Sachbericht zum Verwendungsnachweis

im Verbundprojekt:

„Raman-spektroskopische Messung von Antibiotika-spiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis“

Akronym: **ABXSens**

ZE:	Förderkennzeichen:
Sensor Photonics GmbH	**13GW0425D**
Vorhabenbezeichnung: **Leistungsstarke Laserdioden und Trapezverstärker um 960 nm Wellenlänge für Pumplasersysteme zur Frequenzvervierfachung**	
Laufzeit des Vorhabens: **01.01.2021 – 31.12.2024**	
Berichtszeitraum: **01.01.2021 – 31.12.2024**	

Teil I: Kurzbericht

Die Vorhabenbezeichnung „Leistungsstarke Laserdioden und Trapezverstärker um 960 nm Wellenlänge für Pumplasersysteme zur Frequenzvervierfachung“ des Teilvorhabens der Sensor Photonics GmbH (kurz: SPh) beschreibt die Aufgabenstellung des Teilvorhabens bereits sehr gut, nämlich die Bereitstellung neuartiger, kompakter und leistungsstarker NIR-Pumplasersysteme mit sehr guter Strahlqualität bei Wellenlängen um 960 nm. Mit einem solchen NIR-Pumplasersystem und einem nachfolgenden System zur Frequenzvervierfachung (FHG) wird eine neuartige, kompakte und leistungsstarke UV-Laserquelle entwickelt, welche die hochsensitive und selektive Raman-Spektroskopie von Antibiotikaspiegeln ermöglicht. NIR-Pumplasersysteme mit dieser besonderen Kombination von Eigenschaften sind bisher nicht kommerziell erhältlich und nach unserem Wissensstand auch nicht realisiert und veröffentlicht worden.

Unter Federführung des Projektpartners Leibniz-Institut für Photonische Technologien (kurz: IPHT) wurde das Anforderungsprofil des UV-Lasers erarbeitet (AP 1.1, siehe Zwischenbericht 2021 [Z1]). Die Voruntersuchungen des Absorptionsverhaltens der Antibiotika seitens des IPHT ergaben, dass 235 nm UV zur Anregung besser geeignet sein könnte, wofür die NIR-Zielwellenlänge 940 nm benötigt wird. SPh ließ daher anstelle eines DFB-Wafers einen zweiten Wafer mit Gewinnchips und Trapezverstärkern bei 930 nm wachsen und prozessieren, der auch die zweite gewünschte UV-Wellenlänge von 235 nm ermöglicht. Wesentlicher Vorteil für das Gesamtprojekt ist die dadurch gegebene Abdeckung eines größeren UV-Wellenlängenbereichs.

Entgegen der ursprünglichen Planung (mit mehreren Dienstleistern und mehr Eigenleistung) wurde das Ferdinand-Braun-Institut gGmbH (kurz: FBH) als Dienstleister bzw. Lieferant mit der Simulation, dem Wachstum der Laserwafer, der Maskensatz-Herstellung und der Frontend-Prozessierung der Laserwafer bei den zwei geplanten Wellenlängen inklusive der Facettenbeschichtung beauftragt. Das FBH besitzt langjährige Erfahrung in der Herstellung von Laserdioden bei ähnlichen Wellenlängen und bietet alle dazu notwendigen Leistungen in Deutschland aus einer Hand an. Zwischen SPh und vor allem der größeren und älteren Schwesterfirma Sacher Lasertechnik GmbH (kurz: SLT) und dem FBH besteht eine langjährige, vertrauensvolle Kunden-Lieferanten-Beziehung.

SPh erarbeitete zusammen mit dem FBH eine Schichtstruktur für das Wafer-Wachstum (s. Abb. 1 links), das Layout der Wafer (s. Abb. 1 rechts) und der zu realisierenden Gewinnchips (s. Abb. 2) und Trapezverstärker (s. Abb. 3) auf diesen Laserwafern. Relevante Punkte waren hierbei Wellenführung, benötigter Gewinn, Zentralwellenlänge und spektrale Bandbreite. Zur Risikominimierung und Absicherung des Projekterfolgs wurden sowohl gekrümmte als auch einfachere gerade Varianten der Bauelemente in jeweils mindestens zwei verschiedenen Bereichen des Wafers realisiert. Zunächst wurde die Kampagne bei 960 nm durchgeführt, nachfolgend die bei 930 nm. Erfreulicherweise erreichten beide Wafer die Zielspezifikationen im ersten Prozessdurchlauf.
Unbeschichtete Testriegel aus dem Testfeld der jeweiligen Wafer wurden am FBH zwecks Qualitätskontrolle nach Schwellstrom, Leistung und Wellenlänge charakterisiert, bevor die Wafer zur weiteren Wertschöpfung in Form von Spalten in Riegel und Beschichtung beider Facetten freigegeben wurden.
Im Sinne einer umfassenden Prozess- und Qualitätskontrolle bestand das FBH auf der Auslieferung der Gewinnchips und Trapezverstärker als montierte „Chip on Submount“ (Akronym: CoS).

Die gelieferten und ausgewählten CoS wurden im bestehenden Nadeltestplatz („Laser (Bar) Tester“, s. Abb. 5) vorcharakterisiert, bevor der feste, thermisch optimal angekoppelte Einbau in ein Gehäuse erfolgte. Dieser Nadeltestplatz wurde während des gesamten Projektverlaufs weiter verbessert und für die Charakterisierungsmessungen eingesetzt (AP 2.4). Da sich die CoS im Pulsbetrieb weniger stark aufheizen als im Dauerstrich-Betrieb (bzw. cw, Akronym von englisch „continuous wave“), lag besonderes Augenmerk auf der Erweiterung der MATLAB-Programmbibliothek hinsichtlich Pulsbetrieb (verwendete Pulsformen und –sequenzen s. Abb. 6). Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der zur Vorcharakterisierung der beiden Bauelementtypen RWE und TPA eingesetzten Messungen, dabei verwendeter Betriebsarten, Parameter, Geräte und Detektoren.
SPh erachtete 12 verschiedene CoS-Montagevarianten für sinnvoll, die aus fünf verschiedenen Bauelementen (RWE, gerade / RWE, gekrümmt / TPA, gerade / TPA, gekrümmt in zwei verschiedenen Varianten), drei Beschichtungssystemen, zwei Submount-Basismaterialien (Aluminiumnitrid, kurz: AlN, keramisch, isolierend bzw. Kupferwolfram, kurz: CuW, Legierung, metallisch, leitend) und Montagedetails kombiniert wurden (s. Abb. 7). Vorcharakterisierung und Realisierung von Lasersystemen ergaben die in hell- bzw. dunkelgrün eingezeichneten „Auswahlpfade“ für RWE und TPA zum Aufbau von MOPA-Systemen (MOPA: Akronym für Master Oscillator Power Amplifier). Tabelle 3 zeigt die Spezifikationen dieser ausgewählten Kombination von RWE und TPA und Abbildung 8 ein entsprechendes Schema. Nach diesem Plan wurde für den Halbzeitmeilenstein bei 952 nm ein MikroMOPA erfolgreich realisiert und vorgestellt (siehe Abb. 11, rechts und Tab. 4). Daneben enthält Tabelle 4 auch die Spezifikationen zweier realisierter MOPAs im Standardgehäuse bei 930 und 960 nm. Letztlich alle drei Systeme alle zum Ziel gesetzten Spezifikationen (s. Tab. 1).

Im 3. Projektjahr und dem Verlängerungsjahr lag der Schwerpunkt auf dem AP 34 „Vorbereitungen für Mikro-MOPA 2. Generation“. Die Loomis LSD-100, unsere Maschine zum Ritzen und Brechen von Halbleitermaterial (siehe Abb. 12), wurde erfolgreich modernisiert und neu qualifiziert. Die für ein anderes Projekt beschaffte Präzisionsjustage- und Klebeanlage „NanoGlue 2234“ (siehe Abb. 13) wurde erfolgreich in Betrieb genommen und hat das Potential, auch ABXSens durch hochgenaues Positionieren und Kleben mikrooptischer Bauelemente erfolgreicher zu machen. Die zusätzliche Lötoption konnte wegen verschiedener unten beschriebener Komplikationen nicht eingesetzt werden, so dass Vorversuche zur Lottechnologie mit einem „Stufenlötverfahren“ (s. Abb. 14), das eine stark verbesserte thermische Anbindung der CoS an die weiteren Komponenten im Butterfly-Gehäuse zum Ziel hat,
mit der Lötstation des „Die Bonders“ von Cammax durchgeführt wurden. Mittlerweile stehen auch um ca. 10 mm längere Butterfly-Gehäuse zur Verfügung (s. Abb. 17 links). Die Miniaturisierung optischer Isolatoren für 960 und 930 nm, die in dieses Gehäuse passen sollen, gelang bis zum Projektende noch nicht, da die gelieferten Kristalle noch zu groß für die notwendigen Magnete sind. Daher blieb die letztendliche Realisierung des Mikro-MOPA der 2. Generation offen.

Der Literaturverweis [L1] und verschiedene eigene Artikel und Konferenzbeiträge beschreiben den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde. Die ursprüngliche Aufgabenstellung wurde im Projektverlauf angepasst (Verzicht auf D-DFB Laser zugunsten eines zweiten Wafers bei 930 nm).
Durch die pandemische Lage in den ersten beiden Projektjahren und den Russland-Ukraine-Krieg kam es zu verschiedenen Verzögerungen gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan. Da die RWE und TPA jedoch sehr gute Qualität zeigen, wurde eine zuwendungsneutrale Projektverlängerung genehmigt, um die geplanten Arbeiten noch vollumfänglich durchführen und alle Ziele erreichen zu können. SPh kann nun für SLT

und externe Kunden RWE und TPA als CoS für robuste, industriegefertigte, transportable und gleichzeitig kostengünstige Lasersysteme liefern. Mit den erreichten Projektinnovationen wurde der Stand der Technik deutlich übertroffen.

Teil II: Eingehende Darstellung

AP 1 Spezifikation von UV-Laser

AP 1.1 Erarbeitung des Anforderungsprofils für den UV-Laser durch IPHT

Basierend auf den Anforderungen aus der Raman-Spektroskopie im UV, welche durch den Projektpartner Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) zusammengestellt wurden, wurden ein Anforderungsprofil (siehe Tab. 1) und ein Schema (siehe Abb. 1) für die NIR-Pumplasersysteme erarbeitet, mit deren Hilfe die UV-Laser aufgebaut wurden.

Anforderung	**Spezifikation**
NIR-Zielwellenlänge des ersten Wafers	960 nm (für 240 nm UV)
NIR-Zielwellenlänge des zweiten Wafers	930 nm (für 235 nm UV)
Optische Ausgangsleistung	mehr als 1 - 2 W
Strahlprofil	sehr gute Strahlqualität (M^2: nah an 1)
Gehäuse	kompaktes "High Heat Load"-Gehäuse

Tabelle 1: Anforderungsprofil der NIR-Pumplasersysteme (Schnittpunkt S1 der GVB zwischen den Partnern SPh, SLT und IPHT).

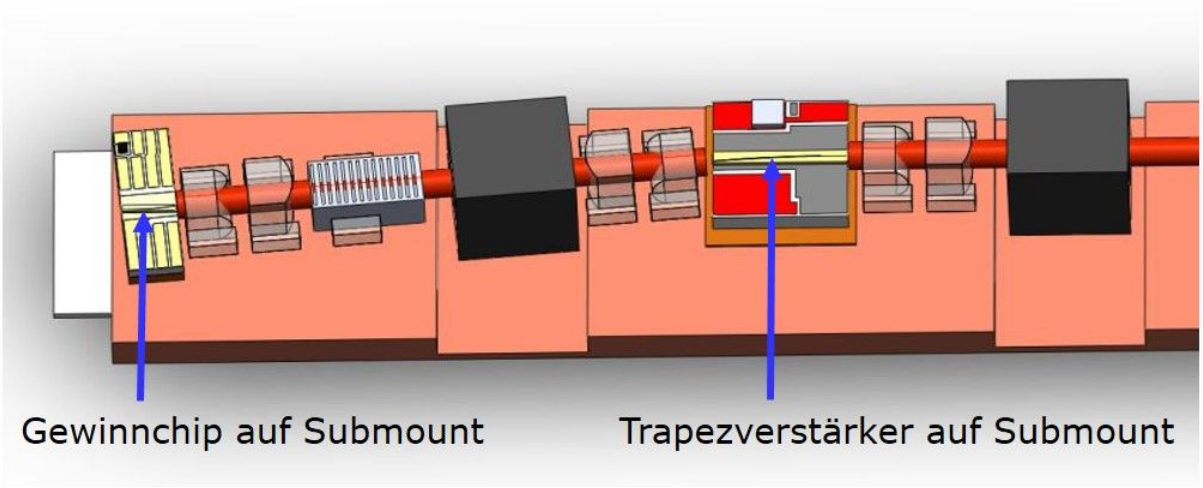

Abbildung 1: Schemazeichnung eines NIR-Pumplasersystems

AP 2 Laserwafer (960 – 980 nm)

Mit der Simulation, dem Wachstum der Laserwafer, der Maskensatz-Herstellung und der Frontend-Prozessierung der Laserwafer bei den zwei geplanten Wellenlängen inklusive der Facettenbeschichtung wurde als Dienstleister bzw. Lieferant das FBH beauftragt, welches diese Leistungen in Deutschland aus einer Hand anbietet und langjährige Erfahrung auf diesem Gebiet besitzt. Zwischen SPh und vor allem SLT und dem FBH besteht auch schon eine langjährige, vertrauensvolle Kunden-Lieferanten-Beziehung.

AP 2.1 Epitaxie-Modell für 960 – 980 nm Laserwafer

Im AP 2.1 wurden die Epitaxie-Modelle für den 960 – 980 nm Laserwafer und sehr ähnlich für den 930 nm Laserwafer konzipiert. Lieferant war in beiden Fällen das Fer-

dinand-Braun-Institut gGmbH (FBH), d. h. das Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik. Von der gemeinsamen Prozessierung von Gewinnchips, Trapezverstärkern und D-DFB-Lasern auf einem Wafer wurde wegen zu großer Kompromisse bei der Prozessierung und den deswegen zu erwartenden Leistungseinbußen der Laser Abstand genommen. Eine separate Produktion von D-DFB-Lasern hätte auch den finanziellen Rahmen gesprengt, so dass der vorhandene finanzielle Spielraum stattdessen für einen zweiten Wafer bei der niedrigeren Wellenlänge von 930 nm verwendet wurde, was einerseits das Prozessierungsrisiko verringerte und damit die Erfolgsaussichten des Gesamtvorhabens steigerte und andererseits vor allem den Wünschen des IPHT entgegenkam. Abbildung 2 links zeigt schematisch die Schichtenfolge der Wafer.

AP 2.2 Layout der Waferstrukturierung, Definition der Wafersegmente, Erstellung des Maskensatzes, etc.

Im AP 2.2 wurden die Planung für die Strukturierung des Wafers abschließend bearbeitet und die Details festgelegt. AP 2.2 ist in vier Unterpunkte gegliedert, auf die in der Folge eingegangen wird. Im zweiten Durchlauf von AP 2.2 für 930 nm waren keine Korrekturen des Layouts der Waferstrukturierung oder der Definition der Wafersegmente erforderlich. Lediglich die notwendigen Ätzprozesse wurden entsprechend leicht veränderter Materialzusammensetzungen und Schichtdicken angepasst. Dieser zweite Laserwafer erreichte die NIR-Zielwellenlänge von 940 nm, die mit Frequenzvervierfachung zur vielversprechenden UV-Operationswellenlänge bei 235 nm gewandelt wurde. Es entstanden keine zusätzlichen Kosten, aber SPh steigerte die Erfolgsaussichten des Projektes.

Auf Basis der in AP 1.1 beschriebenen Vorgaben erarbeitete SPh zusammen mit dem FBH eine Schichtstruktur für das Wafer-Wachstum (siehe Schema in Abb. 2 links), das Layout der Wafer (siehe Abb. 2 rechts) und der zu realisierenden Gewinnchips (schematische Darstellung siehe Abb. 3) und Trapezverstärker (siehe Abb. 4) auf diesen Laserwafern. Relevante Punkte waren hierbei Wellenführung, benötigter Gewinn, Zentralwellenlänge und spektrale Bandbreite.

Das Layout der RWE mit gekrümmtem Ausgangswellenleiter für den Einsatz im Laser mit externem Resonator wurde berechnet und simuliert. Die entsprechenden Gewinnchips sind 2000 µm lang und 500 µm breit. Im Gegensatz zu früheren Designs von SPh beginnt die Krümmung bereits auf der Hälfte der Chiplänge und erreicht die maximale Verkippung des Wellenleiters gegen die Facettennormale von 4° daher mit deutlich geringerem Krümmungsradius, wodurch interne Reflexionen sehr effektiv verringert wurden. Die Krümmung folgt im Wesentlichen einer Sinusfunktion. Der gekrümmte Wellenleiterabschluss verringert störende Rückreflexionen in den Gewinnchip bereits sehr wirksam ($R < 10^{-3}$ mit hoher spektraler Bandbreite bereits ohne zusätzliche Beschichtung). Durch eine zusätzliche Antireflexionsbeschichtung wird die verbleibende Facettenreflektivität minimiert. Diese Maßnahmen ermöglichen eine reflexionsfreie Ankopplung des externen Resonators an den NIR-Gewinnchip. Für einfachere Testaufbauten (insbesondere Messungen mit Rückkopplung) und als (letztlich nicht benötigte) Rückfalloption enthält der Wafer auch RWE mit geradem Wellenleiter, bei denen 1500 µm Chiplänge 400 µm Breite ausreichen. Abbildung 3 zeigt beide Chipvarianten schematisch.

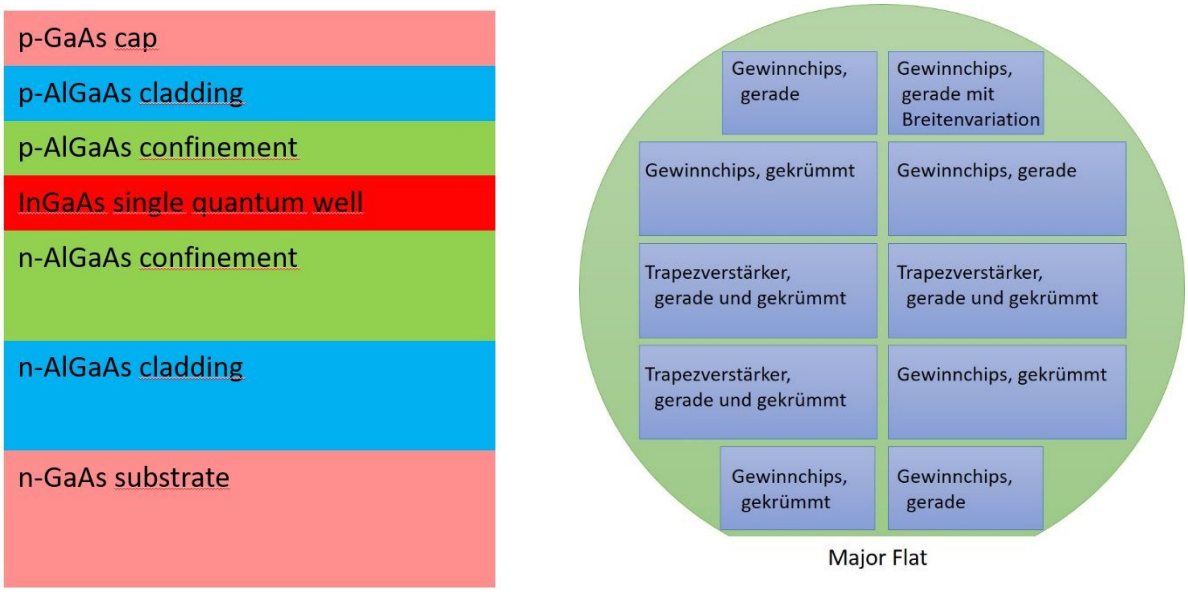

Abbildung 2: Links: Schichtenfolge („growth sheet“) der Wafer, stark schematisiert. **Rechts:** Schema der Waferbelegung.

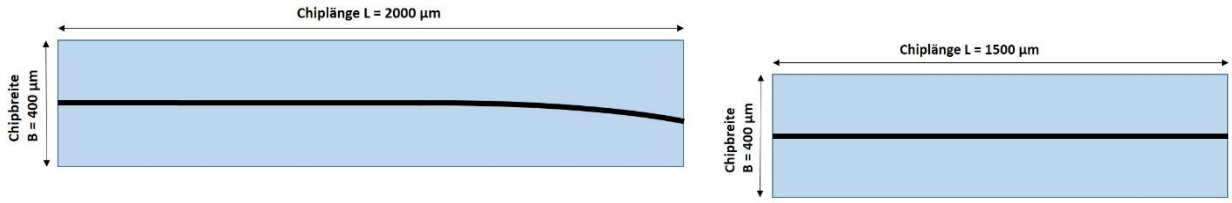

Abbildung 3: Links: Gewinnchip mit gekrümmtem Ausgangswellenleiter. **Rechts:** Gerader Gewinnchip.

Abbildung 4: Links: Trapezverstärker mit gekrümmtem Eingangswellenleiter. **Rechts:** Gerader Trapezverstärker.

Das Layout der TPA mit gekrümmtem Eingangswellenleiter wurde berechnet und simuliert. Sie werden als Verstärkerchips für die oben genannten Master-Gewinnchips im MOPA benötigt. Die Gesamtlänge der TPA beträgt 4000 µm. Aufgrund der größeren Breite im Trapezbereich wird eine Chipbreite von 500 µm benötigt. Beim Standardtyp mit sinusförmigem Eingangswellenleiter von 1000 µm Länge folgt ein gerader Abschnitt von 1000 µm Länge, an den das 2000 µm lange Trapez anschließt. Bei einem vollen Trapezwinkel von 4° ergibt sich am Ende eine Apertur von 139 µm. Ein „Übergangstyp“ mit 1000 µm langem gekrümmten Eingangswellenleiter, einem auf 500 µm verkürzten geraden Wellenleiter und einem 2500 µm langen Trapez mit 4° vollem Trapezwinkel erreicht eine Apertur von 174 µm. Für einfachere Testaufbauten und als Rückfalloption sind auch Trapezverstärker ohne gekrümmten Eingangswellenleiter im gemeinsamen Teilfeld enthalten. Der gerade Wellenleiter ist in diesem Fall 1500 µm lang und das Trapez hat dieselben Abmessungen wie beim Übergangstyp (Länge: 2500 µm, voller Trapezwinkel: 4°, resultierende Apertur: 174 µm). Abb. 4 zeigt die erste und dritte der besprochenen Chipvarianten schematisch.

Die 3‘‘-Wafer wurden in 10 streifenförmige „Teilfelder“ mit 10 mm Breite eingeteilt. Dadurch ergibt sich eine Barrenlänge von 10 mm, die sich im Backend gut weiterbearbeiten lässt. Bei einer Chipbreite von 500 µm enthalten die Barren 20 Chips nebeneinander, bei 400 µm Chipbreite 25 Chips. Mit den drei vorgestellten Barrendesigns wurden jeweils drei über den Wafer verteilte Teilfelder belegt. Die dadurch erreichte Redundanz zwecks Risikominimierung musste erfreulicherweise bei keiner der vier realisierten Wellenlängen in Anspruch genommen werden. Das verbleibende Teilfeld ist ein Testfeld, das mit in der Ridgebreite variierten geraden Gewinnchips belegt ist. An diesen Barren wurden die Schnelltests zur Qualitätskotrolle der Frontend-Prozessierung vor den anschließenden Facettenbeschichtungen durchgeführt. Abbildung 2 rechts zeigt schematisch die sich ergebende Waferbelegung.

AP 2.3 Epitaxie und Prozessierung von Laserwafer

Die Kampagnen für die beiden Wellenlängen wurden zeitlich gestaffelt gestartet. AP 2.3 zu Epitaxie und Prozessierung der Laserwafer verlief bei beiden Wellenlängen (960 nm und anschließend 930 nm) mit sehr guten Ergebnissen, so dass keine Wiederholung erforderlich war. Mit beiden Wafern zusammen wird ein NIR-Wellenlängenbereich von 890 nm bis 980 nm erreicht, womit ein UV-Bereich von 222,5 nm bis 245 nm bedient werden kann. Epitaxie und Prozessierung der Laserwafer erfolgten durch das FBH, so dass nur ein nicht geringer Zeiteinsatz für die Konzeption und Koordination anfiel. Dementsprechend wurden gegenüber der ursprünglichen Ansatz Personalkosten in Materialkosten umgewidmet. Der Erfolg der beiden Kampagnen wurde jeweils durch vom FBH zur Verfügung gestellte Messergebnisse (gepulste Messungen an unbeschichteten Testriegel, d. h. beide Facetten „as cleaved“) verifiziert und von SPh in Präsentationen und Berichten vorgestellt. Als Qualitätsindikatoren dienten Schwellstrom, Leistung und Peakwellenlänge des Emissionsspektrums. Beide Wafer erhielten die Freigabe zur weiteren Verarbeitung.

AP 2.4 Charakterisierung, Facettenbeschichtung, Montage, etc.

Das AP 2.4 umfasst die Backend-Prozessschritte am Laserwafer nach der Beendigung der Frontend-Prozessierung. Zur vollen Prozess- und Qualitätskontrolle bestand das FBH darauf, nur montierte „Chip on Submount“ (Akronym: CoS) auszuliefern. Die letzte Auslieferung zu 960 – 980 nm erfolgte Anfang September 2022. Die Lieferungen zu 930 nm wurden Anfang Oktober 2022 abgeschlossen. Dadurch entstanden durch den Umzug der beiden Firmen SPh und SLT im April 2021 in einen Neubau und dem daran anschließenden Neuaufbau der Arbeitsplätze und Medienversorgung der Arbeitsplätze im Sommer 2021 keine gravierenden Verzögerungen.
Die Charakterisierung der Laserbarren erfolgte im Rahmen von AP 2.4.2 durch das FBH an unbeschichteten „ridge waveguide“ Lasern verschiedener Ridgebreiten im Barren aus dem Testfeld TF0 zur Qualitätskontrolle direkt nach der Frontend-Prozessierung (Ergebnisse dazu wurden bereits vorgestellt), sowie an den Barren aus anderen Testfeldern nach deren Beschichtung.
Zu den drei anderen Unterpunkten des Arbeitspakets 2.4 wurden die Arbeiten durch SPh fortgeführt.

AP 2.4.1 Erstellung von Testvorrichtungen zur Charakterisierung

Das bereits vorhandene Lichtmikroskop Motic BA310MET-H wurde entsprechend der Vorkalkulation (Pos. 813 / 13) mit einem Objektiv mit hundertfacher Vergrößerung aufgerüstet, um einerseits die Qualität der optischen Eingangskontrolle der vom FBH gelieferten CoS zu verbessern und andererseits gegebenenfalls während der Handhabung, Vorcharakterisierung und des Betriebs der CoS auftretende Schäden an Oberflächen und Facetten besser beurteilen zu können.

Der bestehende Nadeltestplatz („Laser (Bar) Tester“, siehe Abb. 5) wurde während des gesamten Projektzeitraums kontinuierlich verbessert (siehe Zwischenberichte [Z1-3]) und für Vorcharakterisierungen eingesetzt. Die vom FBH gelieferten CoS werden vor dem festen, thermisch optimal angekoppelten Einbau in ein Gehäuse im Nadeltestplatz vorcharakterisiert, im Fall von Gewinnchips (RWE, Akronym von englisch „Ridge Waveguide Emitter) bis maximal 300 mA Injektionsstrom und im Fall von Trapezverstärkern (TPA, Abk. von engl. „**T**rapezoidal **P**ower **A**mplifier“) bis 1000 mA. Messungen werden einerseits im Dauerstrich-Betrieb (bzw. cw, Akronym von englisch „continuous wave“) durchgeführt. Andererseits wurden zur wirksamen Begrenzung der Aufheizung der Chips während der Messungen der Pulsbetrieb und dessen Steuerung durch MATLAB-Programme weiter verbessert. Im Pulsbetrieb heizen sich die CoS weniger auf als cw, so dass mit höheren Injektionsströmen vorcharakterisiert werden kann. Abbildung 6 zeigt die üblicherweise verwendeten Pulsformen und –sequenzen bei Messungen im Pulsbetrieb. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der zur Vorcharakterisierung der beiden Bauelementtypen RWE und TPA eingesetzten Messungen, dabei verwendeter Betriebsarten, Parameter, Geräte und Detektoren.

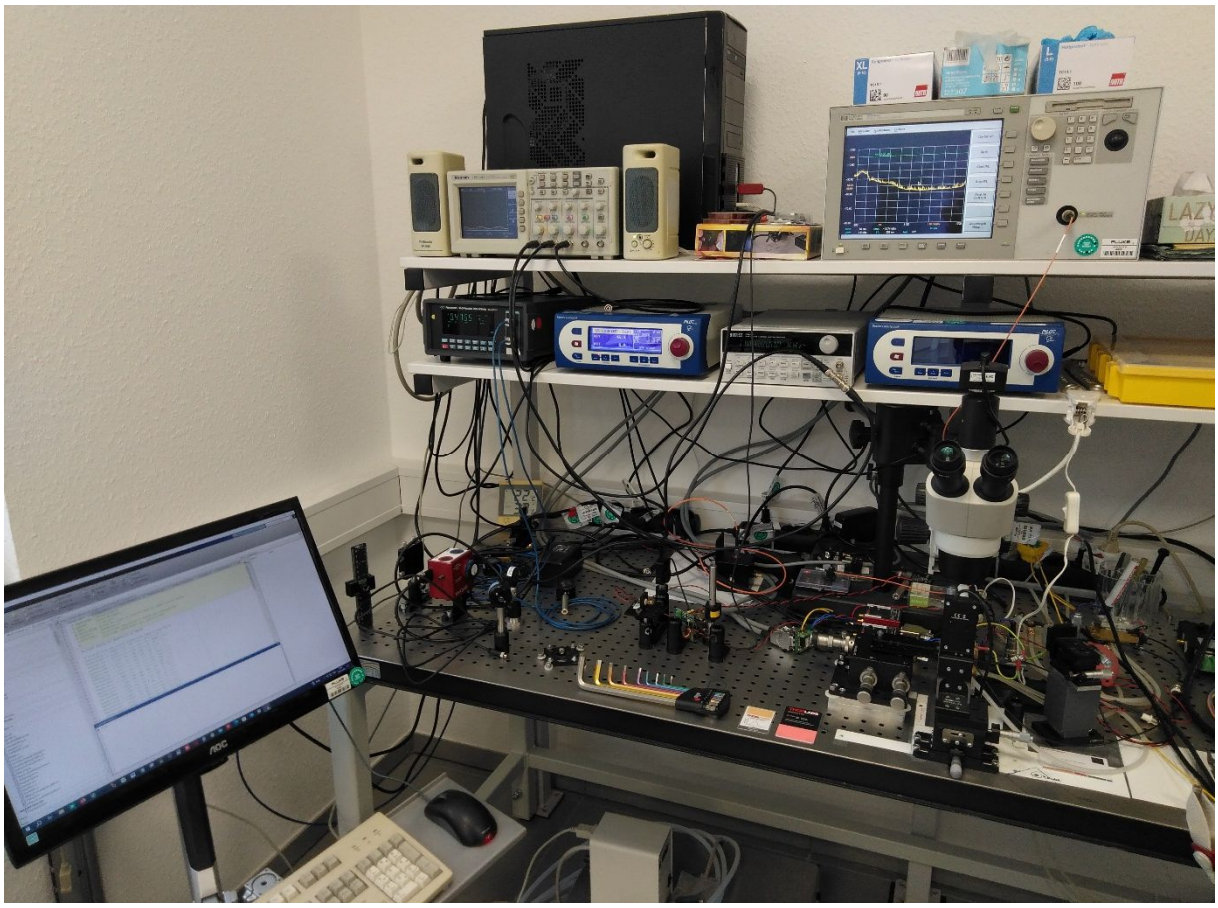

Abbildung 5: Nadeltestplatz (mit Digital-Speicheroszilloskop Tektronix TDS 1002B, Optical Spectrum Analyzer HP 86140A, Multi-Function Optical Meter“ Newport 2835-C, Pilot PZ 500, Function / Arbitrary Waveform Generator HP 33120A und Pilot PC 4000).

Abbildung 6: Verwendete Pulsformen und –sequenzen. Links: Rampenpulse / Sägezähne mit konstanter Amplitude. **Mitte:** Rechteckpulse mit programmierter Anzahl an Wiederholungen und in Programmschleife ansteigender Amplitude. **Rechts:** Rechteckpulse mit konstanter Amplitude.

Die in der Vorkalkulation vorgesehene pulsbare Laserstromquelle Keysight B2902A (Pos. 0847 / 2a) wurde nicht beschafft, sondern durch eine deutlich kostengünstigere und flexibler nutzbare Lösung substituiert: Ein Laser Controller Pilot PC4000 von SLT dient als leistungsstarke Stromquelle, die mit einem gebraucht erworbenen arbiträren Funktionsgenerator Agilent 33120A moduliert werden kann. Das Modulationssignal des Funktionsgenerators bzw. das Monitorsignal des Lasercontrollers und die mit einer schnellen, vorgespannten Si-Photodiode gemessenen optischen Pulssignale des untersuchten RWE- bzw. TPA-Chips werden mit einem Speicheroszilloskop erfasst, gespeichert und ausgewertet. Hierfür wurde zunächst ein gebrauchtes zweikanaliges Digitales Speicheroszilloskop Tektronix TDS 1002B und später ein ebenfalls gebrauchtes Tektronix TDS 2014 Vierkanal-Speicheroszilloskop eingesetzt.

AP 2.4.2 Charakterisierung der Laserbarren

Die weitere Verarbeitung der Laserwafer beim FBH umfasste das Spalten in Barren bzw. Riegel und deren Facettenbeschichtung. Die Kosten für die Lieferungen des FBH waren sehr viel höher als vom Angebot her zu erwarten war, da von Seiten des FBH zwecks vollumfänglicher Qualitätskontrolle auf der Auslieferung der RWE und TPA als CoS und dem Einsatz einer neuen Bestückungsmaschine bestanden wurde. Daher konnte SPh nicht wie geplant ganze Wafer oder zumindest Laserbarren beziehen. Entsprechend höherer Arbeitsaufwand und Materialverbrauch innerhalb des FBH führte zu erheblichen Mehrkosten auf der Beschaffungsseite. Anderseits konnten aber auch erheblich Personalkosten bei SPh eingespart werden. Eine entsprechende Mittelumwidmung wurde vom Projektträger genehmigt. Die umfassende Prozess- und Qualitätskontrolle innerhalb des FBH war ein Vorteil für das Projekt, indem Risiken deutlich verringert wurden.

Bau-ele-ment	Messung	Betriebsart des Bauelements	Beschreibung der Betriebsart	Injektions-strom [mA]	Puls-frequenz [Hz] → Perioden-dauer [ms]	Tastver-hältnis [%] → Pulsdauer [ms]	Geräte für Laserdioden-betrieb	Detektion
RWE	I-I- und U-I-Kennlinie	Pilot-Scan	implementierte Rampe	0 - 200			PZ 500	Si-PD
RWE	P-I- und U-I-Kennlinie	cw in Messschleife	programmierte Rampe	0 - 200			PZ 500	TD or Si-PD Sensor
RWE	P-I-Kennlinie	gepulste Rampen	siehe Abb. 2 , links	0 - 300	10 → 100	0,5 → 0,5	Awg + PZ 500	fast Si-PD + Osci
RWE	P-I-Kennlinie	gepulste Rechtecke	siehe Abb. 2 , Mitte	0 - 300	1000 → 1	20 → 0,2	Awg + PZ 500	fast Si-PD + Osci
RWE	Spektrum	cw	fester Injektionsstrom	i. d. R. 100 mA			PZ 500	OSA
RWE	Spektrum	gepulste Rechtecke	siehe Abb. 2, rechts	i. d. R. 100 mA	1000 → 1	20 → 0,2	Awg + PZ 500	OSA
TPA	I-I- und U-I-Kennlinie	Pilot-Scan	implementierte Rampe	0 - 1000			PC 4000	Si-PD
TPA	P-I- und U-I-Kennlinie	cw in Messschleife	programmierte Rampe	0 - 1000			PC 4000	TD
TPA	P-I-Kennlinie	gepulste Rampen	siehe Abb. 2 , links	0 - 300	10 → 100	0,5 → 0,5	Awg + PC 4000	fast Si-PD + Osci
TPA	P-I-Kennlinie	gepulste Rechtecke	siehe Abb. 2 , Mitte	0 - 300	1000 → 1	20 → 0,2	Awg + PC 4000	fast Si-PD + Osci
TPA	Spektrum	cw	fester Injektionsstrom	i. d. R. 100 mA			PZ 500	OSA
TPA	Spektrum	gepulste Rechtecke	siehe Abb. 2, rechts	i. d. R. 100 mA	1000 → 1	20 → 0,2	Awg + PC 4000	OSA

Legende zu Geräten für Laserdiodenbetrieb:

PZ 500 = Pilot PZ 500, **Awg** = Function / Arbitrary Waveform Generator HP 33120A, **PC 4000** = Pilot PC 4000

Legende zu Detektion:

Si-PD = Si-Photodiode Thorlabs FDS100, **TD** = Thermoelektrischer Detektor Thorlabs PM16-401, **Si-PD Sensor** = Multi-Function Optical Meter" Newport 2835-C, **fast Si-PD** = PDA10A2 Si Amplified Fixed Gain Detector, **Osci** = Digital-Speicheroszilloskop Tektronix TDS 1002B, **OSA** = Optical Spectrum Analyzer HP 86140A

Tabelle 2: Zusammenstellung der zur Vorcharakterisierung von RWE und TPA eingesetzten Messungen, dabei verwendeter Betriebsarten, Parameter, Geräte und Detektoren.

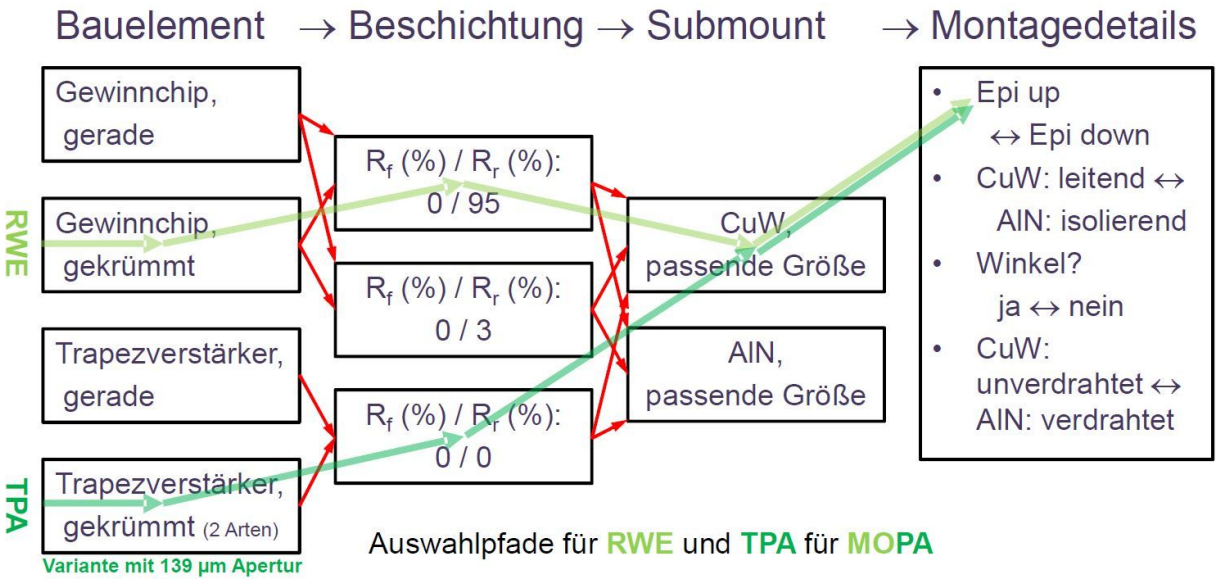

Abbildung 7: Schema, aus dem sich 12 sinnvolle Varianten zur Montage der Gewinnchips und Trapezverstärker ergaben, die sowohl bei 960 nm als auch bei 930 nm zur Anwendung kamen.

AP 2.4.3 Facettenbeschichtung der Laserbarren

Aus oben genannten Gründen bestand das FBH auf der Beschichtung der Laserriegel im eigenen Hause. Abbildung 7 zeigt die von SPh vorgegebenen Facettenbeschichtungen der RWE- und TPA-Barren:

- Entspiegelung bzw. AR-Coating: „0 %“, so niedrig wie möglich, real etwa 0,05 %
- Entspiegelung bzw. AR-Coating: „3 %“, als Option für SPh, Einzellaser zu höheren oder niedrigeren Prozentsätzen weiter zu beschichten
- Verspiegelung bzw. HR-Coating: „95 %“, was auch ziemlich genau erreicht wird.

Die linke Hälfte der Abbildung zeigt die Zuordnung dieser drei Beschichtungssysteme zu den auf den beiden Laserwafern vorhandenen Bauelementen (RWE, gerade / RWE, gekrümmt / TPA, gerade / TPA, gekrümmt in zwei verschiedenen Varianten). Die rechte Hälfte zeigt die weitere Zuordnung zu den beiden Submount-Basismaterialien Aluminiumnitrid (kurz: AlN, keramisch, isolierend) bzw. Kupferwolfram (kurz: CuW, Legierung, metallisch, leitend). SPh hielt 12 verschiedene Montagevarianten für sinnvoll, von denen im Laufe der verschiedenen Tests und Systemintegrationen einige Varianten als weniger leistungsfähig oder unpraktisch ausschieden. Im Projektzeitraum traten keine Probleme auf, welche die Bevorzugung eigentlich schon zurückgestellter Varianten hätte notwendig werden lassen. Die grünen Auswahlpfade für RWE und TPA heben die Varianten hervor, die sich aufgrund der Messergebnisse im Nadeltestplatz von SPh und in den von SLT aufgebauten Lasersystemen als am besten geeignete Kombination zum Aufbau von MOPA-Systemen (MOPA: Akronym für Master Oscillator Power Amplifier) zur Erfüllung des Halbzeitmeilensteins erwiesen haben. Tabelle 3 zeigt die Spezifikationen dieser ausgewählten Kombination von RWE und TPA und Abbildung 8 ein entsprechendes Schema.

Spezifikation	Gewinnchip (RWE)	Trapezverstärker (TPA)
Aktive Zone	5 nm dicker SQW	5 nm dicker SQW
Wellenlänge [nm]	**~ 930 bzw. ~ 960**	**~ 930 bzw. ~ 960**
Laserlänge [µm]	2000 (1000 gerade + 1000 gekrümmt)	4000 (1000 gekrümmt + 1000 gerade + 2000 Trapez)
Streifenbreite [µm]	3	3 (RW) / 139 (TPA-Apertur)
Beschichtung Vorderseite	AR: R_f = 0 %	AR: R_f = 0 %
Beschichtung Rückseite	HR: R_r = 95 %	AR: R_r = 0 %
Montagedetails	CuW-Submount, p-Seite oben	CuW-Submount, p-Seite oben

Tabelle 3: Spezifikationen der ausgewählten Kombination von Gewinnchip und Trapezverstärker.

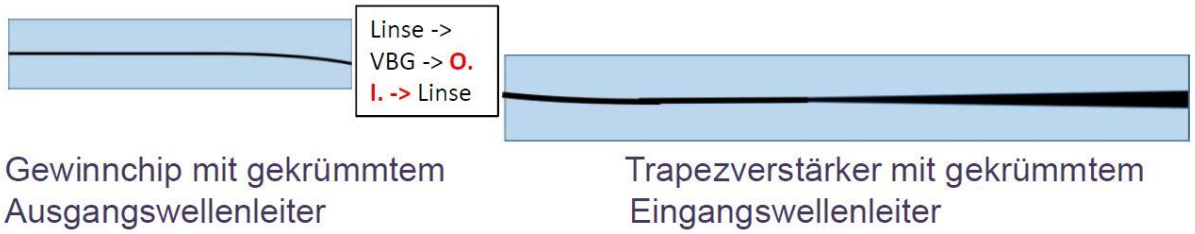

Abbildung 8: Schema: Chipauswahl für erste Generation des MikroMOPAs bei 960 nm.

AP 2.4.4 Montage der Chips

Das FBH bestand auch darauf, das Vereinzeln, Selektieren, Auflöten auf Submounts und ggf. Verdrahten des Chips mit dem Submount im eigenen Hause durchzuführen, obwohl bei SPh an anderen Lasern entwickelte und getestete Montageverfahren zur Verfügung stehen.
SPh erstellte für geeignete CoS detaillierte Testreports ("Data Sheets") mit Dokumentation aller relevanten Parameter und gab die CoS zum Einbau in Lasersysteme an SLT weiter. Tabelle 4 fasst die erreichten Spezifikationen gemessener, aufgebauter und im Rahmen der Projekttreffen präsentierter MOPAs zusammen.

Gemeinsames Arbeitsziel von SPh und SLT für den **Halbzeitmeilenstein** war die Integration von RWE und TPA in ein mikrooptisches Gesamtkonzept auf einer Mikrobank zu einem leistungsstarken MOPA-System mit exzellenter spektraler Qualität und Strahlqualität, wie es derzeit nicht verfügbar ist. Dieses wurde für 960 nm als MikroMOPA erfolgreich realisiert und vorgestellt (siehe Abb. 11, rechts und Tab. 4). Tabelle 3 enthält die Spezifikationen der hierzu ausgewählten Kombination von RWE und TPA. Abbildung 8 zeigt die Chipauswahl schematisch. Mit einem Pumpstrom des RWE-Masterlasers von 150 mA wurden 68 mW Pumpleistung für den TPA erreicht. Das gesamte NIR-Lasersystem erreichte bei 3,2 A Betriebsstrom des TPA eine optische Ausgangsleistung von 1,4 W bei sehr guter Strahlqualität (M^2 = 1,2 bei 130 cm Distanz). Damit wurden die Ziele 2 und 3 des Halbzeitmeilensteins gemeinsam mit SLT erfolgreich erreicht [Z2SLT]. Die Messergebnisse von SLT an Standard-MOPAs in Tabelle 4 zeigen, dass die Stabilität und Strahlqualität des MOPA-Systems durch den Einsatz eines Optischen Isolators (siehe Abb. 8: O. I.) zwischen RWE und TPA weiter verbessert werden kann. Da aktuell keine Mikroisolatoren geeigneter Spezifikation (akzeptable Verluste!) bei 930 und 960 nm zur Verfügung stehen, wurde das System zur Funktionskontrolle des Chipsatzes bei 930 nm von SLT als Standard-MOPA ausgeführt (siehe Abb. 9). Auf die Ergebnisse wird unten ausführlich eingegangen (siehe Abb. 10 und Tab. 4). Die Suche nach und eventuell sogar der Eigenbau von geeigneten Optischen

Isolatoren wurde als Arbeitsziel für das Verlängerungsjahr neu aufgenommen, um einen einteiligen Mikro-MOPA mit Mikroisolator zu ermöglichen. Plan B wäre die getrennte Miniaturisierung von Master und Slave, die an einem „großen“ Optischen Isolator montiert werden könnten, wodurch gegenüber dem Standardsystem immer noch ein sehr großer Miniaturisierungsschritt gelänge.

AP 2.5 Optimierung der Facettenbeschichtungen für die Anwendung im Mikro-MOPA

Vergleichende Messungen aus Vorder- und Rückseite der CoS ergaben, dass die Facettenbeschichtungen des FBH sehr gut entsprechend der gewünschten Spezifikation gelungen sind, so dass zunächst keine Nachbeschichtungen durch SPh erforderlich sind. Die hierzu bestimmten Sputteranlagen wurden jedoch weiter optimiert.

AP 5.2: Spezifikationen von MOPAs

Mit von SPh vorcharakterisierten Gewinnchips mit geradem Wellenleiter bei 930 nm wurde von SLT ein Durchstimmbares Lasersystem mit Externem Resonator (kurz: ECDL, Akronym für englisch: External Cavity Diode Laser) aufgebaut (siehe Abb. 9 links). Abbildung 9 rechts zeigt das sehr gute Strahlprofil dieses Lasersystems. Die P-I-Kennlinien (siehe Abb. 10, links) dokumentieren bei 890 nm (40 nm unterhalb der Zentralwellenlänge des Gewinnspektrums) noch deutlich mehr als 1 W Ausgangsleistung bei etwa 3 A Injektionsstrom. Bei 920 und 940 nm sind sogar 2,5 W bei 4 A Injektionsstrom realisierbar. Spektren des 930 nm ECDL-Systems bei 890, 915, 920, 940 und sogar 950 nm zeigen die sehr gute Durchstimmbarkeit (siehe Abb. 10 rechts). Im zweiten Zwischenbericht ([Z2], S. 15, Abb. 10) wurde ein ähnliches ECDL-System mit einem Chipsatz bei 960 nm und dazugehörigen Spektren bei 920, 960 und 980 nm vorgestellt. Damit ist die erfolgreiche Realisierung der gewünschten und geplanten leichten Überlappung und gemeinsamen Erweiterung des zur Verfügung stehenden NIR-Bereichs (aktuell 890 nm bis 980 nm, bei weiterer Optimierung eventuell sogar noch etwas größer) nachgewiesen. Nach Frequenzvervierfachung sollte damit ein UV-Bereich von 222,5 nm bis 245 nm bedient werden können.

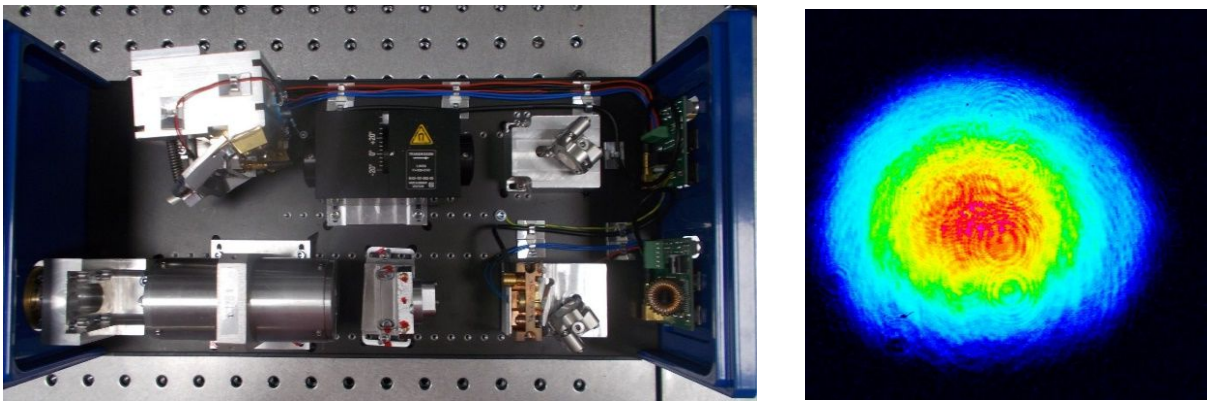

Abbildung 9: Links: Standard-MOPA für 930 nm, Gesamtsystem ohne Haube. **Rechts:** Strahlprofil des Systems in 410 cm Abstand, Strahldurchmesser horizontal 3,6 mm und vertikal 2,9 mm.

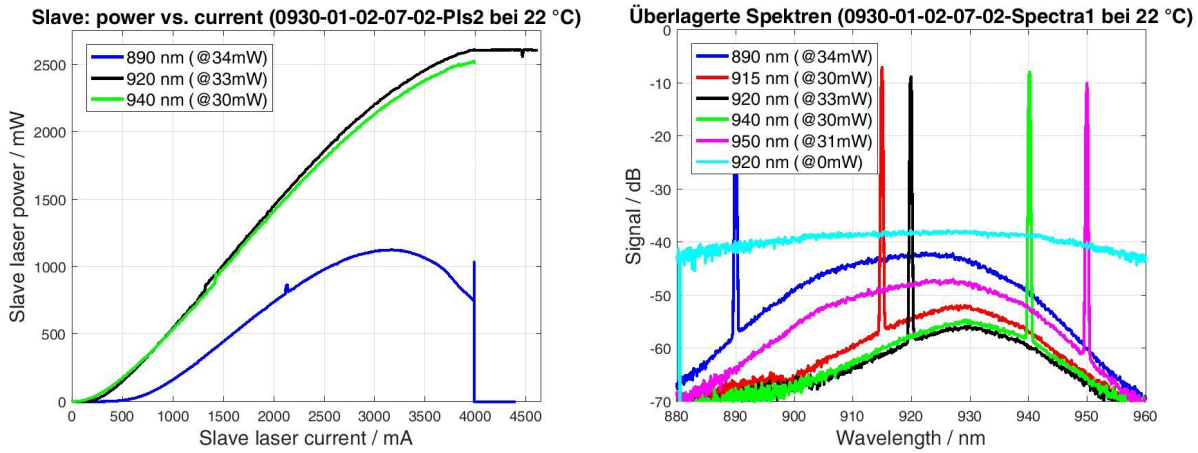

Abbildung 10: Links: P-I-Kennlinien des Slaves im MOPA-System für 930 nm bei drei ausgewählten Wellenlängen und der angegebenen Pumpleistung des Masters. **Rechts:** Überlagerte Spektren des Slaves bei fünf ausgewählten Wellenlängen mit angegebener Pumpleistung des Masters und ungepumpt in 920 nm-Stellung.

Spezifikation	MOPA bei 930 nm	MOPA bei 960 nm	Mikro-MOPA bei 952 nm
NIR-Durchstimmbereich	890 – 950 nm	956 – 960 nm (920 – 980)	952 ± 0,1 nm (mit VBG)
Ausgangsleistung in Abhängigkeit von Wellenlänge und Slave-Injektionsstrom	1 W (@ 890 nm / 3 A) 2,5 W (@ 920 – 940 nm / 4 A)	> 2,2 W @ 960 nm / 3 A (@35 mW master laser power)	1,4 W (@ 952 nm / 3,2 A)
Strahlprofil horizontal / vertikal / Abstand	3,6 mm / 2,9 mm / 410 cm	1,8 mm / 1,4 mm / 140 cm	M^2 = 1,2 / 130 cm
UV-Zentralwellenlänge nach FHG	*(232,5 nm)*	240 nm	*(238 nm)*
UV-Durchstimmbereich	*(222,5 – 237,5 nm)*	239 – 241nm *(230 – 245)*	- - -

Tabelle 4: Spezifikationen von MOPAs bei 930 und 960 nm.

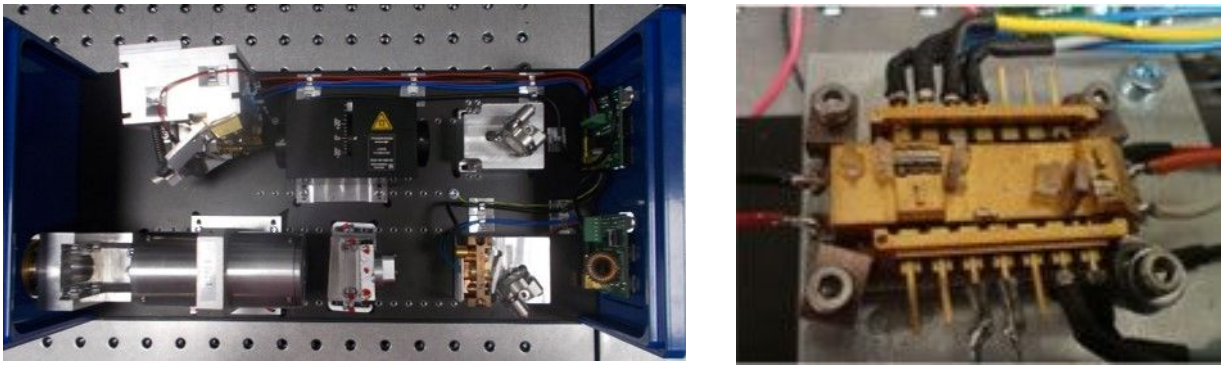

Abbildung 11: Links: Standard-MOPA. **Rechts:** Mikro-MOPA.

Zusammenfassung zum regulärem Projektzeitraum

✓ Wachstum, Prozessierung und Facettenbeschichtungen der Wafer bei 960 nm und 930 nm sind im ersten Anlauf sehr gut gelungen.
✓ Chipauswahl und MOPA-Konzept konnten sowohl bei 960 nm als auch bei 930 nm bestätigt werden.
✓Die MOPAs erreichen die gewünschten Spezifikationen.

Insbesondere das **AP 34 Miniaturisierter Pump Laser für FHG, Mikro-MOPA 2. Generation** betreffend wären zum regulären Projektende einige Arbeiten offen und Fragen unbeantwortet geblieben, so dass einstimmig eine zuwendungsneutrale Laufzeitverlängerung des Projekts beantragt und gewährt wurde. Tabelle 5 zeigt den Projektzeitplan für das dritte Projektjahr, sowie das vierte Projektjahr. Die Hauptarbeitspakete der SPh sind mit den neuen Laufzeiten, Übergabepunkten und Schnittstellen dargestellt. Die aufgezeigten Schnittstellen beziehen sich ausschließlich auf die Arbeitspakete von SPh. Die Arbeiten des dritten und vierten Projektjahres zu AP 34 werden nachfolgend zusammen behandelt.

Kalenderjahr:			2021				2022				2023				2024			
Kalenderjahrquartale:			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP	Bezeichnung der Arbeitspakete	Beteiligte																
1	Spezifikation von UV-Laser	IPHT, SLT, SPh	S1															
2	Laserwafer (960-980nm)	SPh, SLT																
5	Miniaturisierter Pump Laser für FHG, Mikro-MOPA, 1. Generation	SLT, SPh						T1/S7										
17	Austausch SLT - SPh (nach Testung und Auswahl genaue Wellenlänge)	SLT, SPh																
34	Miniaturisierter Pump Laser für FHG, Mikro-MOPA, 2. Generation	SLT, SPh																
S	"Sonstiges": Begleitung der Projektarbeiten	SPh und PP														T8/S13		

Tabelle 5: Projektzeitplan des dritten und vierten Berichtsjahrs für die Sensor Photonics GmbH (SPh).

AP 34 Miniaturisierter Pump Laser für FHG, Mikro-MOPA 2. Generation

AP 34.1 Revision des Mikro-MOPAS basierend auf Rückmeldungen von den Projektpartnern

SPh war laut Teilvorhabensbeschreibung nur an diesem Unterarbeitspaket beteiligt, begleitete aber über den gesamten Zeitraum auch die Projektarbeiten von SLT. Für SPh besonders wichtige und wegweisende Themen werden nachfolgend beschrieben.

Zu AP 34.1: Modernisierung und Neuqualifikation der Loomis LSD-100

Die Loomis ist eine für SPh sehr wichtige Maschine zum Ritzen und Brechen von Halbleitermaterial (siehe Abb. 12). Zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Maschine musste der alte „Schlitten“ mit abgenutzten Kugellagern gegen einen neuen Schlitten mit modernen Kreuzrollenlagern ausgetauscht werden. Wegen des Alters der Maschine konnte der Umbau nicht mehr beim Hersteller durchgeführt werden, sondern ein neues, teilweise ausgestattetes Gehäuseoberteil wurde zugeschickt. Die Verbindung der beiden Gehäuseteile miteinander und der „Umzug“ weiter zu verwendender Baugruppen vom alten auf das neue Gehäuseoberteil musste daher vollständig in Eigenarbeit nur mit Fernbetreuung durch einen Experten des Herstellers erfolgen, was einen hohen Zeitaufwand erforderte. Nach umfangreicher Neujustage und Neuqualifikation ist die Einsatzbereitschaft wiederhergestellt. Diese Arbeiten wurden im dritten Projektjahr durchgeführt.

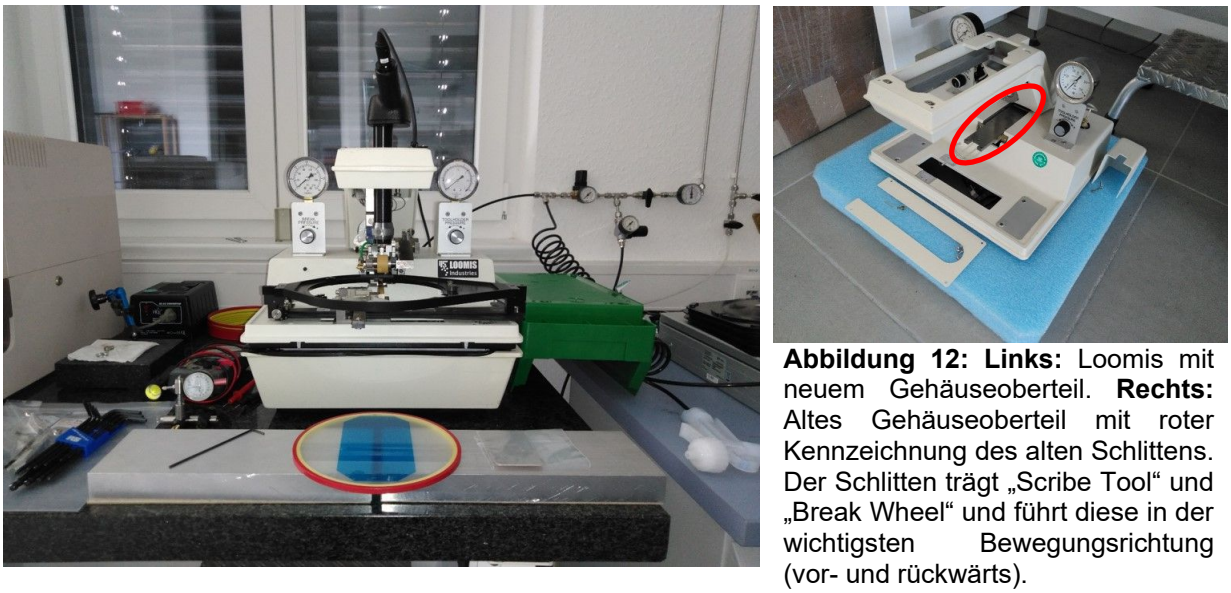

Abbildung 12: Links: Loomis mit neuem Gehäuseoberteil. **Rechts:** Altes Gehäuseoberteil mit roter Kennzeichnung des alten Schlittens. Der Schlitten trägt „Scribe Tool“ und „Break Wheel“ und führt diese in der wichtigsten Bewegungsrichtung (vor- und rückwärts).

AP 34.1: Präzisionsjustage- und Klebeanlage

Mitte 2023 wurde eine Präzisionsjustage- und Klebeanlage der Firma nanosystec („NanoGlue 2234“, siehe Abb. 13) in Betrieb genommen. Die Maschine wurde für ein anderes, ein Jahr später gestartetes, Projekt bestellt. Sie hat das Potential, auch ABXSens durch hochgenaues Positionieren und Kleben mikrooptischer Bauelemente erfolgreicher zu machen.

Abbildung 13: Präzisionsjustage- und Klebeanlage NanoGlue 2234. **Links:** Gesamtüberblick. **Rechts:** Blick in das Innere der Anlage.

Das Justieren und Kleben in der Maschine funktionieren sehr gut und das Portfolio an zur Verfügung stehenden Prozessmodulen wird kontinuierlich erweitert. Die Maschine besitzt zusätzlich eine Lötoption zum Löten mit Heißluft. An der Heißluftstation (Leister LE Mini Sensor Kit) können Gasfluss und Temperatur geregelt werden. Die Inbetriebnahme der ersten Variante war ein lehrreicher Misserfolg: Die notwendigen Temperaturen werden erreicht. Der Heißluftstrom muss aber für mehr Effektivität besser im Gehäuse verteilt werden. Die Halteklammer des Gehäuses muss aus einem temperaturbeständigeren Material gefertigt werden, da sie bei der Inbetriebnahme geschmolzen ist. Daher erwies sich eine im Tray unter dem Butterfly-Gehäuse integrierte Widerstandsheizung als wünschenswert und leistungsfähiger als die bestehende Heizmöglichkeit mit Wasser. Durch verschiedene herstellerseitige Verzögerungen zum Beispiel

durch Designfehler konnte die zweite und verbesserte Variante der Lötoption im Verlängerungsjahr nicht mehr geliefert, installiert und getestet werden.

AP 34.1 Revision des Mikro-MOPAs: Lottechnologie

Die thermische und elektrische Anbindung der CoS an die weiteren Komponenten im Butterfly-Gehäuse haben sich im Projektverlauf als kritische Parameter erwiesen. Letztlich planen wir mit Hilfe der Lötoption der NanoGlue die bisherigen Klebeschritte durch ein „Stufenlötverfahren“ mit dem Ziel stark verbesserter thermischer Anbindung zu ersetzen. Abbildung 14 zeigt schematisch unsere Vorüberlegungen zum Stufenlötverfahren. Wegen der oben beschriebenen Probleme wurden als Alternative zu Tests mit der Lötoption in der NanoGlue Vorversuche mit der Lötstation des „Die Bonders“ von Cammax durchgeführt, die sonst zum AuSn-Löten von Chips auf Submounts bei Temperaturen von bis zu 340 °C eingesetzt wird.

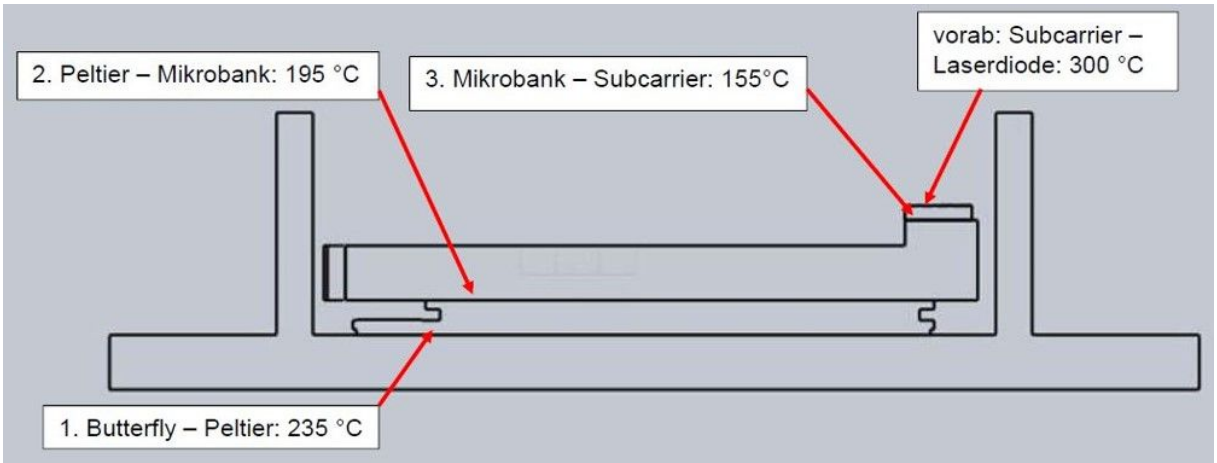

Abbildung 14: Schematischer Querschnitt durch ein Butterfly-Gehäuse mit Kommentaren zum geplanten Stufenlötverfahren.

Folgende Lötstufen sind geplant:

0. Die Lötverbindung zwischen Laserdiode und Subcarrier bzw. Submount ist bereits vorher mit AuSn (Eutektikum bei 286 °C, Löttemperatur um 300 °C) erfolgt.
1. Butterfly – Peltier mit Sn96.5AG3.0Cu0.5 („SAC-Lot“, Schmelztemperatur: 217 – 219 °C, Löttemperatur um 235 °C)
2. Peltier – Mikrobank mit Sn62Pb36Ag2 (Schmelztemperatur: 179 – 189 °C, Löttemperatur um 195 °C). Eine praktikable, bleifreie Alternative steht leider noch nicht zur Verfügung, so dass es an dieser Stelle Ausnahmeregelungen zu den RoHS-Richtlinien gibt.
3. Mikrobank – Subcarrier (mit Laserdiode) mit Sn42Bi58 (Eutektikum bei 138 °C, Löttemperatur um 155 °C) oder In97Ag3 (Schmelztemperatur: 143 °C, Löttemperatur um 160 °C).

Die in Frage kommenden Lote stehen als Lotpasten von Nordson und Lotbänder von Indium Corporation (zur Anfertigung von Preforms für Vorversuche) zur Verfügung. Die Lötvorgänge benötigen 15 bis 40 °C höhere Temperaturen als die Schmelztemperatur.

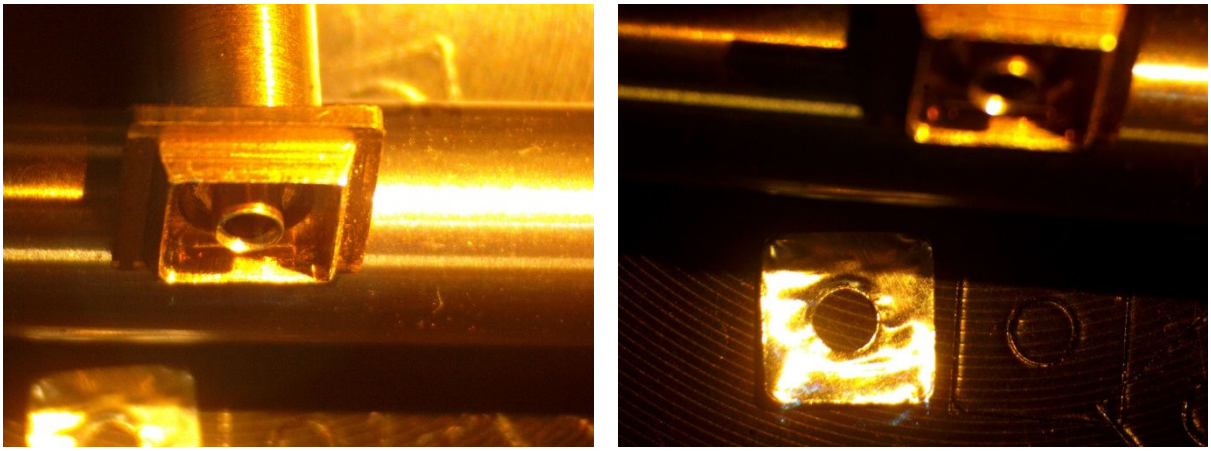

Abbildung 15: Links: Stanzstempel. **Rechts:** Ausgestanzte Preform.

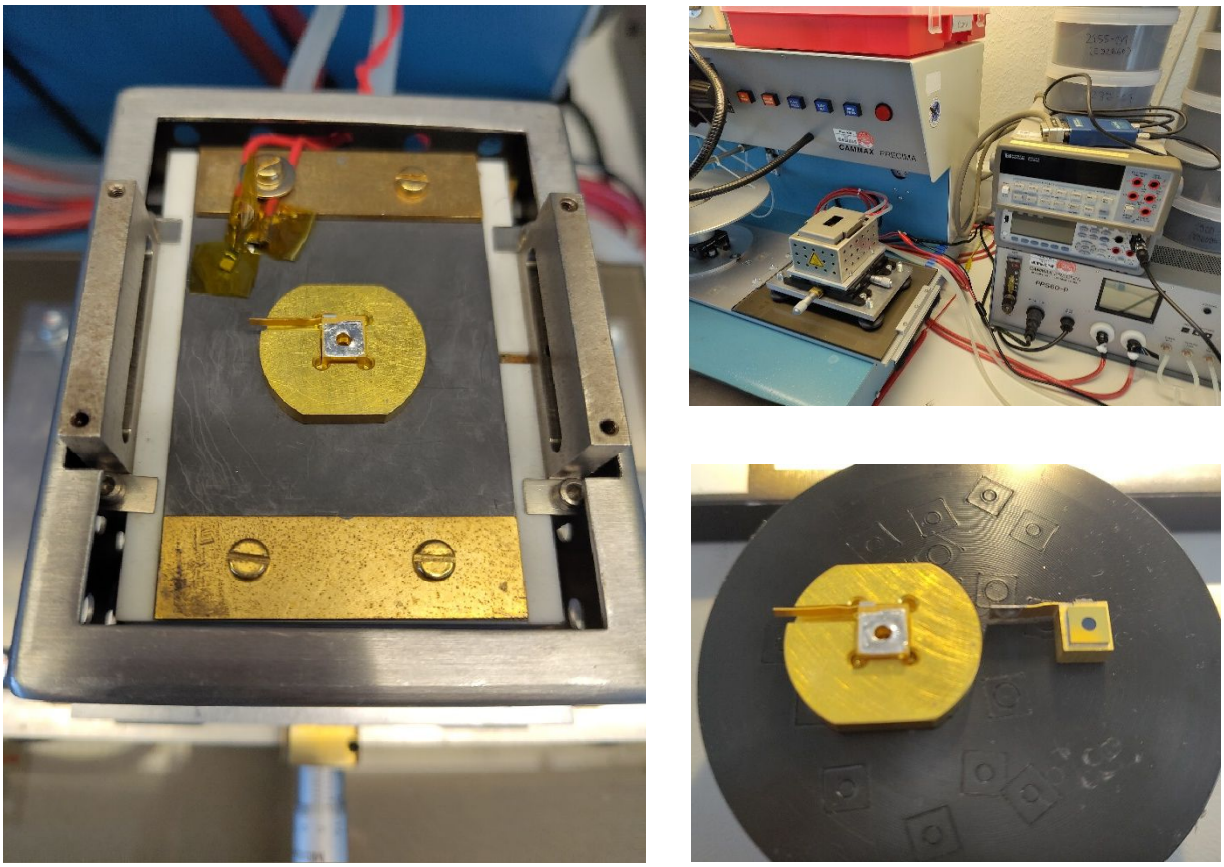

Abbildung 16: Links: Lötofen ohne Abdeckblech mit Thermoelement und C-mount. **Rechts oben:** Die Bonder mit Lötofen. **Rechts unten:** Links C-mount mit aufgelöteter Preform und rechts mit aufgelötetem Chip.

Wegen der Lieferverzögerung des Heiztrays für die NanoGlue wurden Vorversuche im manuellen Die-Bonder Cammax Precima DB600 mit Lötofen unter Verwendung gestanzter Preforms durchgeführt, siehe Abbildungen 15 und 16. Im Lötofen („Heat Pulse System“) des Die-Bonders wird unter Formiergas-Atmosphäre (95 % N_2 / 5 % H_2) gelötet. Die Temperaturrampen können mit Pt100 oder auch Pt1000 mitgeloggt werden.

AP 34.1 Revision des Mikro-MOPAs: Verlängertes Butterfly-Gehäuse

Für den Aufbau des Mikro-MOPA der ersten Generation musste das Butterfly-Gehäuse vorne und hinten geöffnet werden (siehe Abb. 11 rechts). Mittlerweile stehen verlängerte Butterfly-Gehäuse zur Verfügung, die Länge innen beträgt nun 29,00 statt 18,83 mm, die Breite innen 8,90 statt 8,34 mm und die Höhe innen 6,50 statt 6,10 mm. Der Boden ist dicker für größere mechanische Stabilität. Die Gehäuse besitzen nun an beiden Seiten eine Snout. Abbildung 17 links zeigt das beschriebene Sondergehäuse.

AP 34.1 Revision des Mikro-MOPAs: Miniaturisierung Optischer Isolatoren

Beim Mikro-MOPA der ersten Generation wäre der Einbau eines miniaturisierten Optischen Isolators wünschenswert gewesen. Für 960 und 930 nm sind jedoch noch keine geeigneten Mikroisolatoren erhältlich. Ohne Optischen Isolator erhöht sich durch störende Rückreflexionen des Trapezverstärkers die Linienbreite. Dadurch verschlechtert sich die Effizienz der zwei nachfolgenden Frequenzverdopplungen und die Linienbreite und damit Auflösung für die UV-Raman-Spektroskopie wird ein kritischer Punkt. Daher haben wir uns mit dem Eigenbau von Mikroisolatoren beschäftigt. Den Eigenbau größerer Isolatoren beherrscht SLT schon.

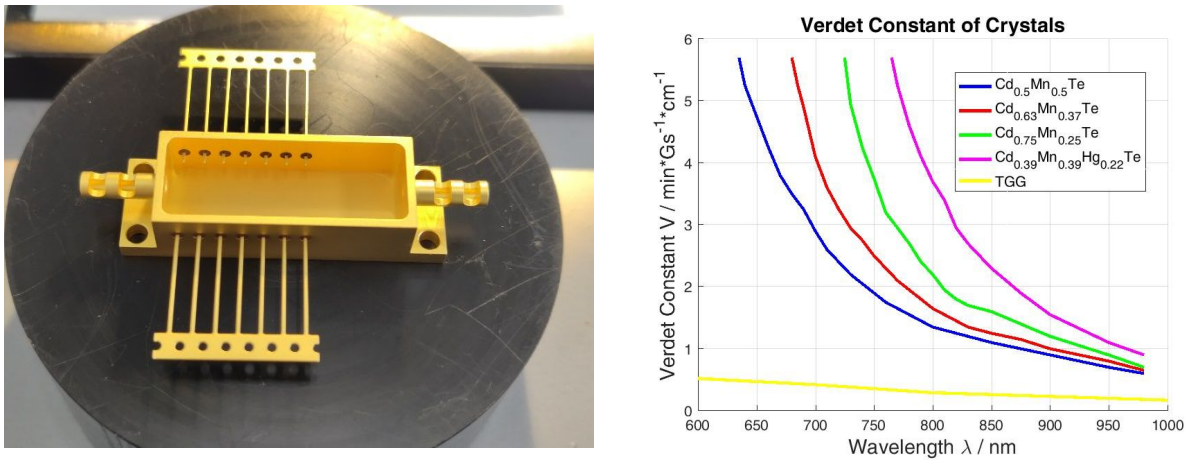

Abbildung 17: Links: Verlängertes Butterfly-Gehäuse. **Rechts:** Verdet-Konstanten von CdMn(Hg)Te gegenüber TGG.

Kristalle zur Miniaturisierung Optischer Isolatoren konnten wir bestellen und die deutlich größere Verdet-Konstante gegenüber TGG verifizieren, siehe Abbildung 17 rechts. Es liegen CdMnTe-Würfel mit AR/AR-Beschichtung für 770 – 960 nm mit Abmessungen 1,7 x 1,7 x 2 mm und CdMnTe-Würfel mit AR/AR-Beschichtung für 935 nm (auch für 960 nm geeignet) mit Abmessungen 2,3 x 2,3 x 2,2 mm vor. Auch die notwendigen Polarisatoren wurde beschafft und getestet. Die gelieferten Permanentmagnete erwiesen sich leider als Fehlbestellung, da die Öffnung in der Mitte zu klein für die Aufnahme der CdMnTe-Würfel ist. Da der Durchmesser der Permanentmagnete schon maximal in Bezug auf die Gehäusegröße gewählt wurde und die Öffnung in der Mitte auch nicht größer sein darf, weil sonst die notwendige Magnetfeldstärke nicht erreicht wird, müssen die CdMnTe-Würfel kleiner geschliffen oder kleinere bestellt werden. Die letztendliche Realisierung des Mikro-MOPA der 2. Generation bleibt also bedauerlicherweise noch offen.

Teil III: Erfolgskontrollbericht

Der Halbzeitmeilenstein des Projektes ABXSens war auf den Projektmonat 18, d.h. die Laufzeitmitte des Teilvorhabens (30.06.2021) terminiert. Die im Teilvorhaben formulierten Ziele (siehe [TVB], S. 16) wurden fristgerecht abgearbeitet: Die RWE und TPA standen in unterschiedlichen Varianten zur Auswahl zur Verfügung. Ein Mikro-MOPA-System der 1. Generation wurde montiert, in Betrieb genommen und stand somit als NIR-Pumplasersystem für das FHG-System von SLT zur Verfügung. Dieses NIR-Pumplasersystem arbeitet um 952 nm Wellenlänge mit einer optischen Ausgangsleistung von 1,4 W bei sehr guter Strahlqualität (M^2 = 1,2 / 130 cm) und hat Abmessungen deutlich unterhalb der spezifizierten 5 cm x 5 cm x 2 cm, so dass alle in der TVB vorgegebenen Anforderungen erreicht wurden.

Die Voruntersuchungen des IPHT zum Absorptionsverhaltens der Antibiotika ergaben, dass 235 nm UV zur Anregung besser geeignet sein könnte, wofür die NIR-Zielwellenlänge 940 nm benötigt würde. Daher wurde statt der teureren Prozessierung eines Wafers mit DFB-Lasern ein zweiter Wafer mit RWE und TPA bei 930 nm prozessiert, der auch die Zielwellenlänge 940 nm des NIR-Pumplasersystems ermöglicht. Wesentlicher Vorteil für das Gesamtprojekt ist die dadurch gegebene Abdeckung eines größeren UV-Wellenlängenbereichs. Sowohl AP 2.3 zu Epitaxie und Prozessierung der Laserwafer als auch AP 2.4 zur beidseitigen Facettenbeschichtung verlief bei beiden Wellenlängen (960 nm und anschließend 930 nm) mit sehr guten Ergebnissen, so dass keine Wiederholung erforderlich war. Beide Wafer zusammen decken einen NIR-Wellenlängenbereich von 890 nm bis 980 nm ab, womit ein UV-Bereich von 222,5 nm bis 245 nm bedient werden kann. Ab dem 3. Projektjahr konnte daher der Schwerpunkt auf die Aufbau- und Verbindungstechnik (kurz: AVT, von Konzepten bis zum Einsatz des Fertigungsautomaten) gelegt werden.

Durch die pandemische Lage in den ersten beiden Projektjahren entstanden erhebliche Lieferverzögerungen auf Seiten des Lieferanten Ferdinand-Braun-Institut gGmbH (FBH). Auch Mitarbeiter im Entwicklungs- und Produktionsteam der Sensor Photonics GmbH (SPh) fielen immer wieder krankheitsbedingt aus, was die Durchführung von Laborarbeiten gegenüber dem Zeitplan weiter verzögerte. Ein weiteres unerwartetes Szenario ist der Russland-Ukraine-Krieg, welcher sich negativ auf die Verfügbarkeit und Lieferzeit wichtiger Komponenten auswirkt. Die gelieferten RWE und TPA sind jedoch von sehr guter Qualität, so dass die Erreichbarkeit der Projektziele nicht in Frage stand. Daher wurde eine zuwendungsneutrale Projektverlängerung um ein Jahr bis zum 31.12.2024 beantragt und genehmigt, um die geplanten Arbeiten noch vollumfänglich durchführen und alle Ziele erreichen zu können.

Im 3. Projektjahr und dem Verlängerungsjahr lag der Schwerpunkt auf dem AP 34 „Vorbereitungen für Mikro-MOPA 2. Generation“. Die Loomis LSD-100, unsere Maschine zum Ritzen und Brechen von Halbleitermaterial (siehe Abb. 12), wurde erfolgreich modernisiert und neu qualifiziert. Der neue Schlitten und die modernen, technisch hochwertigeren Kreuzrollenlager ermöglichen stark verbesserte Präzision, Qualität und Reproduzierbarkeit der entsprechenden Arbeitsschritte, woraus eine Erhöhung der Ausbeute und damit eine Verringerung der Produktionskosten resultiert.

Die Präzisionsjustage- und Klebeanlage „NanoGlue 2234“ (siehe Abb. 13) wurde erfolgreich in Betrieb genommen und kann mikrooptische Bauelemente (wie z. B. Linsen, VBG und Optischen Isolator) hochgenau Positionieren und Kleben.
Eine Erfolgsgeschichte in diesem Zusammenhang ist der Aufbau von VBG-Lasersystemen im Butterfly-Gehäuse mit 922 nm Emissionswellenlänge, basierend auf RWE-

Chips und bei notwendiger Verstärkung TPA-Chips des 930 nm-Wafers. Durch Frequenzverdopplung werden 461 nm erreicht, die zur Laserkühlung von Strontium-Atomen eingesetzt werden mit Anwendungen in der Spektroskopie und in Atomuhren auf der Basis von Strontium. Die dadurch erreichte Erweiterung des Produkt-Portfolios von SPh und SLT (in Bezug auf Standard-ECDL, Standard-MOPA und die notwendigen SHG-Systeme) ist so attraktiv, dass SPh aktuell einen kommerziellen Dienstleister für die entsprechende Epitaxie, Frontend-Prozessierung und Facettenbeschichtungen sucht, da das FBH eher als Forschungsdienstleister einzustufen ist.

Die Lötoption der NanoGlue wird die Übernahme von Lötschritten im Sinne des „Stufenlötverfahren“ (s. Abb. 14) ermöglichen, wodurch entsprechend der Vorversuche mit der Lötstation des „Die Bonders“ von Cammax eine stark verbesserte thermische Anbindung der CoS an die weiteren Komponenten im Butterfly-Gehäuse erreicht werden kann, als mit den bisher eingesetzten Klebeverfahren.

Mittlerweile stehen auch um ca. 10 mm längere Butterfly-Gehäuse zur Verfügung (s. Abb. 17 links). Die Miniaturisierung optischer Isolatoren für 960 und 930 nm, die in dieses Gehäuse passen sollen, gelang bis zum Projektende noch nicht, da die gelieferten Kristalle noch zu groß für die notwendigen Magnete sind. Daher blieb die letztendliche Realisierung des Mikro-MOPA der 2. Generation noch offen, wird aber in absehbarer Zeit möglich sein.

Durch das Projekt ABXSens konnte SPh einen neuen Wellenlängenbereich für neue Produkte erschließen (siehe oben angeführtes Beispiel). Besonders bei den Produktionsschritten des Backends, vor allem der Aufbau- und Verbindungstechnik wurden neue Fähigkeiten erreicht, mit deren Hilfe sich die Produktionskosten senken und die Qualität der Produkte und damit die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen lassen. Die Verkäufe entwickeln sich positiv im Vergleich mit dem ursprünglichen Verwertungsplan. Hinsichtlich des übergeordneten Ziels des Gesamtprojekts werden Anschlussprojekte evaluiert.

Während des Projektverlaufs sind keine FuE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant geworden wären. Eine Änderung in der Zielsetzung wurde nicht notwendig. Die ursprüngliche Aufgabenstellung wurde im Projektverlauf nur in dem Sinne angepasst, dass auf einen DFB-Wafer zugunsten eines zweiten Wafers bei 930 nm verzichtet wurde, mit dem erwünschten Effekt einer deutlichen Erweiterung des erreichbaren NIR- und UV-Bereichs. SPh kann nun für SLT und externe Kunden RWE und TPA als CoS für robuste, industriegefertigte, transportable und gleichzeitig kostengünstige Lasersysteme liefern. Mit den erreichten Projektinnovationen wurde der Stand der Technik deutlich übertroffen.

Basierend auf den berichteten Arbeiten können in Zukunft auch TPAs mit höherer optischer Ausgangsleistung hergestellt werden. Das nächste Etappenziel in dieser Hinsicht wären ca. 7 W Leistung aus 6 mm langen Strukturen (gegenüber den aktuellen 4 mm). Wie oben bereits erwähnt sollen die Forschungsergebnisse zu einer kommerziellen Foundry übertragen werden, z. B. zu Jenoptik in Berlin. Die Ergebnisse können auch auf weitere interessante Wellenlängen übertragen werden. Mit den Arbeiten wurde eine Schlüsseltechnologie für die Medizintechnik erarbeitet.

Anhang: Literaturverzeichnis

Artikel in Fachzeitschriften:

[A1] Milde, T., Assmann, C., Jimenez, Á., Honsberg, M., O'Gorman, J., Schade, W. and Sacher, J.: "**Single mode GaSb diode lasers for sensor applications in a long wavelength regime**", Appl. Opt. **56** (2017)

[A2] Milde et al. **„QEPAS sensor for breath analysis: a behavior of pressure"**, Appl. Opt. **57** No. 10 (2018)

Konferenzbeiträge:

[K1] Sacher, J. R. et al.: "**Narrow-line diode laser packaging and integration in the NIR and MIR spectral range**", SPIE Photonics West 2017, eingeladener Vortrag und Paper

[K2] Milde, T., Jimenez, A., Sacher, J. R., O'Gorman, J.: "**Long Wavelength Single Mode GaSb Diode Lasers for Sensor Applications**", OSA CLEO 2017, Posterpräsentation

[K3] Milde et al. **„New NIR and MIR GaSb based Single Mode Diode Lasers for Sensor Applications"**, ESLW 2017

[K4] Jimenez, Á., Milde, T., Tatenguem, H., Honsberg, M., Carpintero, G., O'Gorman, J., Sacher, J.: "**MEMS-based widely tunable external cavity diode laser**", SPIE Photonics West 2018, Vortrag und Paper [10545-17]

[K5] Milde, T., Hoppe, M., Jimenez, Á., Tatenguem, H., Honsberg, M., O'Gorman, J., Schade, W., Sacher, J.: "**New GaSb-based single-mode diode lasers in the NIR and MIR spectral regime for sensor applications**", SPIE Photonics West 2018, Vortrag und Paper [10553-9]

[K6] Hoppe, M., Rohling, H., Schmidtmann, S., Tatenguem Fankem, H., Milde, T. and Sacher, J.: "**New wide tunable external cavity interband cascade laser based on a micro-electro-mechanical system device"**, SPIE Photonics West 2019, Vortrag und Paper [10931-12]

[K7] Erfle, D.: **"Automated assembly and alignment of NIR and MIR external cavity diode laser systems"**, Konferenz LASE im Rahmen von SPIE Photonics West 2025, Vortrag und Paper, Proceedings Volume 13344, Components and Packaging for Laser Systems XI; 133440G (2025)

[K8] Assmann, C. et al.: **"Sub-kHz miniaturized external cavity diode laser within a butterfly package"**, Konferenz OPTO im Rahmen von SPIE Photonics West 2025, Vortrag und Paper, Proceedings Volume 13373, Photonic Instrumentation Engineering XII; 133730F (2025)

Andere Literaturverweise:

[L1] Faugeron et al.: **"High Power Three Section Integrated Master Oscillator Power Amplifier at 1.5 µm"**, IEEE Photonics Technology Letters, **27**(13): 1449 – 1452 (2015)

[L2] Arhilger, Detlef, Beschichtungsingenieur bei Bühler, vormals Leybold Optics: Multilayer Calculation **MCalc®**, Version 4.0.17, freies Berechnungsprogramm für Optische Beschichtungen

[L3] Erfle, Denis: Masterarbeit „Evaluierung und Optimierung einer Fertigungsanlage zum Aufbau von External Cavity Diode Lasers (ECDL's)" vom 03.11.2023

[TVB] Honsberg, Martin für Sensor Photonics GmbH: Teilvorhabensbeschreibung zum Teilvorhaben „Leistungsstarke Laserdioden und Trapezverstärker um 960 nm Wellenlänge für Pumplasersysteme zur Frequenzvervierfachung" der Sensor Photonics GmbH (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425D)

[Z1] Honsberg, Martin für Sensor Photonics GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis" (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425D, Berichtszeitraum: 01.01.2021 – 31.12.2021)

[Z1SLT] Sacher Lasertechnik GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis" (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425C, Berichtszeitraum: 01.01.2021 – 31.12.2021)

[Z2] Honsberg, Martin für Sensor Photonics GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis“ (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425D, Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2022)

[Z2SLT] Sacher Lasertechnik GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis“ (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425C, Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2022)

[Z3] Honsberg, Martin für Sensor Photonics GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis“ (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425D, Berichtszeitraum: 01.01.2023 – 31.12.2023)

[Z3SLT] Sacher Lasertechnik GmbH: Sachbericht zum Zwischennachweis im Verbundprojekt „Raman-spektroskopische Messung von Antibiotikaspiegeln für die Versorgung von nosokomialer Sepsis“ (Akronym: ABXSens, Fkz: 13GW0425C, Berichtszeitraum: 01.01.2023 – 31.12.2023)