

Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik  
im Forschungsverbund Berlin e.V.

Forschungsbericht  
für das  
Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

## **Förderschwerpunkt NOVALAS**

### **Grundlegende Untersuchungen zur Technologie von Hochleistungsdiodenlasern**

#### **Teilvorhaben:**

### **Hochleistungsdiodenlaser auf der Basis von Al - freien Quantengraben und Wellenleitern im Wellenlängenbereich 800 – 1000 nm**

Förderkennzeichen: 13N7232/8

Laufzeit: 01.03.1998 - 28.02.2001

### **Schlussbericht (August/September 2001)**

Institutsleiter: G. Tränkle

Projektleiter: G. Erbert

Bearbeiter:	G. Beister	A. Krause	H. Schulze
	P. Brade	A. Knauer	B. Sumpf
	F. Bugge	J. Maege	T. Tessaro
	G. Erbert	W. Pittroff	K. Vogel
	I. Fechner	R. Olschewsky	H. Wenzel
	D. Fredrich	I. Rechenberg	S. Wiechmann
	J. Fricke	P. Ressel	M. Weyers
	M. Gielow	J. Sebastian	J. Würfel
	R. Hülsewede	R. Selent	P. Wochatz
	A. Klein	R. Staske	

---

**FBH**

Ferdinand-Braun-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen	4
3. Planung und Ablauf der Arbeiten	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
6. Darstellung der Ergebnisse	8
6.1 Schichtstrukturen für Hochleistungsdiodenlaser: Design und MOVPE	8
6.1.1 AlGaAs – LOC - Diodenlaser mit Al - freien Quantengraben für 808nm	10
6.1.2 808nm Diodenlaser mit InGaP - Wellenleiterschichten und AlGaAs -Mantelschichten	15
6.1.3 Al - freie 940nm Diodenlaser	16
6.2 Prozessierung und Montage	19
6.3 Charakteristik von 808nm-Diodenlasern	23
6.4 Charakteristik von 940nm-Diodenlasern	27
6.5 Charakteristik von 808nm- und 940nm-Diodenlaserbarren	29
6.6 Zuverlässigkeitsuntersuchungen	31
6.6.1 808nm-Diodenlaser	31
6.6.2 940nm-Diodenlaser	33
6.6.3 808nm- und 940nm Barren	35
6.6.4 Zerstörungsfreie Untersuchungen für die Selektion defektfreier Diodenlaser	36
6.7 Ergebnisse eines ersten Vergleichs von Laserbarren für 808nm und 940nm mit AlGaAs – und Al – freien - Epitaxieschichten bei identischer Prozessierung	38
6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse	39
7. Voraussichtlicher Nutzen	41
8. Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	42
9. Literatur	42
10. Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse	44

## 1. Aufgabenstellung

Hochleistungsdiodenlaser sind Schlüsselbauelemente der modernen Lasertechnologie. Besteht momentan das Hauptanwendungsgebiet noch im Pumpen von Festkörperlasern, so lassen die raschen Fortschritte bald auch den direkten Einsatz für viele Applikationen in der Materialbearbeitung, Displaytechnologie, Medizin und Messtechnik erwarten. Das Forschungsprojekt hatte die Erarbeitung von grundlegenden Erkenntnissen für die Realisierung von Diodenlasern hoher Leistung, hoher Brillanz und Zuverlässigkeit zum Ziel. Beispielhaft wurden die Untersuchungen bei den Wellenlängen 808nm und 940nm, die momentan für das Pumpen von Festkörperlasern die größte Bedeutung haben, durchgeführt, wobei das Potenzial von Schichtstrukturen für Hochleistungsdiodenlaser untersucht werden sollte, in denen das auf GaAs Substraten etablierte AlGaAs - Material bei 808nm partiell und bei 940nm ganz durch gitterangepasste Materialkombinationen aus InGaAsP ersetzt wird. Dieses Al - freie Material hat Vorteile wie geringe Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit, geringe Sauerstoffaffinität in der Züchtung und relativ große Stabilität gegenüber Defektwanderung, die sich insbesondere bezüglich der Zuverlässigkeit bemerkbar machen sollten. Andererseits ist die Züchtung Al - freien Materials auf GaAs schwierig und es gab und gibt wenig Erfahrungen über optimale Schichtstrukturen und Technologien für Hochleistungsdiodenlaser, die auf diesem Material basieren. Die Aufgabe des Forschungsvorhabens war es daher, das Schichtwachstum mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) zu untersuchen, Schichtstrukturen für Hochleistungsdiodenlaser zu realisieren, eine angepasste Technologie zur Realisierung von Breitstreifenlasern und Laserbarren für diese neuartigen Schichtstrukturen zu entwickeln und schließlich deren Kenndaten und Ausfallursachen in Lebensdauertests zu untersuchen. Die Leistungen, für die die Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchzuführen waren, lagen mit einer Facettenbelastung von 30mW/ $\mu\text{m}$  Streifenbreite für Breitstreifenlaser und 50W für Barren hoher Belegungsichte über dem damaligen Stand der Technik (10mW/ $\mu\text{m}$  und 40W), auch über dem etablierter AlGaAs - basierter Diodenlaser. Die angestrebten Werte für die maximale Ausgangsleistung und den Konversionswirkungsgrad eines 100 $\mu\text{m}$  Breitstreifenlasers von 5W bzw.  $\geq 50\%$  entsprach den internationalen Spitzenwerten zu Projektbeginn. Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der Eignung dieser neuartigen Schichtstrukturen für den Betrieb der Diodenlaser bei 50°C.

Die große Herausforderung dieses Forschungsprojektes war damit nicht nur Diodenlaser mit Kenndaten, vergleichbar zu denen auf der Basis des seit 20 Jahren erfolgreich etablierten AlGaAs -Materialsystem hergestellten, zu erreichen, sondern auch eine fundierte Aussage zu möglichen Vorteilen der neuartigen Materialkompositionen für die Umsetzung in die industrielle Produktion zu liefern.

Die wesentlichen Untersuchungsschwerpunkte waren:

- InGaAsP - Quantengraben mit unterschiedlicher Verspannung (nur 808 nm),
- LOC - Strukturen mit hohem Al-Anteil für eine hohe Temperaturstabilität (nur 808 nm),
- Al - freie Wellenleiterstrukturen bzw. mit InGaP - Wellenleiter- und AlGaAs - Mantelschichten,

Folgende Kenndaten wurden angestrebt:

- BA - Laser mit einer Leistungsdichte  $P > 50 \text{ mW}/\mu\text{m}$ ,
- Betrieb dieser Laser bei  $50^\circ\text{C}$  mit  $P > 30 \text{ mW}/\mu\text{m}$ ,
- für Diodenlaser bei 808 nm
  - $j_{\text{th}} < 200 \text{ Acm}^{-2}$ ,
  - Bei  $30 \text{ mW}/\mu\text{m}$  Lebensdauer über  $10^4\text{h}$ ,
  - Barren mit  $50 \text{ W}$ , Lebensdauer von  $10^4\text{h}$  und  $50 \%$  Effizienz,
- für Diodenlaser bei 940 nm
  - $j_{\text{th}} < 150 \text{ Acm}^{-2}$  für Strukturen mit InGaAs - Quantengraben,
  - BA-Laser mit  $30 \text{ mW}/\mu\text{m}$  mit einer Lebensdauer über  $10^4\text{h}$ ,
  - Barren mit  $60 \text{ W}$  und Lebensdauer von  $10^4\text{h}$  und  $55 \%$  Effizienz,
  - Betrieb bei  $50^\circ\text{C}$  mit nur geringer Änderung der Gesamteffizienz und Lebensdauer.

Die Charakterisierung der Breitstreifenlaser, insbesondere auch die Lebensdaueruntersuchungen, wurden im FBH durchgeführt. Untersuchungen an Barren waren zunächst nur bei Kooperationspartnern im Rahmen des Verbundprojekts vorgesehen. Im Projektzeitraum wurden jedoch auch eigene Möglichkeiten für die Montage, Messung und Alterungstests an Barren auf passiven Wärmesenken geschaffen und genutzt.

## 2. Voraussetzungen

Das FBH hatte in den Jahren vor Projektbeginn erfolgreich auf den Gebieten Epitaxie sowie Prozesstechnologie für leistungsstarke Laserdioden im Wellenlängenbereich von 790 nm bis 1060 nm gearbeitet. Im FBH waren Programmpakete zur Simulation der Vertikalstruktur einschließlich der Gewinnberechnungen von Quantengraben vorhanden. Es standen zwei MOVPE Anlagen (Einscheibenreaktoren für 2" Wafer) für die Züchtung der Schichtstrukturen zur Verfügung. Eine Prozesslinie für Breitstreifenlaser auf Kontaktlithographie basierend war im Rahmen eines Vorgängerprojekts aufgebaut worden. Es gab die Ausrüstung und das technologische Know-how, um den back - end - Prozess einschließlich Montage zu untersuchen und durchzuführen. Die Messausstattung zum Alterungsverhalten wurden im Rahmen

des Projektes ergänzt.

Der zu Projektbeginn vorhandene Stand im FBH ist in den entsprechenden Veröffentlichungen unter den Nummern V1-V11 im Punkt 10 dokumentiert und wird tabellarisch im Vergleich zum erreichten Stand in der Zusammenfassung dargestellt.

### 3. Planung und Ablauf der Arbeiten

Der Arbeitsplan umfasste folgende Schwerpunkte:

- Epitaxie für 808 nm (verspannte InGaAsP - Quantengraben als aktive Zone,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  LOC Struktur mit  $x_{\text{WI}} \approx 0.65$  und  $\Delta x \approx 0.05$ , Wellenleiter  $d \geq 1\mu\text{m}$ , InGaP als Wellenleiterschicht)
- Epitaxie für 940 nm (InGaAs-QW mit GaAs- oder InGaAsP- Spacer und Barrieren, LOC Struktur Al-frei, Wellenleiterschicht  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ , InGaP als Mantelschicht)
- Modellierung der aktiven Zonen für 808nm und 940nm
- Chiptechnologie für Breitstreifenlaser und Barren
- Aufbautechnik insbesondere Lötten mit AuSn
- Messtechnik (Impuls- und CW-Charakterisierung P-U-I, Temperaturabhängigkeit, Abstrahlcharakteristik räumlich und spektral)
- Lebensdauertests von BA-Lasern

Das Forschungsprojekt war in folgende Arbeitspakete gegliedert, die fristgemäß bearbeitet wurden:

AP1 „808 nm BA-Laser mit InGaAsP - Quanten-Gräben“ bis 2/2000,

AP2 „808 nm Barren“ bis 2/2001,

AP3 „808 nm BA-Laser mit InGaP - Wellenleiter“ bis 8/2000,

AP4 „808 nm Barren mit InGaP - Wellenleiter“ bis 2/2001,

AP5 „940 nm BA-Laser Al - frei“ bis 2/2000,

AP6 „940 nm Barren Al - frei“ bis 2/2001,

AP7 „940 nm BA-Laser mit InGaP -Wellenleiter“ bis 12/2000,

AP8 „940 nm Barren mit InGaP - Wellenleiter“ bis 2/2001,

AP9 „Lebensdauer - Untersuchungen“ beginnend 2/1999 bis zum Projektende 2/2001.

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Projektbeginn waren international für BA-Laser mit 100  $\mu\text{m}$  Apertur Spitzenleistungen von ca. 10 W vorgestellt worden, sowohl mit Al - haltigem (SDL Inc.) /1/ bei 860nm als auch mit Al - freiem Materialen (Uni Wisconsin USA) /2/ bei 980nm, allerdings bei Betriebstemperaturen von 10°C. Im Bereich um 800 nm gehörten die im FBH /3/ erreichten Leistungen von 3,6 W aus 60  $\mu\text{m}$  Aperturbreite und 4,7 W aus 100  $\mu\text{m}$  zu den internationalen Spitzenwerten. Kommerziell wurden allerdings bei diesen Aperturbreiten nur Diodenlaser mit 1 W Ausgangsleistung angeboten, das ließ auf ungelöste Lebensdauerprobleme schließen.

Für Laserbarren konnten im Al - freiem Materialsystem von der Firma TUTCOR (Finnland, jetzt COHERENT USA) in Zusammenarbeit mit JENOPTIK Laserdiode GmbH /4/ eine maximale Ausgangsleistung von 100W erreicht werden. Für die Züchtung wurde hier die Gas Source MBE eingesetzt.

Die Ausgangsleistungen kommerziell erhältlicher Laserbarren lagen bei 25 W, typische veröffentlichte Werte für die auch Lebensdauertests angegeben waren, im Bereich von 40W.

Im Wellenlängenbereich um 800 nm wurde von der Arbeitsgruppe an der Universität Wisconsin über Laserstrukturen mit InGaP - Wellenleiter- und InGaAlP - Mantelschichten, die mit MOVPE realisiert wurden, berichtet /5/. Bei einer Wellenlänge von 835 nm konnten Diodenlaser mit guten Eigenschaften hergestellt werden. Inwieweit dieses Konzept auch für Wellenlängen um 800 nm tragfähig sein könnte, war aufgrund der geringeren Barrierenhöhe noch offen. Der Konversionswirkungsgrad lag bei diesen Diodenlasern typischerweise zwischen 40% und 50%.

Spitzenwerte bezüglich des Konversionswirkungsgrades von 66 % wurden von Botez (Uni Wisconsin USA) bei Wellenlängen unter Einsatz des Al - freien Materialsystems um 970 nm berichtet /6/.

Bei der Bewertung der oben vorgestellten Lasereigenschaften ist zu berücksichtigen, dass sie an Laserstrukturen mit relativ großer vertikaler Strahldivergenz erzielt wurden ( $\geq 35^\circ$  Halbwertsbreite; typisch  $40^\circ$ ). Diese große Divergenz schränkt die Nutzbarkeit dieser Laserdioden insbesondere für Anwendungen, die Strahlformungen implizieren, ein. Es war eine Teilaufgabe des Projektes Laser mit geringer Divergenz zu realisieren und untersuchen.

Welche Materialkombination langfristig die besten Eigenschaften zeigen wird, war damals noch nicht geklärt. Insbesondere war die Frage offen, ob bei 808 nm aufgrund der geringen Barrierenhöhe eine Al - freie Variante auf MOVPE -Basis noch Vorteile gegenüber möglichen Mischvarianten aufweisen würde. Dieses Problem wurde ein Gegenstand des Forschungsvorhabens.

Für Wellenlängen um 940 nm und darüber spricht die materialspezifisch bessere Facettenstabilität für die Al - freie Variante, da ansonsten die gleichen Lasereigenschaften erreicht worden sind. Alterungsuntersuchungen mit Al – freien Diodenlasern im Leistungsbereich > 1 Watt für 100µm Aperturbreite (spezifische Facettenbelastung; 10mW/µm) waren zum Projektbeginn nicht bekannt.

Das vom FBH in der ersten Projektphase verfolgte Konzept eines dicken Wellenleiters (ca. 1 µm LOC) zur Erzielung einer schwachen vertikalen Wellenführung wurde aufgrund der damit erreichten geringen internen Verluste von der bereits erwähnten Arbeitsgruppe der Uni Wisconsin /2/, der Gruppe von Razhegi (Northwestern Uni Illinois) /7/ und auch der Gruppe von Garbusov (Princeton Uni, David Sarnoff Research Center) /8/ ebenfalls als ein wesentlicher Punkt für die Erzielung hoher Leistungen angesehen. Die daraus resultierenden höheren Schwellenstromdichten für Resonatorlängen unter 1000 µm wurden akzeptiert und beeinträchtigen den Gesamtkonversionswirkungsgrad bei hohen Leistungen nur geringfügig.

Veröffentlichungen über Lichtleistungen im Wattbereich, hohe Konversionswirkungsgrade oder Lebensdauer bei dem Betrieb von Hochleistungslaserdioden bei hoher Umgebungstemperatur von ca. 50°C lagen damals nicht vor. Hier wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens Neuland beschritten und mit den erreichten Ergebnissen auch das internationale Spitzenniveau mitbestimmt.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Verbundprojektes wurden folgende Arbeiten in Kooperation mit Partnern geplant und durchgeführt:

### - Substratcharakterisierung

Es wurden im FBH neu entwickelte Substrate des Projektpartners Freiburger Compound Materials charakterisiert. Die Ergebnisse sind im Arbeitsbericht des Verbundpartners FCM enthalten.

### - Materialvergleich für Laserbarren

Mit der Siemens AG (später OSRAM OS) und Jenoptik Laserdiode GmbH wurde ein Versuch zum Vergleich des bei OSRAM OS genutzten Materials für 808nm und 940nm mit den neuentwickelten partiell Al - freien (808nm) und gänzlich Al - freien (940nm) Schichtstrukturen des FBH durchgeführt. Dazu wurden epitaxiierte 2" Wafer des FBH an OSRAM OS übergeben, die dort den bei OSRAM OS für AlGaAs - Strukturen entwickelten Prozess zur Barrenherstellung zusammen mit InAlGaAs/AlGaAs - Wafern von OSRAM durchliefen. Nach der Montage bei der Jenoptik Laserdiode GmbH wurden im FBH Messungen zur Defektkontrolle an jedem Emitter durchgeführt. Anschließend wurden diese Laserbarren bei Jenoptik in der

Alterungsapparatur auf Lebensdauer getestet. Im Abschnitt 7 sind Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

- Degradation

Dem Max-Born-Institut wurden Diodenlaser zur Facettencharakterisierung übergeben.

- Prozessierung von Quantum - dot Lasern

Für den Projektpartner TU Berlin wurden Waferstücke mit Quantum – dots in der aktiven Zone für 940nm und 1120nm prozessiert und im Chipverband vermessen. Von den 940nm – Quantum - dot Lasern wurden Diodenlaser montiert, vermessen und der TU Berlin übergeben. Da die Kenndaten der Laser wesentlich unter denen der im FBH entwickelten Diodenlasern lag, wurde angesichts der geringen Anzahl verfügbarer Alterungsplätze kein Lebensdauerest mit diesen Bauelementen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Bericht der TU Berlin enthalten.

Mit den übrigen Partnern des Verbundes bestand darüber hinaus eine enge, informelle Zusammenarbeit. Hervorzuheben ist die Hilfe des IAF Freiburg als im FBH die Anlage zur Facettenbeschichtung längere Zeit defekt war.

Laserbarren und montierte Breitstreifenlaser konnten über die oben aufgezählte festvereinbarte Zusammenarbeit hinaus weiteren Partnern in anderen Verbänden des Leitprojekts Laser 2000 / NOVALAS zur Verfügung gestellt werden.

## 6. Darstellung der Ergebnisse

### 6. 1 Schichtstrukturen für Hochleistungslaserdioden: Design und MOVPE

Die Leistung von Hochleistungslaserdioden wird wesentlich von der Belastbarkeit des Ausgangsspiegels begrenzt. Die optische Leistungsdichte  $S_{\text{COMD}}$  (Einheit: MW/cm<sup>2</sup>), bei der die katastrophische optische Spiegel- bzw. Facettenzerstörung (COMD) einsetzt, ist eine wichtige Kenngröße von Hochleistungslaserdioden, da diese nur von den verwendeten Halbleitermaterialien, der Emissionwellenlänge und einer eventuell vorgenommenen Facettenbeschichtung abhängen sollte, jedoch z.B. nicht von der Dicke der aktiven Schicht oder des Wellenleiters. Dabei gilt

$$S_{\text{comd}} = \frac{P_{\text{comd}}}{W \cdot \frac{d}{\Gamma}} \quad /9/$$

wobei  $P_{\text{COMD}}$  die interne Leistung an der Facette bei der COMD ist, welche man aus der ausgekoppelten Leistung durch Multiplikation mit dem Faktor  $(1+R)/(1-R)$  erhält ( $R$  - Reflexionskoeffizient der betrachteten Laserfacette,  $W$  – Apertur,  $d$  - Dicke des Quantengrabens,  $\Gamma$  - Füllfaktor). Für eine gegebene Zerstörungsschwelle  $S_{\text{COMD}}$  muss also das Verhältnis zwi-



schen Dicke der aktiven Zone und optischem Füllfaktor ( $d/\Gamma$ ) möglichst groß sein, um eine hohe Ausgangsleistung zu erzielen. Bei einem Breitstreifenlaser hängt  $\Gamma$  nur von der vertikalen Feldverteilung ab. Die maximale Ausgangsleistung vor dem Einsetzen der katastrophischen Spiegelzerstörung berechnet sich danach aus

$$P_{\max} = \frac{1-R}{1+R} \cdot \frac{W \cdot d}{\Gamma} \cdot S_{\text{comd}}$$

Einschränkend ist zu sagen, dass diese relativ einfache Beschreibung von einer gleichmäßigen Intensitätsverteilung ausgeht und die für Breitstreifenlaser typische Filamentierung der Strahlung nicht berücksichtigt. Weiterhin ist eine Änderung von  $S_{\text{comd}}$  mit der Alterung der Facette zu erwarten und hängt in starkem Maße vom Passivierungsprozeß der Halbleiteroberfläche ab. Trotzdem ist die Optimierung der Wellenleiterstrukturen bezüglich  $d/\Gamma$  für 808nm- und 940nm Diodenlaser für die Erzielung hoher Leistungen entscheidend.

Im Projekt wurden vorwiegend Wellenleiterstrukturen mit Schichtdicken für den Wellenleiterkern  $> 1\mu\text{m}$  (Large Optical Cavity (LOC) -Strukturen mit breitem Wellenleiter) untersucht. Diese Strukturen zeichnen sich durch geringe interne Verluste aus, da die Lichtenergie im wesentlichen im schwach dotierten Wellenleiterkern geleitet wird und an den Grenzflächen zwischen Wellenleiter- und Mantelschicht das Feld der Grundmode stark abgeklungen ist.

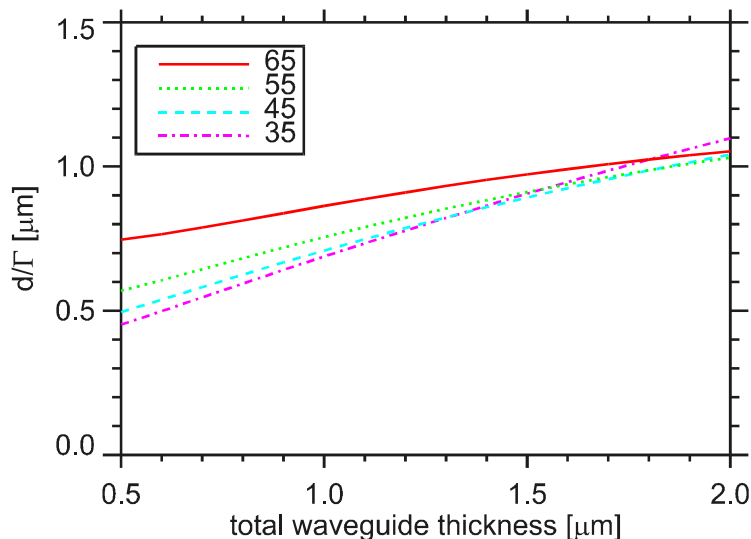


Abb. 6.1 Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Dicke der aktiven Zone und optischem Füllfaktor (Confinementfaktor) von der Dicke des Wellenleiterkerns einer AlGaAs-Laserstruktur für TE-Moden, ( $\lambda = 810 \text{ nm}$ ). Scharparameter ist der AlAs-Gehalt des Wellenleiterkerns. Der AlAs-Gehalt der Mantelschicht beträgt 0.7.

In Abb. 6.1 ist als Beispiel  $d/\Gamma$  als Funktion der gesamten Wellenleiterdicke einer 808 nm - Struktur, für den Laserbetrieb im TE-Mode, dargestellt. Der  $d/\Gamma$ -Wertes kann durch die Vergrößerung der Breite des Wellenleiterkerns unter Beibehaltung der aktiven Zone verringert werden. Das erhöht die Facettenstabilität, verringert aber den optischen modalen Gewinn. Weiterhin sind bei Wellenleiterdicken im Bereich von  $1\mu\text{m}$  bereits höhere Vertikalmoden möglich. Durch geeignete Wahl der Mantelschichtdicken können diese Moden jedoch unterdrückt werden.

Für die im Projekt untersuchten Laserstrukturen lagen die  $d/\Gamma$ -Werte zwischen  $0,6\mu\text{m}$  und  $1\mu\text{m}$ , was zu typischen Facettenbelastungswerten von  $3\dots 5\text{MW}/\text{cm}^2$  bei der Alterung mit  $3\text{W}$  Ausgangsleistung führte. Im folgenden wird auf die spezifischen Belange der Schichtstrukturen in den Wellenlängenbereichen  $808\text{nm}$  und  $940\text{nm}$  gesondert eingegangen.

### 6.1.1 808nm – Diodenlaser mit Al - freien Quantengraben in AlGaAs Wellenleiterstrukturen

Im Projekt wurde für  $808\text{nm}$  Diodenlaser die Eignung Al-freier Quantengraben untersucht. Die Wellenleiterstruktur zeigt die Abb. 6.2. Die Erfahrungen zeigten, dass diese Struktur einen guten Kompromiss bezüglich hohem  $d/\Gamma$ -Wert für geringe Schwellenstromdichte und hohe Temperaturstabilität auf der einen Seite und niedrigem  $d/\Gamma$ -Wert für geringe Strahldivergenz und hohe Ausgangsleistung auf der anderen Seite darstellt. Durch den hohen Al-Gehalt der Wellenleiterschichten entstehen für die Ladungsträger hohe Barrieren, die die Temperaturstabilität verbessern. Durch den geringen Unterschied im Al-Gehalt zwischen Wellenleiter- und Mantelschicht wurde eine geringe vertikale Divergenz von  $27^\circ$  Halbwertsbreite erreicht, die auch praktisch unabhängig von der Ausgangsleistung ist (siehe Abb. 6.3)

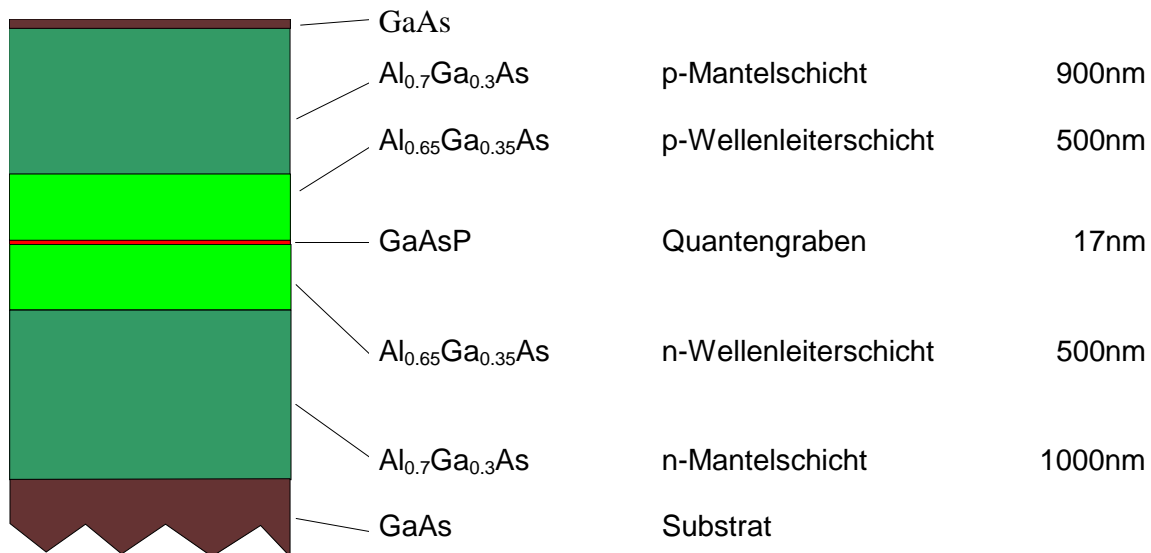


Abb. 6.2 Vertikalstruktur für  $808\text{nm}$ -Diodenlaser

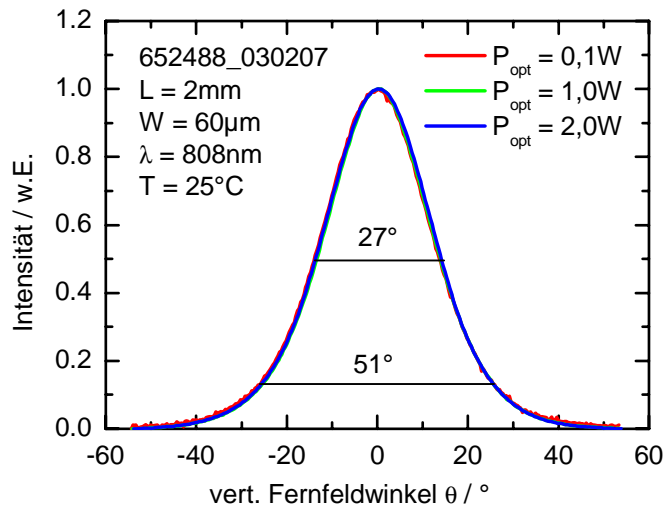


Abb. 6.3 Intensitätsverteilung: vertikales Fernfeld eines 808nm-Diodenlasers bei verschiedenen Ausgangsleistungen (Streifenbreite  $W=60\mu\text{m}$ ) mit GaAsP-Quantengraben und AlGaAs-LOC-Struktur

Sowohl theoretische Berechnungen des Gewinns als auch die experimentellen Ergebnisse des ersten Jahres der Projektlaufzeit zeigten, dass zugverspannte GaAsP-Quantengraben Vorteile bezüglich des Schwellenstroms und der Temperaturstabilität gegenüber druckverspannten oder unverspannten InGaAsP-Quantengraben haben.

Weiterhin führt die Relaxation der Verspannung an der Facette für zugverspannte Quantengraben zu einer Vergrößerung der Energielücke und damit zu einer reduzierten Absorption im Facettenbereich. Es wurden daher ausführlich die Züchtungsparameter und der Einfluss der Breite des Quantengrabens auf die Lasereigenschaften untersucht.

Insbesondere wurde von GaAsP-Schichten im AlGaAs-System die Abhängigkeit der Festkörperzusammensetzung von der Gasphasenzusammensetzung in der MOVPE bei verschiedenen Züchtungstemperaturen untersucht. Geringe Abscheidungstemperaturen von 600°C verhindern eine thermische Degradation des GaAsP, sind auf Grund der geringen Zerlegungseffizienz des Phosphins (P-Quelle) im Vergleich zum Arsin (As-Quelle) bei niedrigen Temperaturen aber die technologisch ungünstigere Variante. Das AlGaAs der Wellenleiter- und Mantelschichten erfordert zudem hohe Temperaturen (> 750°C). Hohe Temperaturen können aber durch den oberhalb 700°C stark zunehmenden Dampfdruck des Phosphors eine thermische Zerlegung des GaAsP hervorrufen. Im Vergleich von GaAsP-Quantengraben, die bei 580°C oder 750°C abgeschieden wurden, konnten jedoch bzgl. der Schichtperfektion keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden. Daher wurden die Abscheidungsbedingungen von GaAsP-Schichten auf den Bereich hoher Temperaturen, wie sie für das AlGaAs-System üblich sind, optimiert.

Weiterer Optimierungsbedarf bestand in der Wahl eines geeigneten GaAsP-Quantengrabens, das heißt in der Kombination von Breite und Komposition für 808nm. In Abbildung 6.4 sind Komposition eines GaAsP-Quantengrabens für eine Emissionswellenlänge von 808 nm und die Differenz der Lage der Energieniveaus für leichte und schwere Löcher in

Abhängigkeit von der Breite des Quantengrabens dargestellt. Um den Abstand vom ersten Subband der leichten Löcher zu den beiden anderen nächstliegenden möglichst groß zu machen, muss die Breite des Quantengraben etwa 14nm - 17nm betragen.

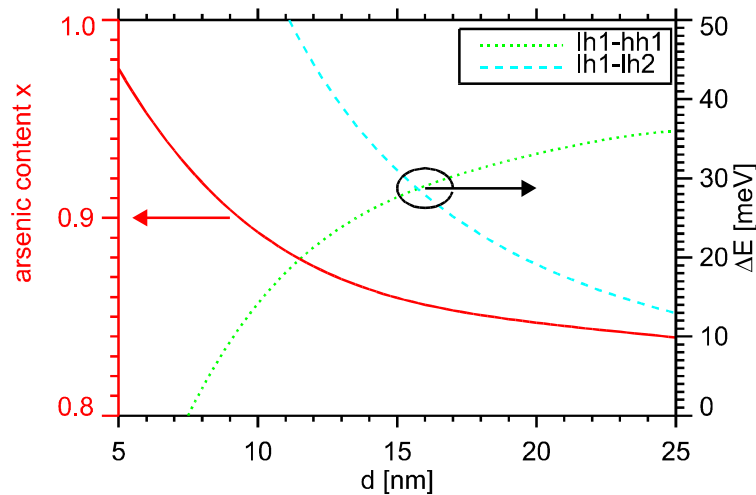


Abb. 6.4 die Zusammensetzung des GaAsP-Quantengrabens und die Abstände (lh1-hh1) und (lh1-lh2) der einzelnen Subbänder in Abhängigkeit von d.

Für eine Übersicht sind in Tabelle 6.1 die charakteristischen Laserdaten von 808nm - Al-GaAs – LOC - Diodenlasern mit unterschiedlich ausgeführter Breite des GaAsP - Quantengrabens zusammengefasst. Die Wellenlänge von ca. 800nm für den Impulsbetrieb wurde so eingestellt, dass für den vorgesehenen CW - Betrieb bei  $P = 3W$  die Wellenlänge von 808nm erreicht wird.

Wafer	d-QW (nm)	$J_T$ ( $A/cm^2$ )	$\lambda$ (nm)	$J_{th}$ ( $A/cm^2$ )	$\eta_d$ (%)	$\theta_{\perp}$ ( $^{\circ}$ HWB)
651805	9	144	803	212	92	25
651917	14	120	802	180	90	26
652067	15	128	807	183	85	27
652103	17	134	802	190	84	27
022118	17	132	800	180	84	28
022120	17		800	184	81	28
022125	17		800	184	83	28
652109	20	133	801	182	88	27
652105	23	157	805	204	86	28
652106	25	165	802	206	85	28

Tabelle 6.1 Charakteristische Laserdaten von 808nm-Diodenlasern mit GaAsP-Quantengraben Impulsbetrieb, Resonatorlänge  $L=2mm$ , unbeschichtet, Streifenbreite  $200\mu m$  d-QW – Breite des Quantengrabens,  $J_T$  – Transprezstromdichte,  $\lambda$  - Wellenlänge  $J_{th}$ - Schwellenstromdichte,  $\eta_d$  – Steilheit,  $\theta_{\perp}$  - vertikale Divergenz

Die Ergebnisse zeigen, dass die Eigenschaften nur schwach von der Breite des Quantengrabens abhängt. Für die praktische Anwendung kann jedoch der Bereich zwischen um 17nm als Optimum angesehen werden. Die Schichtdicke ist für Quantengräben sehr hoch und erleichtert die Reproduzierbarkeit der Zielwellenlänge von 808nm und die Homogenität für die epitaktische Schichtabscheidung über den 2" Wafer. Andererseits ist die Schichtdicke noch gering genug, als dass durch zu starke Verspannung Defekte erzeugt werden könnten. Bei Schichtdicken oberhalb 20nm wurden solche Defekte als Dark Spots in der Kathodoluminescence beobachtet. Die in der Tabelle angegebenen vier Wertesätze für den 17nm breiten Quantengraben zeigen, dass die Kenndaten sehr reproduzierbar auf beiden verfügbaren Epitaxieanlagen erreicht wurde.

Die Wellenlängenhomogenität über einen 2 Zoll - Wafer (ohne den Randbereich von ca. 2 mm) ist besser 2 nm (Standardabweichung:  $\pm 0.7$  nm). Die Reproduzierbarkeit der Wellenlänge von Züchtung zu Züchtung liegt im Bereich von 1 nm.

Die ausgezeichneten Werte für die differentielle Effizienz bei 2mm Resonatorlänge sind auf die hohe interne Effizienz der Quantengräben (typische Werte ca. 90%...95%) und auf sehr geringe interne Verluste der Wellenleiterstruktur  $<1\text{cm}^{-1}$  zurückzuführen.

Die mit dieser Laserstruktur erreichten Werte sind damit klar besser als die Zielstellung von 200A/cm<sup>2</sup> für die Schwellenstromdichte und erlauben bei geeigneter Lasermontage Konversionsgrade über 50% (siehe 6.3). Durch die relativ großen Schichtdickentoleranzen wird eine sehr gute Reproduzierbarkeit für industrielle Anwendungen gewährleistet.

Im Rahmen der Untersuchungen zu Wellenleiterstrukturen wurde darüber hinaus eine neuartige Wellenleiterstruktur entwickelt und gemeinsam mit dem Projektpartner OSRAM OS patentiert. Ziel war es, eine deutlich größere modenstabile vertikale Nahfeldaufweitung zu erhalten, verbunden mit einer weiter verringerten Facettenbelastung und einer sehr geringen vertikalen Divergenz. Die Wellenleiterstruktur ist beispielhaft unter Ausnutzung des erprobten GaAsP/AlGaAs - Materialsystems ist in Abb. 6.5 dargestellt. Diese Struktur besteht im wesentlichen aus einer  $\text{Al}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  Wellenleiterschicht mit 3 $\mu\text{m}$  vertikaler Ausdehnung, die durch zwei schmale Schichten mit einem geringeren Al-Gehalt von  $x=0.15$  begrenzt ist. An diese schließt sich im n- und p-Gebiet eine  $\text{Al}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  - Schicht an. Im Zentrum befindet sich der erprobte zugverspannte GaAsP-Quantengraben mit 17nm Breite. Die Materialdaten und Schichtdicken sind so gewählt, dass nur eine Mode mit geringen Abstrahlungsverlusten möglich ist. Es handelt sich hier um einen vertikalen antiresonant reflektierenden Wellenleiter. Vorteilhaft im Gegensatz zu typischen indexgeführten Wellenleitern ist, dass das Material mit dem größeren Bandabstand und damit höheren Barriere unmittelbar an die aktive Zone angrenzt.

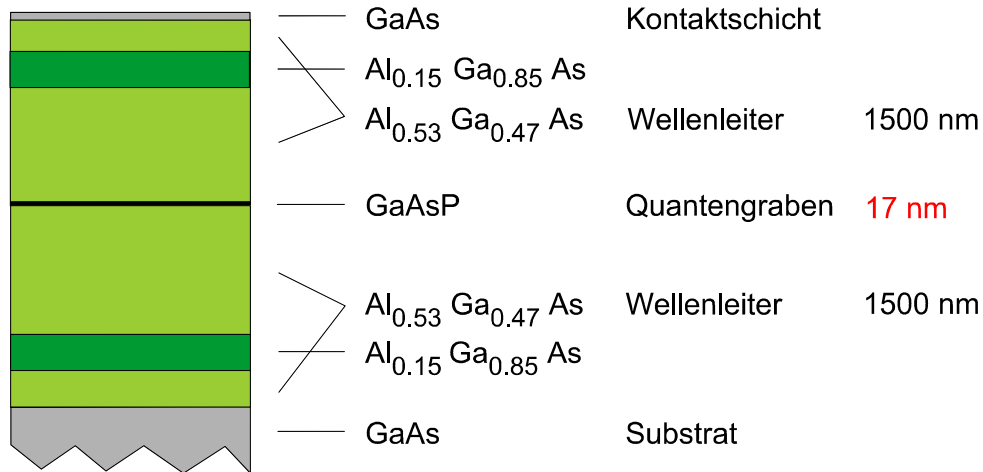


Abb. 6.5 Vertikalstruktur für 808nm Diodenlaser mit  $3\mu\text{m}$  Wellenleiter

Das Design erlaubt eine stabile Modenführung auch für sehr geringe Strahldivergenzen (siehe Abb.6.6). Es wurden Halbwertswinkel bis zu  $16,5^\circ$  und  $1/e^2$ -Breiten von ca.  $35^\circ$  (Vollwinkel) erreicht. Aufgrund des geringeren modalen Gewinns ist die Schwellenstromdichte für 2mm Resonatorlänge etwas höher ( $230\text{A}/\text{cm}^2$  zu  $184\text{A}/\text{cm}^2$ ) und die Temperaturstabilität ( $T_0 = 90\text{K}$  zu  $T_0 = 145\text{K}$ ) geringer als bei der oben beschriebenen LOC- Struktur. Für die differentielle Effizienz wurden aber ebenfalls Werte über 80% gemessen.

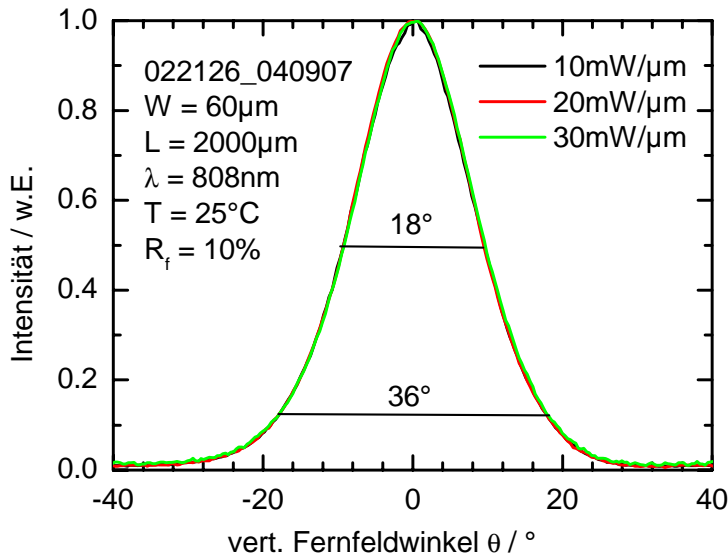


Abb. 6.6 Vertikales Fernfeld eines 808nm Diodenlasers mit  $3\mu\text{m}$ -Wellenleiterstruktur bei verschiedenen spezifischen Leistungen

### 6.1.2. 808nm Diodenlaser mit InGaP- Wellenleiterschichten in AlGaAs - Strukturen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind für Diodenlaser basierend auf dem Al-freien Materialsystem (In,Ga)(As,P)/GaAs hohe Bauelementelebensdauern aufgrund der geringen Oxidationsneigung, der relativ geringen Beweglichkeit von Kristallstörungen und einer guten Facettenstabilität zu erwarten. Nachteilig in diesem System wirkt sich jedoch die Mischungslücke im InGaAsP aus, die zu Inhomogenitäten in der Zusammensetzung und rauen Oberflächen führen kann. Weiterhin ist die Barriere für die Elektronen auch für InGaP – Wellenleiterschichten noch geringer als für AlGaAs – Wellenleiterschichten mit AlAs – Gehalte größer 30%.

Eine Kombination, AlGaAs in der Mantelschicht und InGaP in der Wellenleiterschicht des Lasers, kann die aus der Mischungslücke resultierende Probleme vermeiden, und nutzt die Vorteile des Al - freien Materialsystems im Bereich der Lichtaustrittsfläche an der Laserfacette. Die geringere Barriere bleibt jedoch auch für diese Kombination noch als Nachteil erhalten. Als zusätzliche Schwierigkeit stellte sich in diesem Falle die Realisierung der Grenzfläche GaInP/AlGaAs dar (In-Segregation).

Es wurden sowohl Strukturen mit n-seitiger, mit p-seitiger als auch mit beidseitiger InGaP – Wellenleiterschicht realisiert. Als aktive Zone wurden sowohl druckverspannte InGaAsP - als auch zugverspannte GaAsP – Quantengraben eingesetzt. Die Abb. 6.7 zeigt den schematischen Schichtaufbau dieser Strukturen.

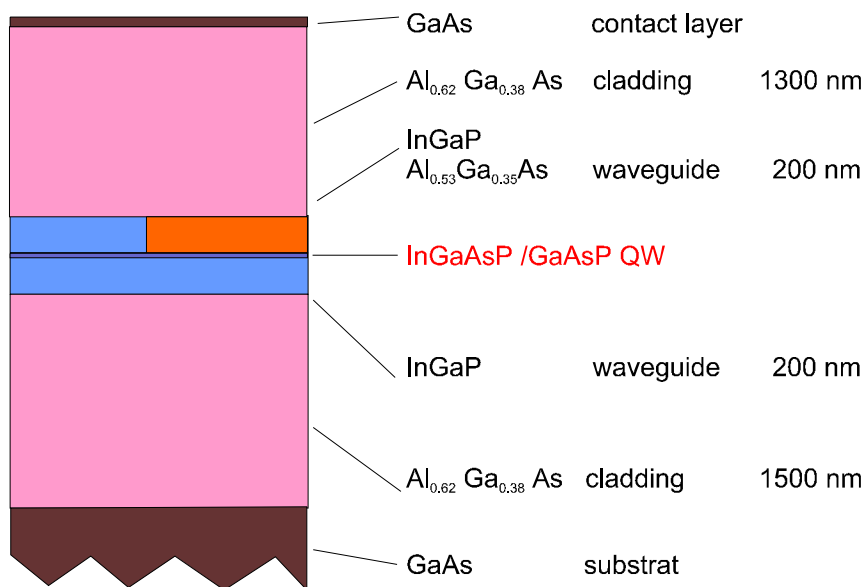


Abb. 6.7: Schichtaufbau für 808nm-Diodenlaser mit InGaP - Wellenleiterschichten und AlGaAs - Mantelschichten

Die Ergebnisse von Impulsmessungen an prozessierten Diodenlasern sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst. Als Vergleich sind ebenfalls die entsprechenden Werte für AlGaAs–LOC–Strukturen mit InGaAsP- und GaAsP – Quantengraben aufgeführt.

n - WL	p - WL	d – WI nm	QW	$J_{th}$ A/cm <sup>2</sup>	$\eta_d$	$\theta_{\perp}$ grd	d / $\Gamma$ $\mu$ m	T <sub>0</sub> K
InGaP	InGaP	400	GaAsP	220	56	32	0.6	93
AlGaAs	InGaP	400	GaAsP	180	70	32	0.6	96
InGaP	AlGaAs	400	GaAsP	200	77	34	0.6	105
AlGaAs	AlGaAs	1000	GaAsP	180	84	28	0.85	145
InGaP	InGaP	400	InGaAsP	200	65	32	0.4	76
InGaP	AlGaAs	400	InGaAsP	170	78	31	0.4	87
InGaP	AlGaAs	1000	InGaAsP	260	80	26	0.7	70
AlGaAs	AlGaAs	1000	InGaAsP	200	84	26	0,7	93

Tab. 6.2 Charakteristische Daten von 808nm - InGaP/AlGaAs – Diodenlasern im Vergleich zu Diodenlasern mit AlGaAs - LOC – Strukturen (Werte von Messungen im Impulsbetrieb an unbeschichteten Diodenlasern, Resonatorlänge L=2mm)

Ein Vergleich mit LOC - AlGaAs – Lasern zeigt, dass beim Einsatz dieser Strukturen bezüglich Abstrahlcharakteristik, Schwellenstromdichte und Temperaturstabilität deutliche Nachteile zu erwarten sind. Der zu erwartende Vorteil in Hinblick auf Zuverlässigkeit wird durch die kritische Grenzfläche InGaP/AlGaAs in Frage gestellt. Aus der Literatur bekannte Fakten weisen daraufhin, dass gute Lebensdauern nur bei relativ geringer Facettenbelastung zu erreichen /10/, bzw. InAlGaP – Material für die Mantelschichten und dünne InGaP - Wellenleiterschichten für temperaturstabile Diodenlaser notwendig sind /11/. Letztere Materialkombination lag außerhalb des Projektrahmens. Aufgrund der wesentlich schlechteren Ausgangswerte im Impulsbetrieb, mit denen die angestrebten Zieldaten nicht zu erreichen sind, wurden nach der Mitte der Projektlaufzeit die Aktivitäten bezüglich dieses Projektpunktes abgeschlossen.

### 6.1.3. Al-freie 940 nm – Diodenlaser

Für den Bereich um 940nm und der dort eingesetzten InGaAs – Quantengraben ist die Barrierenhöhe ausreichend, um auch unter Einsatz von Al – freien Wellenleitern verschiedener Komposition eine hinreichend gute Laserqualität zu erreichen. Im Rahmen des Projektes wurden Strukturen mit quaternären  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  - Wellenleiterschichten und InGaP-Mantelschichten entwickelt, wie in Abb. 6.8 dargestellt.



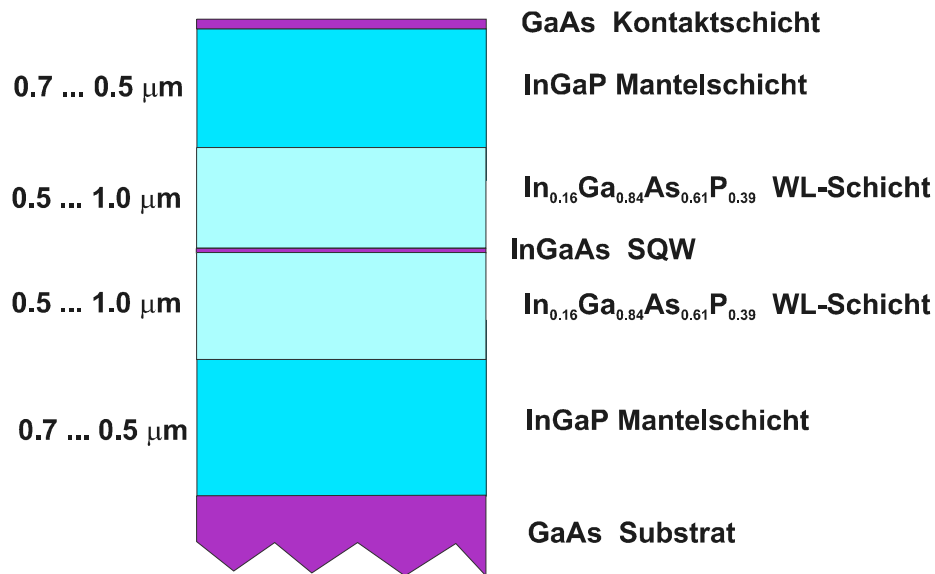


Abb. 6.8: Al-freie Strukturen für 940 nm – Diodenlaser Struktur mit  $y \approx 0.6$  in der Wellenleiterschicht

Basierend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Projektes wurden für InGaP und für zwei quaternäre Materialkompositionen (As - Gehalt  $\approx 0.15$  nahe InGaP und As - Gehalt  $y \approx 0.6$  nahe GaAs) die Züchtungsbedingungen optimiert und Laserstrukturen mit InGaAs - Einfach- und Doppelquantengraben realisiert.

InGaP mit geringem Ordnungsgrad ist bei Abscheidungstemperaturen um  $580^\circ\text{C}$  und  $\geq 750^\circ\text{C}$  mittels MOVPE realisierbar. Die beste Realstruktur und Oberflächenmorphologie wurde für das bei niedrigen Temperaturen abgeschiedene InGaP gefunden. Im Gegensatz dazu benötigen die quaternären arsenhaltigen Schichten erhöhte Abscheidungstemperaturen zur Vermeidung von temperatur- und zusammensetzungsabhängigen binoidalen Entmischungen (Phasendiagramm) /12/, so dass für die Gesamtstruktur mit InGaP- und quaternären Schichten eine Optimierung notwendig wurde. Dabei ist die Zusammensetzung mit einem As-Anteil  $y \approx 0.15$  für die kristalline Schichtqualität deutlich kritischer als  $y \approx 0.6$ . Aus dem quaternären Material mit  $y \approx 0.15$  wurden Wellenleiter mit einer Dicke von ca. 200 nm n- und p-seitig realisiert. Bei dickeren Schichten traten Aufrauungseffekte durch zunehmende Entmischung und Ordnungseffekte auf. Laser mit diesen Schichtstrukturen und dünnen Wellenleitern zeigten zwar eine gute Kenndaten bei den Startmessungen, wiesen aber schlechte Ergebnisse bei den Lebensdauertests auf. Die weiteren Arbeiten wurden deshalb auf die Strukturen mit der Komposition  $y \approx 0.6$  für die quaternären Wellenleiterschichten (WLS) konzentriert, d. h. auf solche mit einem 8nm dicken  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ -Quantengraben, eingebettet in  $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}$  - WLS und  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ - Mantelschichten (MS). Um Entmischungsprozesse bei der Epitaxie weitgehend zu unterdrücken, wurde für die quaternären WLS und für die AZ eine hohe Züchtungstemperatur  $T_{\text{TE}} = 770^\circ\text{C}$  gewählt. Die InGaP - MS wurden bei

600°C abgeschieden. Für die 8-nm-Quantengräben wurde eine Homogenität in der PL von  $\pm 2$  nm über den 2" Wafer erreicht.

Die zunächst realisierten Diodenlaser mit einer Gesamtdicke der Wellenleiterschichten von  $d=1\mu\text{m}$  (im nachfolgenden als „Standardstruktur“ bezeichnet) haben ein vertikales Nahfeld mit einer äquivalenten Ausdehnung  $d/\Gamma \approx 0,6\mu\text{m}$ , und damit bereits eine geringe optische Facetten-Belastung. Um die Facettenbelastung und gleichzeitig die vertikale Divergenz weiter zu reduzieren, wurden auch Untersuchungen mit größeren Dicken der Wellenleiterschichten durchgeführt. Die Verbreiterung der Wellenleiterschichten führt allerdings dazu, dass in Verbindung mit dem relativ hohen Brechzahl - Sprung von 0,17 zwischen WLS und MS die Struktur prinzipiell auch vertikale optische Moden höherer Ordnung führen kann. Bereits die Wellenleiterdicke von  $d=1\mu\text{m}$  erlaubt drei Moden. Die erste Obermode spielt wegen ihres Null-Durchgangs in der Mitte der Wellenleiterschichten keine Rolle, wenn der Quantengraben symmetrisch eingebettet wird. Die zweite Obermode kann aber aufgrund eines höheren Reflexionsfaktors an den Facetten trotz geringeren Füllfaktors unter Umständen sogar eher als die Grundmode die Schwelle erreichen. Durch Optimierung der Mantelschichtdicke kann das Anschwingen der höheren Moden unterdrückt werden. Bei endlicher Mantelschichtdicke treten immer Strahlungsverluste auf. Diese sind für die höheren Moden deutlich größer als für die Grundmode. Durch geeignete Wahl der Mantelschichtdicke können die Strahlungsverluste der Grundmode kleiner  $0,1\text{cm}^{-1}$  sein, die der höheren Moden aber so groß, dass ihr Gewinn zum Laserbetrieb nicht ausreicht. Abb. 6.9 zeigt die Strahlungsverluste von Grund- und zweiter Obermode in Abhängigkeit von der MS-Dicke  $d_{\text{MS}}$  für  $d=1\mu\text{m}$  und  $d=2\mu\text{m}$ .

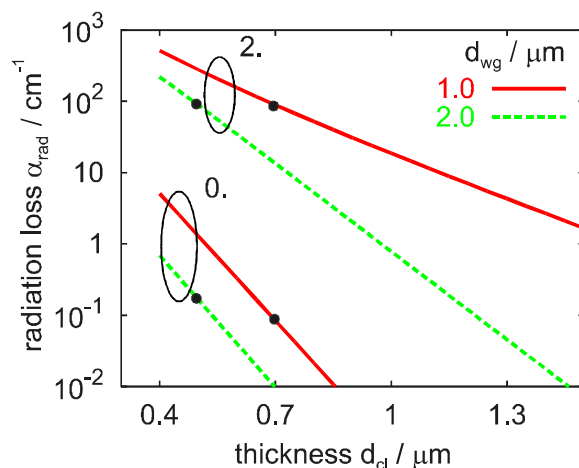


Abb. 6.9: Strahlungsverluste für die Grundmode und 2. Obermode als Funktion der Mantelschichtdicke; Struktur analog Abb. 1.5, Wellenleiterdicke  $d = 1\mu\text{m}$  und  $d = 2\mu\text{m}$

Die gewählten Mantelschichtdicken von  $d_{\text{MS}} = 0,7\mu\text{m}$  und  $0,5\mu\text{m}$  für Wellenleiterdicken von  $1\mu\text{m}$  bzw.  $2\mu\text{m}$  liefern für die Grundmode ausreichend kleine Strahlungsverluste um  $0,1\text{cm}^{-1}$ , für die Mode zweiter Ordnung aber schon Werte um  $90\text{cm}^{-1}$ , die zu ihrer Unterdrückung ausreichen. Die Verringerung der MS-Dicken bringt einen weiteren positiven Effekt mit, da damit gleichzeitig der Serienwiderstand und der thermische Widerstand gesenkt werden kann. Al-

lerdings zeigt Abb.6.9 auch, dass  $d_{MS}$  kaum weiter verringert werden kann, weil mit sinkender MS-Dicke auch die Verluste der Grundmode zu groß werden.

In der Tabelle 6.3 sind die charakteristischen Daten von Diodenlasern mit unterschiedlichen Wellenleiterdicken zusammengestellt. Die internen optischen Verluste liegen für alle Strukturen bei  $\alpha = 1\text{cm}^{-1}$ . Die innere Effizienz erreicht ebenfalls für alle Strukturen Werte um 95%.

Probe	Barriere	d(WL) $\mu\text{m}$	d(MS) $\mu\text{m}$	$j_{th}$ (L=1mm) $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$T_o$ K	$\eta_d$ %	$j_{th}$ (L=2mm) $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\Theta_{\perp}$ grd	$\lambda_L$ nm
652415		500	700	167	91	86	127	42	925
652416		750	600	230	65	88	156	34	928
652417		1000	500	351	33	81	202	28	927
652541	GaAsP	1000	500	285	55	86	175	28	933

Tab. 6.3: Laserparameter von Al - freien 940nm-Diodenlaserstrukturen gemessen im Impulsbetrieb

Aus der Tabelle ist zu ersehen, dass die Aufweitung des Wellenleiters zur Verringerung der Fernfelddivergenz (Halbwertsbreite) von  $42^\circ$  auf  $28^\circ$  führt. Die Facettenbelastung wird um den Faktor 1,68 reduziert. Diese Vorteile werden durch eine Erhöhung der Schwellenstromdichte und ein wesentlich kleineres  $T_o$  erkauft, durch Einführung von GaAsP – Barrieren kann dieser Nachteil teilweise wieder kompensiert werden (Wafer 652541). Weitere Möglichkeiten der Verbesserung der Temperaturstabilität bestehen prinzipiell in der Verlängerung des optischen Resonators auf  $L=4\text{mm}$  oder der Einführung von Doppel – Quantengraben. Im Rahmen der Projektbearbeitung zeigte sich, dass die Zielstellungen mit einfachen Quantengraben und einer Resonatorlänge von  $L=2\text{mm}$  erreicht werden konnten.

Die in der Tabelle 6.3 dargestellten Ergebnisse wurden auf Antestwafern erzielt, die einem verkürzten Prozess unterworfen waren. Bei den im Folgenden darzustellenden Ergebnissen, die auf einen vollständigen Prozess mit 2“ Wafern beruhen, wurden Laser von den Wafern 651814 und 652164 mit jeweils 500nm dicker p- und n- Wellenleiterschicht (1000nm Gesamtwellenleiterdicke), von dem Wafer 652429 mit 1500nm- und 652435 mit 2000nm- Wellenleiterschichten untersucht.

Um Laser mit verbesserter Temperaturstabilität für Strukturen mit größerer Wellenleiterdicke zu erhalten, wurden ergänzend Wafer mit zwei Quantengraben (652635) und mit zusätzlichen GaAsP Barrieren (652915) untersucht.

## 6.2. Prozessierung und Montage

Die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung von BA-Einzellasern sind in Abbildung 6.10 schematisch dargestellt. Im ersten Lithographieschritt wird zunächst die p-GaAs-Kontaktschicht bis auf den Bereich des Kontaktfensters in einem Ätzschritt bis auf die p-Mantelschicht entfernt. Unter Verwendung derselben Lackmaske wird nach dem Abscheiden

des Isolators ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mittels Lift-Off-Technik das Kontaktfenster geöffnet. Anschließend wird die p-Metallisierung aufgebracht und ebenfalls über eine Lift-Off-Maske strukturiert. Diese Metallisierung ist sowohl hinsichtlich eines kleinen Kontaktwiderstandes als auch einer guten Spaltbarkeit optimiert, da sie zur Durchführung des nachfolgenden Galvanik - Prozessschritts über den Facettenbereich hinweggeführt ist. In diesem Prozessschritt wird, von der späteren Facette zurückgezogen, eine Au-Verstärkungsmetallisierung galvanisch abgeschieden, deren Dicke auf die Anforderungen des Montagetechnik abgestimmt ist. Abschließend erfolgt das substratseitige Abdünnen der Wafer auf  $120\mu\text{m}$  bis  $150\mu\text{m}$  und die Herstellung des ohmschen n-Kontaktes. Auch dieser ist hinsichtlich eines kleinen Kontaktwiderstandes und einer guten Spalt- und Lötbarkeit optimiert.

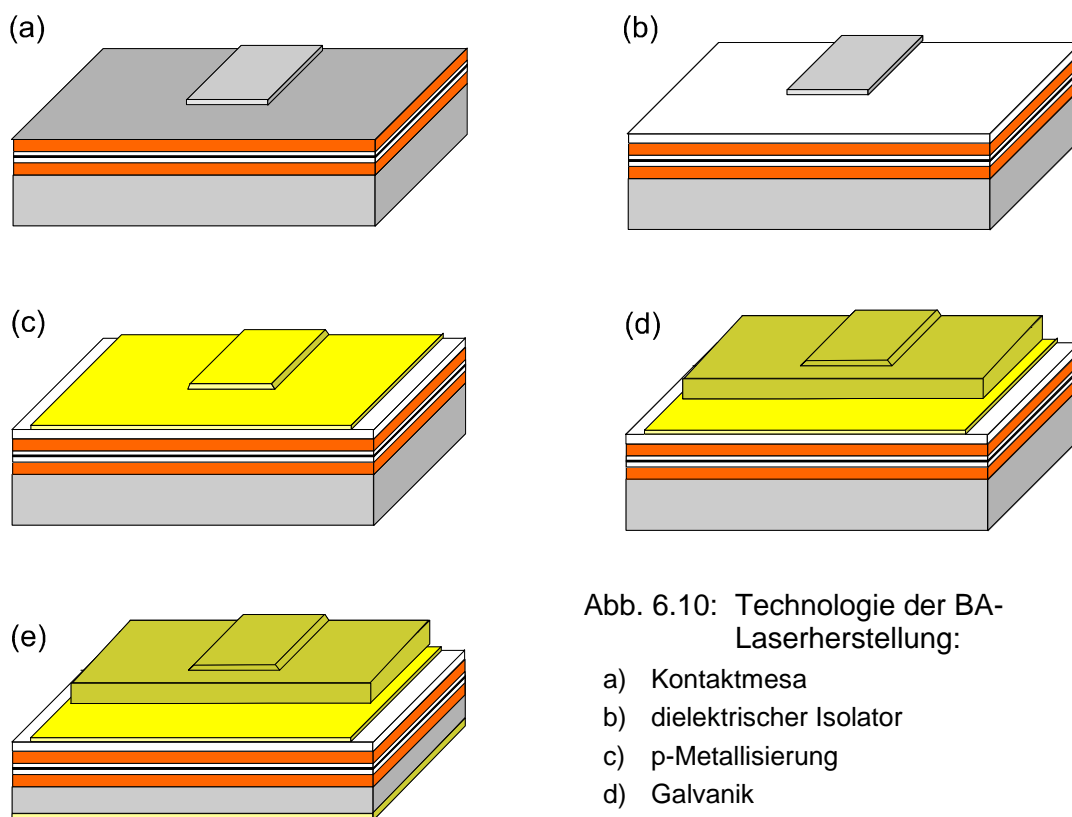


Abb. 6.10: Technologie der BA-Laserherstellung:

- a) Kontaktmesa
- b) dielektrischer Isolator
- c) p-Metallisierung
- d) Galvanik
- e) Abdünnen und n-Metallisierung

Um die Qualität der für die Prozessierung benötigten Lackmasken zu erhöhen und gleichzeitig die Belastung der Wafer bei der Justage und Belichtung zu verringern wurden die Lithographieprozesse von der Kontaktlithographie auf die Projektionslithographie umgestellt. Dazu wurde der im Institut vorhandene i-Line Stepper genutzt, mit dessen Hilfe u.a. auch eine individuelle Belegung eines jeden Wafers möglich ist.

Mit dieser Prozesstechnologie wurden sowohl Einzellaser mit Streifenbreiten von  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  und  $200\mu\text{m}$  als auch Barren mit einer Belegungsdichte von 20% und 50% hergestellt. Die Resonatorlänge betrug im allgemeinen 2mm für Einzellaser aber auch 4mm. Nach Vereinzelung der Wafer in Riegel wurden diese mit Hilfe einer Sekundärionen-Sputteranlage an den Facetten beschichtet. Dabei wurde für die Lichtaustrittsfacette in der Regel ein Reflexi-

onsvermögen zwischen 3% und 20% durch Abscheiden einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Schicht eingestellt und mit einem Schichtpaket aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{TiO}_2$  bzw. Si an der Rückfacette ein Reflexionsvermögen von  $\geq 90\%$  erreicht.

Für CW - Messungen und Degradationsuntersuchungen wurden die Laser zunächst mit Au/Sn - Lot montiert. Dieses Lot zeigt sehr geringe Degradation, verbleibt aber im Zustand der elastischen Verformung und baut somit keine Montagespannung ab. Bei der p-side down Montage von Laserdioden-Chips ist deshalb auf das Verhältnis der thermischen Ausdehnung von Chip und Submount besonders zu achten. Wie Abb. 6.11 zeigt, muss hier ein Kompromiss zwischen der Anpassung bei der thermischen Ausdehnung und der Wärmeleitfähigkeit des Submount - Materials gefunden werden.

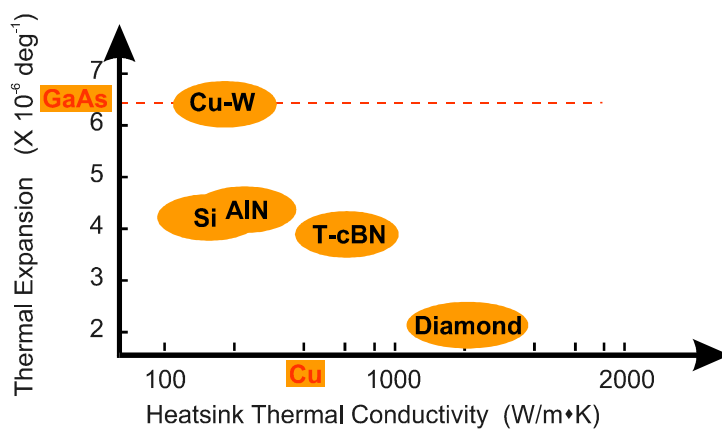


Abb.6.11: Wärmeleitfähigkeit und thermische Ausdehnung von GaAs und typischen Submount-Materialien

Laserdioden bis 2 mm Resonatorlänge wurden auf translucent cubic Bornitrid (T-cBN, Sumitomo) montiert, das eine relativ gute Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten an GaAs aufweist und aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit gegenüber Kupfer zusätzlich noch als Wärmespreizer wirkt. Laserdioden mit größerer Resonatorlänge wurden auf dem bezüglich der thermischen Ausdehnung exakt angepassten CuW (CMSH W-10, Sumitomo) montiert, wobei hier wegen der größeren Diodenfläche die geringere Wärmeleitfähigkeit in der Regel tolerabel ist.

Aus der Literatur /13/ ist bekannt, dass man mit Nutzung der goldreichen  $\zeta$ -Phase den Einfluss von Montagespannungen bei Au/Sn – Lötungen vermindern kann. Parallel zur Projektbearbeitung wurde dieser Effekt zur Entwicklung einer neuen Löttechnik benutzt, bei der sich während des reflow im Lot die goldreiche  $\zeta$ -Phase bildet. Die  $\zeta$ -Phase mit einem Schmelzpunkt  $> 500^\circ\text{C}$  führt bei der Standard-Löttemperatur  $350^\circ\text{C}$  dort, wo sie sich bildet, zum spontanen Erstarren des Lotes.

Zur Bildung der  $\zeta$ -Phase muss ein Depot mit zusätzlichem Lot eingeführt werden, das sich beim „reflow“ im bis dahin eutektisch zusammengesetzten Lot löst. Dieses Depot kann wie in /13/ vorgeschlagen als zusätzliche Goldschicht auf dem Substrat vorgegeben werden (Abb. 6.12 links). Dabei ist eine sehr präzise Temperaturführung notwendig.

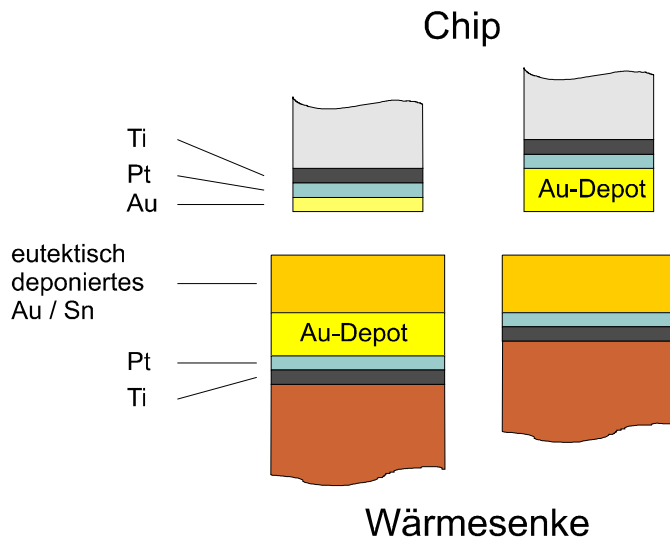


Abb. 6.12: Anordnungen eines Au-Depots zur Bildung der goldreichen  $\zeta$ -Phase beim Lötreflow.

Im FBH wird das Au-Depot chipseitig durch eine galvanische Au-Schicht vorgegeben (Abb. 2.3 rechts). In diesem Fall beginnt das Wachstum der  $\zeta$ -Phase erst, wenn auch das Chip die Löttemperatur erreicht hat. Damit ist der Lötprozess nicht mehr vom Temperatur-Zeit-Profil abhängig. Es muss nur noch eine hinreichend lange Lötzeit gesichert sein ( $\leq 30$  s).

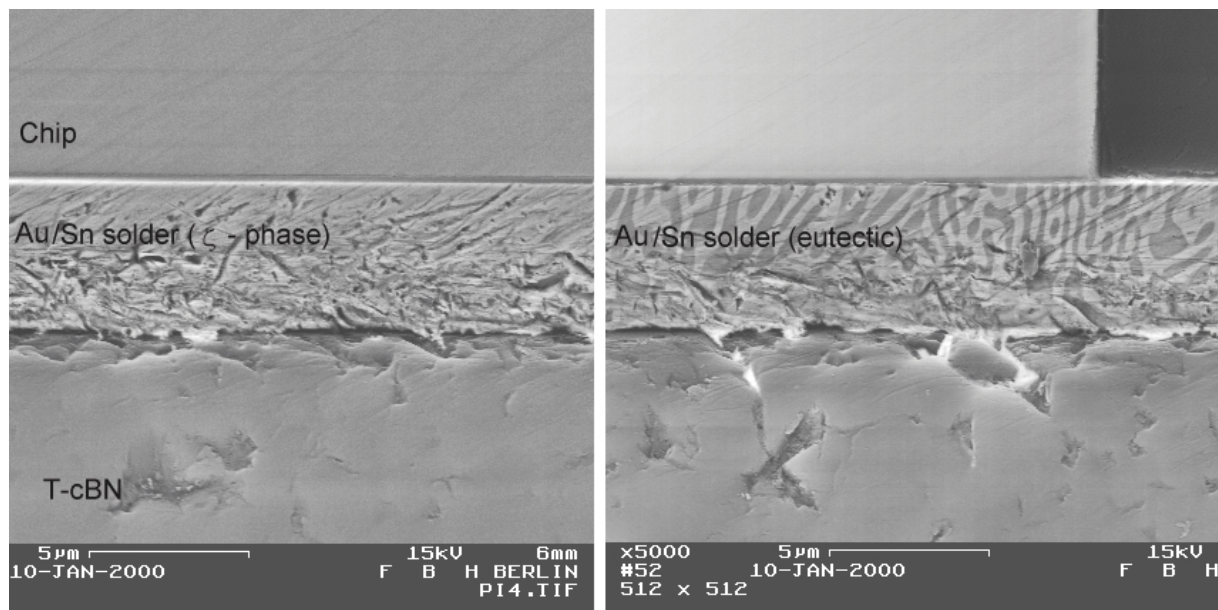


Abb. 6.13: Querschliff durch die Au/Sn-Lotschicht : Chipmitte (links) und Chiprand (rechts)

Abb. 6.13 zeigt den Querschliff durch eine auf T-cBN montierte Laserdiode. Unter dem nicht-metallisierten Randbereich des Chip bleibt die lamellare eutektische Struktur des Lotes erhalten (rechts). Im Bereich der galvanischen Au-Schicht hat sich ein Material bestehend aus reiner  $\zeta$ -Phase gebildet. Typische Werte für die thermischen Widerstände von 2mm – langen Diodenlasern liegen für eine Streifenbreite von 100 $\mu$ m bei 7-9 K/W, wobei dieser Wert den Übergang vom T-cBN – Wärmespreizer auf das C-Mount und dessen Übergang auf eine Cu-Wärmesenke einschließt. Für 4mm – lange Diodenlaser, montiert auf CuW – Submounts, reduziert sich dieser Wert auf etwa 5 K/W.

### 6.3 Charakteristik von 808nm – Diodenlasern: Einzelemitter

In diesem Abschnitt sind nur die Ergebnisse der sich im Projektverlauf für Einzelemitter als optimal herausgestellten Laserschichtstrukturen, das heisst GaAsP – Quantengraben und AlGaAs – Wellenleiterstruktur (Abb.6.2), dargestellt. Weitere Ergebnisse sind ausführlich in den Zwischenberichten beschrieben. Die erreichte Qualität von Epitaxie, Prozess und Montage beschreibt die Abb. 6.14. In dieser Abbildung sind die CW - Kennlinien und die Konversionseffizienz von 17 Laserdioden eines Riegels dargestellt. Die Streifenbreiten betragen 60µm, 100µm und 200µm und die Resonatorlänge 2 mm. Die Spannungsmessung erfolgte jeweils an den Kontaktklemmen der montierten Dioden und schließt damit den Spannungsabfall an Zuführungen ein.

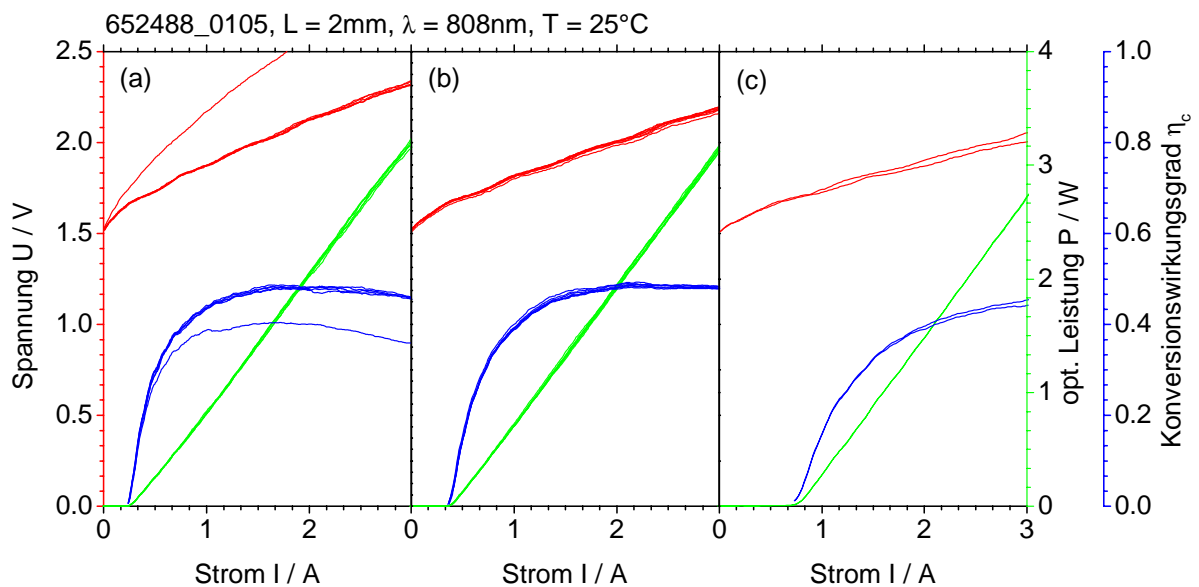


Abb. 6.14: P/U/I-Kennlinien von 808nm-Diodenlasern, hergestellt aus einem Riegelverband (CW-Betrieb,  $R_f = 10\%$ ). Streifenbreite W: 60µm (a), 100µm (b) und 200µm (c). Dargestellt ist zusätzlich der Konversionswirkungsgrad  $\eta_c$

Mit Schwellenstromdichten  $< 200 \text{ A/cm}^2$  wurde die Projektzielvorgabe klar unterboten. Die differentielle Effizienz betrug ca. 80% (Steilheit 1,2 W/A) und für alle Laserdioden wurde ein Konversionswirkungsgrad  $\geq 50\%$  erzielt und damit ein weiteres Projektziel erreicht. Die Homogenität über den Riegel mit relativen Abweichungen in Schwellenstromdichte und differentielle Effizienz von typischerweise weniger als 1% ist sehr gut und zeigt ein hervorragendes Potential für die Realisierung von Laserbarren. Die Temperaturabhängigkeit der P-U-I-Kennlinien ist in Abb. 6.15 dargestellt.



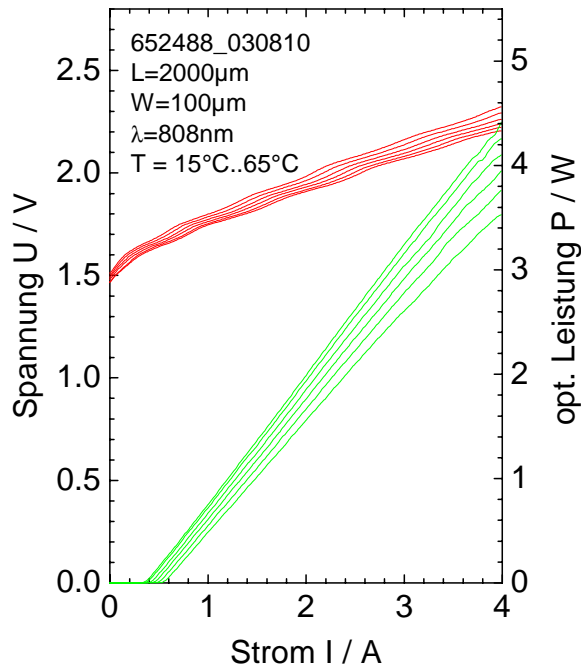


Abb. 6.15: Temperaturabhängigkeit der P-U-I-Kennlinie für Einzellaser mit AlGaAs - LOC-Standardstruktur

Aufgrund der hohen Barrieren wurde bereits im CW Betrieb ein  $T_0 = 108 \text{ K}$  zwischen  $15^\circ\text{C}$  und  $65^\circ\text{C}$  gemessen. Die als Projektziel angestrebte Leistung von  $30\text{mW}/\mu\text{m}$  bei  $50^\circ\text{C}$  (Temperatur der Wärmesenke) wurde erreicht und übertroffen, ohne dass diese Belastung eine Grenzlast für die Diode darstellt.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Strahlqualität wurden an  $808\text{nm}$  Diodenlasern mit Streifenbreiten von  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  und  $200\mu\text{m}$  und einer Resonatorlänge von  $2\text{mm}$  Nah- und Fernfeldmessungen bei unterschiedlichen Leistungen durchgeführt. In Abb. 6.16a ist die laterale Fernfeldverteilung eines  $100\mu\text{m}$  Einzellasers im Leistungsbereich von  $0,5\text{W}$  bis  $3,0\text{W}$  dargestellt. Aufgrund nichtlinearer Effekte im Diodenlaser, die zur Filamentierung des inneren Strahlfeldes führen, ist die Intensitätsverteilung stark inhomogen. Mit zunehmender Leistung nimmt die  $1/e^2$ -Weite von  $6,5^\circ$  bis auf  $9,2^\circ$  zu. Ähnliche Werte für die Fernfeldbreite wurden auch für Streifenbreiten von  $60\mu\text{m}$  und  $200\mu\text{m}$  gemessen. In Abbildung 6.16b ist die Beugungsmaßzahl  $M^2$  in Abhängigkeit von der spezifischen Leistung pro Streifenbreite dargestellt. Mit Zunahme der spezifischen Leistung ist eine Vergrößerung der Beugungsmaßzahl und damit eine Verschlechterung der Strahlqualität verbunden. Bei gleicher spezifischer Leistung ist die Strahlqualität für kleinere Streifenbreiten etwas besser als es dem Verhältnis der Streifenbreiten entspricht.



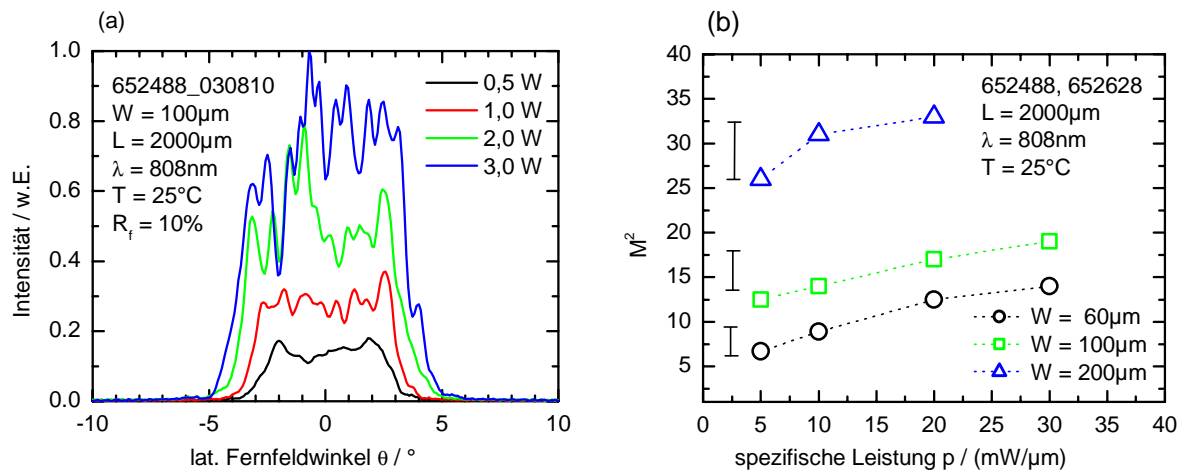


Abb. 6.16: Laterales Fernfeld eines  $100\mu\text{m}$  Diodenlasers bei verschiedenen Leistungen (a) Strahlqualität der Diodenlaser mit Standardwellenleiter in Abhängigkeit von der spezifischen Leistung. Parameter ist die Streifenbreite(b)

Weiterhin wurden für Diodenlaser mit  $100\mu\text{m}$ -Streifenbreite bei  $P=3\text{W}$  die laterale und vertikale Fernfeldverteilung sowohl bei einer Wärmesenktemperatur von  $25^\circ\text{C}$  als auch bei  $50^\circ\text{C}$  untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine in diesem Bereich von der Temperatur unabhängige vertikale Strahldivergenz und auch die laterale Strahldivergenz nimmt mit steigender Temperatur nur unwesentlich zu und erreicht einen maximalen Wert von  $9,9^\circ$  ( $1/e^2$ -Breite).

Zur Untersuchung der Belastbarkeit der beschichteten Laserfacetten wurden Messungen zur katastrophalen Spiegelzerstörung durchgeführt. Als Beispiele sind in Abbildung 6.17 zwei P-I-Kennlinien zur Bestimmung der maximalen optischen Ausgangsleistung von Laserdioden mit Streifenbreiten von  $60\mu\text{m}$  und  $100\mu\text{m}$  dargestellt. Während für Streifenbreiten von  $100\mu\text{m}$  eine maximale Ausgangsleistung von  $P=8,9\text{W}$  entsprechend  $89\text{mW}/\mu\text{m}$  ermittelt wurde, konnte bei Tests von Lasern mit  $60\mu\text{m}$  Streifenbreite eine Maximalleistung von  $6,0\text{W}$  gemessen werden. Das entspricht einer spezifischen Leistung von  $100\text{mW}/\mu\text{m}$  Streifenbreite. Dieser Wert ist ein internationaler Spitzenwert für  $808\text{nm}$ -Breitstreifenlaserdioden und insbesondere auch höher als vergleichbare Werte, die mit InGaP - Wellenleitern erzielt wurden [14]. Während bei dem  $100\mu\text{m}$  - Streifenlaser die Facette die Ausgangsleistung begrenzt, ist die maximale Ausgangsleistung für den  $60\mu\text{m}$  - Streifenlaser nicht durch eine Schädigung der Facette, sondern durch thermisches Abschalten limitiert. Die Facettenbelastung liegt dabei mit etwa  $10..12\text{MW}/\text{cm}^2$  in einer Größenordnung, die den maximal erreichten Werten für GaAs- und GaAsP- Quantengraben entspricht [15].

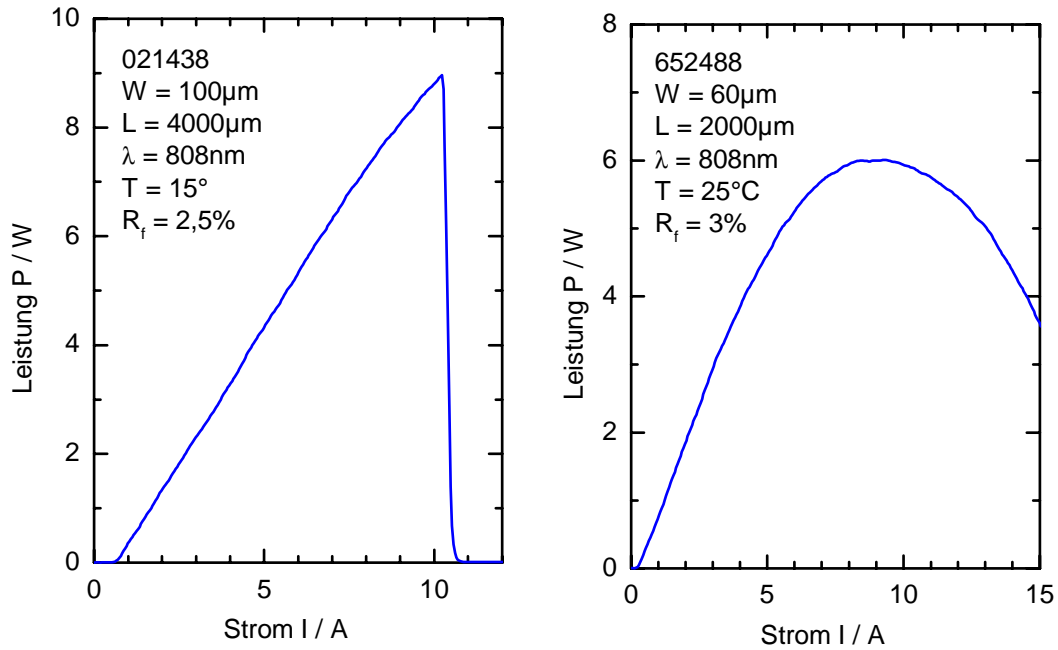


Abb. 6.17: P-I-Kennlinien zur Ermittlung der maximalen Ausgangsleistung vor der katastrophalen Spiegelzerstörung (COD) an 808nm-Diodenlasern mit 60µm Streifenbreite (a) und 100µm Streifenbreite (b)

Montierte Diodenlaser der neuen 3µm-Wellenleiterstruktur mit der geringen vertikalen Divergenz zeigen Schwellenstromdichten von etwa 260A/cm<sup>2</sup> und eine Steilheit von etwa 1,0W/A (gemessen an einem 60µm-Streifenlaser mit 2mm Resonatorlänge, siehe Abb.6.18) Die maximale Konversionseffizienz liegt bei 48%. Die Strahldivergenzen in lateraler Richtung entsprechen den Werten der Standardstruktur.

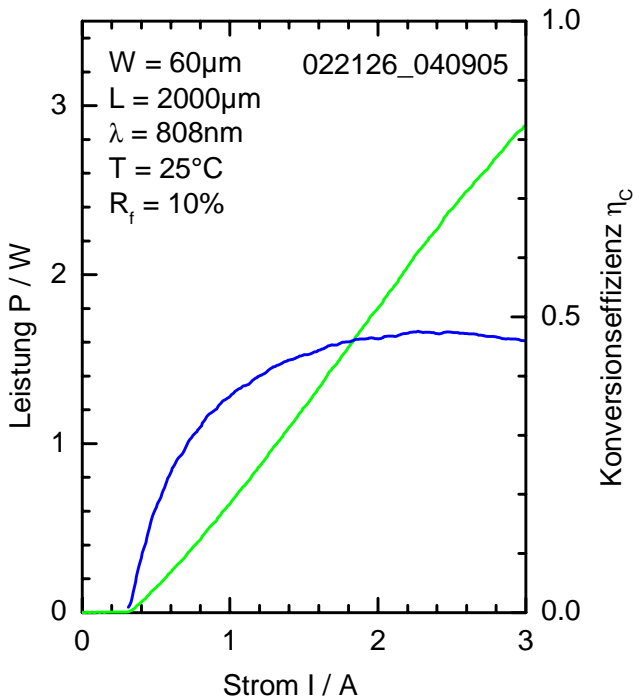


Abb. 6.18 P-I-Kennlinie eines 808nm Diodenlasers mit 3µm Wellenleiterstruktur nach Abb. 6.5.

## 6.4 Charakteristik von 940nm-Diodenlasern

In Abb. 6.19 sind die Laser-Kennlinien zusammen mit dem Konversionswirkungsgrad  $\eta_c$  für alle Laser eines Riegels dargestellt, die mit der „Standardstruktur“ (je 500nm p- und n- seitiger Wellenleiterdicke) realisiert wurden.

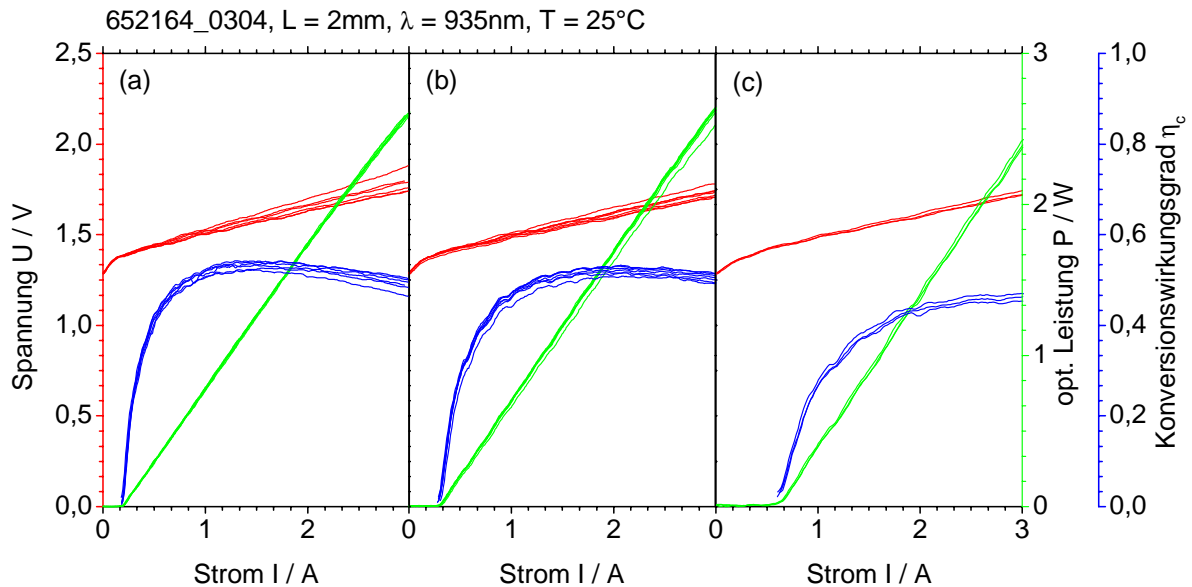


Abb. 6.19: Al-freie 940nm-Diodenlaser P-U-I - Laserkennlinien und Konversionswirkungsgrad  $\eta_c$  für alle Laser eines Riegels (je 7 mit  $w=60\mu\text{m}$  und  $100\mu\text{m}$ , 3 mit  $w=200\mu\text{m}$ , Resonatorlänge  $L=2\text{mm}$ ).

Die Abbildung demonstriert die gute Homogenität der Lasereigenschaften. Die Schwellenstromdichten liegen unter  $150\text{A}/\text{cm}^2$  und der maximale Konversionswirkungsgrad erreicht 60%. Damit wurden die diesbezügliche Projektziele erreicht bzw. übertroffen

Ergebnisse der Untersuchungen zur maximalen Belastbarkeit sind in der Abbildung 6.20 dargestellt. Es konnten Emissionsleistungen von  $P=6\text{W}$  für  $60\mu\text{m}$ - und  $P=8,8\text{W}$  für  $100\mu\text{m}$  Streifenbreite erreicht werden.

Dies erfüllt die Projektzielstellung ( $P>50\text{mW}/\mu\text{m}$ ) und entspricht den international veröffentlichten Spitzenwerten von  $P=10,6\text{W}/16/$  (für  $L=2\text{mm}$  und  $w=100\mu\text{m}$ ,  $\lambda_L=973\text{nm}$ ) bzw.  $11\text{W}/16/$  (für  $L=2\text{mm}$ ,  $w=100\mu\text{m}$  und  $\lambda_L=973\text{nm}$ ), die bei Temperaturen von  $10^\circ\text{C}$  deutlich unter der üblichen Raumtemperatur gemessen wurden. Dabei muss man berücksichtigen, dass die im FBH erreichten  $6\text{W}$  bzw.  $8,8\text{W}$  nicht durch COMD (catastrophic optical mirror damage) sondern durch ein thermisches Abschalten begrenzt waren. Die Messung erfolgte hier bei  $25^\circ\text{C}$ . Die Kennlinie in Abb. 6.20 konnte reversibel und wiederholt über das Maximum hinweg gemessen werden.

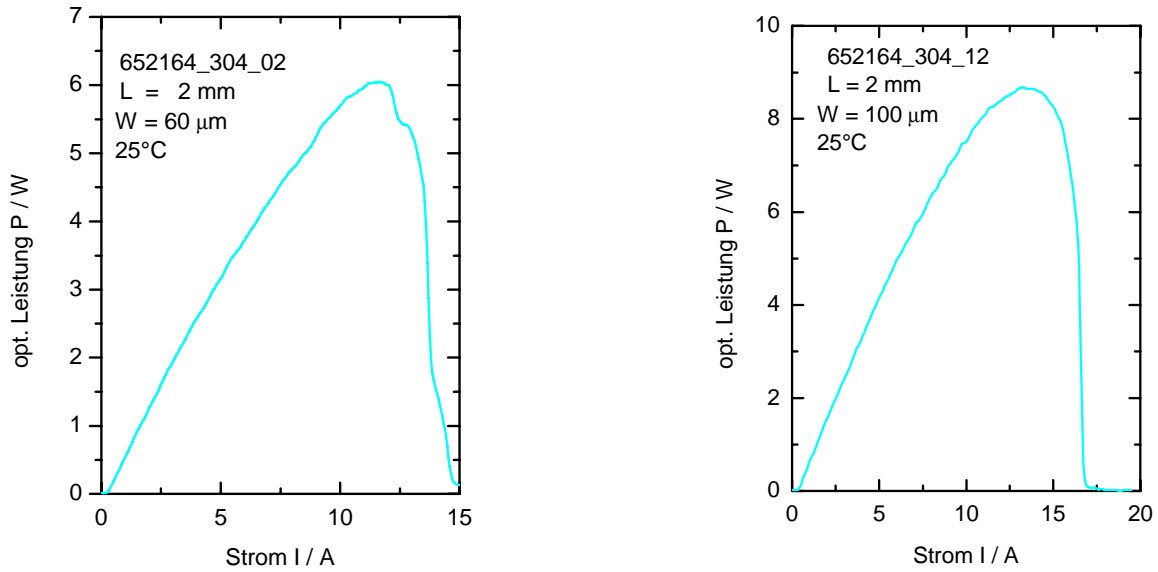


Abb.6.20: P-I-Kennlinien zur Ermittlung der maximalen Ausgangsleistung von Al-freien 940nm-Diodenlasern mit 60µm Streifenbreite (a) und 100µm Streifenbreite (b)

Der Einfluss der Wellenleiterstruktur auf die Abstrahlcharakteristik wurde bei verschiedenen Ausgangsleistungen untersucht. Die Abbildungen 6.21 und 6.22 zeigen die vertikalen und lateralen Fernfelder für Diodenlaser mit unterschiedlichen Breiten des Wellenleiterkerns (oben für 1,0µm, in der Mitte für 1,5µm und unten für 2,0µm (Gesamtdicke), jeweils für drei verschiedene Emissionsleistungen). Die Erhöhung der Wellenleiterschichtdicken führt demnach zu einer deutlichen Reduzierung der vertikalen Fernfeld-Ausdehnung: Bei 2,0µm wurden Halbwertsbreiten von 27° und 1/e<sup>2</sup>-Werte von 50° erreicht.

In der lateralen Abstrahlcharakteristik wächst wie für Breitstreifenlaser typisch die Beugungsmaßzahl  $M^2$  mit der optischen Leistung (siehe Abb. 6.23) an. Es ist jedoch eine deutliche Verbesserung der Strahlqualität (Abnahme  $M^2$ ) mit Verbreiterung der Lichtwellenleiterschichten zu sehen.

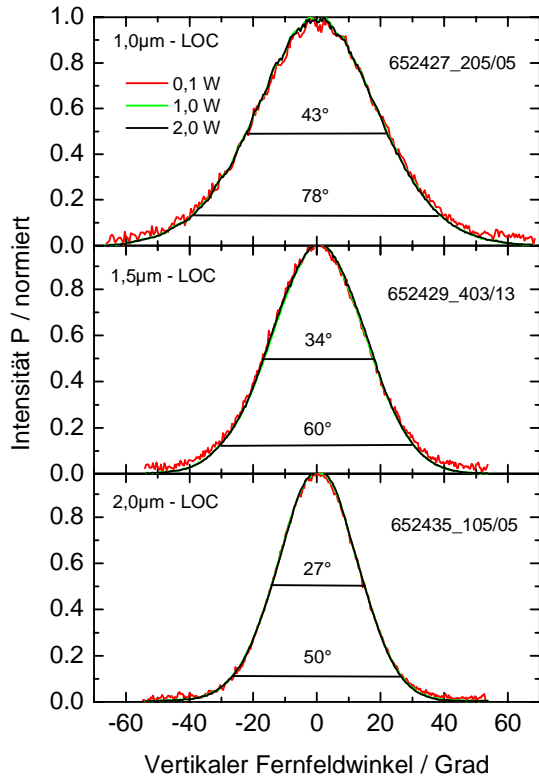


Abb.6.21: Vertikale Fernfelder von 940nm-Diodenlasern mit 1,0; 1,5 und 2,0µm dicken Wellenleiterschichten

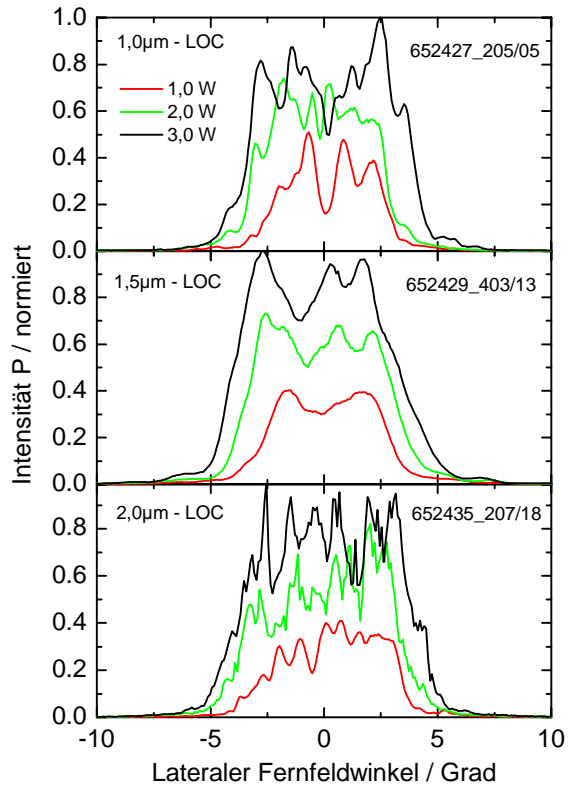


Abb.6.22: Laterale Fernfelder von 940nm-Diodenlasern mit 1,0; 1,5 und 2,0µm dicken Wellenleiterschichten

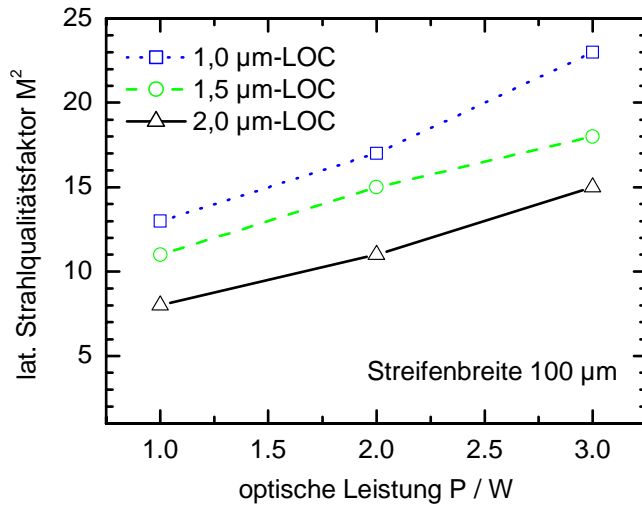


Abb. 6.23: Strahlqualität der Diodenlaser aus Abb. 6.22 in Abhängigkeit von der optischen Emissionsleistung

### 6.5 Charakteristik von 808nm- und 940nm Barren

Basierend auf den Standardstrukturen wurden sowohl für 808nm als auch für 940nm Laserbarren mit einer Belegungsichte von 50% prozessiert. Diese wurden im Rahmen einer Kooperation bei den über den Projektverbund beteiligten Partnern (Jenoptik Laserdiode GmbH und DILAS GmbH) montiert und charakterisiert. Mit diesen Barren wurden die angestrebten Projektziele für beide Wellenlängenbereiche erreicht bzw. übertroffen (siehe Tab. 6.4).

	$\lambda = 808\text{nm}$	$\lambda = 940\text{nm}$
Maximale Leistung (W)	74	68
Schwellenstrom (A)	8,5	8,0
Effizienz (W/A)	1,2	1,0
Konversionseffizienz (%)	51	55
Belegungsichte (%)	50	50
Resonatorlänge (mm)	0,6	1,0

Tab. 6.4: Kenndaten von 808nm- und 940nm Laserbarren mit 50% Belegungsichte.

Weiterhin wurden Wafer an den Projektpartner OSRAM OS übergeben, die dieser zu Barren prozessierte. Darüber wird im Abschnitt 6.7 berichtet.

In Anlehnung an die Montagetechnik von BA-Lasern wurde am FBH die entwickelte Montagetechnik auf Laserbarren übertragen. Die Laserbarren wurden mit der p-Seite nach unten auf CuW-Zwischenträgern und diese auf passiven Wärmesenken montiert. Beim Lötten auf den Zwischenträgern wurde ebenfalls die Au / Sn -  $\zeta$  - Phase benutzt, wie schon im Abschnitt 6.2 beschrieben. Die passiven Wärmesenken bestehen aus einem Cu – Körper mit den Abmaßen  $25 \times 25 \times 8 \text{ mm}^3$ . Auf der n-Seite wurden die Barren durch Drahtbonden kontaktiert. Gegenüber wassergekühlten aktiven Wärmesenken lag der thermische Widerstand mit  $1,2\text{K/W} \dots 1,5\text{K/W}$  (gegenüber ca.  $0,5 \text{ K/W}$ ) deutlich höher: Der damit verbundene zusätzlichen Erwärmungseffekt lieferte damit „automatisch“ den Test bezüglich der Betriebstauglichkeit bei höheren Temperaturen. Die Untersuchungen wurden an Barren mit 2mm Resonatorlänge und einer Belegungsichte von 20% ( $19 \times 100\mu\text{m}$  Emitter) durchgeführt.

Abb. 6.24 und 6.25 sind die Kennlinien von Barren für 808nm und 940nm dargestellt. Bei maximaler Leistung von 30W (808nm) bzw. 34W (940nm) liegt die spezifische Facettenbelastung bei etwa  $17\text{-}18\text{mW}/\mu\text{m}$  Streifenbreite und damit doppelt so hoch wie die kommerzieller Laserbarren. Die maximale Konversionseffizienz beträgt dabei 43% (808nm) bzw. 52% (940nm).

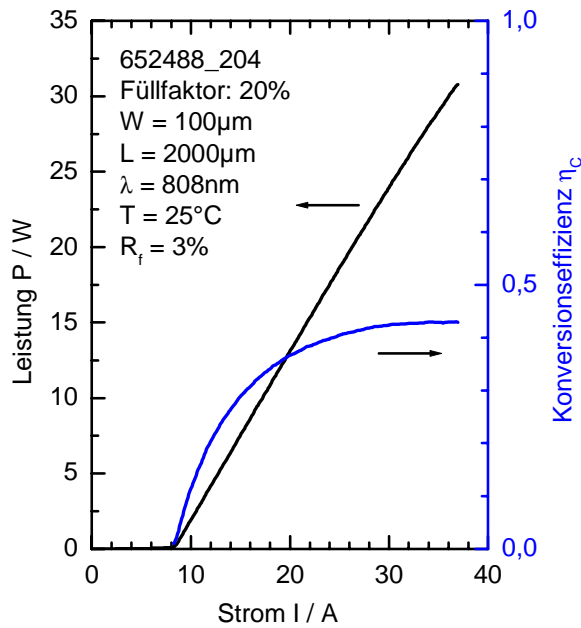


Abb. 6.24 P-I-Kennlinie eines 808nm-Diodenlaserbarrens mit 20% Belegungs-dichte und 1µm Wellenleiterdicke

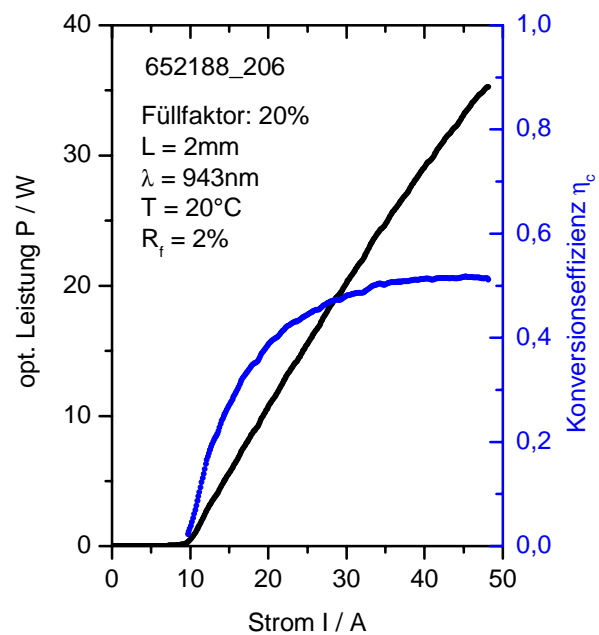


Abb. 6.25 P-I-Kennlinie eines 940nm-Diodenlaserbarrens mit 20% Belegungs-dichte

## 6.6 Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Zur Untersuchung der Zuverlässigkeit wurden Alterungstests, unter kontinuierlicher Belastung der Diodenlaser bei Temperaturen im Bereich 25°C bis 70°C über mindestens 1000 h, und physikalische Messungen zur Aufklärung der Alterungsursachen durchgeführt. Bei diesen Tests liefen die Laser generell im COP-Betrieb (constant optical power), d.h. der Betriebsstrom wurde zur Aufrechterhaltung der Emissionsleistung P nachgeregelt. „Degradation“ der Laseremission bedeutet in dieser Betriebsart eine Erhöhung des Betriebsstromes I. Die Degradationsrate  $\beta$  ist als die relative Stromerhöhung  $(I-I_0)/I_0$  über einer vorgegebenen Zeitdifferenz  $(t-t_0)$  definiert:

$$\beta = \frac{(I - I_0)}{I_0 (t - t_0)}$$

Die Alterungstests wurden ohne Vorselektion der Diodenlaser mittels Burn-In - Verfahren durchgeführt. Auswahl-Kriterien waren eine „kink“-freie Kennlinie bis mindestens 20% oberhalb des Testwertes der Leistung und geringe Abweichungen (typisch < 10%) von den Bestwerten für den Betriebsstrom der Diodenlaser des Wafers.

### 6.6.1 808nm-Diodenlaser

Die Zuverlässigkeit von 808nm - GaAsP/AlGaAs-Diodenlasern wurde mit Alterungstests an epi-side down montierten Diodenlasern mit 60µm und 100µm Streifenbreite untersucht. Um

die interne optische Materialbelastung gering zu halten betrug die Reflektivität der Frontfacette in der Regel 3%.

Für die Standardstruktur konnten bei einer Temperatur der Wärmesenken von 25°C über mehrere tausend Stunden geringe Degradationsraten von weniger als  $1 \times 10^{-5} / \text{h}$  (100µm) bzw.  $5 \times 10^{-6} / \text{h}$  erreicht werden (siehe Abb. 6.26).

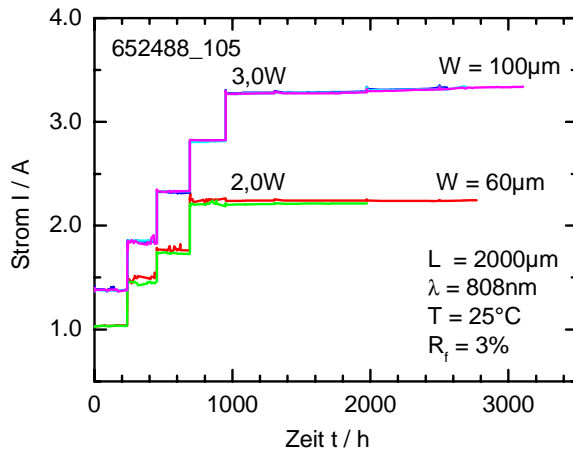


Abb. 6.26 Alterungstest von 808nm-Diodenlasern (Standardstruktur), Belastung: stufenweise erhöht auf 30mW/µm ( $W=100\mu\text{m}$ ) bzw. 33mW/µm ( $W=60\mu\text{m}$ ), 25°C

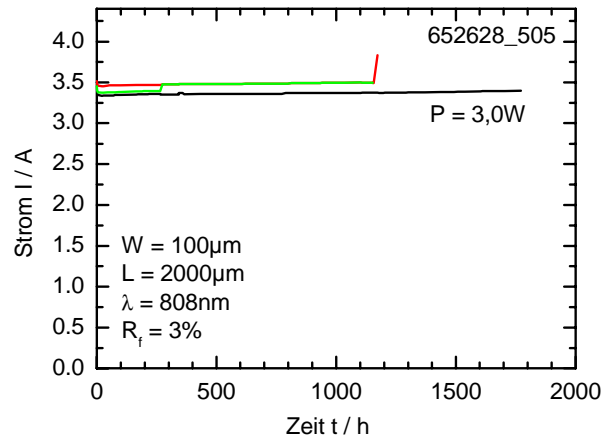


Abb. 6.27 Alterungstest von 808nm-Diodenlasern (Standardstruktur), Belastung: 30mW/µm, 50°C

Die spezifischen Belastung wurde in diesem Test stufenweise auf 30mW/µm (100µm Streifenlaser) bzw. 33mW/µm (60µm Streifenlaser) erhöht. Nach etwa 2000 bis 3000 Stunden führten jedoch Spontanausfälle aller eingesetzten Diodenlaser zum Ende des Versuches. Die Ursache war nach lichtmikroskopischer Untersuchung der Laserfacetten eindeutig auf eine Zerstörung der Lichtaustrittsfacetten durch Absinken des COMD-Niveaus zurückzuführen. Bei 50°C konnte an 100µm-Streifenlasern bei einer Belastung von 30mW/µm ebenfalls geringe Degradationsraten um  $2 \times 10^{-5} / \text{h}$  über nahezu 2000h nachgewiesen werden (Abb. 6.27). Auch bei diesem Test traten eine Reihe von Spontanausfällen auf, die im wesentlichen auf Schäden im Facettenbereich zurückzuführen sind. Kathodolumineszenz-Untersuchungen an ausgefallenen Diodenlasern zeigten neben den von der Facette ausgehenden Dark-Line-Defekten keine weiteren Materialdefekte, so dass die Zuverlässigkeit der GaAsP/AlGaAs-Diodenlaser auch bei 50°C im wesentlichen durch die Langzeitstabilität der Laserfacetten bestimmt wird.

Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Diodenlasern mit der neu entwickelten extrem aufgeweiteten Wellenleiterstruktur zeigten bis zu 7000h ebenfalls Degradationsraten von  $1 \times 10^{-5} / \text{h}$  bis  $1,5 \times 10^{-5} / \text{h}$  (Raumtemperatur) bzw.  $2 \times 10^{-5} / \text{h}$  bei 50°C (siehe Abb. 6.28). Dieser Test dauert noch an.



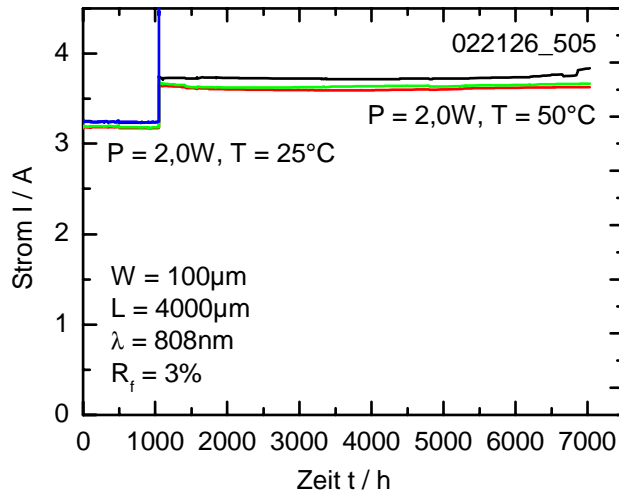


Abb. 6.28: Alterungstest von 808nm Diodenlasern mit  $3\mu\text{m}$ -Wellenleiterstruktur, Belastung:  $20\text{mW}/\mu\text{m}$  bei  $25^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$

### 6.6.2 940nm - Diodenlaser

Die Konzentration der Zuverlässigkeitsuntersuchungen auf Al - freie Strukturen war (im Vergleich zu den AlGaAs - Lasern) mit der prinzipiell höheren Facetten-Stabilität und der geringeren Neigung zu katastrophalen Degradationsmechanismen (Bewegung von Versetzungen) begründet worden, die bei solchen Diodenlasern zu erwarten waren. Dabei war zu berücksichtigen, dass beide Prozesse in Al - freien Laser-Strukturen nicht generell verhindert werden können, sondern (im Vergleich zu AlGaAs) nur verlangsamt ablaufen, bzw. eventuell zu höheren Emissionsleistungen hin verschoben sind. Für die im Projekt angestrebten hohen Laser-Leistungen folgte daraus, dass auch an Al - freien Lasern beide Effekte untersucht werden mussten: Mögliche Erosion der Facetten und auch Degradation im Volumen der aktiven Zone (AZ) des Lasers.

Abb.6.29 zeigt die Ergebnisse von Tests mit der „Standard-Struktur“ ( $1\mu\text{m}$ -Wellenleiterdicke, Charge 652164) bei  $P = 3\text{ W}$ . Die Laser zeigten eine hohe Stabilität über mehr als 5000 h. Im darauf folgenden Zeitraum bis zu 8000 h fielen sie dann jedoch alle aus.

In Abb.6.30 ist der gegenwärtige Stand eines weiteren Alterungstests bei  $25^\circ\text{C}$  und einer Emissionsleistung von anfänglich  $P = 2\text{ W}$  und dann (nach 1000 h)  $P=3\text{ W}$  an Diodenlasern aus der Epitaxiecharge 652429 mit dickeren Wellenleiterschichten ( $1500\text{nm}$ ) dargestellt. Mit diesem noch laufenden Test wurde inzwischen die bisher längste Belastungszeit von über 11000 h bei einer Facettenbelastung von  $30\text{mW}/\mu\text{m}$  erreicht.

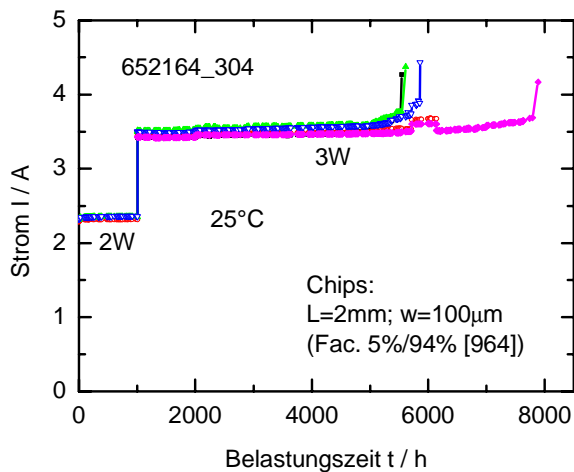


Abb. 6.29: Alterungstest an Diodenlasern aus 652164 (1000nm Wellenleiter) bei 25°C und  $P = 3W$  nach anfänglicher Belastung bei 2W über 1000h

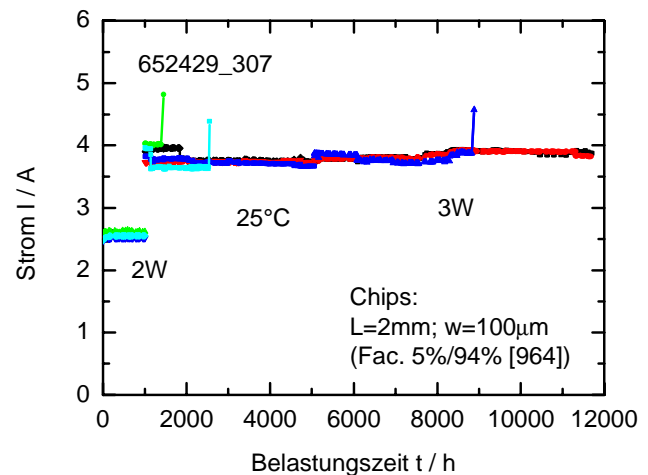


Abb. 6.30: Alterungstest an Diodenlasern aus 652429 (1500nm Wellenleiter) unter gleichen Bedingungen wie in Abb. 6.29

Für die Untersuchungen bei 50°C konnten ebenfalls sehr gute Resultate erreicht werden. In Abb.6.31 wird das Ergebnis eines entsprechenden Alterungstests an Diodenlasern aus 652429 bei einer Emissionsleistung von  $P = 2,5 W$  gezeigt, der gegenwärtig noch läuft.

Wie aus der Abbildung ersichtlich, gab es einen Ausfall nach 1900h – die übrigen drei Laser laufen bisher über mehr als 6000h stabil. Die geringen Sprünge in den Kurven bei 1000, 2000 und 4000h sind auf Unterbrechungen für Zwischenmessungen und die nicht ganz reproduzierbare Justage von Laser zu Photodetektor zurückzuführen. Bemerkenswert ist der kontinuierliche Abfall des für 2,5W erforderlichen Betriebsstroms über der Zeit, d. h. die stetige Verbesserung der Laser. Die Ursache hierfür ist allerdings noch unklar.

Abb. 6.32 zeigt den gegenwärtigen Stand eines Alterungstests bei 50°C und einer Emissionsleistung von 3W an fünf Diodenlaser aus der „Standard-Struktur“. Die geometrischen Daten der Chips, ihre Facetten-Beschichtung und auch die Montage waren die gleichen wie in den Versuchen der Abbildungen 6.29 und 6.30. In den bisher vergangenen 4500h haben die fünf eingesetzten Diodenlaser den Test ohne Störungen überstanden. Auch in diesem Test zeigt sich zunächst ein „Verbesserungs“-Effekt. Insbesondere dieser Versuch demonstriert das Potenzial der Al - freien Laserstrukturen. Die Projektzielstellung wurde damit deutlich übertroffen

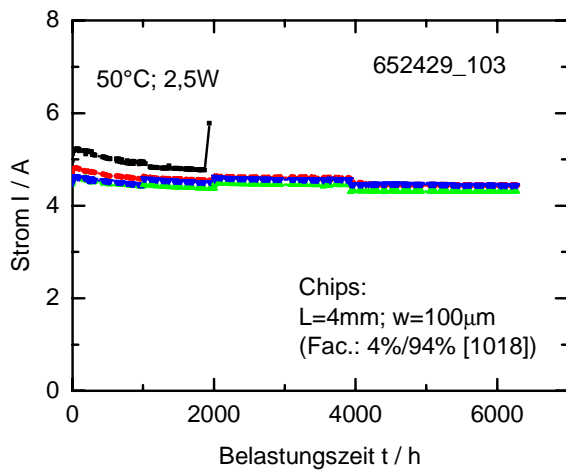


Abb. 6.31: Alterungstest an vier Diodenlasern aus 652429 bei 50°C und  $P = 2,5\text{ W}$

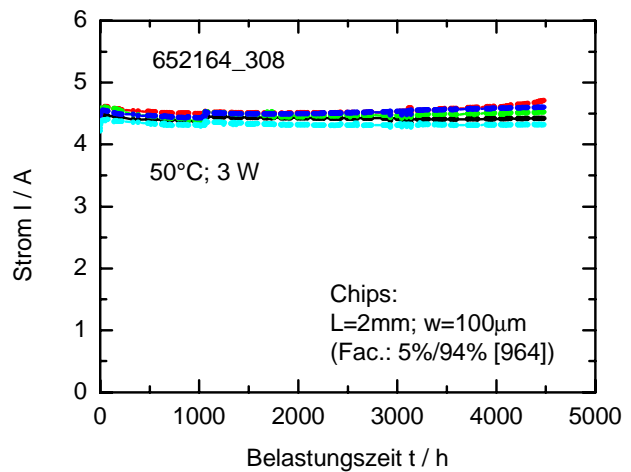


Abb. 6.32: Alterungstest an fünf Diodenlasern aus 652164 bei 50°C und  $P = 3\text{ W}$

Mit Diodenlasern aus des Wafers 652429 und aus der „Standard-Struktur“ 652427 (gleiche Schichtfolge wie 652164) wurde auch ein Alterungstest bei 25°C mit einer Emissionsleistung von 4W durchgeführt. Hierzu wurden drei Laser der ersten Charge und zwei aus der anderen zu einem Versuch zusammengefasst. Die Laser hatten eine Resonatorlänge von 4mm, ihre Facettenbeschichtung war die gleiche wie bei den Lasern aus Abb. 6.31. Die Diodenlaser wurden zunächst über 1000h mit einer Emissionsleistung von 3W betrieben (quasi ein „Burn-In“), was alle problemlos überstanden, danach wurde die Leistung auf 4W erhöht. Die zwei Laser mit 1000nm Wellenleiterdicke (652427) fielen in einem Zeitraum bis zu 2500h aus, die anderen drei liefen länger bis zu 6500h. Dieser Test weist (wie Abb. 6.29 und 6.30) auf eine höhere Stabilität der Laser mit breiterem Wellenleiter hin und zeigt, dass auch 4W aus einem 100µm Breitstreifenlaser mit Lebensdauern  $> 10000\text{h}$  möglich sein sollten.

### 6.6.3 808-nm- und 940-nm – Barren auf passiven Wärmesenken

In Abb. 6.33 und Abb. 6.34 sind Alterungstests von je zwei Diodenlaser-Barren für 808 nm und 960 nm bei 25°C dargestellt. Die Barren waren auf passiven Wärmesenken montiert und wurden im Dauerbetrieb getestet. Sie bestanden jeweils aus 19 Emittoren mit einer Resonatorlänge  $L = 2\text{ mm}$  und einer Streifenbreite  $W = 100\text{ }\mu\text{m}$  (500µm pitch).

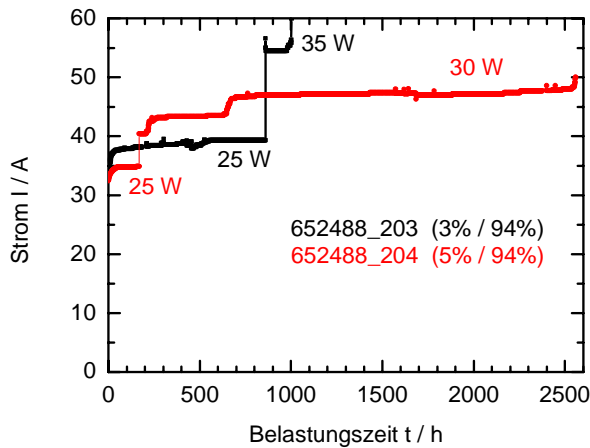


Abb. 6.33: Alterungstest an 808-nm-Barren  
20% Belegung auf passiver Wärmesenke bei 25°C

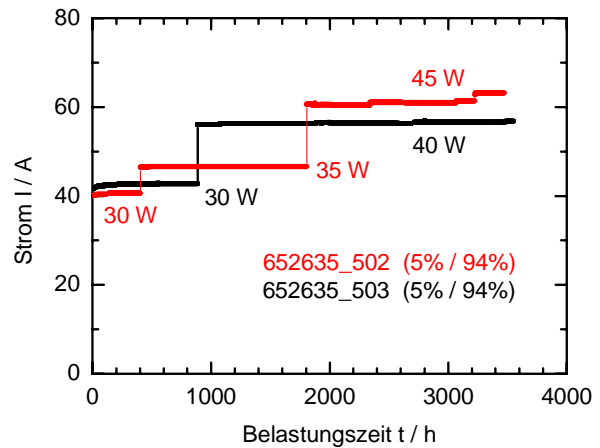


Abb. 6.34: Alterungstest an 960-nm-Barren  
20% Belegung auf passiver Wärmesenke bei 25°C

Da der thermische Widerstand ca. 1K/W höher ist als bei aktiven Wärmesenken entsprechen die Betriebsbedingungen ca. 60°C Umgebungstemperatur für aktive Wärmesenken. Die Temperatur am p/n-Übergang liegt bei ca. 85°C während der Alterung. Berücksichtigt man die gegenüber der ursprünglichen Planung geringere Belegungsichte, dann demonstrieren die Abbildungen 6.33 und 6.34 mit der nachgewiesenen Stabilität bei Emissionsleistungen von 30 W für 808 nm und 45 W für 950 nm die Erfüllung der Projektzielstellung.

#### 6.6.4 Zerstörungsfreie Kontrolle des Laserresonators

Die zu den Alterungstests durchgeführten physikalischen Untersuchungen zeigten, dass die beiden Degradationsmechanismen - Erosion der Facetten oder Degradation im Volumen der aktiven Zone (AZ) des Lasers bei Bildung von DLDs (dark line defects) - als wesentliche Ausfallursache dominierten. Allerdings war die Diagnostik dadurch erschwert, dass Facettendegradation bei den Lasern optisch-mikroskopisch nicht immer eindeutig zu erkennen waren. Auch der Nachweis von Defekten innerhalb des Laser - Resonators war nur nach der Alterung und nur zerstörend möglich, z. B. als DLD („dark line defects“) in der Kathodolumineszenz (CL) mittels REM und der Elektrolumineszenz (EL) im IR-Bild nach entsprechender Probenpräparation. Aus diesen Gründen wurde nach Methoden gesucht, die zerstörungsfrei Aussagen zu Veränderungen der Facette und der Defektstruktur im Laser-Volumen liefern können und damit .

Bei der früheren Arbeiten zu RW-(Monomode-) Diodenlasern /17/ wurden zwei Diagnoseverfahren entwickelt, die solche zerstörungsfreien Untersuchungen erlaubten: Die „P-U-I – Analyse“ und die Messung der Longitudinalmoden-Spektrenmodulation (SPM).

Bei der „P-U-I-Analyse“ wird aus Messungen der I-U- und der P-U- sowie P-I-Kennlinien unterhalb der Schwelle der nichtradiative Stromanteil  $I_{nr}$  (Oberflächenstrom) der I-U-Kennlinie bestimmt. Aus Veränderungen  $\Delta I_{nr}$  während der Alterung kann dann auf mögliche Facetten-

Degradationsprozesse geschlossen werden – ohne dass diese bereits in einer optischen Inspektion sichtbar werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes war zu klären, inwieweit diese Analyse auch für Al - freie Materialkombinationen geeignet ist.

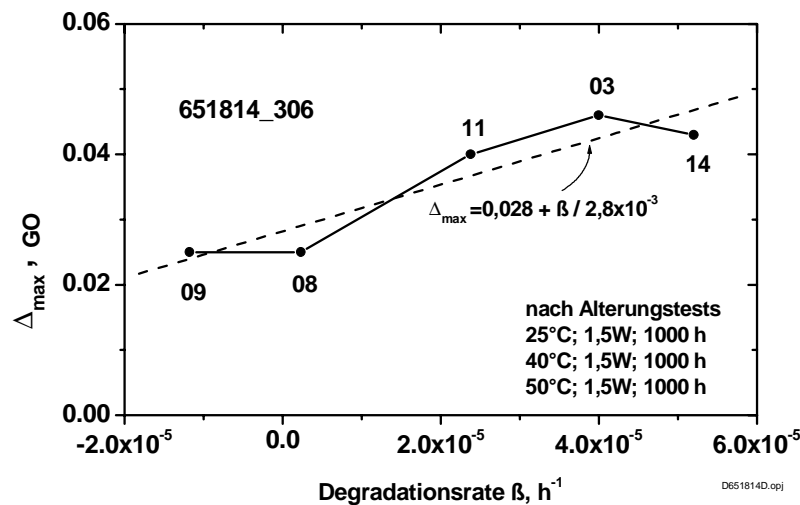


Abb.6.35: Zusammenhang zwischen der Änderung  $\Delta_{max}$  (gemessen in Größenordnungen GO) des nichtradiativen Stroms  $I_{nr}$  und der Degradationsrate  $\beta$  nach Alterungstests bei 25°C, 40°C und 50°C mit  $P=1,5W$  über jeweils 1000h

In Abb. 6.35 ist das Ergebnis einer solchen P-U-I-Analyse für einen Alterungstest an fünf Diodenlasern aus 651814 dargestellt, bei dem die Laser über jeweils 1000h mit einer Emissionsleistung  $P=1,5W$  nacheinander bei 25°C, 40°C und 50°C betrieben wurden. Die Laser hatten eine Resonatorlänge  $L=2mm$  und eine Streifenbreite  $w=100\mu m$ . In der Abbildung ist die Veränderung  $\Delta_{max}$  des nichtradiativen Stromanteils unterhalb der Schwelle über der Degradationsrate  $\beta$  (zu Ende des Tests) dargestellt. Die Größe  $\Delta_{max}$  bedeutet dabei das Maximum der Änderung  $\Delta = \log(I_{nr}^{(n)}) - \log(I_{nr}^{(v)})$  im Flußspannungsbereich 0 - 0,9V. Die Indizes „n“ und „v“ bedeuten „nach“ und „vor“ dem Test. Es ist ein Zusammenhang zwischen  $\Delta_{max}$  und  $\beta$  zu sehen, was auf eine Facettendegradation hinweist, obwohl diese optisch noch nicht sichtbar war.

Bei der SPM kann aus der Modulation des Modenspektrum auf mögliche Defekte in der AZ geschlossen werden. Die Methode nutzt den physikalischen Effekt, dass interne Störungen im Resonator eines Fabry – Perot - Lasers (der Länge  $L$ ) mit beiden Facetten zusätzliche Resonatoren mit kleineren Längen bilden. Diese erzeugen zusätzliche longitudinale Modenkämme, die dem ursprünglichen Spektrum überlagert sind. Eine Fourier -Transformation des so modulierten Moden-Spektrums („von  $\sim 1/L$  nach  $\sim L$ “) macht diese Resonanzen als Maxima über dem Ort im Resonator sichtbar und erlaubt somit die Lokalisierung der hierfür verantwortlichen Defekte. Hier war die Frage zu klären, ob sie auch bei BA-Diodenlasern (mit lateraler Multimode-Emission) anwendbar ist.

Abb. 6.36 zeigt das Elektrolumineszenz-Bild (die räumliche Verteilung der Elektrolumineszenz weit unterhalb der Schwelle – das „dark line picture“) des zuerst ausgefallenen Diodenlasers aus dem Versuch von Abb. 6.30. Es ist deutlich ein Versetzungsbündel zu sehen, das

sich von der Frontfacette ausgehend ins Innere des Resonators hinein ausgebreitet hat. In Abb. 6.37 ist die Fourier-Transformierte (FFT) des longitudinalen Modenspektrums des Lasers dargestellt. Wie oben beschrieben wurde, entspricht jedes Maximum dieser FFT einer Störung im Innern des Resonators, wobei berücksichtigt werden muss, dass eine Störung zwei Maxima hervorrufen kann, entsprechend den Abständen zur Front- und Rückfacette. Die hier gefundenen Maxima korrelieren mit Enden des Versetzungsbündels im Resonator oder mit Störungen, die offenbar durch senkrecht zu den Epitaxie-Schichten (senkrecht zur Zeichenebene) verlaufende, abbiegende Teile des Bündels hervorgerufen werden, wie an der Stelle bei  $x=825\mu\text{m}$ . Die Aussagen wurden durch Kathodolumineszenz-Bilder am Rasterelektronen-Mikroskop („REM-KL“) bestätigt.

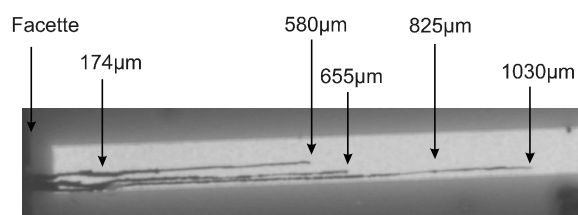


Abb.6.36: Elektrolumineszenz-Bild („dark line picture“) des Lasers 307/10 aus 652429 nach einer Belastung bei  $25^{\circ}\text{C}$  mit  $P=2\text{W}$  über 1000h und Ausfall nach 449h bei weiterer Belastung mit 3W (Abb.6.30).

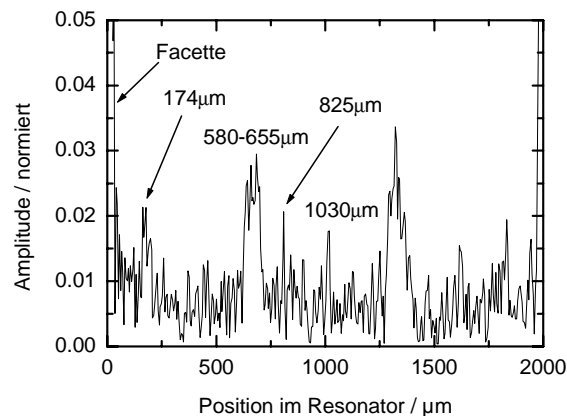


Abb. 6.37: FFT des longitudinalen Modenspektrums des Lasers aus Abb.6.36 nach seinem Ausfall

Das Verfahren wurde zur Vorcharakterisierung von Einzelemittern von Laserbarren eingesetzt. Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz dieses Verfahrens war die Möglichkeit mittels moderner Spektrenanalytoren, die Messzeit auf wenige Minuten pro Emitter zu reduzieren. Bei dem Einsatz im Testvergleich von Laserbarren aus Wafern von OSRAM und dem FBH wurden zum Beispiel 600 Einzelemitter von 25 Barren vermessen. Damit ist eine Möglichkeit zur Vorselektion von Einzelemittern und Barren vor der Alterung zumindest stichprobenartig gegeben.

### 6.7 Ergebnisse eines ersten Vergleichs von Laserbarren für 808nm und 940nm mit AlGaAs – und Al – freien - Epitaxieschichten bei identischer Prozessierung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Ende des zweiten Projektjahres epitaxierte Wafer vom FBH an OSRAM OS für die Barrenprozessierung übergeben. Drei Wafer mit

GaAsP/AlGaAs-LOC Strukturen für 808nm und zwei Wafer mit Al-freien Schichtstrukturen für 940nm wurden im Standardprozess bei OSRAM OS im Rahmen eines größeren Batches aufgefüllt mit Wafern von OSRAM OS prozessiert. Die prozessierten Wafer wurden zunächst bei Jenoptik Laserdiode GmbH montiert und dann im FBH mittels der Spektrenmodulation auf innere Defekte untersucht. Es zeigte sich, dass bei allen Materialchargen innere Defekte allerdings in sehr geringer Anzahl (bei 19 Emittlern von 600 untersuchten) auftraten. Mehr als die Hälfte der Barren erwies sich als defektfrei nach dieser Methode.

Die 808nm Barren wurden bei konstanten Strom von 50A gealtert. Über 2000 Stunden degradierte die Leistung des OSRAM OS Materials um ca. 2 W. Die Barren der Wafer des FBH reagierten unterschiedlich. Bei einer Charge lag der Leistungsverlust ebenfalls bei ca. 2W, die andere Charge degradierte stärker um ca. 6W. Eindeutige Ursachen für diese Unterschiede konnten bei der geringen Probenanzahl bisher nicht gefunden werden.

Ein weiterer Test für 940nm – Barren, in dem allerdings die Al - freien Barren abweichend vom Standardfacettenprozess bei OSRAM OS beschichtet wurden, zeigte für die Al - freien Barren des FBH – Materials eine sehr geringe, quasi nicht messbare Degradation über ca. 200h. Die InGaAs-AlGaAs Barren zeigten eine etwas stärkere Degradation. Der Versuch musste allerdings wegen Kapazitätsengpässen bei Jenoptik Laserdiode GmbH kurz nach dem Ende der Projektlaufzeit abgebrochen werden. Aus der kurzen Testzeit und geringen Stückzahl sind damit noch keine für eine Produktentwicklung ausreichenden Aussagen zu treffen. Die durchgeführten Tests zeigen, dass die Ergebnisse an Einzelemittlern für Laserbarren noch nicht hinreichend und dass die Prozesse insbesondere bezüglich der Facette an die jeweilige Laserstruktur anzupassen sind. Andererseits weist das Ergebnis bezüglich der Al -freien 940nm Barren auf das große Potential dieser Strukturen hin.

## **6. 8 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Im Rahmen des Projektes wurden die physikalisch-technologischen Grundlagen für Hochleistungs-Diodenlaser auf der Basis von Al-freien Quantengraben mit Emissionswellenlängen um 810 nm bzw. vollständig Al-freien Strukturen für 940 nm untersucht, Einzelemitter und Laserbarren realisiert und deren Performance getestet und mit herkömmlichen InAlGaAs-Strukturen verglichen. Mit den im Projekt entwickelten Laserstrukturen konnten bezüglich Schwellenstromdichte, Abstrahlcharakteristik, Spitzenleistung und Konversionswirkungsgrad internationale Spitzenwerte erreicht werden (siehe Tabelle). Diese Werte zeigen, dass diese Laserstrukturen für Einzelemitter eine vergleichbare bzw. bessere Performance als herkömmliche InAlGaAs-Laser für 808nm und 940nm aufweisen.

	Int. Stand 1998	Projektziel	Ergebnis 2001	Int. Stand 2001
808nm				
Schwellenstromdichte	300A/cm <sup>2</sup>	200 A/cm <sup>2</sup>	180 A/cm <sup>2</sup>	
Konversionseffizienz	40%	50%	55%	58%
Max. Leistung für 100µm Streifenlaser	4,7W	5W	8,9W	
Vertikale Divergenz	35°		27° (18°)	
Zuverlässigkeit bei spezifi- scher Belastung von	10mW/µm	30mW/µm	30mW/µm	
940nm				
Schwellenstromdichte		150 A/cm <sup>2</sup>	130 A/cm <sup>2</sup>	
Konversionseffizienz	45%	55%	63%	66%
Max. Leistung für 100µm Streifenlaser	10W	5W	8,8W	11W* * bei 10°C
Vertikale Divergenz	35°		35°	
Zuverlässigkeit bei spezifi- scher Belastung von	10mW/µm	30mW/µm	30mW/µm	30...40mW/µm

Tabelle 6.5 Vergleich internationaler Stand mit den im Projekt erreichten Ergebnissen

In der letzten Spalte sind nur Werte, die die im FBH erzielten übertrafen, eingetragen.

Die angestrebte Langzeitstabilität von 10000h konnte durch Lebensdauertests bei Raumtemperatur und bei einer Belastung von 30 mW/µm für beide Wellenlängen nachgewiesen werden. Bei einer Betriebstemperatur von 50°C konnte dieser Nachweis für die 950-nm-Laser über 5000 h und für 808-nm-Laser über 1700 h erbracht werden. Es zeigte sich allerdings, dass bei den 808nm-Lasern, die eine AlGaAs -Wellenleiterstruktur haben, mit dieser Belastung die Grenze der Facettenstabilität erreicht wurde. Eine Steigerung erscheint hier nur auf der Basis einer verbesserten Facettenpassivierung möglich. Bei den Al - freien Diodenlasern zeigten erste Tests, dass sogar 4W mit guter Lebensdauer noch erreichbar sein sollten.



Für beide Wellenlängen konnten Diodenlaser-Barren hergestellt werden, deren Emissionsleistungen 70 W und damit die Projektzielstellung übertrafen. Die in Kooperation mit OSRAM OS (Prozessierung von epitaxierten Wafern des FBH) und Jenoptik Laserdiode GmbH (Montag und Alterungstests) durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass für Laserbarren mit diesem Material aufgrund der phosphidischen Komponenten und eines anderen mechanischen Spannungszustand die Barrentechnologie von InAlGaAs/AlGaAs - Laserstrukturen nicht einfach übertragbar ist. Der zum Ende der Projektlaufzeit durchgeführte Versuch mit verbesserter Facettenbeschichtung zeigte jedoch auch für alle (!) sieben eingesetzten Al-freien 940nm-Barren eine sehr geringe Degradationsrate und damit das Potential dieser Schichtstrukturen.

Lebensdauertests im FBH wurden an Barren durchgeführt, die auf passiven Wärmesenken mit ausdehnungsangepassten CuW - Submounts montiert waren. Mit einer für passive Wärmesenken typischen geringen Belegungsichte von 20% wurden bei einer Emissionsleistung von 30 W für 808-nm-Laserbarren und 40 W für 940-nm-Laserbarren über 2500 h Degradationsraten ermittelt, die Lebensdauern größer 10000h erwarten lassen. Damit konnte gezeigt werden, dass für diese spezifischen Anwendungsfälle die entwickelten Laserstrukturen, berücksichtigt man dazu noch die hervorragende Strahlqualität, sehr gut geeignet sind.

## 7. Voraussichtlicher Nutzen

Der wesentliche Nutzen des Projekts liegt in der Entwicklung und Realisierung von neuartigen Hochleistungs-Diodenlasern, mit Emissionswellenlängen um 810 nm und 940 nm, die zum Pumpen von Festkörper-Lasern, zur direkten Materialbearbeitung und auch zum Einsatz in der Medizin geeignet sind. Mit ihren Eigenschaften hinsichtlich Emissionsleistung, Abstrahlcharakteristik und Langzeitstabilität liegen sie international in der Spitzengruppe.

Mit den erreichten Ergebnissen konnte sowohl der Barrenhersteller OSRAM OS durch die Resultate der physikalisch-technologischen Untersuchungen als auch deutsche Laserhersteller und Forschungsinstitute durch Bereitstellung von Diodenlasern und Diodenlaserbarren unterstützt werden. Damit können solche Institutionen bereits jetzt ihre Produkte mit Diodenlasern entwickeln, die erst später in eine Produktion einfließen können.

Die erreichten Ergebnisse bildeten und bilden eine gute Basis für die derzeit laufenden Arbeiten im BMBF – Leitprojekt „Modulare Diodenlaser-Strahlwerkzeuge“.

## 8. Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Laufe der Projektbearbeitung gab es auch international eine stürmische Entwicklung bei Hochleistungs-Diodenlasern und – Barren. Die Spitzenleistung von ca. 100mW/ $\mu\text{m}$  für Breitstreifenlaser wurde zwar nicht wesentlich übertroffen, aber im Projektzeitraum von SDL Inc., der Uni Wisconsin, Optopower, dem FhG IAF und wie im Bericht dokumentiert auch in diesem Projekt erreicht. Durch den Einsatz von aktiv (wasser-) gekühlten Mikrokanal-Wärmesenken gelang es dem FhG IAF gemeinsam mit dem FhG ILT 267 W CW-Leistung, die bisher höchste Emissionsleistung, mit Diodenlaser-Barren zu erreichen /20/. Damit wurden 50% der spezifischen maximalen Facettenbelastung von Einzelemittlern erreicht.

Wichtiger als die Steigerung der maximalen Ausgangsleistung sind für den Nutzer die Fortschritte bei der Zuverlässigkeit. Bezüglich der Einzelemitter konnten nur von SDL Inc /21/ spezifische Facettenbelastung  $\geq 30\text{mW}/\mu\text{m}$  für 975nm Telekommunikationslaser erreicht werden.

Für Barren werden nunmehr von mehreren Firmen hohe Zuverlässigkeiten bei 40...50W berichtet. Neben den Arbeiten des Projektpartners OSRAM OS gibt es dazu Veröffentlichungen von der SDL Inc. /19/, Coherent, Inc./11/ und Optopower, Inc./18/ in den USA. Die spezifische Facettenbelastung liegt dabei allerdings nur bei ca. 10mW/ $\mu\text{m}$  Streifenbreite, so dass die Verbesserungen im wesentlichen auf die Optimierung und Anpassung der Technologie zur Verringerung von mechanischen Spannungen des Barrens als auf ein verbesserten Schichtdesign oder Facettentechologie zurückzuführen sind. Die im Projekt erreichten Ergebnisse können also dazu beitragen, die Ausgangsleistungen von Laserbarren weiter zu steigern.

## 9. Literatur

- /1/ S. O'Brien, H. Zhao, A. Schoenfelder, R. Lang, „High power AlGaAs-based 100  $\mu\text{m}$  aperture lasers at 870 and 970 nm“, LEOS'96, Boston, Nov. 1996, Conf. Proc. PDP1.3
- /2/ L. Mawst CLEO'97 Baltimore Mai 97, Proc. CMA 3
- /3/ G. Erbert, F. Bugge, A. Oster, J. Sebastian, R. Staske, K. Vogel, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle, „High CW power diode lasers with unstrained and compressively strained InGaAsP-Qws in AlGaAs waveguides emitting at 8000 nm“, Proc. LEOS'97, WY3, pp. 199-200.
- /4/ F. Daiminger u.a., CLEO'97 Baltimore Mai 97, Proc.CFF1
- /5/ J. K. Wade, L. J. Mawst, M. Jansen, F. Fang, R. L. Nabiev, „High continuous wave power, 0.8  $\mu\text{m}$ -band, Al-free active-region diode lasers“, Appl. Phys. Lett. **70** (2), 149-151, 1997.

- /6/ D. Botez, L. J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez, J. Li, F. Kuech, V. P. Iakovlev, G. I. Suruceanu, A. Caliman, A. V. Surbu, „66% CW wall plug efficiency from Al-free 0.98 $\mu$ m-emitting diode lasers“, *Electron. Lett.* **32** (21), 2012-2013, 1996.
- /7/ H. Yi, J. Diaz, B. Lane, M. Razeghi, “Optical losses of Al-free lasers for  $\lambda=0.808$  and 0.98  $\mu$ m”, *Appl. Phys. Lett.* **69** (20), 2983-2985, 1996.
- /8/ M. R. Gokhale, J. C. Dries, P. Studenkov, D. Z. Garbuzov, S. R. Forrest, „Low-loss, low-threshold 0.98  $\mu$ m wavelength InGaAsP/InGaP/GaAs broadened waveguide lasers grown by GSMBE“, *IPRM'97, Hyannis USA, Proc. TuP7*, 296-299, 1997.
- /9/ D. Botez, “Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad waveguide diode lasers”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 74, 3102-3104, 1999.
- /10/ T. Hayakawa, M. Wada, F. Yamanaka, H. Asano, T. Kuniyasu, T. Ohgoh, and T. Fukunaga, „Effects of broad-waveguide structure in 0.8 $\mu$ m high-power In-GaAsP/InGaP/AlGaAs lasers“ *Appl. Phys. Lett.* Vol. 75, p.1839
- /11/ J. L. Nightingale “High-power, highly reliable, Al-free active region laser diodes”, *Photonics West 2000, 24.02.-28.02.2000 San Jose, USA, (3947-02)*
- /12/ K. Onabe, "Calculation of miscibility gap in quaternary InGaAsP with strictly regular solution approximation", *Jpn. J. Appl. Phys.* **21**, 797-798, 1982.
- /13/ S. Weiss, E. Zakel, H. Reichl, „Mounting of High Power Laser Diodes on Diamond Heat sinks” , *IEEE Trans-CPMT-A*, Vol. 19, No.1 (1996), pp. 46-53
- /14/ T. Hayakawa, “Facet temperature distribution in broad stripe high power laser diodes”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 75, 3204, 1999.
- /15/ D. Botez LEOS'98 inv. Paper WQ1
- /16/ A. Al-Muhanna, L. J. Mawst and D. Botez, „High-power (<10W) continuous-wave operation from 100- $\mu$ m-aperture 0.97- $\mu$ m-emitting Al-free diode lasers“, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.73, No. 9, pp. 1182-1184, 1998
- /17/ Schlußbericht zum Projekt „Halbleiterpumpelaser für 1,3 $\mu$ m-Faserverstärker“, *BMBF-FKZ 01 BP 447/0*, FBH Berlin, Jan. 1999
- /18/ H.G. Treusch, J. Harrison, B. Morris, J. Powers, D. Brown, J. Martin, “Compact high brightness and high power diode laser source for materials processing”, *Proc. SPIE Vol. 3945* (2000), p.23-31
- /19/ B. Lu, E. Zucker, E. Wolak, R. Dohle, D. Zou, S. Bicknese, „High Power, high reliability CW and QCW operation of single AlGaAs laser diode array design“, *Proc. SPIE Vol. 3945*, 293-300, 2000.
- /20/ J. Braunstein, M. Mikulla, R. Kiefer, M. Walther, J. Jandeleit, W. Brandenburg, P. Loosen, R. Poprawe, G. Weimann, „267 W CW AlGaAs / GaInAs Diode Laser Bars“, *Proc. SPIE Vol. 3945*, 17-22, 2000.

/21/ Y. Zou, E. Zucker, K. Uppal, D. Coblenz, P. Liang, M. Peters, R. Craig,  
Reliability and Performance of InGaAs Broad Area Lasers Emitting between 910-980nm  
4285B-20, Photonics West 2001, 20-26 January 2001, San Jose ,CA, USA

## 10. Patente und Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse

Patentanmeldung 100 46 580.3, 20. 09. 2000

„Halbleiterlaser mit geringer Strahldivergenz“

Veröffentlichungen im mittelbaren Zusammenhang mit den Forschungsarbeiten im Projekt

- [V1] G. Oelgart, A. Knauer, A. Oster, M. Weyers; J. .Appl. Phys. 84(1998)1588
- [V2] A. Knauer, G. Oelgart, A. Oster, F. Bugge, S. Gramlich, M. Weyers; J. Cryst. Growth 195 (1998) 694
- [V3] F. Bugge, A. Knauer, I. Rechenberg, G. Beister, J. Sebastian, G. Erbert, M. Weyers, MOVPE Growth of AlGaAs/GaInP Diode Lasers, 9. US-Workshop on MOVPE, Florida, May 1999, J. Electronic Materials.
- [V4] F. Bugge, G. Beister, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Erbert, M. Weyers, AlGaAs/GaInP-Laserdioden für 800 nm und 1000 nm Emissionswellenlänge, DGKK-Workshop, 8./9.12.99 in Stuttgart, DGKK-Workshop, 8./9.12.99 in Stuttgart
- [V5] G. Erbert, F. Bugge, A. Knauer, J. Maege, A. Oster, J. Sebastian, R. Staske, A. Thies, H. Wenzel, G. Tränkle, Diode Lasers with Al-free Quantum Wells embedded in LOC AlGaAs Waveguides between 715 nm and 840 nm, Proc. SPIE, vol. 3628, pp. 19-28, 1999.
- [V6] A. Knauer, F. Bugge, G. Erbert, H. Wenzel, K. Vogel, U. Zeimer, M. Weyers, Optimization of GaAsP/AlGaAs Based QW-Laser Structures for High Power 800 nm Operation, 9. US-Workshop on MOVPE, Florida, May 1999, J. Electronic Materials.
- [V7] A. Oster, F. Bugge, G. Erbert, H. Wenzel, Gain Spectra Measurement of Strained and Strain-Compensated InGaAsP/AlGaAs Laser Structures for  $\lambda \approx 800$  nm, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 5, No. 3, pp. 631 - 636, 1999.
- [V8] H. Wenzel, G. Erbert, P. Enders, Improved Theory of the Refractive-Index Change in Quantum-Well Lasers, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 5, pp. 637-642, 1999.
- [V9] H. Wenzel, High power GaAsP/AlGaAs lasers emitting between 700nm and 800nm, Vortrag auf dem European Semiconductor Laser Workshop Paris 1999.
- [V10] G. Beister, J. Maege, G. Erbert, G. Tränkle, „Non-radiative current in InGaAs/AlGaAs laser diodes as a measure of facet stability“, Solid-State Electronics **42** (11), 1939-1945, 1998.

- [V11] A. Klehr, G. Beister, G. Erbert, A. Klein, J. Maege, I. Rechenberg, J. Sebastian, H. Wenzel and G. Tränkle, "Defect recognition via longitudinal mode analysis of high power fundamental mode and broad area edge emitting laser diodes", erscheint in Journ. Appl. Phys., Juli 2001.
- [V12] R. Hülsewede, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Beister, A. Knauer, G. Erbert, "Beam Quality of High-Power 800nm Broad-Area Laser Diodes with 1 $\mu$ m- and 2 $\mu$ m Large Optical Cavity Structures", Optics Communications, Vol 192/1-2, pp. 69-75, 2001.
- [V13] W. Pittroff, G. Erbert, G. Beister, F. Bugge, A. Klein, A. Knauer, J. Maege, P. Ressel, J. Sebastian, R. Staske, G. Traenkle, "Mounting of High Power Laser Diodes on Boron Nitride Heat Sinks using an Optimized Au/Sn Metallurgy", Proceedings of ECTC 2000, Las Vegas May 21-24, 2000, paper SO4P2. Eingereicht als Veröffentlichung in IEEE Trans. on Advanced Packaging.
- [V14] H. Wenzel, G. Erbert, A. Knauer, A. Oster, K. Vogel and G. Tränkle, "Influence of current spreading on the transparency current density of quantum-well lasers", Semicond. Sci. Technol. vol. 15, pp. 557-560, 2000.
- [V15] I. Rechenberg, A. Klehr, U. Richter, W. Erfurth, F. Bugge, A. Klein, "Interdiffusion-induced degradation of 1017 nm ridge waveguide laser diodes", J. Cryst. Growth 210, pp. 307-312, 2000.
- [V16] A. Knauer, F. Bugge, G. Erbert, H. Wenzel, K. Vogel, U. Zeimer, M. Weyers, "Optimization of GaAsP/AlGaAs-Based QW Laser Structures for High Power 800 nm Operation", J. of Electronic Mat., 29, 1, pp. 53-56, 2000.
- [V17] F. Bugge, A. Knauer, S. Gramlich, I. Rechenberg, G. Beister, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Erbert, M. Weyers, "MOVPE Growth of AlGaAs/GaInP Diode Lasers", J. of Electronic Mat., 29, 1, pp. 57-61, 2000.
- [V18] I. Hähnert, A. Knauer, R. Schneider, I. Rechenberg, A. Klein and W. Neumann, "{110} and {111} Ordering in MOVPE-grown Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P on (001) GaAs Substrates at Low Temperature", Cryst. Res. Technol. vol.35, (2000) pp.831-837.
- [V19] P. Krispin, M. Asghar, A. Knauer, H. Kostial, "Interface properties of isotype GaAs/(In,Ga)P/GaAs heterojunctions grown by metalorganic-vapour-phase epitaxy on GaAs", J. Cryst. Growth 220 (2000) 220-225.
- [V20] U. Zeimer, E. Nebauer, "High resolution X-ray diffraction investigations of He-implanted GaAs", Semicond. Sci. Technol. 15 (2000) 965 - 970.
- [V21] G. Erbert, G. Beister, A. Knauer, J. Maege, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, R. Staske, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle, "Al-free 950nm BA diode lasers with high efficiency and reliability at 50°C ambient temperature", Proceedings of SPIE, Volume 3945, pp. 301-307, 2000.

- [V22] H. Wenzel, G. Erbert, F. Bugge, A. Knauer, J. Maege, J. Sebastian, R. Staske, K. Vogel, G. Tränkle, "Optimization of GaAsP-QWs for High Power Diode Lasers at 800 nm", Proceedings of SPIE, Volume 3947, pp. 32-39, 2000.
- [V23] R. Staske, J. Sebastian, H. Wenzel, H.G. Hänsel, "Influence of mounting stress on polarization degree of electroluminescence of laser diode bars", CLEO Europe, Nizza, Conference Digest S. 237 (2000).
- [V24] R. Hülsewede, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Beister, A. Knauer, G. Erbert, "High power AlGaAs/GaAsP broad area laser diodes with 1 $\mu$ m and 2 $\mu$ m large optical cavity structures", CLEO Europe, Nizza, Conference Digest S. 326 (2000).
- [V25] J. Sebastian, G. Beister, F. Bugge, G. Erbert, H.G. Hänsel, F. Buhardt, A. Knauer, R. Hülsewede, H. Wenzel, R. Staske, M. Weyers, G. Tränkle, "High power 810nm GaAsP/AlGaAs diode lasers with narrow beam divergence", 17th International Semiconductor Laser Conference, Monterey, Conference Digest S. 19-20 (2000)
- [V26] G. Erbert, G. Beister, A. Knauer, J. Sebastian, R. Hülsewede, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle, "High power, highly reliable Al – free 940nm diode lasers", 17th International Semiconductor Laser Conference, Monterey, Conference Digest S. 21-22 (2000)
- [V27] G. Erbert, G. Beister, F. Bugge A. Knauer, J. Sebastian, R. Hülsewede, W. Pittroff, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle, „Performance of 3W/100 $\mu$ m stripe diode lasers at 940nm and 810nm" invited paper Photonics West 2001, 20-26 January 2001, San Jose ,CA, USA
- [V28] G. Erbert, G. Beister, A. Knauer, J. Sebastian, R. Hülsewede, B. Sumpf, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle, "High power 3W Al-free 100 $\mu$ m broad area laser diodes at 940...980nm" CMG3 invited paper CLEO 2001, May 6-11, 2001, Baltimore, MD, USA
- [V29] H. Wenzel, F. Bugge, G. Erbert, R. Hülsewede, R. Staske and G. Tränkle, "High-power diode lasers with small vertical beam divergence emitting at 808 nm", Electronics Letters, Vol. 37, No. 16, pp.1024-1026, August 2001