

InDiLAS / KoModLa

- Zuwendungsempfänger:** Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für
Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V.
Gustav-Kirchhoff. Straße 4
12489 Berlin
- Förderkennzeichen:** 13N9816
- Vorhabensbezeichnung:** Erforschung und Realisierung von innovativen hybrid-
integrierten Diodenlaser-Komponenten und Systemen
(INDILAS)
Teilvorhaben: Halbleiterkomponenten zur Erzeugung von
definierten optischen ps-Impulsfolgen hoher Brillanz auf der
Basis modengekoppelter Laser (KomodLa)
- Laufzeit des Vorhabens:** 01.06.2009 – 31.05.2012

Schlussbericht

- Institutsleiter:** Prof. Dr. G. Tränkle
- Projektleiter:** Dr. G. Erbert
- Bearbeiter:** Dr. A. Klehr
Dr. S. Schwertfeger
Dr. H. Wenzel
A. Liero
T. Hoffmann

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt
beim Autor.

Inhalt

Schlussbericht.....	0
1 Kurzdarstellung.....	2
1.1 Aufgabenstellung.....	2
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2 Eingehende Darstellung.....	7
2.1.1 Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter-Laser für Modenkopplung.....	8
2.1.2 1064nm DBR-RW Laser für externe Kavitäten für Impulsoszillatoren.....	10
2.1.3 1064nm DBR-RW Laser für monolithische Kavitäten für Impulsoszillatoren.....	11
2.1.4 Trapezverstärker und Trapezpulspickerelemente für 840 nm und 1064 nm Wellenlänge.....	15
2.1.5 Schaltungsentwicklung und Prozessierung von Schalttransistoren für Pulspicker und Trapezverstärker.....	17
2.1.6 Hybride Integration von Laserbauelementen, GaN-Transistoren und Ansteuerelektronik.....	21
2.1.7 Bereitstellung von entwickelten Laser- und Elektronikkomponenten an die Projektpartner.....	25
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis.....	27
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	27
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwendbarkeit.....	27
2.5 Fortschritt bei anderen Stellen.....	27
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	27

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses industriellen Verbundprojektes war die Erforschung und Entwicklung von kompakten ps-Impuls-Laserstrahlquellen für Anwendungen in der Messtechnik, der lasergestützte Medizintechnik und in der Lasermaterialbearbeitung. Auf der Basis neuartiger hybrid-integrierten Diodenlaser-Komponenten sollten innovative, quasi-monolithische Laseroszillator-Verstärker-Systeme realisiert werden. Zu den besonderen optischen Merkmalen dieser Systeme gehört die elektronisch einstellbare Wiederholfrequenz der erzeugten infraroten (850 nm oder 1064 nm) ps-Lichtimpulse. Die Wiederholrate sollte von der Auswahl von Einzelimpulsen bis zu Wiederholraten von mehreren GHz variierbar sein. Weiterhin waren definierte einstellbare Pulsdauern im Bereich von 10 ps bis in den fs-Bereich zu ermöglichen.

Aufgabe im vom FBH bearbeiteten Teilvorhaben war die Entwicklung der aktiven optischen Halbleiterkomponenten und deren Bereitstellung für die Verbundpartner. Die Forschungsarbeiten betrafen das Design der Komponenten, die technologische Realisierung und erste Test für den weiteren Einsatz. Im Einzelnen waren das: Diodenlaser für monolithische und externe Resonatoren zur ps-Impulserzeugung, Halbleiterbauteile für das Selektieren von Impulsen aus Impulsfolgen hoher Wiederholrate sowie optische Verstärker auf Halbleiterbasis. Die Entwicklung einer elektronischen Ansteuerung basierend auf im FBH entwickelten neuartigen, schnellen GaN-Leistungstransistoren und deren hybride Integration mit optischen Komponenten zu einer kompakten auf einer Mikrobank angeordneten Strahlquelle gehörte ebenfalls zu den Zielen des Projektes.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) ist eines der führenden Institute für anwendungsorientierte und industrienähe Forschung in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Auf der Basis von III/V – Verbindungshalbleitern realisiert es Hochfrequenz-Bauelemente und Schaltungen für die Kommunikationstechnik und Sensorik sowie hochbrillante Diodenlaser für Materialbearbeitung, Lasertechnologie, Medizintechnik und Präzisionsmesstechnik. Die enge Zusammenarbeit des FBH mit Industriepartnern und Forschungseinrichtungen garantiert die schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Die Aktivitäten des FBH erstrecken sich dabei über die gesamte Wertschöpfungskette vom Design bis zum montierten Bauelement einschließlich Charakterisierung und Zuverlässigkeitstests. Die Ausrüstung dafür reicht von modernen und im engen Kontakt mit dem führenden Hersteller Aixtron entwickelten Epitaxieanlagen (MOVPE) über industriekompatible Prozesslinien für 2", 3" und 4" Wafer hin zu zuverlässigen Montage und automatisierten Messverfahren. Für Diodenlaser sind insbesondere die patentierten und routinemäßig eingesetzten Verfahren zur Facettenpassivierung und zur Implementierung von Bragg–Reflektoren hervorzuheben (siehe bestehende Schutzrechte).

Das FBH hatte in den letzten Jahren im Rahmen öffentlich geförderter Projekte Grundmodelaser auf der Basis schmaler Streifen ($<10\text{ }\mu\text{m}$) mit Ausgangsleistungen im Dauerstrichbetrieb größer 1,5 W [1] und mit monolithisch integrierten Oszillator-Verstärker-Bauelementen Ausgangsleistungen von 10 W im räumlichen und spektralen Einmodenbetrieb [2] erreicht. In beiden Fällen war dies der weltweit publizierte Spitzenwert.

Im DFG-Projekt „Mehr-Sektions DBR-Laser mit einstellbarem sättigbarem Absorber zur Erzeugung kurzer Impulse mit hoher Leistung und geringem Chirp für die Frei–Raum Kommunikation“ im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Optische Übermittlungsverfah-

ren in der Informationstechnik“ wurden gütegeschaltete 3-Sektions-DBR-Laser mit schaltbarer Phasensektion untersucht, sowohl theoretisch [3] als auch experimentell [4]. Erreicht wurden in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Vorhersagen minimale Pulslängen von bis zu 60 ps bei einer Pulspeakleistung von 1,2 W und Wiederholfrequenzen von 0,5-2 GHz. Die Wellenlänge des DBR Lasers lag bei 1064 nm.

Im Forschungsprojekt „HaFemLas“ im Rahmen des Verbundprojektes „FemtoDiode“ wurden Halbleiterkomponenten für kompakte Femtosekunden-Strahlquellen entwickelt und erforscht. Konkret wurden Mehrsektions-RW- und –DBR-Laser zur Erzeugung von Impulsen kleiner 10 ps und Impulsspitzenleistungen von ca. 1 W in modengekoppelten Systemen und Trapezverstärkern auf Diodenlaserbasis für die Wellenlängen 850 nm und 920 nm realisiert. Mit monolithischen modengekoppelten 1 cm langen Lasern (Wiederholfrequenz 4,1 GHz) wurden Pulslängen von 3 ps mit Pulsspitzenleistungen von 500 mW und von 7 ps mit 3,5 W Spitzenleistung erreicht [5]. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Hochfrequenzschaltungen für die Ansteuerung von optischen Modulatoren und Pulspickern realisiert. Das FBH setzte dabei erfolgreich das Knowhow seines zweiten Kernkompetenzfeldes, der Höchstfrequenztechnik, auch für optoelektronische Bauelemente ein.

[1] H. Wenzel, F. Bugge, M. Dallmer, F. Dittmar, J. Fricke, K. H. Hasler and G. Erbert, "Fundamental-Lateral Mode Stabilized High-Power Ridge-Waveguide Lasers with a Low Beam Divergence", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 20, 214-216, 2008.

[2] H. Wenzel, K. Paschke, O. Brox, F. Bugge, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knauer, P. Ressel, G. Erbert, "10W continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier", Electronics Letters, Vol. 43, No. 3, 160-161, 2007.

[3] Hasler, K. H.; Wenzel, H.; Klehr, A. & Erbert, G. "Simulation of the generation of high-power pulses in the GHz range with three-section DBR lasers" IEE Proceedings-Optoelectronics, Vol. 149, 152-160, 2002.

[4] A. Klehr, H. Wenzel, K.H. Hasler and G. Erbert „Generation of high-power pulses in the GHz range with three-section DBR lasers“ Proceeding of SPIE Vol. 4651 (2002), 63-73

[5] S. Schwertfeger, A. Klehr, A. Liero, G. Erbert, G. Tränkle „High Power ps Pulse Generation Due to Modelocking with a Monolithic 10 mm Long 4 Section DBR Laser at 920 nm“, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, 1889-1891, 2007.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das FBH untersuchte und realisierte im Rahmen des Vorhabens Halbleiterkomponenten, d.h. Laserdioden, Modulatoren, Verstärker, Schalttransistoren sowie deren monolithische und hybride Integration für leistungsstarke Impulslaserstrahlquellen im Pikosekunden-Bereich bei Wellenlängen von 850 nm und 1060 nm. Für die Realisierung von Laserbauelementen zur Modenkopplung mit Impulsbreiten <10 ps wurden 2 Lösungsansätze verfolgt.

Zum Einen wurden Laserbauelemente zur Modenkopplung im externen Resonator entwickelt und realisiert. Diese Variante ermöglicht Folgefrequenzen bis in den 100 MHz Bereich. Hierbei handelt es sich im Einzelnen um Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter-(RW)-Laser und Drei-Sektions-DBR Oszillatoren. Zur Verstärkung der erzeugten Impulse wurden Trapezverstärker sowie Pulspickerbauelemente für die Wellenlängen 850 nm und 1064 nm entwickelt und hergestellt. Für diese Bauelemente musste eine 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 und Pulspickern für eine Anwendung im äußeren Resonator erfolgen.

Zum Anderen wurden monolithische Halbleiterlaser entwickelt und hergestellt, die einen kompakten Aufbau ermöglichen und im Frequenzbereich von 4,3 GHz Impulse erzeugen.

In den Arbeitspaketen AP 1 (1064 nm Wellenlänge) und AP 2 (850 nm Wellenlänge) erfolgte die 1. Iteration der Entwicklung und Herstellung von RW Lasern, im AP3 die von 1064 nm DBR Lasern. Trapezverstärker für 850 nm und 1060 nm zur Erhöhung der Pulsleistung wurden im AP4 hergestellt. Nach Charakterisierung der Bauelemente wurden die Komponenten termingerecht an unsere Projektpartner geliefert. Der Meilenstein nach 12 Monaten wurde erfüllt.

Parallel zur Entwicklung der Laserbauelemente erfolgte die Schaltungsentwicklung und Herstellung von Ansteuertransistoren für die Pulsselektion (Pulspicking) von 10 ps Pulsen aus einer 4,3 GHz Pulsfolge (AP 5 und AP 6). Hierzu wurden folgende Hochfrequenz (HF) Komponenten entwickelt und hergestellt: Trapezbauelemente mit speziellem HF-Layout, HF-GaN-Transistoren und Schaltungen für die Erzeugung von elektrischen Pulsen mit 200 ps Pulsbreite zur Ansteuerung der Endstufe der Pulspickersektion, Hochleistungs HF-GaN-Transistoren und Schaltungen für Pulsströme von 20 A und <2 ns Strompulsbreiten zur Ansteuerung der Verstärker. Die Charakterisierung der hergestellten Bauelemente erfolgte in AP 7 bis zum 2. Meilenstein nach 18 Monaten. Die hergestellten Komponenten entsprachen den Anforderungen und wurden den Partnern fristgerecht zur Verfügung gestellt.

Aus den Ergebnissen der 1. Iteration der entwickelten Halbleiterverstärkern und Impulsgeneratoren wurde eine zweite und eine dritte Iteration durchgeführt (AP 8 und 9). Um die Laserbauelemente bezüglich Fernfelddivergenz, Lage des Gewinnmaximums und Breite des Gewinnspektrums zu verbessern, wurden neue Vertikalstrukturen sowohl mit Doppel-Quantum-Well (DQW) als auch Dreifach-Quantum-Well (TQW) hergestellt und untersucht. Eine Optimierung des Koppelkoeffizienten erfolgte durch Variation des Abstandes der integrierten Gitter zur aktiven Zone. Des weiteren erfolgte eine Verbesserung des Layouts, um eine Erhöhung der Pulsleistung und der Verstärkung zu erreichen. Dazu wurden Chips mit verschiedenen Kontaktgeometrien (Einzel-, Zwei- und Multisektionsbauelemente) und Längen (1mm – 6mm) hergestellt.

Eine Weiterentwicklung der HF-Schaltungen und GaN-HEMT-Ansteuertransistoren erfolgte in AP 10. Die verbesserten Komponenten wurden an die Partner zeitnah geliefert.

Mit den hergestellten Bauelementen wurden 4 cm x 5 cm große hybride Aufbauten mit Masteroszillator, Pulspickerelement, integrierter Ansteuerelektronik und optischen Linsen für die Strahlungseinkopplung und -kollimierung realisiert (AP 11 und 12). Das technische Teilziel nach 24 Monaten wurde pünktlich erfüllt.

Die Arbeiten zur Modenkopplung der entspiegelten Laserkomponenten sollte bei unseren Projektpartnern Photonik Zentrum Kaiserslautern (für 1064 nm Bauelemente) und Ruhr-Universität Bochum (für 850 nm Bauelemente) erfolgen. Für diese Arbeiten wurden spezielle Teststände mit Laserbauelementen und Ansteuerelektronik entwickelt und montiert (AP 11 und 12). Dazu wurden den Projektpartnern vorcharakterisierte Bauelemente entsprechend dem vorgegebenen Zeitplan übergeben.

Das Vorhaben wurde in enger Verzahnung mit den Partnern des Verbundes (Photonik Zentrum Kaiserslautern, Lumera Laser GmbH, Ruhr-Universität Bochum, Sacher Lasertechnik und Eagleyard Photonics) durchgeführt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Erzeugung kurzer Laserimpulse im Bereich einiger ps unter Verwendung von Halbleiterlasern ist seit vielen Jahren ein sehr intensiv bearbeitetes Forschungsgebiet. Vor allem die Entwicklung optischer Emittoren für die Telekommunikation bei Wellenlängen von 1,5 μm und 1,3 μm ist eine treibende Kraft bei der Untersuchung von Kurzpuls Laserquellen¹. In diesem Zusammenhang wurden auch je nach Modenkoppelungskonzept verschiedene Mehrsektionslaser realisiert. Im angestrebten Wellenlängenbereich um 1060 nm nutzt man

zumeist optisch gepumpte Nd:YVO₄ Laser^{1,2}. Diese sind nicht sehr kompakt; sie müssen aufwendig justiert werden, da der Aufbau nicht aus monolithischen Strukturen besteht. Modengekoppelte Systeme um 1060 nm auf der Basis von Halbleiterlasern wurden ebenfalls untersucht. So zeigte Hoogland in³ einen optisch gepumpten MQW VECSEL mit einer Wiederholfrequenz von 4,4 GHz bei der Wellenlänge von 1030 nm und einer Pulslänge von 22 ps und einer mittleren Leistung von 21,6 mW. In Ref.⁴ zeigt Adhimoolam einen aktiv modengekoppelten Diodenlaser gekoppelt an einen Faserverstärker mit einer Repetitionsrate von 1,4 GHz, einer Pulslänge von 30 ps und einer mittleren Leistung von 9,5 W bei einer Wellenlänge von 1060 nm.

Auch bei der zweiten Zielwellenlänge von 850 nm gibt es diverse Vorarbeiten. So zeigte Derickson in Ref.⁵ eine 1 cm lange monolithische Laserstruktur bei 840 nm mit einer Wiederholrate von 5,5 GHz bei Pulslängen von 6,5 ps und einer Pulsenergie von 0,2 pJ. In Ref.⁶ wird ein passiv modengekoppelter 2 Sektionslaser mit externem Resonator vorgestellt mit einer Zentralwellenlänge von 840 nm und einem Durchstimmbereich von 26 nm. Die Pulslänge beträgt 3,5 ps. Bei einer Wellenlänge von 860 nm erreichte Camacho⁷ mit monolithischen Strukturen Impulslängen unter 10 ps mit einer Repetitionsrate von 8 bis 15 GHz.

Die Wiederholfrequenz der Impulse des modengekoppelten Systems liegt im Bereich von einigen MHz bis zu einigen 10 GHz. Für verschiedene Anwendungen ist es nötig, aus diesen hohen Folgefrequenzen Impulse im kHz- bzw. MHz-Bereich heraus zu selektieren ("picken"). Als Pulspicker werden in den meisten Fällen elektro-optische Modulatoren (EOM), akusto-optische Modulatoren (AOM) oder Halbleiterverstärker (SOA) verwendet. Bei EOM's z.B. Pockels Zellen, wird der Brechungsindex von nichtlinearen Kristallen über ein elektrisches Feld verändert, sodass Leistung, Phase und Polarisierung eines Laserstrahls verändert werden kann. Bei AOM's erfolgt die Brechungsindexmodulation über den akusto-optischen Effekt, d.h. über Druckoszillationen im Kristall. Bei der Verwendung von SOA's wird der Halbleiterkristall über einen elektrischen Strom transparent bzw. absorbierend geschaltet. Zur Zeit erhältliche kommerzielle Pulspicker-Systeme (z.B. Fa. Delmar Photonics, Coherent, Quantum Technology Inc.) basierend auf SOA und AOM sind relativ groß, aufwendig und teuer.

[1] Paschotta, R.; Krainer, L.; Lecomte, S.; Spühler, G. J.; Zeller, S. C.; Aschwanden, A.; Lorenser, D.; Unold, H. J.; Weingarten, K. J. & Keller, U. „Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power“ New Journal Of Physics, 2004, 6, 174

[2] L. Krainer, R. Paschotta, G. J. Spühler, M. Moser, and U. Keller, "29 GHz modelocked miniature Nd:YVO laser," Electron. Lett., vol. 35, pp. 1160–1161, July 1999.

[3] Hoogland, S.; Dhanjal, S.; Tropper, A. C.; Roberts, J. S.; Haring, R.; Paschotta, R.; Morier-Genoud, F. & Keller, U. "Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser" IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12, 1135-1137

[4] Adhimoolam, B.; Hekelaar, M. G.; Gross, P.; Lindsay, I. D. & Boller, K. J. "Wavelength-tunable short-pulse diode-laser fiber-amplifier" IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18, 838-840

[5] D. J. Derickson, P. A. Morton, J. E. Bowers, and R. L. Thomson, "Comparison of timing jitter in external and monolithic cavity modelocked semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 59, pp. 3372-3374, 1991

[6] Schrans, T.; Sanders, S. & Yariv, A. „Broad-Band Wavelength Tunable Picosecond Pulses From Cw Passively Mode-Locked 2-Section Multiple Quantum-Well Lasers“ IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4, 323-326

[7] Camacho, F.; Barrow, D. A.; Avrutin, E. A.; Bryce, A. C. & Marsh, J. H. „Two-contact semiconductor mode-locked lasers“ International Journal Of Optoelectronics, 1995, 10, 433-437

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurden neben der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Arbeiten zum Design der Laserdioden und Halbleiterverstärker in einem Unterauftrag an das Weierstraß-Institut für angewandte Analysis und Stochastik (WIAS) in Berlin vergeben. Die

Arbeiten beinhalteten die mathematische Modellierung von Diodenlasern zur Modenkopplung und trapezförmigen Halbleiterlaserverstärkern. Im benutzten Modell wurde eine stabile vertikale Wellenleitung vorausgesetzt und die verstärkte spontane Emission berücksichtigt. Speziell wurde die Einkopplung von optischen Pulsen in den Verstärker mit vorgegebenen Parametern im Raum-, Zeit- und Frequenzbereich auf einer Seite des Verstärkers beschrieben. Dieses ermöglichte die Direktsimulation solcher Trapezverstärker auf Parallelrechnern des WIAS, sowie eine Studie von Parametervariationen.

Es wurden umfangreiche Anwendungsrechnungen zum Einfluss verschiedener Puls-, Material- und Bauelemente-Parameter auf die gewünschten Zielgrößen (Parameter der ausgekoppelten Pulse) durchgeführt. Insbesondere wurde der Fokus auf den Einfluss der nichtlinearen Gainkompression, der residualen Facettenreflektivitäten, der Absorption, der Rekombinationsparameter und der Zahl der Quanten-Wellen auf die Wirkung des Verstärkers gelegt.

2 Eingehende Darstellung

Im Projektzeitraum wurden vom FBH Halbleiterkomponenten zur Erzeugung von definierten optischen Impulsfolgen durch Modenkopplung mit Pulslängen im Pikosekunden-Bereich hergestellt und den Projektpartnern bereitgestellt.

Hierbei handelt es sich um:

- Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter-Laser für die Wellenlänge 1064 nm
- Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter-Laser für die Wellenlänge 850 nm
- Drei-Sektions-DBR Oszillatoren für die Wellenlänge 1064 nm
- Vier-Sektions-DBR Oszillatoren für die monolithische Modenkopplung
- Trapezverstärker für 840 nm und 1064 nm Wellenlänge
- Pulpickerbauelemente für die Wellenlängen 850 nm und 1064 nm

Es wurden sowohl Vertikalstrukturen mit Doppel-Quantum-Well (DQW) und Dreifach-Quantum-Well (TQW) hergestellt.

Verschiedene Geometrien von Lasern und Verstärkern wurden realisiert, so dass zur Optimierung der Impulserzeugung und -verstärkung 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 realisiert.

Für die Pulsselektion (Pulspicking) von 10 ps Pulsen aus einer 4,3 GHz Pulsfolge wurden folgende HF Komponenten realisiert:

- Trapezbauelemente mit speziellem HF Layout
- HF-Gallium-Nitrid-HEMT-Transistoren und Schaltungen für elektrische Pulse mit 200 ps Pulsbreite zur Ansteuerung der Endstufe
- Hochleistungs HF-GaN-HEMT-Transistoren und Schaltungen für Pulsströme von 20 A und < 2 ns Stromimpulsbreiten

Mit den hergestellten Bauelementen wurde ein 4cm x 5 cm großer hybrider Aufbau mit Masteroszillator, Pulpickerelement, integrierter Ansteuerelektronik und optischen Linsen für die Strahlungseinkopplung und Kollimierung realisiert.

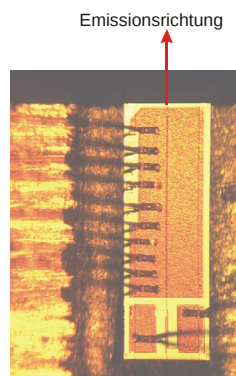
Eine spezielle Pulpickeranordnung für Impulszüge aus einer externen Resonatoranordnung, wie sie bei unseren Projektpartner Photonik - Zentrum Kaiserslautern und Ruhr Universität Bochum benötigt wird, wurde entwickelt und den Partnern geliefert.

2.1.1 Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter-Laser für Modenkopplung

Für die Rippenwellenleiter- (RW-) Laserdioden wurde eine Schichtstruktur bestehend aus einem asymmetrischen vertikalen Wellenleiter mit einer Gesamtdicke von $4,8 \mu\text{m}$ (Asymmetric Super Large Optical Cavity, ASLOC) und einem AIAs-Gehalt von 25% entwickelt, um eine geringe vertikale Fernfelddivergenz zu erreichen. Als aktive Zone wurde sowohl ein Doppel-Quantum-Well (DQW) als auch ein Tripel-Quantum-Well (TQW) implementiert. Im Projektzeitraum wurden insgesamt 6 Wafer für Zwei- und Multi-Sektions-Rippenwellenleiter für die Wellenlänge von 1064 nm in 2 Iterationsschritten prozessiert. Die Streifenbreiten zur lateralen Wellenführung wurden von $2,2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ variiert.

Zur Erzeugung von kurzen Impulsen mittels Modenkopplung werden Laser mit integriertem Absorber benötigt. Dazu wurden im Projekt 2-Sektions- (siehe Abb. 1a) und Multi-Sektions-Laser (1b) hergestellt, bei denen eine Sektion als Absorber geschaltet werden kann. Bei den Multi-Sektions-Lasern wurde die p-Kontaktierung der 1 mm langen Laser in mehrere von einander isolierte Sektionen segmentiert. Dieses Layout ermöglicht eine variable Einstellung des Verhältnisses der Längen zwischen Gewinn- und Absorber-Sektion. Durch Umbondung der Kontaktdrähte kann so an einem Laser das Längenverhältnis geändert werden. Für Vergleichsmessungen wurde zusätzlich ein RW-Laser mit durchgehendem Kontakt präpariert.

a)



b)

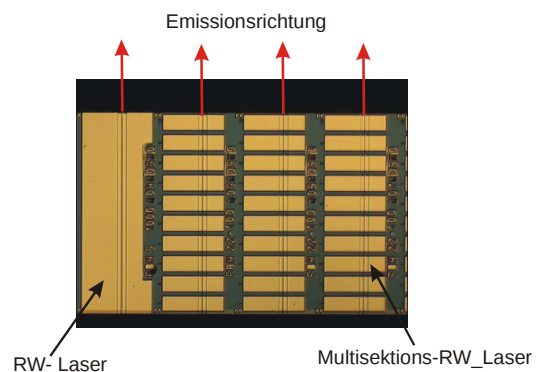


Abb. 1 Layout der hergestellten 2-Sektions- (a) und Multi-Sektions-RW-Laser (b)

Abb. 2 zeigt Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinien von 1 mm TQW Lasern bei Variation der Stegbreite von $2,2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ (a) und das optische Spektrum (b).

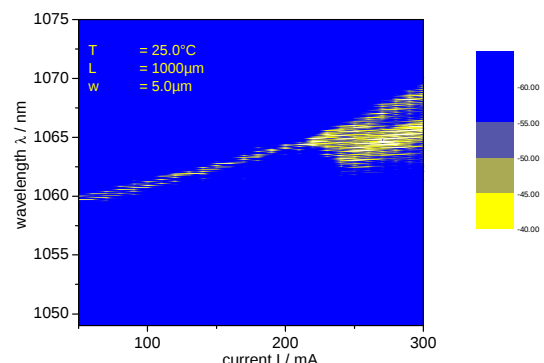
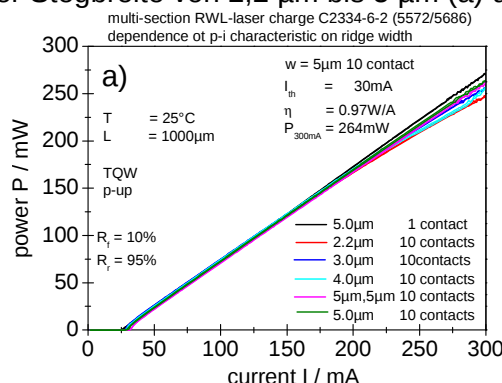


Abb. 2 Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinien von 1 mm TQW Lasern bei Variation der Stegbreite von $2,2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ (a) und ein Spektrummap von einem Laser mit $5 \mu\text{m}$ Stegbreite (b)

Zur Charakterisierung der Qualität der hergestellten Laser wurden alle 10 Kontakte parallel geschaltet. Es konnte eine Ausgangsleistung $> 200 \text{ mW}$ bei einem Anregungsstrom von 300 mA erreicht werden die nahezu unabhängig von der Stegbreite ist. Bei unseren

Untersuchungen an diesen RW Lasern zeigte sich, dass die höchsten Leistungen mit TQW Strukturen mit einer RW-Breite von 5 μm erreicht werden können. Die Messung der optischen Spektren (Abb. 2b) zeigt, dass die angestrebte Wellenlänge von $\sim 1064 \text{ nm}$ erreicht wurde.

Durch eine spezielle Beschaltung der Multi-Sektions-Laser, bei der der Absorber in der Mitte des Bauelementes ist (Colliding Pulse Mode-CPM Betrieb) können sehr kurze optische Impulse durch Modenkopplung erzeugt werden. Ein Beispiel für einen CPM Aufbau mit einem 1,9 mm langen Laser zeigt Abb. 3.

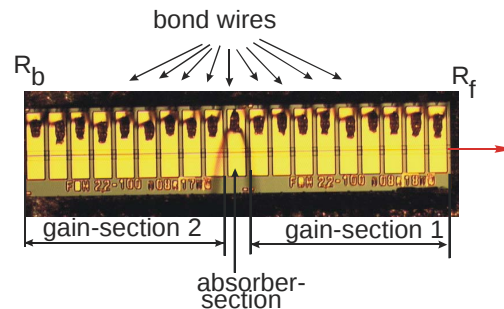


Abb. 3 1,9 mm langer CPM Laser

Eine Leistungs-Strom Kennlinie bei Strömen durch die Gewinn-Sektionen von $I_g = 0\text{-}250 \text{ mA}$ und einer Gegenspannung der Absorbersektion von $U_{\text{abs}} = -2 \text{ V}$ zeigt Abb. 4a. Das optische Spektrum (4b), eine Autokorrelationsmessung (4c) und ein RF Spektrum (4d) wurden bei $I_g = 210 \text{ mA}$ und $U_{\text{abs}} = -2 \text{ V}$ gemessen.

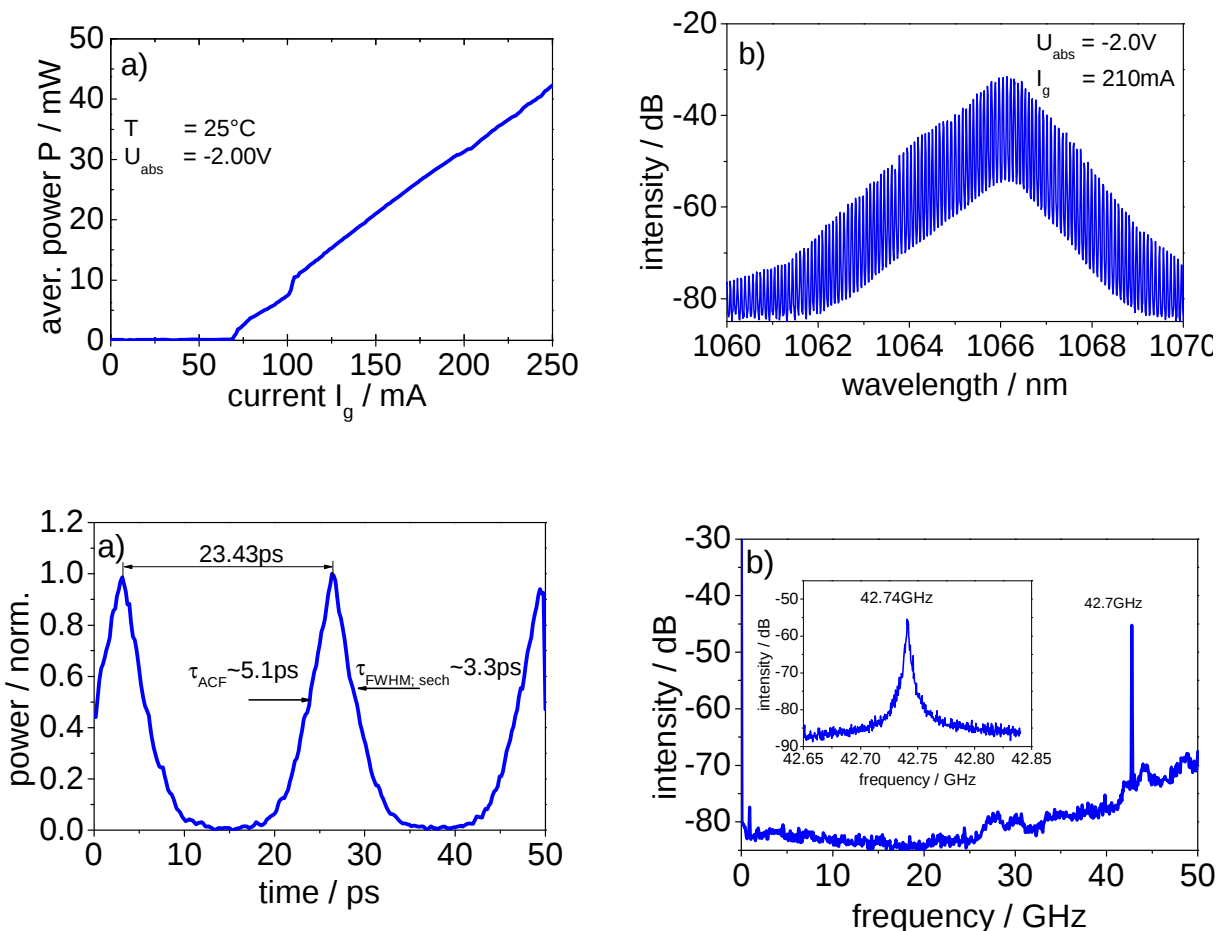


Abb. 4 Leistungs-Strom Kennlinie (a) bei $I_g = 0\text{-}250 \text{ mA}$. Optisches Spektrum (b), Autokorrelationsmessung (c) und RF Spektrum (d) eines 1,9 mm langen CPM Laser bei $I_g = 210 \text{ mA}$ und $U_{\text{abs}} = -2 \text{ V}$

Diese Untersuchungen beweisen, dass mit den entwickelten RW-Laserstrukturen sehr kurze optische Impulse von ~ 3 ps mit einer Folgefrequenz von 4,3 GHz durch Modenkopplung erzeugt werden können.

Die vorgestellte Schichtstruktur mit 3-fach QW und das beschriebene Layout wurde auch an die RW-Laser der Wellenlänge von 850 nm angepasst. Auch bei dieser Wellenlänge konnten Bauelemente mit Ausgangsleistungen von > 200 mW bei Anregungsströmen von 300 mA realisiert werden. Es wurden geringe vertikale Fernfelddivergenzen von $\sim 18^\circ$ FWHM gemessen, was eine effektive Kopplung mit externen Komponenten bei unseren Partnern ermöglicht.

2.1.2 1064nm DBR-RW Laser für externe Kavitäten für Impulsoszillatoren

Im Projektzeitraum wurden 3 Iterationen zur Realisierung von 1064 nm DBR Lasern zur Modenkopplung durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Symmetrie des vertikalen Wellenleiters (symmetrischer - SLOC und asymmetrischer - ASLOC Wellenleiter), die Zahl der QW (DQW, und TQW), die Schichtdicken und Zusammensetzung der AlGaAs-Schichten, die Gitterperiode und der Koppelkoeffizient untersucht. Es zeigte sich, dass die Laser mit asymmetrischen Wellenleiter einer Gesamtdicke von $4,8 \mu\text{m}$ und einem AlAs-Gehalt von 35% die besten Lasereigenschaften besitzen. Die Anstiege, die Aussagen zur Effizienz zulassen, sind bei den DQW Wafern mit $\sim 0,48$ W/A um $0,05$ W/A höher als bei den TQW's. Vertikale Fernfeldwinkel von 14 Grad FWHM wurden bei DQW Wafern und $\sim 18^\circ$ bei TQW Strukturen erreicht.

Bei den ersten 2 Iterationen wurden 3-Sektions-DBR-Laser mit einer Gesamtlänge von 1 mm, 2 mm und 10 mm hergestellt. Bei den 1 mm langen Lasern (siehe Abb. 5a) hatte die Gittersektion eine Gesamtlänge von $200 \mu\text{m}$. Die Längen der Absorbersektion L_{abs} und entsprechend die Längen L_g der Gewinnsektion wurden variiert ($L_{\text{abs}} = 80 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$, $L_g = 720 \mu\text{m}$, $700 \mu\text{m}$ und $600 \mu\text{m}$). Die Breite des Rippenwellenleiters betrug $5 \mu\text{m}$.

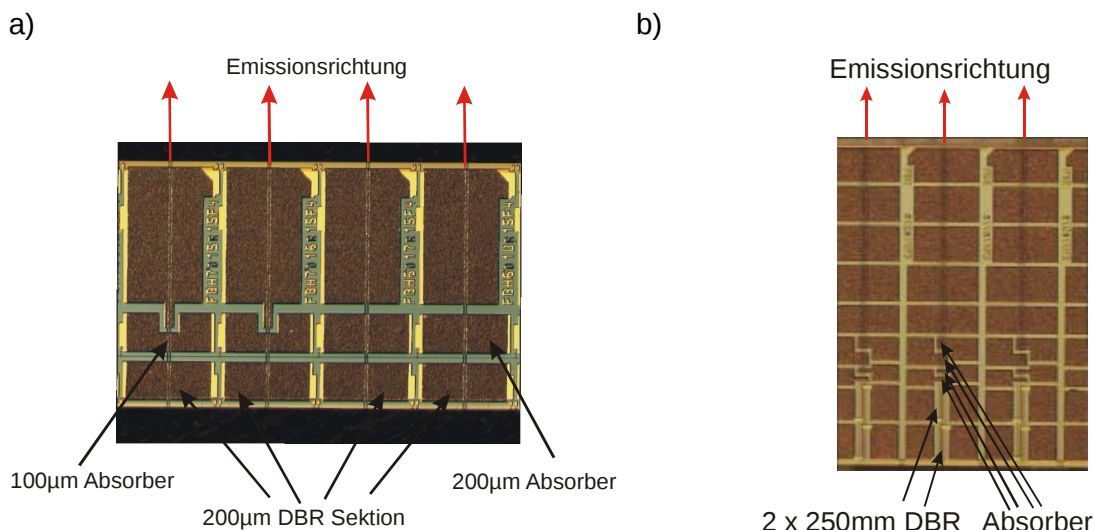


Abb. 5 Drei-Sektions-Laser mit Gewinn-, Absorber und DBR-Sektion (a), Multi-Sektions-Laser mit der Möglichkeit der Längenvariation von Gewinn-, Absorber und DBR-Sektion (b)

In der 3. Iteration wurde ein komplett neues Layout (siehe Abb. 5b) für die weitere Optimierung der Bauelemente erarbeitet. Hierbei wurden alle 3 Sektionen (Gewinn-, Absorber- und DBR-Sektion) segmentiert, was eine wählbare Längenvariation der einzelnen Sektionen ermöglicht. Dadurch wurde es erstmals möglich an einem Laserbauelement durch Umbondung gezielt die Längen der Einzelsektionen zu variieren und damit die günstigsten

Bedingungen für die Pulserzeugung zu erforschen. Zusätzlich wurde die Wellenlänge der Laser auf einem Wafer durch Anwendung der Elektronenstrahlolithografie variiert.

Die Messdaten von Bauelementen der 3. Iteration sind in Abb. 6 dargestellt. Abb. 6a zeigt die P-U-I Kennlinien von Lasern mit einer Front- und Rückfacettenbeschichtung von 10% bzw. 0%. Die Schwellen liegen bei 78 mA, die Effizienz im Bereich von 0,78 W/A – 0,85 W/A. Bei 500 mA Anregungsstrom wird eine Leistung >350 mW erreicht. Abb. 6b zeigt, dass die angestrebte Wellenlänge von 1064,3 nm genau getroffen wird. In den Abbn. 6c, d sind die Kennlinien und Spektren von entspiegelten DBR Lasern (Front- und Rückfacette < 10⁻⁴) für die Anwendung in einem externen Resonator zur Modenkopplung gezeigt.

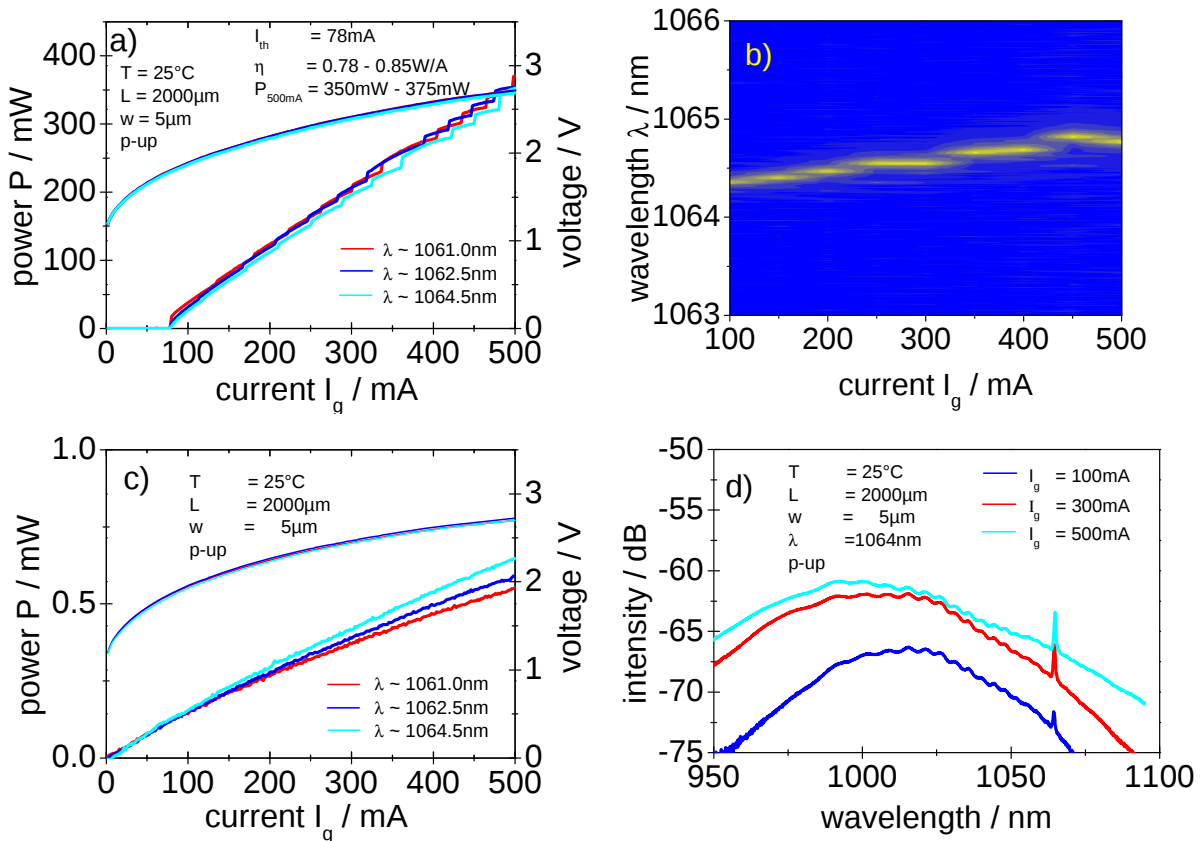


Abb. 6 Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinien (a) und Spektrenmap (b) von Lasern mit einer Front- und Rückfacettenbeschichtung von 10% bzw. 0%, Leistungs-Spannungs-Strom Kennlinien (c), und Spektrenmap (d) von entspiegelten Lasern

Aus den gemessenen Kennwerten ergibt sich, dass die realisierten Bauelemente für eine Modenkopplung im externen Resonator sehr gut geeignet sind.

2.1.3 1064nm DBR-RW Laser für monolithische Kavitäten für Impulsoszillatoren

Pulse im Zeitbereich von 10 ps und darunter lassen sich durch Modenkopplung erzeugen. Im Rahmen des Vorhabens wurden hierfür monolithische Bauelemente entwickelt. Hier wurde die sogenannte hybride Modenkopplung eingesetzt, bei der ein sich im Resonator befindlicher sättigbarer Absorber moduliert wird, und zwar mit einer Frequenz, welcher mit der Umlauffrequenz eines Impulses im Resonators übereinstimmt. Für das spätere Herauspicken von Impulsen darf der Abstand zwischen den Impulsen nicht zu klein, d.h. die Wiederholfrequenz nicht zu groß sein. Um einen kompakten Aufbau zu realisieren wurde ein monolithisch integrierter Resonator mit einer sehr großen Chiplänge von 1 cm gewählt. Dies ist ein Kompromiss zwischen der technologischen Handhabbarkeit und der resultierenden

Wiederholfrequenz im Bereich von ~ 4 GHz. Der modengekoppelte Laser besteht aus einem $200\ \mu\text{m}$ langen sättigbaren Absorber-, einer $1500\ \mu\text{m}$ langen Gewinn-Sektion, einer $8000\ \mu\text{m}$ langen Kavität, einer $200\ \mu\text{m}$ langen DBR Sektion zur Wellenlängenstabilisierung und einer Monitorsektion (siehe Abb. 7). Das Layout des p-Kontaktes erlaubt die elektrische Ansteuerung jeder einzelnen Sektion. Abb. 7 zeigt ein Foto, das Schema und die Ansteuerung der einzelnen Sektionen (unterer Teil).

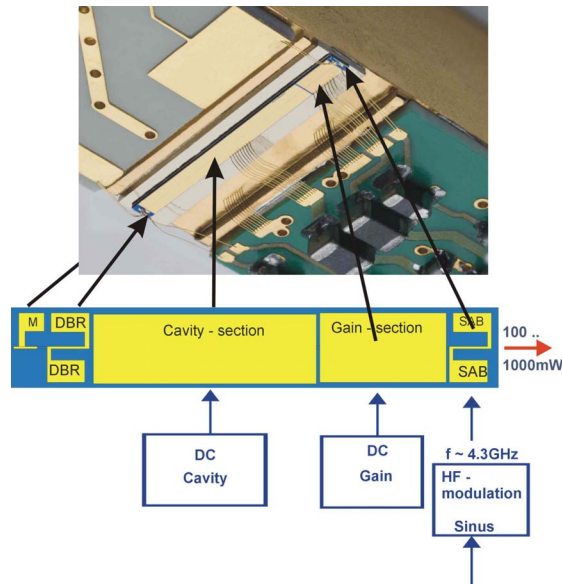


Abb. 7 Schema und die Ansteuerung der einzelnen Sektionen (unterer Teil) und den montierten Laser (Foto).

Die $10\ \text{mm}$ langen Laser wurden auf einen speziell entwickelten Messträger montiert (siehe Abb. 7 Foto). Auf diesem Halter wird die Gewinn-Sektion und die Kavitäts-Sektion mit einem Konstantstrom betrieben. Der $200\ \mu\text{m}$ lange sättigbare Absorber kann sowohl mit einer Gegenspannung betrieben werden (passive Modenkopplung) als auch mit der Frequenz von $\sim 4,3\ \text{GHz}$ (entspricht einer Umlaufzeit von $233\ \text{ps}$) moduliert werden (hybride Modenkopplung). Die $200\ \mu\text{m}$ lange DBR-Sektion und die Monitor-Sektion wurden bei den Untersuchungen nicht beschaltet.

In Abb. 8 ist die gemittelte Leistung der Laserimpulse eines $10\ \text{mm}$ langen DQW Lasers über dem Strom durch die Gewinn-Sektion I_g dargestellt. Die Gegenspannung am Absorber betrug $-0,5\ \text{V}$ und die Kavität wurde mit einem Gleichstrom von $124\ \text{mA}$ angeregt. Bei $I_g = 700\ \text{mA}$ beträgt die mittlere Leistung $35\ \text{mW}$. In Abb. 9 ist die Abhängigkeit der Pulsspitzenleistung und Pulsbreite vom Strom durch die Gewinn-Sektion dargestellt. Bei $I_g = 500\ \text{mA}$ erreicht man eine Pulsspitzenleistung von $950\ \text{mW}$ und eine Pulsbreite von $\sim 7\ \text{ps}$ bei Annahme eines sech^2 Pulses (siehe Abb.11).

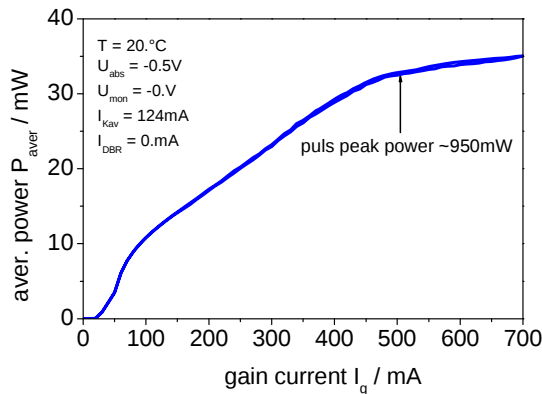


Abb. 8 gemessene gemittelte Leistung der Laserimpulse über dem Strom durch die Gewinn-Sektion I_g

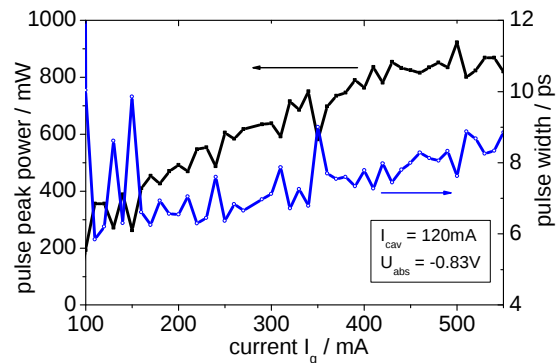


Abb. 9 Abhängigkeit der Impulsleistung und der -breite von I_g

Die mit hybrider Modenkopplung (HF-Modulation mit 4,324 GHz) im 1 cm langen 5-Sektionslaser mit Modenkopplung erzeugten Pulse im Zeitbereich 5 ns zeigt Abb. 10. Bei diesen Messungen war $I_g = 420$ mA, $I_{cav} = 124$ mA und an die Absorbersektion wurde eine Gegenspannung von $-0,5$ V angelegt. Die Messungen zeigen, dass eine stabile Modenkopplung erreicht wird.

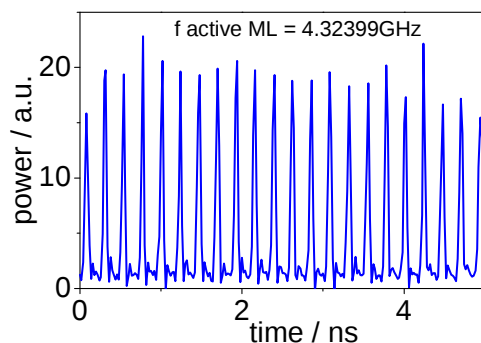


Abb.10 mit hybrider Modenkopplung im 1cm langen 5-Sektionslaser erzeugte Pulse

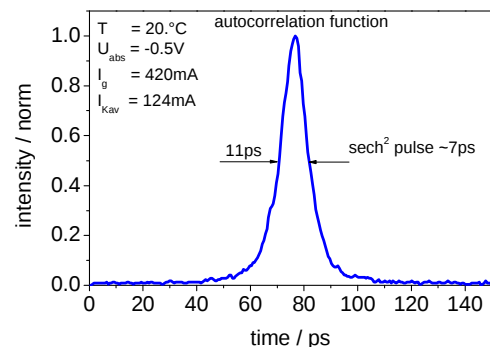


Abb. 11 Autokorrelationsfunktion der erzeugten Pulse bei Anregung der Gewinn-Sektion mit $I_g = 420$ mA, der Kavitäts-Sektion mit $I_{cav} = 124$ mA und einer negativen Spannung am Absorber $U_{abs} = -0.5$ V

Die Ursache der in Abb. 10 zu erkennenden Variation der Pulsamplitude liegt bei der benutzten 25 GHz Fotodiode und der Triggerung des 70 GHz Oszilloskops.

Die Autokorrelationsfunktion der erzeugten Impulse zeigt Abb.11. Die gemessene Pulsbreite FWHM beträgt ~ 11 ps, was bei einer Annahme eines sech^2 -Pulses einer Pulsbreite von ~ 7 ps entspricht.

Das zugehörige Leistungs- oder RF Spektrum zeigt Abb. 12. Die Verschiebung der erzeugten Pulsfrequenz mit dem Anregungsstrom durch die Gewinn-Sektion zeigt Abb. 12a und das zugehörige RF Spektrum ist in Abb. 12b dargestellt. Der Peak des RF Spektrums befindet sich bei 4,33 GHz und die Rauschunterdrückung ist > 50 dB.

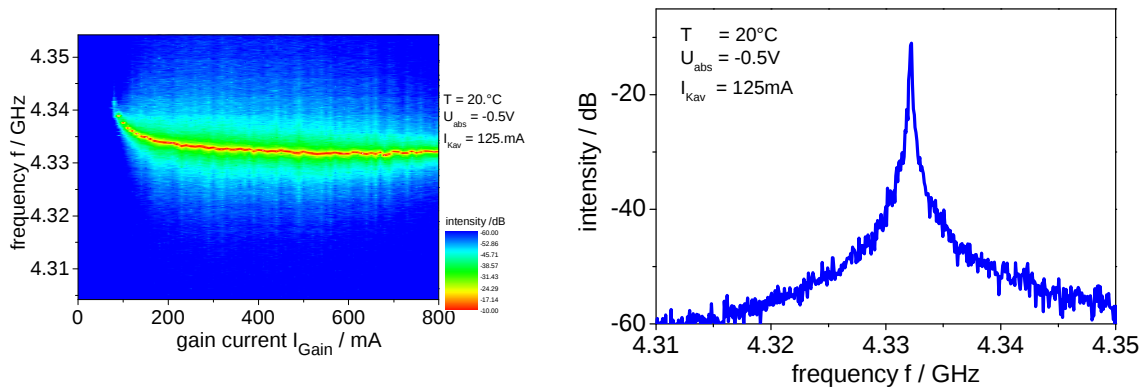


Abb. 12 Verschiebung der erzeugten Pulsfrequenz mit dem Anregungsstrom durch die Gewinn-Sektion (a) und das zugehörige RF Spektrum bei $I_g = 420\text{ mA}$ (b)

In Abb. 13 ist ein optisches Spektrenmap bei hybrider Modenkopplung im Strombereich von $I_g = 40\text{ mA} - 700\text{ mA}$, $I_{\text{cav}} = 124\text{ mA}$ und $U_{\text{abs}} = -0.5\text{ V}$ gezeigt.

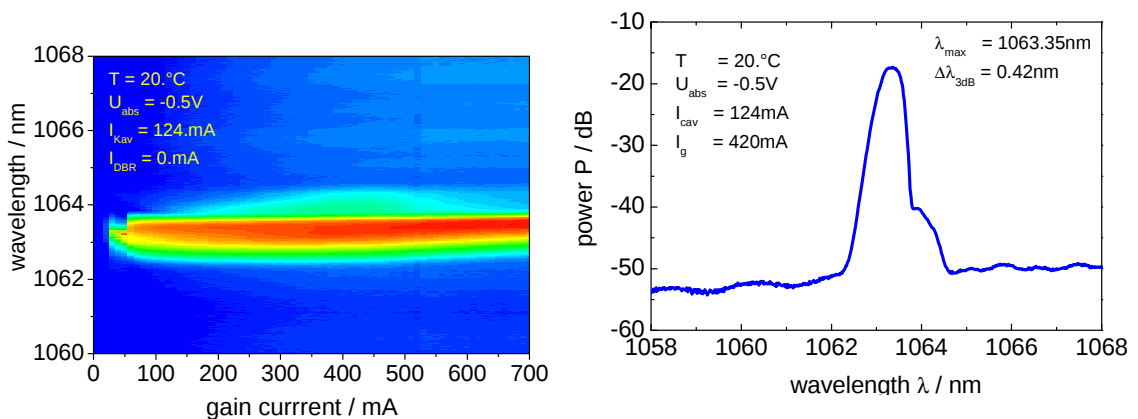


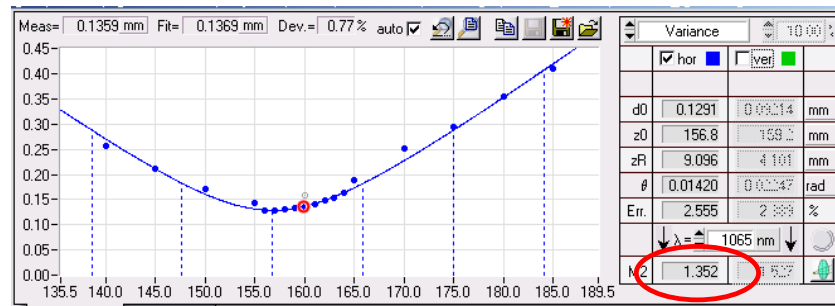
Abb.13 optisches Spektrenmap bei hybrider Modenkopplung im Strombereich von $I_g = 40\text{ mA} - 700\text{ mA}$

Abb.14 Abhängigkeit der Pulsspitzenleistung und Pulsbreite vom Strom durch die Gewinn-Sektion

Die Sockeltemperatur war 20°C . Die Emissionswellenlänge liegt bei $\sim 1063,5\text{ nm}$. Ein Einzelspektrum bei $I_g = 420\text{ mA}$ ist in Abb. 14 dargestellt. Man erkennt eine Verbreiterung des Spektrums durch die Modenkopplung auf eine 3 dB Halbwertsbreite von $0,42\text{ nm}$. Durch Erhöhung der Temperatur auf 25°C kann die angestrebte Wellenlänge von 1064 nm eingestellt werden.

Abb. 15 zeigt Ergebnisse der Messung einer Kaustik des vom modengekoppelten Laser emittierten nahezu kollimierten Strahls. Der Strahlparameter bestimmt aus den 2. Momenten des Strahldurchmessers beträgt $M^2 = 1,4$ horizontal, $M^2 = 1,5$ vertikal. Die Werte entsprechen einem nahezu beugungsbegrenztem Strahl.

Slow axis:
 $M^2 = 1.4$



Fast axis:
 $M^2 = 1.5$

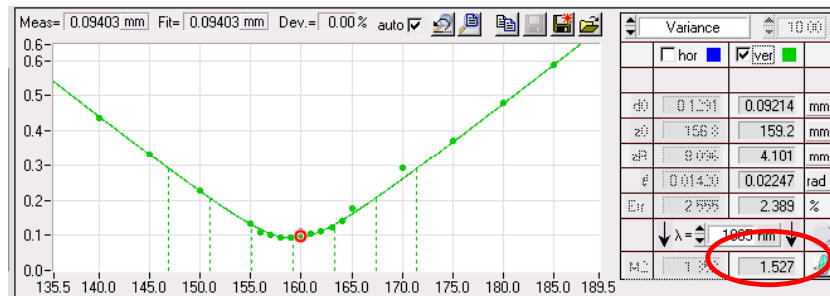


Abb. 15 Kaustik der zeitlich gemittelten Impulse eines modengekoppelten DBR-Lasers zur Bestimmung der Strahlqualität. Oben: lateral. Unten: vertikal.

2.1.4 Trapezverstärker und Trapezpulspickerelemente für 840 nm und 1064 nm Wellenlänge

Um die Energie der Impulse der modengekoppelten Oszillatoren weiter zu erhöhen, wurden im Projekt Halbleiterverstärker entwickelt und hergestellt. Ziel war es die Impulsenergien auf Werte größer 500 pJ zu erhöhen. Dabei erfolgte eine Optimierung der Schichtstruktur in Hinblick auf die Zahl der QWs, die Komposition und das Dotierungsprofil des Wellenleiters und die Lage des Verstärkungsmaximums. Die Halbleiterverstärker bestehen aus einem Eingangsegment zur Modenfilterung und einem Verstärker in Trapezgeometrie, siehe Abb. 16.

a)

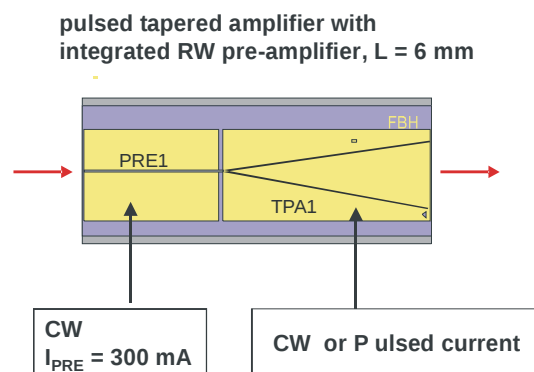


Abb. 16 entwickelte Verstärker bestehend aus einer RW Eingangs-Sektion als Modenfilter und einer Verstärker-Sektion

Die Untersuchungen der Verstärker zeigten, dass eine aktive Zone mit Doppelquantum Well

höhere Leistungen liefert. Zur Optimierung der Verstärkung der optischer Pulse wurde die Wellenlänge des Gewinn-Maximums in 3 Wafern variiert. Abb. 17a zeigt die zugehörigen cw Lumineszenzspektren für die 3 Wafer bei 6 A Trapezstrom und 300 mA RW-Strom. Die Magenta Linie zeigt die Wellenlänge des Seedlasers.

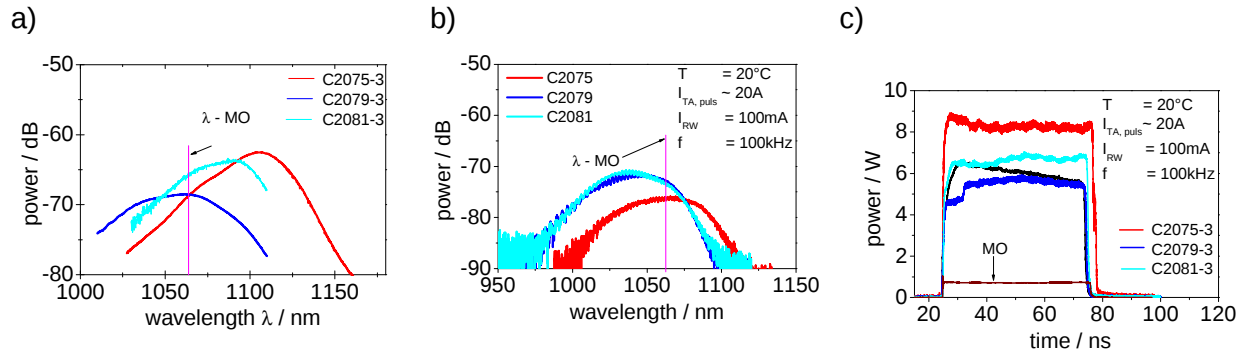


Abb. 17 Lumineszenzspektren unter cw- (a) und Pulsanregung der Verstärkersektion (b) sowie die verstärkten Pulse der 3 Trapezstrukturen (c)

Auf Grund des Designs der Schichtstruktur für die Verstärkung kurzer optischer Pulse ist bei cw-Anregung die Wellenlänge des Gewinnmaximums zu langwellig. Die Lumineszenzspektren unter Pulsanregung der Verstärkersektion (Pulsstromamplitude ~ 20 A, Pulsbreite = 50 ns und Folgefrequenz = 100 kHz) sind in Abb. 16b gezeigt. Man erkennt, dass bei Pulsanregung die Gewinnmaxima nahe der Seedwellenlänge liegen und dadurch eine maximale Verstärkung erreicht werden kann. In Abb. 16c ist die Pulsverstärkung unter den o.g. Anregungsbedingungen gezeigt. Optische Ausgangspulse bis zu 9 W bei 50 ns Pulsbreite konnten erzeugt werden.

Um die Wiederholrate von Pulsen aus modengekoppelten Laseranordnungen frei wählbar einstellen zu können, wurden Pulspicker-Trapezverstärker entwickelt und realisiert. Abb. 18 zeigt ein Schema der hergestellten Bauelemente. Der 2 mm lange RW-Eingangsteil besteht aus 4 Sektionen (Monitor-Sektion M, Vorverstärker PRE1, Pulspicker-Sektion PP und Vorverstärker PRE2), und der 4 mm lange Trapezteil ist unsegmentiert bzw. segmentiert designt.

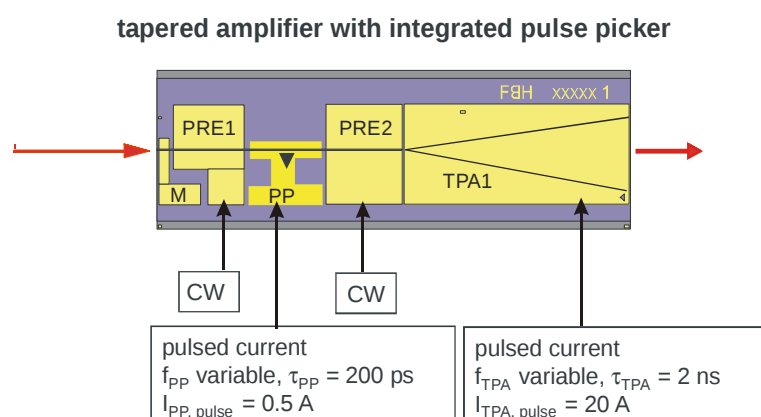


Abb. 18 Schema der hergestellten Pulspicker-Trapezverstärker

Der Pulspicker (PP) und die Vorverstärker (PRE1 und PRE2) werden so betrieben, dass die injizierten optischen Pulse absorbiert werden, wenn kein elektrischer Puls in den Pulspicker injiziert wird. Die Länge der Strompulse muss dabei kürzer sein als der Abstand eintreffenden optischen Pulse, damit jeweils nur ein Puls selektiert wird. Die Wiederholfrequenz der Strompulse in den PP und somit der optischen Pulsfolge kann dann im Prinzip frei eingestellt werden, bis zum Einzelschussbetrieb.

2.1.5 Schaltungsentwicklung und Prozessierung von Schalttransistoren für Puls picker und Trapezverstärker

Für die Ansteuerung der Laserdioden wurden je nach geforderter Schaltgeschwindigkeit und –strom unterschiedliche Konzepte entwickelt.

Der schnelle Schalter mit 500 mA Pulsstrom und ca. 200 ps Torbreite arbeitet als Shunt – Schalter (siehe Abb. 19). Der langsamere Hochstromschalter für den Trapezverstärker ist als Serienschalter ausgeführt (Abb.20).

Für den Endstufentransistor zur Pulsansteuerung wird Gallium-Nitrid (GaN) als Transistor-Basismaterial, das sich mittlerweile auf dem Gebiet der Hochfrequenzleistungselektronik fest etabliert hat, benutzt. Dabei kommen die Vorzüge dieses Wide-Bandgap-Materials durch die Kombination von hoher Durchbruchspannung, hoher Sättigungsgeschwindigkeit und guter Wärmeleitfähigkeit voll zur Wirkung. Aber auch für schnelle Stromschalter ist es durch seine hohe Ladungsträgerdichte im Kanal vorteilhaft gegenüber anderen Materialien wie Silizium oder GaAs. Das niedrigere ϵ_r erlaubt darüber hinaus durch die kleineren parasitären Kapazitäten höhere Schaltgeschwindigkeiten.

Endstufe "Puls-Picker"

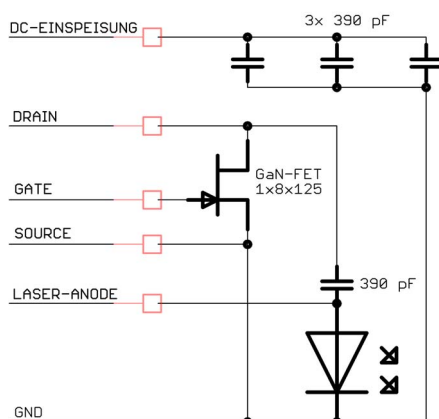


Abb. 19 schneller Shunt – Schalter für Strompulse von 200 ps und 500 mA

Treiber- u. Endstufe Trapez-Laser

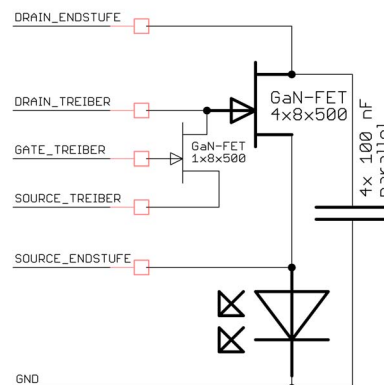


Abb.20 Serienschalter für Hochstrompulse 2 ns und 20 A

Aus diesen Gründen wurde die am FBH vorhandene GaN-HEMT-Technologie für die Endstufentransistoren im Projekt genutzt. Im Projektzeitraum wurden GaN-HEMT Transistoren entwickelt und auf 3"-Wafer (siehe Abb. 21) hergestellt.

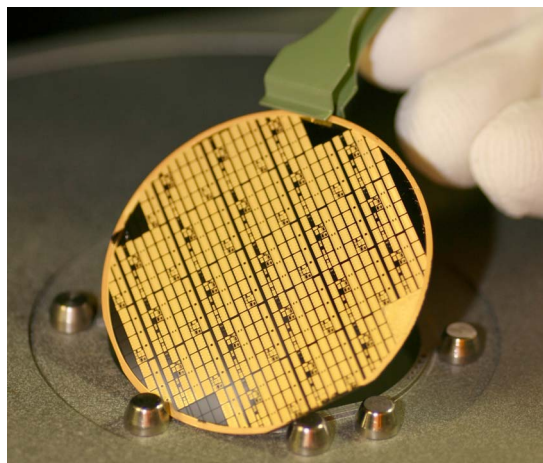


Abb.21 GaN-Wafer

Die Transistoren wurden dabei skalierbar ausgeführt, so dass man je nach geforderter Schaltgeschwindigkeit und Strom die optimale Transistorgröße durch Variation der Gate - Weite auswählen kann. Die Abb. 22 bis 24 zeigen Chipfotos des Layouts der Transistorgrößen 5x8x125 , 5x8x250 und 5x8x500. Damit lassen sich frei wählbar Kombinationen von 200 ps und 500 mA bis 20 A und 2 ns aufbauen.

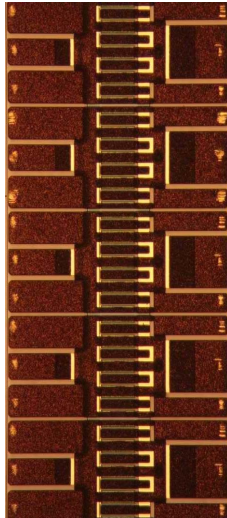


Abb. 23 5x8x125

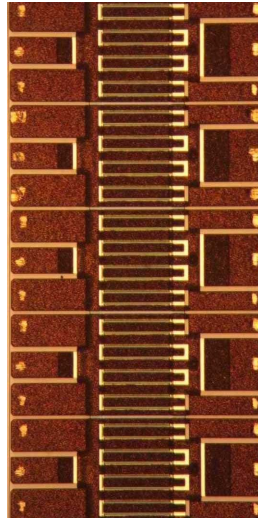


Abb. 24 5x8x250

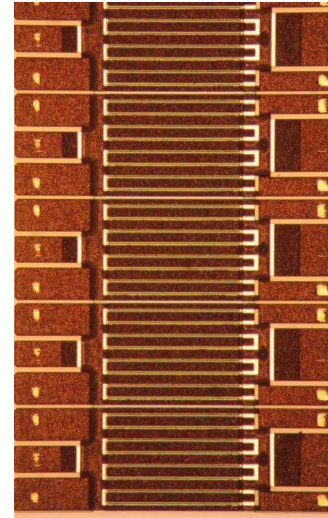


Abb. 25 5x8x500

Das Design der Schalttransistorstufen für Hochstrom-Laserdiodenanwendungen beinhaltet folgende Herausforderungen:

- Durch die sehr niedrige Impedanz der Laserdioden ist eine impedanzangepasste Verbindung zwischen Laser und Transistorstufe nur sehr schwer zu realisieren. Es bleibt, die parasitären Elemente der Verbindung, insbesondere die Bonddraht-Induktivitäten, durch kurze Abmessungen zu minimieren. Zwingend sind dabei der kompakte Chipaufbau mit Direktbondung und seine sorgfältige 3D-Simulation.
- Die hohe Gate-Kapazität des Endstufentransistors macht eine Integration des Treibertransistors notwendig. Damit erreicht man kleinere parasitäre Induktivitäten, was ebenfalls zu kürzeren Schaltzeiten führt.

Abb. 26 zeigt den Aufbau eines integrierten Lasertreibers mit Treiber- und Endstufe sowie Trapezlaser. Die Verbindung der Treiberstufe mit der Endstufe erfordert bei den Standard-Transistorlayouts einen großen Bonddrahtaufwand.

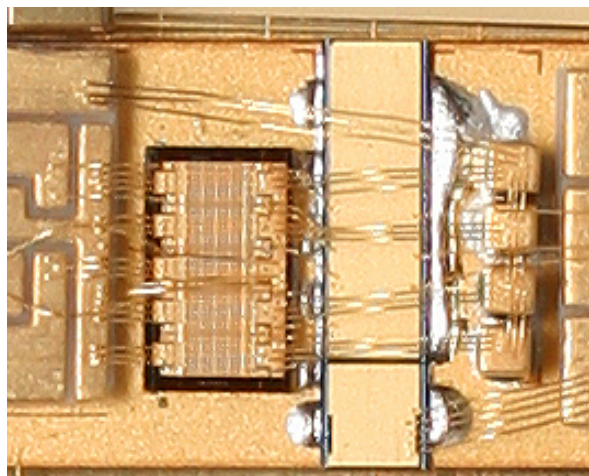


Abb. 26 Transistor Treiber- und Endstufe mit Trapezlaser

Für die Verbesserung der Endstufenschaltungen für Strompulse von 2 ns – 50 ns und Pulsstromamplituden bis 20 A wurde der Treiber- und der Endstufentransistor im Chip integriert (siehe Abb. 27a und b). Damit hat man eine direkte Verbindung von Treiber und Endstufe, was zu einer Verringerung der Induktivitäten und eine Verkürzung der Schaltzeiten führt. Gleichzeitig vereinfacht sich die Schaltung und der Verdrahtungsaufwand.

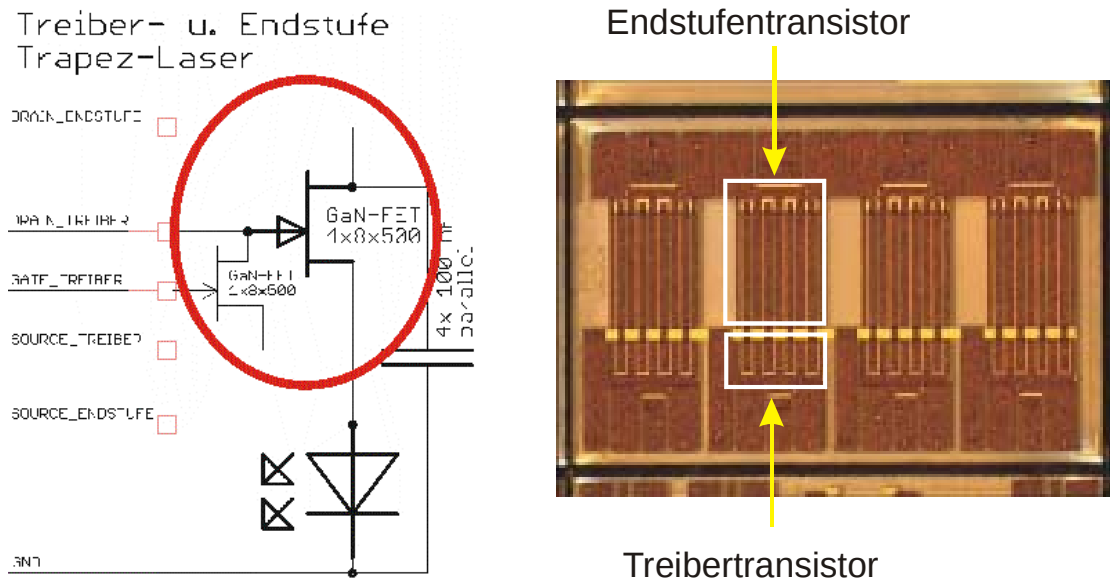


Abb. 27 Verbesserung der Endstufenschaltungen durch Integration von Treiber- und Endstufentransistor.

Ein prinzipielles Schema für einen hybriden Aufbau ist am Beispiel eines Teststandes in Abb. 28 gezeigt. Auf dem Teststand befindet sich das opto-elektronische Bauelement, hier ein Pulspicker mit Verstärker (PA), die Endstufen mit Treiber- und Endstufentransistor und die Ansteuerplatinen. Über die Inputplatinen wird der Teststand angesteuert.

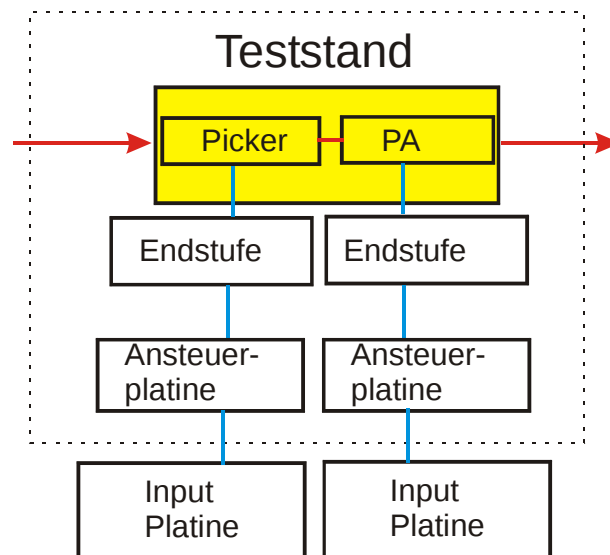
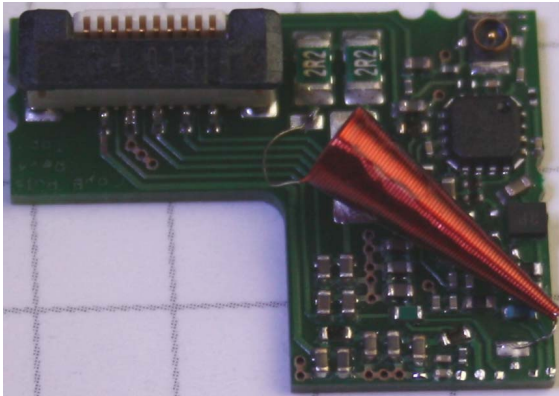
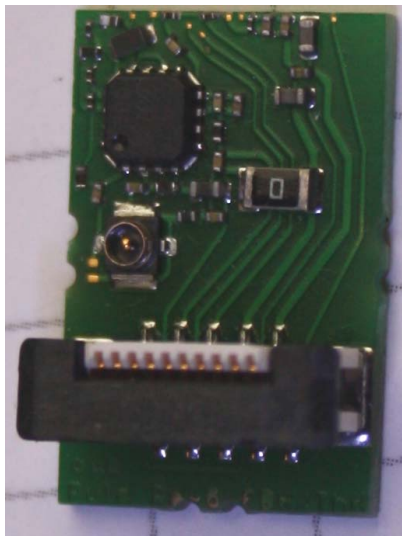


Abb. 28 prinzipielles Schema für den hybriden Aufbau am Beispiel eines Teststandes

Für die Ansteuerung der Endstufe (siehe Abb. 28) auf einem Teststand bzw. auf einer Mikrobank wurden 2 Varianten von Ansteuerplatinen entwickelt. In Abb. 29 sind die Ansteuerplatinen gezeigt.



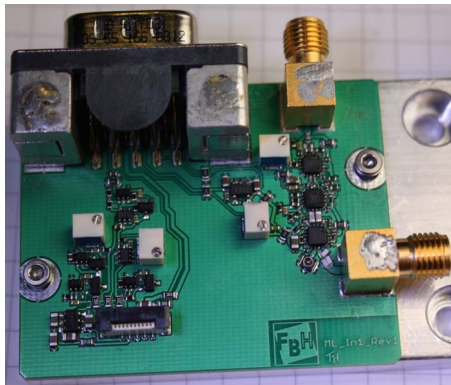
Ansteuerplatine für einen "20 A-Schalter"
und "3 A-Schalter"



Ansteuerplatine für den "schnellen Schalter"
(Picker)

Abb. 29 entwickelte Ansteuerplatinen für die Endstufe auf einem Teststand bzw. auf einer Mikrobank

Die elektronische Steuerung der Ansteuerplatinen erfolgt über Inputplatinen. Im Projektzeitraum wurden 2 Generationen dieser Platinen entwickelt und realisiert. Abb. 30 zeigt die 2. Generation der entwickelten Inputplatinen für den 20 A, den 3 A und den schnellen Schalter (200 ps und 500 mA). Die technischen Details der Platinen sind in Abb. 30 (rechte Seite) beschrieben.



2. Generation:

Inputplatine des "schnellen Schalters" (Picker) –

Pulse werden auf der Platine generiert.
Pulsbreite wird mit Steuerspannung eingestellt
Pulsgenerator triggert die Platine mit pos. Flanke
Zweite Steuerspannung steuert Verzögerung der
Ausgangs- und Monitor-Pulse gegenüber dem Trigger.

Platine hat zwei Ausgänge

pos. Puls-Polarität steuert die Puls-Platine auf der
optischen Mikrobank oder auf dem Teststand

neg. Puls-Polarität dient als Monitor-Ausgang

2. Generation:

Inputplatine für "20 A-Schalter" und "3 A-Schalter"

Die Pulsbreite wird vom Pulsgenerator bestimmt

Pulse werden auf der Platine generiert; Pulsgenerator
triggert sie

Die Platine Puls-Input_II_Rev1 besitzt zwei Ausgänge
pos. Puls-Polarität Puls-Platine auf oµB / Teststand
neg. Puls-Polarität = Monitor-Ausgang, Oszilloskop

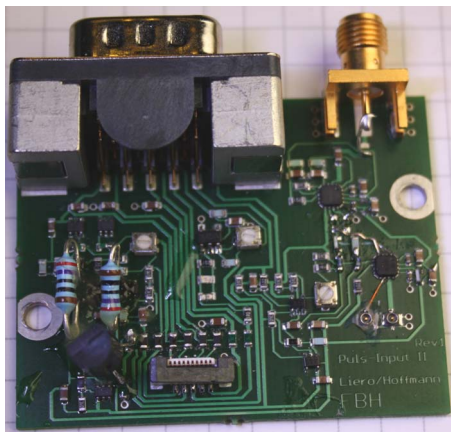


Abb. 30 entwickelte Inputplatinen für den und schnellen Schalter (<200 ps) und 20 A, bzw. 3 A Schalter

2.1.6 Hybride Integration von Laserbauelementen, GaN-Transistoren und Ansteuerelektronik

Mit den entwickelten Laserbauelementen, GaN- Endstufentransistoren, Ansteuer- und Input-Platinen wurden hybrid aufgebaute Lasersysteme realisiert. Dabei wurden 2 Konzepte verfolgt:

1. **Teststand** - hybrider Aufbau zur Charakterisierung der entwickelten Bauelemente unter Pulsanregung und für Lasersysteme mit externem Resonator
2. **Mikrobank** - hybrider Aufbau bei dem Masterszillator, Pulspicker, Verstärker, Elektronik und Auskoppeloptik integriert

2.1.6.1 Teststand

Ein Beispiel für einen Teststand mit einem Trapezbauelement mit Pulspicker und Verstärker zeigt Abb. 31a. Auf dem Teststand sind die Ansteuerplatinen und die Endstufen für die Pulspicker- und Verstärkersektion montiert (siehe auch Abb. 29). Um das Trapezbauelement einfach austauschen zu können (Test vieler Bauelemente), wurde es auf einem C-mount montiert der mittig in den Teststand eingesetzt werden kann. Durch die direkte Montage der

GaN-Endstufentransistoren neben dem Pulspicker und Verstärker (siehe Abb. 31b) wird eine Minimierung der Leitungsinduktivitäten und damit eine optimale Strompulsankopplung erreicht. Dieses ermöglicht es sowohl sehr kurze Pulse zum Pulspicking als auch ns- Pulse mit hoher Stromamplitude in das Laserbauelement einzukoppeln. Durch einfache Linsenkopplung eignet sich der Teststand für die Realisierung von Pulsquellen mit externem Resonator bzw. externem Masteroszillator.

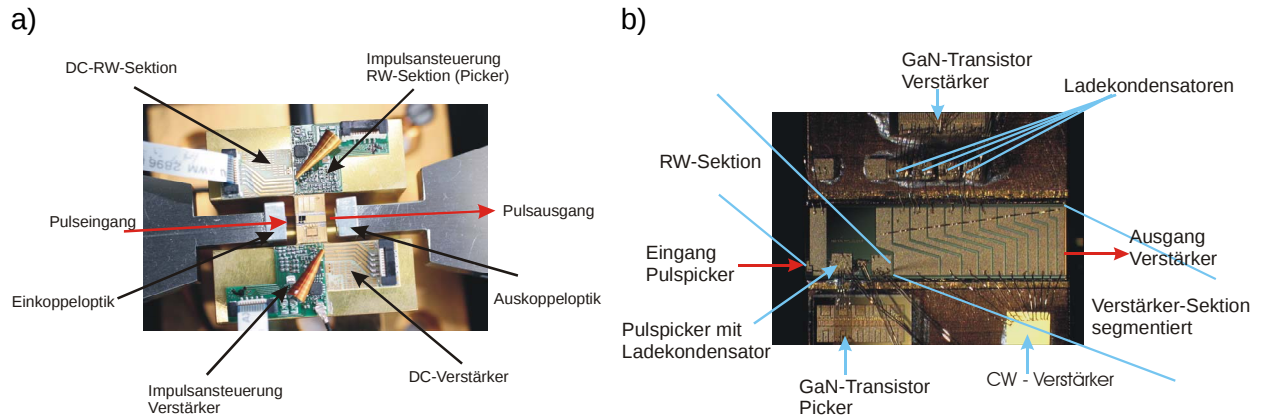


Abb. 31 Pulspicker und Verstärker auf Teststand (a), Detailausschnitt (b)

Für unseren Projektpartner Photonik-Zentrum Kaiserslautern wurden 2 Teststände mit Pulspicker für eine Wellenlänge von 1064 nm und für die Ruhr-Universität Bochum 2 Teststände mit Pulspicker für eine Wellenlänge von 850 nm gefertigt. Beide Projektpartner erhielten die Teststände mit Inputplatinen wie in Abb. 32 gezeigt.

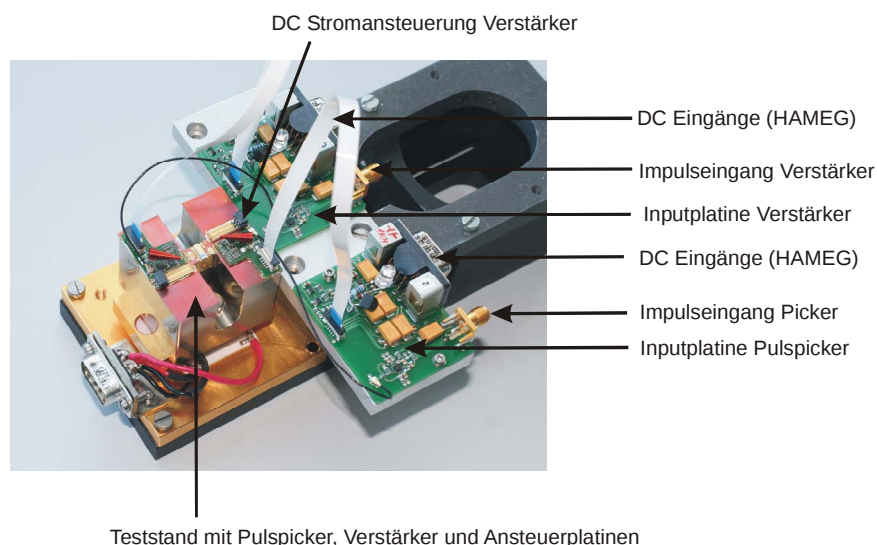


Abb. 32 Teststand mit Inputplatinen zur elektronischen Ansteuerung

2.1.6.2 Mikrobank

Im Berichtszeitraum wurde eine ps-Strahlungsquelle mit einem integriertem Pulspicker auf einer 5 cm x 4 cm großen Mikrobank entwickelt (siehe Abb. 33). Dieser kompakte Aufbau beinhaltet den Masteroszillator (MO) die zugehörige Ansteuerelektronik für die hybride Modenkopplung und die dc-Ströme, das Pulspickerelement, bestehend aus strukturierter RW- und Trapez-Sektion, die elektrische Pulsansteuerung für die Pulspicker-Sektion sowie die elektrische Pulsansteuerung für die Verstärker-Sektion. Die Kopplung zwischen MO und Pulspicker-Element erfolgt über eine GRIN-rod Linse. Die aus der Verstärker-Sektion ausgekoppelten optischen Pulse werden mit einem 3-Linsensystem kollimiert. Zusätzlich

sind noch eine dc-Stromeinspeisung für die Segmente der Pulspicker-Sektion und der Verstärker-Sektion integriert.

Die HF-Modulation des Masteroszillators mit $\sim 4,32$ GHz wird über ein spezielles HF Kabel realisiert. Die Verringerung der Pulsfrequenz erfolgt über einen handelsüblichen Teiler.

Mit dem entwickelten Treiber für die Pulspickersektion können Strompulse von ~ 200 ps mit Anstiegs- und Abfallzeiten < 100 ps bei Stromamplituden von bis zu 500 mA erreicht werden. Mit diesen kurzen Strompulsen wird die Pulspicker-Sektion transparent bzw. absorbierend geschaltet. Die Ansteuerelektronik für die Verstärker-Sektion liefert Strompulse mit einer Pulsbreite < 2 ns bei einer maximalen Stromamplitude von bis zu 20 A.

Abb. 33 zeigt ein Schema der entwickelten optischen Mikrobank mit 5-Sektions-Masteroszillator und Trapezverstärker mit integriertem Pulspicker.

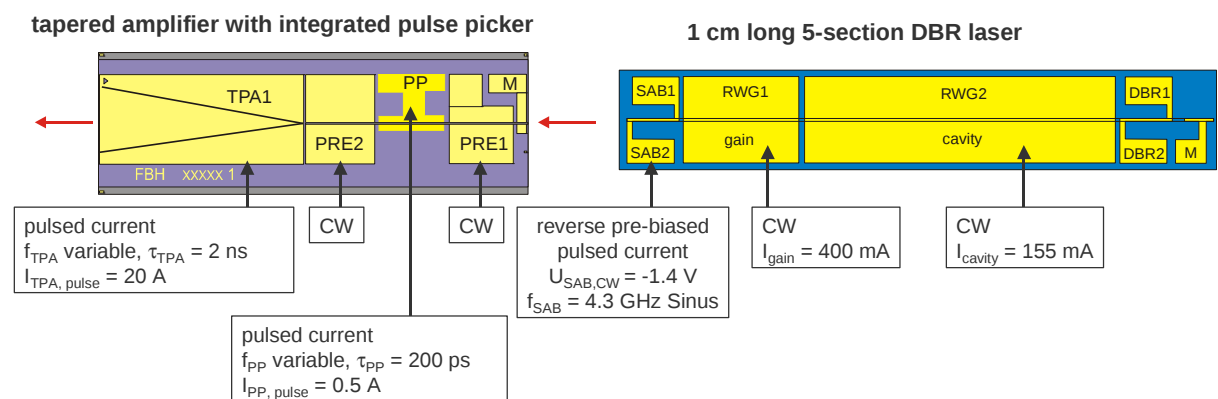


Abb.33: Schema der elektrischen Ansteuerung eines hybrid-modengekoppelten DBR-Lasers mit nachfolgendem Picken und Verstärken der Pulse

Die realisierte kompakte ps-Lichtquelle auf einer 5 cm x 4 cm großen Mikrobank ist in Abb. 34 gezeigt.

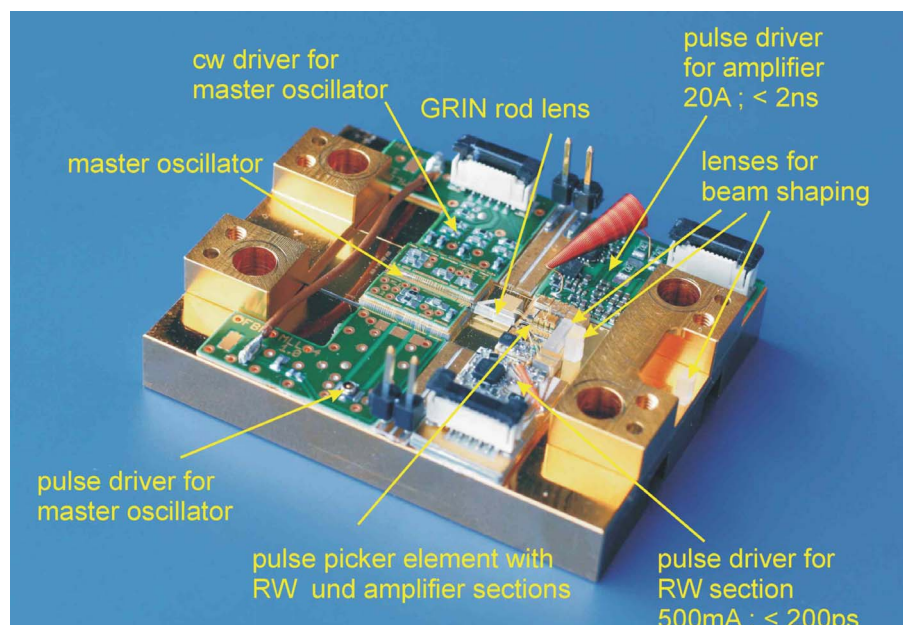


Abb.34 ps - Strahlungsquelle mit integriertem Pulspicker auf einer 5 cm x 4 cm großen Mikrobank

Im folgenden werden Ergebnisse dieser ps - Strahlquelle vorgestellt.

Bei den Untersuchungen wurde der MO mit einer Frequenz von 4,323 GHz hybrid modengekoppelt. Ein Frequenzteiler wurde so eingestellt, dass jeder 258. elektrische Puls selektiert, sodass Pulspicker und Verstärker mit einer Folgefrequenz von $\sim 16,7$ MHz angesteuert werden. Die emittierte Strahlung aus dem Verstärker wurde dann mit einer 25 GHz Fotodiode (New Focus, Modell1434) und einem 70 GHz Sampling Oszilloskop (LeCroy NRO 9000) gemessen. Für hochauflösende Zeitmessungen wurde eine Einzelschuss-Streak Kamera und ein Autocorrelator benutzt.

Abb. 35 zeigt die selektierten Pulse im Zeitbereich 300 ns. Man erkennt, dass jeder 258 Puls selektiert und verstärkt, und die Folgefrequenz auf 16,7 MHz reduziert wird. Die Amplitudenfluktuationen sind auf die Zeitauflösung der Fotodiode und die Triggerung des Oszilloskops zurückzuführen. In Abb. 36 ist ein gepickter Einzelimpuls im Zeitbereich 1 ns dargestellt.

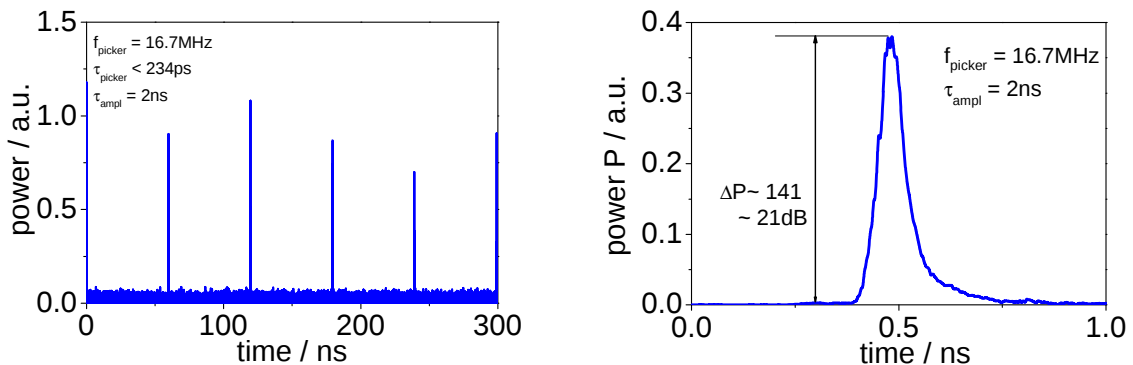


Abb. 35 selektierte und verstärkte Impulse im Zeitbereich 300 ns
Abb. 36 gepickter Einzelimpuls im Zeitbereich 1 ns

Man erkennt, dass genau 1 optischer Puls selektiert wird. Die gemessene Halbwertsbreite von ~ 50 ps korreliert mit der Auflösung der benutzten Fotodiode. Die Unterdrückung der Nachbarpulse ist besser als 21 dB. Hochaufgelöste Zeit- und spektrale Untersuchungen des gepickten Pulses mit einer Streak-Kamera sind in Abb. 37 gezeigt.

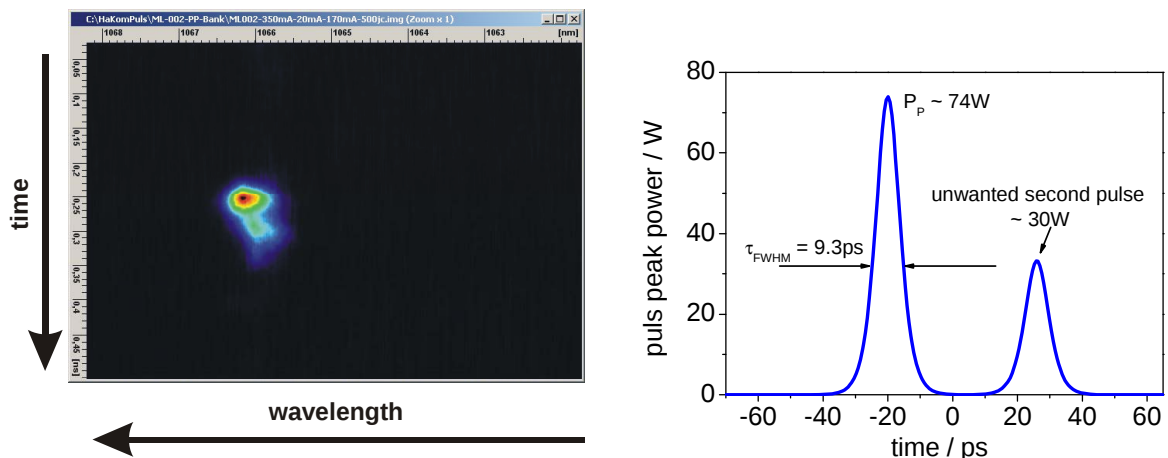


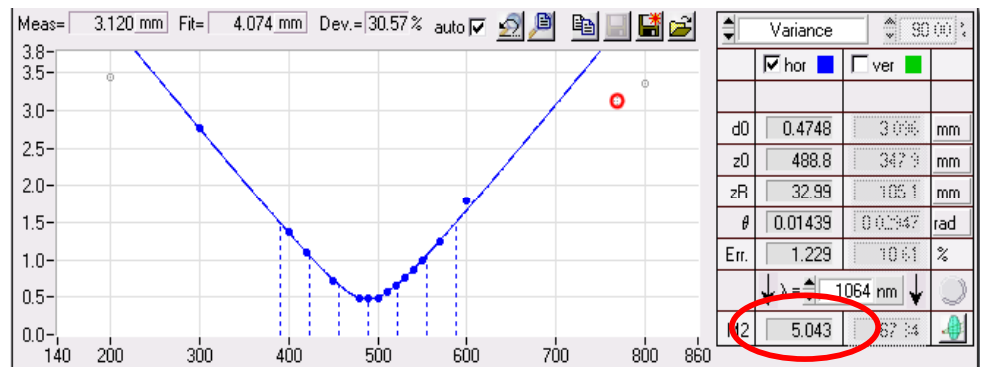
Abb. 37 Streak-Kamera Bild eines selektierten optischen Pulses

Abb. 38 vergleichende Untersuchungen von Streak-Kamera und Autokorrelator zur Charakterisierung der Pulse

Man erkennt, einen sehr intensiven 1. kurzen Puls und einen schwächeren 2. Puls nach ~50 ps, der spektral zum kurzwelligen verschoben ist. Vergleichende Untersuchungen mit der Streak-Kamera und dem Autokorrelator (siehe Abb. 38) zeigen, dass der 1. Puls eine Halbwertsbreite von ~9 ps und eine Spitzenleistung von ca. 74 W und der 2. Puls noch eine Spitzenleistung von ~ 30 W hat. Die Ursache des 2. Pulses ist auf Rückwirkungseffekte auf den MO zu erklären.

Die Ergebnisse der Messung einer Kaustik des von der Mikrobank (siehe Abb. 34) emittierten nahezu kollimierten Strahls zeigt Abb. 39. Der Strahlparameter bestimmt aus den 2. Momenten des Strahldurchmessers beträgt für das Modul $M^2 = 5$ horizontal, $M^2 = 2,1$ vertikal. Diese Werte sind deutlich größer als angestrebt. Hierzu ist zu bemerken, dass in den aus den 2. Momenten bestimmten Strahldurchmesser auch geringe Intensitätsanteile außerhalb der zentralen Strahlkeule eingehen und zu einer Verschlechterung des Strahlparameters führen. Die Effizienz der Kopplung in eine Mono-Mode-Faser ist deutlich besser und beträgt ca. 50% (Faserkollimator von Schäfter + Kirchhoff, Mono-Mode Patch Kabel von FOC, Modenfeld 5,9 μm , NA = 0,11). Es konnte ein Pulsspitzenleistung von 30 W in der Faser erhalten werden.

Slow axis
 $M^2 = 5$



Fast axis
 $M^2 = 2,1$

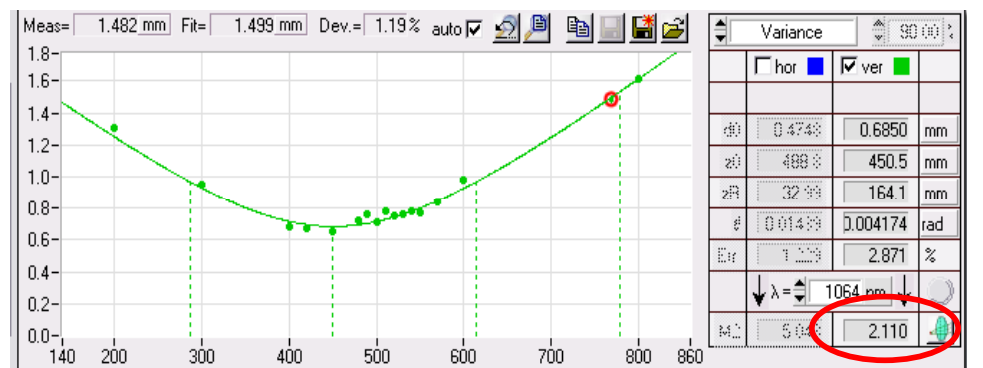


Abb. 38 Kaustik der zeitlich gemittelten Pulse eines modengekoppelten DBR-Lasers am Ausgang des Verstärkers hinter den kollimierenden Linsen zur Bestimmung der Strahlqualität. Oben: lateral. Unten: vertikal.

2.1.7 Bereitstellung von entwickelten Laser- und Elektronikkomponenten an die Projektpartner

Im Berichtszeitraum wurden den Projektpartnern insgesamt 298 Laserbauelemente und Elektronikschaltungen für ihre Entwicklungen geliefert.

Eine Zusammenstellung über Art und Anzahl der gelieferten Bauteile ist in Tab. 1 gezeigt.

	Ruhr-Uni. Bochum	Uni Kaiserslautern Photonik-Zentrum	Sacher Lasertechnik	Ey Photonics
1-Sektion RWE- Oszillatoren	18			
2-Sektions RWE- Oszillatoren	10	25	12	
3-Sektions RWE Oszillatoren		4		
Multi - Sektions RWE - Oszillatoren	64	14	15	
Multi-Sektions- Oszillatoren				12
Multi-Sektions- Modulatoren		10		
3-Sektions DBR- Oszillatoren		27		
Multi - Sektions DBR Oszillatoren		17		
Oszillatoren mit Trapez-Sektion		2		
Trapezverstärker	17	9	13	8
Trapezverstärker auf Mikrobank				4
Teststände mit Elektronik	2	3		
Inputplatinen	2	2		1
Ansteuerplatinen	2	2		3
Gesamtzahl der gelieferten Bauelemente	115	115	40	28

Tab. 1 Zusammenstellung über Art und Anzahl der gelieferten Bauteile an die Projektpartner im Projektzeitraum

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Erfolgt getrennt durch kaufmännische Abteilung.

1.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten wurden in Übereinstimmung mit den Arbeitspakten und der Finanzplanung der Vorhabensbeschreibung durchgeführt.

1.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit

Während der Laufzeit des Vorhabens zeigten verschiedene Firmen und Institutionen (z.B. Fa EKSPILA, UAP (Lettland), Advanced Photonics Systems, Lumera GmbH, Sacher Lasertechnik, ey-Photonics) Interesse an den entwickelten modengekoppelten Laserquellen.

1.5 Fortschritt bei anderen Stellen

- Die Firmen Alcatel-Thales III-V und Innolum haben mit 2-Sektions Quantum Dot Lasern bei ~ 1270 nm mittels Modenkopplung 400 fs Pulse mit einer Pulsleistung von ~ 3 W erzeugt. Mit Drei-Sektions-Trapezlasern mit einer aktiven Zone mit 10 QD Schichten, einer Eingangs-RW-Sektion mit $14 \mu\text{m}$ Breite, einem Trapezwinkel von 2° und einer Gesamtlänge von 4 mm wurden mittels passiver Modenkopplung kurze Pulse von 640 fs mit einer Pulsleistung von ~ 8 W erzielt.
- Sony Corp. (Japan) haben ein hybrides GaN MOPA System bestehend aus 2-Sektions modengekoppelten Mastersoszillator (MO) mit externem Resonator (wellenlängenselektives Bandpassfilter und externer Spiegel) und Verstärker (PA) mit gekrümmten Wellenleiter vorgestellt. Mittels passiver Modenkopplung wurden optische Pulse mit 3 ps Pulsbreite und 1 GHz Wiederholfrequenz bei 404 nm erzeugt. Die Peakleistung betrug 4 W.
- Die ETH Zürich konnte mit modengekoppelten VECSELs oder Modelocked Integrated eXternal-cavity Surface-Emitting Lasern optische Pulse im ps-Bereich mit einer mittlere Ausgangsleistungen von einigen Watt realisieren.

Die spektralen und räumlichen Strahleigenschaften und die Kompaktheit der im Vorhaben realisierten Strahlquellen sind deutlich besser als die der publizierten Laser.

1.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

- [1] A. Klehr, A. Liero, T. Hoffann, S. Schwertfeger, G. Erbert, W. Heinrich and G. Tränkle "A new concept of an ultra fast pulse picker for fs- and ps-pulses from GHz pulse-trains with semiconductor tapered elements", European Conf. on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conf. (CLEO Europe - EQEC 2009), Munich, Germany, Jun. 14-19, paper CB-14.1-FRI (2009).
- [2] A. Liero, A. Klehr, S. Schwertfeger, T. Hoffmann, W. Heinrich, "Laser Driver Switching 20 A with 2 ns Pulse Width Using GaN", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Anaheim, CA, May 25-27, pp. 1110-1113 (2010).
- [3] A. Klehr, B. Sumpf, K.H. Hasler, J. Fricke, A. Liero, Th. Hoffmann, G. Erbert and G. Tränkle, "High peak power pulse generation with GHz repetition rate using a Q-switched 1060nm DBR tapered laser", Proc. SPIE, vol. 7616, no. 7616J (2010).
- [4] T. Schlauch, J.C. Balzer, A. Klehr, G. Erbert, G Tränkle, and M.R. Hofmann, "Femtosecond passively modelocked diode laser with intracavity dispersion management" Opt. Express, vol. 18, no. 23, pp. 24316-24324 (2010).

- [5] A. Klehr, A. Liero, Th. Hoffmann, J. Schulz, S. Schwertfeger, H. Wenzel, G. Erbert, W. Heinrich and G. Tränkle, "Micro bench for optical pulse picking from 4 GHz pulse trains generated by mode locking of DBR lasers", 3rd Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, Sep. 13-16, pp. 1-4 (2010).
- [6] T. Ulm, A. Klehr, G. Erbert, F. Harth, J.A. L'huillier, "Femtosecond diode laser MOPA system at 920 nm based on asymmetric colliding pulse mode-locking", Appl. Phys. B, vol. 99, no. 3, pp. 409-414 (2010).
- [7] S. Schwertfeger, A. Klehr, T. Hoffmann, A. Liero, H. Wenzel, G. Erbert, "Picosecond pulses with 50W peak power and reduced ASE background from an all-semiconductor MOPA system", Appl. Phys. B, vol. 103, no. 3, pp. 603-607 (2011).
- [8] A. Klehr, A. Liero, Th. Hoffmann, S. Schwertfeger, H. Wenzel, G. Erbert, W. Heinrich and G. Tränkle, "Compact ps-pulse laser source with free adjustable repetition rate and nJ pulse energy on microbench", Proc. SPIE, vol. 7953, S. 79531D (2011).
- [9] T. Schlauch, J.C. Balzer, M.R. Hofmann, A. Klehr, G. Erbert, G. Tränkle, "Passively mode-locked two section laser diode with intracavity dispersion control", Proc. SPIE, vol. 7937, no. 79370S (2011).
- [10] A. Klehr, A. Liero, T. Hoffmann, S. Schwertfeger, H. Wenzel, G. Erbert, W. Heinrich and G. Tränkle, "Compact 1064 nm ps-light source on a micro bench with free adjustable repetition rate and nJ pulse energy", European Conf. on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conf. (CLEO Europe - EQEC 2011), Munich, Germany, May 22-26, paper CB7.6-WED (2011).
- [11] D. Grosse, N. Koukourakis, N.C. Gerhardt, T. Schlauch, J.C. Balzer, A. Klehr, G. Erbert, G. Tränkle and M.R. Hofmann, "Colliding pulse mode-locked lasers as light sources for single-shot holography", Applications of Optics and Photonics (AOP) international conference, Braga, Portugal, May 3-7 (2011).
- [12] J.C. Balzer, T. Schlauch, Th. Hoffmann, A. Klehr, G. Erbert and M.R. Hofmann, "Modelocked semiconductor laser system with pulse picking for variable repetition rate", Electron. Lett., vol. 47, no. 25, pp. 1387-1388 (2011).
- [13] P.Z. Tronciu, S. Schwertfeger, M. Radziunas, A. Klehr, U. Bandelow, H. Wenzel, "Numerical simulation of the amplification of picosecond laser pulses in tapered semiconductor amplifiers and comparison with experimental results", Opt. Commun., vol. 285, no. 12, pp. 2897-2904 (2012).
- [14] H. Wenzel, A. Klehr, S. Schwertfeger, A. Liero, Th. Hoffmann, O. Brox, M. Thomas, G. Erbert, G. Tränkle, "Compact sources for the generation of high-peak power wavelength stabilized laser pulses in the picoseconds and nanoseconds ranges", Proc. SPIE, vol. 8241, no. 82410V (2012).
- [15] J.C. Balzer, T. Schlauch, A. Klehr, G. Erbert, M.R. Hofmann, "All semiconductor high power fs laser system with variable repetition rate", Proc. SPIE, vol. 8277, no. 827713 (2012).
- [16] A. Klehr, S. Schwertfeger, A. Liero, Th. Hoffmann, J. Fricke, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Tränkle, "Generation of picosecond pulses and optical frequency combs with multi-section 1065nm ridge waveguide diode lasers", Proc. SPIE, vol. 8277, no. 82770E (2012).
- [17] T. Ulm, F. Harth, A. Klehr, G. Erbert and J. Lhuillier, "Passively mode-locked 1 GHz MOPA system generating sub-500-fs pulses after external compression", Proc. SPIE, vol. 8432, no. 84320Y (2012).
- [18] F. Harth, T. Ulm, M. Lührmann, R. Knappe, A. Klehr, Th. Hoffmann, G. Erbert, and J. A. L'huillier, "High power laser pulses with voltage controlled durations of 400 – 1000 ps, Optics Express, Vol. 20, Issue 7, pp. 7002-7007 (2012)