

Effizienter, aber weniger komplex

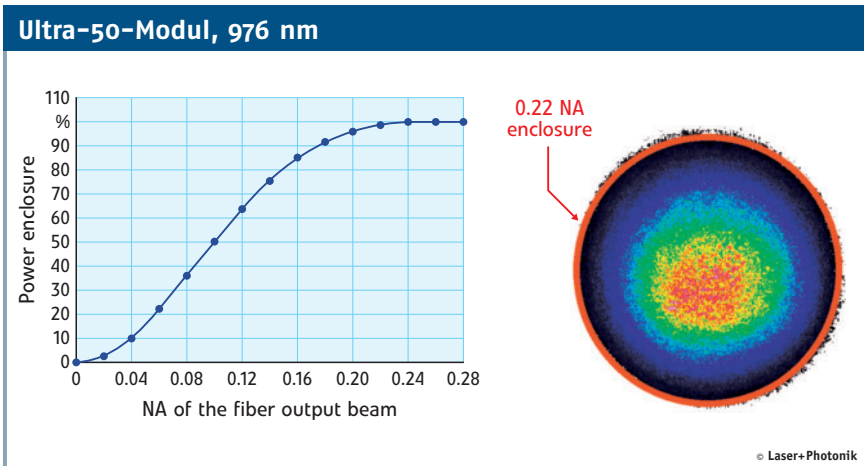
DIODENLASER MIT VERBESSERTER SPEKTRALER UND RÄUMLICHER BRILLANZ

Fortschritte in der Halbleitertechnik haben zu kompakteren Lasersystemen geführt; sie haben die Effizienz, die Leistung und die Strahlqualität deutlich erhöht. Daneben reduzieren die Neuentwicklungen die Kosten für das Wärmemanagement ebenso wie die Komplexität der Lasersysteme.

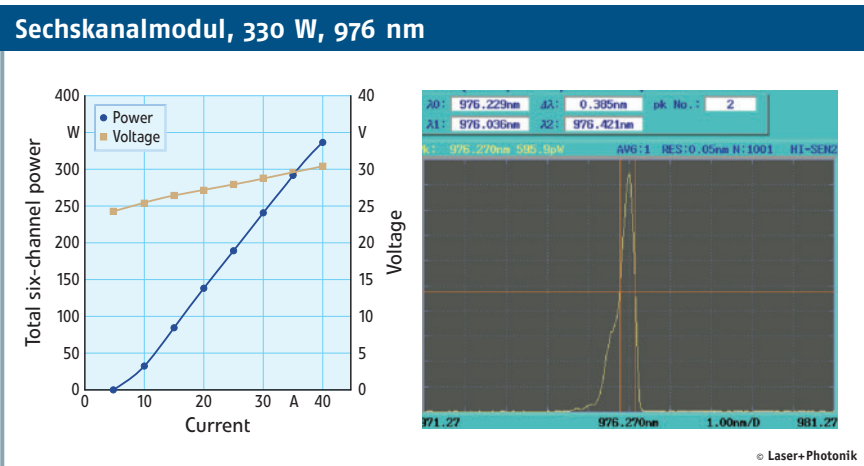
PAUL RUDY
TOM STEELE
LAURENT VAISSIÉ

Das Laserpumpen mit Pumpquellen hoher Brillanz bietet mehrere Vorteile: Zunächst ermöglicht es bei Festkörperlaser eine größere Verstärkung, eine bessere Strahlqualität und ein effizienteres Pumpen, da ein kleinerer Fokus oder ein längerer Arbeitsabstand beim Endpumpen realisiert werden kann. Das Pumpen von Nd:Vanadat-Kristallen bei 888 nm liefert beispielsweise eine geringe und isotrope Absorption, mit gleichen Koeffizienten für beide Polarisationszustände. Das reduziert die thermische Last und ermöglicht eine flexible Abgabe des Pumplichts durch eine Multimodefaser – ohne Verluste bei der Konversionseffizienz [1], also dem Verhältnis aus optischer Ausgangs- und elektrischer Eingangsleistung. Wenn man den niedrigeren Absorptionskoeffizienten bei 888 nm berücksichtigt, erfordert dieser Ansatz eine Pumpquelle mit hoher räumlicher Brillanz, um ein modenangepasstes Pumpen – zum Zwecke des Endpumpens längerer Kristallstäbe – zu erreichen.

Eine solche Quelle ist das fasergekoppelte 100-W-, 400- μm -Modul von QPC. Dessen räumliche Brillanz bei Wellenlängen im nahen IR beruht auf neuen Facetenschutztechniken. Diese hat QPC auf der Basis seiner »Re-Growth«-Technik entwickelt, die das Risiko der optisch induzierten thermischen Zerstörung (Catastrophic

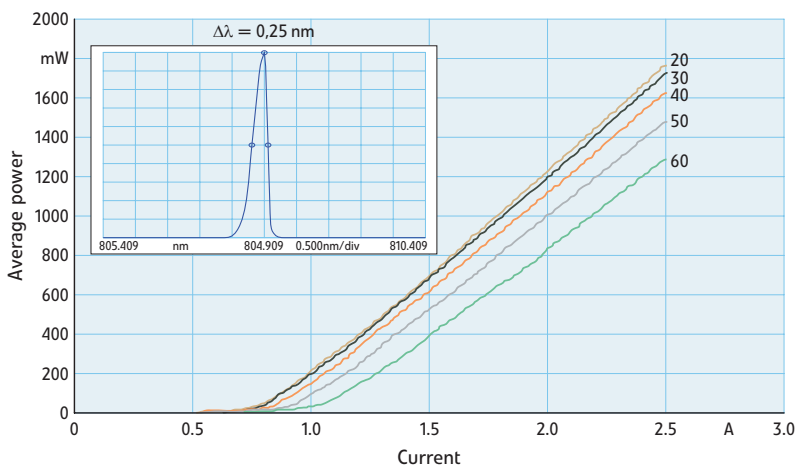


1 NA-Messung vom 200- μm -Faserkernausgang eines QPC-Ultra-50-Hochleistungsmoduls bei 976 nm. Die Messungen zeigen, dass eine zu vernachlässigende Leistung außerhalb der spezifizierten NA von 0,22 liegt, wenn man von einem Messfehler von 1 Prozent ausgeht



2 Die On-Chip-Gitterstabilisierung von Laserdioden ermöglicht hohe Leistung, schmale Bandbreite und eine verringerte Temperaturempfindlichkeit. Hier ist ein Sechskanalmodul dargestellt, das 330 W bei 976 nm mit < 0,5 nm Bandbreite für das Faserlaserpumpen produziert

Wellenlängengekoppelter Einzelemitter, 808 nm



3 Leistung eines wellenlängenstabilisierten Einzelemitters bei 808 nm als Funktion der Temperatur. Die Stabilisierung wird bis 60 °C beibehalten

Optical Damage, COD) bei kurzen Wellenlängen reduziert. Sie ermöglicht den Quasi-CW- (QCW-) Betrieb der fasergekoppelten Bauteile mit bis zu 100 W aus einer 400- μ m-Kern-Faser, die von einem Einzelbaren mit niedrigem Füllfaktor bei 808 nm gespeist wird.

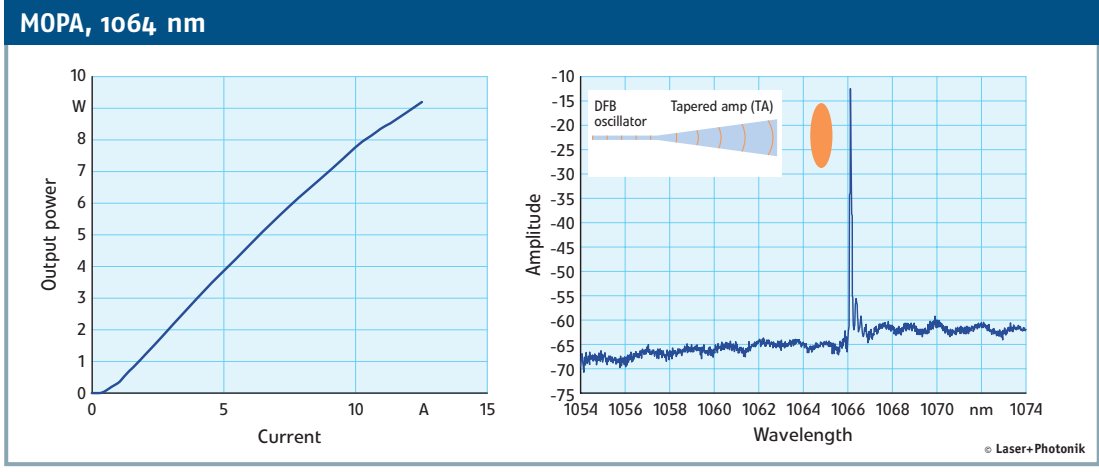
Für Faserlaser und -verstärker werden Pumpen normalerweise mit Pump-Combinern oder verjüngten Faserbündeln mit einer begrenzten Schenkelzahl kombiniert. Das erhöht den Bedarf an höherer Leistung pro Pumpkanal bei populären Wellenlängen wie 792, 915 und 976 nm, während der Bedarf an Faserlasern mit höherer Repetitionsrate und höherer mittlerer Leistung steigt. Bei den kürzeren Wellenlängen haben sich Pumpdioden, die zirka 792 nm emittieren, als geeignete Kandidaten für das Pumpen der immer beliebteren Thulium-Faserlaser erwiesen. Diese Laser eignen sich beispielsweise für medizinische Zwecke und militärische Anwendungen. Heute sind Pumplaser mit großer Brillanz, die an 100- μ m-Fasern gekoppelt sind, von QPC mit bis zu 40 W Ausgangsleistung (Cladding-free , also bezüglich des Faserkernmaterials) bei 792 nm und mit bis zu 45 W bei 976 nm lieferbar. In Zusammenarbeit mit Faserlaserherstellern hat QPC einen neuen Standard gesetzt, was die räumliche Brillanz aus fasergekoppelten Modulen, bezogen auf die Cladding-free-Leistung, bei allen Faserkerndurchmessern betrifft. Damit erhöht sich die Konversionseffizienz, und das Risiko der Beschädigung nimmt für die Pump-Combiner ab (**Bild 1**).

Athermisches Laserdiodenpumpen

In verschiedenen aktuellen Anwendungen für Festkörper- und Faserlaser ist es wichtig, die Stabilität und die spektrale Einengung der Pumplaserdiode zu verbessern. So lässt sich die Effizienz des Diodenpumpens mit einer Temperaturstabilität kombinieren, die früher nur mittels Lampenpumpen erreichbar war.

Beispielsweise wird bei Nanosekunden- und ultraschnellen Lasern hoher Pulsspitzenleistung aus Yb- oder Er:Yb-basierten Materialien eine hohe Absorption pro Einheitslänge bei 976 nm bevorzugt, um Nichtlinearitäten zu minimieren und die Konversionseffizienz zu verbessern [2]. Das Absorptionsband bei 976 nm ist jedoch schmal und fordert von den Pumpdioden eine exakte Zentralwellenlänge, eine schmale Bandbreite sowie Temperaturstabilität. Verschiedene sehr vielversprechende Materialien für Hochleistungs- Thin-Disk -Laser, wie etwa Yb:Lu₂O₃- oder Alkali-Laser, benötigen ebenfalls derartige Pumpdioden, um ihr Potenzial auszuspielen zu können.

In CW-Hochleistungsanwendungen streben die Systementwickler eine Reduzierung des Quantendefekts an, also eine geringere Differenz zwischen Emissions- und Absorptionswellenlänge des Lasers. Laser, die mit einem reduzierten Quantendefekt arbeiten, laufen mit weniger Wärmeverlust, einem geringeren COD-Risiko und besserer Konversionseffizienz. Häufig weisen die bevorzugten Wellenlängen je-



4 9 W CW aus einem 1064-nm-MOPA. Diese Architektur ermöglicht eine räumliche und longitudinale Einzelmode und den wellenlängenstabilisierten Betrieb bei hoher Leistung

▶ doch schmale Absorptionsbänder auf – es werden also temperaturunempfindliche Pump Laser mit genauer Zentralwellenlänge und schmaler Bandbreite benötigt.

Der Quasi-CW-Modus wird bei den Entwicklern von Hochleistungslasersystemen ebenfalls immer populärer: für den Betrieb mit niedriger Wiederholrate. Dieser Modus ermöglicht es, die verstärkte spontane Emission zu minimieren und eine höhere Pulsspitzenleistung aus den Laserdioden herauszuholen, die ansonsten thermisch begrenzt wäre. Da jedoch die Stromstärke an der Anstiegsflanke des elektrischen Impulses zunimmt, steigt die spektrale Bandbreite der Pumpdiode (aufgrund eines signifikanten Anstiegs der Laser-Sperrschichttemperatur). Bei mehreren Mikrosekunden langen Impulsen kann dieser Effekt dazu führen, dass sich die Emissionsbandbreite der Pumpdiode über die

Grenzen des Absorptionsbands des aktiven Lasermediums hinweg verschiebt, was die Effizienz des Gesamtsystems verringert.

Letztendlich fließen herkömmliche diodengepumpte Festkörperlaser in Anwendungen ein, die einen Betrieb unter widrigen Umgebungsbedingungen erfordern – im Verteidigungssektor oder in mobilen Anwendungen der Unterhaltungselektronik. Daher müssen Pumpdioden im Betrieb trotz Temperaturschwankungen von bis zu 80 °C eine exakte Zentralwellenlänge behalten. Systeme, die auf herkömmlichen Laserdioden basieren, können die temperaturunabhängige Leistung lampengepumpter Systeme nicht liefern. Stattdessen sind präzises Wärmemanagement und eine genaue Temperaturregelung der Diode erforderlich, um die Emissionswellenlänge exakt abzustimmen, und selbst mit dieser Regelung sind die Dioden-

linienbreiten unzureichend schmal, so dass die Gesamtsystemeffizienz abnimmt und mehr Verlustwärme entsteht. Während die Anzahl der Pumpdioden mit der durchschnittlichen Ausgangsleistung des Festkörperlaser zunimmt, verhindern die unterschiedlichen Zentralwellenlängen der Pumpdioden ein einfaches Kühlsystem – einige Dioden müssen gekühlt und andere erwärmt werden, um die beabsichtigte Absorptionswellenlänge zu erreichen. Schließlich bevorzugen verschiedene neue Märkte, einschließlich medizinischer Anwendungen und mobiler Laserdisplays, passiv gekühlte Lösungen, wann immer sie möglich sind, um die Kosten zu senken und Geräusche sowie den Gesamtplatzbedarf zu reduzieren. Daher ist es äußerst wichtig, die Stabilität und die spektrale Einengung von Hochleistungslaserdioden zu verbessern, sodass sie das Effizienzpotenzial des Dio-

denpumpens und die Temperaturunabhängigkeit des Lampenpumpens in sich vereinen. Wenn diese Ziele bei einer genau abgegrenzten Wellenlänge erreicht werden, können die Entwickler von Lasersystemen Kompaktheit, Leistung und Strahlqualität ihrer Systeme verbessern und gleichzeitig die Kosten für das Wärmemanagement senken.

Schmale Bandbreiten und stabile Wellenlängen

Es sind verschiedene Ansätze bekannt, um die spektrale Brillanz, Stabilität und Konsistenz von Laserdioden zu verbessern. Diese beruhen auf verschiedenen externen Komponenten wie Volumen-Bragg-Gittern oder externen Linsen und Bulk-Gittern. Die Emission mit externer Volumen-Bragg-Gitter-Stabilisierung liefert im typischen Fall sehr schmale Linien ($< 0,1$ nm) und sehr niedrige Wellenlängen-Temperatur-Koeffizienten, normalerweise in der Größenordnung von $0,01$ nm/°C.

Die Verwendung externer Komponenten erfordert jedoch eine feine und äußerst präzise Justage, teure zusätzliche Laser und/oder Optiken sowie speziell entwickelte Beschichtungen, was die Systemzuverlässigkeit beeinträchtigen kann. Da sich der »Gain« der Diode in External-Cavity-Konfigurationen außerdem in einer Größenordnung von etwa $0,3$ nm/°C verschiebt, ist der Betrieb der Laserdiode auf einen schmalen Stromstärkenbereich beschränkt, um die Wellenlängenstabilisierung über die gesamte Laserbandbreite beizubehalten [3]. Obgleich die hohe Wellenlängenstabilität gegenüber der Umgebungstemperatur ($\sim 0,01$ nm/°C) und die sehr schmale Bandbreite ($\sim 0,1$ nm) einer Diode, die mit externen Komponenten gekoppelt ist, für einige spektroskopische und rauscharme Anwendungen sehr attraktiv sein mögen, sind diese Eigenschaften für Standard-Pumpenanwendungen nicht immer wünschenswert, wenn die Emission zu schmal oder eine Feinabstimmung erforderlich ist.

KONTAKT

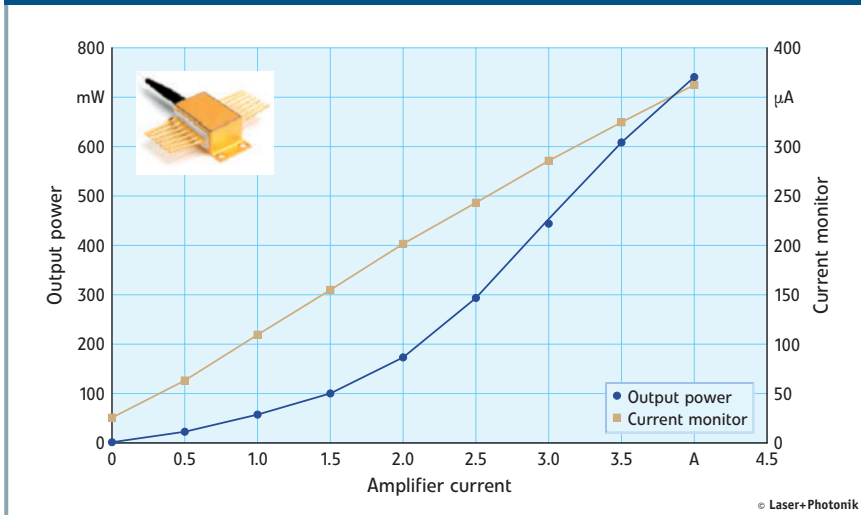
QPC Lasers, Inc.,
USA-Sylmar, CA 91342,
Tel. +1 (8 18) 8 33 -46 85,
Fax +1 (8 18) 6 98 -04 28,
www.qpclasers.com

Vor Kurzem hat QPC diese Herausforderungen bewältigt und eine Reihe von Hochleistungslasern vorgestellt, die bei 808, 976, 1064, 1470, 1532 und 1550 nm arbeiten und in der Firmenzentrale in Sylmar/Kalifornien gefertigt werden [4]. Die »BrightLock«-Laser – wegen ihrer Kombination aus spektraler Brillanz (Spectral Brightness) und Wellenlängenstabilisierung (Wavelength Locking) – werden auf Galliumarsenid- und Indiumphosphid-Basis mittels MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) hergestellt. Sie besitzen interne Gitter, die die spektrale Linienbreite auf weniger als $0,5$ nm verengen, die Wellenlängen-Temperatur-Empfindlichkeit um 400 Prozent reduzieren und gewährleisten, dass das Bauteil bei der erforderlichen Wellenlänge arbeitet. Diese Bauteile werden in ähnlicher Weise wie herkömmliche Laserdioden hergestellt. Die Gitter werden mittels optischer Lithografie auf ein Fotoresist abgebildet, worauf das Ätzen und dann das Formen während eines »Growth and Re-Growth«-Prozesses folgt. Die hohe spektrale Brillanz aufgrund der On-Chip-Wellenlängenstabilisierung lässt sich außerdem mit der Brightlase-Technologie von QPC kombinieren, um eine zuvor unerreichte Brillanz aus Laserdioden zu erhalten.

Hochleistungsdioden für anspruchsvolle Anwendungen

Für Faserlaser mit hoher Pulsspitzenleistung sind von QPC Lasers jetzt wellenlängenstabilisierte, fasergekoppelte Module mit hoher Brillanz bei 976 nm erhältlich. Mehrere dieser Module lassen sich mit einem Pump-Combiner zusammenschalten und ermöglichen so die bisher beste spektrale Brillanz für Yb- und Er:Yb-Laserpumpenanwendungen. Ein Beispiel für ein solches Modul ist in **Bild 2** dargestellt – mit 330 W optischer Leistung bei einer Bandbreite von weniger als $0,5$ nm. Mithilfe des kombinierten Ausgangs lässt sich der Wellenlängen-Temperatur-Koeffizient von $0,3$ auf $0,074$ nm/°C reduzieren. Auch die Zentralwellenlängengenauigkeit, die als Funktion des angelegten Stroms bei $0,089$ nm/A gemessen wird, ist vielversprechend für den QCW-Betrieb dieser Bauteile. Interne Gitter ermöglichen außerdem den Betrieb von Pumpdioden bei hoher Temperatur mit einer Abstimmung der Zentralwellenlänge bei nur $0,07$ nm/°C bis mindestens 60 °C, wie in **Bild 3** dargestellt. ▶

14-Pin-Butterflykomponente, 1550 nm



5 Leistungskurve eines 14-Pin-Butterfly-Bauteils, das in eine Einmodenfasern mit 9 µm Kerndurchmesser gekoppelt ist, bei 1550 nm. Der Pulsbetrieb ist auch bei einer Pulsspitzenleistung oberhalb 2 W mit MHz-Wiederholraten möglich

Hochleistungs-Singlemode-Laserchips

Der nächste logische Schritt besteht darin, Laserdioden mit hoher spektraler und räumlicher Brillanz in Richtung einer einzelnen räumlichen und longitudinalen Mode aus einem monolithischen Chip weiterzuentwickeln. QPC hat diese Leistungskombination über eine verbesserte Chiptechnologie realisiert; diese besteht aus einem wellenlängenstabilisierten Singlemode-Oszillator, gefolgt von einem Flared-Amplifier in einem monolithischen Bauteil.

Eine solche Chip-Architektur, die man auch als Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) bezeichnet, wahrt die räumliche Singlemode und die Reinheit der longitudinalen Mode, die vom DFB- (Distributed-Feedback-) Laser erzeugt wird, und ermöglicht eine außergewöhnliche CW- und Pulsspitzenleistung aus einem einzelnen Chip. Eine unabhängige Regelung der Stromstärke der Oszillator- und der Verstärkerabschnitte des Chips ermöglicht die Regelung der Leistungs- und spektra-

len Eigenschaften, je nach den Erfordernissen der Anwendung.

QPC hat kürzlich eine Rekordleistung von MOPA-Bauteilen bei verschiedenen Wellenlängen nachgewiesen: bis zu 9 W CW bei 1064 nm mit einer räumlichen und longitudinalen Einzelmode (Bild 4) sowie bis zu 40 W Pulsspitzenleistung für eine räumliche Einzelmode mit 20-ns-Pulsen bei einer Wiederholrate von 1 MHz. Diese Bauteile eignen sich für Nd:YAG-Laser in Markierungsanwendungen sowie für sichtbare Laser – angesichts ihrer guten Frequenzverdopplungseigenschaften bei 532 nm und möglicher direkter Modulation bei hohen Pulswiederholraten. Bei 1550 nm werden 700 mW CW aus dem Ausgang einer Singlemode-Faser (SMF) erreicht. Diese Leistung kommt kommerziellen Raman-Faserverstärkern für das EDFA-Pumpen in Telekommunikationsanwendungen gleich (Bild 5). Die MOPAs sind außerdem geeignete Quellen für CW- und gepulste Faserlaser, wo sie die zusätzlichen Vorverstärkerstufen überflüssig machen und eine flexible und unabhängige Steuerung von Parametern wie Puls-

breite und Wiederholrate ermöglichen. Sie stellen darüber hinaus eine gute Laserquelle für augensichere LIDAR-Anwendungen dar. Umgesetzt in Pumpwellenlängen wie 1532 oder 976 nm ermöglichen sie eine mittlere CW-Leistung im Kilowattbereich und Festkörperlaser mit hoher Pulsspitzenleistung. ■

Fazit: Deutliche Leistungsverbesserung

Mit der Brightlase- und der Brightlock-Technologie, die QPC in verschiedene Pump- und Direktiodenprodukte eingeführt hat, überschreiten Halbleiter-Laserdioden ihre bisherigen Grenzen. Die Leistungsverbesserung gipfelt in Einfrequenz-MOPAs mit räumlicher Einzelmode, die nahezu 10 W CW bei Wellenlängen im nahen IR und über 700 mW CW aus einer Singlemode-Faser bei 1550 nm hervorbringen.

AUTOREN

Dr. PAUL RUDY ist Vice President of Marketing and Sales, Dr. TOM STEELE ist Director of Market Development, und Dr. LAURENT VAISSIÉ ist Product Manager bei QPC Lasers in Sylmar, CA/USA.

LITERATUR

- 1 L. McDonagh, R. Knappe, A. Nebel, R. Wallenstein: »888-nm pumping of Nd:YVO₄ for high-power high-efficiency TEM₀₀ lasers«; Proc. SPIE 6451, 2007
- 2 Christopher D. Brooks, Fabio Di Teodoro: »1-mJ energy, 1-MW peak-power, 10-W averagepower, spectrally narrow, diffraction-limited pulses from a photonic-crystal fiber amplifier«; Optics Express, Vol. 13, No. 22, 2005
- 3 Igor Kudryashov, Dmitri Garbuzov, Mark Dubinskii: »Latest developments in resonantly diode-pumped Er:YAG lasers«; in Gary L. Wood, Mark A. Dubinskii (Eds.): »Laser Source Technology for Defense and Security III«; Proc. SPIE 6552, 65520K, 2007
- 4 Paul Rudy: »On-chip gratings add stability to high-power semiconductor lasers«; Compound Semiconductors, Volume 12, Number 7, August 2006