

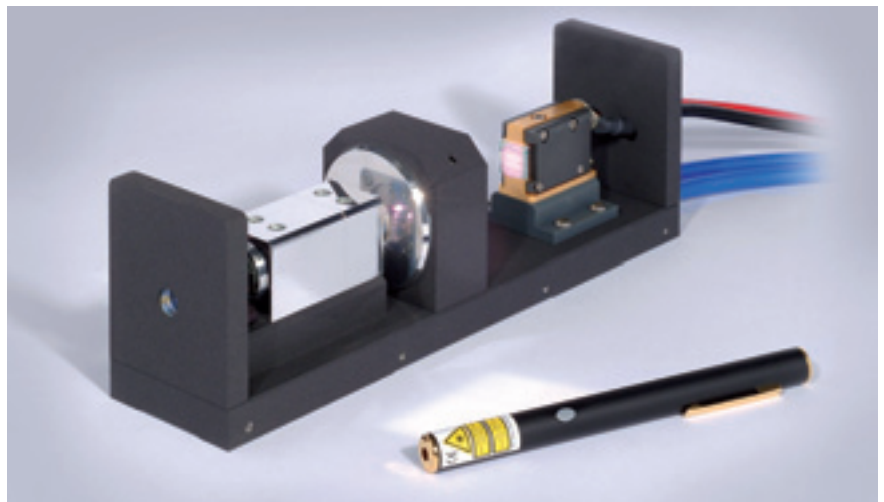
HLDL mit Zukunftsperspektiven

Mit dem Ziel, neue Märkte in den Bereichen Display, augensichere Kommunikation, atmosphärische Messtechnik, Laser-Radar, photodynamische Therapie, Dermatologie und anderen Medizinfeldern zu erschließen, erweitert nLight den Wellenlängenbereich von Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) konsequent von 635 nm bis 2070 nm und erhöht dabei gleichzeitig die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit.

Die optischen Ausgangsleistungen aus einem 1-cm-Diodenlaserbarren erhöhen sich rapide bei allen nutzbaren Wellenlängen, auch außerhalb des Standardbereiches von 800 nm bis 980 nm. Der Wellenlängenbereich wurde nun durch effizientes Material (6xx, 14xx, 17xx, 19xx und 20xx) erweitert. Erreichte Spitzenwerte sind: 90 W Dauerstrich (cw) bei 660 nm, 37 W bei 1910 nm und 25 W bei 2070 nm. Darüber hinaus belegen frühere Demonstrationen 100 W cw bei 1470 nm. Aktuelle Steigerungen des Wirkungsgrades, in Verbindung mit neuer Fertigungstechnologie zur Reduzierung des thermischen Widerstandes bei den verwendeten Wärmesenken, führen zu einer weiteren Erhöhung der Ausgangsleistung bei Diodenlaserbarren.

Wichtigste Neuerungen sind

- die Verringerung der Betriebsspannung des Diodenlasermaterials durch eine gezielte Optimierung der Einzelspannungsabfälle an der Hetero-Barriere des Halbleitermaterials sowie
- die Reduktion des thermischen Widerstands durch Optimierung der Mikro Kühlerperformance. Das Ergebnis sind Barren mit 100 W bei 975 nm, mit einer Effizienz von >74 % und einem thermischen Widerstand von $\leq 0,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$.



Von Milliwatt zu Kilowatt – Hochleistungsdiodenlaser mit großen Potenzialen.

Der Hersteller nLight ist davon überzeugt, dass keine grundsätzliche Barriere besteht, um die Ausgangsleistung aus einem einzelnen 1-cm-Laserbarren in Zukunft – bei gleich bleibender hoher Zuverlässigkeit – auf mehrere hundert W zu erhöhen.

Optimierung der Grundlagen

Dieser Technologiereport will die rapiden Veränderungen in Leistungsfähigkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit von Hochleistungs-Barrensystemen aufzeigen. Gleichzeitig wird aber auch auf bestehende Grenzen des derzeit technisch Machbaren hingewiesen. Schwerpunkte bilden daher Effizienz, Ausgangsleistung und der erweiterte Wellenlängenbereich bei HLDL. Die kommerziell verfügbaren Wellenlängenbereiche wurden durch nLight maßgeblich erweitert und erstrecken sich aktuell vom sichtbaren 6xx nm Bereich über 79x nm – 88x nm, 9xx nm, 14xx nm, den augen-

sicheren 17xx nm bis hin zum 20xx nm Bereich.

Die Bewertung von HLDL ist orientiert an der hohen Zuverlässigkeit. Das wichtigste Kriterium ist jedoch die Effizienz. Die Differenz zwischen optischer Ausgangsleistung und elektrischer Eingangsleistung ergibt die Verlustleistung in W. Diese verbleibt in Form von Restwärme im Halbleitermaterial und muss mittels externer Kühlung abgeführt werden. Eine hohe Effizienz und damit - als Resultat - eine geringe Restwärme ist u. a. ein anerkanntes Maß für die Güte eines modernen Hochleistungslaserbarrens. Je geringer die Restwärme, desto geringer der Stress, desto höher die Qualität und damit die Güte des Lasermaterials.

Ein Anwendungsbeispiel für Konstruktion und Fertigung eines hocheffizienten, überaus kompakten DPSS-Lasers mit einem Wirkungsgrad von 58 % lieferte das Laser Zentrums Hannover. Die resultierende Ausgangsleistung be-

Die Autoren



Ingolf Dueckminor ist Mitarbeiter der nLight Corporation, München.



Maik Frede ist Mitarbeiter des Laser Zentrums Hannover e.V., Hannover.

strahlquellen

trägt mehr als 400 W bei 1064 nm aus einem Laserkopf mit den Maßen von nur 22 x 9,5 x 9,5 [cm]. Die Ausgangsleistung ist hierbei begrenzt durch die Pumpleistung und soll in weiteren Experimenten auf ca. 1 kW erhöht werden.

F&E-Schub mit vielen Auswirkungen

Angespornt durch die positiven Ergebnisse in Forschung und Entwicklung erhalten Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) einen fundamentalen Schub. Unter zunehmend anspruchsvolleren Rahmenbedingungen liefern HLDL die notwendige optische Leistung für neue, innovative Industrieanwendungen. Durch ständig steigende Ausgangsleistung, erhöhte Zuverlässigkeit und steigende Stückzahlen verringern sich die Produktionskosten für die HLDL maßgeblich (Euro/W). Quasi beflügelt aufgrund dieser Entwicklungen werden HLDL in neuen Märkten eingesetzt, z. B. in der Verteidigung, in Industrie, Graphik/Display, Medizin und Konsumelektronik, welche früher aus Kostengründen nicht – oder nur sehr eingeschränkt – für HLDL zugänglich waren. Beispielsweise werden Laserbarren mit bis zu 64 lateral zusammengefassten Einzelemittlern immer häufiger und in immer größeren Stückzahlen verwendet – sei es zum optischen Pumpen von Festkörperlaser oder für die Direktanwendung mit mehreren kW Ausgangsleistung. Neue Strahlformungstechni-

ken – und die sich daraus ergebende Brillanz – erweitern ebenfalls die Anwendungsbereiche für industrielle Direktiodensysteme. Weiterhin lassen sich vermehrt Bestrebungen erkennen, die bewährte, gute, alte Bogenlampe durch leistungsfähige und zuverlässige HLDL zu ersetzen. HLDL haben im Vergleich eine deutlich höhere Lebensdauer (>10.000 h) als Bogenlampen mit einigen 100 h und verlängern daher die Wartungszyklen. Auch die Gesamteffizienz von Festkörperlaser lässt sich durch das Pumpen mit HLDL von 1 bis 3 % (lampengepumpt) auf 10 bis 30 % erhöhen. Die Kosten-Nutzenrechnung geht unter Einbeziehung der Lebensdauer und Effizienz deutlich in Richtung HLDL, auch wenn diese aufgrund der höheren Anschaffungskosten bisher noch zögerlich eingesetzt werden. Durch eine weitere Reduzierung der Kosten pro W wird dies jedoch nur noch eine Frage der Zeit sein.

Super High Efficient Diode Laser Sources (SHEDS)

Effizienz ist das Gebot der Stunde, was auch die amerikanische DARPA »SHEDS«-Förderinitiative belegt. Das SHEDS-Programm ist eine der so genannten »Win-Win Situationen«, in denen das Militär Zugang zu neuen Technologien erhält und der kommerzielle Sektor von leistungsstärkeren und erschwinglichen Bauteilen profitiert. Ultimativ bedeutet das für den kommerziellen Bereich den Einsatz einer größeren Anzahl von Einzelemittlern mit hoher Leistung, von batteriebetriebenen Versionen für die Photodynamische-Therapie (PDT), zu Akne-Behandlungen, bei Tattoo- und Haarentfernungen bis hin zur mobilen Laser-Chirurgie.

Nicht nur die Reduzierung der Bauteilgröße ist ein Nutzen für die Verbraucher. Die Markteinführung von leistungsfähigeren Produkten führt ebenfalls zu kürzeren Behandlungszeiten mit medizinischen Geräten und einem höheren Durchsatz in der Produktion. Eine höhere Ausgangsleistung pro Barren reduziert die Kosten pro W, was ebenfalls die neuen Märkte stimuliert. Sieht



Graph 1 zeigt die neuesten Resultate bei der Effizienzsteigerung der HLDLs über den jetzt verfügbaren Wellenlängenbereich.

man sich die kommerziellen Bauteile an, so hat sich das Verhältnis Preis/W von ca. 2.000 US-D in den achtziger Jahren auf heutzutage weniger als 30 US-D verringert.

Gerade aus diesem Grund werden Diodenlaser aktuell auch für den weiteren Einsatz in der Automobilzulieferindustrie und für künftige TV-Anwendungen berücksichtigt.

Effizienz der HLDL

Motiviert durch die deutliche Verbesserung von Leistung und Effizienz sucht nLight nach den Grenzen des Möglichen in der Diodenlasertechnologie. Die Wissenschaftler haben ein thermisches Modell erarbeitet, das auf bestehenden Charakteristiken des Barrens im Zusammenspiel mit seiner Montageplattform basiert. Wie das Ergebnis zeigt, ist eine Ausgangsleistung von mehreren hundert W durchaus in erreichbare Nähe gelangt und wird auch in absehbarer Zeit erreicht werden. Mehr noch: das Team von nLight konnte ein Modell entwickeln, das alle Betriebsparameter aufzeigt, die auch einen 1-kW Laser zur Realität werden lassen könnten. Kritische Parameter sind dabei die Effizienz, die optische Leistungsdichte und der thermische Widerstand.

Bei einer gleich bleibenden Ausgangsleistung von 100 W cw aus unterschiedlichem 808-nm-Barrenmaterial wird die Verlustwärme in Abhängigkeit der Effizienz in Graph 2 verdeutlicht, und zwar bei dem heutzutage üblichen 50 % Material und bei der gesteigerten Effizienz von 70 %. Die Kernaussage hierbei ist: Bei Erhöhung der Effizienz um 20 % wird die Verlustwärme bei gleicher Ausgangsleistung um >50 % verringert. In der Praxis führt dies für den Anwender zu einer erheblich geringeren Verlustwärme, wesentlich geringeren Temperaturen und mechanischen Beanspruchungen im Bauteil und damit zu einem stabileren Betriebsverhalten, größerer Zuverlässigkeit, einer höheren Ausgangsleistung und einer längeren Lebensdauer.

Die Bedeutung dieses Resultats ist essenziell für portable Lasermarkiersysteme

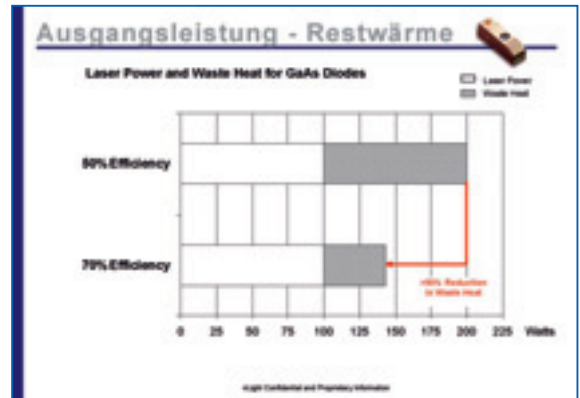
oder für portable medizinische Lasergeräte, z. B. zur Haarentfernung. Hierbei kann der Betriebsstrom - unter Beibehaltung der ursprünglichen Ausgangsleistung - deutlich gesenkt werden. Die Folgen sind eine wesentlich längere Batteriebetriebsdauer bzw. kompaktere Baugrößen. Alternativ bietet sich die Verwendung von leichteren Akkus an, was wiederum zu einer wesentlichen Optimierung des Tragekomforts und der Bedienung führt.

Bestwerte bei Laserbarren

Unter Verwendung des im MOCVD-Verfahren hergestellten Barrenmaterials (800 bis 980 nm), eines 3-mm-Resonators mit 80 % Füllfaktor und optimierten Mikrokanalkühlern bei einer Kühlwassertemperatur von 5 °C konnten bei nLight mehr als 400 W Spitzenleistung im Dauerstrichbetrieb nachgewiesen werden.

Konzentration auf Schlüsselparameter

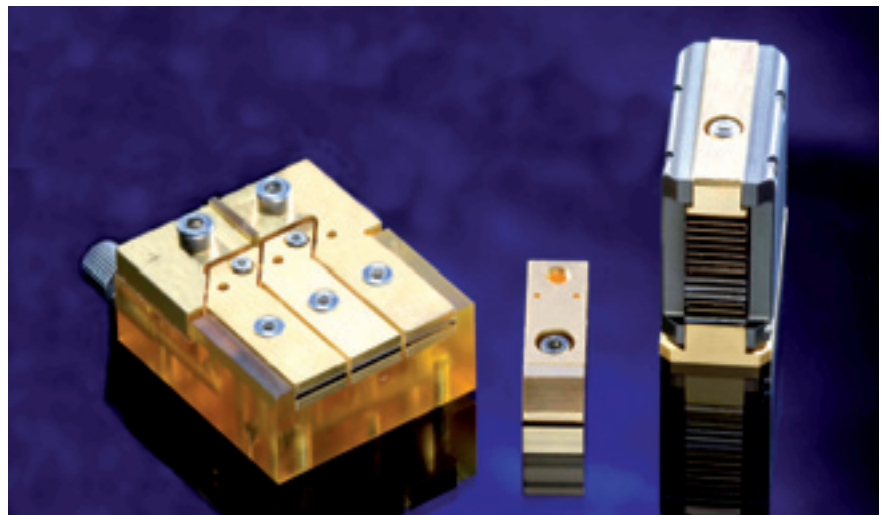
Ein hoher Wirkungsgrad ist für das Erreichen hoher Ausgangsleistungen absolut wichtig. Bei Einzelemittern hat nLight im Laborbetrieb 76 % demonstriert. Ein wichtiger Schritt, durch den



Graph 2

jetzt die 500 W Barren in erreichbare Nähe rücken.

Damit diese hohe Effizienz erreicht werden kann, müssen alle Anstrengungen auf die Schlüsselparameter konzentriert werden. Besonders wichtig ist die Betriebsspannung. In einem fundamentalen Ansatz wird die mögliche Betriebsspannung eines Diodenlasers durch den Bandabstand (Band-Gap) der Quantenquelle (Quantum-Well) bestimmt. Gemeint ist die minimal benötigte Vorspannung, um die Diode einzuschalten. In der Realität muss die angelegte Spannung jedoch viel höher sein, da die Ladungsträger durch zu viele unterschiedliche Lagen transportiert werden müssen, bevor sie die Quantenquelle erreichen. Dies führt zu einem höheren Widerstand. Die Verbindungen zwischen den sehr verschiedenen Halbleitermaterialien (Hetero-Barrieren) liefern einen wesentlichen Beitrag zur Betriebsspannung. Durch ein erweitertes Verständ-



nis des Wachstumsprozesses und der besseren Kontrolle der Gase in der Reaktorkammer, hat nLight das Abscheiden und damit den elektrischen Kontakt zwischen den verschiedenen Lagen optimiert. Das Absenken des Spannungsabfalls lieferte dabei die entscheidende Erhöhung der Diodeneffizienz.

Grenzen der Leistungsfähigkeit

Mit dem vertikal-integrierten Verfahren (»Alles unter einem Dach«) bei der HLDL-Fertigung besitzt nLight einen entscheidenden Vorteil in Bezug auf den sehr kritischen und kommerziell sehr sensiblen Fertigungsprozess. Was die Details angeht, gibt sich nLight sehr zurückhaltend, erklärt aber, dass das angewandte Passivierungsverfahren einen sicheren Schutz bis $>140 \text{ mW}/\mu\text{m}$ gezeigt hat. Vermessen wurden hierbei Einzelemitter mit $50 \mu\text{m}$ Streifenbreite, bei 800 nm . Eine solche Diode weist üblicherweise bei 7 W Dauerstrich einen »thermischen Roll-Over« auf, der mit $140 \text{ mW}/\mu\text{m}$ angegeben wird. Zum Vergleich liegt der »Roll-Over« bei Dioden mit $200 \mu\text{m}$ Streifenbreite bei ca. 12 W . Diese Einzelemitter werden mit 7 W Dauerstrich-Ausgangsleistung spezifiziert und sind seit einiger Zeit kommerziell erhältlich. Höhere Ausgangsleistungen sind in Vorbereitung.

Optische Leistungsdichte – COMD

Trotz der Vorteile einer hohen Effizienz hat die gesteigerte Leistungsfähigkeit auch ihren Preis. Bei einer kritischen Ausgangsleistung stellt COMD (catastrophic optical mirror damage) das eigentliche Problem in Bezug auf einen zuverlässigen Betrieb dar. COMD entsteht an der Oberfläche der Laserfacette (Schleiffläche), die gleichzeitig als Spiegel wirkt. Der Fehlermechanismus wird getriggert, wenn die Facettenoxydation beginnt oder wenn während des Fertigungsprozesses irrtümlich statische Defekte implementiert wurden. Im Betrieb absorbieren sie dann das Licht, führen zu so genannten »Hot-Spots« und zerstören die Facette in Millisekunden. Dabei handelt es sich um einen sehr häufigen und durchaus typischen Fehler bei HLDL. Um dem vorzubeugen, schützen führende Diodenhersteller ihre Produkte mit einer eigens hierfür entwickelten Passivierungslage. Sie wird auf die rohe Frontfacette aufgebracht und verhindert das COMD. Die Leistungsfähigkeit einer Facette wird in maximal zulässiger, optischer Leistungsdichte angegeben ($\text{mW}/\mu\text{m}$). Außergewöhnlich bei nLight ist der weite Bereich der mit dieser speziellen Passivierungstechnologie abgedeckt wird. Diese bietet einen verlässlichen Schutz für den gesamten Wellenlängenbereich, von 635 nm bis zu 2070 nm .

Thermischer Widerstand

Die aktuell von nLight entwickelten Barren weisen bei 100 W und 975 nm derzeit eine Effizienz von 73% auf und werden mittels Mikrokanalwärmesenken gekühlt. Einzelemitter erreichen sogar eine Effizienz von 76% . Bei gleichzeitiger Opti-

mierung der Parameter von Wärmesenken und des Lötprozesses konnte nLight den thermischen Widerstand auf 0,2 K/W absenken – ein sehr wesentlicher Unterschied zu dem Wert von 0,35 K/W, der in heutigen kommerziell erhältlichen Produkten erreicht wird.

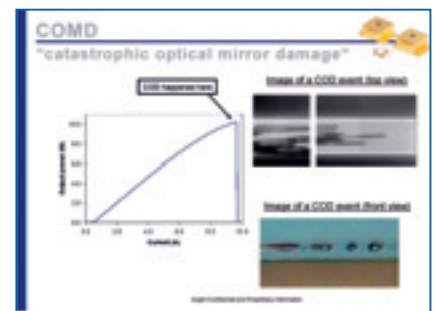
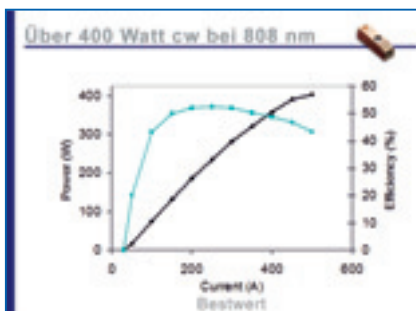
Dies bedeutet, dass die Temperatur eines solchen neuen Bauteils nur noch um 0,2 K/W ansteigt, und zwar als Ursache der Verlustwärme, die im Inneren des Diodenmaterials während des Betriebs entsteht. Bei der Erzeugung von 100 W optischer Ausgangsleistung und dem Verbleib von 27 W an Verlustwärme im Bauteil wird die Temperatur trotzdem äußerst gering gehalten. Bei einem thermischen Widerstand von 0,2 K/W beträgt der Temperaturanstieg also umgerechnet nur noch ca. 8 °C.

Die Leistungsskalierung endgepumpter Stablasers ist aufgrund der hohen Temperaturen und mechanischen Spannungen im Laserstab begrenzt. Diese Einschränkung kann jedoch durch den Einsatz innovativer Laserstäbe teilweise aufgehoben werden. Der Laserstab besteht hierbei aus mehreren Segmenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, die zu einem Stab zusammengesetzt werden. Dadurch wird die Zuführung einer bis zu dreimal höheren Pumpleistung als bei einem konventionellen Laserstab möglich. Die benötigte Pumpleistung kann jedoch nur mit HLDL hoher Brillanz erzeugt und zugeführt werden. Mit einem aus 8 Barren bestehendem HLDL wird mit diesem System eine Ausgangsleistung von mehr als 400 W bei 1.064 nm erreicht. Dieser endge-

kopfes als auch der HLDLs demonstriert werden. Durch Kombination der vorgestellten Konzepte ist es möglich, Laserausgangsleistungen von mehr als 1 kW aus einem Laserkopf kleiner als ein Schuhkarton zu erzeugen.

Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit von Diodenlaserbarren erhöht sich zunehmend bei allen kommerziell erhältlichen Wellenlängenbereichen. Damit wird die Erschließung neuer Anwendungen möglich. Darüber hinaus führt es jedoch auch zur weiteren Leistungsoptimierung bei bestehenden Laseranwendungen. Durch die sorgfältige Auswahl von hocheffizienten HLDL, neuen Hochleistungskühlsystemen und innovativer Fassettenpas-



Anwendungsbeispiel: Hochleistungsfestkörperlaser

Ein Beispiel für den Einsatz neuartiger HLDL ist die Kombination mit innovativen Laserkonzepten für die industrielle Anwendung. So werden z. B. am Laser Zentrum Hannover (LZH) effiziente, neuartige, endgepumpte Lasersysteme entwickelt, in denen neueste Diodentechnologie verwendet wird. Zur Realisierung effizienter Anregung von Nd:YAG-Lasern werden hierbei Laserdioden hoher Brillanz mit neuen Laserstabdesigns kombiniert. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, sehr kleine und dabei leistungsstarke Laserköpfe zu realisieren. Kompakte Laser mit hoher Leistung haben großes Potenzial bei industriellen Anwendungen, z. B. zum Schneiden und Schweißen im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt und in der Glasindustrie.

pumpte 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 [cm].

Die Ausgangsleistung dieses Lasersystems ist bisher nur durch die zugeführte Pumpleistung begrenzt. So wird für eine weitere Leistungsskalierung zurzeit ein Experiment mit Kilowatt Ausgangsleistung aufgebaut, bei welcher der Laserkopf nur geringfügig größer ausfallen wird. Eine weitere Leistungsskalierung ist durch die Verwendung der vorgestellten langwelligeren Laserdioden möglich. Unter Verwendung von 885 nm HLDL zum Pumpen von Nd:YAG kann ohne weitere Änderungen des Laserkopfes die maximale Pumpleistung des Laserkristalls um 30 % erhöht werden. Weiterhin konnte eine bessere Effizienz des Laser-

sivierungstechnologie sind heutzutage über 400 W Ausgangsleistung im Bereich von 800 bis 980 nm erreichbar. Die größte Herausforderung ist das Beherrschen der verbleibenden Restwärme im Halbleitermaterial. Optimierungen bei Effizienz und Kühlung des Barrenmaterials schaffen hierbei Abhilfe.

Die Steigerung der Effizienz auf 76 % bei Laserbarren mit einer Zentralwellenlänge von 795 nm wurde ermöglicht durch mehrjährige, staatliche, amerikanische Förderung innerhalb des SHEDS-Programms. Gezielte Fördergelder erhielten nLight, JDSU und Alphalight.

KENNZIFFER 083

nLight Corporation
www.nLight.net
 Laser Zentrum Hannover e.V.
www.lzh.de