

## **Abschlussbericht:**

### **1. Allgemeine Angaben**

**1.1 DFG Geschäftszeichen: KI 923/1-1/2**

**1.2 Antragsteller: Dr. Andreas Klehr**

**1.3 Ferdinand-Braun-Institut Für Höchtsfrequenztechnik**

**1.4 Dipl. Phys. Karl Heinz Hasler**

**(beschäftigt im Zeitraum 01.07.2000 – 30.6.2004)**

**1.5 Mehr-Sektions DBR-Laser mit einstellbarem sättigbarem Absorber zur Erzeugung kurzer Impulse mit hoher Leistung und geringem Chirp für die Frei – Raum Kommunikation**

**1.6 Berichtszeitraum: 15.4.2000 – 30.6.2004**

**1.7 Fachgebiet: Halbleiterlaserphysik**

**1.8 Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten und untersuchten Laser können eingesetzt werden zur Erzeugung von grüner Laserstrahlung durch Frequenzverdopplung, in der Laser-Displaytechnik und als schnelle Seed-Quellen für Festkörperlaser.**

**1.9 Humboldt-Uni**

## 2. Zusammenfassung

Im Berichtszeitraum wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen zur Erzeugung von kurzen optischen Impulsen hoher Ausgangsleistung mit 3-Sektions-DBR-Lasern durchgeführt. Die Arbeiten sollten sowohl einen Beitrag zum Verständnis des physikalischen Mechanismus der Erzeugung der Impulse als auch zur Entwicklung einer optimierten Impulsquelle hoher Ausgangsleistung und geringer Emissionsbreite dienen. Solche Impulsquellen können Anwendungen in der Satellitenkommunikation finden, als auch durch Frequenzverdopplung als Strahlquellen für die Laserprojektion bzw. im Laser TV eingesetzt werden.

Die entwickelten DBR-Laser bestehen aus einer Gewinn-Sektion, in der die Photonen erzeugt werden und zwei passiven Sektionen (der Phasen- und Gitter-Sektion). Durch Heizen des Gesamtlasers bzw. der passiven Sektionen allein, kann gezielt ein Absorber eingestellt werden, so dass selbst bei hoher Anregung der Gewinn-Sektion kein Lasern erreicht wird. Durch einen kurzen Stromimpuls geringer Amplitude durch die passive Phasen-Sektion wird die Absorption stark verringert und ein optischer Impuls hoher Leistung erzeugt.

Mit diesen 3-Sektions-DBR-Lasern gelang die stabile Erzeugung von ps-Pulsen im GHz-Bereich (0.5 – 5 GHz) bei einer Wellenlänge von 1060 nm. Die erzielte Spitzenleistung der optischen Pulse mit GHz Folgefrequenz lag bei 600 mW. Durch die im Laser integrierte Gitterstruktur wurde die Wellenlängenverschiebung während des Impulses (Chirp) auf 0.12 nm stark reduziert [1]. Zur Ansteuerung des DBR-Lasers wurden hochfrequente Ansteuer- und Oszillatorschaltungen konzipiert und realisiert.

Mit Traveling-Wave-Gleichungen und Trägerbilanzgleichungen konnte dieses Verhalten modelliert werden. Aus den theoretischen Untersuchungen ergab sich, dass zwischen zwei stabilen Bereichen „an“ und „aus“, zwischen denen geschaltet werden kann, auch ein Bereich von Selbstpulsationen auftritt. Theoretischen Untersuchungen zum Schaltverhalten zeigen, dass mit der entwickelten Laserstruktur Impulse mit einer Halbwertsbreite von ca. 35 ps bei einer Folgefrequenz bis 10 GHz erreicht werden können [2].

Zur weiteren Erhöhung der Pulsleistung wurde der 3-Sektionslaser mit einem Trapezverstärker über eine Linse gekoppelt (hybrider Aufbau). Es wurden verschiedene Aufbauvarianten realisiert, u.a. auch der gemeinsame Aufbau von DBR - Laser (**Master – Oszillator**) und Trapezverstärker (**Power Amplifier**) auf einer optischen Mikrobank, was viele Vorteile, insbesondere hinsichtlich der Montage, der Stabilität und der Wärmeabfuhr bietet.

Bei der Lichtverstärkung mit einem hybriden MOPA konnte im cw-Betrieb eine Ausgangsleistung von 2.5 W erreicht werden, was einer Verstärkung von 18 dB entspricht. Es wurde eine exzellente Strahlqualität von  $M^2 < 2$  bis 1.8 W Ausgangsleistung erzielt. Im Pulsbetrieb konnte eine Pulsspitzenleistung von ca. 12 W bei einer Pulsfolgefrequenz von 1.3 GHz realisiert werden [3].

Bei einem Aufbau des MOPA auf einer Silizium-Mikrobank konnte eine cw – Ausgangsleistung im stabilen Einzelmodenbetrieb von 2 W erreicht werden, entsprechend einer Verstärkung von 16 dB. Im Pulsbetrieb konnte eine stabile Pulserzeugung und Verstärkung im GHz – Bereich nachgewiesen werden.

Beim Vergleich mit dem internationalen Forschungsstand kann festgestellt werden, dass keine annähernd vergleichbaren Ergebnisse bekannt sind.

Die erhaltenen Ergebnisse können auf andere Wellenlängen übertragen werden.

## **2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten**

Zur Erzeugung noch kürzerer optischer Pulse ist es denkbar, das sogenannte ‚Mode locking‘ auszunutzen. Mit entsprechenden theoretischen Untersuchungen wurde bereits begonnen [4]. Die Realisierung entsprechender monolithischer Strukturen im FBH ist vorgesehen.

## **3.1 Ausgangslage**

In dem Forschungsvorhaben sollten sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen zur Realisierung von Hochleistungs-DBR Lasern zur Erzeugung von kurzen optischen Impulsen hoher Ausgangsleistung durchgeführt werden. Dabei sollte durch kontrollierte Änderung eines sättigbaren Absorbers mittels Temperaturänderung in einem Teil des Lasers, die Energie der Ausgangsimpulse gezielt eingestellt werden können. Durch das im Laserresonator vorhandene Gitter kann die Wellenlängenverstimmung der Emission (Chirp) minimiert werden. Zur Optimierung des im Laser vorhandenen Absorbers sollte sowohl eine Variation der Schichtstruktur in der Epitaxie als auch des Laserdesigns erfolgen. Das Ziel des Vorhabens besteht darin, DBR-Laserdioden zu entwickeln, mit denen kurze optische Impulse hoher Energie mit geringem Chirp bei einer Wellenlänge von 1064nm erzeugt werden können. Die Modulierbarkeit soll im GHz Bereich liegen.

Im ersten Projektabschnitt sollte durch Modellbildung und einer theoretische Beschreibung von Mehrsektions-DBR-Lasern mit variablen sättigbaren physikalischer Grenzen der Impulserzeugung die in Abhängigkeit von Bauelementparametern (unterschiedlichen Breiten der aktiven Zone, der Wellenleiterschichten des Gitterdesigns und der Facettenentspiegelung) geklärt werden. Im Projekt sollte eine Optimierung dieser Parameter erfolgen.

Parallel zu diesen theoretischen Untersuchungen sollte die Herstellung von Mehrsektions-DBR-Laserdioden erfolgen. Dabei sollte durch Variation der Strukturparameter und des Layouts eine Optimierung der Laserstruktur bezüglich hoher Ausgangsimpulse mit geringem Chirp und hoher Modulierbarkeit erreicht werden

Im zweiten Projektabschnitt sollen sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen zur Realisierung hybrid-gekoppelten Hochleistungs-DBR Lasern mit Trapezverstärkern zur Erzeugung von kurzen optischen Impulsen sehr hoher Ausgangsleistung bis 10W (mittlere Leistung bis 1W) durchgeführt werden. Basierend auf den entwickelten und optimierten DBR-Lasern aus dem 1. Projektabschnitt soll die Kopplung zwischen Laser und Verstärker und das Kurzzeitverhalten dieser Anordnung unter starker Anregung bis in den GHz-Bereich untersucht werden.

Für eine Modulation im GHz-Bereich sollen spezielle HF- Ansteuerschaltungen und HF-Oszillatoren bis 5GHz entwickelt, realisiert und an die Laser-Verstärker-Anordnung hybrid gekoppelt werden.

## **3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten**

Die Arbeiten sollen in folgenden Schwerpunkten erfolgen:

1. Modellbildung zur theoretischen Beschreibung der Funktionsweise von Mehrsektions-DBR-Lasern mit variablen sättigbaren Absorbern und unterschiedlichen Breiten der aktiven Zone, der Wellenleiterschichten und des Gitterdesigns zur Klärung physikalischer Grenzen der Impulserzeugung.

2. Realisierung von Schichtstrukturen für Mehrsektions-DBR-Laserdioden. Einbringen von Gittern 1. Und 2. Ordnung durch holographisches Belichten und selektives Ätzen in den 2. Wellenleiter. Realisierung von integrierten Widerständen zur thermischen Aufheizung der passiven Teile der Laserdiode (Phasen-, Gitter-Sektion).
3. Variation der Strukturparameter und des Layouts der Laser. Gezielte Einstellung von Gitterparametern (Koppelkoeffizient, Gitter 1. Und 2. Ordnung) zur Realisierung unterschiedlicher Rückkopplung. Untersuchung des Einflusses dieser Parameter auf das Emissionsverhalten der hergestellten Laser.
4. Entwicklung und Realisierung von speziellen HF- Ansteuerschaltungen und HF-Oszillatoren bis 5GHz. Untersuchung der HF-Eigenschaften dieser Schaltungen (Schwingverhalten, Rauschen, ect.) zum Erreichen eines stabilen Betriebs.
5. Charakterisierung der Impulseigenschaften und Optimierung der Laserstruktur bezüglich hoher Ausgangsimpulse mit geringem Chirp und hoher Modulierbarkeit

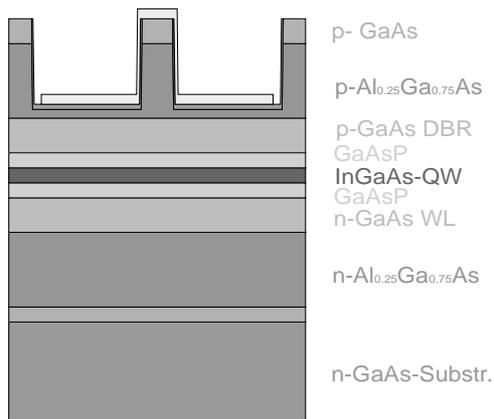
Um die Spitzenleistung der optischen Impulse weiter zu erhöhen, sollte in der 2. Projekthälfte dieser 3–Sektionslaser als Master Oszillator (MO) mit einem Trapezverstärker als Power Amplifier (PA) über eine Linse gekoppelt werden (hybrider Aufbau). Eine Spitzenleistungen von > 10 W bei einer Folgefrequenz im GHz-Bereich wurde angestrebt.

6. Mittels MOCVD-Epitaxie sollen Trapezverstärker hergestellt werden. Die Untersuchungen an diesen Elementen sollen sowohl zur Optimierung der vertikalen Struktur (Verbesserung der Strahlcharakteristik) als auch des Verstärkerverhaltens in der longitudinalen Richtung (Breite des Einkoppelwellenleiters, Winkelabhängigkeit des Trapezteils) zum Erreichen einer hohen Verstärkung führen.
7. Kopplung der entwickelten Laserstrukturen mit Verstärkern (hybride MOPA) zur Realisierung kurzer optischer Impulse mit Modulationsfrequenzen im GHz Bereich mit Spitzenausgangsleistungen > 10W und mittleren Leistungen bis 1W. Untersuchungen zur Dynamik dieser Systeme

### 3.3. Darstellung der erzielten Ergebnisse

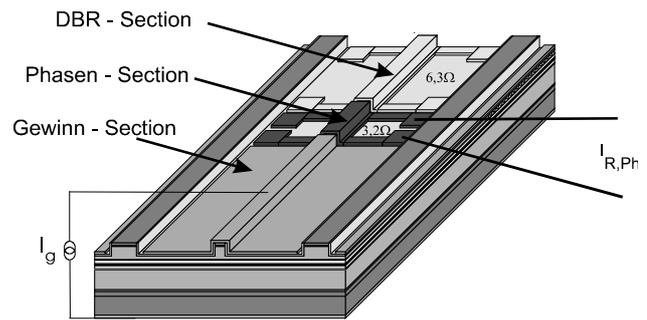
#### 3. Vertikalstruktur und Strukturierung des DBR-Lasers

In Abb.1a ist die vertikale Schichtstruktur des DBR-Lasers dargestellt. Die aktive Schicht ist ein InGaAs-QW der in GaAs Wellenleiterschichten und AlGaAs Mantelschichten eingebettet ist. Aus dieser Struktur wurde der in Abb.1b dargestellte 3–Sektions–DBR–Laser prozessiert. Bei den realisierten Lasern waren die Längen der Gewinnsektion  $L_g$ , der passiven Phasen-  $L_{Ph}$  und der Gittersektion  $L_{DBR}$  1000  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  und 700  $\mu\text{m}$ . Oberhalb der passiven Sektionen wurden Widerstände ( $R_{Ph}$ ,  $R_{DBR}$ ) aufgebracht. Wird ein Strom durch diese Widerstände geschickt, ist eine selektive Heizung der Phasen- und DBR-Sektion möglich. Dadurch kann die Absorption dieser Bereiche gezielt eingestellt werden. Da die aktive Zone sich über das gesamte Bauelement erstreckt, können alle drei Sektionen getrennt mit elektrischen Strömen  $I_g$ ,  $I_{Ph}$  und  $I_{DBR}$  angeregt werden. Durch Variation von  $I_{Ph}$  und  $I_{DBR}$  kann die Absorption sehr schnell variiert werden. Einzelheiten zu diesem Verhalten sind [1] und [3] dargestellt.



a)

Abb. 1: a) Vertikalstruktur



b)

b) DBR-Laser mit Gewinn-, Phasen- und Gittersektion

#### 4. Theorie, Modellierung und Simulation

Experimentell zeigte sich, dass durch Heizen der passiven Teile des DBR-Lasers (insbesondere der Phasensektion) über die Widerstände  $R_{Ph}$  und  $R_{DBR}$  (s. Abb. 1b) die Ausgangsleistung abrupt ausgeschaltet, bzw. durch Verringerung der Heizung wieder angeschaltet werden kann [1]. Das beobachtete Verhalten wurde theoretisch durch Berechnung des Imaginärteils der dielektrischen Funktion  $\epsilon$  des QWs in der aktiven Gewinnsektion und in der passiven Phasensektion untersucht. Einzelheiten sind im Zwischenbericht und in der Publikation [2] zu finden.

Durch selektives Heizen der Phasensektion verschiebt sich die Absorptionskante zu längeren Wellenlängen, wodurch die Absorption erhöht und der Laser ausgeschaltet wird. Durch Ladungsträgerinjektion infolge eines Stromimpulses durch den pn-Übergang wird die Absorption wieder verringert und ein kurzer Lichtimpuls wird generiert. Vorteil des 3-Sektions-DBR-Lasers im Vergleich zu einem 2-Sektions-Fabry-Perot-Laser ist es, dass die Laserwellenlänge durch die Periode des DBR-Gitters fixiert ist.

Für eine Optimierung der Laserstruktur hinsichtlich hoher Leistung, geringer Halbwertsbreite, hoher Wiederholfrequenz der Pulse und geringem Chirp war es wichtig, die Verhältnisse im Laserinneren dynamisch zu simulieren. Da die Struktur in longitudinaler (z-) Richtung variiert, werden zeit- und z-abhängige Gleichungen für die optischen Felder, die sogenannten Travelling Wave Gleichungen (TWE) verwendet. Zusätzlich wird noch eine Bilanzgleichung für die Ladungsträger, die über die optische Leistung mit den TWE-Gleichungen gekoppelt ist, benutzt. Diese gekoppelten Differentialgleichungen werden für alle Sektionen des Lasers mittels des am WIAS und der HU-Berlin entwickelten LDSL – Programms (**L**ongitudinal **D**ynamics in **S**emiconductor **L**asers [5]) unter Berücksichtigung der Gain – Dispersion numerisch gelöst [2]. Die Temperaturerhöhung (Heizen der Phasen-Sektion) wird dabei durch eine Veränderung (Erhöhung) der Gewinnparameter Transparenzdichte  $N_{tr}$  und modaler differentieller Gewinn  $g_{diff}$  simuliert. Einzelheiten und die verwendeten Parameter sind in [2] zu finden.

##### 4.1 Stationäres Verhalten

Zunächst wurde das Ein- und Ausschalten des Lasers simuliert, dann wurden die  $P-I_g$  Kennlinien im ungeheizten und geheizten Zustand berechnet, siehe [2]. Die berechneten Kennli-

nien entsprechen weitgehend den experimentell gemessenen Kennlinien. Es treten, wie im Experiment, Hystereseeffekte auf, die sich mit Erhöhung der Temperatur verstärken. Für eine Zuordnung der Heizparameter zu den verschiedenen Betriebszuständen wurden Stabilitätsdiagramme erstellt.

Neben den Bereichen „stabil an“ und „stabil aus“ wurde ein Parameterbereich gefunden in dem stabile Selbstpulsationen (SPs) hoher Frequenzkonstanz auftreten. Die Frequenz dieser Selbstpulsationen liegt im GHz-Bereich und verringert sich mit zunehmender Temperatur der Phasen-Sektion, was auch experimentell nachgewiesen werden konnte. Beispiele für derartige Stabilitätsdiagramme sind in [2] zu finden.

## **4.2 Dynamisches Verhalten**

Zum Verständnis der Entstehung derartiger Selbstpulsationen ist es notwendig, die zeitlichen und axialen Verläufe der Trägerdichten und optischen Felder in den einzelnen Sektionen zu analysieren. Die mittlere Trägerdichte in der Gewinn-Sektion erreicht eine Sättigung und fällt dann bedingt durch zunehmende (stimulierte) Rekombination wieder ab. In der Phasen-Sektion erhöht sich die Trägerdichte durch Absorption von in der Gewinn-Sektion erzeugter Strahlung zunächst langsam, dann sprunghaft bis zur Transparenzdichte. Da durch die Interband-Absorption von Photonen die Überschussladungsträger zunächst in den der Gewinnsektion benachbarten Gebieten generiert werden, kommt es zur Ausbildung einer „Transparenz-Front“, die sich durch die Phasen-Sektion bewegt. Ist die Transparenzdichte in der gesamten Phasen-Sektion erreicht, wird der Laserpuls generiert. Eine ausführliche Darstellung mit den entsprechenden Abbildungen ist im Zwischenbericht und vor allem in der Publikation [2] zu finden.

## **4.3 Stromimpulsansteuerung**

Der Mechanismus der Entstehung von Selbstpulsationen spielt auch im Fall gesteuerter Pulse, d.h. der Erzeugung von optischen Impulsen durch eine hochfrequente Stromimpulsanregung durch die Phasen-Sektion bis zu Frequenzen von 3 GHz, eine wesentliche Rolle. Durch den Stromimpuls erhöht sich die Trägerdichte zusätzlich und ein Lichtpuls wird hierdurch „getriggert“. Mit zunehmender Frequenz wird die Erhöhung der Trägerdichte in der Phasensektion bis zur Transparenzdichte durch den injizierten Phasenstrom immer wichtiger, um dann bei hohen Frequenzen (>5 GHz) zu dominieren. Die Trägerdichteerhöhung durch den Phasenstrom erfolgt dabei im Gegensatz zur Erhöhung durch Lichtabsorption longitudinal homogen.

Für eine stabile Pulsfolge ist die gezielte Einstellung der Absorption über die Temperatur und die Amplitude sowie die Dauer der Stromimpulse von Bedeutung. Die Form der Stromimpulse (Sinus- oder Rechteck-Impulse) spielt dagegen eine untergeordnete Rolle. Abb. 2a zeigt einen Stromimpuls durch die Phasen-Sektion bei 3 GHz und den erzeugten Lichtpuls.

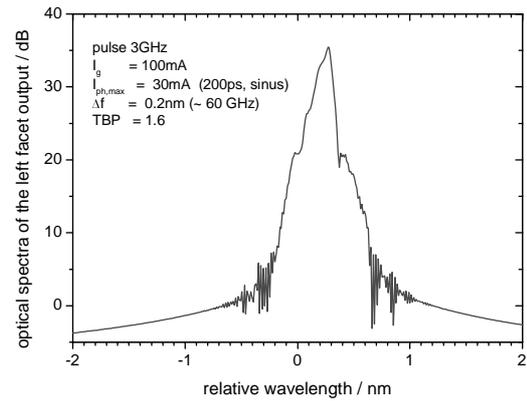
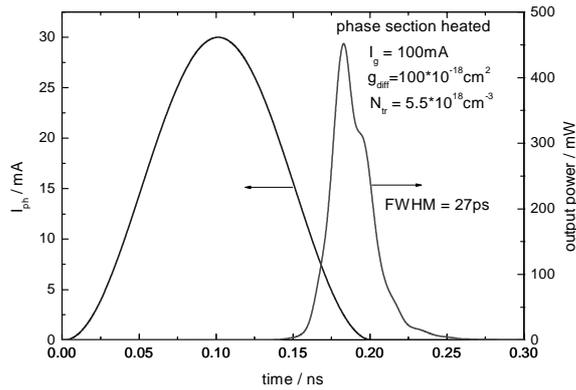


Abb. 2: a) Lichtpuls und Phasenstromimpuls bei 3GHz Folgefrequenz

b) Spektrum des Pulses

Die Verzögerung des Lichtpulses gegen den Stromimpuls ist indirekt proportional zu den Strömen durch die Gewinn- und Phasen-Sektion sowie zur Modulationsfrequenz und liegt zwischen 50p s und 200 ps. Bei einem Strom durch die Gewinnsektion von 100 mA liegt die Pulsspitzenleistung bei 450 mW und die Pulsenergie beträgt 13.4 pJ. Die Halbwertsbreite des optischen Pulses ist 27 ps.

Abb. 2b zeigt das optische Spektrum des Pulses. Die spektrale Breite des optischen Pulses ist wegen des Bragg-Gitters sehr gering und beträgt 0,2 nm, was etwa 60 GHz entspricht. Das resultierende Zeit-Bandbreite-Produkt ist 1.6.

Die maximal erreichbaren Pulsenergien bei der realisierten Struktur liegen bei ca. 25 pJ. Das ist zurückzuführen auf eine Sättigung der Trägerdichte in der hochgepumpten Gewinn-Sektion. Der benötigte Strom ist abhängig von der Folgefrequenz. Mit zunehmender Frequenz sättigt erst ein höherer Strom, da nur kürzere Zeit zum Pumpen zur Verfügung steht.

Ein Beispiel für das Potential der Struktur zeigt Abb. 3. Bei einem Anregungsstrom von 300 mA durch die Gewinn-Sektion und einem sinusförmigen Phasenstromimpuls mit einer maximalen Stromstärke von 200 mA sind bei 10 GHz Folgefrequenz Pulsspitzenleistungen von über 350 mW bei Pulsbreiten von unter 35 ps zu erreichen. Der Wert von 10 GHz ist für die untersuchte Struktur der obere Grenzwert. Oberhalb dieses Wertes lassen sich keine stabilen Impulse mehr berechnen.

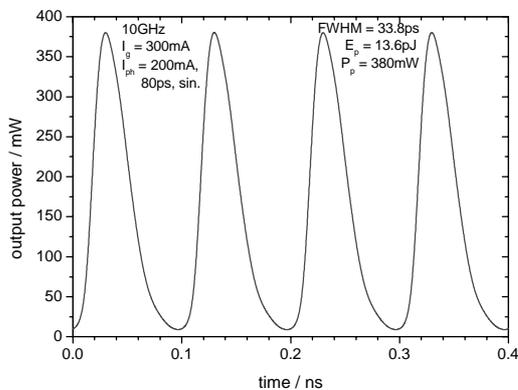


Abb. 3: Berechnete optische Impulse bei einer Modulationsfrequenz von 10 GHz

#### 4.4 Untersuchung zum Einfluss von Bauelementeparametern

Es wurde systematisch die Abhängigkeit der Pulsparameter (Pulsleistung, Pulsbreite, Pulsenergie) von den Bauelementeparametern, insbesondere von den Längen der Einzelsektionen zur Optimierung der Struktur modelliert.

Dabei zeigte sich, dass eine Kürzung der DBR-Sektion von 700  $\mu\text{m}$  auf 500  $\mu\text{m}$  keinen Einfluss auf die Pulseigenschaften hat (bei angenommenen Koppelkoeffizienten des Bragg - Gitters von 25 – 70  $\text{cm}^{-1}$ ).

Bei der Variation der Länge der Phasensektion  $L_{\text{ph}}$  bei einer Pulsfolgefrequenz von 5 GHz (Abb. 4a und b) ergab sich, dass mit kürzer werdender Phasensektion die Pulsspitzenleistung zunächst anwächst und die Pulsbreite sich entsprechend verringert. Für kleinere Längen der Phasensektion als  $L_{\text{ph}} = 150 \mu\text{m}$  sättigen beide Parameter.

Die Pulsenergien nehmen mit abnehmender Länge der Phasensektion bis 200  $\mu\text{m}$  zu. Für  $L_{\text{ph}} < 100 \mu\text{m}$  und  $L_{\text{ph}} > 500 \mu\text{m}$  führt die Simulation zu keinen stabilen Impulsen.

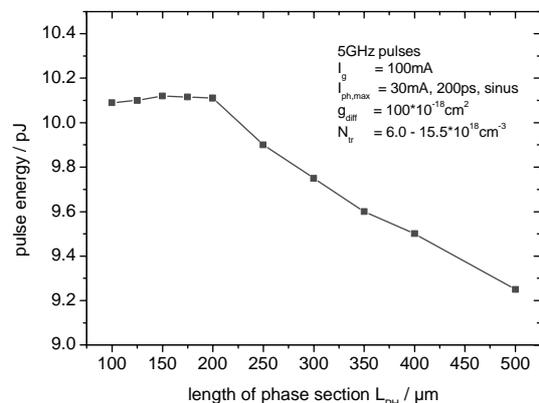
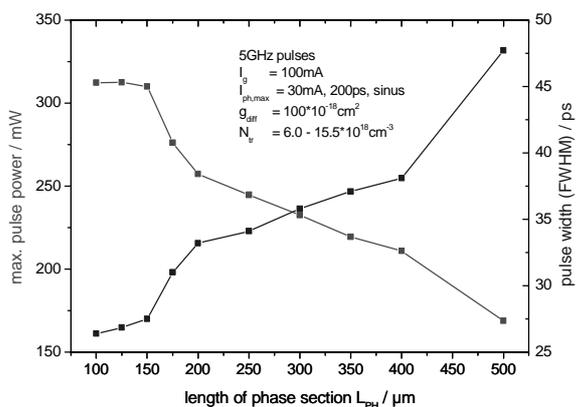


Abb. 4a Pulsspitzenleistung und Pulsbreite als Funktion der Länge der Phasen-Sektion bei 5 GHz Folgefrequenz

Abb.4b Pulsenergie als Funktion der Länge der Phasen-Sektion

Mit kürzer werdender Phasen-Sektion muss die Transparenzdichte (Absorption) durch zusätzliche Heizung erhöht werden, um einen stabilen Pulsbetrieb zu erreichen. Experimentell zeigte sich, dass bei Längen der Phasensektion von  $< 250 \mu\text{m}$  kein stabiler Pulsbetrieb mehr erreicht werden konnte, weil die dazu notwendige Absorption nicht mehr realisiert wurde. Mit zunehmender Länge der Gewinn-Sektion nimmt die Impulsenergie aber auch die Impulsbreite zu. Für Längen der Gewinn-Sektion  $> 1200 \mu\text{m}$  findet man eine Sättigung der Impulsbreite und für Längen der Gewinn-Sektion  $> 1800 \mu\text{m}$  findet man eine Sättigung der Pulsenergie.

Weiterhin wurde systematisch der Einfluss des Reflexionskoeffizienten der Frontfacette auf die Pulsleistung, Pulsenergie und Pulsbreite simuliert (Abb. 5).

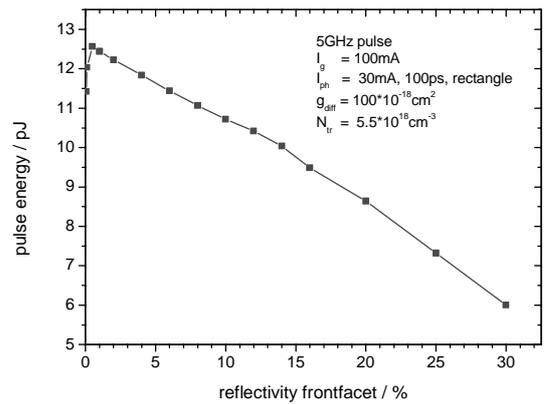
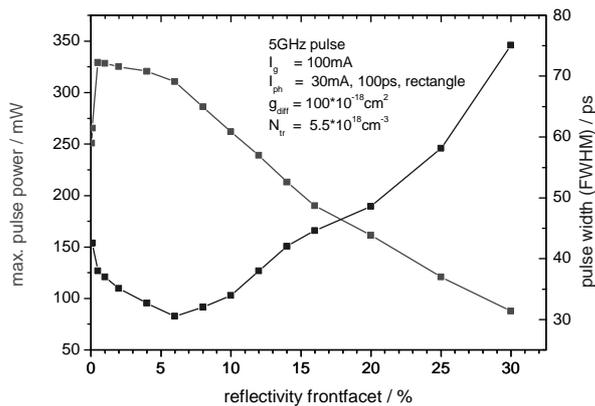


Abb. 5: a) Pulsspitzenleistung und Pulsbreite als Funktion der Länge des Reflexionskoeffizienten der Frontfacette bei 5 GHz Folgefrequenz

5b) Pulsenergie als Funktion der Länge des Reflexionskoeffizienten der Frontfacette bei 5 GHz

Aus den theoretischen Untersuchungen ergibt sich, dass die erreichbare Pulsspitzenleistung mit zunehmender Entspiegelung der Frontfacette größer wird und bei einer Reflexion von 1-4 % (je nach Folgefrequenz) ein Maximum erreicht. Bei noch kleineren Werten werden die Pulse instabil. Die Pulsbreite (FWHM) hat bei einem Reflexionskoeffizienten von ca. 4–5 % ein Minimum. Die erreichbare Pulsenergie nimmt mit abnehmenden Reflexionskoeffizienten der Fronfacette bis 1 % linear zu.

Abb. 6 zeigt die Abhängigkeit der Pulsparameter vom Koppelkoeffizienten des Bragg-Gitters.

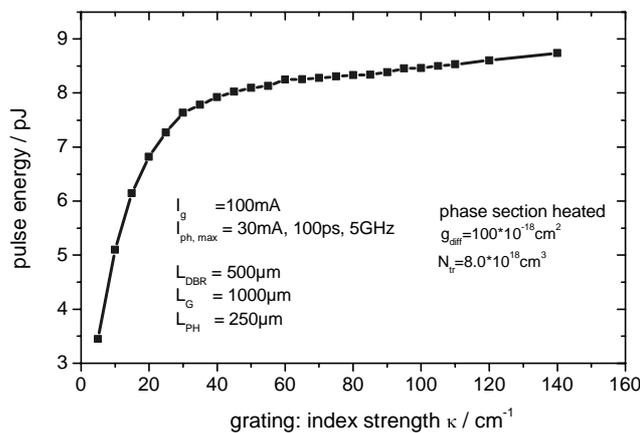


Abb. 6: Abhängigkeit der Impulsenergie vom Koppelkoeffizienten des Bragg – Gitters bei 5 GHz

Ab einem Wert des Koppelkoeffizienten von  $40 \text{cm}^{-1}$  beginnt die Pulsenergie zu sättigen. Bei einer Länge der DBR–Sektion von  $500 \mu\text{m}$  werden bereits bei einem Koppelkoeffizienten von  $40 \text{cm}^{-1}$  ca. 90 % der maximalen Pulsenergie erreicht.

Aus den theoretischen Untersuchungen zur Optimierung der axialen Struktur ergeben sich folgende Erkenntnisse:

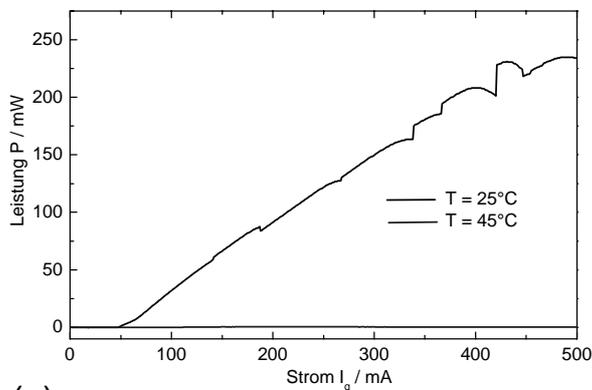
- Verringerung der Länge der Phasen-Sektion bis auf  $150 \mu\text{m}$  (soweit wie die (dann notwendige) Heizung noch realisiert werden kann ( $200 - 300 \mu\text{m}$ )).

- Eine Verringerung der Länge der Gewinn-Sektion bis 500  $\mu\text{m}$  führt zum Erreichen einer besseren Effizienz, insbesondere bei hohen Frequenzen  $\geq 5$  GHz. Zum Erreichen einer maximale Pulsenergie sollte die Länge von  $L_g$  auf 2000  $\mu\text{m}$  vergrößert werden, insbesondere bei Frequenzen  $< 2$  GHz
- Die Reflexion der Fronfacette sollte zwischen 1 % und 5 % betragen.
- Eine Koppelkonstante des Bragg-Gitters von  $40 \text{ cm}^{-1}$  ist ausreichend.
- Die DBR – Sektion kann von 700  $\mu\text{m}$  auf 500  $\mu\text{m}$  reduziert werden.

## 5. Experimentelle Ergebnisse

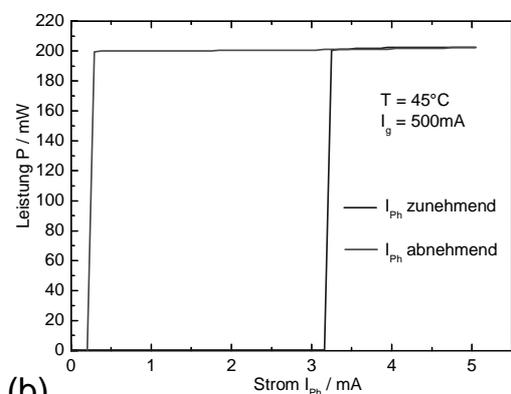
### 5.1 Eigenschaften unter Gleichstromanregung

Typische Leistungs-Gleichstrom-Kennlinien der DBR-Laser bei 25 °C und 45 °C zeigt Abb. 7a. Bei 25 °C hat der DBR-Laser einen Schwellenstrom von ca. 25 mA und erreicht bei einem Anregungsstrom von 500 mA durch die Gewinn-Sektion eine Ausgangsleistung von 235 mW. Die Phasen- und DBR-Sektionen wurden nicht gepumpt. Bei Erhöhung der Sockeltemperatur auf 45 °C wurde im gesamten Strombereich nur noch Lumineszenzstrahlung beobachtet, was auf eine Erhöhung der Absorption der passiven Gebiete zurückzuführen ist (siehe Kap. 2). Zur Untersuchung des Schaltverhaltens wurde der Laser auf 45 °C aufgeheizt und  $I_g$  auf 500 mA eingestellt. Dann wurde die Phasen-Sektion mit einem Gleichstrom  $I_{Ph}$  angesteuert (Abb. 7b). Bei kleinem  $I_{Ph}$  erkennt man nur Lumineszenzstrahlung. Wird  $I_{Ph}$  erhöht (blaue Kurve), beobachtet man das Anschalten der Laser auf 200 mW bei  $I_{Ph} = 3.2$  mA. Oberhalb dieses Stromes bleibt die Ausgangsleistung nahezu konstant. Bei Verringerung des Phasenstromes (rote Kurve) erkennt man ein Zurückschalten in den Lumineszenzbereich bei  $I_{Ph} = 0,3$  mA.



(a)

Abb.7a Leistungs-Strom Kennlinien bei 25 °C (geringe Absorption der passiven Bereiche) und bei 45 °C (starke Absorption)



(b)

7b Schaltverhalten bei Ansteuerung der Phasen-Sektion mit Gleichstrom

Diese Untersuchungen beweisen, dass mit sehr geringen Strömen durch die Phasensektion hohe optische Leistungen geschaltet werden können.

### 5.2 Dynamische Eigenschaften

Im Folgenden werden Ergebnisse unter Hochfrequenzmodulation der Phasen-Sektion vorgestellt.

Für die HF-Untersuchungen wurden Hochfrequenzansteuerungen für die DBR-Laser entwickelt und realisiert. Abb. 8 zeigt eine HF Ansteuerplatine mit integrierter Laserdiode.

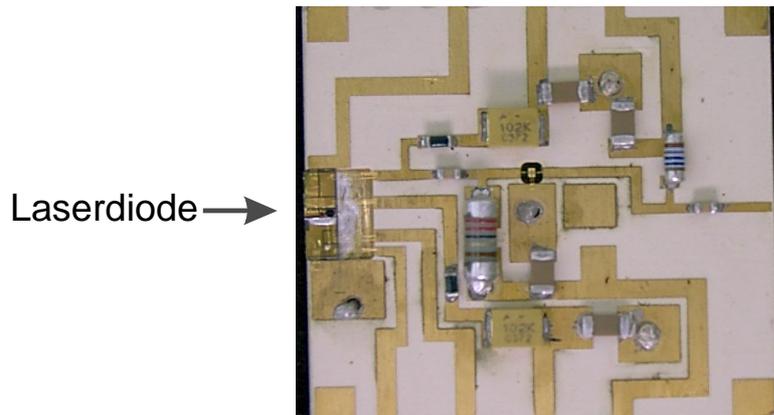


Abb. 8 aufgebaute Gesamtschaltung zur Ansteuerung des DBR – Lasers mit kurzen Stromimpulsen bis zu einer Modulationsfrequenz von 5 GHz

Abb. 9 zeigt HF-Untersuchungen im Frequenzbereich 1 GHz – 2 GHz. Dabei zeigt Abb. 9a die gemessenen optischen Impulse und Abb. 9b die zugehörigen mittleren Spektralverteilungen (Chirp).

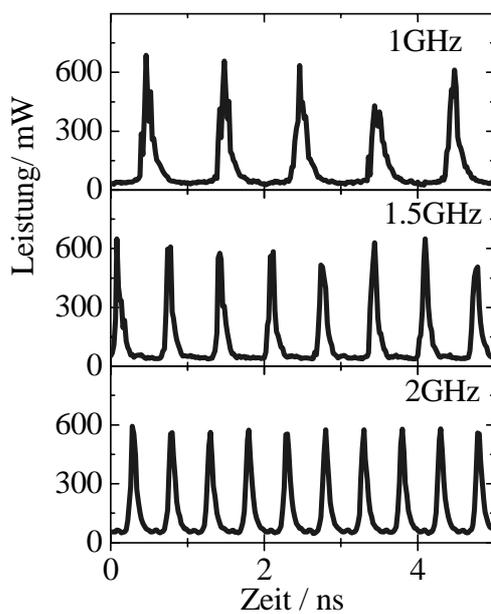


Abb.9a Erzeugung von optischen Impulsen im Frequenzbereich von 1 GHz - 2GHz

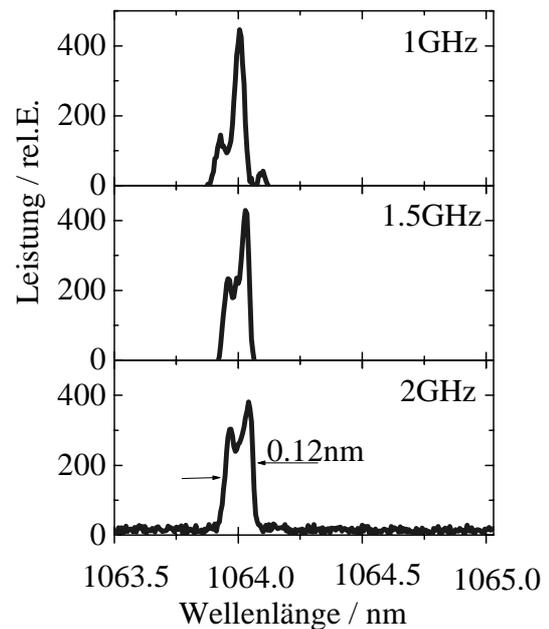


Abb. 9b spektrale Verteilungen (Chirp) bei GHz Modulation

Aus Abb. 9a wird deutlich, dass der DBR-Laser stabil über den Phasenstrom bis zu Frequenzen von 2000 MHz moduliert werden kann. Mit Erhöhung der Modulationsfrequenz bis 2 GHz ändert sich die Impulsspitzenleistung nicht. Aus den Messungen der mittleren spektralen Verteilung (Abb. 9b) wird deutlich, dass das in der DBR-Sektion integrierte Gitter die spektrale Verteilung der emittierten Strahlung während des Impulses stark einengt. Während bei Lasern ohne Gitter spektrale Breiten von  $> 2$  nm gemessen wurden, konnten in den untersuchten DBR-Lasern ein Chirp von nur  $\sim 0.12$  nm bei 2 GHz Modulationsfrequenz bestimmt werden. Durch eine weitere Verbesserung der HF-Ansteuerschaltung und Anpassung konnten Modulationsfrequenzen bis ca. 5GHz erreicht werden. Abb.10 zeigt die Erzeugung optischer Impulse bei 4,5 GHz Folgefrequenz.

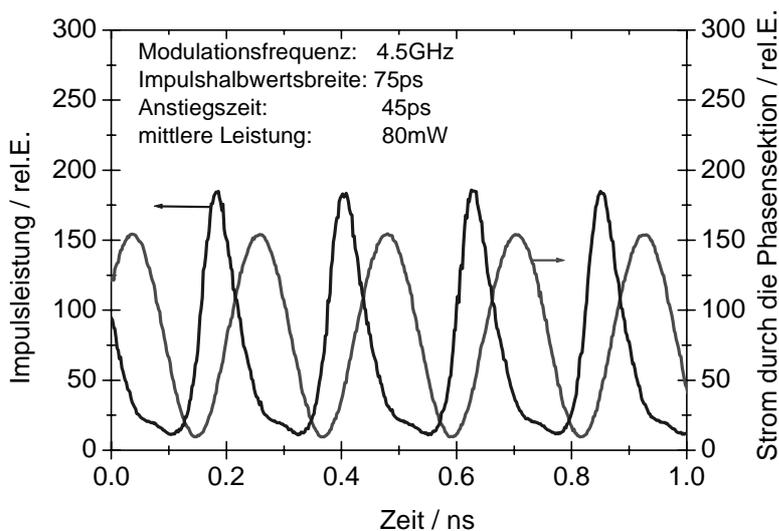


Abb.10 optische Impulse bei 4,5 GHz (blau) und die Modulations-Stromimpulse durch die Phasensektion

Die Anstiegszeit der optischen Impulse betrug 45 ps, die gemessene Halbwertsbreite 75ps. Die mittlere Ausgangsleistung wurde zu 80mW bestimmt. Der elektrische Impulsstrom durch die Phasen-Sektion musste mit Erhöhung der Folgefrequenz zur Erreichung stabiler Impulse erhöht werden. Für 4,5 GHz betrug die Maximalamplitude 150 mA.

Bei diesen Untersuchungen zeigte sich, dass die Impulsspitzenleistung im GHz-Bereich bei solitären DBR-Lasern nicht über 600 mW erhöht werden kann. Zur Erzielung höherer Impulsleistungen wurde die Kopplung der DBR-Laser mit optischen Verstärkern untersucht.

## 6. Aufbau von hybriden Anordnungen DBR-Laser-Trapezverstärker (MOPA's)

### 6.1 DBR-Laser und Trapezverstärker auf getrennten Wärmesenken

Durch eine hybride Kopplung von DBR-Lasern als Master Oszillator (MO) mit Trapezverstärkern als Power Amplifier (PA) wurde untersucht, ob die Leistung der optischen Impulse wesentlich erhöht werden kann. Ein Schema des verwendeten Trapezverstärkers und ein Ausschnitt der Laserstruktur sind in Abb. 11 dargestellt.

Die aktive Zone besteht aus einem InGaAs QW mit einer Dicke von 10 nm. Sie ist eingebettet in n- und p- AlGaAs Wellenleiter von 500 nm Dicke und 1400 nm Dicke AlGaAs Mantelschichten. Die Länge der verwendeten Trapezverstärker betrug 4000  $\mu\text{m}$  mit einem Einkoppel- RW Teil von 500  $\mu\text{m}$  und einem Trapezteil von 3500  $\mu\text{m}$ . Zur Vermeidung von Rückreflexionen wurden die Front- und Rückfacetten auf  $R < 10^{-3}$  entspiegelt.

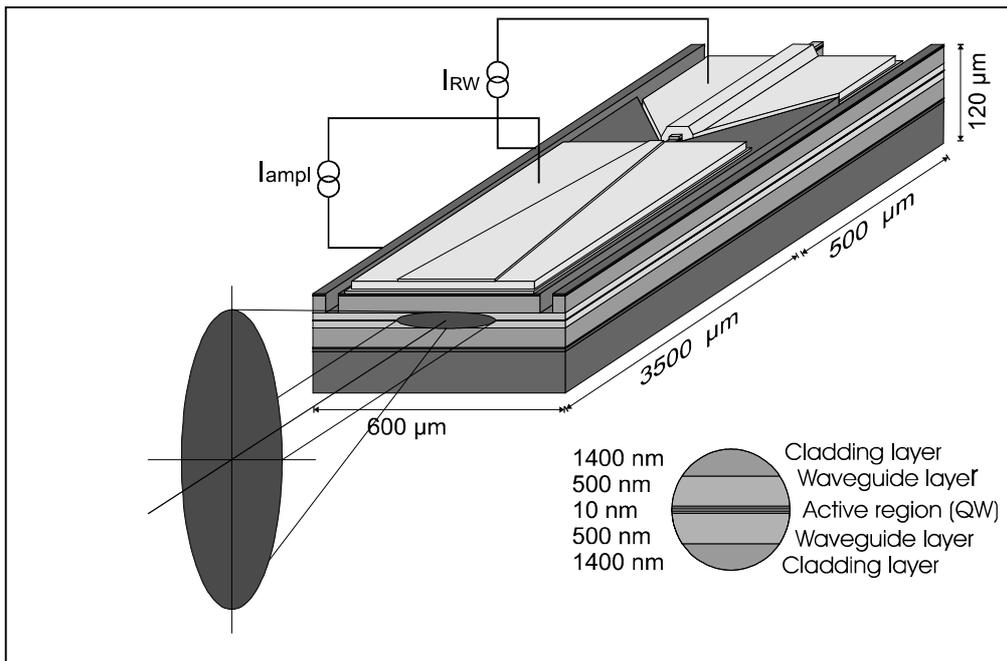


Abb. 11: Schema und Struktur des Trapezverstärkers:

Abb. 12 zeigt die hybride MOPA (**M**aster **O**scillator **P**ower **A**mplifier) – Anordnung.

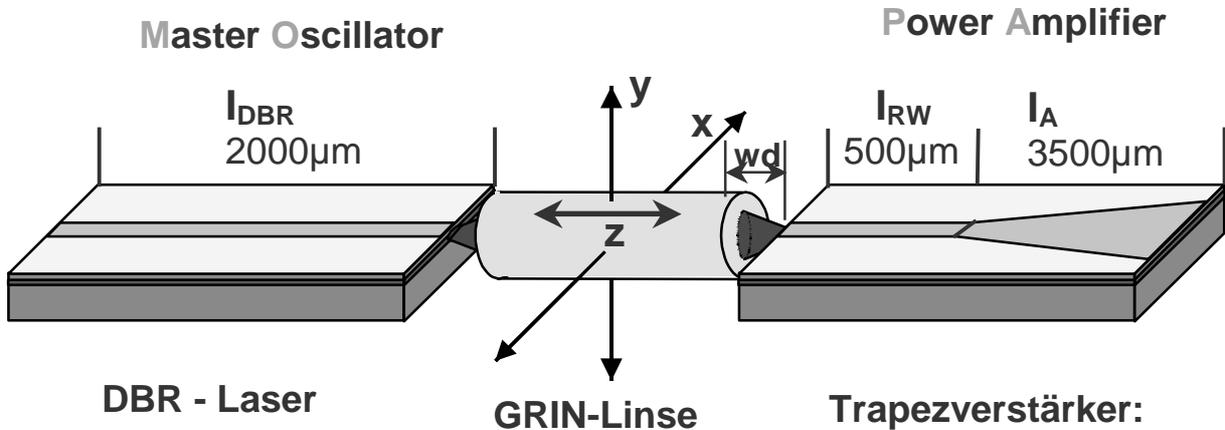


Abb. 12: Schema der hybriden MOPA – Anordnung

Eine genaue Beschreibung findet man in [3]. Der DBR-Laser und der Trapezverstärker wurden auf getrennten Wärmesenken zur besseren Temperaturstabilisierung aufgebaut. Um eine kompakte MOPA Anordnung zu erreichen wurde eine GRIN-Stablinse zur Kopplung verwendet und auf einen teuren optischen Isolator verzichtet. DBR Laser und Verstärker wurden p-up aufgebaut um die einzelnen Sektionen getrennt ansteuern zu können. Eine getrennte Ansteuerung von RW-Teil und Trapezteil bei Trapezverstärkern wurde bisher noch nicht beschrieben. Sie ermöglicht Untersuchungen zur Optimierung der Ansteuer- Stromparameter in einem weiten Bereich zum Erreichen einer maximalen Laserleistung.

Abb. 13 zeigt ein Leistungs-Gleichstrom Kennlinie am Ausgang des Trapezverstärkers. Die Leistung des Master-Oscillators betrug 43 mW (siehe Inset). Bei 4 A Verstärkerstrom konnte eine dc-Leistung von 2.5 W erzielt werden, was einer Verstärkung von 18 dB entspricht.

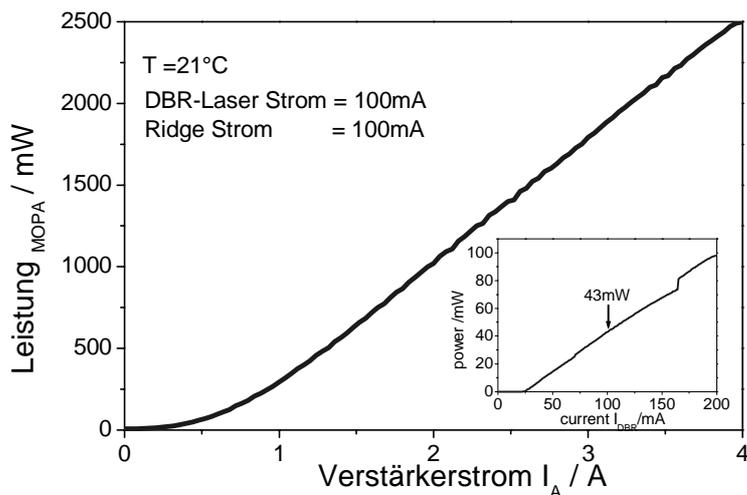


Abb. 13 P- $I_A$  Kennlinie am Trapezverstärkerausgang. Das Inset zeigt die P-I Kennlinie des verwendeten DBR-Lasers.

Das spektrale Verhalten der MOPA Anordnung ist in Abb. 14 gezeigt. Der RW-Teil des Trapezverstärkers wurde mit 200 mA und der Verstärkerteil mit 4 A angeregt, als Parameter wurde die Oszillatorleistung variiert. Bei ausgeschaltetem DBR Laser (0 mA) emittiert der Trapezverstärker in seinem Gainmaximum bei  $\sim 1052$  nm. Schon bei sehr kleiner eingekoppelter Leistung wird der Verstärker auf die Laserwellenlänge des Oszillators (1060 nm) ge-seedet. Bei Erhöhung der eingekoppelten DBR-Laser Leistung emittiert der MOPA stabil bei 1060 nm. Die gemessene Linienbreite des Systems war kleiner 3 pm, der Auflösungsgrenze des verwendeten Messsystems.

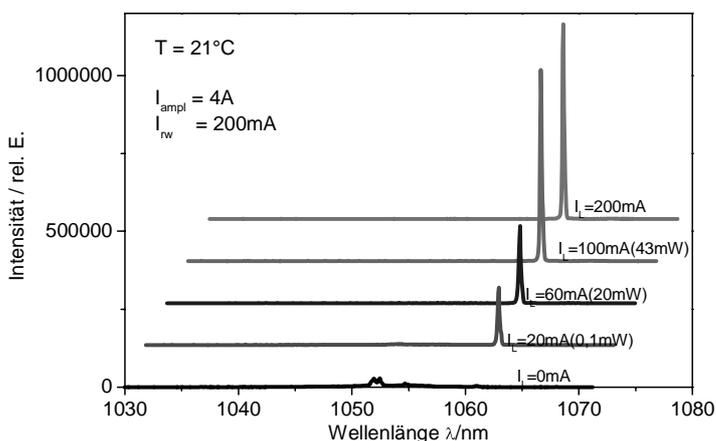


Abb. 14 Spektren am MOPA - Ausgang für unterschiedliche Oszillatorleistungen

Ein Hauptziel des Projektes war die Erzeugung von hohen Pulsleistungen bei GHz Modulation. Für diese Untersuchungen wurden mit dem DBR-Laser kurze Impulse bei Modulationsfrequenzen im GHz erzeugt (siehe Abschnitt 5.2) und diese Pulse in den Verstärker eingekoppelt und verstärkt. Ergebnisse dieser Untersuchungen bei einer Modulationsfrequenz von 1.3 GHz und Variation des Verstärkerstromes  $I_A$  von 0.4 A bis 2 A sind in Abb.15 dargestellt.

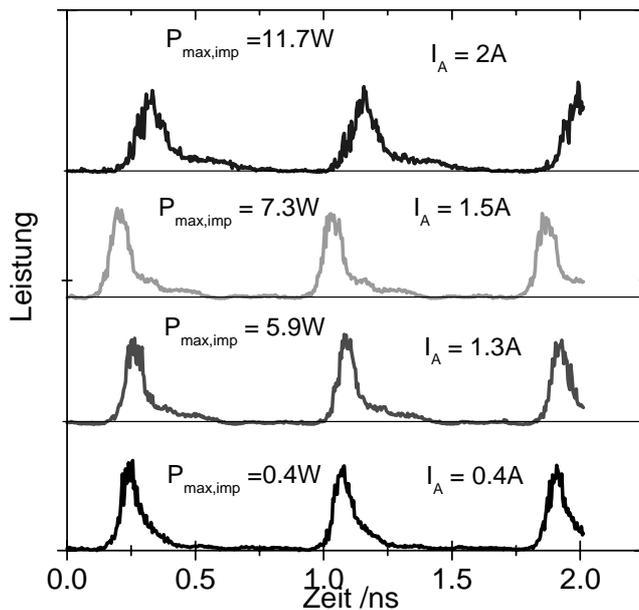


Abb15 Impulsspitzenleistung in Abhängigkeit vom Verstärkerstrom

Mit dieser Anordnung konnte eine Impulsspitzenleistung von 11.7 W bei  $I_A = 2$  A erreicht werden, was oberhalb der im Projekt angestrebten 10 W liegt. Eine weitere Erhöhung des Verstärkerstromes führte zur Verbreiterung der Pulse. Das spektrale Verhalten unter 1.3 GHz Modulation zeigt. Abb.16.

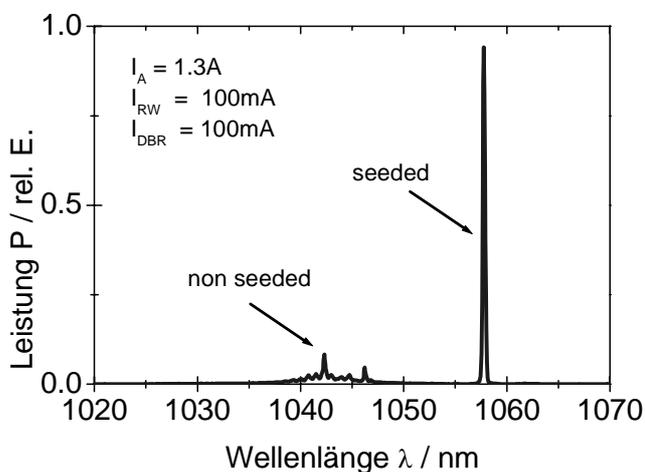


Abb. 16: Schaltverhalten zwischen Verstärkerspektrum und geseedeten Spektrum bei 1.3 GHz

In Abb. 16 sind die Spektren im Fall keiner Impulseinkopplung (nonseeded) und einer Impulseinkopplung (seeded) vom DBR Laser in den Verstärker dargestellt. Wird ein optischer Impuls in den Verstärker eingekoppelt, emittiert der Verstärker stabil bei der DBR-Wellenlänge, wohingegen im „nonseeded“ Fall die Emission im Gainmaximum des Verstärkers liegt. Diese Untersuchungen zeigen, dass sehr kurze Impulse (<100 ps) mit hoher Folgefrequenz (>1 GHz) mit Trapezverstärkern verstärkt werden können.

## 6.2 Aufbau von DBR-Laser und Trapezverstärker auf einer Wärmesenke (optische Mikrobank)

Für eine kommerzielle Anwendung muss die Kopplung von Masteroszillator und Trapezverstärker in einer kompakten Bauform realisiert werden. Im Projektzeitraum wurde eine optische Mikrobank hergestellt, bei der der DBR-Laser und der Trapezverstärker auf einen Si-Träger aufgebaut sind (siehe Abb.17). Die Kopplung erfolgt auch in diesem Aufbau mit einer GRIN-Stablinse.

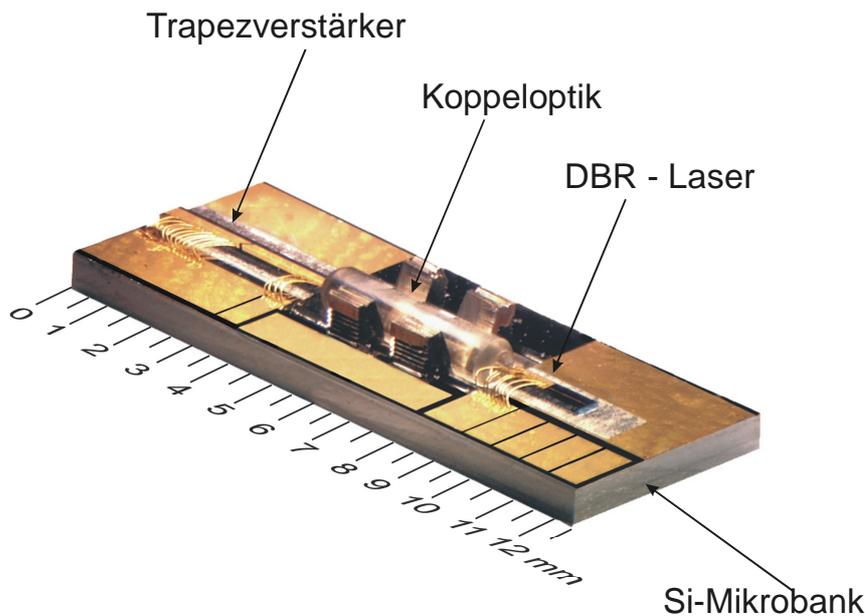


Abb.17: Hybrider MOPA auf einer Si-Mikrobank

Die gemessene dc-Leistungs-Strom Kennlinie des MOPA's auf der Mikrobank und die optischen Spektren bei 1 W und 2 W sind in Abb. 18 gezeigt.

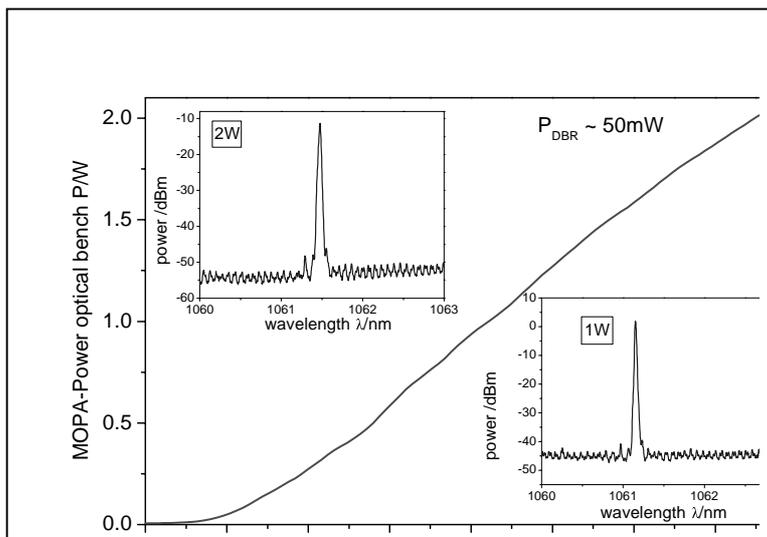


Abb. 18 dc-Leistungs-Strom Kennlinie des MOPA's auf der Mikrobank und die optischen Spektren bei 1 W und 2 W (Insets)

In dieser Anordnung konnte eine dc-Leistung von 2 W erreicht werden. Bei einer eingekoppelten Leistung von 50 mW des Masteroszillators entspricht das einer Verstärkung von 13 dB. Die Spektren bei 1 W und 2 W zeigen einen stabilen Einmodenbetrieb bei der seed-

Wellenlänge mit einer Seitenmodenunterdrückung von >40 dB. Erste dynamische Untersuchungen zur Impulserzeugung und Verstärkung mit der optischen Mikrobank sind in Abb.19 dargestellt. Bei einer Folgefrequenz von 1 GHz wurden stabile Impulse mit einer Halbwertsbreite von 80 ps generiert und verstärkt. Die abgeschätzte Impulsspitzenleistung lag bei 4.5 W.

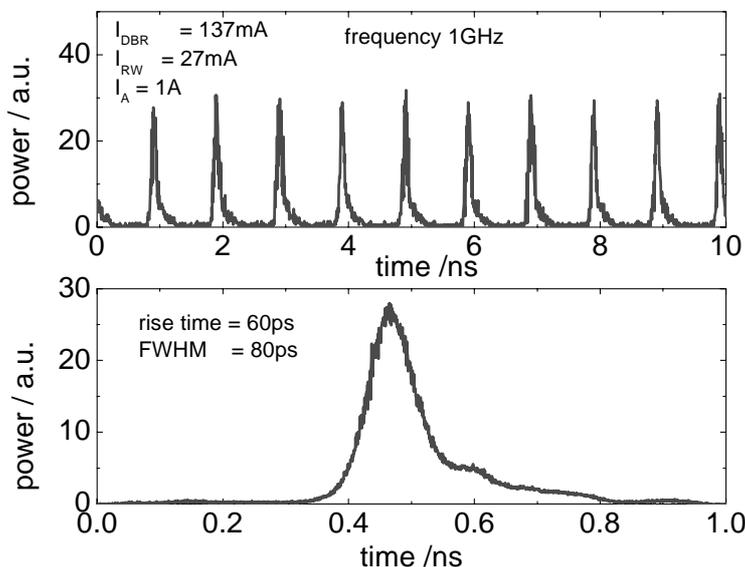


Abb.19 Impulserzeugung und Verstärkung mit der optischen Mikrobank

### 3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

### 3.6 Anwendung:

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten und untersuchten Laser können eingesetzt werden zur Erzeugung von grüner Laserstrahlung durch Frequenzverdopplung, in der Laser-Displaytechnik und als schnelle Seed-Quellen für Festkörperlaser. Prototypen dieser Laser sind für diese Einsatzzwecke zum Fraunhofer Institut in Aachen und zum Imperial College in London geliefert worden.

### 3.7 beteiligte Wissenschaftler:

Dr. Andreas Klehr  
 Dr. Hans Wenzel  
 Dipl. Phys. Karl Heinz Hasler  
 Dr. Arne Knauer  
 Dr. Jörg Fricke  
 Dr. Bernd Janke  
 Dr. Götz Erbert  
 Dipl. Phys. Sven Schwertfeger

### 3.8 Weiterqualifikation:

In diesem Projekt wurden von Herr Schwertfeger Arbeiten zu seiner Promotion durchgeführt.

#### 4. Publikationen:

A. Klehr, H. Wenzel, K.H. Hasler and G. Erbert, "Generation of high-power pulses in the GHz range with three section DBR lasers", Proceedings of SPIE Vol., 4651, pp.63-72

K.-H. Hasler, H. Wenzel, A. Klehr und G. Erbert: „Simulation of the generation of high-power pulses in the GHz range with three-section DBR lasers”, IEE Proc.-Optoelectron., Vol. 149, No. 4, 2002, pp. 152 - 160

S.Schwertfeger, A. Klehr, G. Erbert and G. Tränkle, „Compact hybrid master oscillator power amplifier with 3.1W cw output power at wavelength around 1061nm, IEEE Phot. Techn. Lett. Vol 16, No. 5 2004, pp.1268-1270

K.-H. Hasler, A. Klehr, H. Wenzel und G. Erbert: "Simulation of high-power pulse generation due to mode locking in long multi-section lasers", IEE Proc.-Optoelectron., in Vorb.

#### Literatur, Quellen

- [1] A. Klehr, H. Wenzel, K.H. Hasler and G. Erbert, "Generation of high – power pulses in the GHz range with three section DBR lasers", Proceedings of SPIE Vol., 4651, pp. 63-72
- [2] K.-H. Hasler, H. Wenzel, A. Klehr und G. Erbert: „Simulation of the generation of high-power pulses in the GHz range with three-section DBR lasers”, IEE Proc.-Optoelectron., Vol. 149, No. 4, 2002, pp. 152-160
- [3] S.Schwertfeger, A. Klehr, G. Erbert and G. Tränkle, „Compact hybrid master Oscillator power amplifier with 3.1W cw output power at wavelength around 1061nm, IEEE Phot. Techn. Lett. Vol 16, No. 5 2004, pp.1268-127
- [4] K.-H. Hasler, A. Klehr, H. Wenzel und G. Erbert: "Simulation of high-power pulse generation due to mode locking in long multi-section lasers", IEE Proc.-Optoelectron., in Vorb.
- [5] <http://www.wias-berlin.de/software/ldsl/>