

Kompakte Laser für Medizintechnik und Displays

Hybride Diodenlasersysteme mit hoher Brillanz

Hybride Diodenlasersysteme im sichtbaren Spektralbereich erschließen zahlreiche neue Anwendungen für Halbleiterlaser, etwa in der Medizintechnik, der Materialbearbeitung oder im Entertainment-Sektor. Die Systeme integrieren eine Vielzahl von Funktionalitäten auf dem Platz einer Streichholzsachtel und ermöglichen so bei gleicher Leistung kompaktere und mobile Lösungen. Dazu werden Halbleiterlaser und optische Komponenten mit höchster Präzision zu effizienten Laserlichtquellen integriert. Die Eigenschaften der Laserstrahlung lassen sich durch optische Gitter oder nicht-lineare Kristalle spezifisch auf die jeweilige Anwendung zuschneiden.

Insbesondere in der Medizintechnik und Bioanalytik sind zunehmend mobile Geräte gefragt. Am Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) wird dafür eine Technologieplattform entwickelt und erprobt, die die Präzisionsmontage von aktiven und passiven Bauelementen auf einer mikrooptischen Bank erlaubt. Als besonders vorteilhaft erweist sich dabei, dass auf die etablierte Chiptechnologie für Diodenlaser und Hochfrequenztransistoren zurückgegriffen werden kann. Auf dieser Basis entstehen maßgeschneiderte, kompakte und effiziente Strahlquellen, deren Anwendungspotenzial zunehmend erschlossen wird.

So werden neuartige Lichtquellen entwickelt, die beispielsweise großformatige und ineffiziente Argon-Ionen-Laser oder Helium-Neon-Laser ersetzen können [1,2]. Diese kommen derzeit bei Verfahren wie Raman- oder Fluoreszenzspektroskopie in der Lebensmittelüberwachung zum Einsatz, oder auch bei Blut- und Zelluntersuchungen mittels Flusszytometrie. Vorstellbar sind mobil einsetzbare Geräte mit eigener Stromversorgung, die eine schnelle und unkomplizierte Diagnostik erlauben. Zusätzlich kann bei den miniaturisierten Modulen im sichtbaren Spektralbereich, anders als bei Gaslasern, die Wellenlänge über einen kleinen Bereich variiert werden. Dies gestattet

DIE AUTOREN

KATRIN PASCHKE

Katrin Paschke hat an den Universitäten Potsdam und Konstanz Physik studiert. 1998 begann sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Berliner Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH). 2006 schloss Katrin Paschke ihre Promotion zu hochbrillanten Laserstrahlquellen an der Technischen Universität Berlin ab. Ein Jahr später übernahm sie die Leitung der Arbeitsgruppe „Hybride Lasersysteme“ am FBH.



DANIEL JEDRZEJCZYK

Daniel Jedrzejczyk hat an der RWTH Aachen Physik studiert. Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Ferdinand-Braun-Institut. Seine Forschungsarbeiten konzentrieren sich derzeit auf die Frequenzverdopplung der Diodenlaserstrahlung, insbesondere die Konversionseffizienzerhöhung des nicht-linearen Prozesses durch Pulsbetrieb und Verwendung von Wellenleiterstrukturen.



CHRISTIAN FIEBIG

Christian Fiebig hat an der Technischen Universität Berlin Elektrotechnik studiert. Seit 2006 arbeitet der Dipl.-Ing. als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Ferdinand-Braun-Institut. Sein aktueller Forschungsschwerpunkt umfasst die Entwicklung von hochbrillanten infraroten Diodenlasern, die für die Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich geeignet sind.



Katrin Paschke
Ferdinand-Braun-Institut
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin
Tel.: +49 (0)30 6392 3955
Fax: +49 (0)30 6392 2642
E-Mail: Katrin.Paschke@FBH-Berlin.de
Website: www.fbh-berlin.de

neue und raffinierte Messverfahren, etwa spektroskopische Untersuchungen mittels SERDS (Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy) [3].

Ein weiterer Einsatzbereich ist die Displaytechnologie. Für aufwändige Großprojektionen, wie etwa in Planetarien oder Flugsimulatoren (Abbildung 1), werden derzeit schrankgroße RGB-Laserprojektoren eingesetzt. Diese liefern stets ein scharfes Bild, auch wenn auf eine Kugel oder eine unebene Fläche projiziert wird. Die gegenwärtig genutzten Lasertypen sind allerdings aufgrund ihrer unhandlichen Größe für mobile Einsätze oder den heimischen Gebrauch nicht geeignet. Diodenlasermodule im sichtbaren

Spektralbereich bieten wegen ihrer hohen Effizienz, Wartungsfreiheit und langen Lebensdauer, der einstellbaren Emissionswellenlänge und ihrer geringen Größe ideale Voraussetzungen, diese sperrigen Systeme zu ersetzen.

Rot emittierende Diodenlasersysteme

Rotes Licht lässt sich mit Halbleiterlasern direkt erzeugen. Die Vorteile dieser Strahlquellen liegen in ihrer direkten Modulierbarkeit und Leistungsstabilität. Hinzu kommen relativ niedrige Herstellungskosten und die kompakte Größe. Zum Erfolg dieser

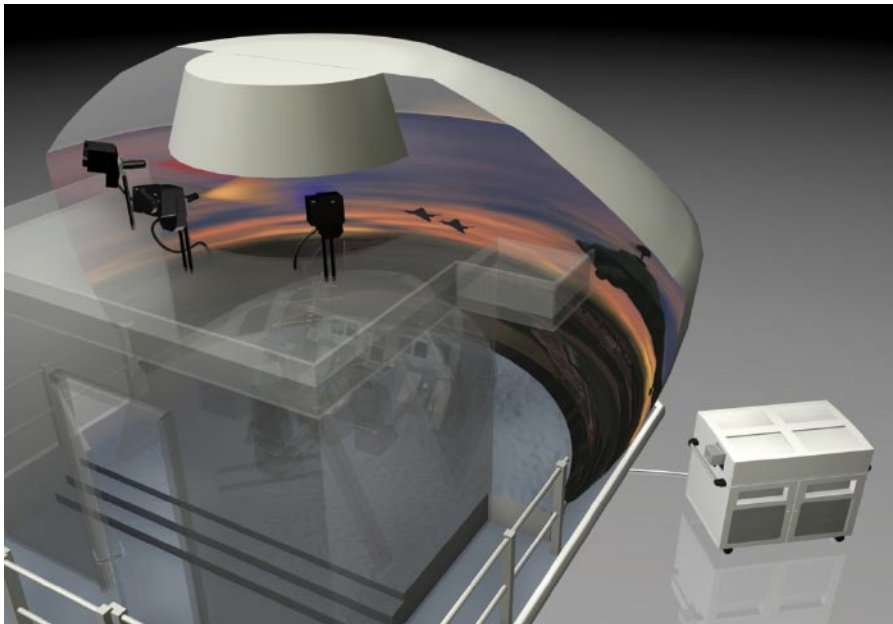


ABB. 1: Flugsimulator mit RGB-Laserlichtquelle.
(Quelle: LDT Laser Display Technology GmbH)

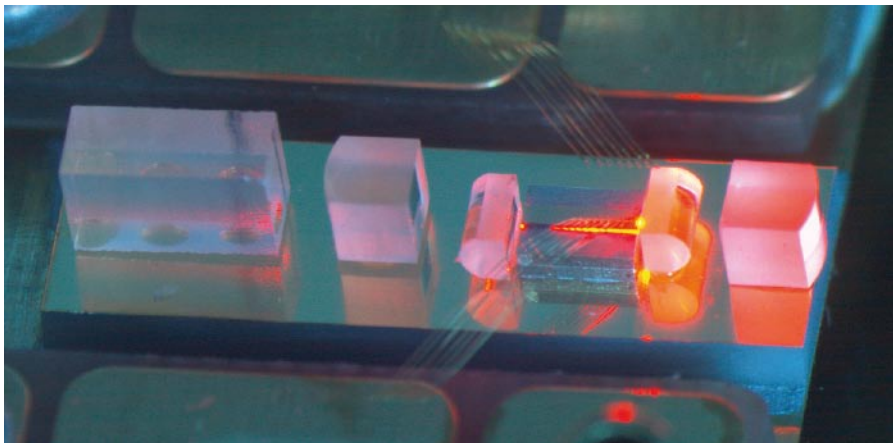


ABB. 2: Hybrid integriertes Mikromodul bei einer Wellenlänge von 632,8 nm.

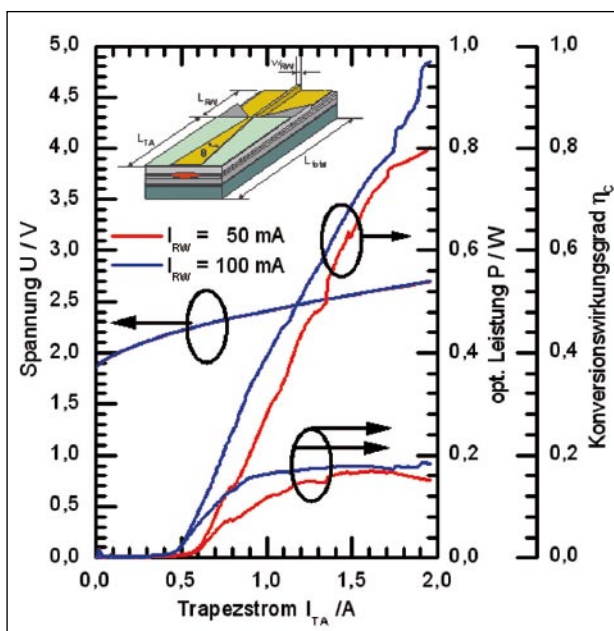


ABB. 3: Kennlinie eines Trapezlasers ($\lambda = 638 \text{ nm}$) bei einer Betriebstemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Laser tragen auch die für die Module im sichtbaren Spektralbereich bereits genannten Eigenschaften wie hohe Effizienz und lange Lebensdauer bei. Gleichzeitig zeigen Halbleiterlaser Einschränkungen, die bei anspruchsvollen Anwendungen kritisch sein können. So ist die spektrale Linienbreite mit 2 bis 4 nm für viele spektroskopische Anwendungen, medizinische Applikationen oder STED-Mikroskopie (eine spezielle Art der Fluoreszenzmikroskopie) nicht schmal genug und die emittierte Wellenlänge ist zudem stark von der Temperatur oder vom

Strom abhängig. Darüber hinaus ist für Anwendungen in der Displaytechnologie oder im Entertainmentbereich die Strahlqualität im Wattbereich oft nicht ausreichend. Es werden Lasersysteme benötigt, die im roten Spektralbereich zwischen 635 nm und 640 nm mit hoher Leistung bei exzellenter Strahlqualität emittieren. An der Verbesserung dieser kritischen Parameter wird bereits gearbeitet.

Hinsichtlich der spektralen Linienbreite eröffnet die Kombination aus einer Laserdiode und einem Volumen-Bragg-Gitter eine interessante Lösung. Durch diese kleinen und effizienten Laserdioden mit einem externen Resonator können Leistungen von über 100 mW bei der für He-Ne-Laser typischen Wellenlänge von 632,8 nm auf einer mikrooptischen Bank (Gesamtlänge ca. 13 mm) erzeugt werden (Abbildung 2). Diese kompakte und robuste Technologie sorgt für die Stabilisierung der Emissionswellenlänge bei gleichzeitiger Verringerung der Linienbreite. Das Spektrum der Strahlung ist extrem schmalbandig $\Delta\lambda < 1 \text{ pm}$ und zeigt eine Kohärenzlänge von $> 1 \text{ m}$ bei einer lateralen Strahlqualität von $M^2 < 3$. Durch die frequenzstabilisierten Lasermodule können großformatige Laser, wie etwa der Helium-Neon-Laser (He-Ne), ersetzt werden.

Eine verbesserte Strahlqualität und damit höhere Brightness der Laserdioden kann durch Laser mit Trapezgeometrie erreicht werden (Inset in Abbildung 3). In einer Rippenwellenleiter-Sektion wird Strahlung mit guter Strahlqualität generiert, die dann in einer Trapezsektion verstärkt wird – eine Technologie, die im nahen infraroten Spektralbereich (NIR) bereits erfolgreich umgesetzt wurde, die jedoch bei dem für rot emittierende Laser genutzten Materialsystem AlGaInP einige Herausforderungen bereithält. Wegen der im Vergleich zu NIR-Lasern geringen Barrierenhöhe für Elektronen kommt es in stärkerem Maße zu nichtstrahlender Rekombination und damit zur Erwärmung des Lasers. Diese führt zur lokalen Variation des Brechungsindex und damit zur Entstehung von Filamenten, die die laterale Strahlqualität ungünstig beeinflussen.

Inzwischen ist es gelungen, Trapezlaserdioden, die bei einer Wellenlänge um 635 nm emittieren, mit einer Ausgangsleistung von einem Watt zu entwickeln. Abbildung 3 zeigt die typische Kennlinie einer Trapezlaserdiode mit einer Resonatorlänge von 2 mm bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Vertikal emittieren die Laser im Gauß'schen Grundmode mit einer Halbwertsbreite des Fernfeldes von 30° . Bezüglich der lateralen Strahlqualität wurden bereits Werte für die Beugungsmaßzahl von $M^2 < 3$ bei einer Ausgangsleistung von 0,7 W erreicht. Weitere Arbeiten laufen

derzeit, um diese gute Strahlqualität auch bei Leistungen über 1 W zu erhalten. Je kleiner die Beugungsmaßzahl desto besser die Strahlqualität und damit bei feststehender Leistung die Brightness. Durch eine getrennte Ansteuerung der Rippenwellenleiter und Trapezsektion ist eine direkte elektrische Modulation möglich.

Werden zusätzlich Mikrolinsen auf einer mikrooptischen Bank integriert, kann zudem die divergente Strahlung der Laserdioden zu einem parallelen Strahlenbündel transformiert werden. Der Astigmatismus der verwendeten Trapezlaser erfordert eine getrennte Kollimation in vertikaler und horizontaler Richtung. Das bedingt eine unabhängige Strahlformung in beide Richtungen. Abbildung 4 zeigt das fast kreisrunde Strahlprofil nach der Kollimation. Das gesamte Lasermodul einschließlich Kollimationsoptik und beispielsweise zusätzlicher Temperatursensoren misst weniger als 5 cm x 2,5 cm x 1 cm.

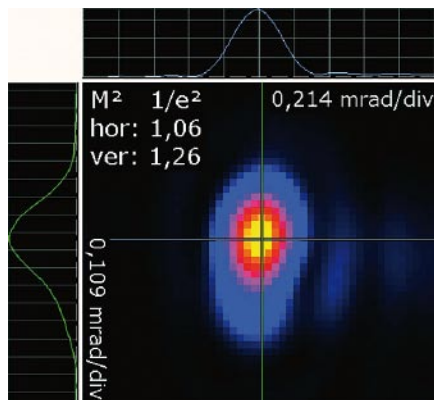


ABB. 4: Fernfeld-Strahlprofil eines kollimierten Lasermoduls ($\lambda = 639 \text{ nm}$) bei einer Ausgangsleistung von 440 mW.

Diodenlasermodule im grünen und blauen Spektralbereich

Im Gegensatz zu rot emittierenden Diodenlasern, lassen sich grüne und blaue Lichtquellen mit Halbleiterlasern im Wattbereich bislang nur schwer direkt herstellen. Etliche wichtige Spektralbereiche z. B. für Anwendungen in der Display- und Biotechnologie sind nach wie vor nur bedingt direkt zugänglich. Dazu gehört im sichtbaren Bereich vor allem die gelb-grüne Lücke. Der blaue und nahe UV-Bereich hingegen konnte in den vergangenen Jahren durch Neuentwicklungen auf Galliumnitrid-Basis erschlossen werden. Allerdings sind im gesamten sichtbaren Spektralbereich die optische Leistung und die Strahlqualität der Lichtquellen für viele Anwendungen noch viel zu gering.

Eine bislang konkurrenzlose Alternative für hohe Leistungen im Wattbereich in diesem Wellenlängenbereich stellt die Frequenzverdopplung (siehe Infokasten) dar, für die brillante Pumplaserquellen unerlässlich sind. Ein Ansatz ist, die brillante Strahlung durch einen kompakten, stromgepumpten Halbleiterlaser zu erzeugen, wodurch die Größe des Gesamtmoduls deutlich minimiert werden kann. Der dafür entwickelte Pumplaser ist ein Diodenlaserchip mit integriertem Bragg-Gitter zur Stabilisierung der Wellenlängen, ein so genannter DBR-Trapezler (engl. Distributed-Bragg-Reflector). Der 6 mm lange Chip vereint alle Voraussetzungen für die Frequenzkonversion in einem Bauelement. Er emittiert eine Leistung bis zu 10 W mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlung ($M^2 = 1.1$ mit 72 % in der zentralen Strahlkeule) in einem extrem schmalen Spektralbereich von $\Delta\lambda < 10 \text{ pm}$. Alle drei Faktoren Leistung, Strahlqualität und spektrale Charakteristik sind entscheidend für die effiziente Umwandlung in sichtbares Licht. Mit solchen DBR-Trapezlasern konnten im La-

ZUKUNFTSWEISENDE OPTIKEN FÜR DIE BIOTECHNOLOGIE

- FILTER, ASPHÄREN, OBJEKTIVE und mehr
- Mehr als **22.700** Optiken IN GROSSEN STÜCKZAHLEN ERHÄLTlich!



INFO

Frequenzverdopplung

Die Frequenz von Laserstrahlung lässt sich in Kristallen durch einen nichtlinearen optischen Effekt verdoppeln. Dabei erzeugt die elektromagnetische Schwingung des Lichtes im Kristall neben Polarisationswellen mit der Frequenz des einfallenden Lichts (Grundwelle) auch Polarisationswellen mit der doppelten Frequenz (Oberwelle). In der Folge entsteht im Kristall auch Licht mit dieser doppelten Frequenz. Dieser Effekt ist effizient und gut nutzbar, wenn erstens die Pumplichtquelle brillant ist, d.h. Laserlicht hoher Leistung mit guter Strahlqualität und schmaler Linienbreite emittiert, und wenn zweitens der Kristall einen hohen nichtlinearen Koeffizienten aufweist und die Brechzahlen für Grund- und Oberwelle gleich sind (Phasenanpassung). Weiterhin spielen die Länge des Kristalls, seine Stabilität gegenüber einer hohen Lichtleistung und seine Homogenität eine entscheidende Rolle. Für typische Konversionswirkungsgrade $< 10 \%$ steigt die Leistung des sichtbaren Lichts quadratisch mit der Leistung der Grundwelle und mit der Höhe des nichtlinearen Koeffizienten; sie wächst linear mit der Kristalllänge. Periodisch gepolte Lithiumniobat-Kristalle (LiNbO_3) weisen einen der höchsten nicht-linearen Koeffizienten auf; sie werden daher sehr häufig für die Frequenzverdopplung vom infraroten ins sichtbare Spektrum verwendet.



BENÖTIGEN SIE EIN ANGEBOT ODER EINEN KOSTENLOSEN KATALOG?
Kontaktieren Sie unser Vertriebsbüro!

mehr optik | mehr technologie | mehr service

EO **Edmund**
optics | worldwide

USA: 1-856-547-3488 | www.edmundoptics.com
EUROPE: 44 (0) 721 6273730 | www.edmundoptics.de
ASIA: 65 6273 6644 | www.edmundoptics.com.sg
JAPAN: 81-3-5800-4751 | www.edmundoptics.jp



ABB. 5: Mikrosystemlichtquelle für den sichtbaren Spektralbereich. (Quelle: FBH/Schurian)

boraufbau mit 3 bzw. 5 cm langen Lithiumniobat-Kristallen, Ausgangsleistungen von 1,8 W im grünen (532 nm) bzw. 1,6 W im blauen (488 nm) Spektralbereich erreicht werden. Der Konversionswirkungsgrad von elektrischer Leistung in sichtbares Laserlicht lag bei 5 %. Das Ergebnis wurde mit einem einfachen Strahldurchgang des infraroten Lichtes durch den nichtlinearen Kristall gewonnen. Dieses Verfahren ist zwar für die Konversion noch nicht optimal, erlaubt jedoch einen relativ simplen Transfer auf die Mikrobank und ermöglicht eine hohe Modulationsbandbreite, wie sie für die Displaytechnologie und komplexe Messtechniken benötigt wird.

Bei einer derartigen Miniaturisierung auf die Größe einer Streichholzschachtel

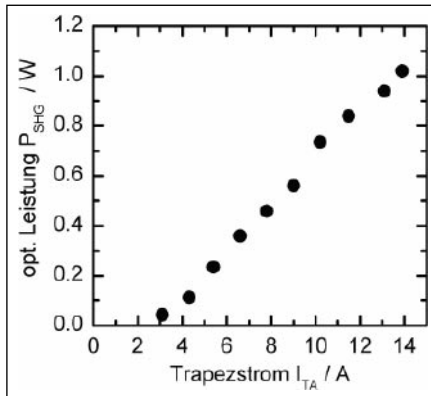


ABB. 6: Leistungskennlinie des Moduls im sichtbaren Spektralbereich als Funktion des Stromes.

(Abbildung 5) stellen sich zwei Herausforderungen:

- **Höchste Präzision:** Für die fokussierenden Mikrooptiken (ca. $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$) bedarf es äußerst präziser Montage- und Klebestrategien. Genauigkeiten von unter einem Mikrometer müssen dabei eingehalten werden, um die optimale Fokussierung in den nichtlinearen Kristall zu gewährleisten.
- **Ausgeklügeltes Wärmemanagement:** Die unterschiedlichen optimalen Temperaturarbeitsbereiche von Diodenlaser ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) und nichtlinearem Kristall ($T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) erfordern ein angepasstes Wärmemanagement. Hierbei muss die exakte Kristalltemperierung gelöst werden, da die Umsetzungsrate empfindlich ($< 0,2 \text{ K}$) von der Homogenität der Kristalltemperatur abhängt. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass der DBR-Trapezdiode eine Abwärme von ca. 10 W generiert.

Diese Herausforderungen konnten auf kleinstem Raum mit einer patentierten Kristallmontage optimal gelöst werden. So wurden ein blaues und ein grünes Modul auf einer 5 cm langen mikrooptischen Bank mit einer Ausgangsleistung von 1 W demonstriert. Abbildung 6 zeigt am Beispiel des blauen Moduls ($\lambda = 488 \text{ nm}$) die Ausgangsleistung der erzeugten sichtbaren Laserstrahlung als Funktion des injizierten Pumpstromes in den Diodenlaser. Bei einem Pumpstrom von 14 A wird eine Ausgangsleistung von 1 W bei 490 nm erreicht. Messungen über typische Einsatzzeiten von 1,5 Stunden zeigen eine hohe Leistungsstabilität mit Schwankungen $< 2 \%$. Die Änderung der emittierten Wellenlänge liegt in dieser Zeit bei $< 10 \text{ pm}$.

Fazit und Ausblick

Mit der Präzisionsmontage hybrider Diodenlaser-Systeme ist es gelungen, maß-

geschneiderte miniaturisierte Laserstrahlquellen im sichtbaren Spektralbereich zu entwickeln. Mit ihren hohen optischen Ausgangsleistungen im Wattbereich bei exzellenter Strahlqualität und schmaler spektraler Linienbreite eignen sich diese besonders für Anwendungen in der Bioanalytik und Medizintechnik sowie Hochleistungs-Displaytechnik (Herstellung von Laserdisplays, digitaler Kino- und Projektionstechnik). Sie sind sehr kompakt, passiv gekühlt und damit einfach in der Nutzung. Aktuell werden vielversprechende Ansätze verfolgt, um die Ausgangsleistung und elektrooptische Konversionseffizienz des hybriden Mikromoduls weiter zu erhöhen. Eine Möglichkeit liegt z.B. im Ersatz des nichtlinearen Volumenkristalls durch einen Kristall mit Wellenleiterstrukturen, mit dem die Konversionseffizienz deutlich gesteigert werden kann.

Referenzen

- [1] M. Maiwald, D. Jedrzejczyk, A. Sahn, K. Paschke, R. Güther, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle: Second-harmonic-generation microsystem light source at 488 nm for Raman spectroscopy. *Opt. Lett.* 34, 2, 217-219 (2009).
- [2] G. Blume, C. Fiebig, D. Feise, C. Kaspari, A. Sahn, K. Paschke, G. Erbert: 633nm tapered diode lasers with external wavelength stabilisation for HeNe applications. *Conf. Dig. CLEO/Europe 2009*, Paper CB-P.29-TUE (2009).
- [3] M. Maiwald, H. Schmidt, B. Sumpf, G. Erbert, H.-D. Kronfeldt, G. Tränkle: Microsystem 671 nm light source for shifted excitation Raman difference spectroscopy. *Appl. Opt.* 48, 15, 2789-2792 (2009).
- [4] C. Fiebig, A. Sahn, M. Uebernickel, G. Blume, B. Eppich, K. Paschke, G. Erbert: Compact second-harmonic generation laser module with 1 W optical output power at 490 nm. *Opt. Express* 17, 25, 22785-22790 (2009).
- [5] A. Jechow, R. Menzel, K. Paschke, G. Erbert: Blue-green light generation using high brilliance edge emitting diode lasers. *Laser Photonics Reviews* 4, 5, 633-655 (2010).

DAS INSTITUT

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH)

Berlin, Deutschland

Das Ferdinand-Braun-Institut ist eines der führenden Institute für anwendungsorientierte Forschung in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Es erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern: Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Die enge Zusammenarbeit des FBH mit Partnern in Industrie und Forschung garantiert die schnelle Umsetzung der Ergebnisse in praktische Anwendungen und hat in den letzten 10 Jahren sechs Spin-offs hervorgebracht.

www.fbh-berlin.de