

Projekt-Abschlussbericht

Projekt FBH 9140 HaFemLas

Projekttitel:

## Femto-Diode

# Teilvorhaben: Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden-Laserstrahlquellen

Auftraggeber:	BMBF
Projektnummer:	13N8569
Projektlaufzeit:	1.10.2004 bis 30.09.2007
Abschlussbericht:	1.10.2004 - 30.09.2007

Freigabe:

Projektleitung:	Dr. M. Weyers	Dr. G. Erbert
Institutsleiter:	Prof. Dr. G. Trän	kle



### Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart Schlussbaricht			
3a. Titel des Berichts Femto-Diode - Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden-Laserstrahlquellen				
3b. Titel der Publikation 				
4a Autoren des Berichts (Name Vorname	(n))	5 Abschlussdatum des Vorhabens		
Klehr Andress Zern Martin		September 2007		
Ab Autoren der Publikation (Name Vorpa	me(n))	6. Veröffentlichungsdatum geplant		
		7. Form der Publikation Bericht		
8. Durchführende Institution(en) (Name, A	dresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution		
Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequer im Forschungsverbund Berlin e.V.	nztechnik	*) 10. Förderkennzeichen		
Gustav-Kirchhoff-Straße 4		13N8569		
		28		
		11b. Seitenzahl Publikation 		
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)		12. Literaturangaben		
Bundesministerium für		0 		
Bildung und Forschung (BMBF)		14. Tabellen 5		
53170 Bonn		15. Abbildungen 40		
16. Zusätzliche Angaben				
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) 				
18. Kurzfassung				
<ul> <li>Folgende wissenschaftlich-technis</li> <li>Technologien und Designs für für Drei-Sektions-DBR-Laser fü</li> <li>HF-Ansteuerung für Mehrsektig Diese Bauelemente wurden von U</li> </ul>	sche Ergebnisse wurden im Rahme Zwei-Sektions RW-Laser für die We ir 920 nm und für Trapezverstärker ons-DBR-Laser zum aktiven mode Ini Bochum und Uni Kaiserslautern	n des Vorhabens erarbeitet: ellenlängen 830 nm und 920 nm, für 830 nm und 920 nm locking im Systemeinsatz getestet.		
Technologien und Designs für kurzer Pulse	Halbleiterscheibenlaserchips (SCD	L) optimiert für die Erzeugung		
<ul> <li>SAM-Strukturen mit neuartigem Design mit QW an der Oberfläche</li> <li>Optimierte Wellenlängenabstimmung zwischen SCDL und SAM für kurze Pulse Mit diesen Komponenten wurden vom Partner MBI Pulslängen von 290 fs erzielt, was einen Weltbestwert für Systeme auf der Basis von Halbleiterscheibenlasern darstellt.</li> </ul>				
Monolithische 4-Sektions-DBR-Laser wurden anhand von Modellierungsrechungen entworfen und realisiert. Mit diesen Bauelementen wurden Pulse von 7 ps bei ca. 4 GHz Folgefrequenz und Spitzenleistungen von 3,6 W erzielt.				
19. Schlagwörter DBR Laser, Trapezverstärker, fs-F	Pulsquelle, ps-Pulsquelle, SAM, SC	DL,		
20. Verlag 		21. Preis 		

## **Document Control Sheet**

1. ISBN or ISSN planned	2. Type of Report Final report			
3a. Report Title Femto – Diode: Semiconductor devices for				
remo -Diode. Semiconductor devices for compact is laser sources				
3b. Title of Publication				
4a. Author(s) of the Report (Family Name,	First Name(s))	5.End of Project		
Klehr, Andreas, Zorn, Martin		6. Publication Date		
4b. Author(s) of the Publication (Family Na	me, First Name(s))	planned		
		7. Form of Publication Report		
8. Performing Organization(s) (Name, Add	ress)	9. Originator's Report No.		
Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequer	nztechnik			
Im Forschungsverbund Berlin e.v.		10. Reference No. 13N8569		
Gustav-Kirchhoff-Straße 4 12489 Berlin		11a No. of Damas Danast		
Germany		28		
		11b. No. of Pages Publication		
13. Sponsoring Agency (Name, Address)		12. No. of References 8		
Bundesministerium für		14. No. of Tables		
Bildung und Forschung (BMBF)		5		
53170 Bonn		15. No. of Figures 40		
16. Supplementary Notes				
17. Presented at (Title, Place, Date)				
18. Abstract				
<ul> <li>The following scientific and techni</li> <li>technologies and designs for the lasers at 920 nm and tapered a</li> <li>RF-driver for multisection DBR These devices were tested in systematical systematical</li></ul>	cal results have been obtained: wo-section RW-lasers at 830 nm un amplifiers at 830 nm und 920 nm -lasers for active mode locking ems at Uni Bochum and Uni Kaiser	d 920 nm, for three-section-DBR slautern.		
<ul> <li>technologies and designs for semiconductor disc lasers (SCDL) optimized for short pulse generation</li> <li>SAM-structures with novel design with surface QW</li> <li>optimized wavelength combination of SCDL and SAM for short pulses.</li> <li>With these components partner MBI has obtained pulses of 290 fs. This represents a world record for systems based on SCDLs.</li> </ul>				
Monolithic 4-section-DBR-lasers were designed based on device modelling. With such devices pulses of 7 ps duration at 4 GHz repetition rate and 3.6 W peak power were obtained.				
19. Keywords				
DBR laser, tapered amplifier, fs pu	ulses, ps pulses, SAM, SCDL,			
20. Publisher		21. Price		
1.77				

# Verbundvorhaben Femto-Diode

# Teilvorhaben: Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden-Laserstrahlquellen (Hafemlas)

Förderkennzeichen:	13 N 8569
Laufzeit:	01.10.2004 - 30.09.2007
Berichtszeitraum:	01.10.2004 - 30.09.2007

## Abschlussbericht

Institutsleiter:	Prof. Dr. G. Tränkle	
Projektleiter:	Dr. M. Weyers	Dr. G. Erbert
Bearbeiter:	Dr. J. Fricke	
	Dr. A. Knauer	
	Dr. A. Klehr	
	Dr. W. Pittroff	
	R. Staske	
	Dr. H. Wenzel	
	Dr. U. Zeimer	
	Dr. M. Zorn	



#### <u>Inhalt</u>

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

siehe Anlage 1

2. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Die Arbeiten wurden im Zeit- und Kostenplan abgeschlossen.

- 3. Haben sich die Aussichten f
  ür die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Kostenzeitraums gegen
  über dem urspr
  ünglichen Angebot ge
  ändert? Nein
- 4. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Nein

5. Sind Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

Nein

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

a. Schutzrechte

Es wurden keine vorhabensbezogenen Schutzrechte angemeldet oder erteilt.

b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Keine Änderung gegenüber Antrag

c. Wissenschaftlich/technische Erfolgsaussichten

Keine Änderung gegenüber Antrag

d. Anschlussfähigkeit für nächste Projektphase

Basierend auf den guten Ergebnissen, die am FBH und bei den Partnern mit den entwickelten Bauelementen erzielt wurden, wurden Folgeanträge im Programm "InLas" gestellt werden.

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 1: Angaben zu Pkt. 1
- Fachlicher Bericht

Berlin, den 29.03.2008

Dr. Markus Weyers

Dr. Götz Erbert

- Projektleiter -



# Anlage 1: Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Es wurden Komponenten für kompakte Femtosekunden-Strahlungsquellen entwickelt, hergestellt und den Projektpartnern bereitgestellt.

Hierbei handelt es sich zum einen um Diodenlaser für die Systeme der Projektpartner Uni Bochum und Uni Kaiserslautern:

- Zwei-Sektions Ridge Waveguide Laser für die Wellenlängen 830 nm und 920 nm
- Drei-Sektions-DBR-Laser für 920 nm
- Trapezverstärker für die Wellenlängenbereiche 830 nm und 920 nm

Durch Realisierung von neuen SLOC (super large optical cavity) Vertikalstrukturen konnten Halbwertsbreiten des vertikalen Fernfeldes von bis unter 20° erreicht werden. Diese schmalen vertikalen Fernfelder ermöglichen eine bessere Ankopplung an externe Systeme zur Impulserzeugung, wie sie an den Universitäten Bochum und Kaiserslautern verwendet werden.

Es wurden sowohl Vertikalstrukturen mit Einfach- (SQW) und Doppel-Quantum-Well (DQW) hergestellt. Unsere Untersuchungen zeigen, dass mit den DQW-Strukturen eine höhere Ausgangsleistung bzw. Verstärkung erreicht werden kann.

Verschiedene Geometrien der Laser und Verstärker wurden realisiert, so dass den Partnern zur Optimierung der Impulserzeugung ein breites Spektrum unterschiedlicher Bauelemente zur Verfügung steht.

Durch Realisierung einer sehr guten Entspiegelung der Frontfacette ( $R_f < 10^{-4}$ ) bei den Lasern bzw. der Front- und Rückfacette ( $R_f < 10^{-4}$ , $R_r < 10^{-4}$ ) bei den Verstärkern, wurden kompakte Bauelemente für die Anwendung im äußeren Resonator und als Verstärker bereitgestellt.

Für die Impulserzeugung mittels aktivem mode locking wurde eine HF-Einspeisung entwickelt und realisiert, die in dem angestrebten Frequenzbereich um 4,5 GHz eine optimale Ankopplung der DBR-Laser an die Impulsstromquelle ermöglicht.

Neben den Komponenten für die hybriden Systeme der Projektpartner wurden auch monolithische Lösungen für Kurzpulslaser auf Halbleiterbasis erforscht. Theoretische Untersuchungen zur Realisierung von internem mode locking in 1 cm langen 4-Sektions-DBR-Lasern wurden durchgeführt. Dabei wurden verschiedene geometrische Konfigurationen bzgl. Dynamik, maximaler Pulsleistung, Pulsenergie und Pulsbreite untersucht. Als bestes Layout erwies sich bei einem 1 cm langen Laser die Absorber-Sektion an der Frontfacette, dahinter die Gewinn-Sektion, dann die Cavity-Sektion und an der Rückfacette die Gittersektion. Mit solchen Bauelementen wurden Pulse von 7 ps Länge mit 4,1 GHz Folgefrequenz und 3,6 W Spitzenleistung erzielt.

Für Halbleiterscheibenlaser (SCDL) als Bottom-Emitter wurden Epitaxieprozesse sowie Charakterisierungsverfahren für unprozessierte Epitaxiestrukturen entwickelt. Chips mit unterschiedlicher Anzahl an QWs sowie QW Designs wurden prozessiert und aufgebaut an das MBI geliefert. Sättigbare Absorberstrukturen (SAM) mit oberflächennahen QWs wurden weiterentwickelt und in Kooperation mit dem MBI charakterisiert. Ein Ultrakurzpulssystem aus SCDL-Verstärkungschip und SAM Strukturen erzeugt Pulse von 290 fs bei 3 GHz Repetitionsrate. Mit im Hause entwickelter Ansteuerungsschaltung und Trapezverstärkern ist pulse picking möglich.

Es wurden an die Universität Bochum 86 Laserbauelemente bei 840 nm, an die Universität Kaiserslautern 95 Laserbauelemente bei 920 nm und an das Max-Born-Institut ca. 70 SCDL und ca. 20 SESAM-Chips sowie 4 Laserdioden zum Pumpen für Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes geliefert.





#### Veröffentlichungen in Zeitschriften und Konferenzbeiträge

K.-H Hasler, A. Klehr, H. Wenzel and G. Erbert "Simulation of high-power pulse generation due to modelocking in long multisection lasers" IEE Proc. Optoelectronics Vol. 152, No. 2, 2005 T.N. Le, M. Breede, M. Hofmann, A. Klehr, G. Erbert "Hybride Modenkopplung von Diodenlasern mit resonatorinterner Dispersionskompensation" DPG- Tagung 2006, Frankfurt U. Griebner, S. Rivier, V. Petrov, M. Zorn, G. Erbert, M. Weyers, X. Mateos, M. Aguiló, J. Massons, F. Díaz "Passively mode-locked Yb:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> oscillators" Optics Express 13 (2005) 3465. M. Zorn, T.K. Tien, J.W. Tomm, H. Kissel, U. Zeimer, F. Saas, U. Griebner, M. Weyers "MOVPE growth of semiconductor disk laser (SCDL) structures" Proc. 11<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, June 2005, Lausanne, Switzerland, F09, p. 309-311. S. Rivier, X. Mateos, V. Petrov, U. Griebner, A. Aznar, O. Silvestre, R. Sole, M. Aguilo, F. Diaz, M. Zorn and M. Weyers "Mode-locked laser operation of epitaxially grown Yb:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composites" Optics Letters, Vol. 30, No. 18 / September 15 (2005) 2484-2486. F. Saas, V. Talalaev, U. Griebner, J.W. Tomm, M. Zorn, A. Knigge, M. Weyers "Optically pumped semiconductor disk laser with graded and step indices" Appl. Phys. Lett. 89, 151120 (2006) F. Saas, G. Steinmeyer, U. Griebner, M. Zorn, M. Weyers "Exciton resonance tuning for the generation of subpicosecond pulses from a modelocked

semiconductor disk laser"

Appl. Phys. Lett. 89, 141107 (2006)

S. Rivier, X. Mateos, J. Liu, V. Petrov, and U. Griebner, M. Zorn, M. Weyers, H. Zhang, J. Wang, and M. Jiang

"Passively mode-locked Yb:LuVO4 oscillator"

Optics Express, Vol. 14, Issue 24, pp. 11668-11671 (2006)

S. Rivier, A. Schmidt, C. Kränkel, R. Peters, K. Petermann, G. Huber, M. Zorn, M. Weyers, A. Klehr, G. Erbert, V. Petrov, and U. Griebner

"Ultrashort pulse Yb:LaSc3(BO3)4 mode-locked oscillator" Optics Express **15** (2007) 15539

F. Saas, V. Talalaev, J.W. Tomm, G. Steinmeyer, U. Griebner, M. Zorn, and M. Weyers "Optically pumped semiconductor disk laser with graded and step indices for cw and ultrashort pulse generation"

Conference Digest CLEO/Europe 2007, Paper CB13-3

T.N. Le, M.R. Hofmann, A. Klehr and G.Erbert, "*Hybrid and passive mode-locking of a two-section laser diode in a Fourier transform external cavity*", IEE Proceedings Optoelectronics **153**, 312 (2006)

T. Ulm, H. Fuchs, A.L`huillier, A. Klehr, B. Sumpf, E. Gehrig *"Amplification of kW peak power femtosecond pulses in single quantum well InGaAs tapered amplifiers*" Optics Comm., accepted for publication

T.Schlauch, M. Li, M. Hofmann, A. Klehr, G. Erbert, G. Tränkle "*High peak power femto-second pulses from a mode-locked semiconductor laser in an external cavity*" Eingereicht Electronics Lett.



### Fachlicher Bericht

#### " Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden-Laserstrahlquellen "

#### Abschlussbericht

#### A. Klehr, M. Zorn

In diesem Projekt wurden vom FBH Komponenten für kompakte Femtosekunden-Strahlungsquellen entwickelt und den Projektpartnern bereitgestellt. Die Ziele des FBH`s in diesem Projekt sind in Tabelle 1 aufgelistet.

	AP	Lasertyp	Wellenlänge	Leistung/M <sup>2</sup>	Energie	Zeitverh.
Komponenten	A 1	2 Sektions-RWE Laser	830 nm	P~100 mW		300 MHz
für 830 nm (Uni Bochum)	A 2	Trapezverstärker	830 nm	P <sub>m</sub> > 1,5 W		τ < 500 fs
Komponenten für 920 nm	B1	2 Sektions-RWE Laser	920 nm	P <sub>m</sub> ~ 50 mW M <sup>2</sup> ~ 1	E = 2-5 pJ	4,5 GHz
(Uni Kaisers- lautern)	B2	3 Sektions-DBR Laser	920 nm	P <sub>m</sub> ~ 50 mW M <sup>2</sup> ~ 1	E = 2-5 pJ	4,5 GHz
	B3	4 Sektions-DBR Laser	920 nm	P <sub>m</sub> ~ 50 mW M <sup>2</sup> ~ 1	E = 2-5 pJ	4,5 GHz
	B4	Trapezverstärker	920 nm	P <sub>m</sub> 510 W P <sub>m,sat</sub> 10 mW P <sub>ASE</sub> < 20 mW		
Bauelemente	C1	SCDL Strukturen	1030 nm			
auf der Basis	C2	SAM Strukturen	1030 nm			
von SCDL	C3	Pumplaser	1030 nm			
(MBI)	C4	Trapezverstärker	1030 nm			

Tab.1 Ziele des FBH im Projekt "Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden - Laserstrahlquellen"

Die Arbeiten umfassten die folgenden Aktivitäten und erbrachten die folgenden Ergebnisse:

#### Arbeiten zu 830 nm Lasern und Verstärkern: Arbeitspaket A

#### Arbeitspaket A 1 – MS-RW-Laser für 830 nm

Es wurden Wafer mit quaternären GalnAsP SQW und DQW hergestellt. Aus dem Wafermaterial wurden sowohl 3 mm lange RW-Laser für Vergleichsmessungen als auch 2-Sektions-RW-Laser mit unterschiedlichem Layout zur Optimierung der Impulserzeugung, hergestellt. Abb. 1 zeigt die verschiedenen Layouts.

Die 2-Sektions-Laser hatten Längen von 600 µm und 1200 µm. Dabei haben die 600 µm langen Laser Absorberlängen von 40 µm und 80 µm. Bei den 1200 µm langen Lasern wurden die Absorberlängen von 80 µm bis 300 µm variiert. Bei den Lasern mit Absorberlängen von 100 µm, 200 µm und 300 µm wurde zusätzlich auf der Mesastruktur die Metallisierung als Heizer ausgeführt. Damit kann die Absorption definiert über eine Aufheizung gesteuert werden.

Für den Einsatz in einem äußeren Resonator im Rahmen des Projektes an der Universität Bochum wurden die 600 µm und 1200 µm langen Laser auf der Frontfacette entspiegelt ( $R_f < 10^{-4}$ ) und auf der Rückfacette mit 95 % verspiegelt. Alle Bauelemente wurden auf C-Mount montiert. Bei den 2-Sektions-Lasern wurden die Gewinn- und Absorbersektion auf getrennte Bondstützpunkte kontaktiert. Bei den Messungen wurde der C-Mount thermisch stabilisiert.





Abb. 1 Design von 2 Sektions-RW - Lasern

Die vertikale Fernfeldverteilung eines 3 mm DQW-RW-Lasers bei 200 mA Anregungsstrom ist in Abb. 2 dargestellt. Bei den hier entwickelten Lasern mit SLOC-Struktur liegt die Halbwertsbreite (FWHM) des vertikalen Fernfelds bei ca. 20° und ist damit um 5° bis 15° geringer als bei typischen kommerziell angebotenen Laserstrukturen. Die 1/e<sup>2</sup> Breite liegt bei ~ 36°. Damit kann bereits mit Linsen (FAC) mit NA von 0.5 eine hohe Koppeleffektivität im externen Resonator erreicht werden.



Abb. 2 vertikale Fernfeldverteilung eines 3 mm langen SLOC-RW-Lasers mit DQW bei 200 mA

Abb. 3 zeigt die P-I-Kennlinien von SLOC-RW-Lasern mit SQW (blau) und DQW (rot). Die Schwellenströme beider Lasertypen betragen 62 mA bzw. 64 mA. Die Steilheit der DQW-Laser (0,89 W/A) ist im Vergleich zu den SQW-Lasern (0,86 W/A) etwas höher. Beim SQW-Laser sieht man oberhalb von 200 mW Instabilitäten in der Kennlinie. Beim DQW ist die Kennlinie linear bis über 300 mW. Damit wird das Ziel (> 100 mW) deutlich übertroffen wird. Der laterale Fernfeldwinkel hat eine Halbwertsbreite von 12°.





Abb.3 Leistungs-Strom Kennlinien von 3 mm langen SLOC-RW- Lasern mit SQW (blau) und DQW (rot)

Die Gewinnkurven beider Strukturen liegen im angestrebten Wellenlängenbereich von 830 nm. Die Kennlinien von entspiegelten 600 µm langen RW-Lasern (RWE) mit SQW bzw. DQW mit (rot) und ohne (blau) Strom durch die Absorber-Sektion (I<sub>abs</sub>) sind in Abb. 4 gezeigt.



Abb. 4  $P-I_g$  Kennlinien von 830 nm SQW und DQW RWE-Lasern mit entspiegelter Frontfacette ( $R_f < 10^{-4}$ ) bei Variation des Stromes  $I_{abs}$  durch die Absorber-Sektion

Über den untersuchten Bereich von Strömen durch die Gain-Sektion von  $I_g = 0$  mA bis 200 mA wird mit einem Strom  $I_{abs}$  durch die Absorbersektion von 20 mA die Laserschwelle in beiden Strukturen nicht erreicht. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Frontfacettenentspiegelung exzellent ( $\leq 10^{-4}$ ) ist.

Die realisierten Laser zeigten alle geforderten Laserparameter, so dass das Projektziel erreicht wurde. Von den montierten RWE-Lasern wurden im Projektzeitraum 61 Stück für Untersuchungen zur Kurzpulserzeugung an die Universität Bochum geliefert.



#### Arbeitspaket A 2 - Verstärker bei 830 nm für 300 MHz Folgefrequenz

Es wurden sowohl Strukturen mit SQW in SLOC-Struktur als auch mit DQW in asymmetrischer SLOC-Vertikalstruktur (aSLOC) hergestellt. Bei der aSLOC-Struktur sind der n-Wellenleiter 2400 µm und der p-Wellenleiter 1200 µm dick. Aus diesen Strukturen wurden Trapezbauelemente mit 4 mm und 8 mm Länge prozessiert. Der RW-Teil hatte unterschiedliche Längen von 500 µm, 1000 µm und 2000 µm (4 mm Bauelemente) und 2000 µm und 4000 µm (8 mm) sowie Trapezwinkel von 4° und 6°, so dass ein breites Spektrum unterschiedlicher Bauelemente für Untersuchungen zur Verfügung steht. Abb. 5 zeigt eine Prinzipskizze der entwickelten Trapezbauelemente.



Abb. 5 Prinzipskizze der entwickelten Trapezbauelemente

Bei den Trapezverstärkern wurden die Front- ( $R_f$ ) und Rückfacette ( $R_r$ ) auf <10<sup>-4</sup> entspiegelt. Die 4 mm langen Trapezbauelemente wurden auf 4 mm lange C-Mount Wärmesenken p-down montiert. Die besten Ergebnisse wurden mit Trapezlasern und Trapezverstärkern mit einem DQW in aSLOC-Vertikalstruktur erreicht.



Abb.6 P-I Kennlinie eines montierten Trapezverstärkers mit 2000 µm RW- und 2000 µm Trapez-Teil und einem Trapezwinkel von 6°



Abb. 6 zeigt eine gemessene P-I Kennlinie bei 25°C eines montierten Trapezverstärkers mit 2000 µm RW- und 2000 µm Trapezteil und einem Trapezwinkel von 6° bei Strömen bis 6 A. Der Verstärker hat bei 6 A eine Ausgangsleistung von ca. 290 mW und die Kennlinie beginnt dort thermisch bedingt abzuknicken.

Das Gewinnspektrum dieses Trapezverstärkers bei 6 A Anregungsstrom ist in Abb. 7 dargestellt. Das Maximum des Spektrums liegt bei ca. 847 nm und die Verstärkungsbreite beträgt ca. 40 nm.



Abb.7 Gewinnspektrum eines Trapezverstärkers bei T = 25°C und 6 A Anregungsstrom



Abb. 8 P-I Kennlinien von 2 geseedeten Trapezverstärkern mit unterschiedlicher Trapezgeometrie

Der oben gezeigte Trapezverstärker wurde dann in einem master oscillator power amplifier (MOPA)-Aufbau mit einem RW-Laser einer Wellenlänge von  $\lambda \sim 845$  nm geseedet. Der Seed-Laser hatte einen Anregungsstrom I<sub>sl</sub> von 75 mA, was einer Ausgangsleistung von ca. 30 mW entspricht. Die Wärmesenkentemperatur des Verstärkers wurde auf 15°C stabilisiert. Die P-I Kennlinie des geseedeten Trapezverstärkers ist in Abb. 8a gezeigt. Bei 1,6 A wird die Schwelle erreicht. Bis 4,5 A zeigt die Kennlinie einen linearen Verlauf mit einem Anstieg von 1 W/A. Oberhalb von 4,5 A ist ein thermisches Abknicken zu beobachten. Bei einem Trapezstrom von 6 A wird eine Ausgangsleistung von 3,35 W erreicht. Als Vergleich ist in Abb. 8b ein geseedeter Trapezverstärker mit einer anderen Geometrie (500 µm RW- und 3500 µm Trapezteil und einem Trapezwinkel von 4°) gezeigt. Auch hier wird eine Ausgangsleistung von 3,3 W erreicht. Abb. 9 zeigt das Emissionsspektrum des



geseedeten Trapezverstärkers aus Abb. 8a. Die Emissionswellenlänge entspricht der Laserwellenlänge der RW-Seedlasers.



Abb. 9 Emissionsspektrum des geseedeten Trapezverstärkers bei 3,5 W Ausgangsleistung bei einer Seedleistung von ca. 30 mW.

Die Ergebnisse aus Abb. 8 und 9 zeigen, dass die erreichte dc-Leistung mehr als doppelt so hoch ist wie die angestrebte Zielleistung ( $P_m > 1,5$  W) und dass die Emissionswellenlänge auf den angestrebten Wert geseedet werden kann, womit die angestrebten Projektziele erreicht sind.

Von diesen Bauelementen wurden im Projektzeitraum 25 Stück an die Universität Bochum für Untersuchungen zur Impulsverstärkung geliefert.

In Tab. 2 sind die Projektergebnisse für den Arbeitspunkt A (Laserkomponenten für 830 nm für die Universität Bochum zur Erzeugung von Femtosekunden-Strahlquellen zusammengefasst.

Lasertyp	Angestrebter Wellenlängen- bereich	Geforderte Leistung	Erreichte Leistung	Realisierter Wellenlängen- bereich	Gelieferte Bauelemente
2 Sektions-RWE Laser	830 nm	P~100 mW	300 mW	810 – 850nm	61
Trapezverstärker	830 nm	P <sub>m</sub> > 1,5 W	3,3 W	820 – 860nm	25

Tab. 2 Erreichte Laserdaten für 840 nm Bauelemente



#### Arbeiten zu 920 nm Lasern und Verstärkern: Arbeitspaket B

#### Arbeitspaket B1 - Mehrsektions (MS)-RW-Laser bei 920 nm

Es wurden Strukturen mit InGaAs-SQW und -DQW für den Wellenlängenbereich 920 nm hergestellt. Aus diesem Wafermaterial wurden sowohl 3 mm lange RW-Laser als Vergleichsstrukturen, als auch 2 Sektion-RW-Laser mit unterschiedlichem Layout zur Optimierung der Impulserzeugung hergestellt (siehe AP1, Abb. 1). Die Laserschwelle bei diesen Bauelementen lag im Antest (unverspiegelte Facetten) bei 23 mA und der Anstieg bei ~ 1 W/A.

Durch Entspiegelung der Frontfacette auf  $R_f < 10^{-4}$  wurden 2-Sektions-RWE-Laser prozessiert. Die Laser wurden mit der aktiven Seite nach oben auf eine C-Mount-Wärmesenke montiert. Ein Foto eines montierten 2-Sektions-RWE-Lasers ist in Abb. 10 gezeigt. Der Pfeil gibt die Emissionsrichtung der Ausgangsstrahlung an. Der linke Teil wirkt als Absorber zur Impulserzeugung.



Abb. 10 Foto eines montierten 2-Sektions-RWE-Lasers

Eine Leistungs-Strom Kennlinie eines 1,2 mm langen entspiegelten Lasers mit 200 µm Absorberlänge ist in Abb. 11 gezeigt. Bis 200 mA zeigt der Laser nur spontane Emission und erreicht eine Ausgangsleistung von 27,6 mW.



Abb. 11 P-I Kennlinie eines 1,2 mm langen Lasers mit 200 µm Absorberlänge



Das optischen Spektren (Gewinnkurve) bei Anregung der Verstärkersektion mit 150 mA und ohne Absorberstrom ist in Abb. 12 dargestellt. Die angestrebte Wellenlänge um 920 nm liegt im Gewinnmaximum. Verstärkte spontane Emission wird im Wellenlängenbereich von 860 nm bis 950 nm erreicht.



Abb.12 Optisches Spektrum eines 920 nm RWE-Lasers mit DQW bei  $I_g$  = 150 mA ohne Absorberstrom bei T = 25 °C

Abb.13 zeigt P-I Kennlinien eines RWE-Lasers ohne Rückkopplung (blau) und mit optischer Rückkopplung (rot).



Abb. 13 P-Ig Kennlinien eines 920 nm 2-Sektions-RWE-Lasers mit DQW ohne (blau) und mit (rot) Rückkopplung über einen äußeren Spiegel

Dieser solitäre RWE-Laser erreicht bei  $I_g = 200$  mA eine Ausgangsleistung von 78 mW. Bei Rückkopplung der Emissionsstrahlung mit einem äußeren Spiegel mit einer Reflexion von 30% sinkt die Laserschwelle auf 20 mA und die Steilheit beträgt 0,76 W/A. Die Modulation der Leistung oberhalb von 40 mW bei externer Rückkopplung kann über die Phasenbedingungen der internen und externen Lasermoden erklärt werden. Mit Rückkopplung erreicht die Ausgangsleistung bei 200 mA einen Wert von 111 mW, was mehr als das Doppelte der Zielleistung (P<sub>m</sub> > 50 mW) ist.

Im Projektzeitraum wurden von diesen entspiegelten Lasern 43 Stück sowie 3 RW-Laser zum Vergleich an die Universität Kaiserslautern geliefert.



#### Arbeitspaket B2 – MS-DBR-Laser für externe Modenkopplung bei 920 nm

Es wurden Vertikalstrukturen für 920 nm mit DQW und unterschiedlich dicken Wellenleitern (a) Wellenleiterdicke 500 nm (RWS-Struktur), b) Wellenleiterdicke 3600 nm (SLOC-Struktur)) hergestellt. Durch holographische Fotolithografie mittels eines frequenzvervierfachten Nd:YAG Lasers und nass-chemische Ätzung wurden Gitter 2. Ordnung mit einer Gitterperiode vom 280 nm erzeugt. Der Koppelkoeffizient dieser Laser liegt bei ~80 cm<sup>-1</sup>.

Es wurden 3-Sektions-DBR-Laser mit Längen von 1000  $\mu$ m prozessiert, wobei die Gitter-Sektion eine Länge von 200  $\mu$ m hat. Das Layout für einen 1000  $\mu$ m langen DBR-Laser ist in Abb. 14a schematisch dargestellt. Abb. 14b zeigt ein Foto eines montierten 3 Sektions-DBR-Lasers.

Bei den 1000 µm langen Lasern wurden die Absorberlängen von 80 µm bis 200 µm variiert. Bei den Lasern mit Absorberlängen von 100 µm und 200 µm wurden zusätzlich auf der Wellenleiterrippe Heizer integriert, um die Absorption definiert über Aufheizung zu steuern (siehe Abb. 14a). Der RW Wellenleiter wurde bei einem Teil der Laser gekrümmt ausgeführt. (siehe Abb. 15). Hierbei wurden die letzten 200 µm des RW-Teils mit einem Winkel von 5° ausgeführt. Vorteil dieser Variante ist eine bessere Entspiegelung der Frontfacette.



Abb.14 Layout für einen 1000 µm langen 3 Sektions-DBR-Laser (a) und Foto eines montierten Lasers (b).



Abb. 15 RW Wellenleiter mit 200 µm gekrümmten Ausgangsteil

Für Messungen in einem externen Resonator, wie sie an der Universität Kaiserslautern zur Impulserzeugung durchgeführt werden, wurden die Front- und Rückfacetten auf R<sub>f</sub>, R<sub>r</sub> <  $10^{-4}$  entspiegelt. Die Laser wurden auf C-Mount Wärmesenken montiert (siehe Abb. 16). Die Kontakte der Gewinn- und Absorber-Sektionen sind auf getrennte Bondstützpunkte gebondet worden. Zur thermischen Stabilisierung bei den Messungen wurde der C-Mount auf eine Wärmesenke montiert.





Abb. 16 Drei-Sektions-DBR Laser montiert auf einer C-Mount Wärmesenke

Abb. 17a zeigt die P-U-I Kennlinien ohne Strom durch die Absorbersektion (rot) und mit einem Strom von 50 mA (blau). Im untersuchten Strombereich I<sub>g</sub> = 0 mA bis 200 mA wird die Laserschwelle ohne Absorberstrom nicht erreicht, d.h. die optische Welle wird in der Absorbersektion absorbiert. Bei einem Absorberstrom von 50 mA (Erhöhung der Transparenz dieser Sektion) liegt die Laserschwelle bei 73 mA, d.h. die Ausgangsleistung kann über den Absorberstrom moduliert werden. Bei 200 mA wird eine Leistung von 124 mW erreicht, was mehr als dem Doppelten der Zielspezifikation von 50 mW entspricht. Der Anstieg der Leistungs-Strom-Kennlinie liegt bei ~1 W/A. Abb. 17b zeigt das Emissionsspektrum bei I<sub>g</sub> = 200 mA und einem Strom durch die Absorbersektion von 50 mA. Bei I<sub>abs</sub> = 50 mA zeigt das optische Spektrum eine Laserlinie bei einer Wellenlänge von ~ 919 nm. Die Seitenmodenunterdrückung durch das integrierte Gitter ist >30 dB. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die Ausgangsleistung und das optische Spektrum mit dem Absorberstrom modulieren lassen.



Abb. 17 P-U-I<sub>g</sub> Kennlinie eines entspiegelten 3-Sektions-DBR-Lasers mit I<sub>abs</sub> als Parameter (a) und Emissionsspektrum bei I<sub>g</sub> = 200 mA und I<sub>abs</sub> = 50 mA (b).

Für Anwendungen dieser Laser zur Kurzpulserzeugung mittels aktivem mode-locking wurde eine HF-Anpassung realisiert, die in dem angestrebten Frequenzbereich von 4,5 GHz eine optimale Ankopplung der DBR Laser an die Impulsstromquelle ermöglicht (siehe Abb. 18a). Abb. 18b zeigt die Anpassung im Frequenzbereich 4,2 – 4,6 GHz.





Abb. 18 HF-Anpassungsschaltung für den angestrebten Frequenzbereich von 4,5 GHz (a) und gemessenes Verhalten im Frequenzbereich 4,2 – 4,6 GHz

Im Projektzeitraum wurden 12 DBR-Laser auf Hochfrequenzhaltern (RWS- und SLOC-Strukturen) an die Universität Kaiserslautern geliefert.

Die dortigen Untersuchungen mit diesen Bauelementen zeigten, dass das integrierte Gitter den Spektralbereich stark eingrenzt (gemessen 0.42 nm), was Einfluss auf die Impulsbreiten hat. Zur Untersuchung dieser Abhängigkeit wurde von einem Teil der 3-Sektions-DBR-Laser die Gittersektion abgespalten. Die Laser wurden an der Frontseite entspiegelt, so dass 2 Sektions-RWE-Laser mit Absorberlängen von 40 µm bis 300 µm realisiert wurden.

Im Berichtszeitraum wurden 16 Stück dieser 2-Sektions-RWE Laser an die Universität Kaiserslautern geliefert. Typische P-I Kennlinien mit und ohne Strom durch die Absorbersektion sind in Abb. 19a gezeigt. Das Emissionsspektrum bei  $I_g$  = 300 mA und ohne Absorberstrom ist in Abb. 19b dargestellt.



Abb. 19 P-I<sub>g</sub> Kennlinien eines entspiegelten 2-Sektions-RW-Lasers mit I<sub>abs</sub> als Parameter (a) und optisches Spektrum bei I<sub>g</sub> = 300 mA und I<sub>abs</sub> = 0 mA (b).



#### Arbeitspaket B3 – MS-DBR-Laser für interne Modenkopplung 920 nm

Es wurden aus den bereits in B2 beschriebenen Vertikalstrukturen DBR-Laser mit einer Länge von 10 mm und 4 separaten Sektionen hergestellt. Die Möglichkeit von internem mode locking in 1 cm langen 4-Sektions-DBR-Lasern wurde theoretisch untersucht. Dabei wurden verschiedene geometrische Konfigurationen bzgl. Dynamik, maximaler Pulsleistung, Pulsenergie und Pulsbreite betrachtet. Als bestes Layout erwies sich ein 1 cm langer Laser mit der Absorber-Sektion an der Frontfacette, dahinter folgt die Gewinn-Sektion, dann die Kavitäts-Sektion und die Gitter-Sektion befindet sich an der Rückfacette.

Auf der Basis dieser Berechnungen wurden unterschiedliche Laserlayouts hergestellt, so dass eine experimentelle Optimierung bzgl. mode locking und Pulserzeugung erfolgen konnte. Die 10 mm langen Laser bestehen aus einer 200  $\mu$ m langen Absorber-Sektion an der Auskoppelfacette, einer 8100  $\mu$ m, 8600  $\mu$ m bzw. 8850  $\mu$ m langen Kavitäts-Sektion, einer entsprechend 1500  $\mu$ m, 1000  $\mu$ m bzw. 750  $\mu$ m langen Gewinn-Sektion und einer 200  $\mu$ m langen Gitter-Sektion an der Rückfacette (siehe Abb. 20). Sowohl die Absorber-Sektion als auch die Gitter-Sektion können über integrierte Widerstände aufgeheizt und in der Frequenz verstimmt werden. Alle 4 Sektionen können elektrisch getrennt angesteuert werden.



Abb. 20 Layout der 4-Sektions-DBR-Laser für interne Modenkopplung

Die Frontfacette der Laser wurde passiviert und mit 5% verspiegelt, die Rückfacette hinter dem Gitter wurde auf R<sub>r</sub><10<sup>-4</sup> entspiegelt um Fabry Perot Moden zu unterdrücken. Zur elektro-optischen Vermessung der 4-Sektionslaser wurde ein Halter entwickelt, welcher den Anschluss von 6 dc Strömen ermöglicht. Diese sind nötig für die Ansteuerung der 4 Sektionen sowie für die Heizelemente auf der Absorber- bzw. DBR-Sektion. Des weiteren ist für aktives mode locking ein HF-Anschluss integriert worden, welcher es erlaubt, die Absorber- bzw. die Gewinn-Sektion zusätzlich mit einer Frequenz, die der Umlauffrequenz entspricht, zu modulieren. Der Halter wurde so konzipiert, dass die Laser auf einem separaten Kupferträger gehaltert sind und somit schnell und unproblematisch gewechselt werden können (siehe Abb. 21). Der gesamte Halter ist zur Temperaturstabilisierung auf einem Peeltierelement montiert.

Messungen der Ausgangsleistung in Abhängigkeit vom Strom durch die Gitter-Sektion (I<sub>g</sub>) mit dem Strom durch die Kavität (I<sub>c</sub>) als Parameter sind in Abb. 22 gezeigt. Hierbei wird die Kavitäts-Sektion mit einem bestimmten Strom in Flussrichtung betrieben und der Strom durch die Gewinn-Sektion kontinuierlich von Null bis 550 mA erhöht. An der Absorber-Sektion liegt eine Spannung in Sperrrichtung von 0,8 V an. Die DBR-Sektion wurde nicht beschaltet. Mit steigendem Kavitätsstrom erhöht sich die Ausgangsleistung und verringert sich die Laserschwelle, was auf eine Verringerung der Absorption zurückzuführen ist. Bei 120 mA Kavitätsstrom und 550 mA Strom durch die Gewinn-Sektion wird eine mittlere Ausgangsleistung von 110 mW erreicht.





Abb. 21 10mm langer 4 Sektionslaser mit HF-Halter



Abb. 22 Optische Leistung in Abhängigkeit vom Strom durch die Gewinn-Sektion für verschiedene Kavitätsströme.

Zur Untersuchung der Dynamik wurde die Laserstrahlung mittels einer schnellen Fotodiode (25 GHz) mit einem RF-Analysator untersucht. In Abb. 23 ist das gemessene RF-Signal in Abhängigkeit vom Strom durch die Gewinn-Sektion bei einem Strom von 120 mA durch die Kavitäts-Sektion und -0,8 V Absorberspannung dargestellt (siehe schwarze Kurve in Abb. 22). Die linke y-Achse zeigt die Frequenz in einem Bereich von 0-25 GHz. Oberhalb der Schwelle (ca. 80 mA) erkennt man bei 4 GHz und den Vielfachen ein Signal, das bei der erwarteten Umlauffrequenz liegt. Diese Messung zeigt, dass der Laser bereits unter diesen Anregungsbedingungen passiv mode lockt und kurze Impulse erzeugt.





Abb. 23 RF Spektren in Abhängigkeit vom Strom durch die Gewinnsektion bei einem Kavitätsstrom von 120 mA.

Der Einfluss der Beschaltung der Gitter-Sektion ist in Abb. 24 gezeigt. In Abb. 24a sind die Leistungs-Strom Kennlinien ohne Strom durch die Gitter-Sektion (rote Kurve) und mit 100 mA  $I_{DBR}$  (schwarze Kurve) dargestellt. Die rote Kurve zeigt bei 250 mA ein abruptes Anschwingen des Lasers, was auf Absorptionseffekte schließen lässt. Bei Anlegen eines Stromes an die Gittersektion verringert sich die Laserschwelle auf 70 mA und die Effizienz des Lasers erhöht sich, d.h. die Absorption in der Gitter-Sektion wird verringert. In Abb. 24b und 24c sind die RF- Frequenzkurven ohne und mit Beschaltung der Gitter-Sektion gezeigt.



Abb.24 Leistungs-Strom Kennlinien (a) RF- Frequenzverhalten ohne (b) und mit (c) Ansteuerung der Gitter- Sektion.

Das mode locking Verhalten ist in Abb. 25 dargestellt. Im Fall von passivem mode locking (schwarze und rote Kurve in Abb. 25a) erkennt man eine stabile Impulserzeugung aber mit einem breiten Rauschuntergrund, der auf starken Jitter schließen lässt. Bei Beschal-



tung der Gitter-Sektion verringert sich dieser Rauschuntergrund. Aus den Abbildungen 24b,c und 25a wird deutlich, dass mit einem Strom durch die DBR-Sektion der Jitter verringert und die Stabilität der emittierten Impulse verbessert werden kann.



Abb. 25 Passives (schwarze und rote Kurven) und aktives (blaue Kurven) mode locking.

Die blauen Kurven in Abb. 25 zeigen den Fall des aktiven mode lockings, bei dem die Absorbersektion zusätzlich mit einer Sinusfrequenz der Umlaufzeit moduliert wurde. Diese aktive Modulation minimiert den Jitter (< 300 fs) und hält die Impulse auf einer sehr stabilen Frequenz (Abb. 25b). In Abb. 26 sind die gemessenen Impulsbreiten im mode locking Betrieb in Abhängigkeit von der mittleren Ausgangsleistung ohne (schwarze Kurve) und mit (rote Kurve) Ansteuerung der DBR-Sektion gezeigt. Die Insets zeigen die Autokorrelationsfunktionen bei den Maximalleistungen (ohne DBR-Strom 71 mW, mit 100mA DBR-Strom 118 mW).



Abb. 26 Impulsbreiten im mode locking Betrieb in Abhängigkeit von der mittleren Ausgangsleistung ohne (schwarze Kurve) und mit (rote Kurve) Ansteuerung der DBR-Sektion. Die Insets zeigen die Autokorrelationsfunktionen bei den Maximalleistungen.

Bei Annahme einer sech<sup>2</sup> Impulsform nehmen die Impulsbreiten ohne Ansteuerung der Gitter-Sektion von 7 ps bei geringen Leistungen zu 12 ps bei 71 mW mittlerer Leistung stetig zu. Bei Ansteuerung der DBR-Sektion verringern sich die Impulsbreiten und variieren nur zwischen 5 ps und 7 ps. Bei 120 mA mittlerer Leistung liegt die Impulsspitzenleistung P<sub>sp</sub> bei 3,6 W. Zusätzlich zum Impulsverhalten kann mit Ansteuerung der Gitter-Sektion die Emissionswellenlänge der generierten Impulse verändert werden, siehe Abb. 27.





Abb. 27 Verschiebung der Emissionswellenlänge mit dem Strom durch die Gitter-Sektion

In Tabelle 3 sind die im Projektzeitraum erreichten Bestwerte für das Impulsverhalten von 4-Sektions-DBR-Lasern aufgelistet.

Messgröße	Gemessene Bestwerte		
Pulsleistung P <sub>sp</sub> bei 7 ps (sech <sup>2</sup> )	3,6 W		
Pulsenergie	25 pJ		
Minimale Pulslänge	3 ps bei 500 mW Spitzenleistung		
	7 ps bei 3,6 W Spitzenleistung		
ΔνΔτ	0,4 bei ~ 500 mW Spitzenleistung		
	1,8 bei 3,6 W Spitzenleistung		

Tabelle 3: gemessene Bestwerte für das Impulsverhalten von 4-Sektions-DBR-Lasern

Unsere Untersuchungen zeigen, dass mit den realisierten 1 cm langen 4-Sektions-DBR-Lasern eine interne Modenkopplung mit hoher Ausgangsleistung erreicht werden kann.

#### Arbeitspaket B4 – Verstärker für 920 nm

Auf der Basis von Vertikalstrukturen mit DQW und SLOC-Wellenleitern wurden Trapezbauelemente mit 4 mm und 8mm Länge hergestellt. Trapezverstärker wurden durch Entspiegelung der Front- und Rückfacette auf <  $10^{-4}$  realisiert. Die 4 mm Trapezverstärker hatten 500 µm, 1000 µm und 2000 µm lange RW-Sektionen. Die 8 mm Trapezverstärker hatten 2000 µm und 4000 µm lange RW-Sektionen. Sie wurden auf 4 mm bzw. 8 mm lange C-Mount Wärmesenken p-down montiert, so dass die RW- und Trapezsektion elektrisch kurzgeschlossen sind.

Abb. 28 zeigt als Beispiel eine Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinie eines Trapezverstärkers mit 4 mm Länge ( $L_{RW}$  = 1000 µm,  $L_{Tr}$  = 3000 µm und  $\phi$  = 6 °) mit einem gekrümmten Wellenleiter. Bis 5 A nimmt die ASE-Leistung zu, darüber erkennt man thermisches Überrollen. Durch die starke Entspiegelung mit R<sub>f</sub> und R<sub>r</sub> < 10<sup>-4</sup> ist kein Lasern bis 9,5 A zu beobachten.

Dieser Trapezverstärker wurde in einem master oscillator power amplifier (MOPA) – Aufbau mit einem RW Laser mit einer Wellenlänge von  $\lambda \sim 930$  nm geseeded. Der Strom des Seed-Lasers (I<sub>sl</sub>) ist 150 mA, was einer in den Verstärker eingekoppelten Leistung von ca. 40 mW entspricht. Die Wärmesenkentemperatur des Verstärkers wurde auf 10°C stabilisiert. Die P-I Kennlinie des geseedeten Trapezverstärkers ist in Abb. 29 gezeigt. Bei 1,7 A wird die Laserschwelle erreicht. Bis 6,7 A zeigt die Kennlinie einen linearen Verlauf mit einem Anstieg von 0,82 W/A. Darüber ist ein thermisches Abknicken zu beobachten. Bei ei-



nem Trapezstrom von 9 A wird eine Ausgangsleistung von 5,35 W erreicht. Mit diesem Leistungswert haben wir unser Ziel von  $P_m > 5$  W erreicht.



Abb. 28 Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinie eines Trapezverstärkers mit 4 mm Länge (L<sub>RW</sub> = 1000  $\mu$ m, L<sub>Tr</sub> = 3000  $\mu$ m und  $\phi$  = 6 °)



Abb. 29 P-I Kennlinie des geseedeten Trapezverstärkers

In Abb. 30 ist das optische Spektrum im Wellenlängenbereich 910 nm – 960 nm bei 5,35 W (9 A) gezeigt. Im Inset ist der Wellenlängenbereich um 930 nm hochaufgelöst zu sehen. Man erkennt, dass der Verstärker stabil auf der Seedwellenlänge emittiert. Die Seitenmodenunterdrückung ist ~ 30 dB.





Abb. 30 Optische Spektrum eines geseedeten Trapezverstärkers im Wellenlängenbereich 910 nm bis 960 nm bei 5,35 W (9 A). Das Inset zeigt hochaufgelöst (0.01 nm) den Wellenlängenbereich um 930 nm.

Von diesen Trapezverstärkern wurden 9 Stück an die Universität Kaiserslautern geliefert.

Lasertyp	Angestrebte	Geforderte	Erreichte	Realisierter	Gelieferte
	Wellenlängen-	Leistung	Leistung	Wellenlängen	Bau-
	bereich				elemente
MS-RW-Laser	920 nm	P <sub>m</sub> ~50 mW	300 mW	810 – 850 nm	61
MS-DBR-Laser				820 – 860 nm	25
für externe Mo-	920 nm	P <sub>m</sub> ~50 mW			
denkopplung					
MS-DBR-Laser	920 nm	P <sub>m</sub> ~50 mW	P <sub>m</sub> ~120 mW	920 – 930 nm	
für interne Mo-			P <sub>sp</sub> ~3,6 W		
denkopplung			-		
Verstärker 920		P <sub>m</sub> > 5 W	5,3 W	910 – 940 nm	9
nm für 5 GHz					

Tab. 4 Erreichte Laserdaten für 920 nm Bauelemente



#### Komponenten für Halbleiterscheibenlaser: Arbeitspaket C

In diesem Arbeitspaket wurden Komponenten für ein optisch gepumptes Halbleiterscheibenlasersystem bei 1030 nm entwickelt und optimiert. Die Arbeiten umfassten die Entwicklung der SCDL-Verstärkungs-Elemente sowie der SAM-Chips, die Bereitstellung von angepassten Pumplaserdioden sowie die Entwicklung eines Systems zur Selektion von Pulsen mit verringerter Repetitionsrate.

#### Arbeitspaket C1 – SCDL-Strukturen

Die SCDL-Strukturen setzen sich zusammen aus einem Bragg-Spiegel und einem aktiven Bereich mit mehreren QWs in resonanter Anordung. Es wurden unterschiedliche Barrieren-Designs für die QWs untersucht. Es handelte sich dabei um ein Design mit abrupten Übergängen in den Brechungsindizes (STIN – Step index structure) sowie ein weiteres Design mit gradierten Übergängen (GRIN – Graded Index structure). Es hat sich gezeigt, dass das GRIN Design einen besseren Ladungsträgereinfang in die QWs ermöglicht und kürzere Pulse erlaubt.

Für die beiden oben genannten Strukturen wurden Anzahl und Position der QWs variiert. Abb. 31 zeigt eine 4-QW- (a) bzw. 6-QW- (b) Verstärkungsstruktur. Bei herkömmlichen Designs sind die QWs gleichmäßig innerhalb der Resonant-Periodic-Gain (RPG) Struktur verteilt. Um der Absorption Rechnung zu tragen, wurde der erste QW unter der Oberfläche als DQW ausgeführtTiefer in der Struktur wurde dann ein QW weggelassen um die Pulse nicht unnötig zu verbreitern. Des weiteren wurde auch die gesamte Anzahl der QWs von sechs auf vier reduziert, um eine weitere Verkürzung der Pulse zu ermöglichen.



4-QW SCDL Gain Structure - Wavelength: 1040 nm

# a)

#### b)

#### 6-QW SCDL gain structure (MBI) - Wavelength: 1040 nm



Abb. 31 Skizze des Aufbaus der neuen Gain-Strukturen mit 4 (a) bzw. 6 (b) QWs.

Die SCDL-Chips werden als bottom emitter ausgeführt. Das heißt, dass sie mit der Epitaxieseite auf CuW-Wärmesenken aufgelötet werden und anschließend das GaAs-Substrat durch selektives Ätzen entfernt wird. Die Unterätzung am Rand sowie die Durchbiegung der Chips ist bei größeren Chips geringer. Daher wurde die Prozessierung und Aufbautechnik von anfänglich 2x2 mm<sup>2</sup> auf eine asymmetrische Chipgröße von 4x6 mm<sup>2</sup> umgestellt. Abb. 32 zeigt die bisherigen und neuen Chip auf den Kupferträgern.





Abb. 32 Bisherige Chipgröße (2x2 mm<sup>2</sup>, links) sowie neue Chipgröße (4x6 mm<sup>2</sup>, rechts) für die SCDL-Verstärkungsstrukturen.

#### Arbeitspaket C2 – SAM-Strukturen

Bei der Entwicklung der SAM-Strukturen wurde ein etabliertes Design mit InGaAs-QWs und As-Implantation verglichen mit im Rahmen des Vorhabens entwickelten oberflächennahen QWs. Diese InGaAs-QWs mit einer nur einige nm dicken GaAs-Deckschicht lieferten in den Untersuchungen des MBI die kürzeren Pulse, so dass nur dieses Design weiterverfolgt wurde. Dabei zeigte sich, dass die Wellenlängenabstimmung zwischen dem SCDL-Element und dem SAM-Element eine große Rolle spielt. Die Emissions- bzw. Absorptionswellenlänge wird während der Epitaxie über den Indiumgehalt der abgeschiedenen Schichten bestimmt, und kann nachträglich nur in einem begrenzten Rahmen durch Temperierung des SCDL- bzw. SAM-Elementes variiert werden. Daher wurde durch Änderung der Epitaxieparameter eine Wellenlängenverteilung über den 2"-Wafer erzeugt. Abb. 33 zeigt die Wellenlängenverteilung über einen rotationssymmetrischen 2"-Wafer.



InGaAs-QW [Generated] Abb. 33 Wellenlängenverteilung über einen rotationssymmetrischen 2" Wafer.



Es konnte eine Wellenlängendifferenz zwischen Wafermitte und Rand von 15 nm erreicht werden. Abb. 34 zeigt den speziell für diese Anwendung hergestellten Kupferträger mit dem aus dem Wafer herausgespaltenen SAM-Streifen. Der Kupferträger wurde so konstruiert, dass er sich in den Aufbau am MBI integrieren lässt. Durch Verschiebung kann so die Wellenlänge des SAMs variiert und damit die optimale Abstimmung zur Emissionswellenlänge des Lasers gefunden werden.



Abb. 34 Inhomogener SAM-Chip zur Wellenlängendurchstimmung

#### Kombination von SAM und SCDL

Durch Kombination der optimierten SCDL- und SAM-Halbleiterstrukturen wurde am Max-Born-Institut ein Halbleiter-Kurzpulslaser aufgebaut, dessen Pulsdauer im Projektverlauf 290 fs reduziert werden konnte, was einen Weltrekord für ein auf Halbleiterkomponenten basierendes Kurtpuls-Lasersystem darstellt. Abb. 35 zeigt das Autokorrelationsspektrum dieses Lasers. Weitere Details zu diesen Experimenten sind im dortigen Bericht nachzulesen. Dabei scheint die Reduzierung der QW Anzahl, sowie deren optimierte Positionierung die entscheidende Rolle zu spielen.



Abb. 35 Autokorrelationsmessung des innerhalb des Projektes realisierten Halbleiter-Kurzpulslasers. Weitere Messergebnisse sind im Bericht des Max-Born-Insitutes zu finden.

#### Arbeitspaket C3 – Entwicklung von Pumplaserdioden mit angepasster Wellenlänge

Zum Pumpen für die SCDLs wurden 840 nm Laser mit einer LOC Struktur und quaternärem SQW entwickelt. Die Breitstreifenlaser wurden auf eine kompakte Wärmesenke (SCL) mit 2 Linsen zur Stahlformung montiert (siehe Abb. 36). Für die vertikale Kollimation wurde eine LIMO FAC 286-D Linse mit einer numerischen Apertur (NA) von 0,8 einge-



setzt. Der slow axis Kollimator hat einen Arbeitsabstand von 9,5 mm. In diesen Halter wurde ein Thermistor zur Temperaturregelung sowie ein ESD Schutz integriert.



Abb. 36 BA-Laser montiert auf einer SCL Wärmesenke mit 2 Linsen zur Stahlformung (kollimierter Strahl)

Eine Leistungs-Strom Kennlinie eines 60 µm BA-Lasers bei 25°C ist in Abb. 37a gezeigt. Dieser Laser erreicht bei einem Anregungsstrom von 6 A eine Ausgangsleistung von 4,5 W. Die Laserschwelle ist 550 mA und die Steilheit beträgt 0,93 W/A. Die Kennlinie ist bis 6 A linear. In Abb. 37b ist das optische Spektrum bei 4 A (P = 3.2 W) dargestellt. Der Laser emittiert bei der angestrebten Wellenlänge von ~ 840 nm.



Abb. 37 Leistungs-Strom Kennlinie (a) und optisches Spektrum (b) bei 4 A bei einer Wärmesenkentemperatur von 25 °C

Untersuchungen zum Strahlprofile dieser Pumplaserdioden wurden durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5 dargestellt.

Profil	$M^2$ slow axis (4 $\sigma$ )	$M^2$ fast axis (4 $\sigma$ )	M <sup>2</sup> slow axis	M <sup>2</sup> slow axis
			(13,5%)	(13,5%)
2500 mA	6,5	2,3	7,1	2,1
5000 mA	10,6	2,0	10,9	2,3

Tab. 5 Strahlprofilparameter von 60  $\mu$ m breitem BA Pumplaser bei $\lambda$  = 840 nm

Von diesen Bauelementen wurden 2 Stück an das Max-Born-Institut geliefert.



#### C4 Entwicklung von Mehrsektions-Halbleiterverstärkern 1030 nm

Es wurden Heterostrukturen mit InGaAs-DQW für 1030 nm in einer aSLOC-Struktur mit 3,2 µm n-Wellenleiter und 1,6 µm p-Wellenleiter eingesetzt. Aus diesen Wafern wurden 4 mm und 8mm lange Trapezlaser ( $R_f \sim 0,1\%$  und  $R_r \sim 95\%$ ) und Trapezverstärker mit Front- und Rückfacettenreflexion < 10<sup>-4</sup> hergestellt. Die 4 mm Trapezverstärker hatten 500 µm, 1000 µm und 2000 µm lange RW-Sektionen. Die 8 mm Trapezverstärker hatten 2000 µm und 4000 µm lange RW-Sektionen. Sie wurden auf 4 mm bzw. 8 mm lange C-Mount Wärmesenken sowohl p-up als auch p-down montiert.

Abb. 38 zeigt als Beispiel eine Leistungs-Strom Kennlinie eines p-up montierten Trapezlasers mit 4 mm Länge ( $L_{RW}$  = 1000 µm,  $L_{Tr}$  = 3000 µm und  $\varphi$  = 6°) mit einem geraden Wellenleiter. Die Laserschwelle liegt bei 845 mA bei einem Strom durch die RW Sektion von 300 mA. Bis 3,5 A ist die Kennlinie linear mit einem Anstieg von 1 W/A. Oberhalb nimmt der Anstieg durch Aufheizen ab. Der Trapezlaser erreicht bei 4 A durch den Trapezteil eine Ausgangsleistung von 2,9 W.



Abb. 38 Leistungs-Strom Kennlinie eines 4 mm langen Trapezlasers ( $L_{RW}$  = 1000 µm,  $L_{Tr}$  = 3000 µm,  $\phi$  = 6°)



Abb. 39 P-I Kennlinie eines Trapezverstärkers mit 4 mm Länge ( $L_{RW}$  = 1000 µm,  $L_{Tr}$  = 3000 µm und  $\phi$  = 6°) bei 25 °C Wärmesenkentemperatur und  $I_{RW}$  = 300 mA



Eine P-I Kennlinie eines Trapezverstärkers mit gleicher Geometrie ist in Abb. 39 gezeigt. Durch die starke Entspiegelung erreicht der Verstärker bis 4 A die Laserschwelle nicht. Ab ~ 3 A ist thermisches Überrollen zu erkennen. Das spektrale Verhalten bei  $I_{trap} = 4$  A im Wellenlängenbereich 990 nm –1090 nm ist in Abb. 40 dargestellt. Optische Verstärkung kann im Wellenlängenbereich 1000 nm –1080 nm erreicht werden.



Abb. 40 optisches Spektrum eines Trapezverstärkers mit 4 mm Länge ( $L_{RW}$  = 1000 µm,  $L_{Tr}$  = 3000 µm und  $\phi$  = 6°) bei 25°C Wärmesenkentemperatur und  $I_{RW}$  = 300 mA

Von diesen Trapezverstärkern wurden 2 Stück im Projektzeitraum an das Max-Born-Institut geliefert.