

Schlussbericht zum Vorhaben
„Brillante Halbleiterlaser mit vergrabenen implantierten Stromblenden“

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 114753 BriSCL
„Brillante Halbleiterlasermodule“

Paul Crump, Seval Arslan, Ben King

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH,
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2103D
Projektlaufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024

I. Kurze Darstellung zu

Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war es, die Effizienz und Brillanz von Hochleistungsdiodenlasern auf GaAs-Basis durch den Einsatz neuester Forschungs- und Spitzentechnologien zu erhöhen (z.B. vergrabene, gewachsene Implantationsstrukturen (BRIS); Klemmmontagetechnik; Einsatz patentierter Spektralkombinationstechniken (RPC) zur Erhöhung der Brillanz). Ein Ansatz war der Einsatz der BRIS-Technologie, bei der ein zweistufiger Epi-Prozess und eine Ionenimplantation eingesetzt werden, um die seitliche Stromausbreitung zu reduzieren und so die Effizienz und das Strahlparameterprodukt (BPP) zu verbessern. Diodenlaser Barren mit BRIS (BRIS-BARs) können dickere Kontaktschichten zum Schutz gegen die durch die patentierte Barrenklemmtechnik von MNC verursachten Montageschäden verwenden. Ein weiterer Ansatz war die Kombination der BRIS-Technologie mit einem lateralen strukturierten p-Kontakt in Single-Emitter-Diodenlasern mit großer Apertur (BRIS-WAs), um eine optische Supermodus-Stabilisierung zu erreichen.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das FBH verfügt über langjährige Erfahrungen und Kenntnisse in der Herstellung von Diodenlasern mit hoher Qualität und Brillanz. In BRISCL nutzte das FBH verschiedene Lasertechnologien, um Fortschritte bei der Brillanz von Diodenlasern zu ermöglichen und die Betriebskosten für Materialbearbeitungsanwendungen zu senken. Zu diesem Zweck nutzte das FBH insbesondere die patentierten nachwachsenden stromblockierenden Strukturen (Patentanmeldung WO 2020/156775 A1), die patentierte extrem doppelte asymmetrische Epitaxiestruktur (EDASLOC, Patente DE 10 2017 101 422 B4, US 8,798,109 B2) und die asymmetrische große optische Epitaxiestruktur (ASLOC, voraussichtlich effizienter), um Diodenlaser mit höherer Effizienz und Brillanz zu realisieren. Darüber hinaus wurde eine periodische laterale Stromstrukturierung zur optischen Supermodenstabilisierung verwendet, um die Brillanz des Diodenlasers zu erhöhen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das FBH arbeitete in Abstimmung mit anderen Projektpartnern und konnte die Projektziele erfolgreich umsetzen. COVID-bedingte Personalengpässe und technische Probleme am FBH verzögerten den Herstellungsprozess des Diodenlasers, wodurch sich andere Arbeitspakete verzögerten und das Projekt verlängert wurde. Im Rahmen des BRISCL-Projekts wurden sechs Arbeitspakete definiert, und das FBH trug zu den Arbeitspaketen 1, 2 und 6 bei.

In Arbeitspaket 1 nahm das FBH an den halbjährlich stattfindenden Projektsitzungen teil und führte Projektstatus- und Risikobewertungen mit den Projektpartnern durch.

Im Arbeitspaket 2 lieferte das FBH erfolgreich Referenzlaserbarren (Iteration 1) sowohl an MNC (15x) als auch an BFB (10x) und „Großapertur“-Einzelemitter (WA) an BFB (30x), und zwar pünktlich (Meilenstein O2.1). It. 2 BRIS-BARs und BRIS-WAs wurden erfolgreich hergestellt,

passiviert und beschichtet. Nach der Qualitätskontrolle der Diodenlaser wurden die BRIS-BARs an MNC (30x) und BFB (10x und 5x Dummies) und die BRIS-WAs an BFB (40x und 5x Dummies) geliefert. Der Meilenstein O2.2 lt. 2 wurde mit einer dreimonatigen Verzögerung in M15 (Juni 2022) teilweise und in M19 (Oktober 2022) vollständig abgeschlossen. Nach der Montage der Laser bei MNC und BFB wurden am FBH detaillierte Messungen und Analysen durchgeführt. Das FBH hat die Robustheit der lt. 2 BRISCL-Einzelemitter mit 100 µm Streifen bei 10 W Ausgangsleistung bei 25 °C im Dauerstrichbetrieb (CW). Robustheitstests für lt. 1-Referenzlaser konnten aufgrund deren schlechten Leistung nicht durchgeführt werden. FBH und Jenoptik haben den ersten Bericht für die Serienfertigung (Meilenstein O2.3) im Mai 2023 und den Abschlussbericht für die Serienfertigung (Meilenstein O2.4) vor Projektende erfolgreich abgeschlossen.

Im Arbeitspaket 6 veröffentlichte das FBH 2x begutachtete wissenschaftliche Artikel und 3x Konferenzbeiträge, um die BRIS-Ergebnisse einer breiteren Öffentlichkeit und potenziellen Kunden zu präsentieren. Darüber hinaus wurde die BRIS-Technologie ausgewählt und als ein Highlight im FBH-Jahresbericht 2022 (veröffentlicht im 2. Quartal 2023) vorgestellt.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Keine, außerhalb der Projektpartnern Jenoptik, MNC, BFB, Raab-Photonik.

II. Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Alle Lieferungen von Referenzbarren und Einzelemitter mit großer Apertur wurden erfolgreich und termingerecht abgeschlossen. lt. 2 BRIS-BARs (mit 10 x 100 µm) und BRIS-WAs (mit 1000-1500 µm Streifen) bei 915 nm wurden am FBH erfolgreich hergestellt. Als vertikale Epitaxieschichten für die Herstellung der BRISCL-Laser wurden ein bewährtes EDASLOC und ein effizienteres ASLOC-Design ausgewählt. Die Diodenlaser wurden mit verschiedenen Implantationsvarianten hergestellt (mit einer Basis-Implantationstiefe und mit einer tieferen Implantation), und die Diodenlaser mit ASLOC-Design wurden auch mit dickeren Kontaktschichten hergestellt, um die Montagebelastung zu verringern. Einzelne Emitter mit 100-µm-Streifen wurden auf CuW-Submounts montiert und am FBH bei 25 °C und im CW-Betrieb zur Qualitätskontrolle getestet. Am FBH wurden auch Einzelemitter mit großer Apertur (mit ASLOC-Design und einer Reflektivität der Vorderfacette von 1,8 % und einer Reflektivität der Rückfacette von 98 %) in Sandwich-Montagetechnik montiert und bei 25 °C und im CW-Betrieb zur Qualitätskontrolle von BRIS-WAs getestet. Die Ergebnisse wurden mit Einzelemittern mit großer Apertur und ASLOC_contact (Implantation an der Kontaktschicht) verglichen. Trotz der Probleme, die durch COVID und technische Störungen verursacht wurden, konnten alle Lieferungen mit einer Verzögerung von sechs Monaten erfolgreich abgeschlossen werden. BRIS-BARs in ASLOC- und EDASLOC-Ausführung wurden an MNC bzw. BFB geliefert, wo sie in Klemmtechnik bei MNC und in Löttechnik bei BFB montiert wurden.

BRIS-WAs (mit einer Reflektivität der vorderen Facette von 0 % und einer Reflektivität der hinteren Facette von 98 %) wurden an FBH zur Montage in Sandwich-Technik zur externen optischen Stabilisierung am Raab Photonik geliefert. Ein Ziel des Projekts ist es, BRIS-BARs mit einer Leistungskonversionseffizienz PCE > 60 % und einem lateralen Strahlparameterprodukt BPP < 4 mm·mrad bei 100 W Ausgangsleistung (10 W pro 100 µm Emitter) im CW-Modus bei 25 °C zu erreichen. Ein zweites Ziel ist es, mit BRIS-WAs einen PCE > 50 % bei 25 W Ausgangsleistung im CW-Betrieb bei 25 °C zu erreichen. BRIS-BARs wurden im QCW-Modus (2 ms Puls, 10 Hz Wiederholrate für Leistungs-Spannungs-Strom-Eigenschaften und 200 µs Puls und 10 Hz Wiederholrate für die laterale Strahlqualität) bei 25 °C getestet. Die Testergebnisse mit den Projektzielen sind in Tab. 1 für BRIS-BARs und Einzelemitter und in Tab. 2 für BRIS-WAs zusammengefasst.

Wie aus den Tabellen hervorgeht, haben BRIS-BARs und BRIS-WAs die Projektziele erreicht.

Wafer	Mounting	Output Power (W)	PCE (%)	Lat. BPP (mm·mrad)
SE with 100 µm stripes				
ASLOC_baseline BRIS	FBH	10	67	2.80
ASLOC_deep BRIS	FBH	10	68	2.70
ASLOC_thick contact	FBH	10	66	2.70
EDASLOC_baseline BRIS	FBH	10	63	3.30
EDASLOC_deep BRIS	FBH	10	62	3.20
BRIS-BARs				
ASLOC_thick contact	MNC	100	66	3.16
EDASLOC_Baseline BRIS	BFB	100	62	3.96
Target		100	> 60	< 4.00

Tab. 1: Die gemessene Leistung der Laserbarren und das Ziel des Projekts

Wafer	Stripes (µm)	Mounting	Output Power (W)	PCE (%)
BRIS-WAs				
ASLOC_baseline BRIS	1200	FBH	25	53
ASLOC_deep BRIS	1200	FBH	25	54
ASLOC_contact	1200	FBH	25	57
Target			25	> 50

Tab. 2: Die gemessene Leistung der Einzelemitter mit großer Apertur und das Ziel des Projekts.

Arbeitspaket 1: Koordination (“Project Coordination”)

Nach dem ersten Projektstatustreffen (am 15.10.2021 am FBH in Berlin) wurden zwei digitale Projektstatustreffen am 25.02.2022 und 07.04.2022 sowie ein weiteres persönliches Projektstatustreffen mit allen Partnern am 04.11.2022 erfolgreich durchgeführt. Im Jahr 2023 fanden zwei Sitzungen statt, eine persönlich am 03.04.2023 und die andere digital am 16.10.2023. Das letzte Treffen fand am 30.04.2024 persönlich statt.

Arbeitspaket 2: T2.1a – It. 1: FBH Referenzlaser

Im Arbeitspaket 2.1a lieferte das FBH erfolgreich Referenzlaserbarren (Iteration 1) sowohl an MNC (15x) als auch an BFB (10x) und „Große Apertur“-Einzelemitter (WA) an BFB (30x) in der vorgegebenen Zeit. BFB meldete die erfolgreiche Montage beider Typen. MNC verwendet für die Montage der Barren eine Klemmtechnik. Obwohl die vom FBH gelieferten Barren eine Krümmung von $\sim 10 \mu\text{m}$ aufwiesen, was für eine erfolgreiche Klemmung marginal ist, wurden akzeptable Ergebnisse erzielt. Das FBH hat jedoch das Verfahren verbessert, um die Krümmung der Barren zu verringern und die It. 2- Barren wurden mit einer Barrenkrümmung von weniger als $5 \mu\text{m}$ hergestellt. Daher traten keine Probleme bei der Klemmbefestigung auf.

Das Arbeitspaket „T2.1a - It. 1-Referenzlaser“ wurde somit erfolgreich abgeschlossen und alle Lieferungen (O2.1) sind erfolgt.

Arbeitspaket 2: T2.2a – It. 2: FBH BRISCL Laser

In WP 2.2a wurden ein bewährtes EDASLOC- und ein effizienteres ASLOC-Design als vertikale Epitaxieschichten (beide emittieren um 915 nm) für die Herstellung von BRISCL-Lasern ausgewählt. Eine weitere Variante des ASLOC-Designs mit einer dicken Kontaktschicht wurde als zusätzlicher Schutz gegen Montagestress verwendet. Sowohl beim EDASLOC- als auch beim ASLOC-Design wurden zwei verschiedene Varianten der Basisimplantation und der tieferen Implantation für eine höhere Leistung verwendet. Das Wachstum und die Qualitätskontrolle dieser Strukturen wurden erfolgreich durchgeführt. Nach bestandener Qualitätskontrolle wurde das vollständige epitaktische Wachstum abgeschlossen, was zu 8x EDAS-Wafern und 18x ASLOC-Wafern führte. Für die ASLOC-Struktur wurden aufgrund der verschiedenen Varianten mehr Wafer benötigt.

Es wurden Implantationsversuche durchgeführt, um die Qualität der für das Projekt geplanten vergrabenen implantierten Stromblenden zu testen. Weder das FBH noch seine externen Lieferanten konnten mit der geplanten Siliziumimplantation fortfahren, da hochreine Siliziumquellen nicht mehr verfügbar waren (der Hersteller hat weitere Lieferungen gestrichen). Stattdessen musste ein Implantationsversuch mit Sauerstoff durchgeführt werden. Ein Risikoelement bei der Herstellung von BRISCL-Diodenlasern war deswegen die Verwendung von implantiertem Sauerstoff als Strombarriere. Der Brechungsindex und das erwartete Sauerstoffprofil entlang der vertikalen Schicht sind in Abb. 1 für das ASLOC-Design bei der verwendeten (niedrigen) Implantationsenergie dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die erwartete Sauerstoffkonzentration in der aktiven Zone etwa $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ beträgt. Bei diesem niedrigen Wert wurden keine Auswirkungen auf die Lebensdauer oder die maximale Leistung erwartet. Wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, wurden BRISCL-Einzelemitter mit $100\text{-}\mu\text{m}$ -Streifen bei 10 W Ausgangsleistung bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ und im CW-Betrieb 5000 Stunden lang ohne Ausfall betrieben. Allerdings fielen 3 von 5 Diodenlaser mit tieferem Implantat früher als 5000 Stunden aus. Die Ausfallanalyse auf der Grundlage der Kathodolumineszenztechnik zeigt keine Korrelation zwischen der Implantation und dem Ausfall. Weitere Tests und Analysen sind erforderlich, um dies zu bestätigen.

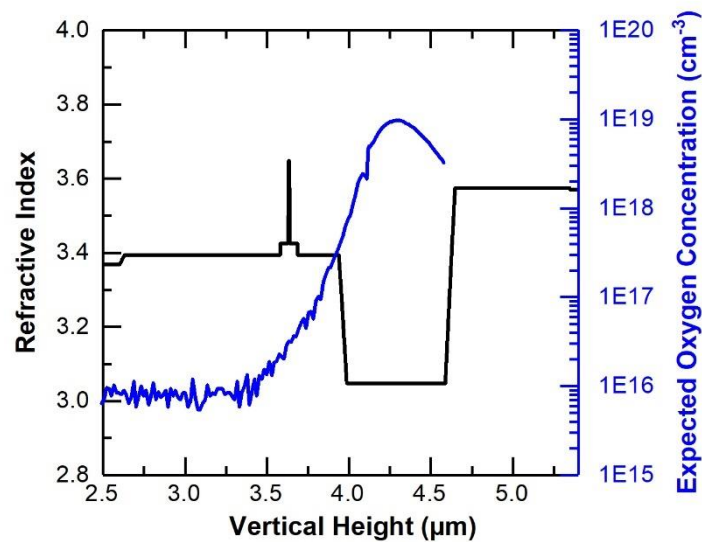


Abb. 1: Der Brechungsindex und das erwartete Sauerstoffprofil entlang der vertikalen Schicht für das ASLOC-Design bei niedriger Implantationsenergie

Trotz erheblicher Verzögerungen im Jahr 2021 aufgrund des Ausfalls des FBH-Implantationssystems und COVID-bedingter Abwesenheit von Schlüsselpersonen in der Halbleitertechnologie wurde der Waferprozess im Mai 2022 mit guter Qualität abgeschlossen.

Nach dem Prozess wurden die erforderlichen Facettenpassivierungen und -beschichtungen durchgeführt, mit anschließender Qualitätskontrolle der Laser. Einzelemitter mit 100-µm-Streifen wurden auf CuW-Submounts montiert, und Einzelemitter mit großer Apertur (1000-1500 µm) wurden mit einer Sandwich-Montagetechnik montiert. Die Vorderseiten der Einzelemitter mit großer Apertur wurden mit einem Reflexionsgrad von 1,8 % beschichtet, um die Tests am FBH durchführen zu können. Die an das BFB gelieferten Laser wurden für die Tests am FBH mit nom. 0 % Frontfacettenreflexion zur externen optischen Stabilisierung beschichtet.

Ein Ziel des Projekts war es, 1-cm-Laserbarren mit einer Leistungskonversionseffizienz $PCE > 60\%$ und einem Strahlparameterprodukt $BPP < 4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ bei 100 W Ausgangsleistung (10 W pro 100 µm Emitter) im CW-Betrieb zu erreichen. Ein zweites Ziel war es, einen $PCE > 50\%$ bei 25 W Ausgangsleistung im CW-Betrieb mit Einzelemittern großer Apertur zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden geeignete Diodenlaser bei 25 °C im CW getestet.

Abb. 2 zeigt die elektro-optischen Eigenschaften von BRIS-Diodenlasern mit 100 µm Streifenbreite von 4 verschiedenen Epitaxiedesigns: „ASLOC Baseline“ mit Basisimplantation, „ASLOC Thick Contact“ mit 2 µm dickerem Kontakt für geringere Montagebelastung, „EDAS Baseline“ mit Basisimplantation und „EDAS Deep“ mit tieferer Implantation. Alle gemessenen Diodenlaser erfüllen die Projektziele. Die „ASLOC Baseline“ und die „ASLOC Thick Contact“ Ausführung zeigen ähnliche Leistungen. Wie erwartet ist die neue ASLOC-Struktur bei 10 W mit $PCE = 67\%$ wesentlich effizienter als das etablierte EDAS-Design mit $PCE = 63\%$.

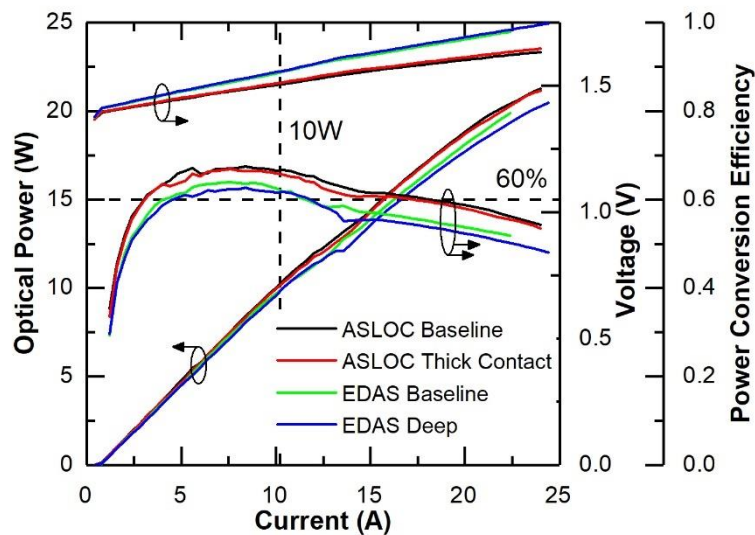


Abb. 2: Elektro-optische Eigenschaften der Einzelemitter mit 100 μm Streifen bei 25°C CW Betrieb

Abb. 3 zeigt die laterale Divergenz und den lateralen BPP als Funktion der Ausgangsleistung für alle Diodenlaser mit 100 μm Streifenbreite. Der BPP bei 10 W liegt für alle Diodenlaser unter 4 mm·mrad, wobei das ASLOC-Design den niedrigsten BPP von $\approx 2,8$ mm·mrad bei dieser Leistung aufweist.

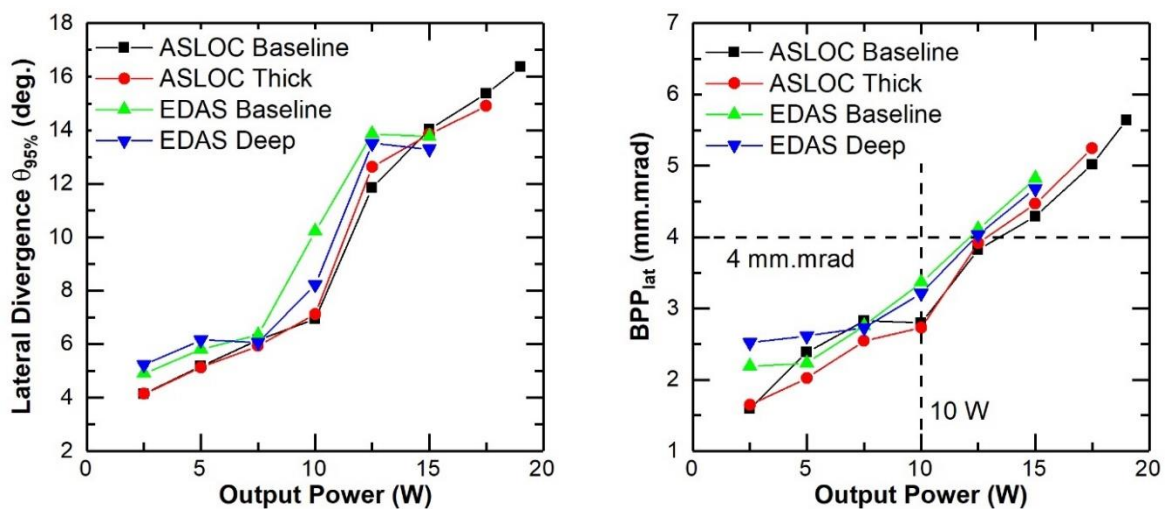


Abb. 3: (links) Laterale Divergenz mit 95 % Leistungseinschluss und (rechts) Strahlparameterprodukt BPP als Funktion der Ausgangsleistung der Einzelemitter mit 100 μm Streifen bei 25°C CW Betrieb

Abb. 4 zeigt die elektro-optischen Eigenschaften der BRIS-Einzelemitter mit großer Apertur und 1200 μm (20p29) Streifenbreite bei 25°C im CW-Betrieb für „ASLOC Baseline“ und „ASLOC Deep“. Beide Laser übertrafen das Projektziel von PCE = 50 % bei 25 W und haben einen PCE > 54 % bei 40 W. Das FBH hat auch das laterales Fernfeld oder Divergenzprofil dieser Diodenlaser bei verschiedenen CW-Ausgangsleistungen von 10, 20, 30 und 40 W gemessen

(siehe Abb. 5). Bei beiden Designs besteht das Fernfeld bei niedriger Leistung aus scharfen Doppelspitzen, die auf das Vorhandensein von periodischen Supermoden zurückzuführen sind. Durch die vergrabene Implantation ist es möglich, diese Supermoden bis zu einer hohen Ausgangsleistung von 40 W aufrechtzuerhalten.

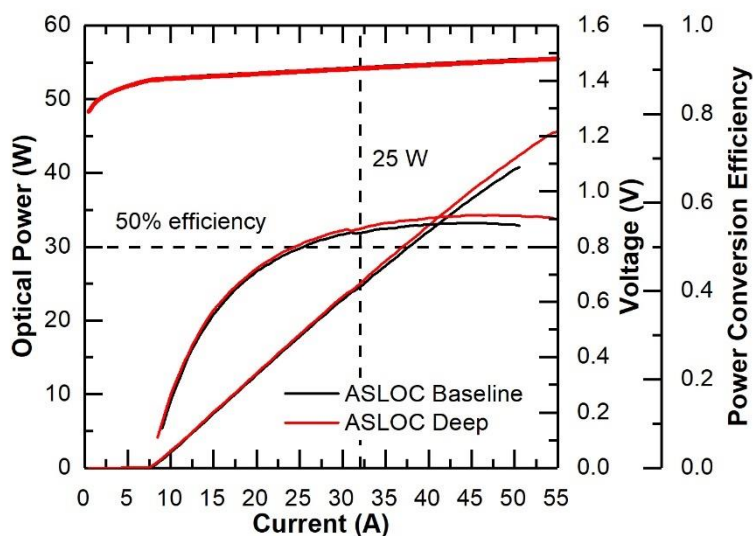


Abb. 4: Elektro-optische Eigenschaften von Einzelemittlern mit großer Apertur und 1200 μm breiten Streifen bei 25°C CW Betrieb

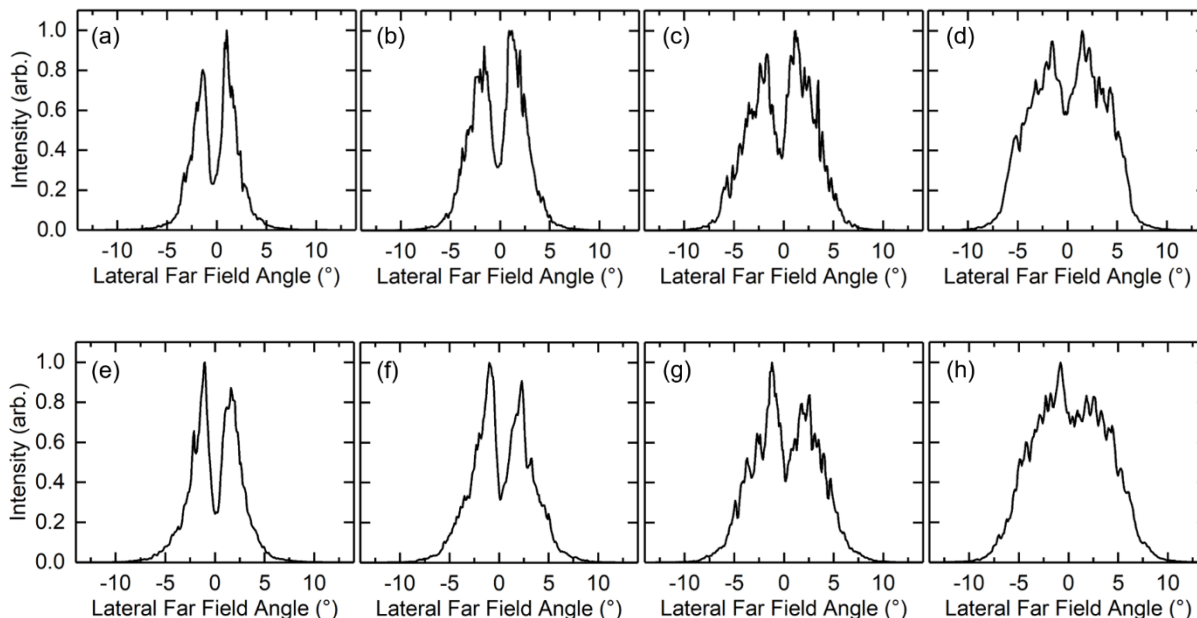


Abb.5 : Laterales Fernfeldprofil der Einzelemitter mit großer Apertur und einer Streifenbreite von 1200 μm (20p29) bei verschiedenen 25°C CW-Ausgangsleistungen von 10, 20, 30 bzw. 40 W für (a-d) "ASLOC Baseline" und (e-h) "ASLOC Deep" Design.

Nach der Qualitätskontrolle der Diodenlaser wurden die BRIS-Barren und BRIS-Einzelemitter mit großer Apertur an die Projektpartner geliefert. Der Meilenstein O2.2 lt. 2 wurde teilweise

in M15 (Juni 2022) und vollständig in M19 (Oktober 2022) mit einer dreimonatigen Verzögerung abgeschlossen.

Die Einzelheiten der lt. 2-Lieferungen sind unten aufgeführt:

- lt. 2 BRIS Barren mit $L = 4 \text{ mm}$, $10 \times 100 \text{ }\mu\text{m}$ Streifen und $\lambda = 915 \text{ nm}$:
 - Erste Lieferung an MNC in Juni 2022 mit der Liefernummer 07/5198/22a
 - 3x Barren mit "EDASLOC Baseline" Design
 - 5x Barren mit "EDAS Deep" Design
 - Zweite Lieferung an MNC im Juli 2022 mit der Liefernummer 07/5198/22b
 - 13x Barren mit "ASLOC Baseline" Design
 - 9x Barren mit "ASLOC Thick Contact" Design
 - Lieferung an BFB im Oktober 2022 mit der Liefernummer 07/5316/22
 - 4x Barren mit "EDASLOC Baseline" Design
 - 4x Barren mit "EDASLOC Deep" Design
 - 2x Barren mit EDASLOC Design ohne vergrabene Implantation (Referenz)
 - 5x Dummy Barren für Lötversuche
- lt. 2 Einzelemitter mit großer Apertur, $L = 4 \text{ mm}$ und strukturierte p-Seite (20p29), AR-Beschichtung (nom. 0 % Reflexionsgrad der Vorderseite) und $\lambda = 915 \text{ nm}$:
 - Lieferung an BFB im Oktober 2022 mit der Liefernummer 07/5311/22
 - 21x BRIS Diodenlaser mit ASLOC-Basislinien-Design und verschiedenen Streifenbreiten
 - 7x Lasern mit $1000 \text{ }\mu\text{m}$, 8x Lasern mit $1200 \text{ }\mu\text{m}$ und 6x Lasern mit $1500 \text{ }\mu\text{m}$
 - 19x Referenzlaser mit ASLOC-Design ohne vergrabene Implantation
 - 7x Lasern mit $1000 \text{ }\mu\text{m}$, 7x Lasern mit $1200 \text{ }\mu\text{m}$ and 5x Lasern mit $1500 \text{ }\mu\text{m}$
 - 5x Dummy Laser für Lötversuche

Arbeitspaket 2: T2.3 – Detaillierte Messung und Analyse

Das Arbeitspaket „T2.3 - Detaillierte Messung und Analyse (FBH)“ wurde mit einer Verzögerung abgeschlossen. Die am FBH hergestellten lt. 2-Diodenlaserbarren (BRIS-BARS), die am FBH hergestellt wurden, wurden am FBH und BFB in Löttechnik und bei MNC in Klemmtechnik montiert. Das FBH montierte Diodenlaser mit „ASLOC Baseline“- und „ASLOC Thick Contact“-Design, während MNC nur Diodenlaser mit „ASLOC Thick Contact“-Design montierte, um die Vorteile eines dickeren Kontakts zur Reduzierung der Montagebelastung zu analysieren. BFB montierte Laser mit „EDAS Baseline“, um ASLOC und das EDAS-Design zu vergleichen. Das FBH untersuchte die elektro-optische Leistung und die laterale Strahlqualität aller montierten Diodenlaser bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ im QCW-Betrieb (2 ms Pulsbreite und 10 Hz Wiederholrate wurden für die elektro-optische Charakterisierung und $200 \text{ }\mu\text{s}$ Pulsbreite und 10 Hz Wiederholrate für die laterale Strahlcharakterisierung verwendet). Die Strahlqualitätsanalyse für die am FBH montierten Laserbarren wurde ohne Temperaturkontrolle durchgeführt, da der Kühler ersetzt werden musste. Alle Laser erfüllen das Projektziel von $\text{PCE} > 60 \%$ und $\text{BPP} < 4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ bei 100 W.

Abb. 6 zeigt die elektro-optischen Eigenschaften der an FBH, BFB und MNC montierten Laserbarren. Derzeit ist eine Spannungsmessung mit vier Sonden für die an MNC und BFB montierten Barren nicht möglich, so dass die gemessenen Spannungen etwas über dem tatsächlichen Wert liegen. Die Leistung des ASLOC-Designs ist aufgrund der höheren Steigung und des niedrigeren Schwellenstroms besser als die des EDAS-Designs. Die Laser mit „ASLOC Baseline“ und „ASLOC Thick Contact“, die auf dem FBH montiert sind, zeigen eine ähnliche Leistung, wobei die Leistung des Thick Contact etwas früher in die Sättigung geht als die des Baseline-Designs. Die auf dem MNC montierten ASLOC-Dickschichtlaser weisen eine höhere Steilheit und einen höheren Schwellenstrom auf als die auf dem FBH montierten ASLOC-Laser.

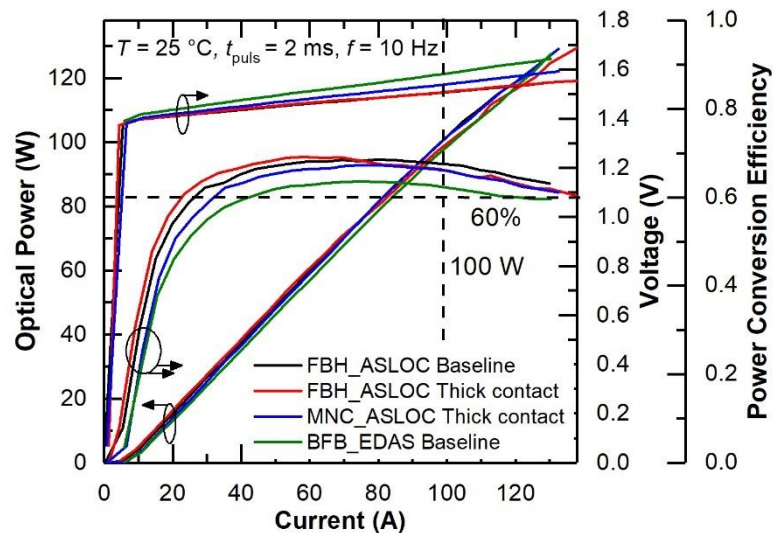


Abb.6: Elektro-optische Eigenschaften der vom FBH hergestellten BRIS-Barren mit $10 \times 100\text{ }\mu\text{m}$ Streifen, gemessen bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ im QCW-Betrieb (2 ms Pulsbreite und 10 Hz Wiederholrate)

Abb. 7 vergleicht die laterale Divergenz (links), BPP (Mitte) und DOP (rechts) für alle Laser. Die an FBH und MNC montierten Laser haben ähnliche Divergenzwinkel im Bereich von $7,3^{\circ}$ - $7,6^{\circ}$. Die am BFB montierten EDAS-Basislinienlaser weisen den höchsten Divergenzwinkel von $10,0^{\circ}$ auf. Trotz des hohen Divergenzwinkels erreichten die von BFB montierten Laser das Projektziel eines durchschnittlichen BPP $< 4,0\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ bei 100 W. Alle anderen Laser übertrafen dieses Ziel mit einem BPP $\approx 3,2\text{ mm}\cdot\text{mrad}$. Darüber hinaus weist das MNC-Design mit dickem Kontakt den höchsten Polarisationsgrad von DOP = 98 % auf, der den der Laser mit „ASLOC baseline“-Design auf dem FBH übertrifft, was den Vorteil des dicken Kontakts mit Klemmtechnik bestätigt. Insgesamt zeigen alle Laser Ergebnisse, die deutlich über dem Projektziel liegen.

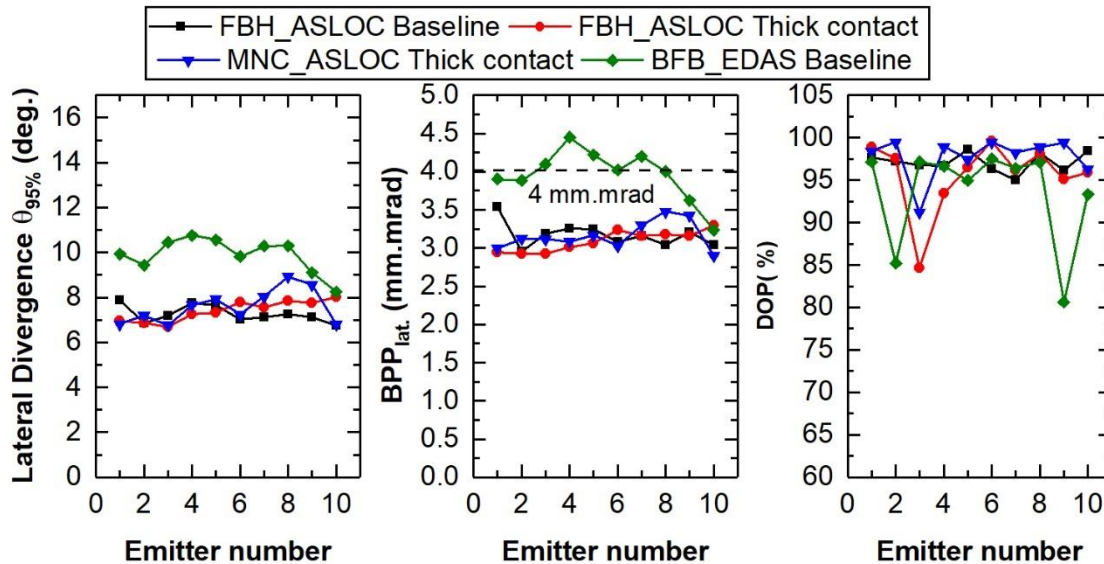


Abb.7: (links) laterale Divergenz, (Mitte) BPP und (rechts) DOP als Funktion der Emittanzahl am FBH hergestellter BRIS-Barren mit $10 \times 100 \mu\text{m}$ Streifen, gemessen im QCW-Betrieb ($200 \mu\text{s}$ Pulsbreite und 10 Hz Wiederholrate)

It. 2 Einzelemittler mit großer Apertur ($1000\text{-}1500 \mu\text{m}$ Streifenbreite mit 20p29-Unterstruktur, mit 1,8 % Frontfacettenreflexion) für die Designs „ASLOC Contact“, „ASLOC Baseline“ und „ASLOC Deep“ wurden in Sandwich-Montagetechnik aufgebaut und am FBH getestet. Diese Diodenlaser erreichten das Projektziel mit $\text{PCE} > 54 \%$ bei bis zu 40 W unter CW-Bedingungen bei 25°C .

Abb. 8 zeigt die Leistungs-Strom-Spannungs-Kennlinien (LIV) und die Effizienz der Laser mit unterschiedlichen Streifenbreiten für das „ASLOC Baseline“ und „ASLOC Deep“ Design. Die maximale Ausgangsleistung ist bei allen Lasern durch die Kühlkapazität der Teststation begrenzt (mit Ausnahme der $1200\text{-}\mu\text{m}$ -Laser für das „ASLOC Deep“-Design, die bis zu 55 A gemessen wurden). Der Leistungsabfall bei hohem Strom ist auf die Temperaturinstabilität in diesem Strombereich zurückzuführen. Für beide Designs gilt, dass die maximal erreichbare Ausgangsleistung mit zunehmender Streifenbreite steigt. Die Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad des „ASLOC Deep“-Designs sind jedoch besser als die des „ASLOC Baseline“-Designs. Die höchste Leistung von $\sim 60 \text{ W}$ bei 52 % Konversionseffizienz wird mit den Diodenlasern mit dem „ASLOC Deep“-Design für $1500 \mu\text{m}$ Streifenbreite erreicht. In spätere Tests kurz vor Projektende, Geschwisterdiodenlaser ohne BRIS wurde mit einer verbesserten Messmethode erreicht eine dauerstrich Leistung um 71 W von $1000 \mu\text{m}$ Apertur, die zu einer Weltbestwert korreliert (Siehe. S. Arslan et al, 2024, Zitat unten).

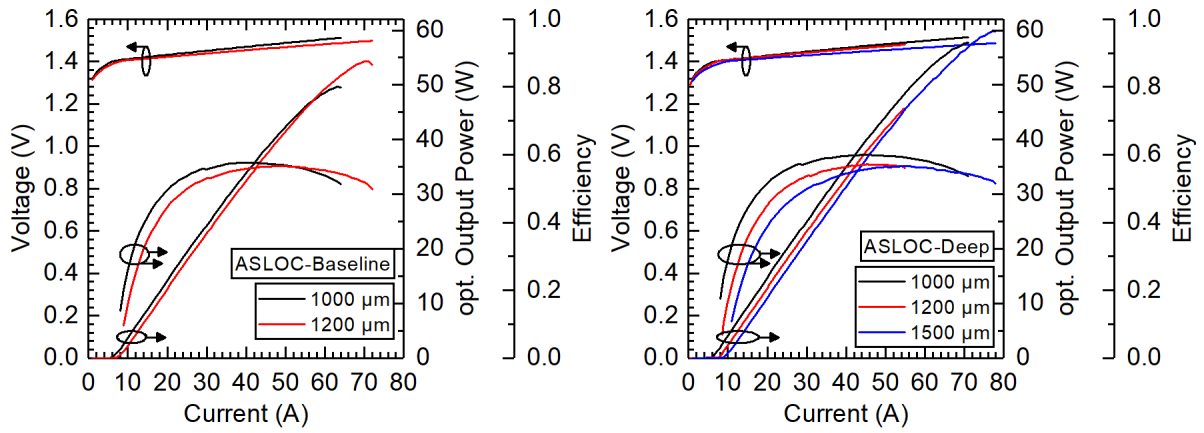


Abb. 8: Die Leistungs-Strom-Spannungs-Kennlinien und der Wirkungsgrad der einzelnen Emitter mit einer Streifenbreite zwischen 1000 μm und 1500 μm für die Designs "ASLOC Baseline" (links) und "ASLOC Deep" (rechts) für CW-Betrieb bei 25 $^{\circ}\text{C}$.

Obwohl die elektrooptische Leistung der BRIS-WA-Einzelemitter mit „ASLOC Baseline“- und „ASLOC Deep“-Design geringer ist als die der WA-Einzelemitter mit „ASLOC Contact“-Design, wird die laterale Strahlqualität der Diodenlaser verbessert, wenn entweder „ASLOC Baseline“ oder „ASLOC Deep“ anstelle des „ASLOC Contact“-Designs im QCW-Betriebsmodus verwendet wird. Allerdings ist der Vorteil von „ASLOC Baseline“ oder „ASLOC Deep“ im CW-Betrieb geringer. In Abb. 9 werden der laterale Fernfeld (Divergenzwinkel bei 95% Leistungsanteil) und das laterale Strahlparameterprodukt (BPP) als Funktion der Ausgangsleistung für die Diodenlaser mit verschiedenen Streifen und mit den Designs „ASLOC Contact“, „ASLOC Baseline“ und „ASLOC Deep“ für den CW-Betrieb verglichen. Die BPP wurde unter der Annahme berechnet, dass die laterale Nahfeldbreite gleich der Streifenbreite ist. Beide Diodenlaser mit dem „ASLOC Baseline“- und „ASLOC Deep“-Design haben weitgehend ähnliche laterale Divergenzwinkeln und BPP, die im Vergleich zu den Divergenzen und BPP der Diodenlaser mit dem „ASLOC Contact“-Design reduziert sind.

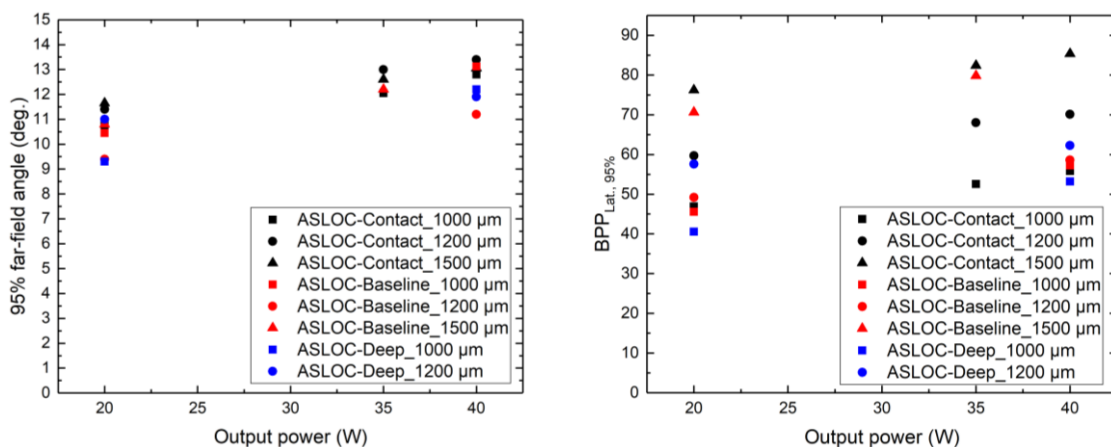


Abb. 9: Vergleich des lateralen Divergenzwinkels (links) und des BPP (rechts) der einzelnen Emitter mit einer Streifenbreite zwischen 1000 μm und 1500 μm und den Designs "ASLOC Baseline", "ASLOC Deep" und "ASLOC Contact" in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung für CW-Betrieb bei 25 $^{\circ}\text{C}$.

Arbeitspaket 2: T2.4 - Robustheit

Das Arbeitspaket T2.4 - „Robustheit (FBH)“ begann im Januar 2023, mit einer Verspätung von einem Jahr. Leider konnten die lt. 1 Prototyp-Laser aufgrund ihrer schlechten Leistung nicht getestet werden. Der Robustheitstest der lt. 2-Laser wurde mit Einzelemitter-Diodenlasern mit 100- μ m-Streifen durchgeführt, die auf einem freistehenden Submount (SSM) montiert waren. Die Montage und Qualitätsprüfung der einzelnen Emitter für den Robustheitstest führten jedoch zu einer Verzögerung der Tests. 5x „ASLOC-Baseline“ und „ASLOC Deep“ Einzelemitter wurden mit einem konstanten Strom von 10,5 A bei 25°C im CW-Modus (\approx 10 W Ausgangsleistung) getestet. Abb. 10 zeigt die optische Leistung als Funktion der Betriebszeit für beide Diodenlaser. Alle „ASLOC Baseline“-Diodenlaser und zwei „ASLOC Deep“-Diodenlaser arbeiteten 5000 Stunden lang ohne Ausfall, aber zwei der „ASLOC Deep“-Diodenlaser fielen nach 3000 Stunden und einer nach 4000 Stunden aus. Die Ursache für den Ausfall der „ASLOC Deep“-Diodenlaser wurde mit Hilfe einer Kathodolumineszenztechnik analysiert, bei der die Rückseite des Diodenlasers weggeätzt und die Lumineszenz des aktiven Bereichs untersucht wird, um die Lage der Materialfehler zu ermitteln. Die Kathodolumineszenzbilder der beiden ausgefallenen Diodenlaser sind in Abb.11 dargestellt. Bei beiden Diodenlaser wird die Ausfallstelle entweder an der vorderen Facette oder innerhalb des nicht implantierten Streifenbereichs der Diodenlaser ausgelöst. Es wurde also kein Zusammenhang zwischen der tiefen Sauerstoffimplantation und dem Laserausfall festgestellt. Für eine vollständige Bestätigung sind weitere Tests erforderlich.

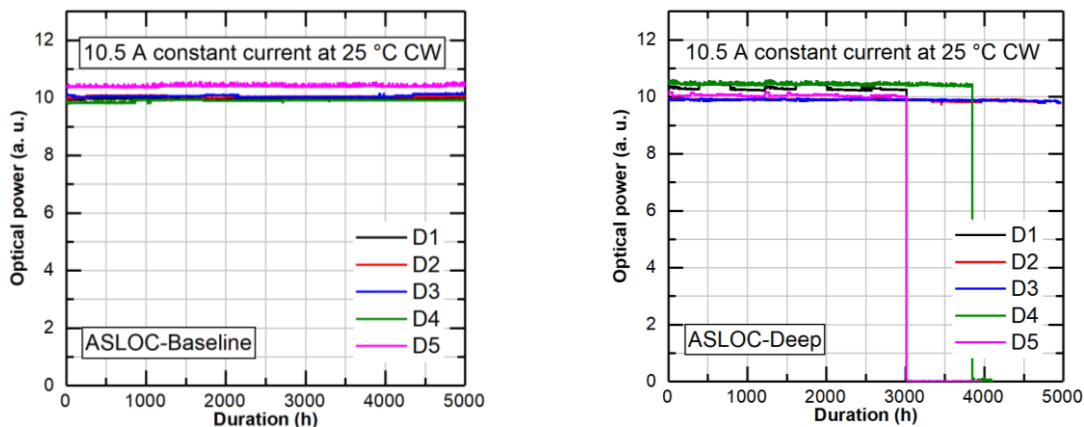


Abb. 10: Alterungstest der "ASLOC-Baseline" (links) und "ASLOC-Deep" (rechts) Einzelemitter mit 100 μ m Streifenbreite im CW-Betrieb bei 10,5 A konstantem Strom.

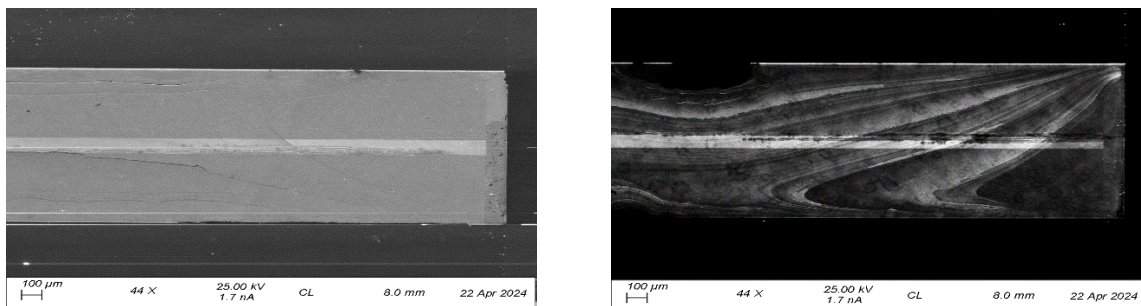


Abb. 11: Kathodolumineszenzabbildung von zwei ASLOC_Deep Einzelemittern als Beispiel. Links: Beispiel für ein Ausfall an einer Defektstelle innerhalb des Laserstreifens. Rechts: Beispiel für einen Defekt an der vorderen Facette

Arbeitspaket 2: T2.5 – Vorbereitung für Serienfertigung

Das Arbeitspaket T2.5 - „Vorbereitung der Serienproduktion (FBH / Jenoptik)“ wurde vor Ende des Projekts erfolgreich abgeschlossen. Der zugehörige Bericht „O2.3 - Erster Bericht Serienfertigung / Robustheit“ wurde im Mai 2023 geliefert (Bericht liegt bei). Der Abschlussbericht „O2.4 - Abschlussbericht Serienfertigung / Robustheit“ wurde vor Projektende fertiggestellt (Bericht liegt bei).

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Wird in einem separaten Bericht behandelt.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden in Übereinstimmung mit den Arbeitspaketen und der Finanzplanung der Projektbeschreibung durchgeführt.

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

Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern steigerte sowohl das Interesse an neuen Kooperationen als auch die Entwicklung der individuellen Fähigkeiten der Projektpartner. Neue Förderanträge sind mit MNC und Raab Photonics für direkte Diodenlaser Anwendungen geplant.

Die in diesem Projekt demonstrierte Effizienzverbesserung mit dem ASLOC-Epitaxiedesign im Vergleich zum EDASLOC-Design soll in einem neuen Projekt HOTSTACK (EuPRAXIA) genutzt werden. In diesem Projekt konnten die Leistung und der Wirkungsgrad der Diodenlaser höher als bisher angegeben gesteigert werden. Die nachgewiesenen Leistungs- und Effizienzvorteile könnten den Einsatz von Diodenlasern als Pumpen in Fusionskraftwerken ermöglichen, was eine Motivation für das neue Projekt DIOHELIOS ist.

Das laufende SAMBA-Projekt verwendet Diodenlaser, die bei 780 nm emittieren, für eine effiziente additive Fertigung (AM) des Aluminiums. Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 915 nm sind ebenfalls von großem Interesse für andere AM-Anwendungen, da sie im Vergleich zu Lasern mit einer Wellenlänge von 780 nm eine höhere Leistung und Effizienz aufweisen, z.B. für die AM von Stahl, wo die Wellenlänge weniger kritisch ist.

Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Eine maximale Ausgangsleistung von 74 W bei einem Wirkungsgrad von 53 % für den CW-Betrieb wurde im Jahr 2024 unter Verwendung einer Single-Junction-Laserdiode mit einer Streifenbreite von 500 µm und einer Resonatorlänge von 5,5 mm veröffentlicht. Im Vergleich dazu erreichten wir einen sehr hohen Wirkungsgrad von 59 % bei einer vergleichbaren Leistung von 71 W (S. Arslan et al., 2024) mit einer 1000-µm-Streifenbreite und einer Resonatorlänge von 4 mm, was unsere Ergebnisse zu den höchsten gemeldeten kombinierten Leistungen und Wirkungsgraden in einer Single-Junction-Laserdiode macht.

G. Yang, Y. Liu, Y. Zhao, Y. Lan, Y. Zhao, S. Tang, W. Wu, Z. Yao, L. Yi, J. Di, J. Lin, and A. Demir "Efficient power scaling of broad-area laser diodes from 915 to 1064 nm," Proc. SPIE, 12867, 128670W (2024). <https://doi.org/10.1117/12.3002642>

Im Jahr 2024 wurde eine Ausgangsleistung von 132,5 W bei 60 % Effizienz im CW-Betrieb unter Verwendung einer 500 µm breiten Streifenlaserdiode mit doppelter Aktivzone, gemeldet, basiert auf der Nutzung von Tunneljunction-Technologien.

J. Wang, S. Tan, Y. Shao, W. Liu, K. Tian, Y. Xiao, Z. Zhang, Y. Gou, L. Zhu, B. Wang and Z. Zhou. "Double-junction cascaded GaAs-based broad-area diode lasers with 132W continuous wave output power," Photonics, vol. 11, no. 3, pp. 258 (2024). <https://doi.org/10.3390/photonics11030258>

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Rahmen des Projekts wurden 2 wiss. Artikeln und 3 Konferenzbeiträge erstellt.

2023 (2x Konferenzbeiträge)

B. King, S. Arslan, A. Boni, P. Della Casa, D. Martin, A. Thies, A. Knigge, and P. Crump "Buried-regrown-implant-structure diode lasers with ultra-thick epitaxy for resistance to mounting stress without loss in efficiency," Proc. SPIE 12403, 124030J (2023)

<https://doi.org/10.1117/12.2647096>

Ben King, Seval Arslan, Anisuzzaman Boni, Paul Simon Basler, Christof Zink, Pietro Della Casa, Dominik Martin, Andreas Thies, Andrea Knigge, and Paul Crump "GaAs-based wide-aperture single emitters with 68 W output power at 69% efficiency realized using a periodic buried-regrown-implant-structure," Proc. CLEO-EU, (2023)

<https://doi.org/10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10232435>

2024 (2x wiss. Artikel and 1x Konferenzbeitrag)

S. Arslan, B. King, P. Della Casa, D. Martin, A. Thies, A. Knigge, and P. Crump "Efficient, High Power, Wide-Aperture Single Emitter Diode Lasers Emitting at 915 nm", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 36, no. 16, pp. 977-980 (2024)

<https://doi.org/10.1109/LPT.2024.3419552>

B. King, S. Arslan, P. Della Casa, D. Martin, A. Boni, A. Thies, A. Knigge, and P. Crump "High-efficiency and high-brightness broad area laser diodes with buried implantation current blocking", Open Access Phys. Scr., vol. 99, no. 5, pp. 055528, (2024)

<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad368a>

B. King, S. Arslan, P. Della Casa, D. Martin, A. Boni, P. S. Basler, A. Thies, A. Knigge, and P. Crump "Ultra-wide-aperture diode lasers with high brightness through use of buried periodic current structuring", Proc. of SPIE, vol. 12867, 128670S (2024).

<https://doi.org/10.1117/12.3005647>

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekttitle: BriSCL Brillante Halbleiterlasermodule Teilprojekttitle: Brillante Halbleiterlaser mit vergrabenen implantierten Stromblenden	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Institutsleiter: Prof. Dr. P. Scheele Projektleiter: Dr. P. Crump Bearbeiter: Dr. S. Arslan, Dr. B. King, M. Wilkens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik Gustav-Kirchhoff-Str. 4 12489 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01QE2103D
	11. Seitenzahl 14
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 11
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Ziel des BRISCL-Projekts war es, Leistung, Effizienz und Brillanz der Diodenlaser durch die Kombination von Forschungs- und Spitzentechnologien wie vergrabene Regrowth-Implantat-Struktur (BRIS), Klemmtechnik für die Montage und spektrale Kombinationstechniken (RPC) für höhere Brillanz zu steigern.

Im Teilprojekt „Brillante Halbleiterlaser mit vergrabener implantierter Stromblende“ lieferte das FBH in einem ersten Schritt Referenzbarren an MNC (Monocrom) und BFB (Brilliance Fab Berlin) sowie Einzelemitter mit großer Apertur an BFB für Montageversuche. Danach wurden BRIS-Diodenlaserbarren BRIS-Bars (mit 10 x 100 µm Streifen) und BRIS Weite Apertur-Einzelemitter BRIS-WAs (mit 1000-1500 µm Streifen) erfolgreich mit zwei verschiedenen vertikalen Epitaxiedesigns von EDASLOC (patentiert) und ASLOC (mit höherer erwarteter Effizienz) hergestellt. Bei den Diodenlaser für beide Designs wurden verschiedene Varianten der Implantation verwendet (mit Basistiefe und tieferes Implantat). Außerdem wurde bei den ASLOC-Diodenlaser ein dickerer Kontakt verwendet, um die montagebedingte Verspannung zu verringern. Nach der Qualitätskontrolle der Laser wurden die BRIS- Barren an MNC und BFB geliefert und die BRIS-WAs mit 0 % nominaler Frontfacettenreflexion wurden an BFB zur Montage geliefert. Die BRIS-WAs mit 1,8% Frontfacettenreflexion (für eine niedrigere Schwelle) wurden am FBH montiert und getestet. Nach der Montage der Diodenlaser wurden die detaillierten Messungen und Analysen am FBH durchgeführt. Die Projektzielvorgaben von PCE (Konversionswirkungsgrad) von >60% und lateralem BPP (Strahlparameter Produkt) von <4,0 mm.mrad bei CW (Dauerstrichbetrieb) Ausgangsleistung von 100 W für BRIS-Bars und PCE von >50% bei CW Ausgangsleistung von 25W für BRIS-WAs wurden übertroffen. Die BRIS-Bars mit ASLOC_thick-Kontaktdesign erreichten einen PCE von 66% und einen lateralen BPP von 3,16 mm.mrad bei einer Ausgangsleistung von 100 W für QCW (quasi-Dauerstrichbetrieb mit 10 Hz Wiederholrate und 2 ms bzw. 200 µs Pulsbreite für die Leistungs-Strom-Spannungs-Analyse und die Effizienz- und Strahlqualitätsanalyse), während die Einzelemitter (100 µm-Streifen) einen PCE von 66% und einen lateralen BPP von 2. 7 mm.mrad bei einer CW-Ausgangsleistung von 10 W. Darüber hinaus erreichten BRIS-WAs mit ASLOC-Design eine PCE von 54 % bei einer CW-Ausgangsleistung von 25 W, und die PCE änderte sich bis zu 40 W nicht.

Das FBH und Jenoptik erstellten Vorberichte und Abschlussberichte für die Serienfertigung. In diesen Berichten wird festgestellt, dass die BRIS-Technologie für die Serienfertigung in Bezug auf Leistung und Ausbeute nützlich sein wird, dass aber das Überwachstum zusätzliche Kosten und Komplexität verursacht.

19. Schlagwörter

Brillante diodenlaser, vergrabene Implantation, lasermodule

20. Verlag

21. Preis