der nur marginalen Vorteile im kontinuierlichen Betrieb nicht weiter fortgeführt.

VCSEL mit einer Wellenlänge von 795nm sind neben Gyroskopen auch für Atomuhren interessant. Darüber hinaus lassen sich viele Ergebnisse des Projekts auf die benachbarte Wellenlänge von 808nm übertragen, welche traditionell als Pumpwellenlänge für Nd:YAG Verwendung findet. Wellenlängen um 800nm sind auch in der medizinischen Diagnostik interessant, da diese Strahlung gut in Gewebe eindringt.

4.3 TRUMPF Photonic Components beendet die Arbeiten an der VCSEL Technologie

TRUMPF Photonic Components hat neuartige, leistungsfähige VCSEL bei 795nm entsprechend den Anforderungen im Projekt erarbeitet und in großer Zahl den Verbundpartnern bereitgestellt. Die Anwendung im Satelliten werden die Partner des Qyro-Konsortiums in den nächsten Jahren demonstrieren. Eine Weiterarbeit von TRUMPF im Konsortium würde nicht mehr zum Erfolg des Gesamtprojekts beitragen.

TRUMPF Photonic Components hat seinen Projektteil zum 31.12.2025 vorzeitig beendet. Zeitgleich stellt TRUMPF alle Aktivitäten auf dem Gebiet der VCSEL Herstellung ein. Der Bereich ist wirtschaftlich nicht tragfähig und erlaubt auch keine positive Perspektive. Eine wirtschaftliche Halbleiterfertigung verlangt sehr hohe Stückzahlen, um die großteils teuren Anlagen auszulasten und den erforderlichen Personalbestand zu unterhalten. Trotz technisch teilweise sehr guter Ergebnisse (wie z.B. in Qyro) fehlt ein adressierbarer Markt für Massenanwendungen und die Rechtfertigung für eine Fortführung der Aktivitäten.

4.4 Geplante weitere wirtschaftliche Verwertung

Ein möglicher Massenmarkt für VCSEL könnte in Zukunft die Datenspeicherung sein, konkret die „heat assisted magnetic recoding“ (HAMR) Technologie. Die Erwärmung sehr kleiner Bereiche einer Festplatte durch einen VCSEL erhöht wesentlich die Speicherdichte. Damit werden VCSEL zu einer Schlüsselkomponente für Festplattenhersteller. Die Firma Western Digital Corporation hat sich seit mehr als 10 Jahren intensiv mit dieser Anwendung beschäftigt und diese breit patentiert. Die vertikale Integration eines VCSEL Herstellers ist für WDC folgerichtig.

Daher hat TRUMPF mit Stichtag 31.12.2025 den wesentlichen Teil seiner VCSEL Fertigung am Standort Ulm, die Mitarbeiter und die entsprechende IP an die Firma Western Digital Corporation übertragen. Die vertikale Integration innerhalb eines Systemherstellers nimmt das Marktrisiko und ermöglicht eine Fortsetzung und Weiterführung der VCSEL Aktivitäten in Deutschland.

Die Arbeiten im Projekt Qyro tragen wesentlich zur Standortsicherung und dem Erfolg in der HAMR-Anwendung bei. Auch dort wird eine hohe Monomode Leistung mit einer stabilen Polarisierung benötigt. Die in Qyro realisierten Konzepte können auf die benötigte längere Wellenlänge übertragen und erweitert werden und die Vorteile der VCSEL Technologie für die HAMR-Anwendung unterstützen.

5 Literatur

Publikationen im Rahmen von Qyro sind fett gedruckt

[1] V. Torrelli, A. Gullino, A. Tibaldi, F. Bertazzi, M. Goano, and P. Debernardi, "High-Power Emission via Large-Area VCSELs With Single High-Order Mode Operation," *IEEE Photonics J.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–7, 2024, doi: 10.1109/JPHOT.2024.3360992.

[2] P. Debernardi et al., „Design of 100 mW Single-Polarization-Mode Axial Emitting 795nm VCSEL based on 25mW Record Performance,“ invited paper, under review, submitted to IEEE Selected Topics of Quantum Electronics.

[3] R. Michalzik, "VCSEL Fundamentals," in *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, vol. 166, R. Michalzik, Ed., in Springer Series in Optical Sciences, vol. 166. , Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 19–75.

[4] J. M. Ostermann and R. Michalzik, "Polarization Control of VCSELs," in *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, vol. 166, R. Michalzik, Ed., in Springer Series in Optical Sciences, vol. 166. , Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 147–179. doi: 10.1007/978-3-642-24986-0_5.

[5] S. Gronenborn, T. Schwarz, P. Pekarski, M. Miller, H. Mönch, and P. Loosen, "Optical Modes in a Rectangular VCSEL Resonator With Properties of Both Gaussian and Fourier Modes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 8, pp. 1040–1044, 2012.

[6] S. Gronenborn, J. Pollmann-Retsch, P. Pekarski, *et al.*, "High-power VCSELs with a rectangular aperture," *Appl. Phys. B* **105**, 783–792 (2011)

[7] J. Lindner et al., „Fifteen-milliwatt single-mode vertical-cavity surface-emitting laser at 795nm via high-order transverse mode stabilization,“ under review, submitted to Optics Letters.

[8] J. Lindner et al., „Compact VCSEL chips for diverse applications (795nm to 850nm),“ in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIX, SPIE, Mar. 2025, pp. 73–81.

[9] M. Dummer, A. Ghods, K. Tatab, and K. Johnson, "High-power single-mode multijunction VCSEL," in 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC), (Matsue, Japan), pp. 1–2, IEEE, Oct. 2022.

[10] J. Lindner et al., „795nm multi-junction Vertical-cavity Surface Emitting Lasers,“ under review, submitted to IEEE Selected Topics of Quantum Electronics 12/12/2025.

[11] V. Torrelli, J. Lindner et al., „22 mW single-mode axial-emitting 795 nm pin VCSELs,“ submitted to ISLC 2026 conference to be held June 2026.