

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

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

## **Förderschwerpunkt Laser 2000**

**Grundlegende Untersuchungen zur hochgenauen, berührungslosen  
laserinterferometrischen Messung großer Längen im Maschinenbau**

**Teilvorhaben:**

**Grundlegende Untersuchungen leistungsstarker  
durchstimmbarer Halbleiterlaserdioden**

Förderkennzeichen: 13N6838

Laufzeit: 1.10.1996 - 30.09.1999

## **Schlußbericht (März 2000)**

Institutsleiter: Dr. G. Tränkle

Projektleiter: Dr. G. Erbert

Bearbeiter:	Dr. F. Bugge	Dr. A. Knauer	M. Thiemann
	I. Fechner	R. Olschewsky	A. Thies
	J. Fricke	A. Oster	Dr. K. Vogel
	D. Fredrich	Dr. I. Rechenberg	Dr. H. Wenzel
	M. Gielow	Dr. P. Ressel	Dr. M. Weyers
	L. Hofmann	Dr. J. Sebastian	Dr. J. Würfel
	Dr. A. Klehr	R. Selent	P. Wochatz
	A. Klein	Dr. V. Smirnitzki	
	A. Krause	T. Tessaro	

---

**FBH**

Ferdinand-Braun-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

## Inhaltsverzeichnis

### Seite

1.	Aufgabenstellung	3
2.	Voraussetzungen	5
3.	Planung und Ablauf der Arbeiten	5
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
6.	Darstellung der Ergebnisse	11
6.1	Design	11
6.2	Epitaxie	17
6.3	Herstellung der DBR-Gitter	18
6.3.1	Gitter 2. Ordnung	18
6.3.2	Gitter 1. Ordnung	20
6.4	Strukturierung	22
6.5	Montage	24
6.6	Laserdaten	25
6.6.1	Rippenwellenleiter-Laser	25
6.6.2	DBR-Laser mit Gittern 2. Ordnung	25
6.6.3	DBR-Laser mit Gittern 1. Ordnung	33
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	36
7.	Voraussichtlicher Nutzen	36
8.	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	37
	Literatur	37
9.	Veröffentlichungen	39

## 1. Aufgabenstellung

Das industrielle Verbundprojekt „Grundlegende Untersuchungen zur hochgenauen berührungslosen laserinterferometrischen Messung großer Längen im Maschinenbau ordnete sich ein in das Leitprojekt „Laseroptische Mess- und Prüfverfahren für die Produktion und Umweltmesstechnik“ im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Laser 2000“. Der Verbund setzte sich aus dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik Berlin (FBH), der Carl Zeiss Jena GmbH, Innovationszentrum( CZJ) und der Siemens AG, Zentralbereich Produktion und Logistik, ZPL 1 FPS 4(SAG) zusammen.

Ziel des Verbundes waren grundlegende Untersuchungen zur hochpräzisen Distanzmessung mittels laseroptischer Meßmethoden. Dabei sollten Gegenstände mit nicht kooperativen Oberflächen, vorzugsweise metallische Objekte, bei relativ großen Arbeitsabständen von 1m bis 10m mit einer Genauigkeit von 10µm vermessen werden. Basis des in diesem Verbundprojekt zu untersuchenden Messverfahrens war das FMCW (frequency-modulated continuous wave) Laser Radar. Die Messungen sollten reflektorlos erfolgen und unabhängig von den Oberflächeneigenschaften der Messobjekte sein. Am Ende des Projektes soll das Messprinzip anhand eines Demonstrators verifiziert werden.

Das Gesamtprojekt setzte sich aus drei Schwerpunkten zusammen, die jeweils von den Projektpartnern bearbeitet wurden. Dabei war das Ziel des FBH die Realisierung geeigneter Strahlungsquellen für das FMCW–Radar. CZJ sollte vorrangig optische und metrologische Untersuchungen zur berührungslosen Präzisionslängenmessung durchführen und das optische Design sowie die Herstellung der optischen Komponenten übernehmen. Grundlegende Untersuchungen des Messprinzips, der Signalverarbeitung und der Messunsicherheit beim FMCW-Radar wurden von der SAG übernommen. Der Demonstrator wurde bei SAG aufgebaut. Für das Erreichen des Gesamtziels war damit ein stark arbeitsteiliges Vorgehen notwendig, mit einer intensiven Vernetzung und Zeitabstimmung der Arbeiten der Partner.

Ein entscheidender Punkt für die erreichbare Genauigkeit des FMCW-Laserradar-Verfahrens war die Realisierung der Strahlquelle. Dabei hatte das FBH die Aufgabe, Hochleistungslaserdioden zu entwickeln, mit denen diese hochpräzise Längenmessungen durchgeführt werden können. Es mussten spektral sehr schmalbandige Laser sein, mit denen über einen großen Bereich eine kontinuierliche Verschiebung der Emissionswellenlänge (kontinuierlichen Durchstimmung) möglich ist. Aufgrund der geringen Reflektivität der Messobjekte sollte eine hohe Ausgangsleistung der Laserdioden erreicht werden.

Im Einzelnen ergaben sich daraus folgende Anforderungen an die zu entwickelnden Laser:

Zweck	Längenmessung (hohe Genauigkeit)
Ausgangsleistung P	100mW
Wellenlänge $\lambda$	1060nm
spektrale Linienbreite	< 5MHz
Durchstimmbereich	$\Delta\nu = 300\text{GHz}$ (entspricht $\Delta\lambda \approx 1\text{nm}$ )
Durchstimmfrequenz	>100Hz

Für eine hohe Einkoppelleistung in die zu verwendenden Lichtleitfasern musste die Laserstrahlung im räumlichen Grundmode mit möglichst geringen Fernfeldwinkeln erfolgen. Hieraus ergaben sich folgende Schwerpunkte für die Arbeiten im FBH:

1. a) Epitaxie von Schichtstrukturen für Halbleiterlaser mit speziellen Quantengraben  
b) Überwachen von Gitterstrukturen
2. Realisierung von Mehrsektionslasern mit Bragg-Reflektoren im Wellenlängenbereich um 1060nm
3. Untersuchungen der Laserparameter, insbesondere der Linienbreite und des Durchstimmverhaltens der hergestellten Laser hoher Ausgangsleistung

In der Mitte des Jahres 1998 änderte sich die Zielstellung des Projektes, da eine Einsatzanalyse beim späteren Anwender Siemens-KWU zeigte, dass für das geplante Anwendungsgebiet andere Lösungen gefunden wurden. Eine neue Anwendung für das FMCW-Laserradar hat ein Verfahren zur Verschleißmessung von Oberleitungsstromkabeln zum Gegenstand. Hier ist, da mehrere Messkanäle parallel betrieben werden sollen, eine höhere Laserleistung und eine größere Durchstimmfrequenz bei einem reduzierten Durchstimmbereich wesentlich. Es ergaben sich folgende geänderte Zielparametern:

Zweck	Formerkennung (hohe Meßgeschwindigkeit)
Ausgangsleistung P	>100mW
Wellenlänge $\lambda$	1060nm
spektrale Linienbreite	< 5MHz
Durchstimmbereich	$\Delta\nu = 60\text{GHz}$
Durchstimmfrequenz	> 1kHz
räumlicher Grundmode	ja

## **2. Voraussetzungen**

Das FBH besaß für die erfolgreiche Bearbeitung des Projektes alle nötigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Herstellung von Diodenlasern, die im lateralen Grundmode arbeiten. Die Technologieschritte zur Realisierung von Grundmodelasern, mit metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE), Strukturierung und Isolatorbeschichtung wurden weitgehend beherrscht. Erfahrungen in der Strukturierung von Gittern waren ebenfalls vorhanden.

Die Messtechnik zur räumlich-, zeitlichen und spektralen Charakterisierung von Halbleiterlasern waren weitgehend vorhanden. Gleiches galt für die Bestimmung sehr schmaler Linienbreiten der Emissionsstrahlung. Weiterhin standen Messplätze zur Untersuchung des Alterungsverhaltens der entwickelten Laser zur Verfügung.

Im FBH vorhandene Rechenprogramme ermöglichten die theoretische Modellierung der Laserstrukturen innerhalb des Instituts.

Insgesamt standen im FBH zu Projektbeginn die erforderlichen Grundtechnologien für eine komplette Laser-Chip-Herstellung sowie langjährige Erfahrungen bei der Materialanalyse, der Modellierung und der messtechnischen Charakterisierung der Laser zur Verfügung.

Die Entwicklung der DBR - Laserdioden umfasste den gesamten technologischen Zyklus von der Epitaxie über den Scheibenprozess bis zur Chip-Vereinzelung und Montage der Dioden auf spezielle Träger (Submounts). Diese Montage erfolgte auf selbstentwickelten AlN-Trägern, die von der Firma Sumitomo hergestellt wurden.

Im Rahmen des Projektes waren neu zu entwickeln:

- Technologie von DBR – Lasern mit Gitter 1. Ordnung
- Aufbautechnik
- Messtechnik für die Linienbreitenbestimmung

## **3. Planung und Ablauf der Arbeiten**

Durch die enge Verzahnung der Arbeiten zwischen den Projektpartnern mussten die Zeitpläne der einzelnen Partner sehr gut aufeinander abgestimmt werden. Um die Zielparameter der Laserdioden zu erreichen, wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

1. In den ersten 6 Monaten des Projektes wurden mittels MOVPE die modellierten Strukturen für Laserdioden der Wellenlänge von 1060 nm gezüchtet. Bis auf die aktive Zone konnte dabei auf Erfahrungen mit bereits realisierten Rippenwellenleiter-(RW)-Laserdioden für 1020 nm zurückgegriffen werden.

2. Parallel zu diesen Arbeiten wurde ein Messplatz zur Untersuchung der Linienbreiten und des Durchstimmverhaltens der Laser erstellt.
3. In der zweiten Hälfte des ersten Bearbeitungsjahres wurden integrierte Bragg-Reflektoren mit Gittern 2. Ordnung im GaAs Wellenleiter erzeugt und überwachsen. Aus diesen Strukturen wurden DBR-Laser hergestellt. Erste Muster konnten den Verbundpartnern vorfristig zur Verfügung gestellt werden.
4. Im zweiten Projektjahr erfolgte eine Optimierung der DBR-Laser mit Gitter 2. Ordnung. Die hergestellten 3-Sektions-DBR-Laser wurden bezüglich ihrer Leistungs-Strom Kennlinien, der spektralen Eigenschaften und der Feldverteilung untersucht. Auch die dynamischen Eigenschaften wurden getestet, wobei ein Hauptaugenmerk auf den Durchstimbereich und die Schnelligkeit des Durchstimmens gerichtet wurde. Diese Arbeiten führten zur weiteren Optimierung der Struktur bezüglich des dynamischen Verhaltens. Erste Untersuchungen zum Degradationsverhalten wurden durchgeführt.
5. Am Ende des zweiten Projektjahres konnten den Partnern optimierte DBR-Laser mit Gittern 2. Ordnung zur Verfügung gestellt werden.
6. Durch Änderung der Themenstellung Mitte 1998 erfolgte eine Optimierung der Laser zu hohen Ausgangsleistungen hin.
7. Parallel zu diesen Arbeiten wurden DBR-Laser mit Gittern 1. Ordnung mit höherem Reflexionsvermögen und besserer Linienstabilisierung entwickelt und charakterisiert.
8. Im dritten Projektjahr wurden DBR-Laser mit höheren Ausgangsleistungen im longitudinalen Monomodebetrieb realisiert. Damit konnten alle Zielparameter weit übertroffen werden.

Während der Projektlaufzeit gab es bei der Entwicklung der DBR-Laser beachtliche Fortschritte. Bei der Entwicklung gelang es, bezüglich Ausgangsleistung, Monomode-Emissionsleistung, Linienbreite und Durchstimmverhalten internationale Spitzenwerte zu erreichen. Dies war vorrangig den Maßnahmen zur Struktur-Optimierung, der Realisierung von Gittern 1. Ordnung in GaAs-Wellenleitern und der Optimierung des Aufbaus zu verdanken. Auch die angestrebten Daten in der Lebensdauer ( $\beta > 10^4$ ) konnten nachgewiesen werden.

## 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Für ein frequenzmoduliertes Dauerstrich Laser-Radar (FMCW-Ladar) wurden zu Projektbeginn, wie in Veröffentlichungen dargestellt, Laserdioden im Wellenlängenbereich 810nm - 850nm mit einfachem Fabry-Perot-Resonator /1, 2/ oder im Wellenlängenbereich um 1550nm mit einem integrierten, frequenzselektiven Resonator /3/ eingesetzt. Die zuerst genannte Art von Laserdioden zeigte nur einen relativ geringen Frequenzhub (ca. 50 GHz), allerdings bei hoher Leistung (50 mW) und geringer Linienbreite (< 10 MHz). Die Abstimmung erfolgte durch die Erhöhung des Injektionsstromes und war thermisch bedingt. Die in den Vorarbeiten des einen Verbundpartners (Siemens AG) eingesetzten Laserdioden der Wellenlänge 1550 nm wiesen einen großen Frequenzhub (250 GHz), bei geringer Ausgangsleistung (~10 mW) auf. Aufgrund der elektronisch bedingten Durchstimmung der Frequenz war die Durchstimmrate sehr hoch, jedoch vergrößerte sich die Linienbreite auf ca. 50 MHz. Über Laserdioden mit integriertem, frequenzselektivem Resonator und sehr hoher Ausgangsleistung (P ~ 200 mW), aber ohne die elektronische Durchstimmung und ohne Angaben zur Linienbreite wurde von SDL berichtet /4/. Diese Arbeit zeigte das Potential von DBR - Rippenwellenleiterlaserdioden für den angestrebten Einsatz auf.

Für die spezifischen Anforderungen eines FMCW-Radar (Durchstimmbereich 300 GHz, Durchstimmrate im kHz-Bereich, Ausgangsleistung > 100 mW und sehr geringer Linienbreite < 10 MHz) waren weder grundlegende Untersuchungen an bekannten Laserstrukturen publiziert noch spezielle Strukturen erforscht. Insbesondere die bei hohen Leistungen auftretende Vergrößerung der Linienbreite, wie sie speziell bei Halbleiterlasern im 1.55  $\mu\text{m}$  Wellenlängenbereich auftritt, war ein noch nicht gelöstes Problem. Im einzelnen gab es zu den zu bearbeitenden Teilproblemen folgenden Stand der Technik:

### 4.1. Realisierung von Bragg-Reflektoren

In DFB- und DBR-Laserdioden für den Wellenlängenbereich  $\lambda < 1100 \text{ nm}$  waren als Bragg-Reflektoren in der Regel Gitter zweiter Ordnung mit einer Periode  $\Lambda = 230 - 280 \text{ nm}$  realisiert, da man diese Gitter noch relativ einfach durch die holografische Fotolithografie herstellen konnte z. B. /5, 6, 7/. Die Gitter zweiter Ordnung ( $m = 2$ ) haben jedoch gegenüber Gittern erster Ordnung ( $\Lambda = 110 - 140 \text{ nm}$ ;  $m = 1$ ) erhebliche Nachteile. Laser mit diesen Gittern haben gitterbedingte Strahlungsverluste. Außerdem ist es relativ schwer, die Rückkopplung zu kontrollieren, da sie bei Gittern zweiter Ordnung deutlich von der Form des Gitters abhängt. In der Literatur beschriebene Laser mit Bragg-Reflektoren, die aus Gittern zweiter Ordnung bestehen, wiesen deshalb eine größere Linienbreite als Laser mit Gittern erster Ordnung auf.

Die Herstellung von Gittern erster Ordnung durch holografische Fotolithografie oder durch Elektronenstrahlithografie war zu Beginn des Projektes ein technologisch sehr schwieriger

Prozess /8/. Bragg-Reflektoren mit Gittern erster Ordnung konnten nur durch Elektronenstrahl-Lithografie hergestellt werden /5, 9, 10, 11, 12/. Dieses Verfahren hatte neben den sehr langen Belichtungszeiten, die durch das sequentielle Schreiben bedingt sind einen weiteren Nachteil gegenüber der holografischen Fotolithografie. Die Nanometer-Lithografie erfordert sehr kleine Größen des zu belichtenden Feldes. Bei normaler Größe des Gittergebietes müssen mehrere Felder zusammengesetzt werden, womit "Field Stitching Errors" auftreten. Dies führt zu Phasenverschiebungen an den Feldgrenzen, die die Lasercharakteristiken negativ beeinflussen.

## 4.2. Durchstimmung und realisierte Laserstrukturen

Die Frequenz oder Wellenlänge der Diodenlaser kann über eine Änderung der Brechzahl, variiert werden entweder durch eine Temperaturänderung (thermische Abstimmung) oder durch die Injektion von Ladungsträgern (elektrische Abstimmung), /13, 14/. Die Injektion von Ladungsträgern hat sowohl einen thermische Effekt als auch einen rein elektronischen durch die Änderung der Ladungsträgerdichte (sogenannter Drude-Effekt) zur Folge /13/. Typisch für die elektronische Durchstimmung ist eine spektrale Linienverbreiterung durch das Injektions-Rekombinations-Schrotrauschen. Ein weiteres Problem dieses Verfahrens ist eine Intensitätsmodulation durch die Strominjektion im aktiven Bereich.

Verbesserte Eigenschaften konnten durch die Trennung von Gewinn- und Abstimmbereich, wie sie für 3-Sektions-DBR-Laser im Wellenlängenbereich um  $1,55 \mu\text{m}$  in /15/ beschrieben wurden, erreicht werden. Bei dem beschriebenen Laser wurde die Wellenlänge durch Strominjektion in die Phasen- und DBR-Sektion durchgestimmt. Es konnte ein kontinuierlicher Abstimmbereich von 380 GHz ( $3,1 \text{ nm}$ ) bei 2 mW Ausgangsleistung nachgewiesen werden. Die Linienbreite erhöhte sich mit abnehmender Wellenlänge von 23 MHz auf 100 MHz. Eine weitere Möglichkeit der Trennung von Durchstimmbereich und Gewinnbereich wurde mit einem TTG-DFB-Laser (TTG = tunable twin guide) /16/ realisiert. Über einen Abstimmbereich von 9,2 nm konnte eine Ausgangsleistung von 1 mW bei einer Linienbreite von 30 MHz erzielt werden.

Diese und andere Konzepte für schmalbandige, abstimbare Laser wurden bisher überwiegend im Materialsystem InP/InGaAsP realisiert, da dort bei den für die Realisierung der Braggreflektoren notwendigen Ätz- und Überwachungsmethoden wesentlich weniger Probleme auftraten, als im Materialsystem GaAs/AlGaAs. Zugleich war die elektronische Abstimmung bei den langwelligen Lasern wesentlich effektiver, da die ladungsträgerinduzierte Änderung der Brechzahl proportional zum Quadrat der Wellenlänge ist. Ein Problem stellt jedoch die geringe Leistung ( $P \leq 10 \text{ mW}$ ) im langwelligen Bereich dar. Zu abstimbaren kurzwelligeren Lasern ( $\lambda < 1,1 \mu\text{m}$ ) gab es zu Projektbeginn wesentlich weniger Veröffentlichungen, jedoch war auch hier die Technologie soweit fortgeschritten, dass erste durchstimbare Laser mit einer Leistung  $P < 10 \text{ mW}$  für die Wellenlänge  $\lambda = 852$

nm kommerziell erhältlich waren /17/. Eine Hauptursache für die geringe Aktivität auf dem Gebiet kurzweiliger abstimbarer Laser war, dass man für DBR-Laser in der Regel eine Mehrschrittepitaxie benötigte, die bei dem in diesem Wellenlängenbereich üblichen Al-haltigen Materialsystem erheblich komplizierter ist. Es wurden deshalb verschiedene Verfahren in der Literatur vorgestellt, um DBR-Laser ohne Mehrschrittepitaxie herzustellen. Eine Möglichkeit bestand darin, Gitter mit großer Ätztiefe /18, 19/ zu realisieren. Da das Gitter über eine Tiefe von  $> 1 \mu\text{m}$  geätzt werden musste, ist dieses Verfahren auf Gitter höherer Ordnung ( $m = 3$ ) beschränkt. Mit derartigen Lasern konnte durch elektronische Abstimmung der DBR-Sektion bei geringer Leistung eine kontinuierliche Durchstimmung von 0,5nm bei  $\lambda \approx 1070 \text{ nm}$  erreicht werden.

Andere Versuche, eine Mehrschrittepitaxie zu vermeiden, beruhten auf Strukturkonzepten, die eine Wechselwirkung des Gitters mit dem evaneszenten optischen Feld in Stegwellenleitern nutzten. Dazu wurden die Gitter nur rechts und links des Steges durch Elektronenstrahlithografie /10/ oder Röntgenstrahlithografie /20/ hergestellt. Diese Laserstrukturen, die das evanescente Feld ausnutzten, hatten die Nachteile, dass bei der Herstellung des Steges die Steghöhe oder -tiefe sehr genau eingehalten werden muss, um eine optimale Wechselwirkung zwischen Gitter und optischen Feld zu realisieren und dass sie an die oben genannten sehr aufwendigen Technologien zur Gitterherstellung gebunden sind.

Die besten Ergebnisse bezüglich des Abstimmbereichs und der spektralen Linienbreite für GaAs/AlGaAs-Laser wurden in /9/ bzw. /11/ veröffentlicht. Die Autoren entwickelten einen abstimmbaren 3-Sektions-GaAs-AlGaAs Laser mit DBR-Reflektor und Phasenkontrollsektion für Wellenlängen von 780 nm und 852 nm. Durch Optimierung der QW-Struktur, der Ladungsträger-Sperrschicht, die den Ladungsträger-Verlust an der überwachsenen Grenzfläche verhindern soll, und durch Optimierung der Si-Implantation für die Erzeugung eines Disorderings in den passiven Lasersektionen, wurde mit diesen Laserdioden ein Abstimmbereich von ca. 2 THz (allerdings verbunden mit Modensprüngen) und eine spektrale Linienbreite kleiner 1 MHz im optimalen spektralen Bereich bei einer Ausgangsleistung von ca. 10 mW erreicht. Die Gitter für diese Laser wurden mit Hilfe der Elektronenstrahlithografie /5/ hergestellt. Diese Arbeiten waren die Grundlage für kommerziell angebotene Laser /17/. Eine thermische Abstimmung ohne Ladungsträgerinjektion über eine Widerstandsheizung wurde in /21/ vorgestellt. Die Widerstandsheizung wurde auf der Epitaxieseite in einer Ti/Pt- oder InP-Widerstandsschicht ausgebildet. Mit diesem Konzept erreichten die Autoren eine kontinuierliche Durchstimmung der Wellenlänge von  $\Delta\lambda \approx 1 \text{ nm}$ . Die minimale Linienbreite betrug 6,1 MHz bei 5,5 mW im Ausgangszustand und 6,7 MHz bei 3,7 mW bei angelegter Spannung über den passiven Sektionen. Diese Änderung der Linienbreite war wesentlich geringer als bei Abstimmung durch Ladungsträgerinjektion. Die Abstimmgeschwindigkeit betrug 0,5 ms.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Bei der Erläuterung der Zielstellung wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Projektbearbeitung in Kooperation mit der Carl Zeiss Jena GmbH (Innovationszentrum) und der Firma Siemens AG erfolgte. Die Koordinierung der Gesamtaufgabe lag beim Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik. Die Projektarbeiten erfolgten in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern.

Bei der Entwicklung der Epitaxie-Strukturen erfolgte eine Zusammenarbeit mit der Philipps-Universität Marburg. Hier konnten in Marburg vorhandene neue Gasquellen für die MOVPE benutzt werden. Im Rahmen des Gesamtverbundes „Grundlagen und Erprobung neuer Strahlquellen in der Metrologie“ wurden die erreichten Ergebnisse kontinuierlich vorgestellt. In diesem Rahmen ergab sich eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Physik der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. Hier konnte ein entwickelter Linienbreiten-Messplatz zur Bestimmung der Linienbreite der entwickelten DBR-Laser genutzt werden. Ein Student der Universität konnte im Rahmen des Projektes sein Praktikum im Institut durchführen.

Weiterhin erfolgte mit den KMUs TUI-Optics und Sacher Lasertechnik ein reger Informationsaustausch über den Einsatz von Diodenlasern in deren Lasergeräten (externe, frequenzselektive Rückkopplung). Es wurden die KMUs seitens des FBHs mit Mustern von Diodenlasern unterstützt.

## 6. Darstellung der Ergebnisse

Für die Realisierung der geforderten Laserlichtquellen wurde die Arbeit in 3 Etappen gegliedert. In der ersten Phase wurde die Realisierung eines Mehrsektionslasers mit einem Rippenwellenleiter angestrebt, der bei einer Wellenlänge von etwa 1060 nm emittiert und eine Ausgangsleistungen von >100 mW erreicht. In dieser Phase sollte der prinzipielle Nachweis der Machbarkeit geeigneter Laserlichtquellen für das Laserradar nachgewiesen werden.

Für die Herstellung von spektral sehr schmalbandigen Lasern mit einem großen kontinuierlichen Durchstimmbereich (kontinuierliche Verschiebung der Emissionswellenlänge) waren im zweiten Arbeitsschritt die Realisierung von DBR-Lasern mit einem Gitter 2. Ordnung vorgesehen. In dieser Phase sollte vor allem die kontinuierliche Durchstimmung bei geringer Linienbreite der Strahlung untersucht werden. Der letzte Abschnitt der Arbeiten zielte vor allem auf das Erreichen einer hohen Ausgangsleistung der Laserstrahlung bei Nachweis der angestrebten Zuverlässigkeit ab.

### 6.1. Design

Die epitaktische Schichtenfolge des DBR-Lasers ist schematisch in Abb.1 dargestellt.

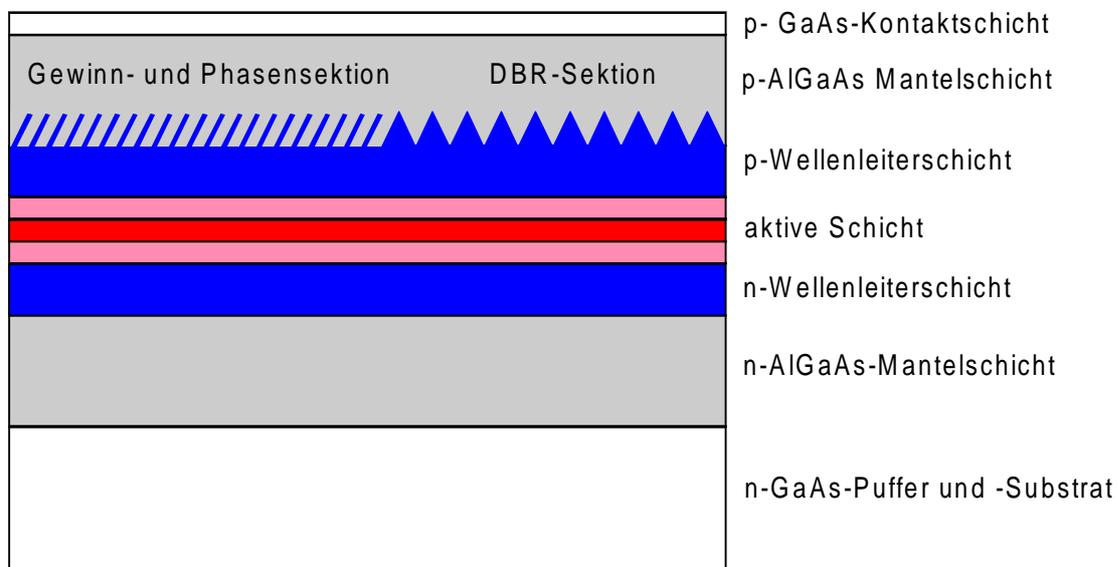


Abb. 1: Schematischer Längsschnitt durch die Epitaxiestruktur. Die p-Wellenleiterschicht in der Gewinn- und Phasensektion wird mit dem Gitter geätzt oder bleibt vollständig erhalten, je nachdem, ob bei der Lithografie Positiv- oder Negativ-Fotolack verwendet wird. Der entsprechende Anteil der p-Wellenleiterschicht ist schraffiert gezeichnet.

Der DBR-Laser enthält im Unterschied zum Fabry-Perot-Laser in einer Sektion an der Grenzfläche zwischen dem p-GaAs-Wellenleiter und der p-AlGaAs-Mantelschicht eine

Korrugation, die eine periodische Änderung des effektiven Brechungsindex in Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle erzeugt. Erfüllt die Gitterperiode  $\Lambda$  dieser Korrugation die Bragg-Bedingung:  $\Lambda = m \lambda_L / (2 n_{\text{eff}})$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$  Ordnung des Gitters,  $\lambda_L$  Laserwellenlänge,  $n_{\text{eff}}$  effektiver Brechungsindex), so wirkt diese Sektion als wellenlängenselektiver Reflektor. Im Projektzeitraum wurden 3 verschiedene DBR-Laserstrukturen untersucht:

1. DBR-Laser mit Gittern 2. Ordnung in einer GaAs-Wellenleiterschicht
2. DBR-Laser mit Gittern 1. Ordnung in einer InGaP-Wellenleiterschicht
3. DBR-Laser mit Gittern 1. Ordnung in einer GaAs-Wellenleiterschicht

Die Verwendung von GaAs oder InGaP in der Wellenleiterschicht sicherte die Herstellung der notwendigen Gitterstruktur mit relativ einfachen Methoden und guten Bedingungen für das Überwachsen. Untersuchungen an DBR-Lasern mit Gitter 1. Ordnung mit InGaP – Wellenleiter zeigten, dass die erwartete Leistungserhöhung und Modenstabilität nicht erreicht wurde. Es konnte nur eine maximale Ausgangsleistung von 75 mW erreicht werden, wobei ab etwa 50 mW eine zweite longitudinale Mode emittierte. Da die Technologie zur Herstellung dieser Struktur größere Probleme aufwies, und sich durch die Anschaffung eines neuen kurzwelligeren BelichtungsLasers die Möglichkeit ergab, Gitter 1. Ordnung auch in GaAs-Wellenleitern herzustellen, wurde auf die weitere Entwicklung von DBR-Lasern mit Gittern 1. Ordnung in InGaP-Wellenleitern verzichtet.

Tabelle 1 und 2 enthalten genauere Angaben über die Zusammensetzung, Dicken und Dotierung der Halbleiterschichten. Das Design der Strukturen erfolgte unter folgenden Gesichtspunkten:

- (1) die Kopplungskonstante (beim Gitter 2. Ordnung der Realteil) sollte im Bereich 20 bis  $70 \text{ cm}^{-1}$  liegen, um sowohl eine ausreichende Rückkopplung als auch eine gute Seitenmodenunterdrückung zu erhalten;
- (2) die Halbwertsbreite des vertikalen Fernfeldes sollte maximal  $40^\circ$  betragen, um die Strahldivergenz zu beschränken;
- (3) die p-Mantelschicht sollte möglichst dünn sein, um das thermische Durchstimmen der Laserwellenlänge durch die Heizstreifen auf der p-Kontaktschicht der Phasen- und DBR-Sektion zu erleichtern.

Die Kopplungskonstante bestimmt die Reflektivität des Bragg-Gitters und hängt, wie auch die vertikale Strahldivergenz, von der Dicke der Wellenleiterschichten und der Differenz der Brechzahlen der Wellenleiter- und Mantelschichten ab. Letztere wird im AlGaAs-Materialsystem durch die Differenz des AlAs-Anteils bestimmt. Bei den Strukturen mit GaAs-Wellenleiterschichten wurden Mantelschichten aus  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  verwendet.

Die Kopplungskonstante hängt zusätzlich noch von der Tiefe des Gitters ab. Diese Abhängigkeit ist in Abb. 2 dargestellt. Da bei unserer Struktur das Gitter in die Wellenleiterschicht geätzt wird, ergibt sich die Mindestdicke der Wellenleiterschicht aus der Ätztiefe plus einem genügend großem Abstand zur aktiven Schicht. Die mit einem nasschemischen Prozess maximal erreichbare Gittertiefe errechnet sich nach der Formel  $d_G = \Lambda/2 \tan(54^\circ)$ .

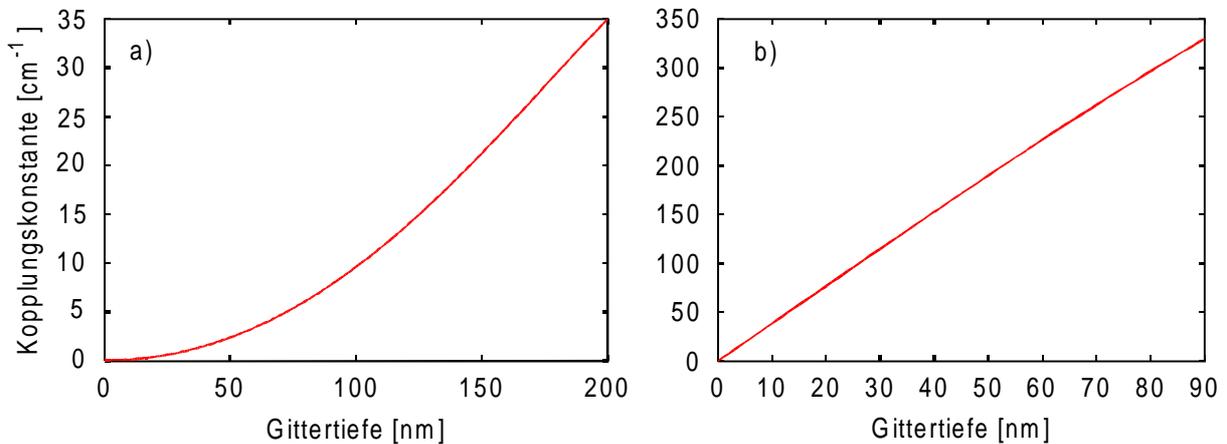


Abb. 2: Berechnete Kopplungskonstante der Strukturen mit GaAs-Wellenleiter als Funktion der Gittertiefe für ein Gitter 2. Ordnung (a) und ein Gitter 1. Ordnung (b). Es wurden die Schichtstrukturen von Tab. 1 bzw. Tab. 2 zugrunde gelegt. Das Gitter wurde als sinusförmig angenommen.

Bei einem Gitter 2. Ordnung ( $\Lambda \approx 312 \text{ nm}$ ) sollte das Gitter wegen der inherent kleinen Kopplungskonstante (siehe Abb. 2) so tief wie möglich geätzt werden. Experimentell wurde eine maximal erreichbare Gitterätztiefe von 170 nm gefunden, woraus sich die Dicken der Wellenleiterschichten in Tab. 1 ableiten. Dabei ist noch zu beachten, dass die p-Wellenleiterschicht in der Gewinn- und Phasensektion mit dem Gitter geätzt oder vollständig erhalten bleibt, je nachdem, ob bei der Lithografie Positiv- oder Negativ-Fotolack verwendet wird.

Schicht	Material	Dicke in nm	Dotierung in $\text{cm}^{-3}$	Kommentar
p-Kontaktschicht	GaAs	50	$2\text{E}19$	
p-Mantelschicht	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	1100	$1\text{E}18$	2. Epitaxie
p-Wellenleiter	GaAs	270 / 220	intrinsisch	positiver / negativer Fotolack
Spacer	$\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$	18	intrinsisch	
Quantum Well	$\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	8	intrinsisch	
Spacer	$\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$	18	intrinsisch	
n-Wellenleiter	GaAs	100	intrinsisch	
n-Mantelschicht	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	2100	$1\text{E}18$	1. Epitaxie

Tab. 1: Schichtstruktur des DBR-Lasers mit GaAs-Wellenleiterschicht und Gitter 2. Ordnung (Lithografie mit positivem oder negativem Fotolack).

Bei einem Gitter 1. Ordnung ( $\Lambda \approx 156 \text{ nm}$ ) erreicht man wesentlich größere Kopplungskonstanten. Jedoch wirkt sich hier wegen der kleineren Ätztiefen das Einebnen des Gitters um etwa 20-30 nm (siehe Abb. 10) während der 2. Epitaxie viel stärker aus als bei einem Gitter 2. Ordnung, so dass auch hier so tief wie möglich geätzt wurde. Es konnte eine maximale Ätztiefe von 70 nm erreicht werden, woraus sich wiederum die Dicken der Wellenleiterschichten in Tabelle 2 ergeben.

Schicht	Material	Dicke in nm	Dotierung in $\text{cm}^{-3}$	Kommentar
p-Kontaktschicht	GaAs	50	2E19	
p-Mantelschicht	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	1400	1E18	2. Epitaxie
p-Wellenleiter	GaAs	120	intrinsisch	
Spacer	$\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$	18	intrinsisch	
Quantum Well	$\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	8	intrinsisch	
Spacer	$\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$	18	intrinsisch	
n-Wellenleiter	GaAs	50	intrinsisch	
n-Mantelschicht	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	2100	1E18	1. Epitaxie

Tab. 2: Schichtstruktur des DBR-Lasers mit GaAs-Wellenleiterschicht und Gitter 1.Ordnung (positiver Fotolack).

Die laterale Wellenführung wurde durch einen Rippenwellenleiter realisiert. Dabei wird nach der 2. Epitaxie eine Rippe in die Kontakt- und Mantelschicht geätzt. Dadurch wird ein Sprung der effektiven Brechzahl  $n_{\text{eff}}$  in lateraler Richtung erreicht. Dieser Sprung  $\Delta n_{\text{eff}}$  muss eine bestimmte Mindestgröße haben, um eine stabile laterale Führung der Grundmode zu gewährleisten. Auf der anderen Seite darf er nicht zu groß sein, damit nicht höhere Lateralmoden anschwingen. Aus Erfahrung bei der Herstellung von RW-Fabry-Perot-Lasern wurde ein  $\Delta n_{\text{eff}}$  von etwa  $10^{-2}$  in der Gewinnsektion angestrebt, was Ätztiefen von etwa 950nm (Gitter 2. Ordnung) bzw. 1200 nm (Gitter 1. Ordnung) entspricht.

In Abb. 3 ist das Reflexionsspektrum eines Bragg-Reflektors für ein Gitter 2. Ordnung und für ein Gitter 1. Ordnung für 2 Kopplungskonstanten und 2 Sektionslängen dargestellt. Die Berechnung erfolgte durch Lösung der gekoppelten Wellengleichungen (coupled wave equations). Man erkennt, dass durch den Übergang vom Gitter 2. Ordnung zum Gitter 1. Ordnung die maximale Reflektivität bei gleichem Realteil der Kopplungskonstanten zunimmt. Ein weitere Zunahme kann man durch eine Vergrößerung der Kopplungskonstanten erhalten, gleichzeitig jedoch verbunden mit einer Vergrößerung des Reflexionsplateaus. Wenn die Länge der DBR-Sektion vergrößert wird, nimmt die maximale Reflektivität zu, ohne das das Reflexionsplateau größer wird. Allerdings ändert sich die Maximalreflektivität bei einer Kopplungskonstanten von  $\kappa = 30 \text{ cm}^{-1}$  nur wenig, wenn man die Länge des Bragg-

Reflektors verdoppelt (siehe Abb. 3). Die Abhängigkeit der maximalen Reflektivität von der Länge des Bragg-Reflektors ist für verschiedene Kopplungskonstanten in Abb. 4 dargestellt. Je größer  $\kappa$ , um so kürzer kann der Bragg-Reflektor sein.

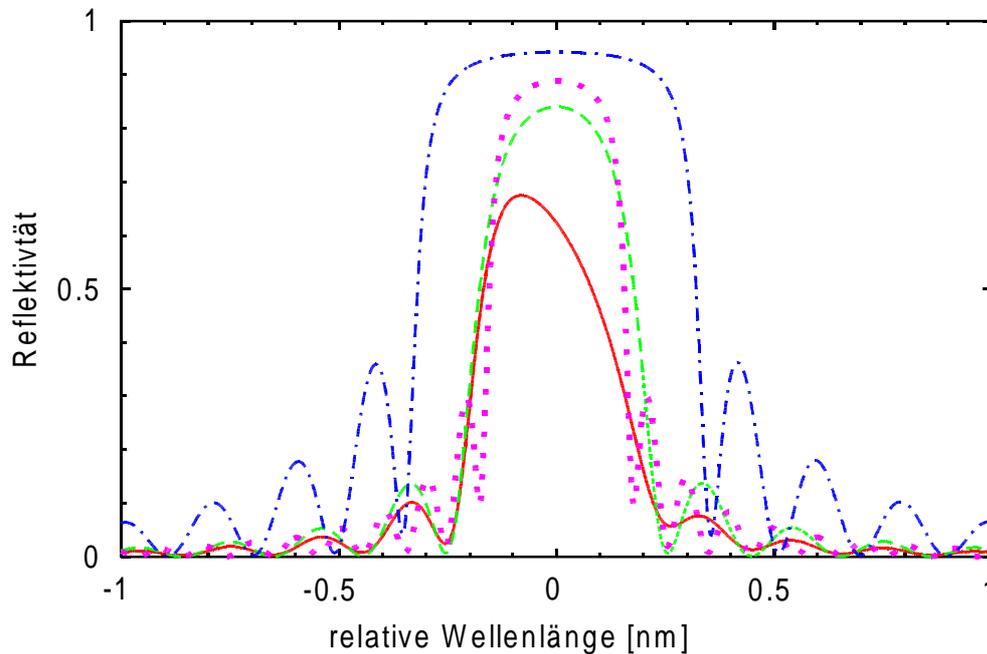


Abb. 3: Reflexionsspektrum eines 700  $\mu$ m langen Bragg-Reflektors für ein Gitter 2. Ordnung (rot durchgezogen, Realteil( $\kappa$ ) = 30 cm<sup>-1</sup>, Imaginärteil( $\kappa$ ) = -5 cm<sup>-1</sup>) und für ein Gitter 1. Ordnung (grün gestrichelt,  $\kappa$  = 30 cm<sup>-1</sup>, blau gepunktet-gestrichelt,  $\kappa$  = 60 cm<sup>-1</sup>). Das Reflexionsspektrum eines 1400  $\mu$ m langen Bragg-Reflektors für ein Gitter 1. Ordnung ( $\kappa$  = 30 cm<sup>-1</sup>) ist violett gepunktet dargestellt. Die Bezugswellenlänge ist 1060 nm.

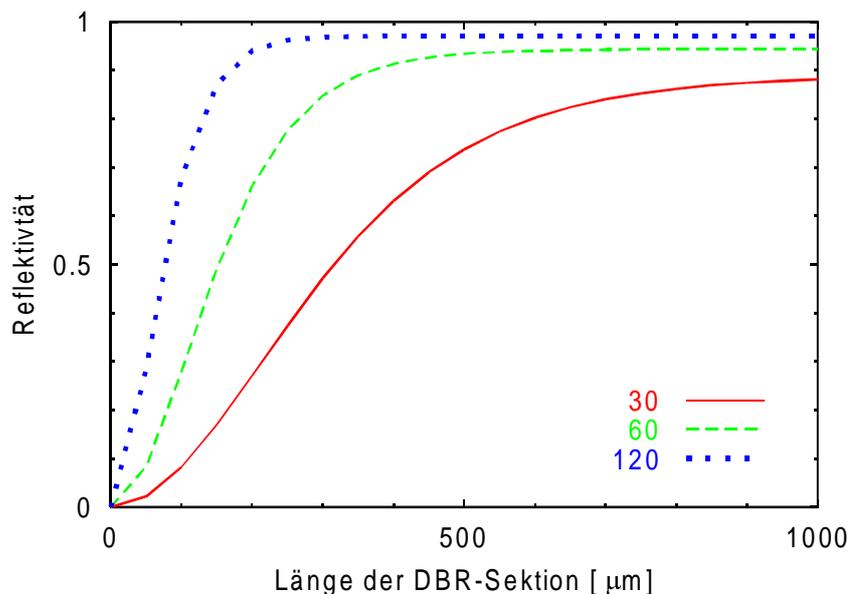


Abb. 4: Maximale Reflektivität eines Bragg-Reflektors (Gitter 1. Ordnung) in Abhängigkeit von dessen Länge für verschiedene Werte der Kopplungskonstanten  $\kappa$  in cm<sup>-1</sup>.

Die Zielstruktur, ein 3-Sektions-DBR-Laser, ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Die Gesamtlänge und das Verhältnis der Längen zwischen den einzelnen Sektionen kann variiert werden. Als günstigste Variante ergab sich ein Laser mit einer Gesamtlänge von 2000  $\mu\text{m}$  mit einer 1000  $\mu\text{m}$  langen Gewinnsektion, einer 300  $\mu\text{m}$  langen Phasensektion und einer 700  $\mu\text{m}$  langen DBR-Sektion (Abb.5). Für die thermische Durchstimmung sind die Kontakte über der Phasen- und der DBR-Sektion sehr schmal ausgeführt (Serienwiderstand ca. 3  $\Omega$  bzw. 6  $\Omega$ ). Da diese Kontakte als Ohmsche Kontakte auf der p-GaAs-Kontaktschicht ausgeführt sind, kann zusätzlich noch ein Strom durch den pn-Übergang zum Substrat geführt werden, wodurch auch eine ladungsträgerinduzierte Durchstimmung erzielt werden könnte.

Im Gegensatz zu DBR-Lasern bei der Wellenlänge von 1.55  $\mu\text{m}$  kann hier auf die Wegnahme der aktiven Schicht in der passiven Phasen- und DBR-Sektion verzichtet werden, weil die Intervallenz-Band-Absorption keine Rolle spielt. Durch eine geeignete Wahl der Wellenlänge des Gewinnmaximums der aktiven Schicht ( $\lambda_{\text{Gewin}} \approx 1050 \text{ nm}$ ) kann die jetzt dominierende Inter-Band-Absorption minimiert werden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch eine geringe Transparenzstromdichte des QWs, wodurch die Absorption durch optisches Pumpen mit in der Gewinnsektion erzeugtem Licht schnell gesättigt wird.

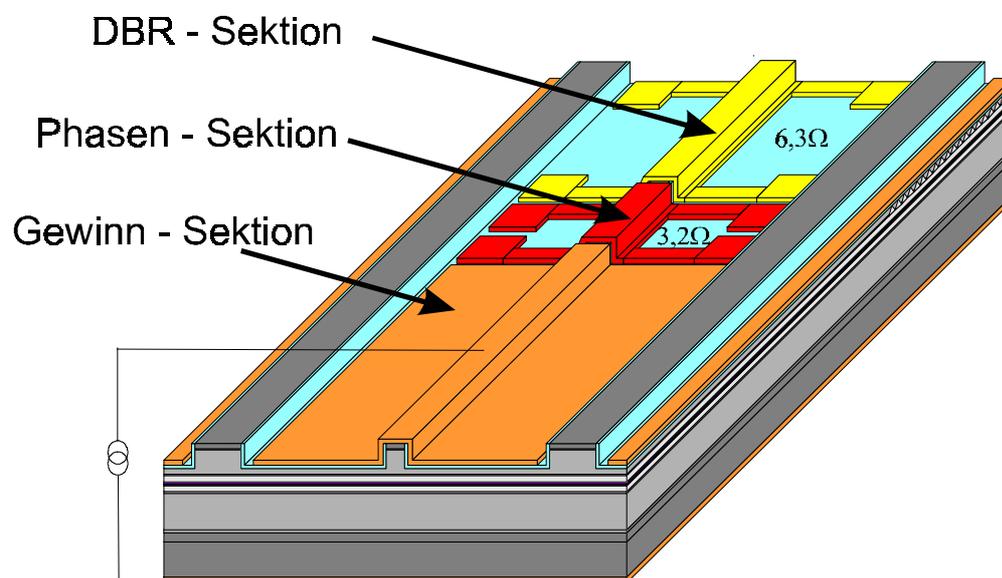


Abb. 5: Schematische Zeichnung des 3-Sektions-DBR-Lasers

## 6.2 Epitaxie

Die Laserstrukturen wurden mit einer 2-Schritt-MOVPE in einem 2“ Single Wafer MOVPE – Reaktor (Aix200/4) bei niedrigem Druck unter Verwendung der metallorganischen Gruppe-III-Quellen TMGa, TMIIn und TMAI sowie der Gruppe-V-Quellen AsH<sub>3</sub> und PH<sub>3</sub> gezüchtet. Bei der Epitaxie gab es 2 Herausforderungen zu bewältigen:

1. die Züchtung eines stark druckverspannten InGaAs-QWs (Fehlanpassung des Kristallgitters ca. 2%),
2. das Überwachsen eines Gitters, ohne es einzuebnen und mit möglichst wenig kristallografischen Störungen in der Mantelschicht.

Zum Punkt 1: Zur Kompensation der Verspannung wurde der InGaAs-QW in zugverspanntes GaAsP (Gitterfehlanpassung ca. -0.5%) eingepackt. Es gelang, bei einer Wachstumstemperatur von 720°C einen 8 nm dicken In<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>As QW versetzungsfrei und reproduzierbar zu züchten, dessen Gewinnmaximum bei einer Wellenlänge von 1060 nm lag.

Zum Punkt 2: Die Gitter 2. Ordnung wurden bei einem Druck von 70 mbar und einer Temperatur von 720°C mit Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As überwachsen. Während der Aufheizphase vor Beginn der 2. Epitaxie kommt es jedoch aufgrund eines Material-Transportes zu einer Einebnung des Gitters, was zu einem vollständigen Verschwinden der Gitter 1. Ordnung wegen der geringen Ätztiefe führte. Daher wurden bei den Gittern 1. Ordnung die ersten 100 nm Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As bei der niedrigeren Wachstumstemperatur von 625°C gezogen, bevor auf die hohe Wachstumstemperatur von 770°C übergangen wurde, um eine gute Qualität des AlGaAs' zu erreichen. In Kapitel 6.3 sind REM-Aufnahmen der Gittersektion nach der 2. Epitaxie zu sehen (Abb. 8 und 11). In Abb. 10 ist der Zusammenhang zwischen der Gittertiefe vor und nach der 2. Epitaxie dargestellt. Die Grundcharakteristiken der Epitaxiestruktur, ermittelt aus Breitstreifenlasern (Streifenbreite 100 µm) unterschiedlicher Resonatorlänge (600 µm...2000 µm), gemessen unter Impulsbedingungen (Impulsbreite 500 ns, Folgefrequenz 5 kHz) sind:

Wellenlänge:	$\lambda = 1050 \text{ nm}$
Schwellenstromdichte (1000 µm Resonatorlänge):	$j_{\text{th}} = 100 \text{ A/cm}^2$
interne Verluste:	$\alpha_i = 2 \text{ cm}^{-1}$
interne Effizienz:	$\eta_i = 90 \%$
differentielle Effizienz:	$\eta_{\text{diff}} = 82 \%$
Transparenzstromdichte:	$j_{\text{T}} = 57,5 \text{ A/cm}^2$

Damit erfüllte die realisierte Epitaxiestruktur sehr gut die oben genannten Forderungen nach der Zielwellenlänge, der niedrigen Transparenzstromdichte und guten Effizienz.

Tabelle 3 vergleicht die wesentlichen Laserparameter (differentielle Effizienz und Schwellenstrom) von Breitstreifenlasern und RW-Lasern, die mit einer Ein- bzw. Zwei-Schritt-Epitaxie hergestellt wurden. Deutlich sichtbar ist, dass die Laserparameter durch die Zwei-Schritt-Epitaxie und die dazwischenliegenden prozesstechnologischen Schritte keine Verschlechterung erfahren haben.

<b>Epitaxie (Streifenbreite)</b>	<b>Diff. Effizienz (mW/mA)</b>	<b>Schwellenstrom (mA)</b>
<b>Einschrittepitaxie (50 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,51	61
<b>Zweischrittepitaxie (50 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,53	54
<b>Einschrittepitaxie (5 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	0.45	24
<b>Zweischrittepitaxie (5 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	0.46	18

Tab. 3: Differentielle Effizienz und Schwellenstrom von Breitstreifen und RW-Lasern, die mit Ein- und Zwei-Schritt-Epitaxien gewachsen wurden. Die Resonatorlänge beträgt 1000  $\mu\text{m}$ .

### 6.3 Herstellung der DBR-Gitter

Von wesentlicher Bedeutung für die Funktionsfähigkeit und für die Charakteristiken des DBR-Lasers war neben der Epitaxie der Prozess der Gitterherstellung. Wegen der erforderlichen Gitterperioden von  $\Lambda = 312 \text{ nm}$  (Gitter 2. Ordnung) bzw.  $\Lambda = 156 \text{ nm}$  (Gitter 1. Ordnung) kann man diese Strukturen nur durch Elektronenstrahlolithografie oder durch holografische Fotolithografie erzeugen.

Im FBH wurde die holografische Fotolithografie, da sie flexibler, schneller und angepasster an die anderen Prozessschritte ist. Bei diesem Verfahren wurde ein Interferenzfeld mit definierter Periode durch Überlagerung zweier kohärenter Lichtstrahlen erzeugt und ein mit Fotolack beschichteter Wafer belichtet. Zum Erzeugen der Korrugation wurde das Wachstum der Laserstruktur nach der Epitaxie der p-GaAs-Wellenleiterschicht unterbrochen. Nach dem Entwickeln der Lackmaske wurde das Gitter der Lackmaske durch nasschemisches Ätzen in den Wellenleiter übertragen. Nach der Lackentfernung und der Reinigung der Waferoberfläche erfolgte das epitaktische Wachstum der p-AlGaAs-Mantelschicht und hochdotierten p-GaAs-Kontaktschicht in der 2. Epitaxie.

#### 6.3.1 Gitter 2. Ordnung

Für Gitter 2. Ordnung wird eine Periode von 312 nm benötigt. In Abb. 7 sind Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) von der holografisch belichteten und entwickelten

Lackmaske (a) und das durch nasschemisches Ätzen in den Wellenleiter übertragene Gitter (b) dargestellt. In Abb. 7b erkennt man genau die durch Doppelbelichtung erzeugte Grenze zwischen DBR-Sektion (Gitterbereich) und Phasen-Sektion.

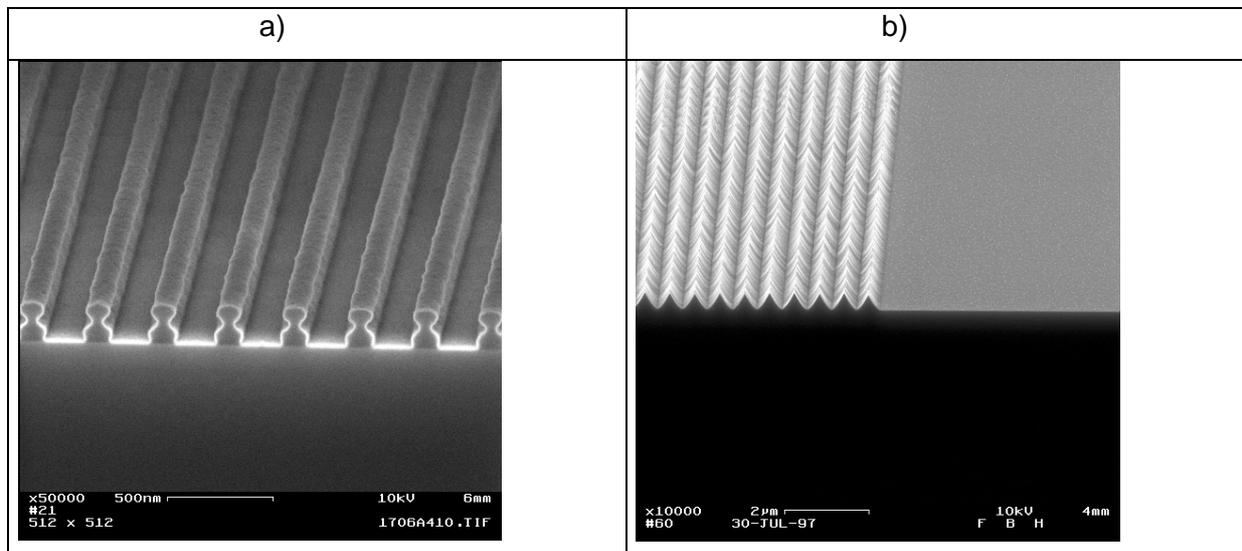


Abb. 7: REM - Aufnahmen der Lackmaske mit Gitterstruktur  $\Lambda = 312$  nm (a) und das geätzte Gitter (b). Verwendung von Positiv-Fotolack.

Nach der Lackentfernung und Reinigung der Waferoberfläche erfolgt das epitaktische Wachstum der p-AlGaAs-Mantelschicht und der p-GaAs-Kontaktschicht in der 2. Epitaxie (siehe Abb. 8a). Abb. 8b zeigt den Übergangsbereich zwischen Phasen und DBR-Sektion.

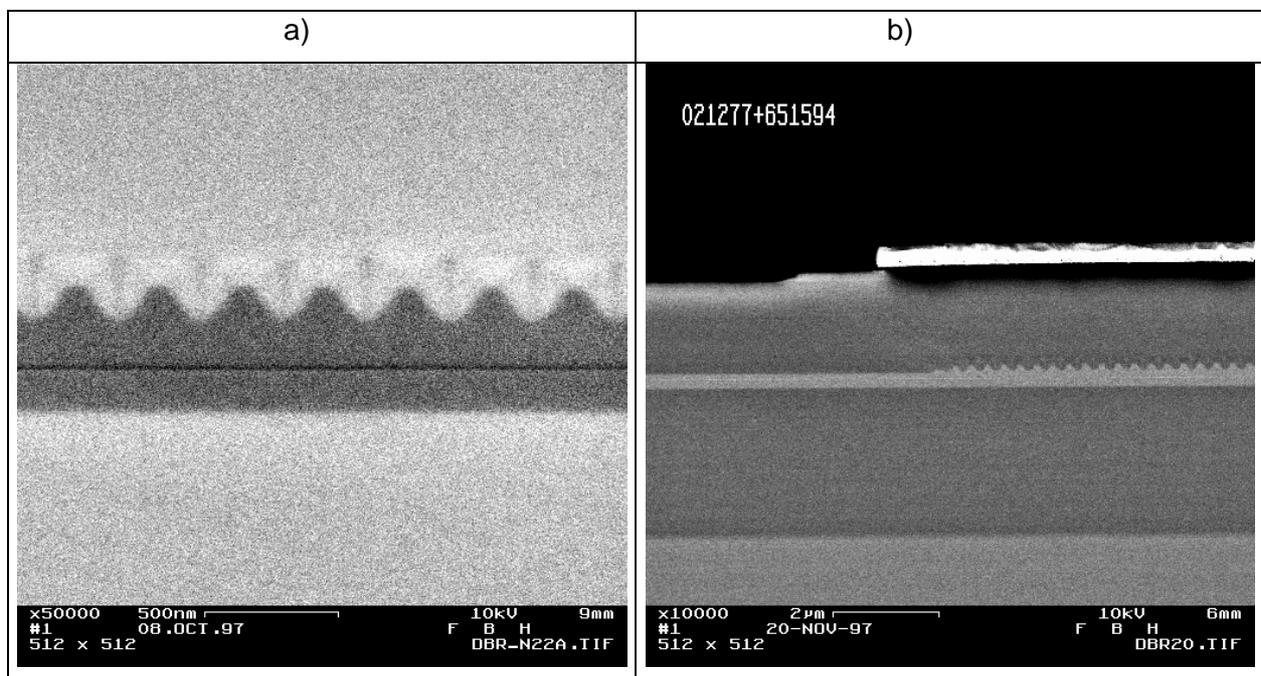


Abb. 8: REM-Aufnahmen des überwachsenen Gittergebietes und des Übergangsbereiches von der Phasen- in die DBR-Sektion

### 6.3.2 Gitter 1. Ordnung

Durch den Einsatz eines neuen Lasersystems für die holografische Fotolithografie mit einer Wellenlänge von 266 nm (diodengepumpter frequenzvervierfacher Nd:YAG Laser) konnten Gitter 1. Ordnung in GaAs-Wellenleitern ( $\Lambda=156$  nm) im letzten Jahr der Projektlaufzeit hergestellt werden. Abb. 9 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Lackmaske (a) und des geätzten Gitters mit einer Gitterperiode von 143 nm (b). Aufgrund der kleinen Dimension der GaAs-Gitter 1. Ordnung ist mit einer Einebnung durch Materialtransport beim Überwachsen zu rechnen. Um trotzdem eine ausreichende Gittertiefe nach der 2. Epitaxie zu erhalten, muss der Überwachsprozess optimiert werden. Das betrifft die Temperatur mit einem geeigneten Mischungs-Verhältnis der Elemente der Gruppe V und der Gruppe III in der Gasphase (V/III-Verhältnis).

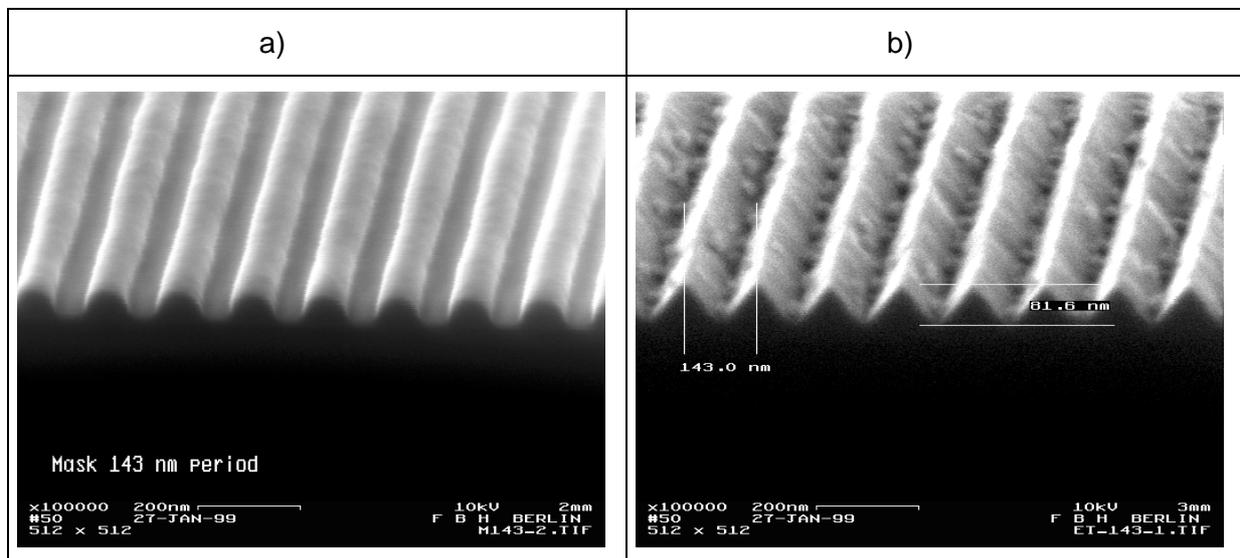


Abb. 9: Lackmaske (a) und in GaAs geätzte Gitterstruktur (b) mit einer Periode von 143 nm

In Abb. 10 ist die Gittertiefe nach der zweiten Epitaxie über die Gittertiefe vor der 2. Epitaxie aufgetragen. Die Reduzierung der Gittertiefe ist reproduzierbar und für Gittertiefen von 40 nm bis 70 nm vor der zweiten Epitaxie geht sie linear mit der Gittertiefe.

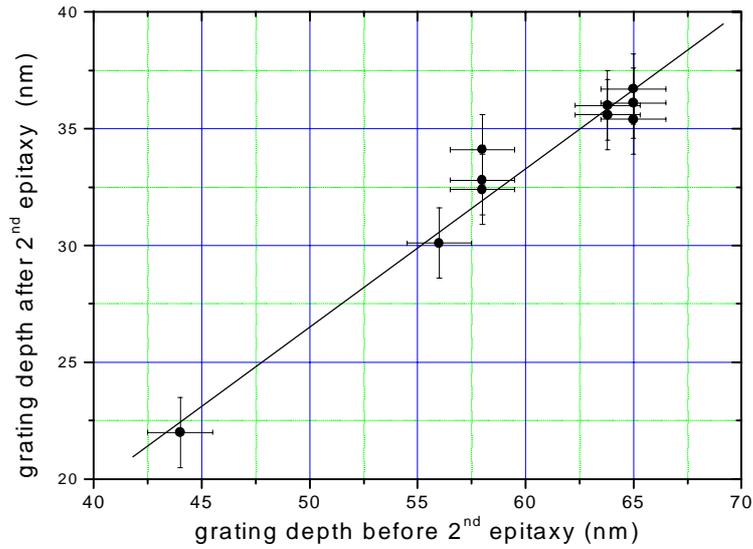


Abb. 10: Gittertiefe vor und nach der 2. Epitaxie; Wachstum bei 625°C mit AsH<sub>3</sub>, V/III = 31

Ein überwachsenes Gitter 1. Ordnung in GaAs ist in Abb. 11 zu sehen. Man erkennt den Grenzbereich zwischen Phasensektion (links vom Pfeil) und DBR-Sektion (rechts).

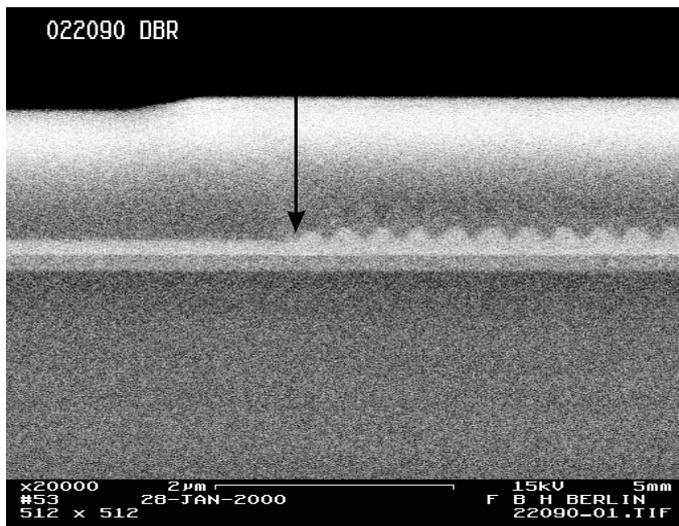


Abb. 11: Überwachsenes Gitter im GaAs Wellenleiter

Die hergestellten Gitter vor der 2. Epitaxie haben eine Ausgangstiefe von 65 nm. Somit beträgt die Gitterhöhe in den fertigen DBR-Lasern etwa 35 nm (siehe Abb. 10). Dies entspricht theoretisch einer Koppelkonstante von 130 cm<sup>-1</sup> (siehe Abb.2)

## 6.4 Strukturierung

Die Technologie zur Herstellung von DBR-Lasern mit der dargestellten Epitaxiestruktur zur Prozessierung von Laserdioden mit Rippenwellenleitern beinhaltete 4 Schritte (Abb. 12):

Erzeugung des lateralen optischen und elektrischen Konfinements,

p-seitige Metallisierung,

Abdünnen

n-seitige Metallisierung

Das laterale optische und elektrische Konfinement bei Laserdioden mit Rippenwellenleitern wurde durch die geätzten Kanäle rechts und links des Rippenwellenleiters erzeugt. Die Ätztiefe dieser Kanäle bestimmte zusammen mit der Vertikalstruktur den effektiven Indexsprung und damit die Modenführung im Laser. Ein exaktes Einhalten einer berechneten Ätztiefe war dabei Voraussetzung für eine Grundmode-Emission bei hohen Leistungen.

Für das Ätzen dieser Kanäle standen sowohl nasschemische als auch trockenchemische Ätzverfahren zur Verfügung. Bei der Herstellung der Mehrsektions-RW-Laser wurde vorrangig zur Erzeugung der Kanäle ein reaktives Ionenätzverfahren mit  $\text{BCl}_3/\text{Ar}$  eingesetzt. Die dafür benutzte Anlage besitzt ein in-situ Interferometer zur Bestimmung der aktuellen Ätztiefe. Damit war es möglich, die Kanaltiefe und damit die Rippenwellenleiterhöhe auf  $\pm 30$  nm genau einzustellen.

Nach der Herstellung des Rippenwellenleiters wurde mittels der gleichen Lackmaske ein durch rf-Sputtern abgeschiedener Isolator ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) strukturiert. Damit wurde der Strom auf den Rippenwellenleiter begrenzt. Als p-seitige Metallisierung wurde thermisch Ti/Pt/Au abgeschieden. Nach dem substratseitigen Abdünnen erfolgte die n-seitige Metallisierung mit AuGe/Ti/Pt/Au und die Formierung des Kontaktes in einer RTA-Anlage.

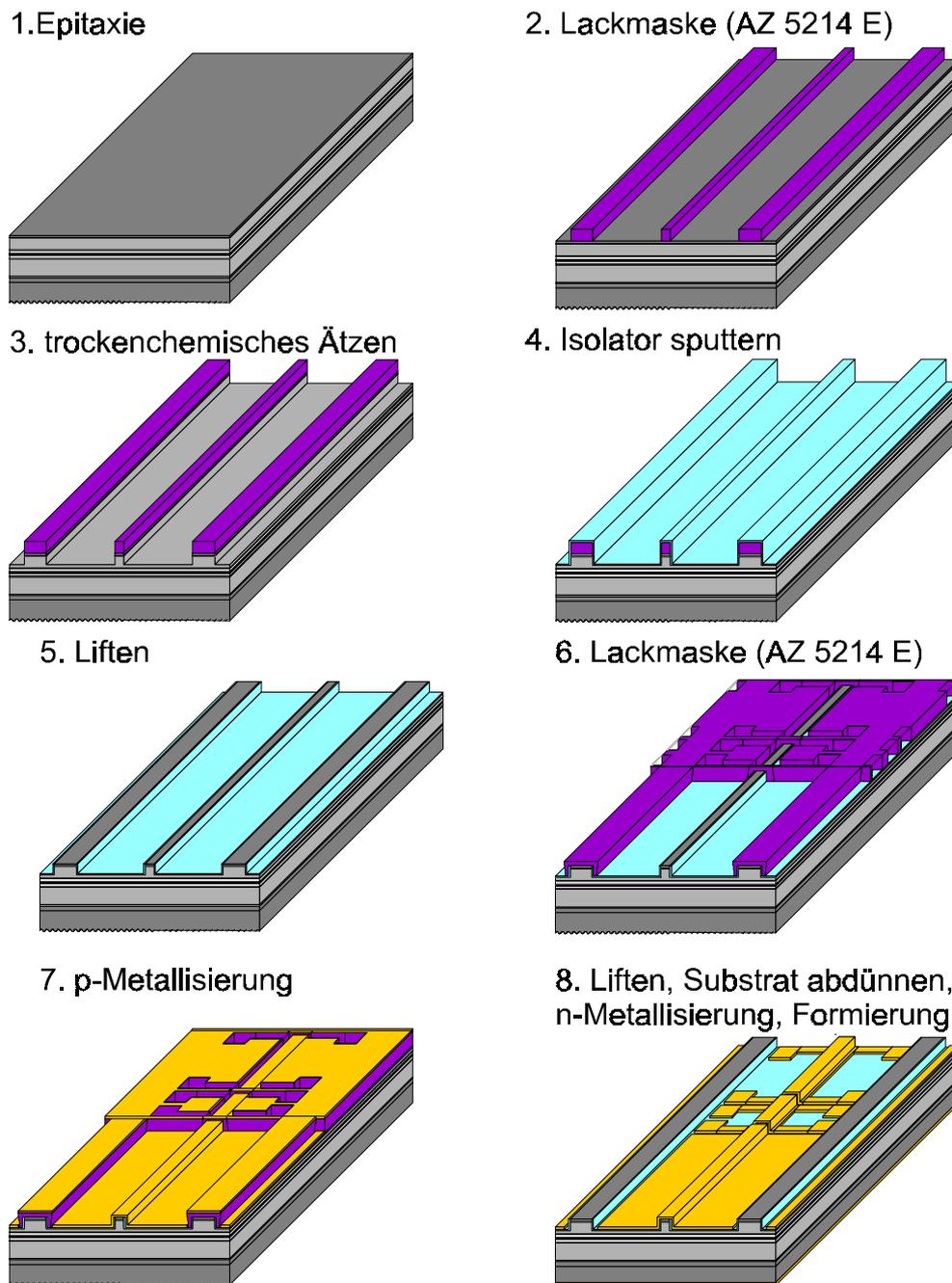


Abb. 12: Prozesstechnologie zur Herstellung von Mehrsektions-RW-Lasern

Nach einer ersten Messung der Lasercharakteristiken im Riegelverband wurden die Facetten der DBR-Laser in einer Sekundärionen-Sputteranlage mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  beschichtet. Dabei wurde die Reflektivität der Auskoppelseite (Gewinnsektion) auf 10 % , die der Rückseite (DBR-Sektion) auf  $< 1$  % verringert. Dadurch konnte das Anschwingen der Fabry – Perot Moden unterdrückt werden, so dass nur die durch das interne Gitter bevorzugte Mode emittierte.

## 6.5 Montage

Die aus dem Wafer gespaltenen Laser hatten Längen von 2000  $\mu\text{m}$  und 4000  $\mu\text{m}$ . Die Chips wurden auf speziell entwickelte AlN-Zwischenträger (Abb. 13 links) mit strukturierter Ti-Pt-Au-Metallisierung p-side up aufgelötet (Pb37/Sn63). Diese Zwischenträger dienten auch als Bondstützpunkt für die drahtgebondeten Anschlüsse der Gewinn-, Phasen- und DBR-Sektionen, so dass in dieser Aufbaustufe Zwischenmessungen an den DBR-Laserdioden vorgenommen werden konnten. Danach wurden die AlN-Zwischenträger mit Niedrigtemperatur-Lot (In52/Sn48) auf einen vergoldeten Kupferträger gelötet.

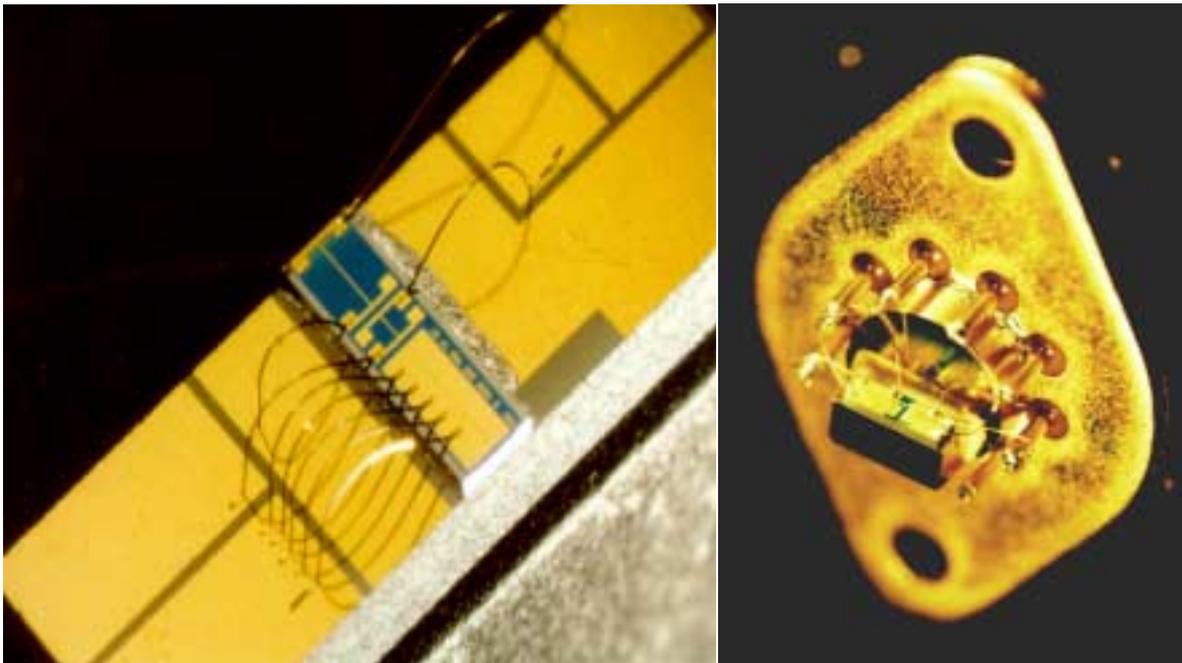


Abb. 13: DBR-Laser auf AlN Wärmesenke (links) und in ein TO-3-Gehäuse montiert (rechts)

Dieser Kupferträger wurde seinerseits auf der 8-poligen TO-3-Grundplatte (Abb. 13 rechts), welche schon mit einem Peltierdummy (Cu, Ni-Au-Galvanik) bestückt wurde, befestigt. In diesem Montageschritt erfolgte das Ausrichten des Lasers zur optischen Achse der Grundplatte. Bezug genommen wurde dabei auf die Befestigungsbohrungen der Grundplatte. Dieser letzte Schritt im Aufbau erfolgte mit Klebetechnik (H61). Die DBR-Laserdioden-Chips wurden vom FBH in diesem Standardgehäuse vom Typ TO-3 an die Verbundteilnehmer geliefert.

Der thermische Widerstand innerhalb dieses Aufbaus (AlN-Zwischenträger bis TO-3-Grundplatte) wurde mit 6 K/W abgeschätzt und ist somit viel kleiner als der thermische Widerstand innerhalb der p-side-up gelöteten Laserdiode selbst. Die TO-3-Kappe besitzt ein Fenster, das mit einer entspiegelten Glasplatte (Glassorte D263,  $R < 1\%$  bei 1060 nm) verschlossen ist. Die Glasplatte wurde mit Epoxidharz eingeklebt. Beim Verschweißen der Kappe mit der Grundplatte wurde das Gehäuse mit trockenem Stickstoff gefüllt. Das Verschweißen wurde in Auftrag durch die Fa. InfraTec GmbH (Dresden) durchgeführt.

## 6.6 Laserdaten

### 6.6.1 Rippenwellenleiterlaser

In der ersten Phase wurden Einsektions- und Mehrsektions-Fabry-Perot Laser mit Rippenwellenleitern hergestellt. In Abb. 14 sind die Leistungs-Strom Kennlinien (P-I) im Temperaturbereich 20°C – 50°C (a) und die Emissionsspektren für 3 unterschiedliche Anregungsströme (b) dargestellt.

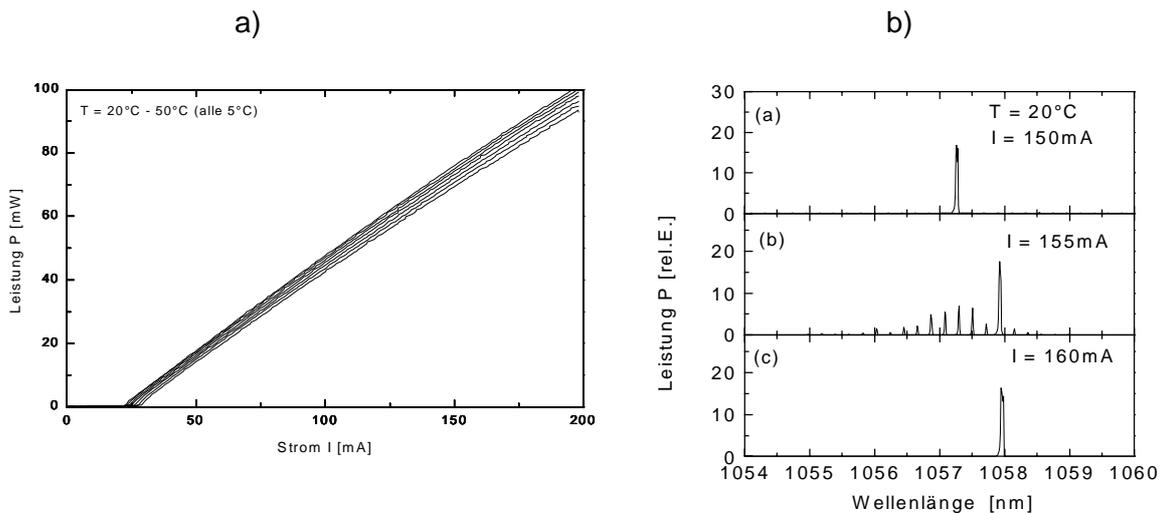


Abb. 14: Temperaturabhängige (P-I) Kennlinien (a) und longitudinale Modenspektren bei 3 unterschiedlichen Anregungsströmen (b).

Bei 200 mA Anregungsstrom konnten Ausgangsleistungen von  $P \approx 100$  mW erreicht werden. Der differentielle Wirkungsgrad lag bei 0.57 mW/mA. In den Spektren zeigte sich sowohl longitudinaler Monomodebetrieb ( $I = 150$  mA und  $I = 160$  mA) als auch das Auftreten mehrerer Moden ( $I = 155$  mA).

### 6.6.2 DBR-Laser mit Gitter 2. Ordnung

Alle entwickelten DBR-Laser wurden zuerst im Riegelverband getestet. In jedem Riegel befanden sich 9 DBR-Laser mit einer Rippenwellenleiter-Breite von 5  $\mu\text{m}$ . Die gemessenen Leistungs-Strom Kennlinien von 27 DBR-Lasern (3 Riegel) sind in Abb. 15 dargestellt. Man erkennt die gute Homogenität über dem Wafer und die erreichte hohe Qualität der Technologie der Laserherstellung. Die Laserschwelle lagen alle zwischen 31 mA und 40 mA. Die Ausgangsleistungen bei 200 mA Anregungsstrom  $I_g$  durch die Gewinnsektion variierten zwischen 46 mW – 61 mW.

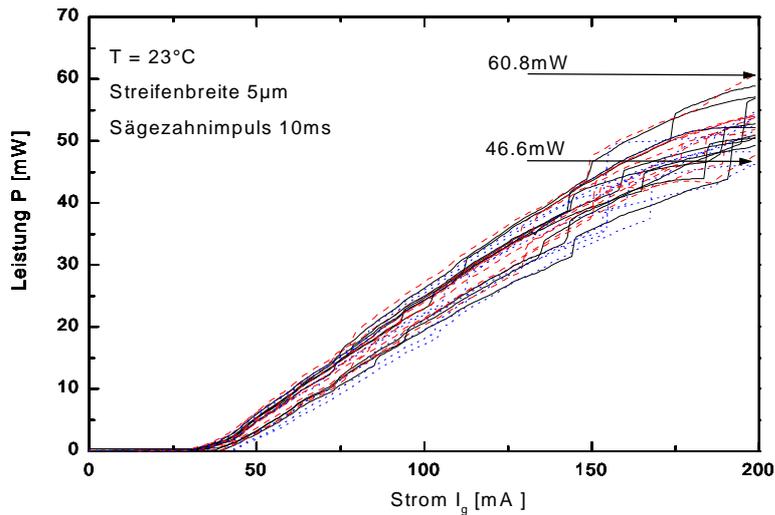


Abb. 15: P-I Kennlinien von 27 Lasern mit 5 µm Streifenbreite der Charge 21277

Abb. 16 zeigt die Leistungs - Strom Kennlinie eines Lasers im TO-3 Gehäuse. Der Laser wurde auf 25 °C thermisch stabilisiert. Die Laserschwelle wurde bei 32 mA erreicht. Die maximale Ausgangsleistung bei  $I_g = 200$  mA lag bei 124 mW. Die Leistungserhöhung im Vergleich zur Riegelmessung konnte auf die bessere Wärmeabführung nach dem Aufbau der Chips zurückgeführt werden. Der Anstieg  $\eta$  der Leistungs-Strom Kennlinie lag bei diesen DBR-Lasern mit Gitter 2. Ordnung zwischen 0.7 und 0.8 W/A. Die abrupte Leistungsänderung bei 140 mA beruht auf einem longitudinalen Modensprung. Das longitudinale Modenspektrum dieses Lasers bei einer Ausgangsleistung von 124 mW ist in Abb. 17 gezeigt.

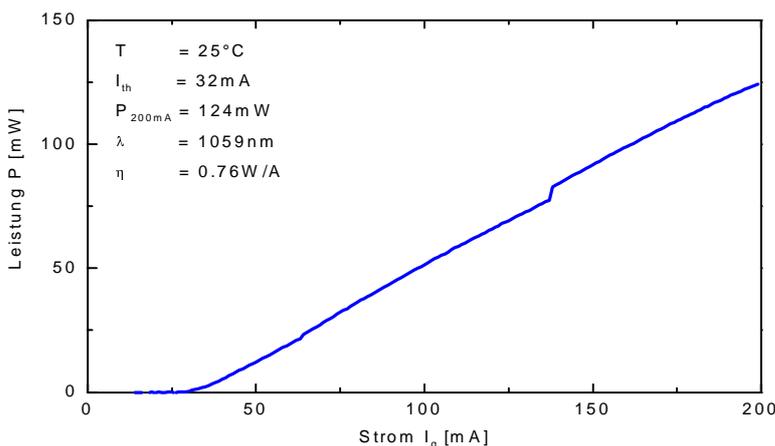


Abb. 16: P-I Kennlinie eines DBR-Lasers im TO-3 Gehäuse bei 25°C Sockeltemperatur

Die Wellenlänge bei dieser Leistung war 1058,6 nm und die gemessene Seitenmodenunterdrückung 33 dB. Die Bestimmung der Seitenmodenunterdrückung erfolgte derart, dass der Abstand der longitudinalen Moden unterhalb der Laserschwelle (siehe Inset von Abb. 17)

bestimmt wurde. Bei diesem Abstand von der lasernden Mode wurde das Verhältnis der Intensität zum Maximalwert als Maß für die Seitenmodenunterdrückung gewonnen.

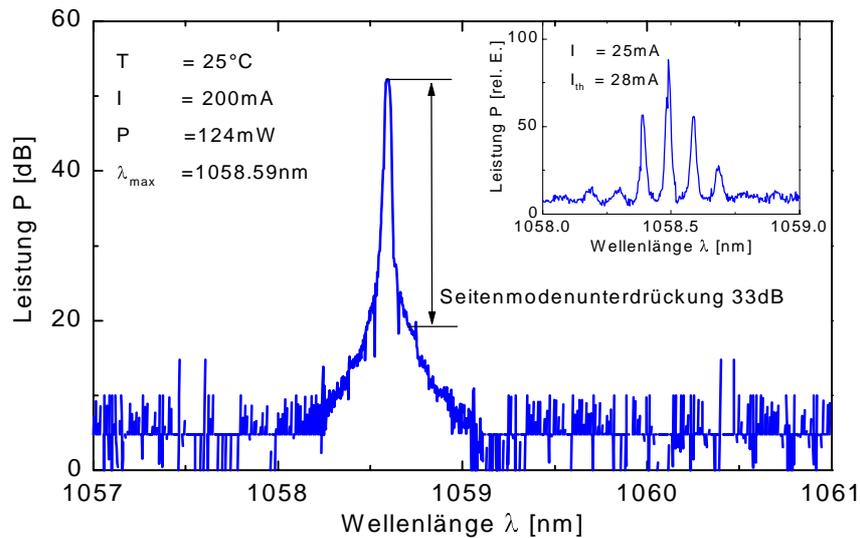


Abb. 17: Longitudinales Modenspektrum bei 124 mW Ausgangsleistung (im Inset ist das longitudinale Modenspektrum unterhalb der Laserschwelle dargestellt)

Für hochauflösende, spektrale und Linienbreitenmessungen wurde ein nicht konfocales Fabry-Perot Interferometer („super cavity“) mit einer Finesse von ca. 40 000 benutzt. Der freie Spektralbereich des Interferometers betrug 6 GHz, so dass theoretisch eine spektrale Auflösung von 100 kHz erreicht werden konnte. Die Messungen im Scanning-Betrieb wurden mit einer Ablenkzeit von 17 ms für den Resonanzabstand von 6 GHz durchgeführt. Aus der Ablenkzeit und der Halbwertsbreite der gemessenen Linie ( $2,4 \mu\text{s}$ ) konnte eine spektrale Linienbreite der lasernden Mode von 0.85 MHz. (siehe Abb. 18) bestimmt werden.

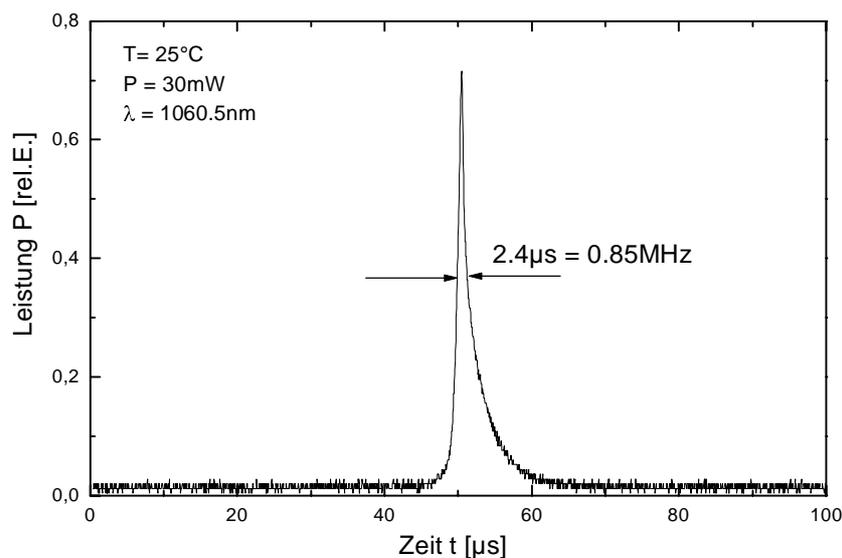


Abb. 18: Bestimmung der spektralen Linienbreite eines DBR-Lasers

Diese Messung zeigte, dass der DBR-Laser sehr stabil auf der Emissionsfrequenz arbeitet.

Für die Anwendung der Laser in der hochgenauen Längenmessung muss eine kontinuierliche Durchstimmung von 300 GHz bei einer Modulationsfrequenz von 100 Hz (10 ms) erreicht werden. Die Durchstimmung der entwickelten Laser erfolgte über eine selektive Aufheizung der Widerstände oberhalb der Phasen- und DBR-Sektion durch Sägezahnstromimpulse mit einer Dauer von 10 ms. Infolge der thermisch bedingten Brechzahlerhöhung verschob sich die lasernde Mode zur langwelligen Seite des Spektrums. Abb. 19 zeigt, dass die DBR-Laserdioden durch geeignete Ansteuerung der Phasen- und Gittersektion über einen Wellenlängenbereich von über 300 GHz kontinuierlich durchstimmbar sind.

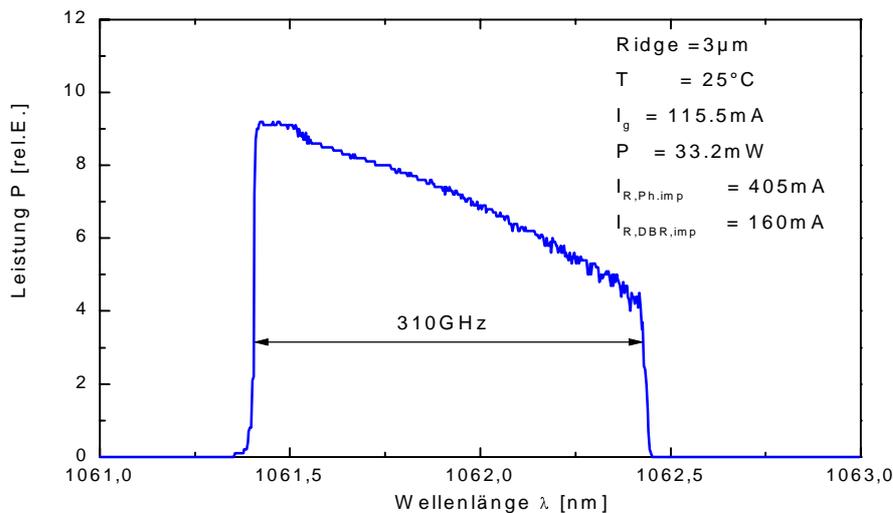


Abb. 19: kontinuierliche Durchstimmcharakteristik bei Ansteuerung mit Sägezahnimpulsen einer Breite von 10 ms

Aus Abb. 19 wird deutlich, dass sich die Ausgangsleistung während der Durchstimmung verringert. Dieses Verhalten lässt sich mit der Temperaturerhöhung in der Phasen- und DBR-Sektion, verbunden mit einem Anstieg der Absorption, erklären. Die erforderlichen Ströme durch den Phasenwiderstand  $R_{ph}$  und den Widerstand oberhalb der DBR-Sektion  $R_{DBR}$  lagen bei 405 mA bzw. 160 mA.

Für das FMCW-Radar-Messsystem ist eine kontinuierliche Durchstimmung sowohl in der ansteigenden (up-chirp - Verschiebung zum Langwelligen durch Aufheizung) als auch abfallenden Flanke des Ansteuerimpulses (down-chirp - Verschiebung zum Kurzwelligen durch Abkühlung) notwendig. Um eine maximale Durchstimmung zu erreichen, musste das optimale Tastverhältnis der Ansteuerimpulse und dabei die Aufheiz- und Abkühlphase untersucht werden. In Abb.20a (linkes Bild) ist die Leistungsänderung  $\Delta P$  (blaue Kurven) bei Ansteuerung mit Dreieckimpulsen mit einem Tastverhältnis von 1:10, 1:5, und 1:1 und einer Folgefrequenz von 100 Hz dargestellt. Im oberen Bild ist zusätzlich der Ansteuerstromimpuls gezeigt (rote Kurve). In dem rechten Bild (Abb. 20b) sind die für die jeweiligen

Tastverhältnisse gemessenen kontinuierlichen Durchstimmkurven gezeigt, wobei die Messung nur während des Ansteuerimpulses erfolgte.

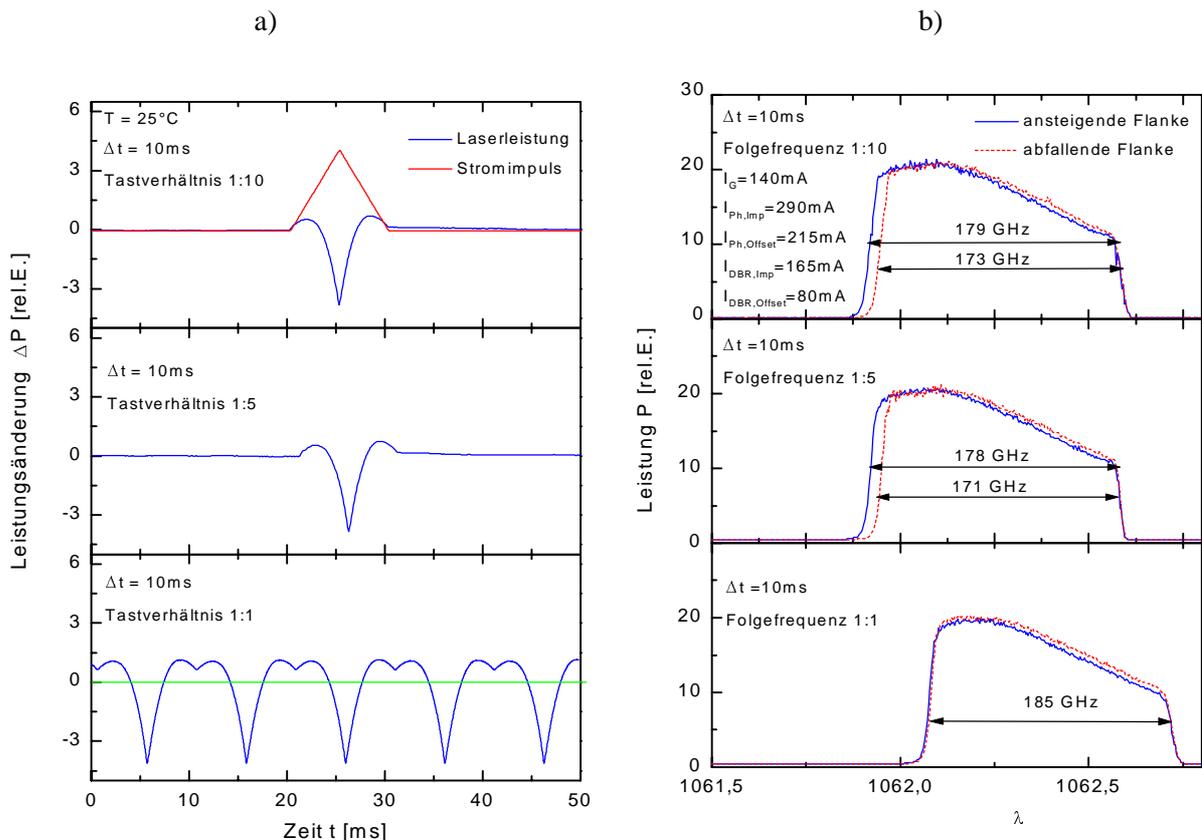


Abb. 20: Leistungsänderung bei Ansteuerung mit Dreieckstromimpulsen mit einem Tastverhältnis von 1:10, 1:5, und 1:1 und einer Folgefrequenz von 100 Hz (a) und die gemessenen Durchstimmkurven (b)

Man erkennt aus Abb. 20a, dass bei Ansteuerung mit Dreieckstromimpulsen über  $R_{Ph}$  und  $R_{DBR}$  sich erst die Ausgangsleistung erhöht (positives  $\Delta P$ ) und dann bei weiterer Erwärmung eine Abnahme von  $\Delta P$  erfolgt. Am Ende des Dreieckimpulses wird der Ausgangszustand der Laserleistung bei den Tastverhältnissen von 1:10 und 1:5 nicht wieder erreicht. Dieses wird auch deutlich in den kontinuierlichen Durchstimmkurven (Abb.20b). Hier ist der up-chirp mit der blauen durchgehenden Kurve und der down-chirp mit der roten gestrichelten Kurve dargestellt. Bei den Tastverhältnissen 1:10 und 1:5 erreicht die Durchstimmkurve nach Ende des Anregungsimpulses nicht den Ausgangswert (Abkühlung der Phasen- und DBR-Sektion ist nicht beendet). Im Gegensatz dazu zeigt sich ein wesentlich günstigeres Verhalten beim Tastverhältnis 1:1, bei dem der gleiche up- und down-chirp, erreicht wird (Abb. 20b). Aus den Untersuchungen ergab sich, dass die besten Bedingungen für den Einsatz im FMCW - Laserradar bei Modulation mit einem Tastverhältnis von 1:1 erreicht werden.

Um Aussagen zur Linearität der Durchstimmung zu erlangen, wurde die Emissionsstrahlung während des Durchstimmens durch eine Fabry-Perot Platte (geringe Finesse,  $R = 80\%$ )

geschickt und das Signal mit einer Fotodiode aufgenommen. Die Impulse  $I_{R,Ph}$  und  $I_{R,DBR}$  und das erhaltene Fotodiodensignal sind in Abb.21 dargestellt.

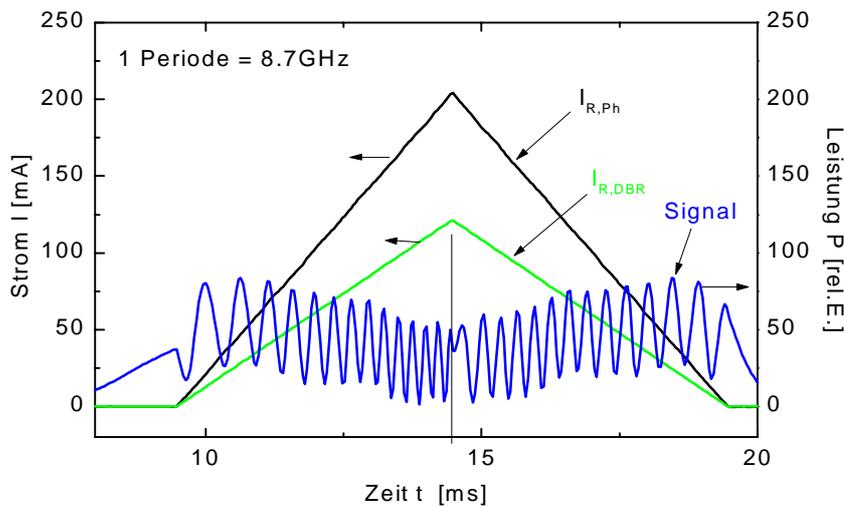


Abb. 21: Ansteuerstromimpulse  $I_{R,Ph}$  (schwarze Kurve) und  $I_{R,DBR}$  (grün) und das mit einer FP-Platte gemessene Durchstimmverhalten (blau)

Der Abstand eines Fabry-Perot Durchlaufs beträgt 8,7 GHz. Mit zunehmender Aufheizung über den Ansteuerimpuls nimmt der zeitliche Abstand zwischen den Fabry-Perot Perioden ab, woraus sich das nichtlineare Verhalten der Durchstimmung bestimmen lässt. Aus Abb. 21 wird weiterhin deutlich, dass durch die Wärmekapazität des Lasers, ein geringer zeitlicher Versatz zwischen Ansteuerimpulsen und up- und down chirp besteht (markiert mit senkrechter schwarzer Linie).

Für die Anwendung des FMCW-Laserradars bei der Formcharakterisierung der Oberleitungsstromkabel muss die Durchstimmfrequenz  $\geq 1$  kHz sein. Eine Optimierung der Laserstruktur in Richtung schnelleres Durchstimmen konnte durch Reduzierung der Mantelschichtdicke erfolgen. Hierbei wurde das aktive Volumen verringert, was eine Abnahme des thermischen Widerstandes bewirkt und eine schnellere Aufheizung bzw. Abkühlung ermöglicht, was zur schnelleren Durchstimmung führt.

In Abb. 22 ist der Durchstimmbereich in Abhängigkeit von den ansteigenden Impulsflanken von  $I_{R,Ph}$  und  $I_{R,DBR}$  für zwei DBR-Laserstrukturen mit unterschiedlichen Mantelschichtdicken dargestellt. Bei Laser 32\_53 (rote Kurve) ist die Mantelschicht 1,3  $\mu\text{m}$  dick, beim Laser 24\_31 (blaue Kurve) 1,05  $\mu\text{m}$ . Der Laser 32\_53 erreicht nach 5000  $\mu\text{s}$  seinen maximalen Durchstimmwert, der optimierte Laser 24\_31 bereits nach 250  $\mu\text{s}$ .

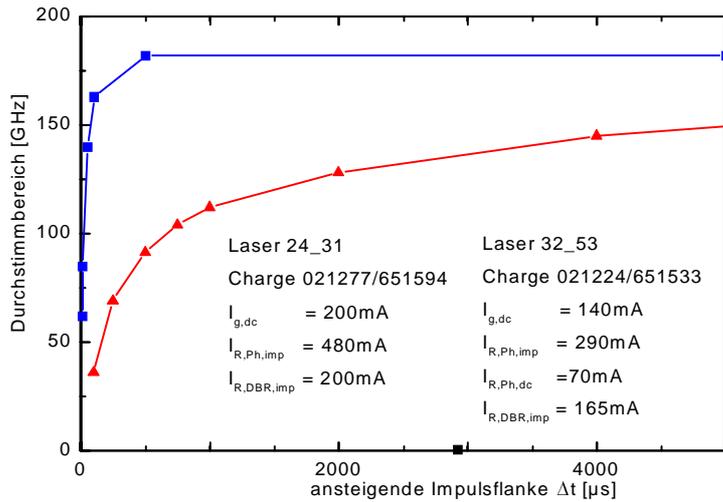


Abb. 22: Durchstimmbereich in Abhängigkeit von der ansteigenden Impulsflanke der Aufheizimpulse. Die rote Kurve zeigt einen Laser der 1. Generation, die blaue Kurve eine optimierte Struktur.

Ein wichtiges Kriterium für die Anwendbarkeit der hergestellten Laser im System ist die Langzeitstabilität. Hierzu wurden Untersuchungen an 10 auf AlN aufgebauten Lasern durchgeführt. Die Ergebnisse eines Belastungstests über 1000 h sind in Abb. 23 dargestellt. Aufgetragen ist die Laserleistung über der Belastungszeit bei konstanter Anregung aller Laser mit  $I_g = 200$  mA.

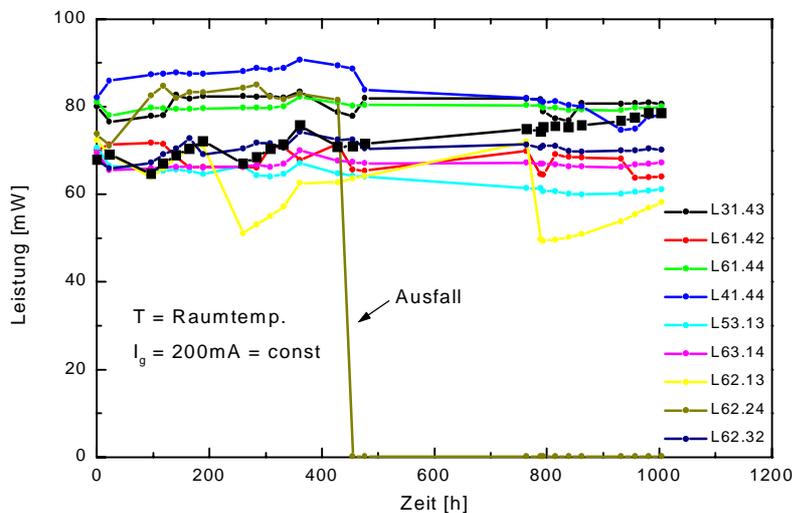


Abb. 23: Alterungstest von 10 DBR-Lasern bei 200mA Konstantstrom durch die Gewinn-Sektion bei Raumtemperatur

Die benutzte Messapparatur konnte nicht ausreichend thermisch stabilisiert werden, so dass die Raumtemperaturschwankungen zu Leistungsänderungen führten (siehe Abb. 23). Von den 10 eingesetzten Lasern fiel eine Diode nach 430 h aus. 9 DBR-Laser überlebten den Test und zeigten eine geringe Degradationsrate.

Alterungsuntersuchungen unter Betriebsbedingungen, d.h. die Ansteuerung der Gewinnsektion mit einer Ausgangsleistung von 100 mW und die gleichzeitige Aufheizung der Phasen- und DBR-Sektion zur Durchstimmung der Laser konnten nur für jeweils einen Laser durchgeführt werden. Ergebnisse eines Tests über 117 Stunden unter Betriebsbedingungen sind in Abb. 24 gezeigt.

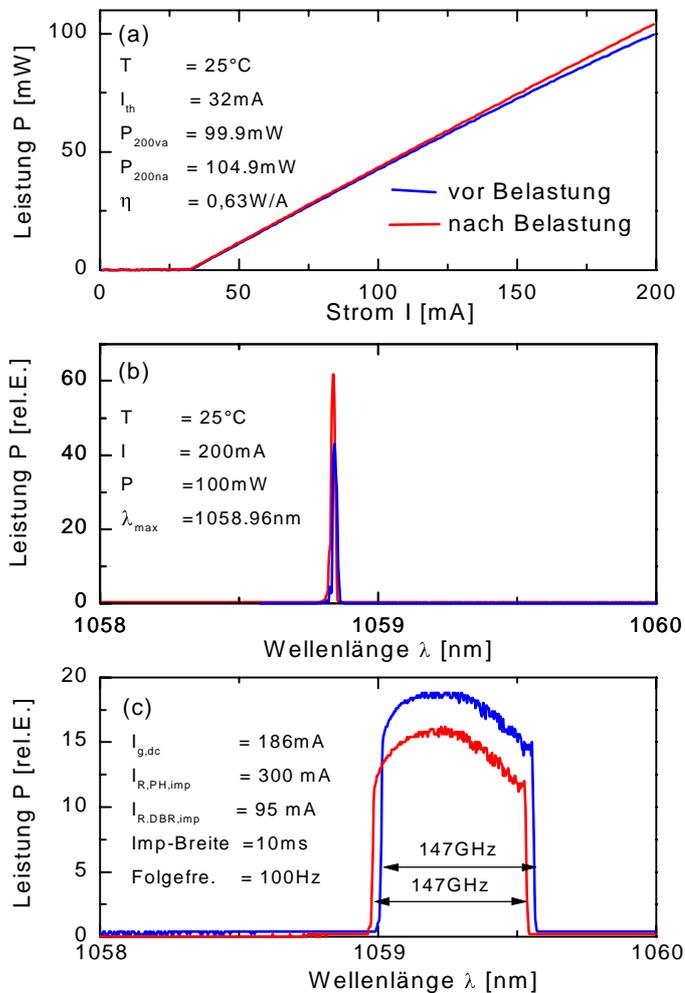


Abb. 24: Ergebnisse eines Belastungstests unter Betriebsbedingungen, vor Belastung blau, nach 117 h rot (a), Leistungs - Strom Kennlinien (b) longitudinale Modenspektren (c) Durchstimmverhalten)

Aus Abb. 24 wird deutlich, dass sich weder die Ausgangsleistung noch das spektrale Verhalten und die Durchstimmbarkeit verändert haben. Damit konnte auf einen stabilen Betrieb der entwickelten Laserdioden mit Gitter 2. Ordnung in GaAs Wellenleiter geschlossen werden.

### 6.6.3 DBR-Laser mit Gitter 1. Ordnung

Eine typische P-I-Kennlinie für einen DBR-Laser mit Gitter 1. Ordnung in GaAs ist in Abb. 25 zu sehen. Die Laserschwelle liegt bei 28 mA. Die Effizienz beträgt  $\eta = 0,74 \text{ mW/mA}$ . Beide Werte entsprechen den Lasern mit Gitter 2. Ordnung, aber hier konnte bei hohen Ausgangsleistungen bis 180 mW auch die longitudinale Einmodigkeit erhalten bleiben. Wie bei allen bisher gezeigten DBR-Lasern treten auch hier Stufen in der Kennlinie auf. Diese haben ihren Ursprung in einer thermisch bedingte Verstimmung zwischen der Wellenlänge der lasernden Longitudinalmode und der Wellenlänge des Reflektivitätsmaximum der DBR-Sektion, was zu einem Modensprung und einem entsprechendem Anstieg der Lichtleistung führt. Die Ausgangsleistungen von 100mW, 125mW, 150mW und 175mW sind in der Kennlinie mit A - D markiert. An diesen Werten wurde das longitudinale Modenspektrum mittels eines 1,2m langen Gittermonochromators mit einer Auslösung von 0,005nm gemessen.

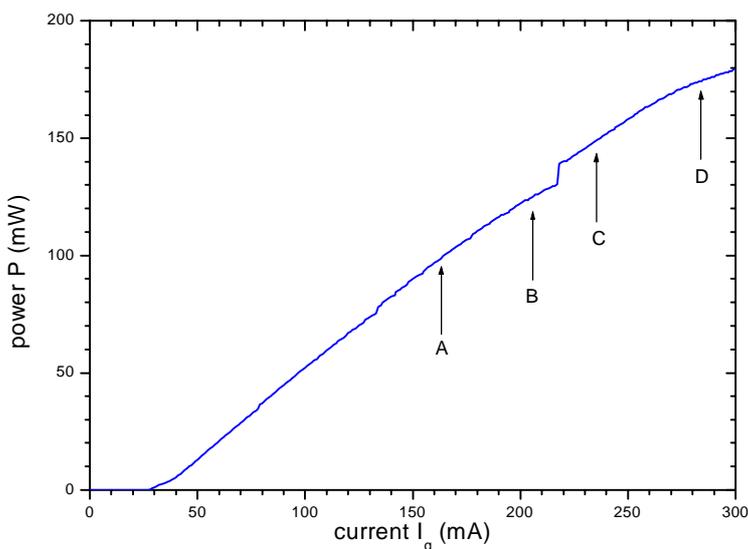


Abb. 25: P-I Kennlinie eines DBR Lasers mit Gitter 1. Ordnung im GaAs Wellenleiter

Die dazugehörigen Spektren sind in Abb. 26 dargestellt. Bei allen Leistungen ist die Seitenmodenunterdrückung zwischen der Lasermode und der nächsten Nachbarmode größer als 35dB und die Linienbreite kleiner als 5MHz. Ursache für das verbesserte spektrale Verhalten ist das höhere Reflexionsvermögen des Gitters 1. Ordnung, siehe Abb. 3.

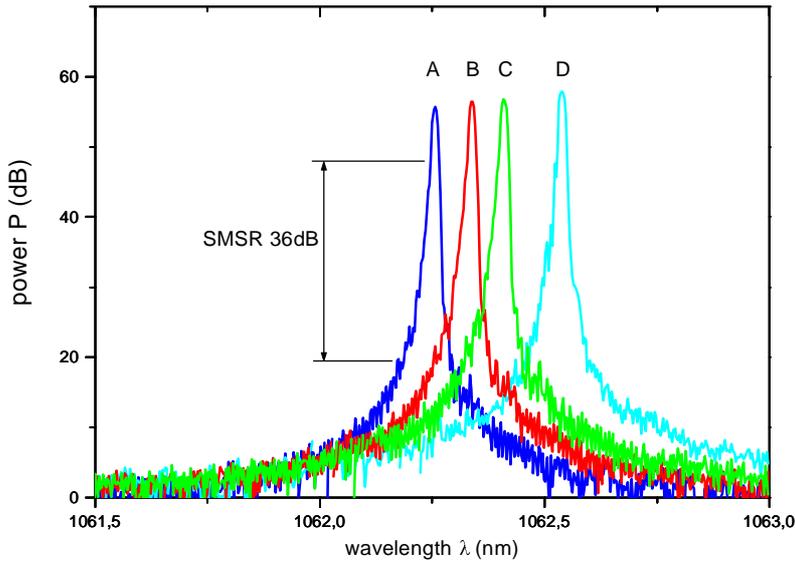


Abb. 29: Longitudinale Modenspektren bei 25°C für einen DBR-Laser mit Gitter 1. Ordnung in GaAs bei den Ausgangsleistungen: A = 100 mW, B = 125 mW, C = 150 mW, D = 175 mW

Untersuchungen zum Durchstimmverhalten dieser Laser bei hohen Ausgangsleistungen sind in Abb. 26 gezeigt. Der Laser zeigt zwischen 100mW und 150mW einen gleichbleibenden Durchstimmbereich von ca. 120GHz.

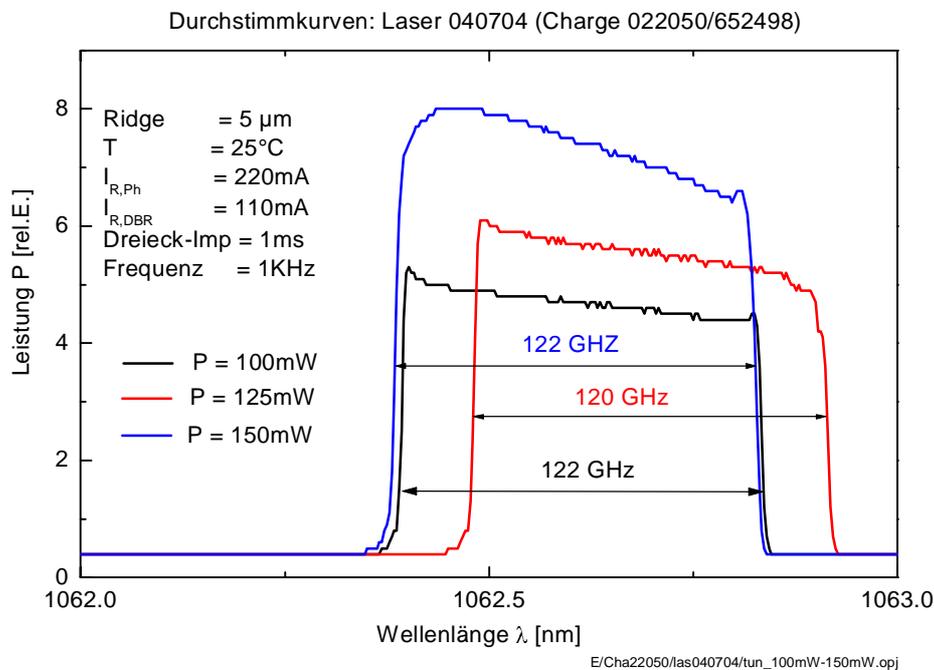


Abb. 26: Kontinuierliche Durchstimmung der Laserlinie im Leistungsbereich 100mW–150mW.

Die Durchstimmrage betrug 1kHz (Anwendung zur Formerkennung). Die Wellenlängenverschiebung zwischen 100mW und 125mW ist auf einen Sprung im longitudinalen Modenspektrum zurückzuführen, hat aber keinen Einfluss auf die angestrebten Anwendungen.

Ein wichtiges Kriterium für den Einsatz von DBR – Laserdioden ist die Stabilität der Emissionsstrahlung. Zum Nachweis der Lebensdauer wurden 10 Laserdioden auf TO-3 Halter montiert und in einem Belastungsgestell gealtert. Die Laser wurden in Reihe geschaltet und mit einem Gleichstrom von 170 mA durch die Gewinnsektion über 1017 Stunden bei 25 °C Umgebungstemperatur betrieben. Die Ausgangsleistungen der Einzellaser lagen zwischen 110 mW und 130 mW. Abb. 27 zeigt das Ergebnis des Belastungstests.

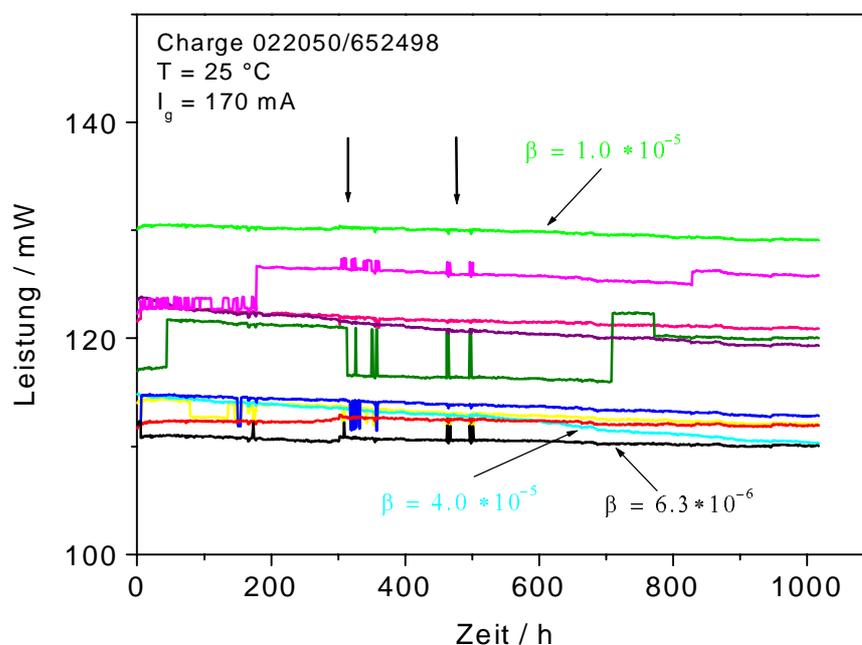


Abb. 27: Alterungsverhalten von 10 DBR – Laserdioden im TO-3 Gehäuse

Während der Belastung ist kein Laser ausgefallen. Die Degradationsraten der Laser liegen zwischen  $\beta = 6,3 \times 10^{-6}$  und  $\beta = 4,0 \times 10^{-5}$  (die Farben der angegebenen Degradationsraten korrelieren mit den entsprechenden Kurven). Hieraus lassen sich Lebensdauern von > 25000 Stunden ableiten. Die zuerkennenden Sprünge in den Alterungskurven sind auf longitudinale Modensprünge zurückzuführen. Die zwei schwarzen Pfeile markieren zwei Zeitpunkte an denen Zwischenmessungen erfolgten. Nach Wiedereinschalten sieht man bei einzelnen Lasern ein kurzes Einschwingen in der Ausgangsleistung.

## 6.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss Jena GmbH (Innovationszentrum) und der Firma Siemens AG (Zentralbereich Produktion und Logistik, ZPL 1 FPS 4) wurde das Ziel verfolgt, grundlegende Untersuchungen zur Realisierung einer hochpräzisen Distanzmessung über 10m sowie ein Verfahren zur Verschleißmessung von Oberleitungsstromkabeln mit einem FMCW-Laser-Radar durchzuführen. Im Rahmen des Projektes wurden am FBH Hochleistungslaserdioden mit Gittern 1. und 2. Ordnung mit geringer spektraler Linienbreite und großem Durchstimmbereich entwickelt.

Die erreichten Leistungsdaten dieser Dioden lagen weit über den angestrebten Zielparametern. So konnten Ausgangsleistungen  $> 180$  mW im Einmodenbetrieb erreicht werden. Die gemessene Linienbreite lag unter 1 MHz und mit 10 ms Stromimpulsen durch die Widerstände oberhalb der DBR- und Phasensektionen konnte eine kontinuierliche Durchstimmung  $>300$  GHz nachgewiesen werden. Für die Anwendung in der Formerkennung konnte der kontinuierliche Durchstimmbereich  $>100$ GHz in  $250\mu\text{s}$  erreicht werden. Der Nachweis einer Langzeitstabilität wurde in mehreren Alterungstests über 1000h bei nachgewiesen. Den Projektpartnern konnten im Rahmen dieses Projektes jeweils vorfristig Laserdioden für ihre Untersuchungen übergeben werden.

## 7. Voraussichtlicher Nutzen

Der wesentliche Nutzen des Projekts liegt in der Entwicklung und Realisierung von DBR - Laserdioden, die als Sendelichtquellen für ein FMCW – Laserradar eingesetzt werden können.

- Ausgangsleistung im longitudinalen Einmodenbetrieb  $> 175$  mW
- Seitenmodenunterdrückung  $> 35$  dB, Linienbreite  $< 1$  MHz, Durchstimmbereich bis 310 GHz
- I Stabilitätsnachweis über 1000 h bei  $25$  °C und  $>100$  mW,

Gemäß Aufgabenstellung erfolgte die Projektbearbeitung in Kooperation mit der der Carl Zeiss Jena GmbH (Innovationszentrum) und der Firma Siemens AG (Zentralbereich Produktion und Logistik, ZPL 1 FPS 4).

Im Rahmen dieser Vereinbarung wurden seitens des FBH an die Projektpartner mehrmals DBR – Laserdioden im TO-3 Gehäuse geliefert und so die Voraussetzungen für die Entwicklung eines FMCW – Laserradars für eine hochgenaue Entfernungsmessung und Formerkennung geschaffen.

Für Entwicklungen von Geräten zur Erzeugung kurzer Impulse konnten die hergestellten Laserdioden weiteren Firmen zur Verfügung gestellt werden (Pico – Quant, APhS). Auch für den Einsatz in der Spektroskopie wurden DBR – Laser der Firma TUI - Optics bereitgestellt. Auf der Basis der erarbeiteten Technologie sind die Laser weiterhin verfügbar und können weiteren Anwendern geliefert werden.

## 8. Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Laufe der Projektbearbeitung konnte aus der Literatur kein Fortschritt bei anderen Stellen bei der Entwicklung von monolithischen Lasern bei einer Emissionswellenlänge von ~ 1060 nm erkannt werden. Im Gegenteil, die Firma SDL, die Laserdioden bei dieser Wellenlänge hergestellt hatte, nahm diese Produkte aus ihrem Katalog. So ist unserer Kenntnis nach das FBH die einzige Stelle, die DBR-Laser bei einer Wellenlänge von ~ 1060 nm bereitstellen kann.

## 9. Literatur

- /1/ M. de La Chapelle u.a., "Diode Laser Radar System Analysis and Design for High Precision Ranging", *SPIE Vol. 1043 Laser Diode Technology and Applications* (1989), S. 228
- /2/ A. R. Slotwinski u.a., "Utilising GaAlAs Laser Diodes as a Source for Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Coherent Laser Radars", *SPIE Vol. 1043 Laser Diode Technology and Applications* (1989), S. 245
- /3/ P. Thürmel, "Frequenzmodulierter Dauerstrich Laser-Radar für die industrielle Meßtechnik", *Forschungsbericht TU München in Zusammenarbeit mit Siemens AG*, Feb. 1994
- /4/ J.S. Major u.a., "Singlemode AlGaAs/GaAs distributed Bragg reflector laser diodes operating at 856 nm", *Electronics Letters* Vol. 30, March 1994, No. 6, 496
- /5/ M. Suehiro u.a., "GaAs/AlGaAs First-order gratings fabricated with electron beam lithography and very-narrow-linewidth long-cavity DBR laser diodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**, pp. 2081 - 2087
- /6/ Y.K. Sin u.a., "High power InGaAs-GaAs-InGaP distributed feedback buried heterostructure strained quantum well lasers grown by three step MOVPE", *Electron. Lett.*, 1993, **29**, pp. 253 - 255

- /7/ S. O'Brien u.a., "High power single mode GaInAs lasers with distributed Bragg reflectors", *Electron. Lett.*, 1992, **28**, pp.1272 - 1273
- /8/ S. Hirata u.a., "AlGaAs/GaAs distributed feedback lasers with first-order grating fabricated by metal organic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* 1987, vol. 51, p. 63-65
- /9/ T. Hirata u.a., "Fabrication and characteristics of GaAs-AlGaAs tunable laser diodes with DBR and phase-control sections integrated by compositional disordering of a quantum well", *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**, pp. 1609 - 1615
- /10/ R.D. Martin u.a., "InGaAs-GaAs-AlGaAs laterally-coupled distributed feedback (LC-DFB) ridge laser diode", *Electron. Lett.*, 1994, **30**, pp. 1058 - 1060
- /11/ T. Hirata u.a. "Fabrication of 780-nm AlGaAs tunable distributed Bragg reflector laser diodes by using compositional disordering of a quantum well", *Jpn. J. App. Phys.*, 1991, **30**, pp. 3410 - 3415
- /12/ G.M. Smith u.a., "Wavelength tunable two-pad ridge waveguide distributed Bragg reflector InGaAs-GaAs quantum well lasers", *Electron. Lett.*, 1994, **30**, pp. 1313 - 1314
- /13/ F. Wittgreffe u.a. "Semiconductor lasers for spectroscopy", *Meas. Sci. Technol.*, 1991, **2**, pp. 304 - 311
- /14/ P.L. Fuhr u.a., "Laser diode frequency sweeping techniques for fiber optic sensors and systems", *SPIE Fiber Optic and Laser Sensors*, 1989, **1169**, pp. 114 - 125
- /15/ S. Murata u.a., "Over 720 GHz (5,8 nm) frequency tuning by a 1,5  $\mu\text{m}$  DBR laser with phase and Bragg wavelength control regions", *Electron. Lett.*, 1987, **23**, pp. 403 - 405
- /16/ T. Wolf u.a., "Tunable twin-guide (TTG) distributed feedback (DFB) laser with over 10 nm continuous tuning range" , *Electron. Lett.*, 1993, **29**, pp. 2124 - 2125
- /17/ Typ YL85XNW/XTW von der Firma Laser 2000
- /18/ G.M. Smith u.a., "Wavelength tunable two-pad ridge waveguide distributed Bragg reflector InGaAs-GaAs quantum well lasers", *Electron. Lett.*, 1994, **30**, pp. 1313 - 1314
- /19/ G.M. Smith u.a., "Ridge waveguide distributed Bragg reflector InGaAs/GaAs quantum well lasers", *Electron. Lett.*, 1994, **30**, pp. 651 - 653
- /20/ V. V. Wong u.a., "Ridge-grating distributed-feedback lasers fabricated by X-ray lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1993, 11 pp. 2621
- /21/ S.L. Woodward u.a., "A DBR laser tunable by resistive heating", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**, pp. 1330 - 1332

## Eigene Veröffentlichungen:

- /P01/ A. Klehr, F. Bugge, G. Erbert, A. Knauer, J. Sebastian, V.B. Smirnitzky, A. Thies, H. Wenzel, G. Tränkle, „ High power ridge-waveguide DBR lasers with a 300GHz continuous tuning range“ , Semicond. & Integr. Optoelectr. Conf. SIOE`98, Cardiff, Talk
- /P02/ F. Bugge, A. Knauer, U. Zeimer, J. Sebastian, V.B. Smirnitski, A. Klehr, G. Erbert, M. Weyers, „MOVPE growth of tunable DBR laser diode emitting at 1060nm“ J. Crystal Growth, 195, 1998, pp. 676 - 680
- /P03/ L. Hofmann, G. Erbert, A. Knauer, V.B. Smirnitzky, J. Sebastian, A. Klehr, M. Weyers, W. Stolz, „MOVPE overgrowth of InGaP gratings for GaAs-based DBR lasers“ IPRM 99
- /P04/ L. Hofmann, A. Klehr, A. Knauer, V.B. Smirnitzky, W. Stolz, „DBR lasers emitting at 1060nm with first-order grating in (InGa)P waveguide layer“, Electronics Lett., **35**, 1999, No11, pp 902 - 903
- /P05/ A. Klehr, F. Bugge, G. Erbert, A. Knauer, J. Sebastian, V.B. Smirnitzky, H. Wenzel, G. Tränkle , „High power pulse generation with a three section DBR laser with controllable saturable absorber“ , CLEO 99, 23.5 - 28.5.99, Baltimore (USA), Technical Digest Series, CWD2, p238-239
- /P06/ A. Klehr, F. Bugge, G. Erbert, L. Hofmann, A. Knauer, J. Sebastian, V.B. Smirnitzki, H. Wenzel, G. Tränkle, „300 GHz continuously tunable high power three section DBR laser diode at 1060 nm“ , 26<sup>th</sup> Internat. Sympos. On Comp. Semic., Berlin, Germ. 22 - 26. 8. 99, WeP.15
- /P07/ A. Klehr, F. Bugge, G. Erbert, A. Knauer, J. Sebastian, V.B. Smirnitzki, H. Wenzel, G. Tränkle, „Dynamics of 1060nm three-section DBR laser“ , workshop: Dynamics of semiconductor lasers , Berlin, 1999, Vortrag
- /P08/ L. Hofmann, A. Klehr, A. Knauer, V.B. Smirnitzki, J. Sebastian, G. Erbert. „120mW tunable DBR Lasers emitting at 1060nm“, Electronics Lett., **36**, 2000, No1, pp 38 – 39
- /P09/ L. Hofmann, A. Klehr, F. Bugge, H. Wenzel, V. Smirnitski, J. Sebastian, G. Erbert, „180 mW DBR lasers with first-order grating in GaAs emitting at 1062 nm” , Electronics Letters, vol. 36, no. 06, 16th March, 2000, p. 534- 535
- /P10/ H. Wenzel, A. Klehr, G. Erbert, J. Sebastian, G. Tränkle, M.F. Pereira, „Effect of bandgap renormalization on threshold current and efficiency of a three-section DBR laser“, eingereicht APL
- /P11/ G. Erbert, “Kontinuierlich durchstimmbare Hochleistungslaserdioden für die Messtechnik” Vortrag LOB , Berlin 9.3.2000
- /P12/ A. Klehr, “Kontinuierlich durchstimmbare Hochleistungslaserdioden für die Messtechnik” Vortrag, Forum tech transfer, Hannover Messe 2000, 23.3.2000

/P13/ A. Klehr, F. Bugge, G. Ebert, L. Hofmann, A. Knauer, J. Sebastian, V. B. Smirnitski, H. Wenzel, G. Tränkle, „300 GHz continuously tunable high power three section DBR laser diode at 1060 nm“, Inst. Phys. Conf. Ser., No 166: Chapter 6, pp 383 - 386