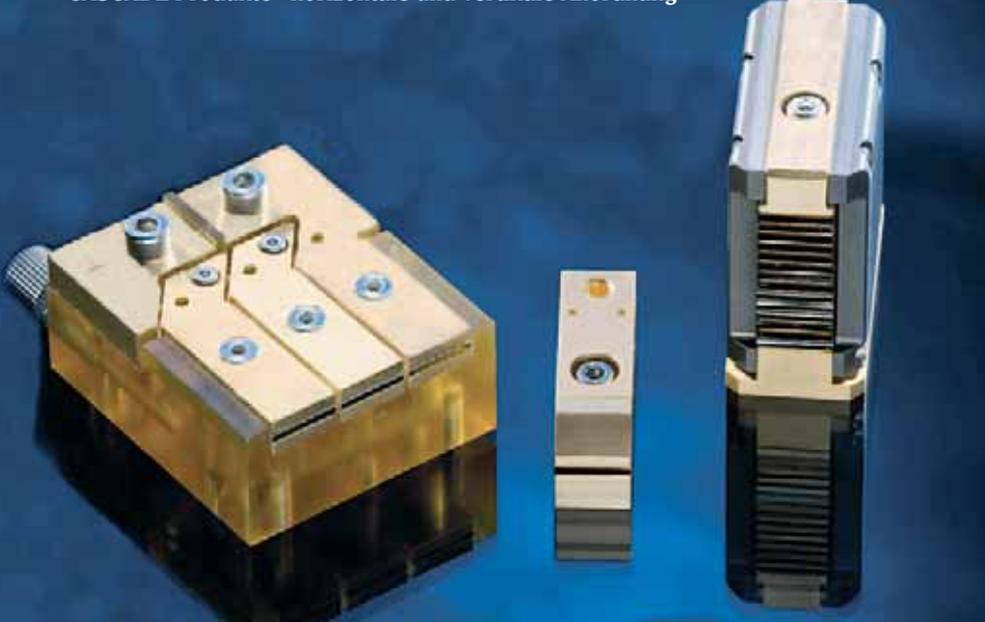


Effiziente Größe

Ein Tutorial von Ingolf Dueckminor mit einem Anwendungsbeispiel von Maik Frede

Hochleistungs-Diodenlaserstapel (HPDLs) mit Ausgangsleistungen von mehreren hundert Watt im Dauerstrich, in sehr kompakter Bauweise und höchster Effizienz, sind seit einiger Zeit kommerziell erhältlich. Durch direkte Umsetzung von elektrischer zu optischer Leistung erzielt der Diodenlaser den höchsten Wirkungsgrad bei allen derzeit bekannten Laserarten. Allerdings sind besondere Maßnahmen erforderlich, die Brillanz der Diodenlaser weiter zu steigern, so dass sie auch für direkte Laseranwendungen herangezogen werden können. Aufgrund der deutlich erhöhten Brillanz ermöglichen neuartige Laserdioden allerdings schon heute eine völlig neue Generation diodengepumpter Festkörperlaser (DPSSL) mit hohem Wirkungsgrad und einer kompakten Bauweise. Ausgestattet mit diesen Merkmalen, finden die Diodenlaser immer mehr Akzeptanz im industriellen Einsatz.

CASCADE-Produkte - horizontale und vertikale Anordnung



Schon Mitte der 80er Jahre wurden erste Laserbarren mit Ausgangsleistungen im Bereich von einigen Watt zur kommerziellen Nutzung vorgestellt. Heutige Hochleistungs-Barren unterscheiden sich jedoch ganz wesentlich von ihren Vorgängern. Sie sind kompakt, portabel, äußerst zuverlässig und vor allem sehr effizient. Bei den neuesten Entwicklungen konnte sowohl die Ausgangsleistung als auch die Effizienz wesentlich gesteigert werden. Die elektrisch zu optische Leistungskonversion liegt derzeit bei 67%, im Laborbetrieb konnten sogar bis

zu 74% erreicht werden. HPDLs werden deshalb für eine zunehmende Anzahl von anspruchsvollen industriellen Anwendungen immer attraktiver.

In der Praxis führt dies zu einer erheblich geringeren Verlustwärme, wesentlich geringerem Stress im Bauteil und damit zu einem stabileren Betriebsverhalten, größerer Zuverlässigkeit, einer erhöhten Ausgangsleistung und einer längeren Lebensdauer.

Das in USA laufende SHEDS-Programm (Super High Efficient Diodelaser Sources) ist die Steigerung der Effizienz auf

über 80 % bis zum September 2006 und damit ein weiterer Meilenstein bei der kommerziellen Umsetzung neuer Technologie zur Fertigung von industriell nutzbaren HPDLs. Die Ausgangsleistung konnte aktuell auf über 400 Watt CW aus einem einzigen Barren, mit einer Kantenlänge von 1 cm, gesteigert werden.

Dieser Artikel fasst die Vorteile des neuen Barrenmaterials zusammen, die zu Hochleistungsstapeln verarbeitet und mit Strahlformungsoptik versehen, industriell nutzbare Ausgangsleistungen von mehreren hundert Watt liefern. Messungen zeigen, dass sie ohne Probleme bis in den Kilowatt-Bereich skalierbar sind. Das Produkt aus hoher Leistung, verbunden mit exzellenter Brillanz, macht sie zu bevorzugten Pumplichtquellen von neuen, außerordentlich kompakten DPSSL-Lasern mit hohen Ausgangsleistungen im Dauerstrichbetrieb.

Erläuterung der Grundlagen

Auf einem Diodenlaserbarren ist eine Vielzahl von Einzelemittlern in einer Linie aufgebracht, die jeweils durch ein schmales Band unterbrochen werden. Typische Maße eines solchen Barrens sind 150 μm Höhe, 1 mm Tiefe und 10 mm Breite. Er enthält zwischen 10 und 60 Emittler, die sehr präzise entlang des Barrens angeordnet sind.

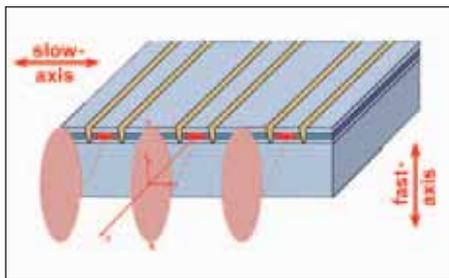
Im Einzelemitter wird das Laserlicht innerhalb einer aktiven Region, von 1 μm Höhe und 150 μm Breite, erzeugt. Es verlässt das Halbleitermaterial an der Kante jedes einzelnen Lasers. Das Ergebnis ist eine Reihe von schmalen, parallelen Lichtbündeln, die vom Barren weg abstrahlen.

Das Verhältnis von aktivem zu inaktivem Diodenmaterial nennt man den Füllfaktor. Es beschreibt den prozentualen Anteil des mit vielen Emittlern besetzten Barrenmaterials. Berechnet wird er, indem man die Breite eines Emitters

durch den Zentrumsabstand zwischen den Emittlern teilt. Ein typischer Barren mit 19 Emittlern hat je Emitter 150 μm Breite und einen Zentrumsabstand von 500 μm . Damit ergibt sich ein Füllfaktor von 30 %. Kommerziell verfügbare, konvektionsgekühlte Barren mit 30 % Füllfaktor und 1 mm langer Kavität erreichen bis zu 40 W CW Ausgangsleistung. Wassergekühlte Versionen mit 80 % Füllfaktor hingegen liefern bis zu 100 W CW. Grundsätzlich erhöht sich die Ausgangsleistung linear mit der konstruktiven Verbreiterung des Emitters. Für Halbleitermaterial, das Laserlicht bei 800 und 900 nm erzeugt, liegt die typische Facetendichte der optischen Ausgangsleistung bei 20–30 $\text{mW}/\mu\text{m}$. Rote Diodenlaser erreichen ca. 5 $\text{mW}/\mu\text{m}$ und Laser mit 1.400 nm oder länger liegen bei 10–15 $\text{mW}/\mu\text{m}$. Eine Verlängerung der Kavität erhöht die Ausgangsleistung. Die typische Länge des Resonators liegt im Bereich von 0,6–1 mm. Ausnahmen sind 1,5 mm und 2,0 mm Länge.

Strahleigenschaften

Um die Strahleigenschaften eines Laserbarrens zu verstehen, stellt man sich am besten vor, dass sich der Laserstrahl in Richtung der z-Achse ausbreitet. Die Höhe der aktiven Region befindet sich entlang der y-Achse (senkrecht zum



▲ **Abb. 1: Strahlaustritt und Divergenz FA und SA**

Laserbarren) und die Breite entlang der x-Achse. Aufgrund der asymmetrischen Form der aktiven Emitterregion (typisch 1 μm Höhe x 150 μm Breite) ist der Ausgangsstrahl eines Barrens sowohl elliptisch als auch astigmatisch – das bedeutet, dass bei einer Fokussierung die Strahltaille an unterschiedlichen Stellen in der x- und y-Achse entsteht.

In transversaler Richtung (z-Achse =

Fast-Axis) verlässt das Licht den schmalen Wellenleiter nahezu beugungsbegrenzt unter hoher Divergenz. Die Halbwertsbreite des Vollwinkels beträgt bis zu 30–40 Grad (FWHM). Deshalb spricht man oft von einer »Fast-Axis«-Strahldivergenz. Das Intensitätsprofil des Fast-Axis-Nahfeldes ist annähernd gausförmig.

Im Gegensatz hierzu treten in lateraler Richtung (x-Achse = Slow-Axis) die Modenprofile der einzelnen Emitterstreifen auf, die nur langsam divergieren. Diese Achse ist hochgradig Multimode, annähernd diffus und weist viele transversale Moden mit einer kleineren Strahldivergenz von ca. 10 Grad FWHM auf. Die Divergenz ist hierbei reduziert, weil die Breite der aktiven Region viel größer ist als deren Höhe. Man spricht deshalb oft von einer »Slow-Axis«-Strahldivergenz.

Wichtige Parameter bei HPDLs

Je nach Anwendung der HPDLs gilt es, die grundsätzlichen Charakteristiken der Laserdioden zu spezifizieren. Für die Anregung von Festkörperlasern ist, z. B. neben der Laserleistung und Brillanz, die Emissionswellenlänge von Bedeutung, da diese an die Absorption des Festkörpermateriale angepasst werden muss. Zunächst soll also die Frage der Anwendung bzw. der zur Verfügung stehenden Wellenlängen geklärt werden.

Wellenlänge: Kommerziell sind Dioden im Bereich von 635–2.000 nm erhältlich, allerdings durchzogen von einigen Lücken. Die wichtigsten Halbleitermaterialien sind:

- AlGaInP/GaAs (635–700 nm) – beispielsweise zur Anregung von Chromdotierten Lasermaterialien,
- AlInGaAsP/GaAs (780–1.000 nm) – zur Anregung von Yb- und Nd-dotierten Lasermaterialien,
- InGaAsP/InP (1250–1.700 nm) – zur Anregung von Er- und Tm-dotierten Lasermaterialien.

Ebenso wichtig ist es, nicht nur die gewünschte Zentralwellenlänge, sondern auch den Akzeptanzbereich (Toleranz) zu spezifizieren. Dies beeinflusst allerdings den Preis entscheidend. Als

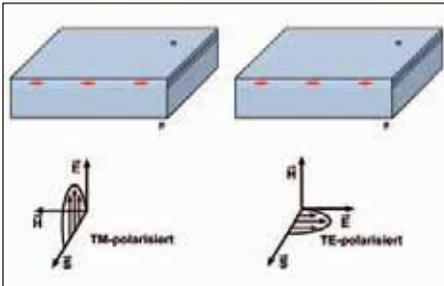
Daumenregel gilt: Je größer die Toleranz der Zentralwellenlänge, desto niedriger der Preis des HPDL, da die Ausbeute bei der Produktion größer ist. Als Standard-Toleranz gilt:

- ± 3 nm für 800-nm-Dioden-Laser,
- ± 5 nm für 900-980-nm-Laser und roten Dioden-Laser,
- ± 10 nm für 1.400 nm oder Dioden-Laser mit größerer Wellenlänge.

Für die Anregung von Festkörperlasermaterialien ist des Weiteren die Emissionsbreite der Laserdiode ein wichtiger Parameter. Diese wird die Halbwertsbreite des Ausgangsstrahles spezifizieren – FWHM. Darunter versteht man die spektrale Breite des Lasers – gemessen in Nanometer – bei 50 % des Spitzenwertes. Hochleistungs-Barren bei 6xx, 8xx und 9xx nm besitzen normalerweise spektrale Breiten von 2–3 nm FWHM, während sie bei 14xx nm und längeren Wellenlängen wesentlich breiter sind, manchmal bis zu einem Faktor 5–8.

Lebensdauer: Die Lebensdauer einer Laserdiode ist für den industriellen Einsatz der entscheidende Faktor und bestimmt neben der Zuverlässigkeit den Einzug der HPDLs in den Hochindustrieinsatz. Der Wert gibt an, nach welcher Betriebsdauer die nominale Ausgangsleistung der Laserdiode um maximal 10% gesunken sein darf. Neueste Fertigungsverfahren stellen jetzt höchste Qualität sicher. Aus diesem Grund geben die meisten Lieferanten über 10.000 Stunden Lebensdauer an. Allerdings ist es von entscheidender Bedeutung, dass diese Lebensdauerdaten nur eingehalten werden können, wenn bestimmte Rahmendaten und Betriebsbedingungen sichergestellt bzw. eingehalten werden – z. B. den speziellen Betriebsstrom, die angegebene Betriebstemperatur sowie die angegebene optische Ausgangsleistung. Die Größe der Abweichung von diesen spezifizierten Daten ist verantwortlich für die entsprechend reduzierte Lebensdauer.

Zur Erhöhung der Lebensdauer von Laserdioden kann es notwendig werden, die Betriebstemperatur – und damit den Spitzenwert der Emissionswellenlänge – zu stabilisieren. Die Emissionswellen-



▲ Abb. 2: Polarisation TM und TE

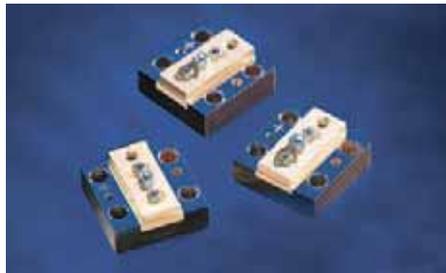
länge verändert sich in Richtung längerer Wellenlänge, während die Temperatur ansteigt. Dieser Anstieg ist materialabhängig. Typische Werte sind:

- 0,18 nm/°C für rote Dioden-Laser,
- 0,28 nm/°C für 8xx nm Dioden,
- 0,34 nm/°C für 9xx nm Dioden,
- 0,4 nm/°C für 14xx nm Dioden.

Als Daumenregel gilt: Die Diodenlebensdauer halbiert sich für jeweils 10°C Erhöhung der Gehäusetemperatur über Raumtemperatur. Umgekehrt erhöht sich die Lebensdauer bei reduziertem Betriebsstrom, niedrigerer Ausgangsleistung und bei geringerer Betriebstemperatur der Diode.

Ausgangsleistung Wie anfangs beschrieben, ist die Ausgangsleistung eines HPDLs zurzeit bei 808 nm auf ca. 100 W pro Barren beschränkt. Werden Laserleistungen von mehr als 100 W benötigt, so können die Barren in 2D-Anordnungen gestapelt werden. Den nicht strahlenden Bereich zwischen den Barren nennt man »Pitch«, also den zentralen Abstand zwischen den Barren entlang des horizontalen Abstands oder der vertikalen Stapelrichtung. Solche 2D-Arrays sind in der Lage, eine sehr hohe CW-Leis-

tung aus äußerst kompakten Abmessungen bereitzustellen. Ein vertikaler 2D-Stapel aus 10 Barren und einem Pitch von 1,8 mm kann in einer Emissionsfläche von 16,2 x 10 mm eine Gesamtleistung von 1 kW emittieren. **Polarisation:** Ein beim Kauf oft unbeachteter Parameter ist die Polarisation des Laserlichtes. Sie kann TE oder TM sein. Bei TE-polarisiertem Licht (Transversal-Elektrisch) schwingt der E-Vektor des elektromagnetischen Feldes in der Wellenleiterebene. Bei TM-polarisiertem Licht steht er senkrecht zur Wellenleiterebene in pn-Übergangsrichtung. **Polarisationsgrad/Reinheit** Je höher der Polarisationsgrad – also die Reinheit – eines Diodenlasers ist, desto höher ist die



▲ Abb. 3: CS-Mount, konvektionsgekühlte Barren

Güte der Strahlung und desto geringer sind die Verluste in der nachfolgenden Strahlführung. Die Polarisations-eigenschaften können aber beispielsweise zu einer Verdopplung der Ausgangsleistung, bei Beibehaltung der Brillanz, führen.

Leistungsskalierung

Mit geeigneten geometrischen und optischen Maßnahmen kann man optische

Ausgangsintensitäten von Barren miteinander verknüpfen und damit die Gesamtleistung wesentlich erhöhen. **Multiplexverfahren** Zum Beispiel mittels »Interleaving« – dem ergänzenden Zusammenfügen von Strahlung –, hierbei wird die Intensitätsverteilung eines Barrens mit dem eines zweiten aufgefüllt.

Die Polarisationskopplung von TE- und TM-Strahlung liefert die direkte Erhöhung der Ausgangsleistung. Substantielle Voraussetzung ist dabei ein außerordentlich hoher Polarisationsgrad. Als dritte Möglichkeit bietet sich das so genannte Wellenlängenmultiplexing an. Hierbei werden unterschiedliche Wellenlängen zusammengeführt und beispielsweise über einen dichroitischen Spiegel gekoppelt. Wichtig ist, dass die Leistungssteigerung ohne zusätzliche Verluste geschieht und dass die hohe Qualität der Strahlung beibehalten wird. Unter Einsatz und Kombination der verschiedenen Verfahren wurden über 25 kW Dauerstrichleistung aus einem einzigen Laserkopf erzielt.

Einbau und Kühlung Konvektionsgekühlte Diodenlaserbarren werden üblicherweise auf eine offene Wärmesenke montiert. Diese kann dann wiederum in ein gekapseltes Gehäuse integriert werden, um sie vor unsachgemäßer Handhabung zu schützen. Abhängig vom Integrationsfaktor und der Komplexität des Designs können entsprechende Gehäuseformen z. B. TECs zur Kühlung und Thermistoren zur Überwachung der Betriebsdaten enthalten. Aktiv wasser-

gekühlte Barren – auf sogenannte Mikrokanalkühler montiert – können ebenfalls in einem solchen Gehäuse untergebracht sein.

Diodenbarren mit niedriger Ausgangsleistung werden mittels sogenannten »CS-Mounts« oder ähnlichen Montagehalterungen konvektionsgekühlt. Bei der CS-Halterung handelt es sich um einen bekannten Industriestandard. Ein einzelner Barren (1 cm x 1 mm) wird hier auf die Anode der Wärmesenke aufgelötet. Typische Maße einer CS-Halterung sind 2,54 x 2,54 x 0,635 cm (L x B x H).

Werden Hochleistungsbarren mit mehr als 50 W Dauerstrich benötigt, wird Wasserkühlung erforderlich, um so die anfallende Verlustwärme abzuführen. Der solide Kupferblock des CS-Mounts wird dann durch eine Montagehalterung mit integrierten Wasserkanälen ersetzt. Der damit erzeugte turbulente Wasserfluss in der Nähe der Diodenbarren-Übergänge leitet die Wärme effizient ab.

Wassergekühlte Wärmesenken sind zum Beispiel Makrokanalkühler aus Kupfer. Sie weisen einen thermischen Widerstand von $\pm 0,5$ bis $0,6^\circ\text{C}/\text{W}$ auf. Mikrokanalkühler aus Kupfer liegen bei $0,2$ bis $0,3^\circ\text{C}/\text{W}$. Bislang noch nicht kommerziell erhältliche Mikrokanalkühler aus Silizium ersetzen das Kupfer durch eine Siliziumplatte mit eingeätzten Mikrokanälen. Damit ist man in der Lage, das Kühlwasser bis auf $100\ \mu\text{m}$ an die Dioden-Übergänge heranzuführen und erhält einen thermischen Widerstand von $0,1$ bis $0,15^\circ\text{C}/\text{W}$.

Optiken/Optionen bei Diodenbarren

Mikrolinsen: Diodenbarren können mit einer Mikrolinse ausgestattet werden, die die gleiche Länge hat wie der Barren selbst. Damit werden alle divergenten Einzelstrahlen in der »Fast-Axis« gleichzeitig gebündelt. Der Durchmesser der kollimierten Emission gleicht ungefähr der Focallänge der Mikrolinse und beträgt gewöhnlich $300 - 1.000\ \mu\text{m}$ FWHM. Die Mikrolinsen werden mit μm -Genauigkeit im Reinraum positioniert und befestigt.

Nach erfolgter »Fast-Axis« (FA)-Kollimation beträgt die Divergenz normalerweise $0,2$ bis 3 Grad FWHM, abhängig von der Art der verwendeten Mikrolinse und der Montagegenauigkeit. Mikrolinsen sind in vielen Formen und Variationen erhältlich, so z. B. mit zirkularem und aspherischem Querschnitt. Einige Hersteller liefern ebenfalls für die »Slow-Axis« (SA)-Diodenbarren mit Mikro-Optik zur Kollimation, allerdings ist das eher eine Ausnahme.

Strahlparameterprodukt und Brillanz

Die Güte der Strahlqualität ist nach wie vor die wichtigste Größe bei der Auswahl von Lasertypen in Bezug auf eine bestimmte Industrieanwendung.

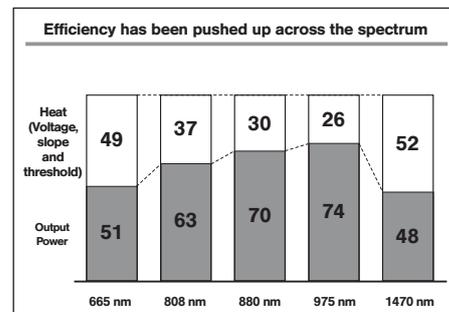
Der Ausgangsstrahl eines Hochleistungsdiodenlasers ist nicht-zirkular, astigmatisch und inkohärent. Aus diesem Grund ist es schwierig, die Strahlparameter direkt zu messen und mit denen von konventionellen Lasern zu vergleichen. Ein Ausweg bietet das sogenannte Strahlparameterprodukt, das in $\text{mm} \times \text{mrad}$ angegeben wird.

Bei Diodenlasern wird dabei das geometrische Mittel zwischen Fast- und Slow-Axis gebildet. Auf diese Weise kann das Anwendungspotenzial und die Grenze für Diodenlaser aufgezeigt werden. Als ein Beispiel soll hier das Schneiden von Metall dienen. Einige kW Ausgangsleistung aus einem CO_2 -Laser sind hierbei zur Trennung nötig. Wichtigste Voraussetzung für einen sauberen Schnitt ist ein Strahlparameterprodukt in der Größenordnung von wenigen $\text{mm} \times \text{mrad}$.

In vielen Publikationen wird heute immer öfter das Strahlparameterprodukt, gekoppelt mit der Ausgangsleistung, als Brillanz eines Lasers bezeichnet. Je höher die optische Ausgangsleistung der Austrittsfläche ist und je kleiner die Divergenz der Strahlung ist, desto höher ist die Brillanz des entsprechenden Lasers. Definiert wird also die optische Leistungsdichte pro Flächeneinheit, verbunden mit einem idealerweise geringen Austrittswinkel.

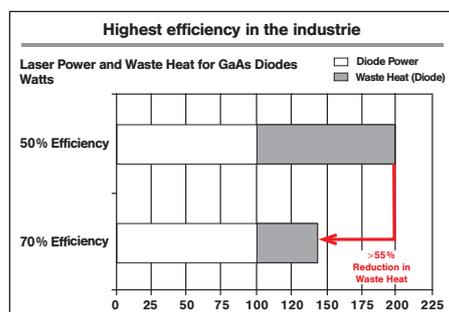
Effizienz bei HPDL

Abb. 4 zeigt die neuesten Resultate bei der Effizienzsteigerung unter Verwendung verschiedener Diodenmaterialien und unterschiedlichen Wellenlängenbereichen.



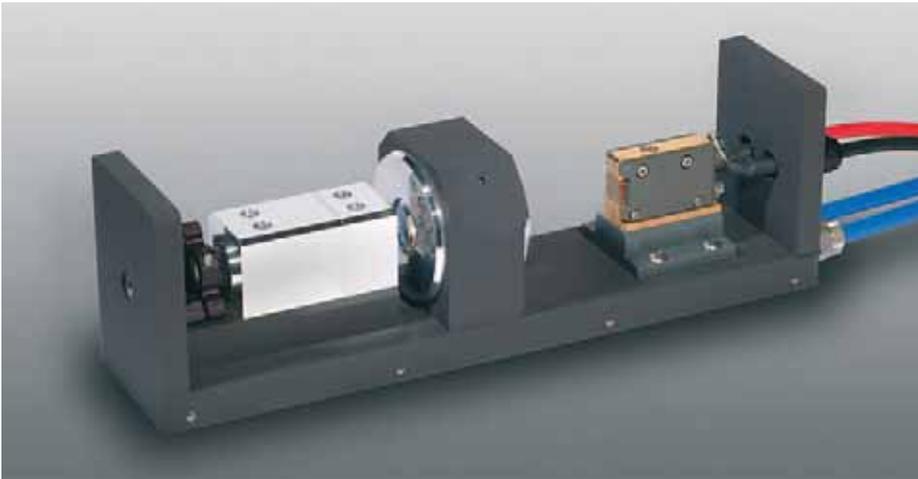
▲ Abb. 4: Effizienz bei verschiedenen Wellenlängen

Anhand von zwei Kennwerten – und einer Ausgangsleistung von $100\ \text{Watt CW}$ aus $808\ \text{nm}$ Barrenmaterial – wird die Verlustwärme in Abhängigkeit der Effizienz in Abb. 5 verdeutlicht. Zum einen bei



▲ Abb. 5: Erhöhung der Effizienz von 50% auf 70% führt zur Reduzierung der Verlustwärme um 55%

dem heute üblichen 50%-Material, zum anderen bei der gesteigerten Effizienz von 70%. Die Kernaussage hierbei ist: Bei Erhöhung der Effizienz um 20% wird die Verlustwärme bei gleicher Ausgangsleistung um 55% verringert. Dieses Resultat wird zur essenziellen Bedeutung bei portablen Lasermarkiersystemen. Hierbei kann der Betriebsstrom – unter Beibehaltung der ursprünglichen Ausgangsleistung – deutlich gesenkt werden. Die Folge ist eine wesentlich längere Batteriebetriebsdauer. Alternativ bietet sich die Verwendung von leichteren Akkus an, was wiederum zu einer wesentlichen Erleichterung des Tragekomforts und der Bedienung führt.



▲ Abb. 6: Neuer Laser – LZH / Stack ohne Deckel

Hochleistungs-Festkörperlaser

Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung neuer, hocheffizienter Festkörperlasersysteme für die industrielle Anwendung. So werden beispielsweise am LZH effiziente, neuartige, endgepumpte Lasersysteme entwickelt, in denen neueste Diodentechnologie verwendet wird. Zur Realisierung effizienter Anregung von Nd:YAG-Lasern werden hier Laserdioden hoher Brillanz mit neuen Laserstabdesigns kombiniert.

Des Weiteren bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, sehr kleine und dabei leistungsstarke Laserköpfe zu realisieren. Kompakte Laser hoher Leistung haben ein hohes Potenzial bei industriellen Anwendungen, z. B. zum Schneiden und Schweißen beim Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt und in der Glasindustrie. Die Leistungsskalierung endgepumpter Stablaser ist jedoch aufgrund von hohen Temperaturen und mechanischen Spannungen im Laserstab begrenzt. Diese Einschränkung kann jedoch durch den Einsatz innovativer Laserstäbe teilweise aufgehoben werden. Die Stäbe bestehen hierbei aus mehreren Segmenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, die zu einem Stab zusammengesetzt sind. Dadurch wird eine dreimal höhere Leistung als bei einem homogenen Laserstab möglich. Diese Pumpleistung kann jedoch nur mit HPDLs hoher Brillanz erzeugt und auch zugeführt werden. Mit einem aus 8 Barren bestehendem HPDL wird mit diesem System eine Ausgangsleistung von

413 W bei 1.064 nm erreicht. Dieser endgepumpte Hochleistungs-Nd:YAG-Laser hat somit dieselben optischen Eigenschaften wie ein konventioneller, seitlich gepumpter Laser, aber eine deutlich höhere optisch-optische Effizienz von 58% bei einer Gesamtgröße von nur 22 x 9,5 x 9,5 cm³.

Künftige Entwicklungen

Ziel ehrgeiziger Entwicklungen ist es, die Brillanz von HPDLs in Kürze ganz wesentlich zu steigern und damit neue Anwendungsbereiche für direkte Hochleistungsdiodenlaser zu erschließen. Neue Lasersysteme nutzen unter anderem Defraktive Optische Elemente (DOEs) zur Steigerung des Strahlparameterproduktes.

Die Zukunft der Laserbranche bleibt also weiterhin spannend, besitzt aber sicherlich wesentlich mehr Brillanz.

Autoren:

Ingolf Dueckminor
Repräsentant der nLight Corporation
85386 Eching/München
Tel.: 089/37 00 14 77 · Fax: 089/32 71 48 87
E-Mail: ingolf.dueckminor@nlight.net
www.nlight.net

Maik Frede
Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover
Tel.: 05 11/2 78 82 35 · Fax: 05 11/2 78 81 00
E-Mail: m.frede@lzh.de
www.lzh.de