

Diodenlaser höchster Brillanz im nahen und mittleren Infrarot

Márc Kelemen, Jürgen Gilly, Patrick Friedmann, m2k-laser GmbH, Freiburg i.Br.

Während bisher die erreichbaren absoluten Spitzenleistungen und die maximalen elektro-optischen Effizienzen die Qualität eines Hochleistungslasers beschrieben, steht nunmehr die nutzbare optische Leistung charakterisiert durch die Brillanz der Diodenlaser im Vordergrund.

Herkömmliche Hochleistungsdiodenlaser haben typischerweise Brillanzen unter 30 MW/cm². Insbesondere der Erfolg der Faserlaser hat zu einem Schub in der Entwicklung hin zu hochbrillanten Dioden-

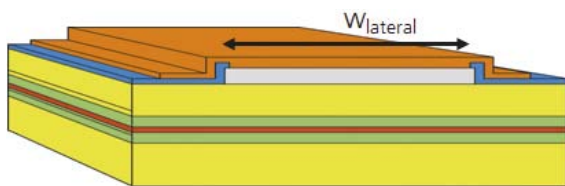


Bild 1: Design eines Breitstreifenlasers

laserstrahlquellen geführt. Das dabei am häufigsten eingesetzte Resonatordesign ist das eines Breitstreifenlasers, der durch seine mittels Ätztechnik definierte aktive (lichterzeugende) Streifenbreite w_{lateral} charakterisiert ist (**Bild 1**).

Brillanz

Die Brillanz eines Diodenlasers ist ein Maß für die Leistung pro Fläche und Raumwinkel und beinhaltet damit neben der Leistungsangabe auch eine Beschreibung der Strahleigenschaften. Sie ist definiert durch:

$$B = P / (\lambda^2 M^2_{\text{vertikal}} M^2_{\text{lateral}}) = P / (\lambda^2 M^2_{\text{vertikal}} (\pi/4 w_{\text{lateral}} \theta_{\text{lateral}})) \quad (1)$$

M^2 bezeichnet dabei die Strahlqualität in beiden Raumrichtungen des emittierenden Laserstrahles. Die optische Leistung P lässt sich bei Breitstreifenlasern über die Breite w_{lateral} des aktiven Streifens steuern. Der Strahl besitzt dabei einen ovalen Querschnitt: In vertikaler Richtung ist der Strahl zwar stark divergent, aber gaussförmig, so dass er sich mittels geeigneter Linsen gut formen lässt. In lateraler Richtung bilden

sich viele Schwingungsmoden aus, die Intensitätsverteilung ist nicht mehr gaussförmig und der Strahlquerschnitt zeigt starke Intensitätsschwankungen (Filamente). Die Breite des lateralen Fernfeldes wird mit θ_{lateral} bezeichnet und umfasst 95% der emittierten optischen Leistung.

Die im Folgenden diskutierten Konzepte werden alle anhand von Einzelemitttern erklärt, sind aber natürlich auch auf Diodenlaserbarren umsetzbar. Einzelemitter werden mittels AuSn-Lötung über Zwischenwärmesenken auf vergoldete Kupferwärmesenken montiert, die passiv gekühlt werden (**Bild 2**).

Breitstreifenlaser im nahen Infrarot

Diodenlaser im nahen Infrarot (880 – 1080 nm) basieren auf dem GaAs-Materialsystem, wobei Wellenleiter- und Mantelschichten aus AlGaAs und die aktive Schicht aus InGaAs besteht. Die jeweilige Wellenlänge lässt sich über den Indium Gehalt in der InGaAs Halbleiterschicht einstellen.

Die Brillanz ist nach **Gleichung (1)** bestimmt durch das inverse Produkt aus Streifenbreite und Fernfeldbreite. Dementsprechend wurde die Streifenbreite von Breitstreifenlasern in den vergangenen Jahren konsequent von 200 µm Streifenbreite über 150 µm auf heutzutage unter 100 µm reduziert. Ein wesentlicher Nachteil des Streifendesigns besteht allerdings darin, dass mit einer Reduzierung der Streifenbreite bei ansonsten gleichen Resonatorgeometrien immer eine zunehmende Aufweitung des lateralen Fernfeldes mit steigendem Betriebsstrom einhergeht. Hauptgrund ist im Wesentlichen die durch

die reduzierte Fläche verschlechterte Wärmeabfuhr, die durch die Verlustleistung erzeugt wird.

Will man also die Brillanz von Breitstreifenlasern erhöhen, darf man demnach nicht nur die Streifenbreite reduzieren, sondern man muss gleichzeitig ein allzu rasches thermisches Aufblühen des lateralen Fernfeldes verhindern. Dies erreicht man am einfachsten über lange Resonatorlängen, die über eine vergrößerte Fläche zu einer deutlich besseren Wärmeabfuhr führen. Dabei muss allerdings die elektro-optische Gesamteffizienz des Bauteils auf einem hohen Niveau bleiben. Deshalb werden zum Pumpen von Faserlasern Diodenlaser mit Resonatorlängen zwischen 3 - 5 mm und elektro-optischen Effizienzen zwischen 55 - 65% eingesetzt.

Lange Resonatoren in Kombination mit

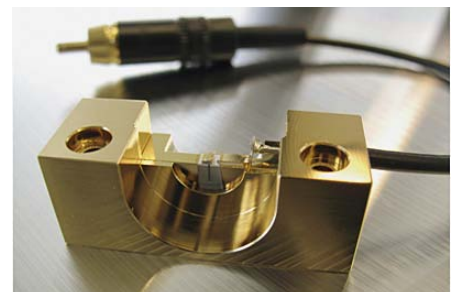


Bild 2: Beispiel eines montierten Hochleistungslasers auf passiver Wärmesenke

einem hohen elektro-optischen Wirkungsgrad können nur durch vertikale Laserdesigns mit internen Verlusten deutlich unter 1cm⁻¹ realisiert werden. Unter internen Verlusten versteht man dabei die Verluste an Ladungsträgern in den Halbleiterschichten, die nach der Strominjektion nicht mehr für eine Lichtausbeute zur Verfügung

stehen. Dazu müssen geeignete Dotierverläufe gewählt werden. Zudem kann durch Wahl geeignet zusammengesetzter Halbleiterschichten die Wärmeabfuhr im Diodenlaser optimiert werden. Dies stellt sehr hohe Ansprüche an die zu verwendenden Epitaxieanlagen, z.B. einer Molekularstrahlanlage. Deshalb sind heutzutage die verwendeten Laserstrukturen sehr stark an die technischen Möglichkeiten der jeweils eingesetzten Epitaxieanlagen angepasst. Die Zunahme des lateralen Fernfeldes mit steigendem Betriebsstrom kann außerdem durch geeignete Prozessschritte begrenzt werden.

Eine weitere wesentliche Einschränkung der Brillanz ergibt sich aus der beschränkten Leistungsdichte, die die heutigen Facettenbeschichtungen bieten. Bei einer gewünschten optischen Ausgangsleistung (z.B. 10 W) ergibt sich die Streifenbreite als Kompromiss zwischen der möglichen maximalen Leistungsdichte pro Emitterbreite, die die verwendete Facettenbeschichtung innerhalb einer geforderten Lebensdauer des Bauteils liefern kann, und einer möglichst schmalen Streifenbreite zur Optimierung der Brillanz des Bauteils.

So erhält man beispielsweise bei einem Breitstreifenlaser mit 90 µm Streifenbreite und 5 mm Resonatorlänge, der bei einer optischen Leistung von 10 W eine laterale Fernfeldbreite von unter 8° liefert, eine Brillanz von über 100 MW/cm², eine um einen Faktor 3 höhere Brillanz (Bild 3) gegenüber herkömmlichen Breitstreifenlasern [1].

Brillanz im mittleren Infrarot

Für den Wellenlängenbereich zwischen 1800 nm und 2500 nm, dem mittleren Infrarot, standen bislang nur Festkörperlaser (Ho:YAG, Tm:YAG) oder Faserlaser mit bestimmten Emissionswellenlängen zur Verfügung. Zwar gibt es InP-basierte Diodenlaser mit bis zu 1900 nm Emissionswellenlänge, oberhalb von 1800 nm nimmt deren elektro-optische Effizienz allerdings deutlich ab.

Basierend auf GaSb/AlGaAsSb/InGaAsSb Halbleiterschichten, stehen nun auch im mittleren Infrarotbereich hocheffiziente Hochleistungsdiodenlaser mit optischen Ausgangsleistungen bis zu 2 W cw bzw. 10 W im Pulsbetrieb zur Verfügung.

Viele Anwendungen in diesem Wellenlängenbereich wie beispielsweise die Laserchirurgie, die Bearbeitung von Kunststoffen oder das Pumpen von Lasersystemen benötigen hohe Leistungsdichten, d.h. eine hohe Brillanz der Diodenlaser. Setzt man allerdings die bekannten Konzepte aus dem nahen Infrarot (GaAs Materialsystem) um, ergeben die dort oftmals verwendeten

breiten Wellenleiterstrukturen im GaSb-Materialsystem vertikale Fernfelder von über 120° und sind somit in der Praxis nicht einsetzbar.

Mit der Verwendung so genannter schmaler Wellenleiterstrukturen [2] konnte vor einigen Jahren ein wesentlicher Entwicklungsfortschritt erzielt werden. Geeignete Dotierungen der Halbleiterschichten ermöglichten Laserstrukturen mit 80° Fernfelddivergenzen. Derartige Diodenlaser werden inzwischen als Pumpmodule und in der Medizintechnik eingesetzt. Bis zu 80% der optischen Leistung eines 150 µm breiten Streifenlasers können in eine Faser mit einem 200 µm breiten Kern eingekoppelt werden.

Schmale Wellenleiterstrukturen haben allerdings den Nachteil, dass die optische Welle teilweise in höherdotierten Halbleiterschichten läuft, was zu relativ hohen internen Verlusten von 10 cm⁻¹ führt. Daher sind bisher nur Resonatorlängen von bis zu 1,5 mm praktikabel. Dies limitiert die zur Wärmeabfuhr zur Verfügung stehende Fläche, was wiederum zu einem frühzeitigen Aufblühen des lateralen Fernfeldes führt. So gelten im mittleren Infrarot optische Leistungen bis zu 1 W als nutzbar und können in Fasern mit Kerndurchmessern bis 200 µm oder darüber eingekoppelt werden [3].

Die Brillanz eines Breitstreifenlasers ist also limitiert durch:

- die verwendete Facettentechologie
- die verwendete Streifenbreite
- das thermische Aufblühen des lateralen Fernfeldes
- die Qualitätsanforderungen an die verwendete Epitaxie.

Alternatives Resonatordesign: Trapezlaser

Mit dem Einsatz von Trapezlasern können einige Limitierungen der Breitstreifenlaser umgangen werden. Ein Trapezlaser besteht aus zwei monolithisch auf einem Chip integrierten Komponenten. Die sogenannte Rippenwellenleitersektion ist ein einmodiger Diodenlaser, der als Pumpquelle dient. Im anschließenden Trapezbereich verbreitert sich die aktive Breite von üblicherweise 3 µm Ridgesektionbreite auf eine Austrittsflächenbreite von mehreren hundert Mikrometer, abhängig von der

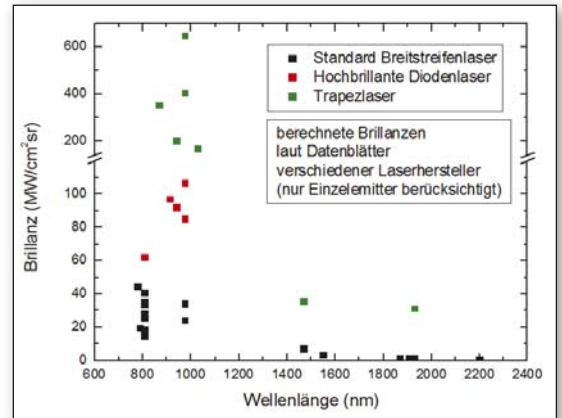


Bild 3: Brillanzen verschiedener Hochleistungslaser (Einzelemitter)

gewählten Sektionslänge und dem Trapezwinkel. Bei einer Eingangsintensität von mehreren 10 mW wird die optische Leistung auf mehrere Watt verstärkt (Bild 4). Die im Fokus minimal mögliche laterale Strahlbreite ist aufgrund der Trapezgeometrie nicht durch die Breite der Austrittsfläche, sondern durch die Breite der Ridgesektion bestimmt. Im Vergleich zu Breitstreifenlasern gleicher Leistung kann beim Trapezlaser mit einer 25fach geringeren Strahlbreite gearbeitet werden. Das für die Strahlqualität ebenfalls wichtige laterale Fernfeld ist durch den Trapezwinkel festgelegt.

Durch Verlängerung der Trapezsektion lässt sich die Austrittsfläche verbreitern und damit die optische Leistung erhöhen. Die minimale Strahlbreite bleibt dabei erhalten, ebenso das laterale Fernfeld und damit die Strahlqualität. Damit spielt die Facettentechologie nicht mehr die limitierende Rolle wie bei den Breitstreifenlasern.

Ein Nachteil dieses Konzeptes besteht allerdings in dem Astigmatismus dieser Bauteile: die Differenz zwischen dem Fokus in lateraler und vertikaler Strahlrichtung. Bei einem Streifenlaser liegt der Fokus in

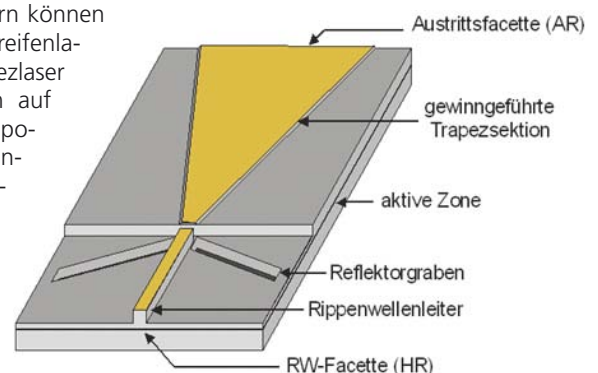


Bild 4: Design eines Trapezlasers

beiden Strahlrichtungen aufgrund der symmetrischen Geometrie an derselben Stelle, der Astigmatismus ist entsprechend bei null. Bei einem Trapezlaser ist jedoch die Lage der Foki in beiden Strahlrichtungen verschieden. Die Lage des Fokus in lateraler Strahlrichtung und damit auch der Astigmatismus sind durch die Trapezlänge und den effektiven Brechungsindex der verwendeten Halbleiterschichten bestimmt. Da der effektive Brechungsindex zusätzlich von Temperatur und Betriebsstrom abhängt, lässt sich der Astigmatismus über diese Einflussgrößen steuern.

In der Praxis wurden bereits Trapezlaser mit optischen Ausgangsleistungen zwischen 5 - 10 W mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität und Brillanzen von 200 MW/cm² bis über 600 MW/cm² erprobt [4].

Auch im mittleren Infrarot bietet die Trapezlasergeometrie eine deutliche Brillanzsteigerung für Hochleistungslaser. Ein 2,5 mm langer Trapezlaser mit 6° Trapezwinkel bei 1930 nm emittierender Wel-

lenlänge erreicht bei einer Brillanz von 32 MW/cm² dieselbe optische Leistung wie ein 150 µm-Breitstreifenlaser identischer Wellenlänge. Allerdings muss auch hier der Astigmatismus bzw. dessen Änderung mit dem Betriebsstrom beim Einsatz dieser Bauteile beispielsweise in Pumpmodulen beachtet werden [5].

Fazit

Der Erfolg der Faserlaser hat zu einer neuen Generation von brillanten Hochleistungslasern sowohl im nahen als auch im mittleren Infrarot geführt. Heutige 90 µm breite Streifenlaser mit 10 W liefern eine um einen Faktor 3 gesteigerte Brillanz gegenüber herkömmlichen Streifenlasern. Das Trapezlaserdesign erlaubt eine weitere Steigerung der Brillanz von Pumplaser.

Literaturhinweise:

- [1] J. Gilly, P. Friedmann, H. Kissel, J. Biesenbach, M.T. Kelemen, *5mm long broad-area lasers with 65% wall-plug efficiency*, SPIE Proc., Vol. 7198, Paper 10, 2009

- [2] M. Rattunde, J. Schmitz, G. Kaufel, M. Kelemen, J. Weber, and J. Wagner, *GaAs-based 2.X µm quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power*, Appl. Phys. Lett. 88, 081115, 2006
- [3] M. T. Kelemen, J. Gilly, M. Haag, J. Biesenbach, M. Rattunde, J. Wagner, *Diode laser arrays for 1.8 to 2.3µm wavelength range*, SPIE Proc., Vol. 7230, paper 56, 2009
- [4] P. Friedmann, J. Gilly, S. Moritz, R. Ostendorf, M. T. Kelemen, *5W frequency stabilized 976nm tapered diode lasers*, SPIE Proc., Vol. 6876, Paper 54, 2008
- [5] C. Pfahler, G. Kaufel, M. Kelemen, M. Mikulla, M. Rattunde, J. Schmitz, J. Wagner, *GaAs-based tapered diode lasers at 1.93 µm with 1.5-W nearly diffraction limited power*, IEEE Photonics technology Letters, Vol. 18, No. 6, 2006

Ansprechpartner:

Dr. Márc Kelemen
M2k-laser GmbH
Tullastr. 72
79108 Freiburg
Tel.: 0761/5158-7370
Fax: 0761/5158-7376
eMail: info@m2k-laser.de
Internet: www.m2k-laser.de



www.photonik.de ▶ Webcode 6005