

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Ferdinand-Braun-Institut gGmbH Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) Gustav-Kirchhoff-Str. 4 12489 Berlin
Förderkennzeichen:	50WM2179
Vorhabensbezeichnung:	Entwicklung einer Laserquelle für eine Rubidium-basierte optische Atomuhr (LARUS)
Fördernde Institution:	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Projektträger:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Fördermaßnahme:	Quantentechnologien
Förderbereich:	Forschung unter Weltraumbedingungen
Laufzeit des Vorhabens:	01.09.2021 – 31.08.2024
Wiss. Geschäftsführer:	Prof. Dr. P. Scheele
Admin. Geschäftsführerin:	Dr. K.-I. Eiermann
Projektleiter:	Dr. S. Einfeldt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
2	Eingehende Darstellung	5
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	6
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	6
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	6
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	7
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	8
	Anlage 1: Fachlicher Bericht	
	Anlage 2: Erfolgskontrollbericht	
	Anlage 3: Berichtsblatt	

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Hintergrund des Projekts waren die optischen Quantentechnologien z. B. im Bereich kalter Quantengase, Quantensensoren und optischer Frequenzreferenzen. Voraussetzung für deren Nutzung ist eine kompakte und robuste Hardware, die einen Einsatz im Feld oder im Weltraum gestattet. Diodenlaser sind in diesem Rahmen besonders gut geeignete Lichtquellen. Während Diodenlaser im NIR-Bereich für die Manipulation atomarer Spezies wie Rubidium (780 nm, 795 nm) oder Cäsium (852 nm, 894 nm) bereits etabliert sind, sind Diodenlaser im Sichtbaren (z. B. 689 nm und 461 nm für Strontium-Spektroskopie, 532 nm für Jod-Spektroskopie, 420 nm für Rubidium-Spektroskopie) und im UV-Bereich (z. B. 267 nm für die Manipulation von Aluminium-Ionen) kaum verfügbar. Die Aufgabenstellung des Vorhabens war die Realisierung von Diodenlasern im blau-violetten Spektralbereich auf Basis von Galliumnitrid als Lichtquelle in optischen Frequenzreferenzen und Atomuhren für den Einsatz im Weltraum. Am Ende sollten Laser bei einer Wellenlänge von 420 nm (Übergang $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ in ^{85}Rb) für eine Rubidium-basierte optische Atomuhr zur Verfügung stehen. Damit sollte das FBH in die Lage versetzt werden, Lichtquellen zur Verfügung zu stellen, welche prinzipiell die Anforderungen für eine Weltraummission erfüllen und es sollte perspektivisch die komplette Palette an Lasermodulen für z. B. „beyond state-of-the-art“ Rubidium-Uhren in einem einheitlichen Formfaktor liefern können.

Die im Vorhaben bearbeiteten Aufgaben zur Entwicklung der oben genannte Laser erstreckten sich von der Optimierung der Halbleiterheterostruktur und der Chipprozestechnologie über die Einrichtung einer Messumgebung für die Charakterisierung von blau-violett emittierenden Diodenlasern in Extended-Cavity-Diode-Laser (ECDL)-Anordnung, insbesondere für die Messung von deren Linienbreite, bis hin zur Herstellung von Fabry-Pérot (FP)-Lasern mit Rippenwellenleitern (FP(RW)-Laser) für den Einsatz in einem ECDL, deren elektro-optische Charakterisierung sowie Optimierung bezüglich Betriebseigenschaften und Lebensdauer und der Herstellung eines ECDL auf der Basis der zuvor genannten Diodenlaser sowie dessen Charakterisierung hinsichtlich der Anwendung als Lichtquelle für eine Rubidium-basierte optische Atomuhr.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am FBH wurde die Chiptechnologie von Rippenwellenleiterdiodenlasern und Verstärkern bei 389 nm und 405 nm im Rahmen des BMBF-Wachstumskerns Berlin-WideBaSe (Projekt Blu-LaS, 2010-2013) und des KMU-Innovativ-Projekts UVMOPA (2014-2017) u. a. zusammen mit der Fa. TOPTICA entwickelt. Die Projekte BriVi (2014-2017) und RelyLa (2018-2020) im Rahmen des IBB-Förderprogramms *Pro FIT* ermöglichten die Realisierung von DFB-Laserdioden mit Emission bei 405 nm. Der Stand nach diesen Projekten war, dass entsprechende Laser am FBH hergestellt und an ausgewählten Bauelemente auch Hero-Performannewerte z. B. bezüglich Schwelle (RW-Laser) und Single-Mode-Betrieb (DFB-Laser) demonstriert werden konnten. Eine verlässliche Technologieplattform, mit der Performannewerte sicher abrufbar sind, lag jedoch nicht vor. Dies lag an einer ganzen Reihe von Gliedern in der Herstellungskette der Laser, an denen die Technologie noch nicht robust entwickelt bzw. optimiert war. Exemplarisch seien dafür die Epitaxie benannt, die nur auf einer veralteten Einzelwaferanlage erfolgte, die Kontakttechnologie, die noch keinen ohmschen p-Kontakt ermöglichte sowie die Facetten- und Chipmontagetechnologien, die keine Stabilität der Facetten im Langzeitbetrieb erlaubten. Die offensichtliche Folge, dass die Lebensdauer von RW-Lasern mit Emission im Violetten auf einige hundert Stunden begrenzt blieb. Gleichwohl stand am FBH, abgesehen von der ECDL-Technik für den blau-violetten Spektralbereich, sämtliche apparative Infrastruktur für eine Technologieentwicklung der avisierten Laser zur Verfügung.

Das FBH verfügte schon zu Beginn des Vorhabens über langjährige Erfahrungen zum Betrieb von wellenlängenstabilisierten FP(RW)-basierten Diodenlasern in der ECDL-Anordnung. Der ECDL ist mittlerweile sogar die Standard-Laserarchitektur für die Lokaloszillatoren der Lasermodule des FBH für Weltraumanwendungen geworden und wurde bzw. wird in den Experimenten JOKARUS, MAIUS, BECCAL oder OPUS eingesetzt. Die Erfahrungen bezogen sich allerdings ausschließlich auf den nah-infraroten Spektralbereich, während der blau-violette Spektralbereich völliges Neuland darstellte. Insbesondere war auch kein geeigneter Messaufbau für einen ECDL bei 420 nm vorhanden und musste erst realisiert werden. Die ursprünglich angedachte Nutzung des im Rahmen des Vorhabens MiLas entwickelten Messplatzes für die elektro-optische Charakterisierung beliebiger Arten von Laserchips auf Submount hatte sich schnell als unpraktisch herausgestellt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Sämtliche Planungen und Abläufe im Vorhaben orientierten sich an der Vorhabensbeschreibung bzw. dem Projektantrag. Das Kernteam der beteiligten Wissenschaftler inklusive des Projektleiters hat sich alle zwei Wochen in einer Besprechungsrunde über den aktuellen Stand der Arbeiten und die unmittelbar anstehenden nächsten Aufgaben ausgetauscht. Über die gesamte Vorhabenszeit erfolgten im Abstand von jeweils sechs Wochen Statustreffen, in die Vertreter aller relevanten FBH-Bereiche, d. h. Materialtechnologie, Prozesstechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik, Optoelektronik und Integrierte Quantentechnologie einbezogen wurden. In regelmäßigen Jour Fixes wurde der Wissenschaftliche Geschäftsführer des FBH über den Projektstand informiert. Sämtliche Ergebnisse des Vorhabens wurden in zentralen Ordnern gesammelt, die wiederum in den Zugriffsrechten beschränkt und gegen unerlaubten Zugriff geschützt sind. Finanzielle Aspekte des Vorhabens wurden im engen Austausch zwischen den Fachabteilungen und der Finanzabteilung des FBH bearbeitet.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Single-Mode-Diodenlaser um 420 nm mit Leistungen im Bereich von 100 mW und hoher Zuverlässigkeit wurden zu Beginn des Vorhabens u. a. von der japanischen Firma Nichia angeboten. Die Toleranzen der spezifizierten Wellenlängen lagen typischer Weise im Bereich 10-15 nm. Antireflexionsbeschichtete Laser für den Aufbau von ECDLs bei der genannten Wellenlänge waren damals von Nichia ebenfalls verfügbar, aber am Ende des Vorhabens nicht mehr. Schmalbandige DFB- oder DBR-Diodenlaser im blauvioletten Spektralbereich waren am Weltmarkt nicht erhältlich. Es war auch nicht bekannt, dass einer der namhaften Hersteller von GaN-Diodenlasern an der Entwicklung entsprechender Bauelemente arbeitet. Mittlerweile haben Firmen wie Nichia, Bluglass und Exalos verkündet, dass sie an DFB-Lasern arbeiten bzw. dabei sind, diese auf den Markt zu bringen. In Europa war und ist ams-OSRAM der einzige große Hersteller von Diodenlasern im blauen Spektralbereich. Kurzwellige Single-Mode-Laser bei 420 nm waren und sind von ihm nicht verfügbar, nur langwelligere bei 450 nm. Einziger weiterer europäischer Anbieter entsprechender *Engineering Samples* war und ist die polnische Firma TopGaN, von der 421-nm-Laser mit Leistungen von 100 mW, auch mit antireflexionsbeschichteten Frontfacetten für ECDLs verfügbar sind. In Kooperationen des FBH mit Nutzern entsprechender kommerzieller Laser hatte sich immer wieder gezeigt, dass nur wenige der Hersteller Zuverlässigkeiten für ihre Laser garantieren können. Die Ausfall- und Degradationsmechanismen von GaN-Diodenlasern waren nur begrenzt bekannt, zudem widersprachen sie sich teilweise. Bekannt waren empirisch gefundene Einflüsse u. a. der Kristalldefektdichte und der Diffusion von Magnesium und von Wasserstoff.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das FBH hat die Arbeiten in dem Einzelvorhaben weitestgehend alleine durchgeführt.

Allerdings gab es innerhalb des FBH über die gesamte Laufzeit hinweg einen regen fachlichen Austausch zwischen dem federführenden Bereich *Joint Lab GaN Optoelectronics* und anderen Bereichen des Instituts, insbesondere den Abteilungen für Materialtechnologie und Prozesstechnologie in Bezug auf die Epitaxie und die Chipherstellung, mit der Abteilung Optoelektronik über das Chipdesign und die Alterungsmesstechnik sowie mit der Gruppe *Quantum Photonic Components* bezüglich der Realisierung des ECDL. Einen informellen Austausch gab es fortlaufend mit der Fa. Eagleyard Photonics GmbH, eine Tochter der TOPTICA Photonics AG, mit der das FBH sowohl über öffentlich geförderte Kooperationsprojekte als auch Auftragsentwicklungen und -fertigungen von Diodenlasern eine lange Geschichte des Zusammenarbeitens hat. Eagleyard hat großes Interesse daran, Laser auf der Basis von GaN mit Emission im Blauen und Violetten mit in sein Produktportfolio aufzunehmen. In Form von Unteraufträgen gab es Zusammenarbeiten mit der Fa. rtg zur Durchführung von Materialanalysen mittels SIMS.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der Epitaxieprozess der GaN-Laserdioden wurde von einer alten Einzel-Wafer- auf eine moderne Multi-Wafer-MOVPE-Anlage transferiert. Probleme wie z. B. ein Zersetzen der GaN-Substrate und des Suszeptors infolge hoher Prozesstemperaturen konnten durch apparative Anpassungen gelöst werden. Eine neue Heterostruktur, deren Wellenleiter undotiert und frei von Indium ist, wurde mittels Simulationen bezüglich Wellenleitung und Ladungsträgerinjektion optimiert und über Breitstreifenlaser qualifiziert. Weitere Variationen des Heterostrukturdesigns, aber auch Prozessvariationen erfolgten bezüglich der Wahl des GaN-Substratherstellers, der InGaN-Basissschicht zur Defektfiltration, bei den InGaN/GaN-Quantenfilmen, der Elektronenblockierschicht und der p-Dotierung der Mantel- und Kontaktschicht. Bewertet wurden sie anhand der Materialperfektion sowie der Effizienz, der Schwelle und deren Temperaturabhängigkeit der realisierten Laser. Es wurden Laser mit Emission bei 420 nm mit Schwellenstromdichten von $2,5 \text{ kA/cm}^2$ und differentiellen Effizienzen von 0,6 W/A (bei unbeschichteten Facetten) erreicht.

Im Bereich der Waferprozesstechnologie wurden die thermische Aktivierung der p-Leitfähigkeit optimiert und über eine neue In-situ-Messtechnik beim Plasmaätzen der Rippenwellenleiter Ätztiefen mit einer Genauigkeit von unter 10 nm realisiert. Weiterentwicklungen bei der Passivierung mit SiO_2 haben Haftungsprobleme auf Palladium gelöst. Eine Umstellung des Waferabdünnprozesses von Läppen auf Schleifen und Polieren hat nicht nur Kristallschäden, Verspannung sowie Waferkrümmung reduziert, sondern in Kombination mit einem optimierten Laserritzprozess auch die Terrassendichte auf den Spaltfacetten verringert und so Ausbeuten an defektfreien Lasern von ca. 80 % ermöglicht. Über einen Vergleich verschiedener Facettenbeschichtungsmaterialien und Umgebungsbedingungen wurde die Stabilität der Frontfacette hinsichtlich parasitärer, fotoinduzierter Abscheidungen von SiO_x analysiert. Im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik wurde in Kooperation mit externen Partnern eine Prozesskette zur hermetischen Einhausung von 420-nm-Lasern in TO-Gehäuse erfolgreich etabliert.

Die Entwicklungsfortschritte haben es ermöglicht, die Lebensdauer der Laser deutlich zu steigern. Die Betriebsspannung und Facetten sind nunmehr langzeitstabil. Ausgehend von wenigen 100 h betragen die Lebensdauern bei konstanter Ausgangsleistung von 20 mW bis zu 10.000 h.

Rippenwellenleiter-Verstärkerchips mit Antireflexionsbeschichtung ermöglichten den Aufbau und Betrieb eines Single-Mode-ECDL, dessen Schwellenstrom von ca. 70 mA dem eines

Fabry-Perot-Lasers entspricht. Auch nach zahlreichen Optimierungen des Aufbaus ergeben Linienbreitenmessungen noch unerwartet hohe Werte von >30 MHz, die weiter untersucht werden. Dazu werden u. a. thermische Stabilisierungen im Aufbau sowie interne Verluste im Chip betrachtet. Weiterführende Informationen zu den erzielten Ergebnissen finden sich im fachlichen Bericht (Anlage 1).

Das vorgegebene Ziel der Etablierung einer stabilen sowie State-of-the-Art Technologieplattform zur Realisierung von Diodenlasern auf Basis des Materialsystems AlInGaN wurde erreicht. Am deutlichsten spiegelt sich das im Übertreffen des Meilensteins M33 des Vorhabens wieder: Diodenlaser bei der Emissionswellenlänge von 420 nm mit einer maximalen cw-Leistung von ≥ 50 mW wurden bei konstanter Ausgangsleistung von 20 mW über bis zu 10.000 h betrieben, während mindestens 5.000 h erreicht werden sollten. Nicht komplett erreicht wurde der Meilenstein M30: Ein ECDL bei der Emissionswellenlänge von 420 nm wurde zwar erfolgreich aufgebaut und im Dauerstrichbetrieb wurden eine max. Leistung von ≥ 20 mW demonstriert. Eine Linienbreite ≤ 1 MHz konnte jedoch nicht gezeigt werden. Als wahrscheinlichste Begrenzungen zum Erreichen des Ziels konnten die thermische Stabilität des Aufbaus sowie die optischen Verluste im Halbleiterchip benannt werden. An diesen Aspekten wird auch nach Abschluss des Vorhabens weitergearbeitet.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die mit Abstand wichtigste Position im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis bezieht sich auf Ausgaben für Personal (ca. 869 T€). Indem die gesamte Herstellungskette des Lasersystems im Vorhaben abgebildet wurde, war die Mitarbeit von zahlreichen Wissenschaftlern und Technikern aus den Bereichen Epitaxie, Chipprozessertechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik, Messtechnik und Zuverlässigkeitsuntersuchungen erforderlich. Die nächstwichtigste Position sind die Kosten für (Verbrauchs-)Materialien (ca. 489 T€), zu denen u. a. die teuren GaN-Substrate für die Epitaxie beitragen. Schließlich waren Investitionen zum Aufbau des ECDL erforderlich (ca. 158 T€), welche u. a. die Beschaffung eines Wavemeters, Optischen Spektrumanalysators und von Translationsstages beinhalteten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die komplette Technologiekette zur Herstellung von blau-violett emittierenden Diodenlasern auf eine solide Basis zu stellen, mit der nunmehr z. B. Rippenwellenleiterlaser mit State-of-the-art Performance und Zuverlässigkeit im Langzeitbetrieb bereitgestellt werden können. Die Realisierung eines ECDL-Aufbaus bei 420 nm war ein angemessener und notwendiger Schritt auf dem Weg, kurzweilige Diodenlasersysteme so weit zu entwickeln, dass sie einmal in im Weltraum betriebenen quantenoptischen Systemen wie z. B. optischen Atomuhren Einzug halten können.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das FBH strebt an, die Projektergebnisse über die Einwerbung weiterer Projekte zu verwerten. Ein entsprechendes bereits bewilligtes Vorhaben ist das durch die Leibniz-Gemeinschaft im Rahmen ihres Wettbewerbs „Kooperative Exzellenz“ geförderte Projekt „Far-UVC compact laser module (UV-COLA)“ in Kooperation mit der Technischen Universität Chemnitz (Start 02/2025), in dem die Emission GaN-basierter DFB-Laser und Verstärker bei 420 nm in den fernen UVC-Bereich frequenzverdoppelt werden soll, um somit eine faserkoppelbare Fern-UVC-Strahlungsquelle zum Einsatz bei der hautverträglichen Antisepsis gegen multiresistente Keime im Nasen-Rachenraum zu realisieren. Das FBH nutzt die Ergebnisse des Vorhabens LARUS auch im Rahmen eines Unterauftrag durch die Firma neQxt. Diese entwickelt über die Ausschreibung „Mobiler Quantencomputer – Quantenprozessoren für den mobilen Einsatz in

Verteidigungs- und Sicherheitsanwendungen“ der Agentur für Innovation in der Cybersicherheit GmbH (Cyberagentur) einen Quantencomputer auf der Basis von Ca-Ionen. Das FBH wird dafür u. a. maßgeschneiderte, kompakte Laserquellen mit Emission bei 397 nm, 400 nm und 423 nm entwickeln. Im Rahmen der durch das BMBF erfolgten Ausschreibung „Enabling Technologies für resiliente F&E-Lieferketten in den Quantentechnologien“ hat das FBH zusammen mit seinen Industriepartnern Eagleyard Photonics GmbH und TOPTICA Photonics AG die Verbundprojektidee „Skalierbare Diodenlasersysteme mit schmalbandiger Emission für resiliente Lieferketten in der Quantentechnologie (DiLaRes)“ eingereicht, welche momentan begutachtet wird. Hier sollen robuste, monolithisch gitterstabilisierte Halbleiterlaser für industrielle QT-Anwendungen im infraroten und violetten Spektralbereich mit einer resilienten Herstellungskette in Deutschland realisiert werden. Die Basis für die Arbeiten würde die im Vorhaben LARUS entwickelte Technologieplattform für zuverlässige Diodenlaser auf der Basis von GaN bilden.

Die Untersuchungen an violett emittierenden Diodenlasersystemen auf der Basis von GaN und deren Weiterentwicklung haben die Wissensbasis zu diesen Bauelementen und Systemen erheblich verbreitert und die Herstellungstechnologie auf ein deutlich höheres Reifenniveau gehoben. Es können nunmehr Diodenlaser im Spektralbereich 395-435 nm designt werden, die praxistauglicher sind und auch den Einstieg von Industriepartnern in eine Produktentwicklung näher rücken. Die erzielten Performancewerte der Laser sind eine solide Basis für zukünftige Weiterentwicklungen und werden in Form von Veröffentlichungen in hochrangigen Zeitschriften und Präsentation auf internationalen Tagungen verwertet werden. Extrapoliert man die im Vorhaben LARUS erfolgten Performanceentwicklungen des FBH im Bereich der GaN-Diodenlaser weiter in die Zukunft, dann sollen insbesondere Verwertungen über die Realisierung kompakter Laserquellen für Ca-Ionen-basierte Quantencomputer und „beyond state-of-the-art“ Rubidium-Atomuhren adressiert werden. Das FBH ist momentan – und wird dies auch weiterhin tun – in bilateralen Gesprächen mit Interessenten an kurzweiligen Lasersystemen aus Industrie, Wissenschaft und Forschung, um die Projektergebnisse im Rahmen von Forschungsverbänden auch unter Industriebeteiligung zu verwerten.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der Diodenlasersysteme, die im blau-violetten Spektralbereich emittieren und Anwendung im Bereich der Quantentechnologie finden können, waren während des Vorhabens vor allem Fortschritte bezüglich reiferer Herstellungstechnologien für DFB-Laser zu beobachten. Zu Beginn waren am FBH sowie an Forschungseinrichtungen wie University of Glasgow/CSTG (UK), UNIPRESS (Polen) und UCSB (USA) entsprechende Basistechnologien vorhanden und die Funktionalität (Einzelmodenbetrieb, geringe spektrale Verschiebung mit der Temperatur) war demonstriert. Eine Kommerzialisierung entsprechender Bauelemente war durch die Fa. Nichia angekündigt. Auch wenn nach wie vor blau-emittierende DFB-Laser nicht am Markt verfügbar sind, so haben doch weitere Firmen wie Exalos (Schweiz), Bluglass (USA/Australien) und Ushio (Japan) Technologiefortschritte berichtet oder sogar einen Markteintritt angekündigt. Weiterhin liegen nunmehr erste Veröffentlichungen zu Linienbreiten dieser Laser und von Verstärkerchips mit gekoppelten externen Gittern vor, gemäß derer Linienbreiten bis unter 1 MHz möglich sind (siehe z. B. E. Trageser et al., Optics Express 32, 23372 (2024); S. Watson, Proc. SPIE 12912, 1291202 (2024); A. Congar, Optics Letters 46, 1077 (2021). Veröffentlicht wurden zudem Daten zu Photonisch integrierten Schaltungen unter Verwendung von blau-violett emittierenden Diodenlasern (siehe z. B. T. Wunderer et al., Opt. Lett. 48, 2781 (2023)). Über Mikroresonatoren für optisches Feedback und Modeselektion wurden Self-injection Locking mit einer Seitenmodenunterdrückung im Bereich 30-40 dB und Linienbreiten von ca. 4 MHz demonstriert. Dies alles bestätigt den im Vorhaben avisierten Ansatz einer schmalbandigen Lichtquelle bei 420 nm in Form eines ECDL für eine Rubidium-basierte optische Atomuhr.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Rahmen des Projekts sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- E. Freier, J. Glaab, J. E. Boschker, J. Enslin, M. Guttman, S. Makhadi, A. Mogilatenko, C. Netzel, I. Ostermay, C. Stölmacker, and S. Einfeldt, *Analyses of degradation mechanisms in single mode InGaN based laser diodes*, 2024 IEEE Photonics Conference (IPC), Rome, Italy, 2024, pp. 1-2, DOI: [10.1109/IPC60965.2024.10799609](https://doi.org/10.1109/IPC60965.2024.10799609) (invited talk).
- L. Uhlig, C. Becht, E. Freier, J. H. Kang, V. Hoffmann, C. Stölmacker, S. Einfeldt, U. T. Schwarz, *Micro-electroluminescence and micro-photoluminescence study on GaN-based laser diode aging*, Photonics West, San Jose/USA, 2022, Proc. SPIE **12001**, 1200106 (2022), DOI: [10.1117/12.2609394](https://doi.org/10.1117/12.2609394) (contributed talk).
- E. Freier, J. Boschker, J. Glaab, A. Mogilatenko, C. Netzel, M. Guttman, J. H. Kang, S. Makhadi, and S. Einfeldt, *Facet degradation mechanisms of InGaN-based laser diodes emitting around 420 nm*, 2024 DPG Spring Meeting Berlin (contributed talk).
- S. Makhadi, *Influence of surface and subsurface damage on GaN wafer processing and laser facet fabrication*, 2024 DPG Spring Meeting Berlin (contributed talk).
- S. Einfeldt, E. Freier, J. H. Kang, H. Wenzel, A. Mogilatenko, J. Glaab, A. Abou-Shewarib, V. Hoffmann, J. Enslin, M. Guttman, S. Makhadi, J. Fricke, O. Brox, M. Matalla, M. Norman-Reiner, C. Stölmacker, M. Weyers, L. Sulmoni, M. Kneissl, L. Uhlig, U. T. Schwarz, *Towards GaN-based diode lasers with narrow linewidth and high reliability*, 2023 Spring Meeting Dresden (invited talk).
- E. Freier, J. H. Kang, V. Hoffmann, A. Mogilatenko, J. Glaab, C. Stölmacker, J. Enslin, I. Ostermay, M. Weyers, L. Uhlig, U. T. Schwarz, and S. Einfeldt, *Reliability aspects of GaN-based ridge waveguide diode lasers*, 9th Workshop on Physics and Technology of Semiconductor Lasers, Kraków/Polen, 2022 (invited talk).

Als weitere Veröffentlichungen sind geplant:

- J. Glaab et al., *Selected topics on the reliability of GaAs- and GaN-based laser diodes* (Arbeitstitel), J. Phys. D: Applied Physics.
- E. Freier et al., *Facet degradation mechanisms of AlInGaN-based laser diodes emitting around 420 nm* (Arbeitstitel), voraussichtlich physica status solidi.

Fachlicher Abschlussbericht zum Vorhaben LARUS: Entwicklung einer Laserquelle für eine Rubidium-basierte optische Atomuhr

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 – 31.08.2024

Autoren: A. Bawamia, S. Einfeldt, J. Enslin, E. Freier, M. Guttman, S. Makhadi, S. Stölmcker

AP1: Optimierung der Halbleiterstruktur

Die Optimierung der Halbleiterstruktur im Arbeitspaket 1 umfasste verschiedene Aufgaben im Bereich der Epitaxie, dem Design der Heterostruktur selbst sowie der optischen und elektrischen Simulation dieser Strukturen.

Epitaxie-Technologie

Mit dem Start des Projekts wurde der Epitaxieprozess der Halbleiterheterostruktur von einer älteren Einzel-Wafer-MOVPE-Anlage (horizontale Geometrie) auf eine moderne Multi-Wafer-MOVPE-Anlage (vertikale Geometrie mit Close-Coupled-Showerhead, CCS) transferiert. In diesem Zusammenhang wurden zwei technologische Herausforderungen festgestellt. Zum einen wurde im CCS-Reaktor insbesondere bei hohen Wachstumstemperaturen eine Zersetzung des SiC-beschichteten Graphitsuszeptors beobachtet, was wiederum zu einem erhöhten, ungewollten Einbau von Silizium in die Epitaxieschichten führte. Für die Entwicklung der Epitaxieprozesse im CCS-Reaktor wurde daher die Wachstumstemperatur auf maximal 1200 °C limitiert und der Siliziumeinbau wird nunmehr regelmäßig mittels überprüft. Zusätzlich wurde der Skirt, der den Suszeptor trägt und wie dieser mit SiC beschichtet ist, durch ein TaC-beschichtetes Graphitteil ausgetauscht. Sekundärionenmassenspektrometrie (SIMS)-Messungen der Si-Konzentration zeigen in Abbildung 1 den ungewollten Einbau bis zu einer Tiefe von 1 µm. Der steile Anstieg der Si-Konzentration zur Oberfläche hin (bis zu einer Tiefe von 150 nm) kann auf Oberflächenkontamination zurückgeführt werden und ist typisch für SIMS-Messungen. Im weiteren Verlauf kann man beobachten, dass die Struktur, die mit einem TaC-beschichteten Skirt gewachsen wurde, etwas niedrigere Si-Konzentrationen zeigt. Für einen TaC-beschichteten Skirt ergeben sich Si-Konzentrationen von unter $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Dies entspricht einem in anderen MOVPE-Anlagen und Instituten beobachteten Niveau.

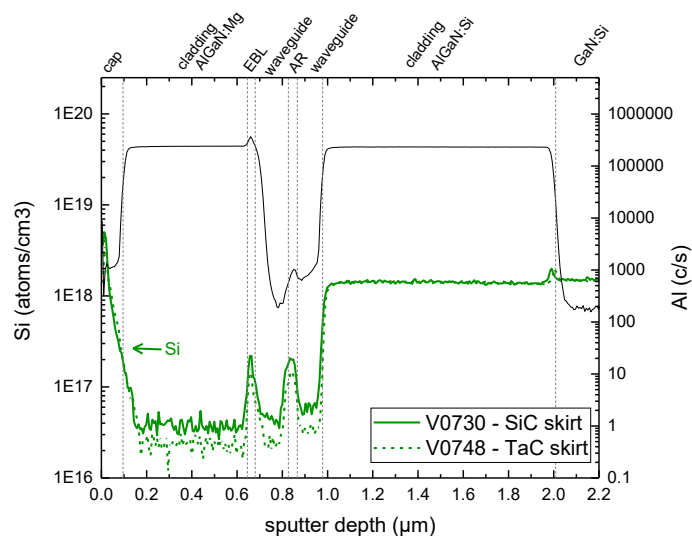


Abbildung 1: Si-Konzentrationsprofil aus SIMS-Messung an Laserdiodenheterostrukturen auf GaN, gewachsen mit einem SiC- und einem TaC-beschichteten Skirt.

Zum anderen erwies sich die Temperaturregelung als sehr träge, sodass sich Wachstumstemperaturen nur mit erheblichen Überschwingern und langen Stabilisierungszeiten einstellen

ließen. Es erfolgten apparative Erweiterungen, mit Hilfe derer nunmehr die Reaktortemperatur nach der Oberflächentemperatur des Suszeptors geregelt werden kann (Top Temperature Control, TTC). Dazu wird die Temperatur radial über den Suszeptor mit 13 Dioden in einem „Argus“-Modul ermittelt und angepasst. Im Speziellen ist der Indium-Einbau in der aktiven Zone stark temperaturabhängig, was schon bei einer moderaten Temperaturänderung zu einer merklichen Verschiebung der Laserwellenlänge führt. In Abbildung 2e ist die Position der Wafer, mit Flat nach außen gezeigt. Die drei radialen Heizzonen können separat gesteuert werden und werden von innen nach außen mit A, B, C bezeichnet (Abbildung 2f). Elektrolumineszenzmessungen (EL) von Laserheterostrukturen zeigen bei der Messung vom Flat aus Richtung Antiflat eine signifikante Wellenlängenverschiebung. Diese kann 15 nm betragen, ähnlich wie in Abbildung 2a gezeigt. Durch eine Optimierung der Heizzonenverteilung, in diesem Fall einer Verringerung der Leistung von Zone A (im Zentrum) und eine Erhöhung der Leistung von Zone C (am Rand) konnte eine Reduktion der Wellenlängenvariation auf 4 nm erreicht werden (Abbildung 2b-d).

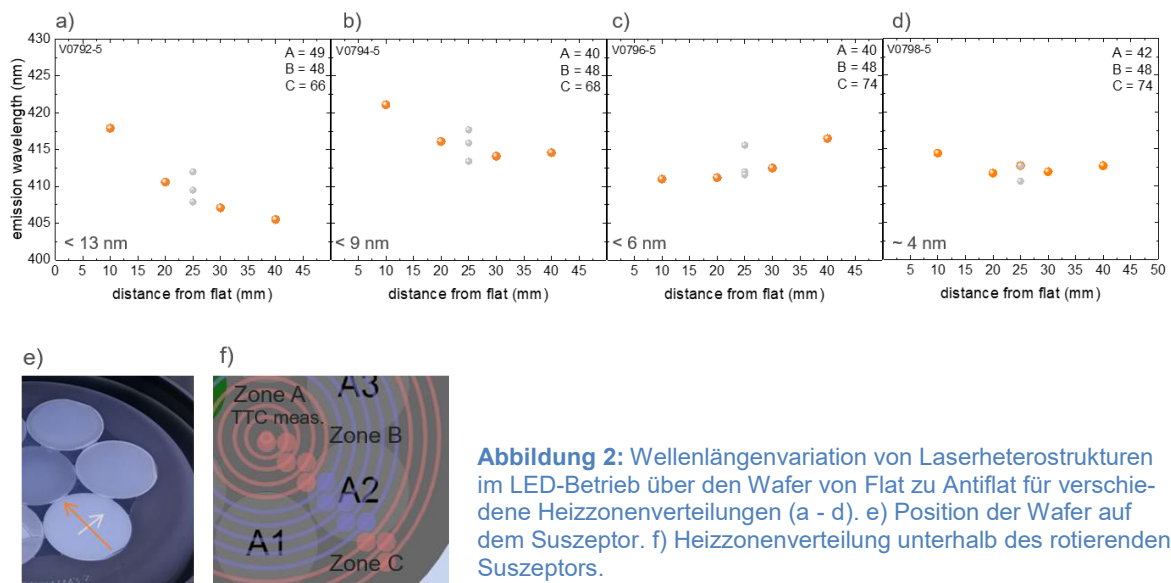


Abbildung 2: Wellenlängenvariation von Laserheterostrukturen im LED-Betrieb über den Wafer von Flat zu Antiflat für verschiedene Heizzonenverteilungen (a - d). e) Position der Wafer auf dem Suszeptor. f) Heizzonenverteilung unterhalb des rotierenden Suszeptors.

Im Verlauf des Projektes wurde bei der Epitaxie auf 2“-GaN-Wafern beobachtet, dass die Wafer am Suszeptor „festwachsen“ und nicht zerstörungsfrei aus dem Reaktor entnommen werden können. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich eine fehlende Stabilisierung der Waferrückseite gegen Zersetzung, da Ammoniak dort nicht hingelangt. Als Lösung dieses Problems hat sich bewährt, die GaN-Wafer während des Wachstums auf Wafer Elevation Elements (WEEs), welche aus 100 µm dicken Saphirwaferteilstücken bestehen, zu lagern. Somit ist die Zufuhr von Ammoniak zur Rückseite der Wafer sichergestellt. Zusätzlich ermöglicht dies eine indirektere Temperaturankopplung an den Suszeptor, was zu einer besseren Temperaturverteilung führen sollte.

Simulationen

Optische Simulationen der Lasermode

Die neue Laserstruktur, welche im Zuge des Multi-Wafer-Reaktor-Transfers zu Beginn des Projekts definiert wurde, unterscheidet sich von der Laserstruktur, welche für den alten Einzel-Wafer-Reaktor benutzt wurde. Daher wurden optische Simulationen zur Lasermode durchgeführt und charakteristische Parameter wie die modale Absorption α und der Einschlussfaktor Γ_{AR} bestimmt. Abbildung 3 zeigt die simulierte Bandstruktur (ohne Felder), die Grundlasermode und die berechneten Werte α und Γ_{AR} für einen Laser mit alter Struktur (B7859, links) und neuer Struktur (V0567, rechts). Aufgrund des GaN-Wellenleiters ist Γ_{AR} mit 3,1 % bei der

neuen Struktur etwas geringer als bei der alten Struktur (3,6 %), da in der neuen Struktur die Mode weniger eingeschlossen wird. Allerdings ist bei der neuen Struktur auch die Absorption etwas geringer, da die dotierten Schichten (inkl. EBL) weiter entfernt vom Modenmaximum liegen.

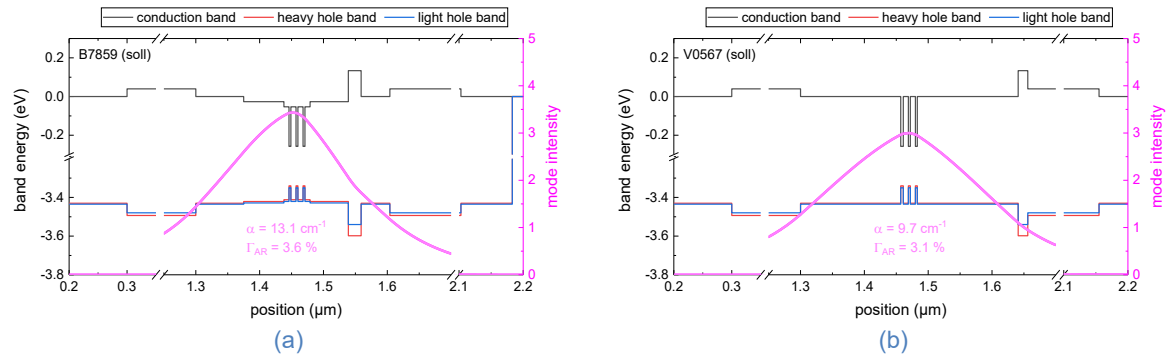


Abbildung 3: Optische Simulation der Lasermode mit modaler Absorption α und Einschlussfaktors Γ_{AR} für (a) die Laser mit InGaN-Wellenleiter von der alten Einzel-Wafer-Anlage und (b) die Laser mit GaN-Wellenleiter von der neuen Multi-Wafer-Anlage.

Dieser Zusammenhang wird auch in Abbildung 4 deutlich, wo α und Γ_{AR} für die neue Struktur unter Variation von Schichtparametern simuliert wurde. Zusammenfassend lässt sich hier erkennen, dass eine Verringerung der Wellenleiterdicke einen starken Anstieg der Absorption hervorruft, ohne den Einschlussfaktor signifikant zu erhöhen. Eine geringere Al-Konzentration in der p- oder n-AlGaN-Mantelschicht würde ebenfalls die Absorption erhöhen, weil die Mode weniger eingeschlossen wird. Eine höhere Al-Konzentration hätte nur geringe optische Auswirkungen, wohl aber elektrische.

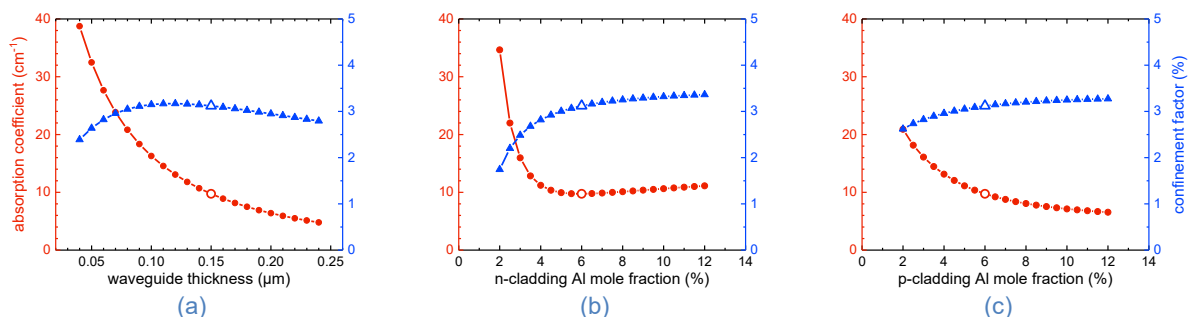


Abbildung 4: Optische Simulation der Lasermode mit modaler Absorption α und Einschlussfaktors Γ_{AR} unter Variation (a) der Wellenleiterschichtdicke, (b) der Al-Konzentration in der n-Mantelschicht und (c) der Al-Konzentration in der p-Mantelschicht.

Elektrische Simulationen der Ladungsträgerinjektion und -rekombination

Die Heterostruktur, welche zu Projektbeginn als Ausgangspunkt diente, besteht unter anderem aus 3,5 nm breiten $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ -Quantenfilmen (QW), einer 16 nm breiten $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ -Elektrosperrschicht (EBL) und $\text{Al}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ -Mantelschichten. Zur Bewertung der elektro-optischen Lasereigenschaften wurden Simulationen mit der kommerziellen Software *SiLENSe* durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die interne Quanteneffizienz (IQE), die Ladungsträgerinjektionseffizienz (CIE) und die Betriebsspannung als Funktion der Stromdichte für verschiedene QW-Breiten, EBL- und Mantelschicht-AlGaN-Zusammensetzungen ohne Berücksichtigung der Laserschwelldensität. Nach Abbildung 5a zeigt eine Änderung der QW-Breite, außer für den sehr schmalen QW (1,5 nm), keine Änderung in der CIE, sondern nur in der IQE aufgrund der Ladungsträgerdichteänderung bei gleicher Stromdichte. Abbildung 5b zeigt, dass gerade bei hohen Stromdichten eine zu geringe Al-Konzentration im EBL zu Leckströmen führt und die CIE und IQE sinken. Eine Änderung der Al-Konzentration in den Mantelschichten hat dagegen keinen Einfluss auf die CIE und IQE (siehe Abbildung 5c).

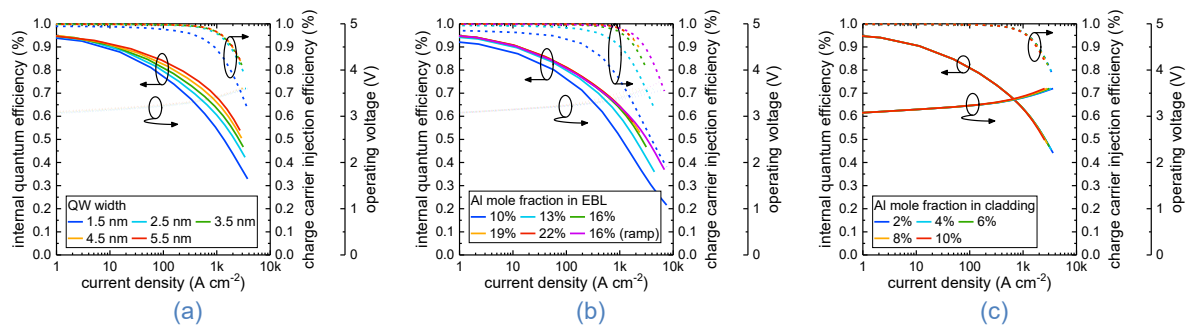


Abbildung 5: Elektrische Simulation der internen Quanteneffizienz, Ladungsträgerinjektionseffizienz und Betriebsspannung von Laserstrukturen unter Variation (a) der Quantenfilmbreite, (b) der Al-Konzentration in der Elektronensperrschicht und (c) der Al-Konzentration in den Mantelschichten.

Heterostrukturvariation

Auf Basis der Ausgangsstruktur, welche zu Beginn des Projekts definiert wurde, wurden verschiedene Heterostrukturvariationen am Wellenleiter, der aktiven Zone und an der Elektronenblockierschicht (EBL) durchgeführt, um die Uniformität und Zuverlässigkeit der Laser zu maximieren. Hierzu dienten Antest-Prozesse, bei denen die Schwellenstromdichte minimiert und über den Wafer homogenisiert und die Steigungseffizienz maximiert werden sollten.

MQWs

Um den Einfluss der Wachstumsparameter auf die Lichtleistung zu untersuchen, wurden verschiedene MQW-Strukturen gewachsen und mittels Photolumineszenz (PL) untersucht. Einerseits wurden GaN/InGaN-MQWs gewachsen, bei denen die Wachstumstemperatur für die Barrieren 860 °C betrug und die der Quantenfilme 780 °C. Dies hat zur Folge, dass nach und vor jedem Quantenfilm die entsprechende Temperatur in einer relativ langen Wachstumspause angefahren werden muss. Andererseits wurden MQWs gewachsen, bei denen die Wachstumstemperatur in der aktiven Zone nicht verändert wurde und konstant bei 780 °C lag. Mit diesem Wachstumsschema wurden GaN/InGaN-MQWs und InGaN/InGaN-MQWs hergestellt. Die Ergebnisse der PL-Untersuchung sind in Abbildung 6 zu sehen.

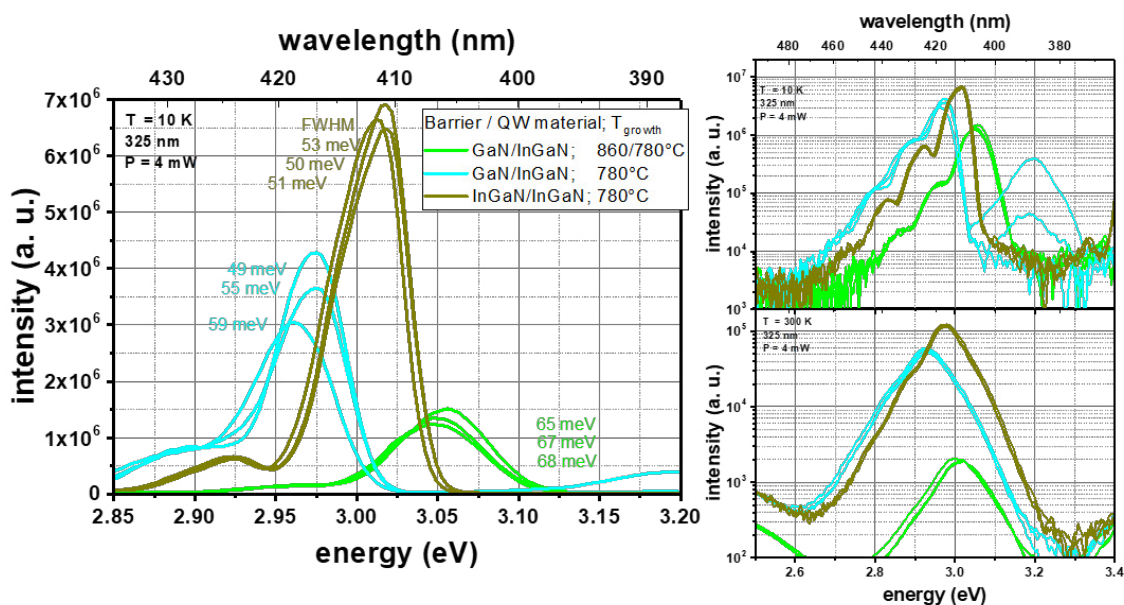


Abbildung 6: Tieftemperatur-PL-Spektren von (In)GaN/GaN-MQWs (links). Vergleich der Intensitäten von PL-Spektren bei Raumtemperatur (unten rechts) und bei tiefer Temperatur (oben rechts).

Links sind die bei 10 K gemessenen PL-Spektren gezeigt. Man erkennt deutlich erhöhte Intensitäten bei den Proben, bei denen die Wachstumstemperatur in der aktiven Zone konstant gehalten wurde. Zusätzlich lassen sich reduzierte Halbwertsbreiten der Emission erkennen. Dies könnte auf verbesserte Grenzflächen zwischen den Quantenfilmen und -barrieren zurückzuführen sein. Vergleicht man die Intensität der gemessenen Spektren bei 10 K (rechts oben) mit denen bei Raumtemperatur (rechts unten) wird deutlich, dass die Proben mit konstanter Wachstumstemperatur in der aktiven Zone weniger als zwei Größenordnungen an Intensität verlieren, wohingegen die Probe mit unterschiedlichen Temperaturen für Barrieren und Quantenfilme ca. drei Größenordnungen an Intensität verliert. Dies spricht für eine höhere Effizienz der MQWs bei konstanter Wachstumstemperatur.

Weitere Untersuchungen des Wachstums der aktiven Zone ergaben jedoch niedrigere Schwellstromdichten für Strukturen, die mit verschiedenen Wachstumstemperaturen in der Quantenfilmen und den Barrieren gewachsen wurden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die niedrigsten Schwellstromdichten und somit auch die besten Voraussetzungen für lange Lebensdauern der Bauelemente für InGaN/GaN MQWs erreicht werden konnten. In Abbildung 7 ist ein Vergleich der Schwellstromdichte von LD-Strukturen mit InGaN/GaN MQWs bei variiertem Wachstumstemperatur und InGaN/InGaN-MQWs bei konstanter Wachstumstemperatur zu sehen.

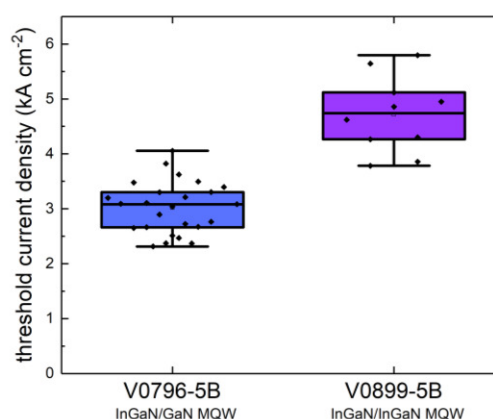


Abbildung 7: Schwellstromdichte von LD-Strukturen mit InGaN/GaN-MQW bei variiertem Wachstumstemperatur (links) und InGaN/InGaN-MQWs bei konstanter Wachstumstemperatur (rechts) gewachsen.

Elektronenblockerschicht (EBL)

Ausgangspunkt der EBL-Variationsserien war ein $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}:\text{Mg}$ -EBL mit einer Dicke von 15 nm, eingebettet zwischen GaN-Wellenleiter und $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}:\text{Mg}$ -Mantelschicht. In zwei Serien wurde der Al-Gehalt des EBLs zwischen 8 % und 24,5 % und die Breite des EBLs zwischen 8 und 25 nm variiert. Es zeigte sich, dass ein geringerer Al-Gehalt im EBL die Schwelle senkt, aber auch die Steigungseffizienz auf Grund der geringeren Elektronenblockierung reduziert. Eine Verbreiterung des EBLs führte zu einer Abnahme der Steigungseffizienz aufgrund der verringerten Lochinjektionseffizienz bei fast gleichbleibender Schwelle. Dies machte sich auch bei temperaturabhängigen Messungen bemerkbar (Abbildung 8), da Laser mit breiteren EBLs überraschender Weise eine negative charakteristische Temperatur aufwiesen, eine höhere Temperatur also zu einer kleineren Schwelle führte. Als Fazit wurde ein 15 nm $\text{Al}_{0.125}\text{Ga}_{0.875}\text{N}:\text{Mg}$ -EBL als neuer Standard in der Laserheterostruktur definiert.

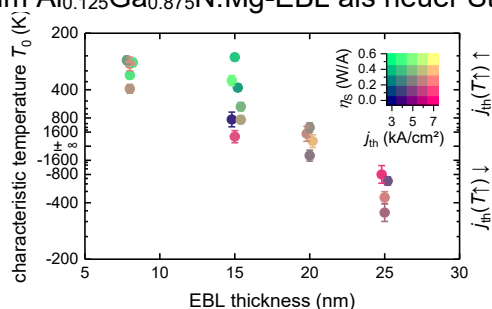


Abbildung 8: Charakteristische Temperatur (inverse Darstellung) als Funktion der EBL-Dicke. Farbkodiert ist die Schwellstromdichte j_{th} und die Steigungseffizienz η_s der jeweiligen Laser.

InGaN-Zwischenschicht im Wellenleiter

InGaN-Schichten unterhalb der aktiven Zone, also im n-Wellenleiter, können dazu verwendet werden, beim Wachstum entstehende Punktdefekte zu filtern und somit die Punktdefektdichte in den QWs zu reduzieren. Dies führt zu einer höheren strahlenden Rekombinationsrate und schließlich zu einer höheren Effizienz der elektrooptischen Bauteile. Da der In-Einbau stark temperaturabhängig ist, wurde die Wachstumstemperatur auf 800 °C für diese Schicht der Heterostruktur abgesenkt und nach einem 90 nm dicken GaN-Wellenleiter zusätzliche ein 60 nm InGaN-Wellenleiter gewachsen. Es konnte gezeigt werden, dass MQWs mit InGaN-Zwischenschichten bei Raumtemperatur zu höheren PL-Intensitäten führen. Abbildung 9 zeigt die Schwellenstromdichte und Steigungseffizienz von Laserdioden, bei denen der In-Gehalt in der InGaN-Zwischenschicht zwischen 0 % und 4 % variiert wurde. Demnach gibt es für eine InGaN-Zwischenschicht mit etwa 3 % Indium ein Optimum, d. h. sowohl kleine Schwelle als auch hohe Steigungseffizienz. Eine weitere Erhöhung des In-Gehalts führt jedoch vermutlich nicht zur weiteren Reduzierung der Defekte, sondern stattdessen zu einer nachteiligen Verschiebung des Lasermodemaximums aufgrund des asymmetrischen Wellenleiters.

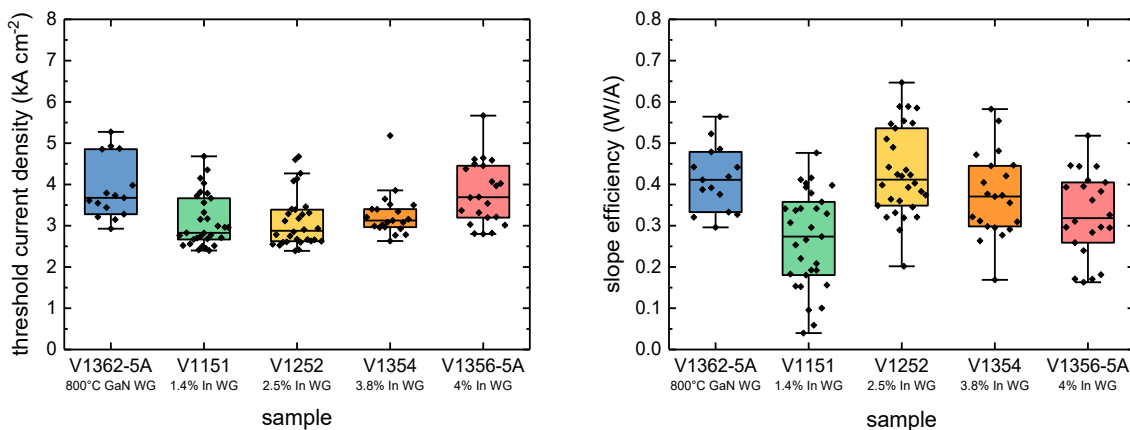


Abbildung 9: Schwellenstromdichte und Steigungseffizienz von Laserdioden, bei denen der In-Gehalt in der InGaN-Zwischenschicht zwischen 0 % und 4 % variiert wurde.

Barrierendotierung

Eine weitere Möglichkeit, Punktdefekte zu filtern, besteht laut Literatur darin, die erste Barriere zu dotieren. Ein Kreuzvergleich zwischen Heterostrukturen mit InGaN-Zwischenschicht und/oder dotierter erster Barriere der aktiven Zone zeigt (vgl. Abbildung 10), dass die Schwellenstromdichte bei allen Kombinationen relativ konstant zwischen 2,5 kA/cm² und 3,5 kA/cm² liegt, aber die Steigungseffizienz deutlich höher ist, wenn statt der InGaN-Zwischenschicht nur die erste Barriere dotiert wird, wobei die Dotierung hier $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ nicht überschreiten sollte.

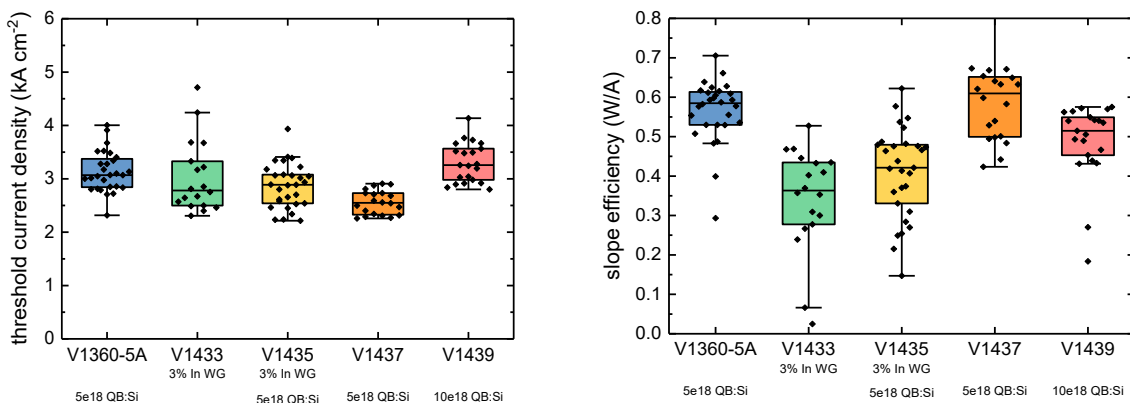


Abbildung 10: Schwellenstromdichte und Steigungseffizienz von Laserdioden mit einer dotierten ersten Barriere im Vergleich zu Laserdioden mit einer InGaN-Zwischenschicht.

Optimierung von Wachstumsunterbrechungen

Unterbrechungen der Zuführung von Metallorganika während des Veränderns von Wachstumsbedingungen (Rampen von Flüssen, Drücken oder Temperaturen) können z. B. zu Desorption von Gallium und folglich zu Zwischenschichten höherer Bandlücke führen. Diese können für die Ladungsträgerinjektion hinderlich sein. Um das zu verhindern, wurden auch während des Veränderns von Reaktorparametern in der n- und p-Seite Metallorganika in die Reaktorkammer geleitet, sodass ein ununterbrochener Zufluss von Gruppe-III-Ausgangsstoffen vorhanden ist. Laserdioden ohne Unterbrechung der Metallorganika wiesen häufig kleinere Schwellenstromdichten als auch höhere Steigungseffizienzen auf.

Vergleich von GaN-Substraten

Während des Projektzeitraums wurde die Produktion von GaN-Substraten durch die Firma Sumitomo Electric Inc. (SEI) eingestellt und deshalb neue Substrate eines zweiten Herstellers (Mitsubishi Chemical Corp., MCC) qualifiziert. Morphologisch zeigen die Schichten auf MCC-Substraten keine Auffälligkeiten, vielmehr eine glatte, homogene Oberfläche über den gesamten 2"-Wafer. On-Wafer-Elektrolumineszenzmessungen an LD-Heterostrukturen zeigen eine spontane Emission bei 420 nm, wie im Spektrum in Abbildung 11 zu sehen ist. Die Strukturen auf „stripe-core“ SEI-Substraten weisen dagegen eine deutliche gelbe Lumineszenz im Spektralbereich zwischen 500 nm und 650 nm auf. Diese könnte unter anderem aus Verunreinigungen mit Kohlenstoff entstehen oder eine Folge der Streifen des Substrates sein. Strukturen auf MCC-Substrat zeigen diesen spektralen Anteil nicht. Ein Vergleich der Laserleistung der beiden Substrate zeigte in verschiedenen Antest- und RW-Prozessen, in denen beide Substrate parallel verwendet wurden, dass die Laser auf MCC-Substraten etwas kleinere Schwellenstromdichten ausweisen im Vergleich zu denen auf SEI-Substraten. Der Herstellerwechsel ist somit kein Nachteil gewesen, allerdings konnten abschließende Alterungsexperimente nicht innerhalb des Projektzeitraums abgeschlossen werden.

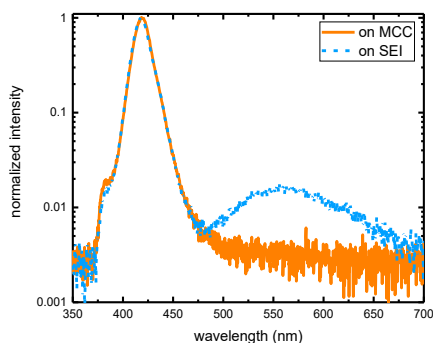


Abbildung 11: Spontane Emission zweier LD-Heterostrukturen auf GaN Substraten verschiedener Hersteller mittels on-Wafer Elektrolumineszenz gemessen.

Optimierung der p-Seite

Für eine Minimierung der Kontakt- und Schichtwiderstände der zu entwickelnden Laser ist die Magnesiumdotierung der p-leitenden Schichten von großer Bedeutung. Im Projektzeitraum wurde die entsprechende Dotierung der Mantelschicht und der Kontaktschicht variiert. Die Kontaktschicht wird durch einen 20 nm dicken, äußerst hochdotierten Bereich abgeschlossen. Die Magnesiumkonzentration der 500 nm dicken $\text{Al}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}:\text{Mg}$ -Mantelschicht wurde im Bereich $1,3\text{--}4,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ und die der 90 nm dicken $\text{GaN}:\text{Mg}$ -Schicht im Bereich $0,3\text{--}1,3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ variiert. In Abbildung 12 sind exemplarisch Strom-Spannungskennlinien zwischen unformierten Pd/Au-Kontakten auf einer Laserstruktur gezeigt. Im damaligen Stadium der Technologieentwicklung konnten noch keine Ohmschen Kontakte realisiert werden. Im weiteren Projektverlauf konnten jedoch durch eine optimierte p-Kontaktschicht Ohm'sche Kontakte mit spezifischen Kontaktwiderständen um $3 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$ realisiert werden. In Abbildung 13 ist die I-V-Charakteristik mit linearem Verlauf zu sehen.

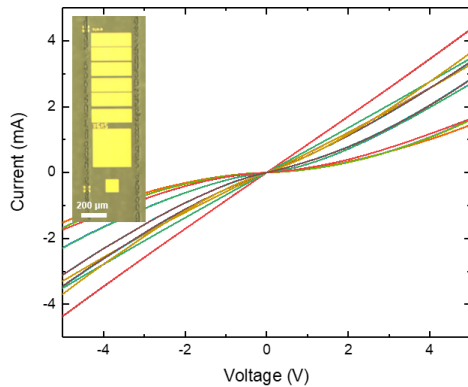


Abbildung 12: p-TLM Messung an Pd/Au-Kontakten auf einer Laserdioden-Heterostruktur mit einer reduzierten Mg-Dotierung von $3,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ in der 90 nm dicken GaN:Mg-Cap-Schicht und $1,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ in der 500 nm dicken AlGaN:Mg-Mantelschicht.

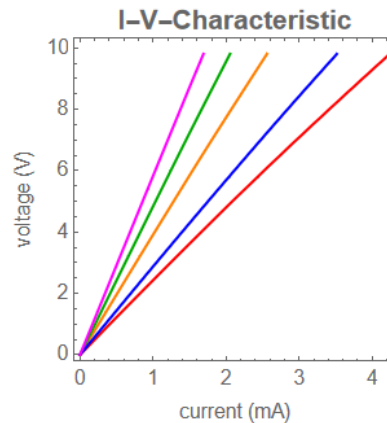


Abbildung 13: Lineare I-V-Charakteristik von p-TLM-Strukturen auf einer LD-Heterostruktur.

AP2: Optimierung der Chiptechnologie

p-Kontakttechnologie

Der bei Projektstart am FBH standardmäßig verwendete p-Kontakt aus Pd/Pt führt zu spezifischen Kontaktwiderständen auf GaN-Laserdioden von ca. $3 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$. Die Halbleiteroberfläche wird dazu vorab über einen vierstufigen Prozess nasschemisch gereinigt. Im Anschluss an die p-Kontaktmetallisierung wird Ti/Pd als Hartmaske für die darauffolgende Sputterstrukturierung des p-Kontakts und die Plasmaätzung des Rippenwellenleiters in die Halbleiterstruktur verwendet. Palladium eignet sich als Hartmetallmaske, da es eine hohe Ätzselektivität gegenüber GaN von etwa 1:35 aufweist. Dicke Palladiumschichten sind jedoch in sich stark verspannt und haften schlecht, d. h. sie lösen sich teilweise vom Wafer ab. Die Bedingungen beim Aufdampfen, insbesondere die Aufdampfrate der Palladiumätzmaske wurde deshalb untersucht. Die geringste Aufdampfrate von 1 \AA/s führte zu einer 2,8-mal größeren Metallkorngroße im Palladium und damit auch zu einer geringeren tensilen Verspannung des Palladiums im Vergleich zu der größten getesteten Aufdampfrate von 4 \AA/s . Im Ergebnis dessen konnte der Prozess angepasst und eine reproduzierbar gute Haftung des p-Metallstapels sichergestellt werden (vgl. Abbildung 14). Mit der optimierten Metallhaftung ist voraussichtlich nicht nur eine erhöhte Prozessausbeute, sondern ebenso eine erhöhte Langzeitstabilität des Bauelements verbunden.

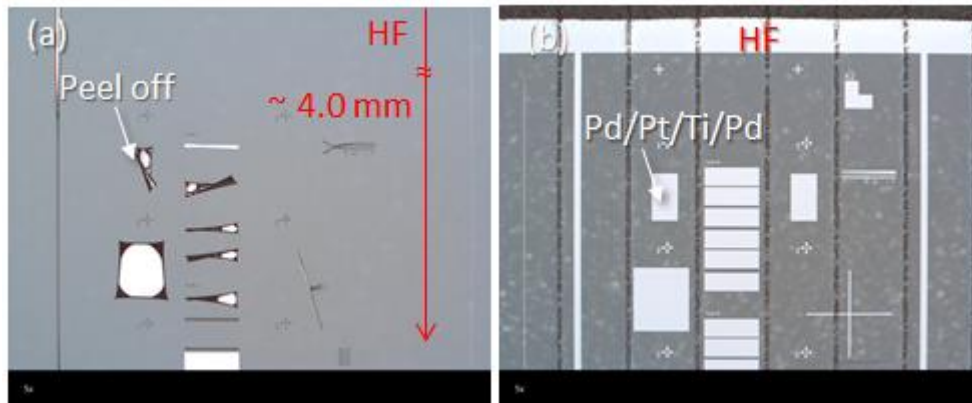


Abbildung 14: Optische Mikroskopaufnahmen (Draufsicht) von Wafern nach Strukturierung des p-Kontakt-Metallstapels bei Verwendung einer Aufdampftrate für Palladium von 4 Å/s (a) bzw. 1 Å/s (b).

Rippenätztechnologie

Die präzise Herstellung von Rippenwellenleitern ist für die Verbesserung der Leistung, Effizienz und Langlebigkeit von GaN-basierten Laserdioden unerlässlich. Um dies zu erreichen, ist eine genaue, zuverlässige und reproduzierbare Kontrolle der Ätztiefe erforderlich. Anfänglich wurde am FBH ein In-situ-Reflektometer verwendet, das bei 633 nm arbeitet. Mit einer solch relativ großen Wellenlänge lässt sich nur schwer eine klare Überwachung während des Ätzens von GaN-basierten Lasern auf GaN-Wafern realisieren. Im Laufe der Jahre hat das FBH durch eine Reihe von Innovationen und Kooperationen mit Branchenführern wie LayTec und Sentech erhebliche Fortschritte bei der Weiterentwicklung von Ätztechniken für GaN-Materialien erzielt.

Um die Ätzpräzision zu verbessern, wurde zunächst das Reflexionsvermögen bei kleineren Wellenlängen simuliert, um die für das Interferometer am besten geeignete Wellenlänge zu ermitteln (siehe Abbildung 15a). Im Jahr 2021 wurde zunächst von der Fa. LayTec ein Interferometer-Prototyp mit einem Drei-Wellenlängen-Detektionssystem getestet. Diese Innovation führte zu dichteren Schwingungen und einer höheren Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Brechungsindex, was die Erkennung einzelner Schichten während des Ätzens ermöglichte. Dies verbesserte durch die präzise Erkennung der Zielschicht die Ätzgenauigkeit erheblich.

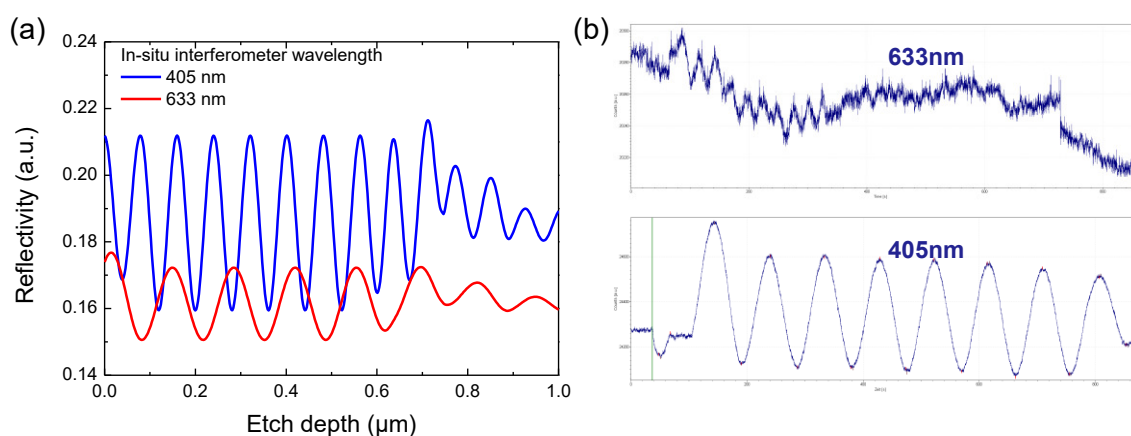


Abbildung 15: (a) Simulation der Reflexionskurven und (b) In-situ-Überwachungsdaten der Rippenätzung von GaN-basierten Lasern auf GaN-Substrat als Funktion der Ätztiefe für die Reflektometer-Wellenlänge von 405 nm und 633 nm.

Im Jahr 2022 wurde am FBH das Reflektometer SLI405 von Sentech zur In-situ-Überwachung getestet. Dieses System nutzt einen Laser mit einer einzigen Detektionswellenlänge (405 nm), um die Ätztiefe präzise zu steuern. Erfolgreiche Tests zeigten eine hohe Übereinstimmung zwischen experimentellen Ergebnissen und Simulationsvorhersagen, unabhängig von der Ätzrate. Das System ermöglichte es, die Ätzung mit einer Genauigkeit von < 10 nm zu realisieren (Abbildung 15b). Nach einer gründlichen Evaluierung entschied sich das FBH im Jahr 2024 für das Interferometer SLI405 von Sentech aufgrund seiner überlegenen Eigenschaften für den Einsatz am FBH, wie z. B. einer Live-Kamera zur Erfassung des Messpunktes auf dem Wafer und der Softwarekompatibilität mit den am FBH bereits vorhandenen Ätzanlagen. Seitdem konnte so in mehreren Laserprozessen die Ätzpräzision von < 10 nm bestätigt und damit die Technologie zur Herstellung der GaN-Laser entscheidend verbessert werden.

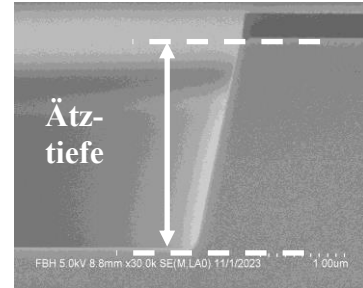


Abbildung 16: REM-Querschnittsaufnahme einer in eine GaN-basierte Laserdiode geätzte Rippe.

Passivierungstechnologie

Der Rippenwellenleiter wird vor dem Aufbringen der Bondpads über die Abscheidung einer SiO_2 -Isolatorschicht auf der gesamten Waferoberfläche mittels IC-PECVD passiviert. Die vor Projektbeginn standardmäßig durchgeführte Abscheidung bei 130°C führte häufig zum lokalen Ablösen der SiO_2 -Schicht auf dem p-Metallkontakt aus Palladium. Die Abscheidungsbedingungen, insbesondere die Temperatur und die HF-Leistung wurden optimiert. Mit einer höheren Abscheidetemperatur von 250°C wurden SiO_2 -Schichten mit deutlich verbesserter Haftung erzielt (vgl. Abbildung 17).

Um die Konformität der SiO_2 -Isolationsschicht zu erhöhen, wurde bei deren Abscheidung die ICP-Leistung von 450 W auf 15 W reduziert. Die Konformität der Schicht konnte so von 0,67 auf 0,79 erhöht werden. Die Vorbehandlung der Oberfläche in der IC-PECVD-Kammer mit NH_3 zur Reinigung der Oberfläche führte zu unregelmäßigen Farbveränderungen der SiO_2 -Schicht auf dem Metallkontakt. Dies könnte ein Resultat des Wasserstoffs in der SiO_2 -Schicht sein, wenn dieser während der NH_3 -Oberflächenbehandlung durch die Pd-Schicht adsorbiert und später in die SiO_2 -Schicht wieder abgegeben wird. Es gab keine eindeutigen Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit der Bauelemente, aber auch keinen klaren Vorteil der NH_3 -Oberflächenbehandlung bezüglich SiO_2 -Haftung. Ausgehend von unserer ursprünglichen Idee, jedwedes Einbringen von Wasserstoff in unser Bauelement zu minimieren, wird die NH_3 -Oberflächenbehandlung in diesem Prozessschritt zukünftig weggelassen.

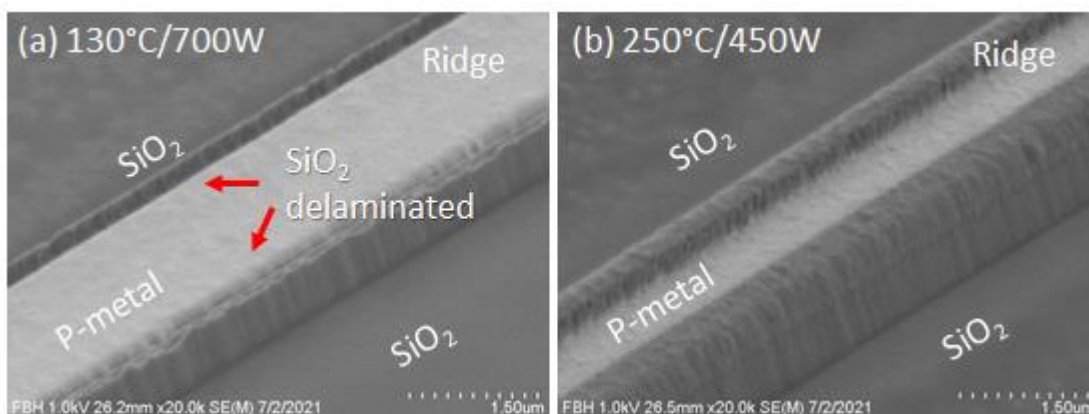


Abbildung 17: REM-Aufnahmen in Vogelperspektive von GaN-Rippenwellenleitern mit 300 nm dicker SiO_2 -Passivierung unter Verwendung unterschiedlicher Abscheidetemperaturen und HF-Leistungen des SiO_2 : $130^\circ\text{C}/700\text{ W}$ (a) und $250^\circ\text{C}/450\text{ W}$ (b).

Waferabdünnen

Das Abdünnen der Waferrückseite ist ein elementarer Bestandteil der Prozesskette zur Herstellung von Diodenlaserchips. Es erleichtert das präzise Spalten der Wafer und die Erzeugung von Laserfacetten mit hoher struktureller Qualität. Galliumnitrid (GaN) ist ein sehr sprödes Material. Zusammen mit den verspannten Epitaxieschichten auf dem abgedünnten Wafer verringert dies jedoch dessen mechanische Stabilität und führt somit zu einem erhöhten Bruchrisiko. Abgedünnte Wafer weisen auf der Rückseite verschiedene Merkmale wie Rauheit, Risse, Kratzer und Schäden unter der Oberfläche (SSD, *sub-surface damage*) auf (siehe Abbildung 18). Diese beschädigten Bereiche tragen erheblich zur Schwächung des Substrats bei und erhöhen die Verkrümmung und die Bruchrate der Wafer.

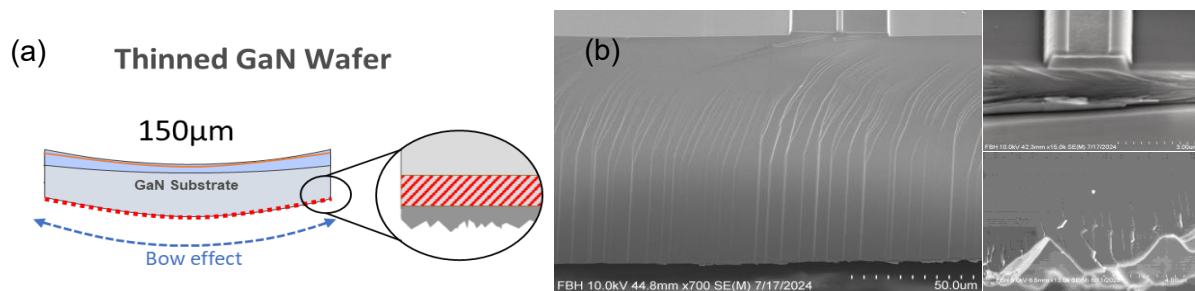


Abbildung 18: (a) Illustration des Querschnitts eines abgedünnten GaN-Wafers. (b) REM-Aufnahme von SSD und Rissen im Bereich der Laserfacette

Um die Rückseitenbearbeitung von GaN-Rippenwellenleiterlasern zu optimieren, wurden GaN-Wafer mit drei verschiedenen Technologien abgedünnt: Läppen, Schleifen und Schleifen mit anschließendem Polieren. Eine detaillierte Bewertung der Auswirkungen der einzelnen Technologien auf die Schäden auf der Rückseite und die Laserperformance ist in der folgenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Abdünn-Technologievariationen und deren Auswirkungen auf die Wafer bzw. Bauteile

Technologie	Ø SSD Größe (µm)	Waferkrümmungsradius (m)	Terrassendichte in aktiver Zone	Schwellenstromdichte	Ausbeute (%)	Abdünnrate (µm/min)
Läppen	2-3,3	0,35-0,4	Hoch	Hoch	50	3-6
Schleifen	0,7	0,67	Gering	Gering	96	2-3
Schleifen + Polieren	-	2,80	Sehr gering	Gering	75	1-2

Der Einfluss sowohl der Schleifmittelgröße als auch der Abdünntechnologie ist aus der Tabelle 1 ersichtlich. So kann beispielsweise die Verwendung eines Schleifmittels mit kleinerer (9 µm) anstelle größerer (29 µm) Korngröße das Ausmaß des SSD beim Läppen von 3,3 µm auf 2 µm reduzieren. Im Vergleich dazu ermöglicht das Schleifen jedoch eine weitere Reduzierung des SSD und der Risse auf der Rückseite. Darüber hinaus haben wir nach dem Polieren keinerlei SSD-Schäden beobachten können, während ebenfalls die Anzahl der Risse stark abgenommen hat.

Da alle Wafer die gleiche Ausgangs- und Zieldicke aufwiesen, kann die Steigerung der Prozessausbeute hauptsächlich auf eine Verringerung der Oberflächen- und SSD-Schäden auf der Rückseite und somit auf eine Entspannung des Substrats mit größerem Verbiegungsradius zurückgeführt werden.

Um den Einfluss von Oberflächen- und SSD-Schäden auf die Kristallqualität und das Defektniveau zu untersuchen, wurden Röntgenbeugungs- (XRD) und PL-Untersuchungen von der Rückseite der Wafer durchgeführt. Wie in Abbildung 19 zu sehen weist die unbearbeitete Probe im Vergleich zu den bearbeiteten Proben sehr hohe und schmale XRD-Peaks auf, was auf eine hohe Kristallqualität an der Rückseite hinweist. Ebenfalls lässt sich durch den Vergleich der Halbwertsbreiten (FWHM) erkennen, dass die geläppte Probe im Vergleich zur geschliffenen eine größere Schädigung aufweist.

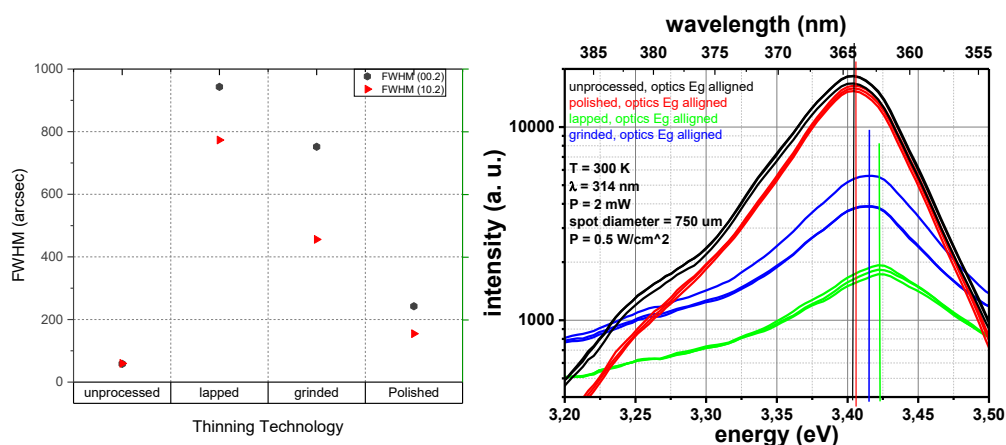


Abbildung 19: links: Ergebnisse von Untersuchungen mittels Röntgenbeugung (links) und Photolumineszenz (rechts) an der Rückseite unterschiedlich abgedünnter GaN-Wafer.

Bei den PL-Messungen war es aufgrund der Unterschiede in der Oberflächenmorphologie schwierig, die Stärke der gelben Lumineszenz der einzelnen Proben fair miteinander zu vergleichen. Zu beobachten ist jedoch eine deutliche Blauverschiebung bei den geschliffenen und geläpften Proben im Vergleich zu den unbearbeiteten Proben (vgl. Abbildung 19). Diese Verschiebung deutet auf eine Verringerung der interatomaren Abstände hin, die vermutlich auf Druckspannungen in der c-Ebene auf der Rückseite des Wafers zurückzuführen ist. Die etwas stärker verschobenen Peaks beim Schleifen können darauf hindeuten, dass die hier eingebrachte Druckspannung größer ist als beim Läppen und somit die vorhandene Zugspannung im Substrat (eingebracht durch Epitaxie und SSD) besser kompensiert wird. Dadurch ist auch die Durchbiegung der geschliffenen Wafer geringer und ihre mechanische Festigkeit höher. Die polierten Proben weisen ein ähnliches Beugungsbild auf wie die unbearbeiteten Proben, was auf eine erhebliche Verringerung von Schäden und Spannungen hinweist. Das bedeutet, hier wird keine zusätzliche Druckspannung eingebracht, aber eben auch keine zusätzliche Zugspannung durch SSD. Das führt insgesamt zu weniger durchgebogenen und verspannten Wafers. Als Schlussfolgerung aus diesen Befunden werden zukünftig die Wafer zuerst dünn geschliffen und dann anschließend poliert, um so durch die verringerte Verbiegung die Prozessierung zu erleichtern und die Stabilität der Wafer zu erhöhen.

Wir konnten ebenfalls eine Abhängigkeit der Facettenqualität vom Abdünnverfahren beobachten. So war es ersichtlich, dass Schäden auf der Rückseite die Bildung von Terrassen auslösen, die sich über die Facetten ausbreiten (vgl. Abbildung 18). Dadurch erhöht sich die Facettenrauheit, was die Leistungsfähigkeit des Bauelements beeinträchtigen kann (siehe Abbildung 20). So hilft auch hier die Kombination aus Schleifen und Polieren, die Facettenqualität und somit die Performance der Laser zu erhöhen.

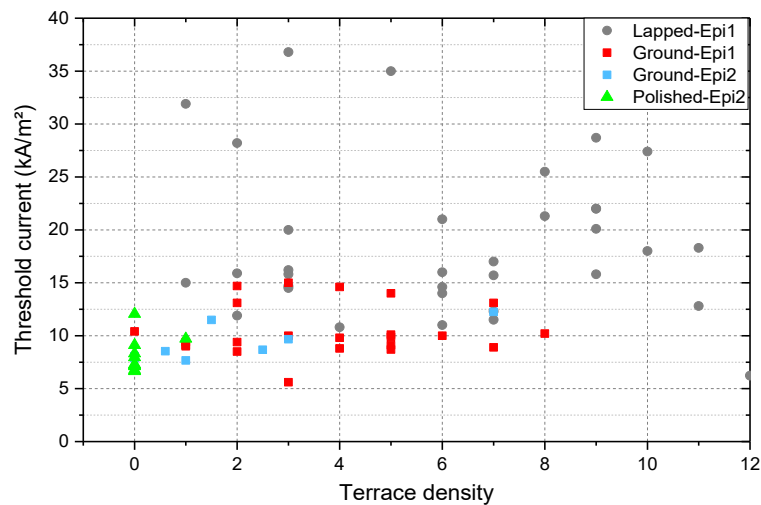


Abbildung 20: Einfluss verschiedener Abdünnstechnologien und der damit einhergehenden Facettenqualität (hier dargestellt durch eine dimensionslose Terrassendichte) auf die Schwellenstromdichte der Laser.

Facettentechnologie

Qualitativ hochwertige Laserfacetten sind für GaN-basierte Laserdioden unerlässlich, da sich ihre Rauheit direkt auf wichtige Laserparameter wie Schwellenstrom und Steigungseffizienz auswirkt. Im gesamten Projektzeitraum konzentrierten sich umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am FBH auf die Optimierung von Ritzmethoden, um glatte, defektfreie Facetten zu erzielen und so die Zuverlässigkeit der Verarbeitung und die Leistungsfähigkeit der Bauteile zu verbessern.

Wie bereits beschrieben umfassten die Arbeiten zunächst das Abdünnen der Wafer. Anschließend wurde ein System zur automatischen Facetteninspektion integriert. Dadurch ließ sich die Datenerfassung und statistische Analyse erheblich verbessern. Diese Schritte lieferten wertvolle Erkenntnisse darüber, wie sich die Facettenqualität quantifizieren lässt, insbesondere in Bezug auf die Terrassendichte und Rauheit.

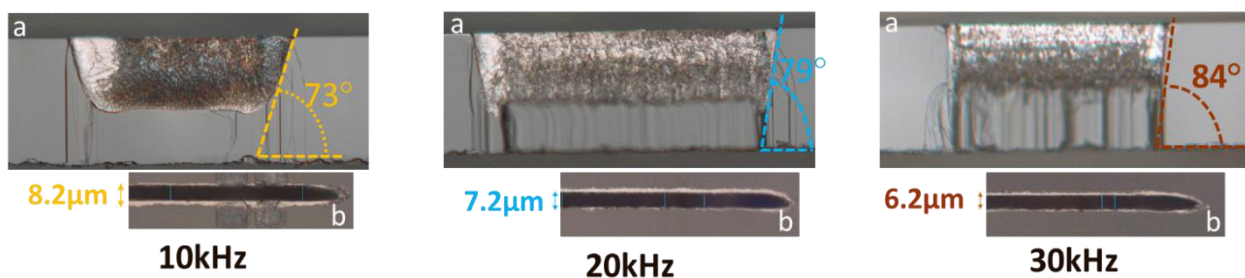


Abbildung 21: (a) Facettenansicht und (b) Draufsicht auf verschiedene Ritzfrequenzen der Lasersäge

Dadurch ließ sich das Verständnis des Einflusses von Ritzparametern (vgl. Abbildung 21) und der verwendeten Ritzanlage deutlich erhöhen. Es wurden Vergleiche zwischen der am FBH zum Projektbeginn genutzten Standard-Laserritzanlage und einer neuen Hochleistungs-Lasersäge durchgeführt. Die mit einer kontrollierten Optik ausgestattete Lasersäge ermöglichte eine präzise Steuerung des Ritzstrahls und der Ritzform, wodurch die thermische Belastung erheblich reduziert und eine gleichmäßigere Spaltqualität erreicht wurden. Die Anpassung von Parametern wie Ritztiefe, Abstand und Strahlfokus lieferte wertvolle Erkenntnisse darüber, wie die Ritzgeometrie und die thermische Belastung die Terrassenbildung und das Rissverhalten beeinflussen. Optimierte Parameter erhöhten die Ausbeute und führten zu glatteren Facetten.

AP3: Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik

Hermetische Einhausung

Da sich in vorangegangenen Untersuchungen gezeigt hatte, dass ein Betrieb der GaN-Laser unter Laboratmosphäre zu einer ungewünschten Abscheidung von SiO_x auf der Facette führt, sollten die Laserchips zukünftig hermetisch eingehaust werden. Nach Recherchen wurde als dafür gängigste und etablierteste Technologie die Montage in ein TO-Gehäuse identifiziert. Zunächst bot sich als erste, kurzfristig mögliche Realisierung die Beauftragung der Firma Eagleyard Photonics (EyP) mit den entsprechenden Arbeiten als „Komplettpaket“ an. D. h. ausgesuchte Laserdiodenchips auf CuW-Submounts wurden an EyP übergeben und auf einen dort verfügbaren und passenden TO9-Header montiert. Anschließend wurden diese mit einer für die Wellenlänge passenden Kappe unter einer „Trimix“-Atmosphäre ($\text{N}_2/\text{O}_2/\text{He}$ (7:2:1)) verschweißt und wieder ans FBH für Alterungsexperimente zurückgeliefert.

Langfristig war jedoch das Ziel, die hermetische Montage in TO-Gehäusen am FBH zu etablieren. Eine Recherche zu möglichen Anbietern eines entsprechenden Packages führte zur Firma Schott AG, bei der TO56-Header (vgl. Abbildung 24) mit einer für die Wellenlänge von 420 nm geeigneten Kappe bestellt wurden. Die Qualifizierung der Bauteile wird im AP4 beim Unterpunkt Lebensdaueruntersuchungen beschrieben. Für die Montage auf die Header ist auch ein angepasstes Submount erforderlich. Dieses wurde entworfen und beschafft. Zur Durchführung der Montage-technologie (Bonden der Laserchips mit Submount auf TO-Header sowie Drahtbonden) wurde eine Haltevorrichtung für die TO-Header entworfen. Nach den erfolgreichen Montagetests konnten dann funktionsfähige Laser auf TO-Header batchweise über eine Firma in der Nähe des FBH mit den beschafften Kappen verschweißt werden. Überlegungen, auch den Schweißprozess am FBH durchzuführen, erwiesen sich als nicht praktikabel.

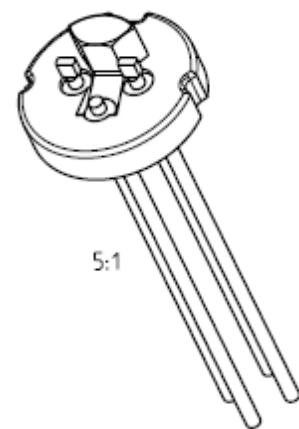


Abbildung 24: TO56-Header für die zukünftige Montage der Laserdioden (Quelle: SCHOTT Zeichnung SL01.664.083)

Eine FBH-eigene Technologie für die Montage von Laserdioden in TO-Packages konnte somit während des Projekts entwickelt werden. Diese Technologie hat sich zum Ende des Projekts als eines von zwei Standardverfahren etabliert. Auch die Kooperation mit einem nahegelegenen (externen) Dienstleister für das Schweißen von Kappen auf die TO-Sockel hat sich bewährt. Diese Technologie wird somit auch nach Abschluss des Projekts weiter am FBH genutzt.

AP4: Herstellung und Qualifizierung von FP(RW)-Lasern

Zu Beginn des Projekts wurden zunächst die RW-Laser der Einzelwaferanlage qualifiziert und die Erkenntnisse dann auf RW-Laser der Multiwaferanlage übertragen und weiter optimiert. Von welcher Anlage die jeweilige Untersuchung stammt ist in den kommenden Abschnitten vermerkt.

Einfluss der p-Seiten-Aktivierungsbedingung auf die Laserschwelle und Betriebsspannung

Die Untersuchung der Aktivierungsbedingungen wurde an Lasern der Einzelwaferanlage durchgeführt. Es kamen die Standard-p-Kontakttechnologie des FBH und zwei unterschiedliche Prozesse zur thermischen Aktivierung der p-Leitfähigkeit im Halbleiter zum Einsatz. Aus Voruntersuchungen war bekannt, dass hohe Aktivierungstemperaturen die Oberfläche der Wafer modifizieren und niedrige Kontaktwiderstände schwieriger zu erzielen sind. Daher wurden neben den Standardaktivierungsbedingungen von 2 min bei 820 °C ebenfalls 15 min bei 660 °C verwendet. Zusätzlich zu dieser Variation wurden Laser auf zwei verschiedenen GaN-Substrattypen hergestellt. Bisher wurden am FBH Substrate der Firma Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) verwendet. Erstmals kamen nun im Vergleich dazu auch defektreduzierte Substrate der Firma Sumitomo zum Einsatz.

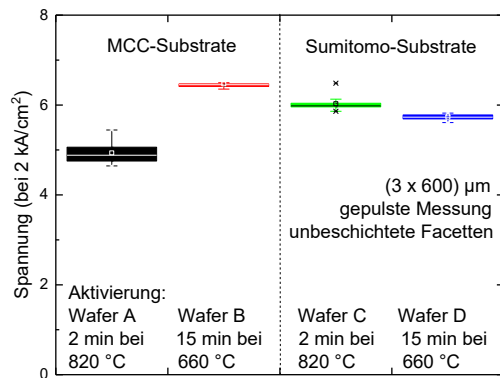


Abbildung 25: Vergleich der Betriebsspannung von RW-Lasern unter Verwendung verschiedener Substrate und p-Aktivierungsbedingungen bei Betrieb bei gleicher nomineller Stromdichte.

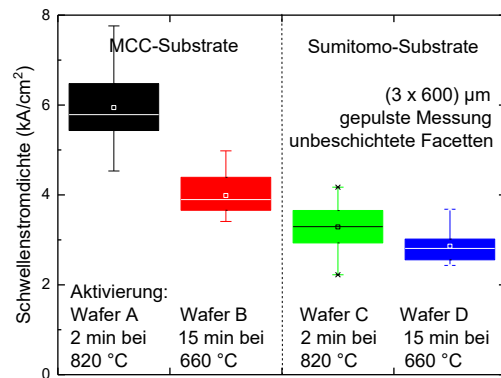


Abbildung 26: Vergleich der Schwellenstromdichte von RW-Lasern unter Verwendung verschiedener Substrate und p-Aktivierungsbedingungen.

In Abbildung 25 ist die Betriebsspannung bei einer konstanten nominellen Stromdichte von 2 kA/cm^2 für die unterschiedlichen Technologievariationen dargestellt. Bei den MCC-Substraten ist durch die Reduzierung der p-Aktivierungstemperatur ein deutlicher Anstieg in der Betriebsspannung von etwa $1,2 \text{ V}$ zu beobachten. Im Gegensatz dazu führt die Reduzierung der p-Aktivierungstemperatur bei den Sumitomo-Substraten auch zu einer Reduzierung der Betriebsspannung. In Abbildung 26 ist die Schwellenstromdichte dieser Laser aufgetragen. Abgesehen von Wafer A ist der gleiche Trend wie bei der Betriebsspannung zu beobachten. Die Schwellenstromdichte ist für die Sumitomo-Substrate geringer und nimmt mit der Reduzierung der p-Aktivierungstemperatur nochmals ab. Wafer A weist eine um ca. 2 kA/cm^2 erhöhte Laserschwelle auf. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass aufgrund der begrenzten Reproduzierbarkeit des Epitaxieprozesses der Einzelwaferanlage auch Unterschiede zwischen nominell gleichen Epitaxiewafern bestehen können.

Performancevergleich von Laserstrukturen mit InGaN- und GaN-Wellenleitern

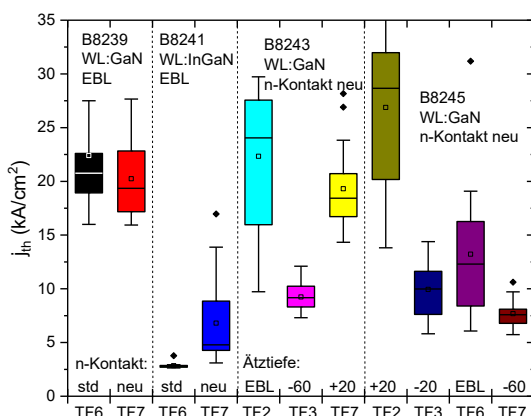


Abbildung 27: Vergleich der Schwellenstromdichte von RW-Lasern mit InGaN- und GaN-Wellenleitern. Zusätzlich sind als Technologievariationen der n-Kontakt und die Rippenätztiefe relativ zum EBL dargestellt.

In Abbildung 27 sind die Schwellenstromdichten der InGaN- und GaN-Wellenleiterstrukturen von Lasern aus der Einzelwaferanlage dargestellt. Es fällt auf, dass die Schwellenstromdichten der GaN-Wellenleiterstrukturen um einen Faktor drei bis zehn erhöht sind. Es ist nicht eindeutig geklärt, warum die Performance der Anteststrukturen (hier nicht gezeigt) nicht auf den RW-Prozess übertragen werden konnte. Interessanter Weise skaliert aber die Schwellenstromdichte mit der Rippenätztiefe. So sind die 60 nm durch den EBL geätzten Laser jeweils die mit den niedrigsten Schwellen. Dies kann ein Ansatz zur Reduzierung der Schwellen sein, wie es im Folgenden dargelegt wird.

Einfluss der Rippenätztiefe auf die Laserperformance

Für den ersten RW-Prozess von Wafern der Multiwaferanlage wurde der Einfluss der Rippenätztiefe auf die Laserschwelle und Steigung untersucht. Auf sechs Wafern aus zwei Epitaxieprozessen wurde die Ätztiefe der Rippe zwischen 500 nm (deutlich über dem EBL) bis 800 nm (kurz über der aktiven Zone) variiert. Abbildung 28a zeigt die Schwellenstromdichte der RW-Laser als Boxplots sowie die Schwellenstromdichte der jeweiligen Breitstreifenlaser (40 μm , Kreise) und die Referenzschwelenstromdichte aus dem vorherigen Antest mit derselben Heterostruktur. Generell zeigen die Breitstreifenlaser aus dem RW-Prozess einen etwa 50 % höheren Schwellenstrom als Laser aus dem Antestprozess. Ist die Ätzung zu flach, liegt die Stromdichte der Laserschwelle im Bereich von 40 kA/cm^2 . Wird die Rippe bis unterhalb des EBLs geätzt, liegt die Stromdichte der Laserschwelle bei etwa $(15 \pm 5) \text{kA}/\text{cm}^2$ und damit etwa dreimal höher als im Antest. Dies wurde jedoch auch bei früheren Prozessen der alten Einzelwaferanlage beobachtet. Somit muss beim Ätzen keine genaue Tiefe getroffen werden, sondern nur unterhalb des EBLs geätzt werden. Abbildung 28b zeigt die Steigungseffizienz der Laser, welche mit zunehmender Rippenätztiefe abnimmt. In Kombination mit der Schwellenstromdichte ist eine Ätzung knapp unterhalb des EBLs die optimale Tiefe für eine geringe Schwelle und eine große Steigungseffizienz um die 0,6 W/A. Abbildung 28c zeigt die Spannung an der Laserschwelle. Diese beträgt bei tief geätzten Rippen nur 6 V und ist damit deutlich kleiner als bei RW-Laserprozessen mit Wafern aus der alten Einzelwaferanlage. Ist der Kontaktwiderstand aufgrund einer Schottkybarriere zu hoch, liegt die Spannung bei 9 V, was die Wichtigkeit von ohmschen Kontakten unterstreicht.

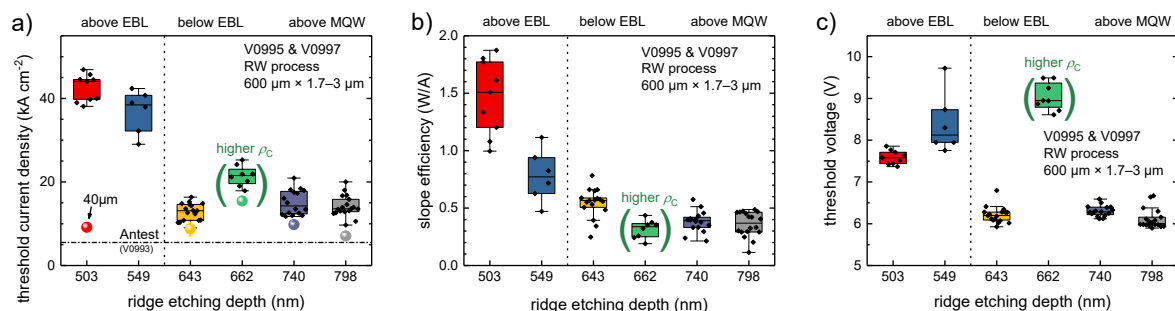


Abbildung 28: Als Boxplots dargestellte (a) Schwellenstromdichte, (b) Steigungseffizienz und (c) Spannung an der Laserschwelle von RW-Lasern mit Rippenätztiefen zwischen 500 nm und 800 nm. In (a) wird zusätzlich die Schwellenstromdichte der Breitstreifenlaser als Kreise und der Referenzwert aus dem vorherigen Antestprozess mit gleicher Struktur gezeigt.

Einfluss von Substrat, Wachstumsunterbrechungen und InGaN-Zwischenschicht

Abbildung 29 zeigt den (die) Laserschwelstrom(-dichte) von RW-Lasern auf verschiedenen Substraten, mit und ohne Wachstumsunterbrechungen (GRI), mit oder ohne InGaN-Zwischenschicht sowie Vergleichsmessungen des vorherigen RW-Prozesses und des parallel durchgeführten Antestprozesses. Generell lässt sich sagen, dass die Laserschwelle gegenüber dem ersten RW-Prozess mit Wafern der Multiwaferanlage zwar deutlich verringert ist und im besten Fall bei weniger als 60 mA ($6 \text{kA}/\text{cm}^2$) liegt, generell die einzelnen Variationen aber wenig Einfluss auf die Laserschwelle hatten, wohl aber auf deren Streuung. Auch die Steigungseffizienz (Abbildung 30) liegt bei fast allen Wafern bei etwa $(0,3 \pm 0,1) \text{W}/\text{A}$. Somit wurden von allen Wafern dieser Variation Laser für Lebensdaueruntersuchungen aufgebaut, um dort einen möglichen Einfluss der Wachstumsunterbrechungen, der InGaN-Zwischenschicht oder des Substrats zu erkennen.

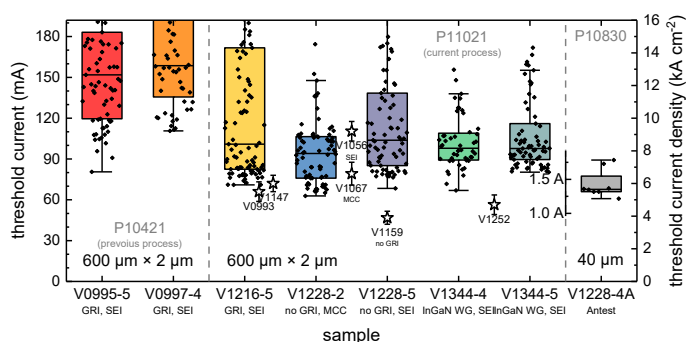


Abbildung 29: Boxplots des Schwellenstroms (der Schwellenstromdichte) von unbeschichteten RW-Lasern mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen im Vergleich zum vorherigen RW-Prozess.

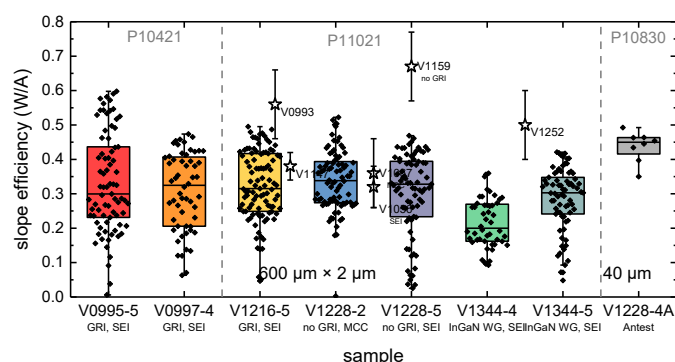


Abbildung 30: Boxplots der Steigungseffizienz von unbeschichteten RW-Lasern mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen im Vergleich zum vorherigen RW-Prozess.

Lebensdaueruntersuchungen

Zu Beginn des Projekts lagen die Lebensdauern der am FBH hergestellten GaN-Laserdioden typischer Weise bei wenigen hundert Stunden. Innerhalb dieser Lebensdauer waren immer zwei Hauptdegradationsmechanismen nachweisbar. Zum einen die unter AP3 erwähnte Degradation der Laserfacetten, welche zu einer Instabilität der Laserschwelle und somit auch zu einer Instabilität der Ausgangsleistung führte. Zum anderen führte eine Verringerung der stromdurchflossenen Fläche auf der p-dotierten Seite der Halbleiterheterostruktur zu einem Anstieg der Betriebsspannung, einem inhomogenen Pumpen der aktiven Zone und somit ebenfalls zu einer Reduzierung der Ausgangsleistung. Im Nachfolgenden werden diese zwei Mechanismen getrennt voneinander behandelt.

Degradation des Halbleiters

Zunächst beziehen sich die gezeigten Daten auf Laserstrukturen mit InGaN-Wellenleitern gewachsen in der Einzelwafer-MOVPE-Anlage. Der Wechsel zu Lasern gewachsen in der Multiwaferanlage wird dann explizit erwähnt.

Zur Illustration der Ausgangssituation bei Projektstart ist in Abbildung 31 der typische Verlauf einer Alterung von Lasern des Wafers A bei konstanter Ausgangsleistung dargestellt. Der Wafer des hier gezeigten Lasers wurde bei einer Temperatur von 820 °C für 2 min aktiviert. Der stufenförmige Spannungsanstieg, begleitet von einem Anstieg des Diodenstroms, beginnt nach einer Betriebszeit von 100 bis 200 h (typischerweise nach wenigen 100 h). Der Zeitpunkt des Anstiegs hängt von verschiedenen Prozessbedingungen ab. Der Einfluss des Substrats auf die Lebensdauer ist in Abbildung 32 dargestellt. Die hier verwendeten Wafer wurden allerdings bei 660 °C aktiviert und die Laser bei der im Projekt definierten Ausgangsleistung von 20 mW betrieben. Obwohl die Laser in Abbildung 32 bei einer höheren Ausgangsleistung als die in Abbildung 31 betrieben wurden, hat sich der Zeitpunkt des Spannungsanstiegs für die Laser auf Sumitomo-Substrat (Wafer D) um mehr als eine Größenordnung auf über 2.000 h verschoben. Der Spannungsanstieg der Laser von Wafer B beginnt bei ca. 70 h und somit etwas eher als bei Wafer A (beides MCC-Substrat). Allerdings wurden die Laser von Wafer B aufgrund der höheren Ausgangsleistung auch bei höheren Strömen betrieben als die von Wafer A. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alleine die Veränderung der p-Aktivie-

rungsbedingungen die Lebensdauer nicht signifikant verändert. Die zusätzliche Nutzung defektreduzierter Substrate hingegen verlängert bei einer geringen p-Aktivierungstemperatur die Lebensdauer um etwa eine Größenordnung.

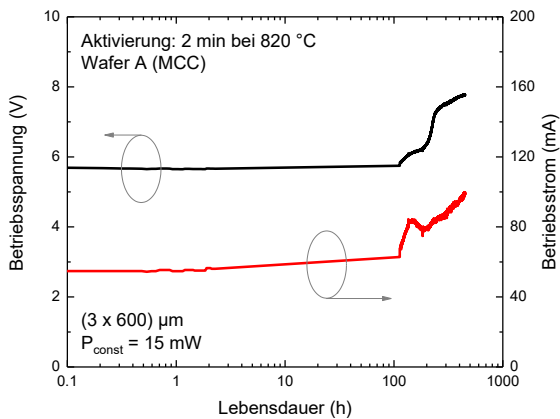


Abbildung 31: Typische Lebensdauerkurven von RW-Lasern unter Verwendung der noch zu Projektbeginn verwendeten p-Aktivierungsbedingungen und Substrate.

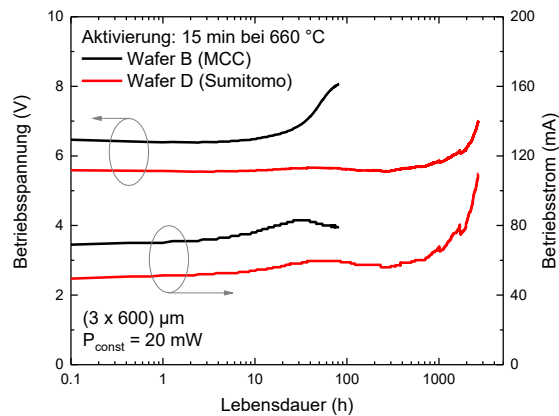


Abbildung 32: Einfluss des Substrattyps auf die Lebensdauerkurven von RW-Lasern.

Für die Funktionalität eines ECDLs ist ein Laserdiodenchip erforderlich, der lateral monomodig arbeitet. Im Projektzeitraum wurde deshalb damit begonnen, verstärkt die Alterung von Lasern mit einer schmalen Rippenbreite von 2 μm anstatt der vorherigen Standardbreite von 3 μm zu untersuchen. Laser mit einer schmalen Rippe weisen in der Regel eine höhere Schwellenstromdichte auf. Die oben beschriebenen Degradationsmechanismen hängen von der verwendeten Stromdichte ab, so dass der stufenförmige Spannungsanstieg bei diesen Lasern eher stattfindet und die Lebensdauer kürzer ist. In Abbildung 33 ist dieser Effekt zusammen mit dem Vergleich der p-Aktivierungsbedingungen auf Sumitomo-Substraten zu sehen. Hier beginnt der Spannungsanstieg nach etwa 1.000 h. Werden die vorherigen Standardaktivierungsbedingungen verwendet, beginnt der Anstieg etwa um den Faktor 5 früher.

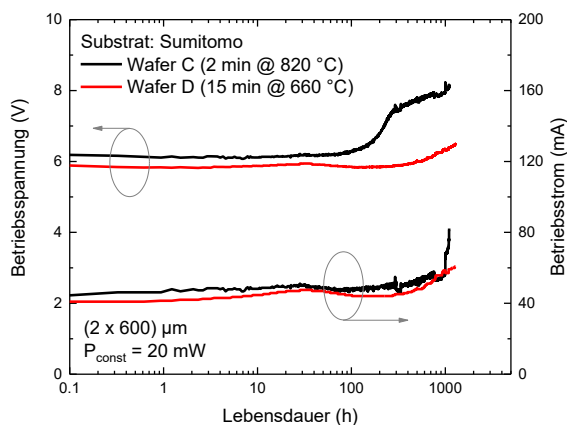


Abbildung 33: Lebensdauerkurven von lateral monomodigen RW-Lasern (Rippenbreite 2 μm) auf Sumitomo-Substraten mit unterschiedlichen p-Aktivierungsbedingungen.

Die vorab gezeigten Daten stellen typische Alterungskurven der Laser da. Jedoch sind auch immer wieder Frühausfälle und abweichendes Alterungsverhalten zu beobachten. Um dies zu quantifizieren sowie die Ursachen dafür zu verstehen und technologische Lösungen zu finden, wurde der Durchsatz an Alterungsexperimenten am FBH deutlich erhöht. Durch die größere Statistik konnten Trends in den Alterungsmechanismen deutlich zuverlässiger identifiziert werden. So lässt sich in Abbildung 34 sehen, dass nominell identische Laser, betrieben bei konstanter Ausgangsleistung unter Laboratmosphäre, stark unterschiedliche mittlere Degradationsraten von unter 10 $\mu\text{A/h}$ bis zu über 100 $\mu\text{A/h}$ aufweisen können. Allerdings fallen sie unabhängig von der Degradationsrate bei vergleichbaren Strömen zwischen etwa 80 mA und 100 mA aus. Um lange Lebensdauern zu erzielen, ist es daher notwendig, Laser mit niedrigen

Schwellen und somit auch niedrigen Betriebsströmen zu realisieren. Es hat sich gezeigt, dass Laser mit Betriebsströmen von ≤ 50 mA zu Beginn der Alterung im Normalfall Lebensdauern von 2.000 h bis 4.000 h aufweisen. Laser mit erhöhten Schwellen und somit auch höheren Betriebsströmen fallen entsprechend eher aus. Somit lassen sich durch eine Vorauswahl sehr zuverlässig Laser finden, die Lebensdauern von einigen tausend Stunden erreichen werden.

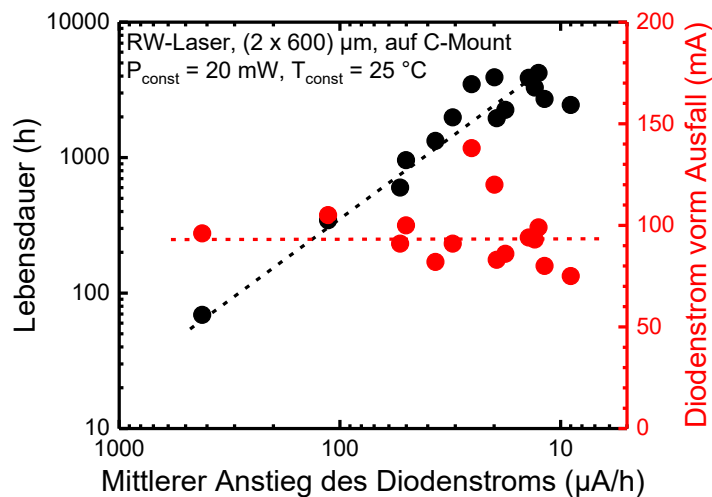


Abbildung 34: Laser mit unterschiedlichen Degradationsraten fallen bei ähnlichen Strömen aus, daher führen geringe Degradationsraten bei vergleichbaren Startstromdichten zu längeren Lebensdauern.

Wie bereits erwähnt und in Abbildung 34 gezeigt, fallen $2\ \mu\text{m}$ breite Rippenwellenleiterlaser auf C-Mount meist bei Strömen zwischen 80 mA und 100 mA aus. Eine Ausfallanalyse hat gezeigt, dass im Falle eines Durchbrennens zumeist die Rippe im Bereich zwischen Bondpad und Facette beschädigt ist (siehe Abbildung 35). Dort hat der Isolator nicht ausreichend auf dem p-Kontaktmetall gehaftet, so dass er sich beim Spalten der Wafer in Laserriegel teilweise abgelöst hat. Die Bedingungen für die Isolatorabscheidung wurden deshalb optimiert (siehe AP2). Dadurch konnte das Durchbrennen der Laser in diesem Bereich des Chips vermieden werden. Diese Technologieoptimierung wurde dann bei den Lasern der Multiwaferanlage angewandt und ist ein Grund, warum diese Laser deutlich höhere Stromdichten aushalten.

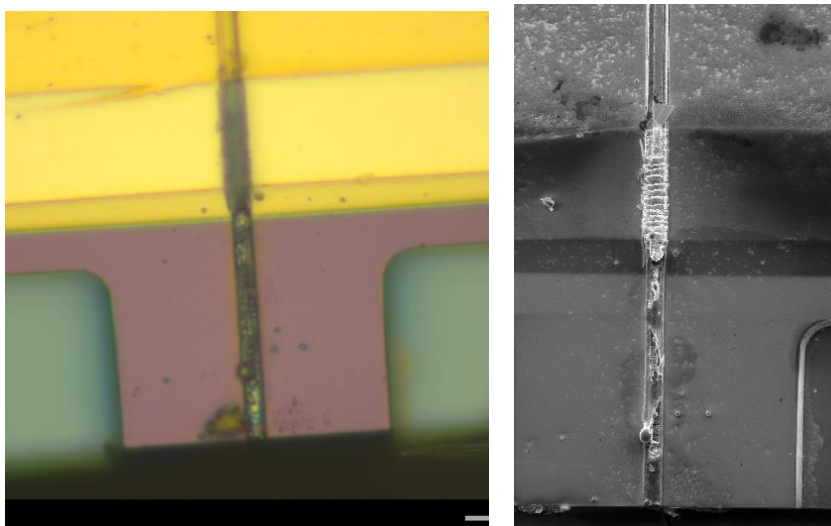


Abbildung 35: Zerstörungen der Rippe im Bereich zwischen Frontfacette und Bondpad eines RW-Lasers auf C-Mount nach der Alterung, links: Lichtmikroskopbild und rechts: REM-Aufnahme.

Laser im TO-Gehäuse zeigen durchschnittlich eine längere Lebensdauer als Laser auf C-Mount. Bekannt ist, dass der Betrieb im TO-Gehäuse parasitäre Ablagerungen auf der Facette deutlich verringert (siehe Abschnitt Facettendegradation). Dies führt zu einem stabileren Betrieb jedoch nicht unbedingt zu längeren Lebensdauern. Neben der veränderten Atmosphäre führt der Aufbau der Laser im TO-Gehäuse auch zu einem höheren thermischen Widerstand, d. h. bei gleicher Kühltemperatur weisen die Laser höhere Betriebstemperaturen (etwa 15 K

bis 20 K höher) auf. Um den Einfluss der Temperatur auf die Lebensdauer zu untersuchen, wurden Laser auf C-Mount bei verschiedenen Temperaturen gealtert (siehe Abbildung 36). Hier ist ebenfalls ersichtlich, dass der Meilenstein M33 (Lebensdauer > 500 h) mit verschiedenen Aufbauvarianten und bei unterschiedlichen Temperaturen erreicht wurde.

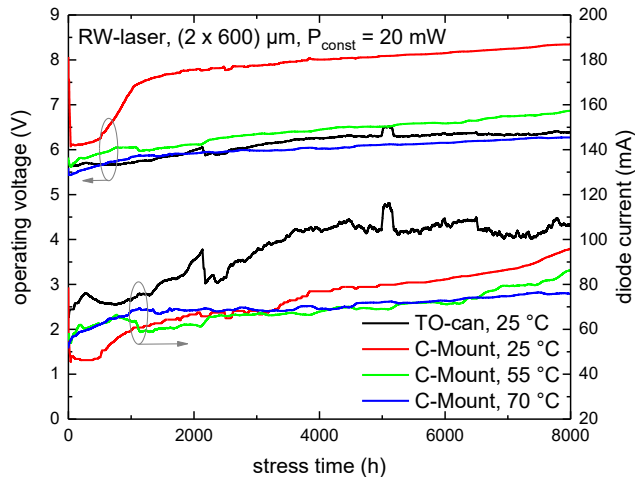


Abbildung 36: Ausgewählte Alterungskurven von Lasern der Einzelwafer-MOVPE-Anlage mit unterschiedlichen Kühltemperaturen und Aufbauvarianten

Der im Bericht mehrfach beschriebene stufenförmige Anstieg der Betriebsspannung erhöht die thermische und elektrische Last der Laserdiode und trägt maßgeblich zum Ausfall des Bauteils bei. Es ist bekannt, dass dieser Effekt bei höheren Betriebstemperaturen später oder gar nicht auftritt. In Abbildung 36 sind Alterungskurven von Lasern auf C-Mount bei verschiedenen Kühltemperaturen sowie im TO-Gehäuse bei 25 °C dargestellt. Der stufenförmige Spannungsanstieg tritt nur bei dem Laser auf C-Mount bei 25 °C auf. Die Erhöhung der Temperatur führt zu stabileren Alterungskurven, sowohl bei der Spannung als auch beim Strom. Auch die mittlere Lebensdauer hat sich durch die höhere Temperatur erhöht. So fallen die meisten Laser auf C-Mount bei 25 °C zwischen 1.000 h – 3.000 h aus. Es wurden jeweils 3 Laser bei 55 °C und 70 °C gealtert und alle haben Lebensdauern > 5.000 h. Die abgeschätzte Betriebstemperatur für die Laser im TO-Gehäuse liegt zwischen 40 °C und 50 °C und somit zwischen den untersuchten Temperaturen auf C-Mount. Da die mittlere Lebensdauer der Laser im TO-Gehäuse zwischen 3.000 h – 5.000 h liegt, scheint die Temperatur hier der entscheidende Parameter zu sein. Die exakte physikalische Ursache für den positiven Einfluss einer erhöhten Temperatur konnte nicht final geklärt werden. Vermutlich steigen mit erhöhter Temperatur die Ladungsträgerinjektion bzw. die Leitfähigkeit auf der p-dotierten Seite des Halbleiters und vermindern so den Degradationsmechanismus, der final zum Ausfall des Bauteils beiträgt. Zur weiteren Erhöhung der Lebensdauer und Optimierung der Laser der Multiwaferanlage wird daher an der p-Leitfähigkeit und Ladungsträgerinjektion gearbeitet.

Nachfolgend werden die Alterungsuntersuchungen an Lasern der neuen Multiwaferanlage diskutiert. Die hier gezeigten Laser (siehe Abbildung 37) stammen aus dem ersten RW-Laserprozess mit Wafern aus dieser Anlage und beinhalten somit noch nicht sämtliche im Bericht gezeigten Optimierungen der Halbleiterstruktur hinsichtlich der Schwelle. Die Laser laufen daher noch bei vergleichsweise hohen Strömen. Diese Ströme liegen über der bei Lasern der Einzelwafer-MOVPE-Anlage beobachteten Zerstörschwelle der Bauteile von etwa 100 mA. Dies belegt, dass die Optimierungen zur verbesserten Haftung des Isolators zwischen Metall-Bondpad und Laserfacette die Robustheit und somit potenziell auch die Lebensdauer der Laser erhöht haben. Während des Langzeitbetriebs der Laser steigen sowohl der Widerstand der Bauelemente als auch die Laserschwelle an. Bei den Lasern der Einzelwafer-Anlage führte die konsequente Reduktion der Laserschwelle auch zu einer verbesserten Stabilität des Betriebsstroms während der Alterung. Wie in AP1 gezeigt, ist dies auch bereits für die Laser der Multiwafer-MOVPE-Anlage gelungen. Die Ursache für den Anstieg des Widerstands der Laserdiode ist bislang nicht genau verstanden. Es wird ein Zusammenhang mit der Ladungsträgerinjektion bzw. der Leitfähigkeit der p-dotierten Seite des Halbleiters vermutet. Hieran wird

bspw. mit verschiedenen EBL-Designs gearbeitet. Die erzielte Lebensdauer von 500 h ist daher ein guter Ausgangspunkt für weitere Optimierungen.

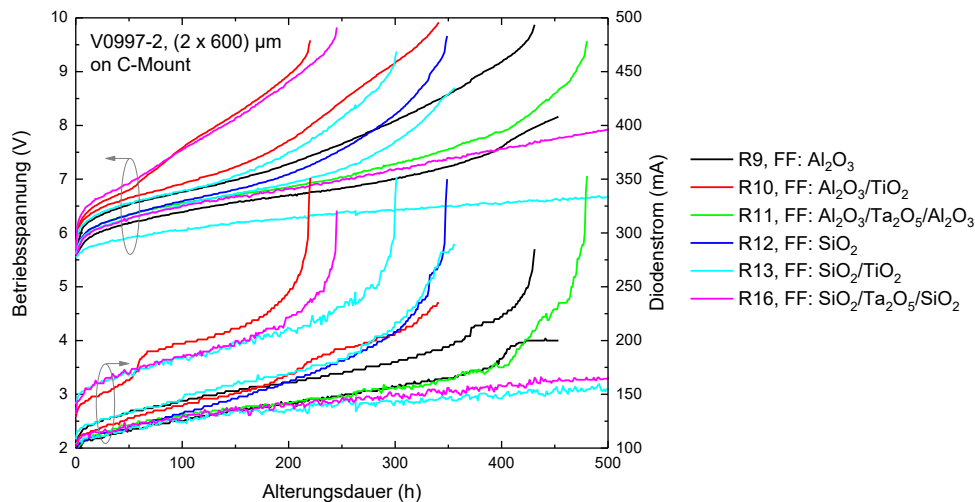


Abbildung 37: Alterungskurven von Lasern der Multi-Wafer-MOVPE-Anlage mit unterschiedlichen Frontfacettenbeschichtungen bei einer konstanten Ausgangsleistung von 20 mW und einer Kühltemperatur von 25 °C

Degradation der Laserfacette

Bereits vor dem Start des Projekts war bekannt, dass sich beim Betrieb der Laser an Laboratmosphäre eine SiO_x -Schicht auf der Laserfacette abscheidet, die in ihrer Form der Intensitätsverteilung der optischen Mode ähnelt (siehe Abbildung 38). Um diesen Effekt zu vermeiden, wurden die Laser in hermetisch versiegelte TO-Gehäuse montiert (siehe AP3) und unter verschiedenen Atmosphären gealtert.

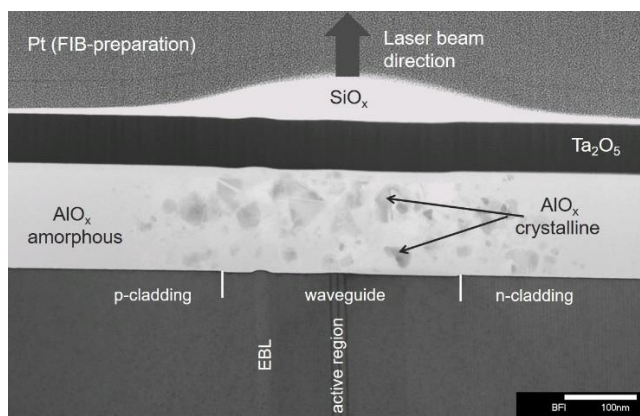


Abbildung 38: Querschnittsbild der gealterten Laserfacette im TEM mit der entstandenen SiO_x -Schicht

Dies führt zu einer stabileren Alterungskurve. Jedoch lässt sich auch hier eine Fluktuation des Betriebsstroms in den ersten 100 h der Alterung erkennen (siehe Abbildung 39a). Untersuchungen im REM haben mithilfe von EDX gezeigt, dass sich auch im TO-Gehäuse diese Ablagerungen bilden (siehe Abbildung 39b). Interessanterweise bilden sich die Ablagerungen sowohl in trockener Luft als auch unter Stickstoffatmosphäre. Lecktests an den TO-Gehäusen ergaben keinerlei Hinweise auf Undichtigkeiten. So konnte durch das alleinige Verkappen der Laser in einer definierten Atmosphäre dieser Effekt nicht verhindert werden.

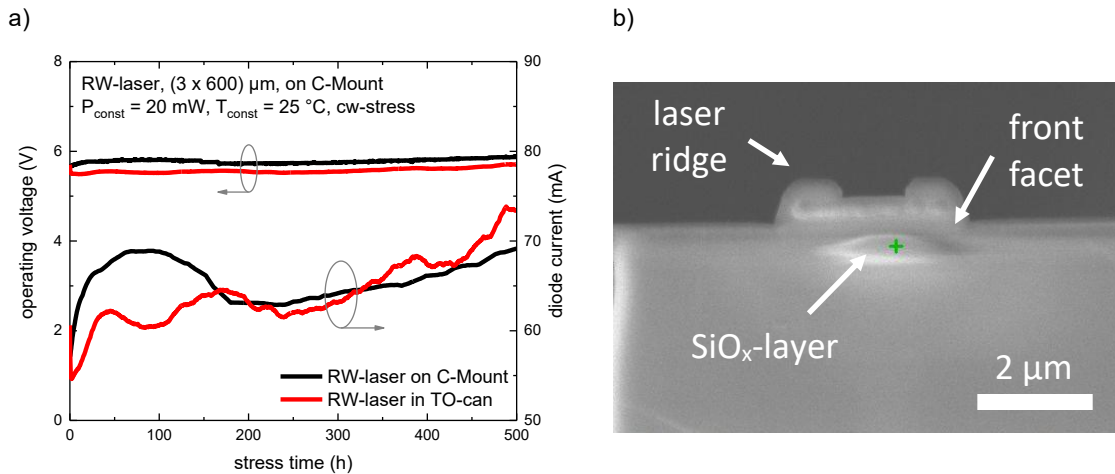


Abbildung 39: a) Vergleich von Alterungskurven der Laser in Laboratmosphäre und im TO-Gehäuse und b) die im TO-Gehäuse entstandenen Ablagerungen während der Alterung

Am FBH wird bei der Facettenbeschichtung standardmäßig Ta₂O₅ als hochbrechendes Material und für die Abschlusschicht verwendet. Der Sauerstoff im Ta₂O₅ ist nur sehr schwach gebunden und kann mit dem Silizium aus der Atmosphäre reagieren. So entstehen nicht nur im Laserbetrieb die SiO_x-Ablagerungen, sondern es kann sich schon während der Lagerung der Laser eine dünne Schicht auf der gesamten Facette ausbilden. Aus dieser Schicht formen sich dann im Laserbetrieb selbst in hermetischer Atmosphäre die oben gezeigten Ablagerungen mit einer Dickenverteilung entsprechend der Intensitätsverteilung der optischen Mode. Es wurden daher verschiedene Facettenbeschichtungen ohne Ta₂O₅ als Abschlusschicht getestet (siehe Abbildung 37). Die so beschichteten Laser wurden dann auf C-Mount gealtert. Das Ergebnis war ähnlich wie im TO-Gehäuse (siehe Abbildung 40). Die Laser laufen stabiler, aber im Betrieb scheidet sich auch bei anderen Materialien an der Oberfläche eine SiO_x-Schicht ab. Daher muss sowohl auf Ta₂O₅ an der Grenzfläche zur Luft verzichtet als auch die Laser hermetisch eingehaust werden. Diese Überlegungen konnten mit einem kommerziellen GaN-Laser bestätigt werden. Dieser zeigte keinerlei Abscheidungen im Betrieb im TO-Gehäuse. Nach der Entfernung der TO-Kappe bildete sich aber auch hier eine SiO_x-Schicht auf der Ta₂O₅-freien Facettenbeschichtung. Ein Alterungsexperiment mit FBH-Lasern mit verschiedenen Facettenbeschichtungen im TO-Gehäuse konnte im Projektzeitraum leider nicht abgeschlossen werden. Diese Experimente sind aber von entscheidender Wichtigkeit für die Erhöhung der Stabilität der Laser und werden daher auch nach dem Ende des Projekts weitergeführt.

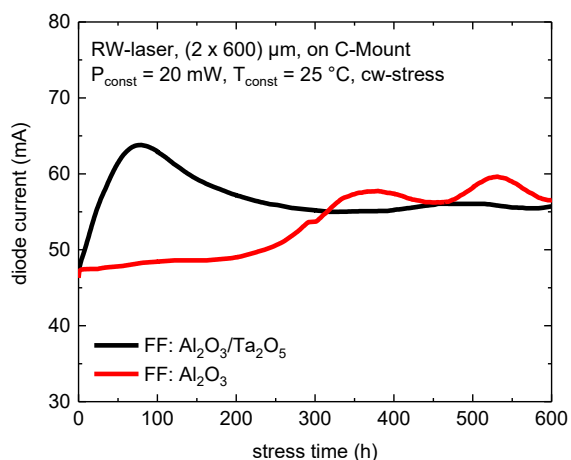


Abbildung 40: Alterungskurven von auf C-Mount montierten Lasern mit unterschiedlichen Frontfacettenbeschichtungen

AP5: ECDL für Rubidium-Standard

Das AP5 dieses Projekts umfasste die Planung und Beschaffung von optischen Geräten und Messtechnik sowie die Charakterisierung und Bewertung eines Diodenlasers mit externem Resonator (ECDL).

Aufbau des Messplatzes

Basierend auf den am FBH bereits etablierten Konzepten für ECDL-Messplätze für den NIR- und roten Wellenlängenbereich wurde zu Beginn des Projekts ein Konzept für den ECDL im blauen Spektralbereich entworfen (Abbildung 41). Da die blauen Laserdioden-Chips mit einer Länge von $600\ \mu\text{m}$ deutlich kürzer sind als vorhandene Submounts und Wärmesenken und man somit das Licht aus der Rückfacette nicht nutzen kann, wurde das etablierte Konzept angepasst und die Chips wurden in Reflexion anstatt in Transmission betrieben. Hierfür werden die Chips an der Rückfacette hoch verspiegelt (97 %) und an der Frontfacette mit einer Antireflexionsschicht beschichtet ($\sim 0\%$), um die Entstehung eines zweiten Resonators zu verhindern. Das austretende Licht wird kollimiert und mit Hilfe des Bragg-Gitters (mit einer Reflektivität von etwa 60 %) ein Resonator aufgebaut.

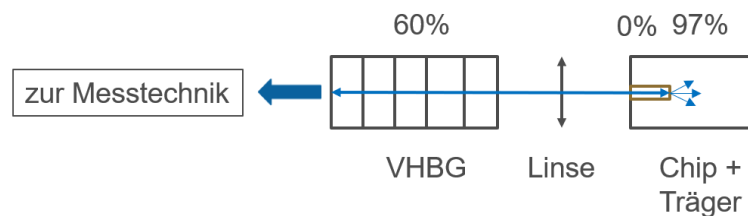


Abbildung 41: Konzept für einen ECDL im blauen Spektralbereich basierend auf einem Halbleiterchip (auf Träger) mit Facettenreflektivitäten von 0 % und 97 %, einer Intrakavitätslinse und einem volumenholographischen Bragg-Gitter (VHBG).

Der Halter für den Laser, samt elektrischer Ansteuerung wurde gefertigt und zusammen mit den Achsen für die Justage aufgebaut (Abbildung 42). Ein optischer Isolator, ein Strahlteiler und Spiegel wurden auf einem optischen Tisch positioniert und justiert, um gleichzeitig das Laserspektrum mit dem optischen Spektrum-Analysator (OSA) und die Linienbreite mit einem Fabry-Pérot-Interferometer zu vermessen (Abbildung 42).

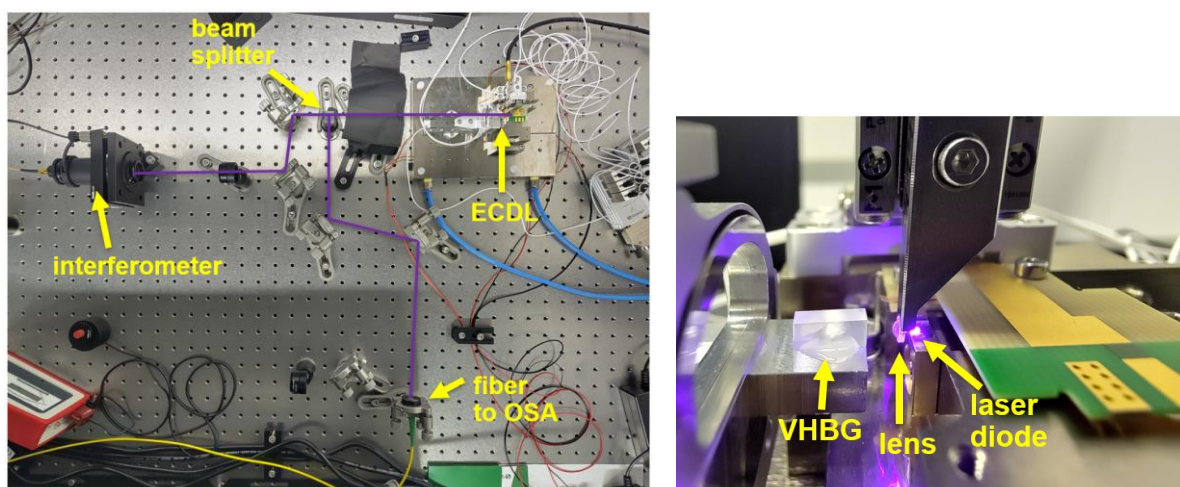


Abbildung 42: (links) Foto des gesamten ECDL-Messplatzes mit optischen Wegen für die Messtechnik und (rechts) Foto des ECDL mit Bragg-Gitter, Linse und Laserdiode.

Herstellung von AR-Laserchips

Für den ECDL-Aufbau müssen die Laserchips an der Auskoppelfacetten entspiegelt werden. Hierfür wurden die notwendigen Schichtdicken eines $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ -Schichtstapels simuliert und die Schichten auf den Laserfacetten abgeschieden. Dadurch wurde eine nominelle Reflexion von 0,01 % erwartet. Anschließend wurden Strom-Spannung-Leistungskurven vor bzw. mit 25 % Beschichtung sowie Kurven nach der AR-Beschichtung aufgenommen. Bei ersten Versuchen (Abbildung 43, links) wurde durch die Verminderung der Reflexion der Auskoppelfacetten eine Erhöhung der Laserschwelle auf deutlich über 100 mA erwartet. Die nur beobachteten 45 mA bis 60 mA entsprechen in etwa einer Reflexion von 3 % bis 5 % (anstatt 0,01 %) an der Frontfacette. Es ist nicht klar, woher die erhöhte Reflexion stammt. Es wird vermutet, dass eine entstandene Oxidschicht zwischen Halbleiter und Facettenbeschichtung ursächlich dafür ist. Daher wurde ein neues Beschichtungsmodul entwickelt, bei dem zunächst die Halbleiteroberfläche mit Ar-Ionen gereinigt und erst anschließend beschichtet wird. Zusätzlich wurde die Beschichtungsdicke direkt auf den Laserriegeln und nicht mehr auf GaAs-Dummies vermessen. Abbildung 43 (rechts) zeigt die Strom-Leistungskurven des neuen Beschichtungsversuchs vor und nach der AR-Beschichtung. Hier sind die Laserschwelle deutlich höher und die Charakteristik deutlich verrundet und eher exponentiell. Dies ist ein Zeichen für ein geringes Feedback vom Resonator also einer erfolgreichen AR-Beschichtung.

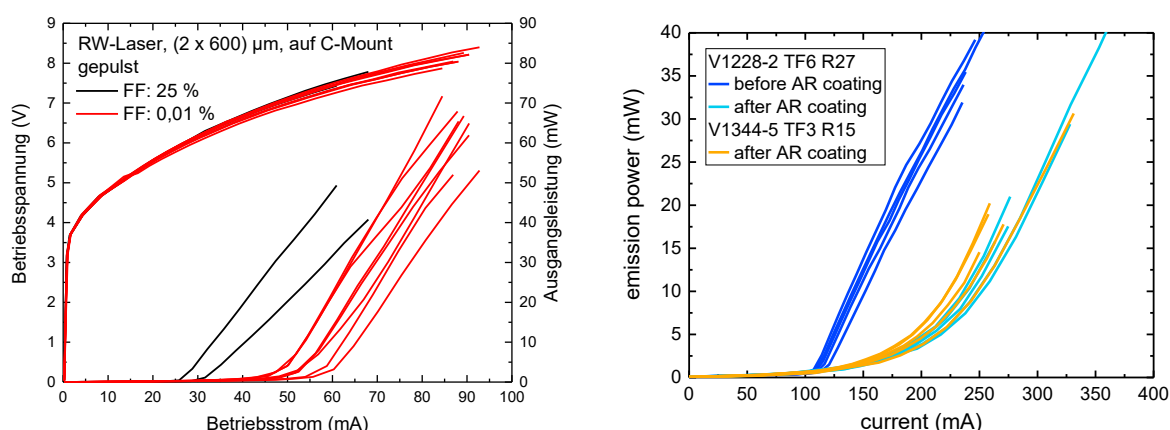


Abbildung 43: (links) Vergleich von Lasern mit 25 % und nominell 0,01 % reflektierenden Frontfacetten. (rechts) Vergleich von Lasern ohne Beschichtung und nominell 0,01 % (95 %) reflektierenden Front- (Rück-) Facetten.

Charakterisierung

Bei der Charakterisierung des ECDL-Aufbaus ist zu erwähnen, dass sowohl die Laser mit der erhöhten Reflexion der Frontfacette (aber geringeren Schwelle) als auch die neueren Laser mit der vermeintlich besseren AR-Beschichtung verwendet wurden. Es ist gelungen, die Laser in der ECDL-Konfiguration zum Lasing zu bringen. In Abbildung 44a ist die verstärkte spontane Emission des Laserchips bei etwa 416 nm und die scharfe ECDL-Linie bei 420,3 nm zu sehen. Dies ist ein klarer Nachweis für die Funktion des ECDLs. In Abbildung 44b ist die zugehörige Strom-Spannung-Leistungskennlinie zu sehen. Über das gesamte Leistungsspektrum erfolgte die Emission auf der ECDL-Wellenlänge. Der ECDL läuft in dieser Konfiguration über viele Stunden stabil und die Linienbreite ist kleiner als das Auflösungsvermögen des OSAs von 20 pm. Selbiges gilt für die neueren Laser mit der optimierten AR-Beschichtung (Abbildung 45). Abbildung 45b zeigt zudem einen Vergleich mit einem zweiten Laser vor der Beschichtung mit ähnlicher Charakteristik. Demnach erreicht ein Laser in ECDL-Konfiguration mit 70 mA eine sehr ähnliche Laser-Schwelle wie ein Laser mit einer 25%-reflektierenden Frontfacette (60 mA), was darauf schließen lässt, dass auch das ECDL-System eine ähnliche Reflektivität hat.

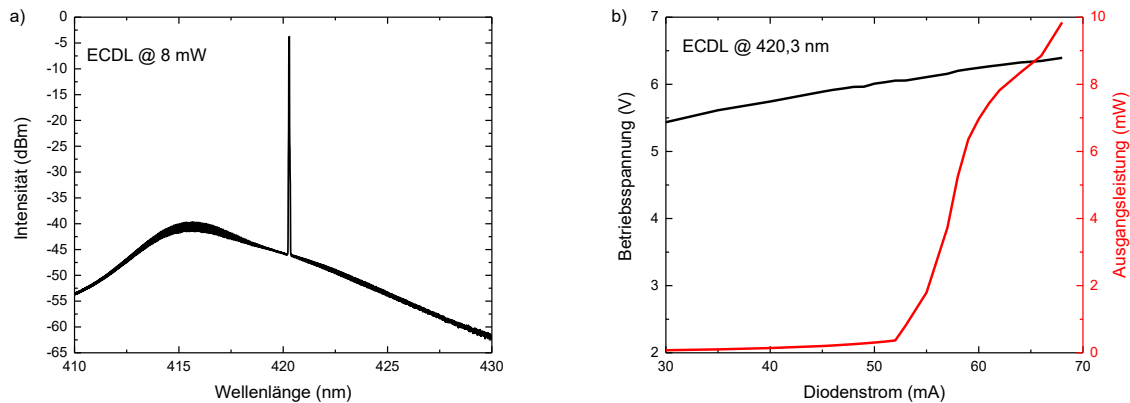


Abbildung 44: (a) Emissionsspektrum und (b) Strom-Spannung-Leistungskennlinie des ECDLs.

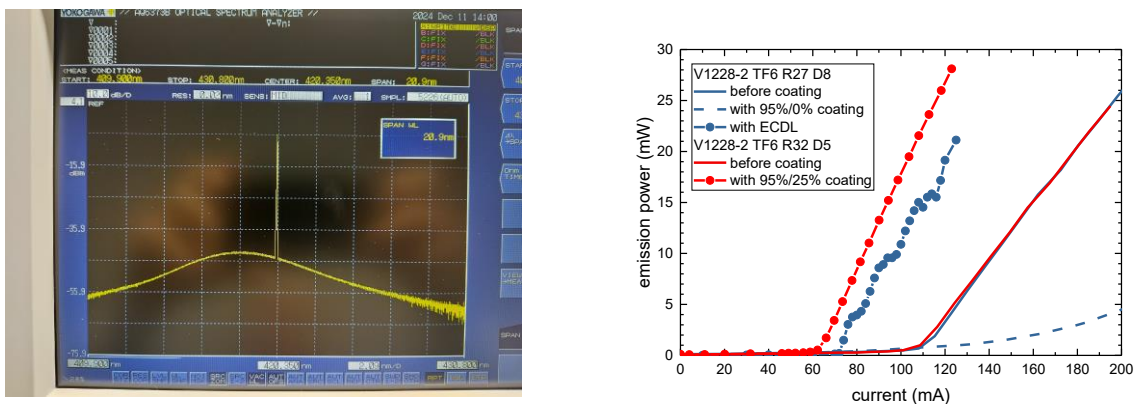


Abbildung 45: (a) Emissionsspektrum und (b) Strom-Spannung-Leistungskennlinie des ECDLs mit Gain-Chips von der Multi-Wafer-MOVPE-Anlage.

Eine genaue Vermessung der Linienbreite erfolgte mit Hilfe eines konfokalen Fabry-Perot-Interferometers. Obwohl hierbei alle für diese Art der Linienbreitenmessung erforderlichen Justage- und Kalibrierungsschritte erfolgreich durchgeführt werden konnten, lagen die im Oszilloskop dargestellten und final errechneten Linienbreiten bei einigen 10 MHz bis 100 MHz und damit deutlich höher als das Projektziel von 1 MHz. Hierbei ist zu erwähnen, dass Linienbreiten nur für die Vermessung einer Mode definiert sind. Die hier gemessenen großen Linienbreiten deuten darauf hin, dass „Frequenzpakete“ vermessen wurden. Solche Messwerte sind für eine quantitative Bewertung nicht geeignet und dienen nur als grobe Richtwerte. Die integrative Messmethode der Linienbreite mittels Interferometer ermöglicht keine Rückschlüsse auf die Ursachen für die Verbreiterung des Frequenzspektrums. Mögliche Gründe bzw. Fehlerquellen konnten innerhalb des Projekts nicht abschließend geklärt werden, jedoch wird die Ursache der großen Linienbreite eher im Bereich des Lasers und ECDL-Systems selbst als in der Interferometer-Messmethode vermutet. Eine detaillierte Diskussion der erzielten Ergebnisse erfolgt im abschließenden Kapitel des Berichts.

Bewertung hinsichtlich Rubidium-Atomuhr

Die erzielten Linienbreiten von mehreren 10 MHz sind zu groß, um mit diesem Lasersystem eine Rubidium-Atomuhr aufzubauen. Prinzipiell konnten aber mit GaN-basierten Laserchips in verschiedenen externen Resonatorkonfigurationen bereits Linienbreiten im Bereich von wenigen MHz gezeigt werden (bspw.: T. Wunderer, et al., "Single-frequency violet and blue laser emission from AlGaInN photonic integrated circuit chips," Opt. Lett. **48**, 2781-2784 (2023)). Daher sollen nachfolgend mögliche Ursachen für die unerwartet große Linienbreite diskutiert werden.

Die mit einem bestimmten Resonator erzielbare Linienbreite hängt von dessen Güte ab. Die Güte eines Resonators ist ein Maß dafür, wie gut dieser Energie speichern kann. Je höher die Güte des Resonators desto geringer ist das Rauschen und umso näher liegt die erzielte Linienbreite an der natürlichen Linienbreite des Systems. Das bedeutet im Umkehrschluss, alle Verluste innerhalb des Resonators erhöhen das Rauschen und sorgen somit für eine Verbreiterung der Linie. Daher können die Ursachen für die große gemessene Linienbreite sowohl im Aufbau des ECDLs als auch im Halbleiterchip selber liegen.

Aufgrund der kurzen Chiplänge der GaN-Laserdioden von 600 μm gab es von der Länge keine passenden Submounts und somit konnte nur das Licht aus der Frontfacette genutzt werden. Daher erfolgte die konzeptionelle Entscheidung, in Kollimation durch das Gitter zu gehen (siehe Abbildung 41). Dies erhöht zwar die Rückkopplung des Gitters, ist aber instabiler als wenn man das Gitter in Reflexion verwendet und auf dieses fokussiert. Das so entstehende Rauschen liefert einen Beitrag zur Linienverbreiterung. Weiterhin existiert in dem aktuellen Aufbau keine aktive Kühlung der Laserchips. Wenn während des Betriebs die Temperatur im Chip nicht konstant gehalten wird, kann sich die Länge des Chips im Vergleich zur gesamten Resonatorlänge des ECDLs ändern. Auch dies erzeugt ein Rauschen, welches einen Einfluss auf die Linienbreite hat. Beide Limitationen ließen sich durch ein Redesign des ECDL-Setups eliminieren. Es wäre möglich, Submounts und Wärmesenken auf die Chiplänge zuzuschneiden und entsprechend neu gefertigte Gitter in Reflexion zu nutzen. Zusätzlich ließe sich über ein Peltierelement in der Nähe des Laserchips dessen Temperatur besser kontrollieren.

Beim Wechsel von den Lasern der alten Single-Wafer- auf die der neuen Multi-Wafer-MOVPE-Anlage erfolgte gleichzeitig auch zwei weitere Optimierungen für den ECDL. Zum einen lag das Maximum des Verstärkungsspektrums der Laserchips dann näher an der designten Gitterwellenlänge von 420,3 nm. Zum anderen gelang eine deutliche Optimierung der AR-Beschichtung. Dadurch konnte verhindert werden, dass sich innerhalb des ECDLs ein zweiter Resonator durch die Restreflexion an der Frontfacette des Chips ausbildet. Der Effekt dieser beiden Optimierungen ist in den Laserkennlinien zu sehen. So liegt die Schwelle des ECDLs mit einem Chip der Multi-Wafer-MOVPE-Anlage nahe an der eines Fabry-Perot-Lasers mit 25 % Frontfacettenreflexion, wohingegen bei den Chips der Single-Wafer-MOVPE-Anlage die Schwelle im ECDL fast doppelt so hoch ist. Dies ist ein Zeichen für weniger zusätzlich durch den ECDL eingebrachte Verluste. Trotzdem ist die gemessene Linienbreite des ECDLs mit Chips der Multi-Wafer-MOVPE-Anlage tendenziell größer als mit Chips der Single-Wafer-Anlage. Höchstwahrscheinlich liegt das an der hohen Schwelle mit den Chips aus der Multi-Wafer-Anlage. Auch nach sämtlichen erfolgten Epitaxieoptimierungen (siehe AP1) liegt diese noch einen Faktor 2 über der von Lasern aus der Single-Wafer-MOVPE-Anlage. Eine erhöhte Laserschwelle entspricht höheren Verlusten innerhalb des Laserchips, welche sich auf den ECDL und somit dessen Linienbreite übertragen können. Somit scheint eine Verringerung der Laserschwelle nicht nur essenziell für stabilere und langlebigere Bauelemente zu sein, sondern ebenso ein Hebel, um die Linienbreite des ECDL zu reduzieren.

Eine Messung der Linienbreite mittels Heterodyn-Messung war im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Hierfür müsste man die Frequenz des zu vermessenden Lasers mit einer zweiten überlagern. Dies könnte bspw. durch den Aufbau eines zweiten ECDLs oder durch das Verzögern und anschließende Überlagern eines Teils der Ausgangsstrahlung des ECDLs (self-heterodyn) realisiert werden, wobei die hohe Dämpfung von optischen Fasern im Bereich der 420 nm eine Self-Heterodyn-Messung schwer realisierbar erscheinen lässt. Solche Messungen würden einen Rückschluss auf die einzelnen Frequenzanteile des Rauschens ermöglichen und somit bei der Eingrenzung der Verlustmechanismen helfen. Die hier verwendete Messung der Linienbreite mittels Interferometer ermöglicht keine Information über die spektralen Anteile des Rauschens.

Am FBH wird auch nach Abschluss des Projekts weiter an der Entwicklung von GaN-basierten Lasersystemen mit Linienbreiten im MHz und sub-MHz gearbeitet. Hierfür werden sowohl die Laserchips als auch der ECDL-Messplatz weiter optimiert.