Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

Design innovativer ultralanger Diodenlaser hoher Ausgangsleistung (DULD)

Zuwendungsempfänger:	Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V. Gustav-Kirchhoff. Str. 4 12489 Berlin
Förderkennzeichen:	03WKP10D
Vorhabensbezeichnung:	Verbundprojekt: Laserstrahlsysteme bis 4kW mit optisch integrierten Einzeldiodenlasern (SysLasDiode) Teilvorhaben: Design innovativer ultralanger Diodenlaser hoher Ausgangsleistung (DULD)
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2009 – 30.11.2011

Schlussbericht

Institutsleiter:	Prof. Dr. Günter Tränkle
Projektleiter:	Dr. Götz Erbert
Bearbeiter:	Agnieszka Pietrzak Dr. Hans Wenzel Dr. P. Crump

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

1. Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens im Rahmen des Verbundprojektes SysLasDiode war es, auf der Basis von physikalischen Simulationen Designs von Diodenlasern zu untersuchen und neu zu entwickeln, die eine Ausgangsleistung von zunächst mehr als 25 W (Meilenstein 1) und später 50 W (Meilenstein 2) bei einem Konversionswirkungsgrad von 60% und einer vertikalen Divergenz von 43° (95% Leistungseinschluss) ermöglichen.

Das Teilvorhaben war in fünf Arbeitspakete gegliedert. AP1 bis AP3 betrafen Breitstreifen-Diodenlaser mit Streifenbreiten von 50 µm bis 200 µm und langen Fabry-Perot Resonatoren (Resonatorlänge 4 mm – 7 mm). AP4 betrafen Diodenlaser mit trapezförmigen Kontaktstrukturen mit Öffnungswinkeln im Bereich von 0.5°...2°. Die Arbeiten konzentrierten sich dabei im wesentlichen auf den Einfluss dieser Kontaktgeometrie auf die Leistungsstromkennlinien. AP5 betraf Diodenlaser mit integrierten oder externen Bragg-Gittern zur Stabilisierung der Emissionswellenlänge.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am FBH gab es umfangreiche Erfahrungen beim Design von Hochleistungsdiodenlasern. Dadurch konnten Ausgangsleistungen und elektro-optische Konversionswirkungsgrade erreicht werden, welche den internationalen Stand mit bestimmen. Für das Design standen eine Reihe von selbstentwickelten und kommerziellen Simulationstools zur Verfügung, die sich in ihrer Komplexität und Zielrichtung unterschieden. Im Rahmen des Vorhabens wurden die Simulationsprogramme FBH-QIP, WIAS-TeSCA, FBH-DFB und LASTIP benutzt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der geplante Ablauf des Vorhabens kann folgendem Balkenplan entnommen werden:

Arbeitspakete	Jahr 1				Jahr 2			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP1 vertikales Design								
AP2 Kennliniensimulation								
AP3 Variation der Streifenbreite								
AP4 Trapezstrukturen								
AP5 Spektral selektive Spiegel								

In Absprache mit der Firma Lumics wurden die Arbeitspakete wie folgt bearbeitet:

Arbeitspakete Jahr	2009	2010		2011	
Monat	12	1-6	7-12	1-6	7-11
AP1 vertikales Design					
AP2 Kennliniensimulation					
AP3 Variation der Streifenbreite					
AP4 Trapezstrukturen					
AP5 Spektral selektive Spiegel					

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Durch die Anwendung der am FBH vorhandenen Simulations-Tools konnte das FBH den internationalen Stand mitbestimmende Werte für die Ausgangsleistung [Cr09] und des Konversionswirkungsgrad [Kn05] der Laser erreichen.

In [We96] wurde das Programm "WIAS-TeSCA benutzt, um die Leistungs-Strom-Kennlinien von Al-freien Grundmodelasern (ARROW und RISAS) im Impulsbetrieb (ohne Erwärmung) zu berechnen. Es wurde gefunden, dass in nicht optimierten Strukturen der Elektronen-Leckstrom in die p-dotierten Volumenschichten zu einem Abknicken der Kennlinien führt. In [We00] wurde der in Breitstreifenlasern seitlich wegfließende Strom sowohl experimentell als auch aus Simulationen mit WIAS-TeSCA als Funktion der Ätztiefe bestimmt. In [Kn01] wurde der Einfluss des Einflusses des Sauerstoffgehaltes in den Wellenleiterschichten auf die Leistungs-Strom-Kennlinien mit WIAS-TeSCA simuliert. In [We08] wurde die Abhängigkeit der lateralen Fernfelder von Rippenwellenleiter-Lasern von dem durch die Eigenerwärmung entstehenden lateralen Temperaturprofils experimentell und theoretisch untersucht. In [We09] wurde die Ursache des Abrollens der Kennlinie von Breitstreifenlasern theoretisch untersucht und mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Dabei wurde das Programm WIAS-TeSCA in Kombination mit dem Programm DFB benutzt. Es wurde gefunden, dass eine wesentliche Ursache für das Abrollen die Ladungsträger-Akkumulation in den Volumenschichten aufgrund einer Bandverbiegung bei hohen Leistungen ist. Bei langen Kavitäten und stark unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten an den Facetten führt darüber hinaus das longitudinalen räumliche Lochbrennen zu einer Begrenzung der maximal möglichen Ausgangsleistung.

[Kn05] A. Knigge *et al.,* Electron. Lett. Vol 41, pp250-251 (2005).

[Cr09] P. Crump*et al.,* Proc. SPIE, vol. 7198, no. 719814 (2009).

[We96] H. Wenzel *et al., P*roc. SPIE, vol. 2693, p. 418 (1996).

[We00] H. Wenzel *et al.*, Semicond. Sci. Technol. vol. 15, pp. 557-560 (2000).

[Kn01] A. Knauer *et al.,* JEM 30(11), pp. 1421-1424 (2001).

[We08] H. Wenzel *et al.*, J. Opt. Quant. Electron. Vol. 40 pp. 379–384 (2008).

[We09] H. Wenzel *et al.,* Proceedings 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Paper WB1 (2009).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojektes „SysLasDiode" wurde eng mit der Firma Lumics GmbH zusammengearbeitet. Die Simulationsergebnisse wurden in Form von Berichten und Powerpoint-Präsentationen übergeben. Es fanden halbjährliche Treffen und Telefonkonferenzen zur Diskussion der Ergebnisse statt.

6. Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

AP 1: Simulation von vertikalen Schichtstrukturen

Die Simulationen erfolgten in mehreren Phasen. In den ersten beiden Phasen wurden Strukturen mit einem Doppel-Quantum-Well (DQW) als aktiver Zone untersucht. In der 1. Phase wurden für symmetrische Schichtstrukturen die Kenngrößen der Diodenlaser, welche vorwiegend durch die vertikale Schichtstruktur bestimmt werden, als Funktion des Al-Gehalts und der Dicke der Wellenleiterschichten für verschiedene aktiven Zonen berechnet. Es konnten Schichtparameter gefunden werden, die die Vorgaben der Firma Lumics bezüglich der Laserkenngrößen erfüllten. In der 2. Phase wurden auf der Basis der gefundenen Schichtparameter von der Lumics asymmetrische Schichtstrukturen vorgeschlagen. Für diese Schichtstrukturen wurde der Einfluss der Asymmetrie des Wellenleiters (Verhältnis p-dotierter zu n-dotierter Anteil) und der Dicke der Mantelschichten auf Diodenlaser-Kenngrößen untersucht. Als Resultat dieser Simulationen wurden in Absprache mit der Firma Lumics Schichtstrukturen festgelegt, die danach im Rahmen des AP 2 genauer untersucht wurden.

Abb. 1 zeigt exemplarisch den Einfluss der Asymmetrie des Wellenleiters auf den Confinement-Faktor Γ, die Nahfeld-Breite und den Fernfeldwinkel bei $1/e^2$-Intensitätsabfall.

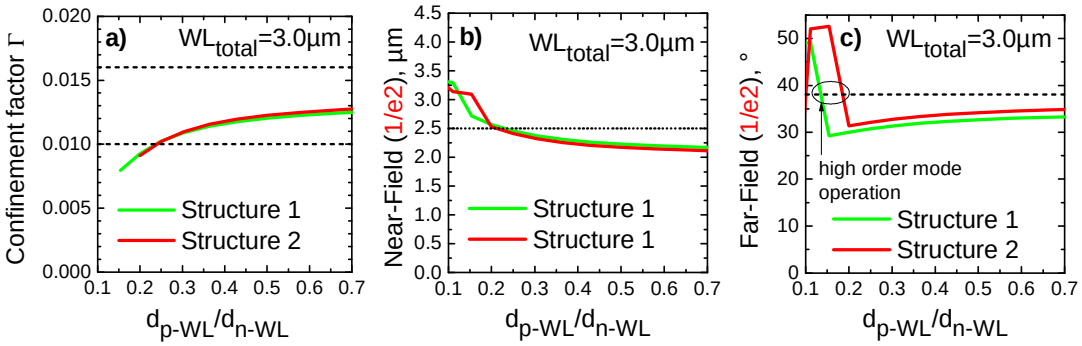

Abb. 1: Einfluss der Asymmetrie des Wellenleiters auf den Confinement-Faktor Γ, die Nahfeld-Breite und den Fernfeldwinkel bei $1/e^2$-Intensitätsabfall. Gestrichelt sind die Grenzen der Zielwerte gekennzeichnet.

In der 3. Phase wurden schwerpunktmäßig vertikale Schichtstrukturen mit einem einzelnen Quantum-Well (SQW) untersucht. Dazu wurde von der Firma Lumics ein Basis-Strukturvorschlag an das FBH übergeben und der Einfluss von Strukturparametern wie Al-Gehalt, Dicken und Dotierung auf Laserkenngrößen wie optische Verluste, Confinement-Faktor und Abstrahlwinkel simuliert. Es wurde gefunden, dass der Al-Gehalt der p-Mantelschicht reduziert werden kann, indem gleichzeitig der Al-Gehalt des p-Wellenleiters geringfügig erhöht wird. Alternativ müsste das Dotierungsprofil in der p-Mantelschicht modifiziert werden. Beim ursprünglichen Design von Lumics werden 2 vertikale Moden geführt. Um die Obermode zu unterdrücken, muss der Al-Gehalt der n-Mantelschicht (z.B. auf 30%) und die Dicke des n-Wellenleiters (z.B. auf 1.5 µm) reduziert werden (siehe Abb. 2).

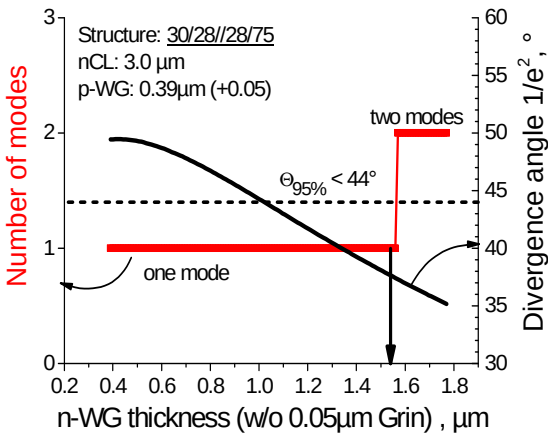

Abb. 2: Anzahl der geführten Moden und Divergenzwinkel des Fernfelds als Funktion der Dicke des n-Wellenleiters. Berechnet für Struktur mit x=0.30 Al Gehalt in n-Mantelschicht.

Weitere Details können den Zwischenberichten für die Zeiträume 1.1.2010-30.6.2010 und 1.1.2011-30.6.2011 entnommen werden.

AP 2: Simulation der Leistungsstromkennlinien für Diodenlaser mit ca. 100 µm Streifenbreite und den Kavitätslängen 5.4 mm und 7 mm

Die Simulationen der in AP 1 entworfenen Schichtstrukturen erfolgten zunächst mit den Simulationsprogrammen WIAS-TeSCA und FBH-DFB. Um die Rechenzeit gering zu erhalten, wurden in den Simulationen zwar das longitudinale räumliche Lochbrennen, zunächst aber nicht das GaAs-Substrat sowie die p-Kontaktschicht und p-Metallisierung berücksichtigt. Dies erlaubt eine realistische Berechnung des Schwellenstromes und des Anstiegs der Leistungs-Strom-Kennlinie, führt aber zu einer Überschätzung der Konversionseffizienz und der maximalen Leistung, welche aus dem thermisch bedingten Überrollen der Kennlinie resultiert.

Um die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse zu überprüfen und um Modellparameter zu bestimmen, wurden von der Fa. Lumics die Struktur und die Messergebnisse einer vorhandenen bei 975 nm emittierenden Laserdiode zu Verfügung gestellt. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Kennlinien erreicht werden.

Mit dem kalibrierten Modell wurden bei 1040 nm emittierenden Laserstrukturen der neuen Leistungsklasse simuliert. Dabei wurden das Dotierungsprofil, die Resonatorlänge und der Reflexionskoeffizient der Frontfacette variiert und der Einfluss des longitudinalen räumlichen Lochbrennens untersucht. Es wurden maximale Leistungen (Überrollleistungen) von 29 W, 34 W und 38 W für Resonatorlängen von 4.4 mm, 5.4 mm und 6.4 mm bei einer Streifenbreite von 94 µm berechnet. Die entsprechenden berechneten Kennlinien sind in Abb. 3 dargestellt.

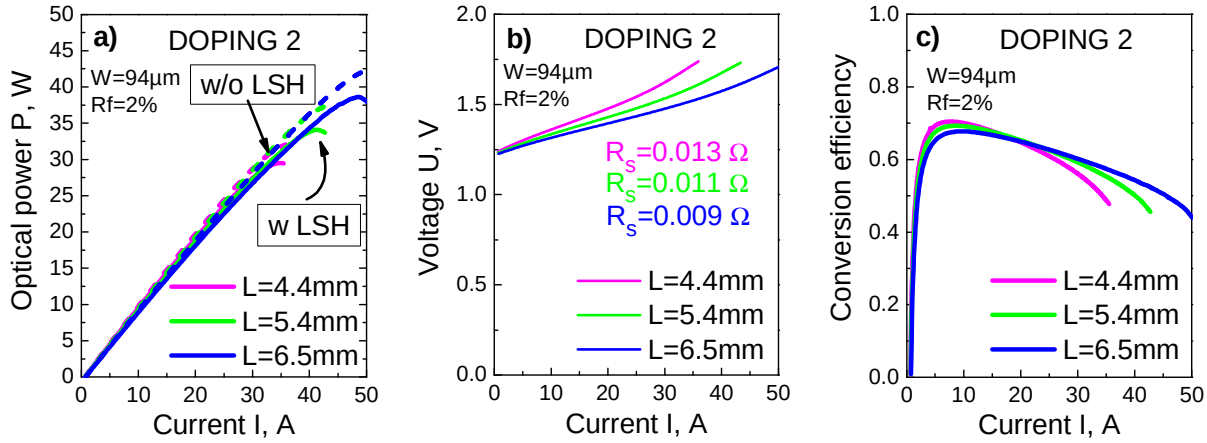

Abb. 3. Einfluss der Resonator-Länge (L) und des longitudinalen räumlichen Lochbrennen (durchgezogene Kurven: mit, gestrichelte Kurven: ohne LSH) auf das Maximum der Ausgangsleistung (a), den Serien-Widerstand (b), das Maximum des Wirkungsgrades und den Wirkungsgrad bei höheren Strömen (c).

Die Simulationen erfolgten eindimensional in der transversalen Resonatorebene. Zweidimensionale Simulationen, bei denen der Einfluss lateraler Effekte wie z.B. Stromspreizung und Ladungsträgerdiffusion, welche zur einer Reduzierung der maximalen Leistung führen, berücksichtigt wird, wurden im Rahmen des AP 3 mit dem Simulationsprogramm LASTIP untersucht. Weitere Details können dem Zwischenbericht für den Zeitraum 1.1.2010-30.6.2010 entnommen werden.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde das GaAs-Substrat sowie die p-Kontaktschicht und p-Metallisierung in der Simulation berücksichtigt. Diese besitzen einen endlichen elektrischen Serienwiderstand und führen zu einer zusätzlichen Aufheizung des Lasers aufgrund Joulescher Wärme, welche quadratisch mit dem Strom ansteigt. Eine Berücksichtigung dieser zusätzlichen Wärmequelle verbesserte die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Kennlinien von Lasern der Firma Lumics Bereich des Überrollens deutlich, und zwar sowohl im CW- als auch QCW-Betrieb.

Das verbesserte Modell wurde benutzt, um den thermischen Widerstand R_{th} zu übermitteln, bei dem ein bei 970 nm emittierender Laser basierend auf einer Struktur mit einem SQW als aktiver Zone, einer Streifenbreite W = 100 µm und einer Resonatorlänge L = 8 mm eine Ausgangsleistung von 50 W erreicht. Die berechneten Kennlinien sind in Abb. 4 dargestellt. Der ermittelte Wert von R_{th} = 1.1 K/W ist allerdings im CW-Betrieb mit den gegenwärtigen Aufbautechniken nicht realisierbar, welche thermische Widerstände im Bereich zwischen 2 und 3 K/W ergeben.

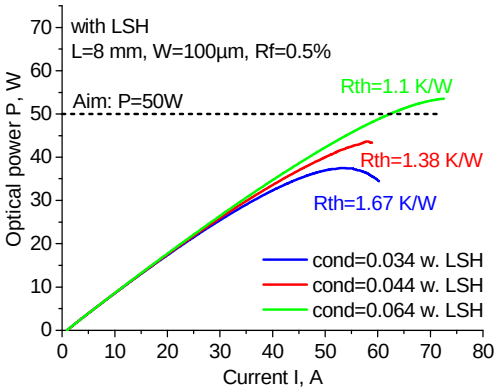

Abb. 4: Berechnete Leistungs-Strom-Kennlinien für verschiedene thermische Übergangswiderstände.

Weitere Details können dem Zwischenbericht für den Zeitraum 1.1.2011-30.6.2011 entnommen werden

Parallel zu den Simulationen mit den auch in anderen Projekten bewährten Programmen WIAS-TeSCA und FBH-DFB wurde die kommerzielle Software „LASTIP“ der Firma Crosslight (Kanada) und die aus Projektmitteln angeschafften zusätzlichen Module eingefahren und auf die im Rahmen des Vorhabens zu simulierenden Strukturen angewendet. Die Software LASTIP kann zusätzliche Effekte berücksichtigen, wie z.B. die laterale Stromspreizung und Ladungsträgerdiffusion in Breitstreifenlasern. Darüber hinaus vereinfacht die kommerzielle Software die Durchführung von Simulationen, weil die benötigten Materialparameter aus Inputdateien, welche z. T. zum Lieferumfang gehören, direkt übernommen werden.

Die Inputdateien für die Materialparameter der von uns verwendeten Halbleitermaterialien wurden von uns überarbeitet bzw. neu erstellt, sowohl für den Standard-Typ der aktiven Zone als auch für den Typ „Complex“. Letzterer erlaubt die Simulation von Lasern, deren aktiven Zone aus unterschiedlichen QWs und Barrieren besteht. Folgende in LASTIP implementierte Modelle wurden auf ihre Anwendbarkeit überprüft:

- Optischer Gewinn mit der 6-Band-kp-Methode
- Thermoemission an Heterogrenzen
- Änderung der Brechzahl mit der Ladungsträgerdichte
- Numerik zur Berechnung der Lasermode
- Eigenerwärmung

Mit LASTIP ohne Eigenerwärmung und longitudinales räumliches Lochbrennen simulierte Kennlinien wurden mit experimentellen Ergebnissen verglichen (eindimensionale Rechnung). Bei geeigneter Wahl der Parameter konnte im unteren Bereich der Kennlinie, wo Eigenerwärmung, Hochstromeffekte und longitudinales räumliches Lochbrennen noch keine Rolle spielen, eine gute Übereinstimmung der simulierten mit der gemessenen Kennlinien erreicht werden. Weitere Details können den Zwischenberichten für die Zeiträume 1.7.2010-31.12.2010 und 1.1.2011-30.6.2011 entnommen werden.

AP 3: Simulation von Leistungsstromkennlinien unter Berücksichtigung der Variation der Streifenbreite

Mit LASTIP wurde der Einfluss einer endlichen Streifenbreite auf die Kennlinien ohne Berücksichtigung der Eigenerwärmung untersucht. Die Simulationen zeigen, dass mit abnehmender Streifenbreite der Anstieg der Leistung-Strom-Kennlinien geringfügig abnimmt und die Schwellenstromdichte zunimmt. Erstmalig konnte untersucht werden, ob bei ho-

hen Leistungen die laterale Stromspreizung und Ladungsträgerdiffusion zu einem Abknicken der Kennlinie führt. Im betrachteten Leistungsbereich (100 W) zeigten die simulierten Kennlinien kein Abknicken (siehe Abb. 5).

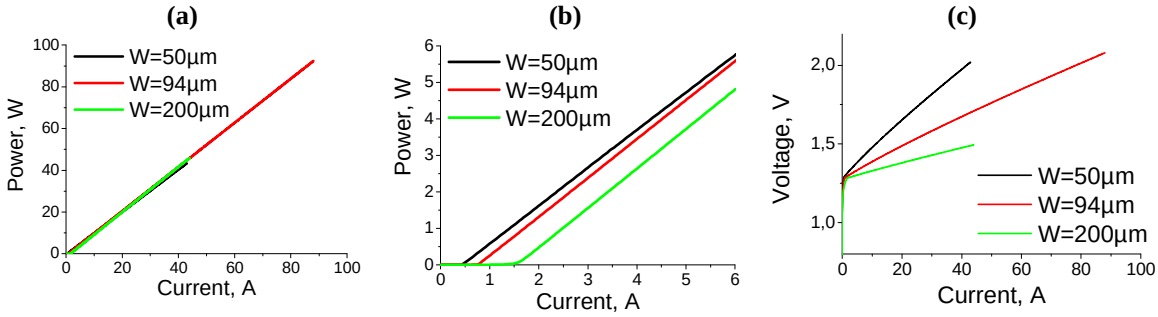

Abb. 5. Berechnete (a, b) P-I Kennlinien (c) U-I Kennlinien für Laser mit 4.4 mm Resonatorlänge und Streifenbreite W=50µm (Schwarze Linie), W=94µm (rote Linie) und W=200µm (grüne Linie)

Weitere Details können dem Zwischenbericht für den Zeitraum 1.7.2010-31.12.2010 entnommen werden.

AP 4: Untersuchungen zur Erhöhung der Brillanz der Laserstrahlung durch longitudinale Variation der Kontaktgeometrie

Im Rahmen des Vorhabens wurden trapezförmige Kontaktstrukturen mit geringen Öffnungswinkeln von 0.5° bis 2° (Trapez-BA-Laser) unte rsucht. Ziel der Arbeit war es, den Einfluss dieser Kontaktgeometrie auf die Leistungs-Stromkennlinien mit den Simulationsmodell „WIAS-TeSCA“ + „FBH-DFB“ zu untersuchen.

Für den Fall konstanter Kontaktfläche ergibt eine größere Apertur an der Frontfacette als an der Rückfacette eine höhere maximale Leistung und eine homogenere Verteilung des modalen Gewinns (d.h. der Trägerdichten) wegen dem verringertem longitudinalem räumlichen Lochbrennen. Im Fall einer konstanten Apertur an der Frontfacette ergibt eine größere Apertur an der Rückfacette als an der Frontfacette eine größere Leistung wegen dem kleinerem elektrischen und thermischen Widerstand. Allerdings ist dies nicht notwendigerweise mit einer größeren Brillanz aufgrund einer reduzierten Strahlqualität wegen der im Mittel größeren Apertur verbunden. Eine Aussage darüber erfordert eine 3D-Simulation, für die derzeit kein geeignetes Simulationsprogramm verfügbar ist.

Weitere Details können dem Zwischenbericht für den Zeitraum 1.7.2011-30.11.2011 entnommen werden.

AP 5: Untersuchungen zum Laserverhalten bei Ersatz der breitbandigen Resonatorspiegel durch spektral selektive Spiegel

Die Arbeit im Rahmen des 5. Arbeitspakets konzentrierte sich auf Simulationen des modalen Schwellengewinns der Bragg- und Fabry-Perot-Moden für einen Laser mit spektral selektivem Spiegel (Volumen-Bragg-Gitter platziert vor die Frontfacette). Ziel der Simulationen war, einen Einfangbereich des Gitters und demzufolge einen Arbeitsbereich (Ausgangsleistungsbereich) des Lasers zu bestimmen, bei welchem die Emissionswellenlänge bei 980 nm fixiert werden kann.

Die untersuchte Struktur besitzt einen optimalen Einfangbereich, falls bei 300 K die Wellenlänge des maximalen Gewinns ~10 nm kurzwelliger als die Braggwellenlänge ist. Eine

Verringerung der Frontfacetten-Reflektivität auf Werte kleiner 0.01 vergrößert den Einfangbereich insbesondere bei hohen Leistungen. Eine Erhöhung der Reflektivität des Bragg-Gitters auf Werte größer 0.01 vergrößert den Einfangbereich nur unwesentlich, verringert aber die Effizienz sehr stark.

Weitere Details können dem Zwischenbericht für den Zeitraum 1.7.2011-30.11.2011 entnommen werden.