

# Blaue Laserdioden – genutzte Chance für eine junge deutsche Technologiefirma

Wilhelm G. Kaenders

Im Jahre 1998 wurde der technologische Traum von blauviolett Laserdioden kommerzielle Wirklichkeit. Drei Jahre zuvor war Shuji Nakamura an der japanischen Firma Nichia ein aufsehenerregender Durchbruch mit dem III-V-Halbleitermaterial Galliumnitrid gelungen. GaN erwies sich nicht nur als effizientes Material für Leuchtdioden, sondern trotz der massiven Kristallfehlerdichte ( $> 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) überraschenderweise auch als brauchbares Halbleitermaterial für Laserdioden im blauen und violetten Spektralbereich (bisher realisierter Wellenlängenbereich 360 bis 480 nm). Fachleute prophezeiten der blauen Laserdiode angesichts der möglichen Verwendung in optischen Datenspeichern einen gigantischen Konsumermarkt. Entsprechend beeindruckend war die Geschwindigkeit, mit der Nichia aus Labormustern ein zuverlässiges Massenprodukt machte. Schon seit Mitte letzten Jahres sind Laserdioden mit einer cw-Ausgangsleistung von 30 mW und einer mittleren Lebensdauer von 10000 h verfügbar, 50 mW sind angekündigt.

Bei genauerer Betrachtung des komplexen Zusammenspiels von wissenschaftlichem Durchbruch, technischer Innovation, Patentschutz und Marktdominanz fiel der so sicher geglaubte schnelle kommerzielle Erfolg der blauen Diode bisher allerdings bescheiden aus. Erst die umfangreiche (Überkreuz-) Lizenzierung mit anderen Firmen (Cree, Osram, Sony, Toyoda Gosei, Lumileds, Rohm, Citizen Electronics, Toshiba usw.) im Laufe des Jahres 2002 hat für die violette Laserdiode (und nicht unbedingt für Nichia) die Tür zur großtechnischen Verwertung aufgestoßen. Den derzeitigen Höhepunkt der Entwicklung markierte im April 2003 die Firma Sony mit der Präsentation der ersten „Blu Ray“-Disc mit 25 Gigabyte Speicherkapazität (Fokusleckgröße  $< 300 \text{ nm}$ ). Insgesamt sind aber nur wenige 10000 blauviolette Laserdioden im Einsatz, und zwar bislang mehr bei hochtechnologischen als bei preissensitiven Applikationen. Gerade letztere sind allerdings eine wichtige Spielwiese für die Industrietauglichkeit der blauen Diode gewesen, und so soll in diesem Bericht speziell auf diese Applikationen eingegangen werden.

## Von der Laserdiode zum Diodenlaser

Halbleiterlaser zeichnen sich durch hohe elektrisch-optische Effizienz, kompakte Bauform und, wenn sie den Massenmarkt erreicht haben, relative niedrige Kosten in Anschaffung und Unterhalt aus. Da jedoch die Spezifikationen der für große Märkte (IT, Telekommunikation) entwickelten Laserdioden keinen direkten Einsatz in der Grundlagenforschung erlauben, fanden Halbleiter-

laser nur zunächst sehr zögerlich Einzug in wissenschaftliche Labors. TOPTICA hat sich seit der Gründung im Jahre 1995 mit der „Veredelung“ von Laserdioden zu Diodenlasern beschäftigt: mit der Entwicklung und Fertigung von abstimmbaren, einfrequenten und schmalbandigen Lasersystemen. Die Laserdioden werden dabei in komplexere Systeme, z. B. External-Cavity-Diodenlaser, integriert (Abb. 1). Neben einem mechanisch robusten Aufbau zur Modenselektion und Linienbreitenreduktion wird die Temperatur der Laserdiode auf mK-, der Strom auf  $\mu\text{A}$ -Präzision geregelt, um den Laser mit einer Linienbreite von 1 MHz oder weniger für die Spektroskopie einsetzbar zu machen.

Das Knowhow der „parasitären“ Nutzung von Laserdioden für Anwendungen in der Forschung war in den Jahren vor 1995 maßgeblich in den Laboren von Prof. Hänisch und Kollegen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, an der Universität München und an der PTB in Braunschweig kultiviert worden. Von dort aus strahlte es in viele internationale Arbeitsgruppen aus, die sich mit Laserkühlung und magnetooptischen Fallen befassten. Da die für die Konsumerindustrie erhältlichen Wellenlängen zufällig mit den Resonanzlinien der Alkali-Atome überlappen, erfuhren die preisgünstigen und dabei hochpräzisen Lasersysteme einen so nicht erwarteten Aufschwung. Darüber hinaus wurde das wissenschaftliche Gebiet durch die Nobelpreise der Jahre 1997 und 2001 weiter stimuliert und zählt heute auch in Deutschland zur Paradedisziplin der Atomphysik und Quantenoptik.

Gleichzeitig haben wir als junge Firma früh versucht, neben den wissenschaftlichen Diodenlasern weitere langfristige Standbeine aufzubauen. Durch die Kooperation mit dem Optical Sciences Center in Tucson, Arizona, sind wir in die Welt der optischen Datenspeicherung vorgestoßen. Ziel war die grundlegende Definition neuer Speicherverfahren und insbesondere die Erschließung neuer Spektralbereiche für optische Speicherverfahren. So war der sehr frühe Kontakt zu Nakamura und Nichia eine natürliche Konsequenz unserer Arbeiten. Bereits drei Wochen nach Eintreffen der ersten blauen Musterdioden konnten wir im Januar 1999 den ersten abstimmbaren violetten Diodenlaser präsentieren. Die erste Anwendung wurde in der Arbeitsgruppe von Prof. Meschede in Bonn anhand der Spektroskopie eines Indium-Atomstrahls demonstriert (Abb. 5). Damit stand eine abstimmbare und schmalbandige Laserquelle im blauen und nahen UV-Spektralbereich zur Verfügung, die im Vergleich zu den bisherigen frequenzverdoppelten IR-Lasersystemen wesentlich kompakter und leichter handhabbar war.

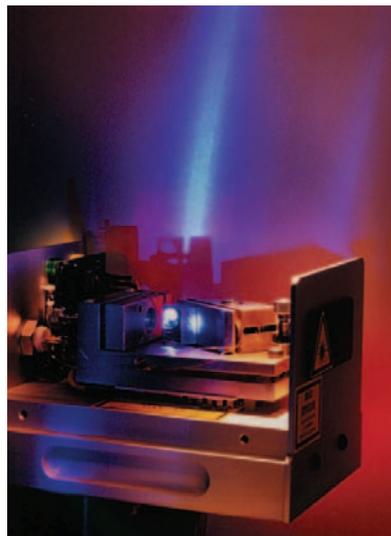


Abb. 1: External-Cavity-Diodenlaser für den blauen Spektralbereich, wie er weltweit bei verschiedensten Wellenlängen mittlerer Leistung in mehr als 1000 Einheiten eingesetzt wird.

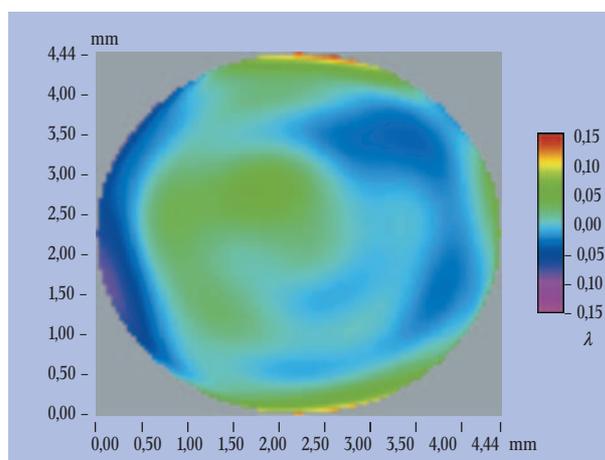


Abb. 2: Wellenfrontbild eines kollimierten blauen Diodenlasermoduls.

## Anwendungen der blauen Laserdioden

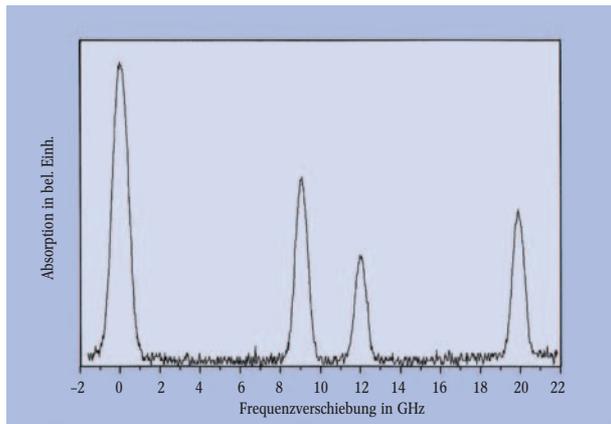
Im Bereich der optischen Tester wurden zwei universelle Plattformen entwickelt (dynamischer Tester „VersaTest“, statischer Tester „MediaTest“), die Entwicklern von optischen Speichermedien eine umfassende Charakterisierung der Materialeigenschaften ermöglichen. Im „MediaTest“ beispielsweise werden in einer „Read and Write“-Anordnung zwei Laser leicht unterschiedlicher Wellenlänge (etwa 400 nm und 420 nm) überlagert und durch ein Mikroskopobjektiv auf ein wiederbeschreibbares Speichermedium fokussiert. Der schwache kontinuierliche Read-Laser misst dabei die Reflektivität der Oberfläche, während der kurze Puls des Write-Lasers die untersuchte Stelle aufheizt und verändert. Durch spektrale Aufspaltung der beiden Laser wird die Reflektivität vor, während und nach dem Write-Puls beobachtet. Damit lässt sich die Dynamik der Phasen-

Dr. Wilhelm Kaenders ist Vorstand der TOPTICA Photonics AG, Fraunhoferstraße 14, 82152 Martinsried

übergänge (amorph zu kristallin) bei der lokalen Aufschmelzung studieren und optimieren. Solche Messungen erlauben es den Medienherstellern, neuartige Datenspeicher bereits Jahre vor ihrer kommerziellen Einführung zu testen.

**Jenseits der Grundlagenanwendung**

Nicht nur in der Design-Phase optischer „Disks“, sondern auch bei ihrer Fertigung kommen blaue Diodenlaser zum Einsatz: Gerade bei der Einführung neuer Standards wie dem Blu-Ray-Verfahren (Abb. 4) ist qualitätssichernde Messtechnik unerlässlich. Derzeit entwickelt TOPTICA hochqualitative Refe-



**Abb. 3:** Hochaufgelöstes Absorptionsspektrum von Indium ( $^5P_{3/2} \rightarrow ^6S_{1/2}$ ) bei 410 nm, aufgenommen mit einem abstimmbaren Diodenlaser, der zur Laserkühlung eingesetzt wird (H. Leinen et al.).

**Abb. 4:** Entwicklung der optischen Speichertechnologie von der CD über die DVD zum Blu-Ray-Format. Die Verkürzung der Wellenlänge ging einher mit der Erhöhung der numerischen Apertur und einer Verlagerung des Speichersubstrats von der Rückseite der Speicherscheibe auf die Oberseite. (Quelle: Philips Research)

CD	DVD	Blu-Ray
1,3 mm Substrat	0,6 mm Substrat	0,1 mm Deckschicht/1,1 mm Substrat

renzlaufwerke, die bei der Markteinführung der Blu-Ray-Technologie zur Qualitätsprüfung eingesetzt werden sollen. Noch ein anderer Berührungspunkt blauer Diodenlaser mit optischer Datenspeicherung ist die interferometrische Vermessung der in den DVD- oder Blu-Ray-Laufwerken eingesetzten Kollimationsoptiken. Die blauen Dioden eignen sich ausgezeichnet zur Interferometrie – sofern sie ausreichend kohärent sind. So wurde, basierend auf einem kompakten gitterstabilisierten Aufbau, ein festfrequentes blaues Lasersystem entwickelt, das für die industrielle Messtechnik eine kurzweilige Ergänzung zum HeNe-Laser darstellt.

In den vergangenen Jahren hat sich die blaue Laserdiode einen bunten Strauß neuer

Anwendungen erschließen können. Disk-Mastering und Laserlithographie nutzen Lasermodule mit hoher Strahlqualität und Fokussierbarkeit, mit denen sich asynchrone Pulszüge mit Anstiegszeiten im Bereich von 1–2 Nanosekunden realisieren lassen. Für uns als Hersteller stellten die Anforderungen an Intensitätsstabilität (<2%) und Wellenfrontqualität (< $\lambda/20$ ) angesichts der in ihren Parametern stark schwankenden Laserdioden eine Herausforderung dar – ganz zu schweigen von der geforderten Standzeit im industriellen Dauerbetrieb.

In der medizinischen Messtechnik ermöglicht ein neuartiges Analysegerät, das als wesentliche Komponente einen violetten Diodenlaser einsetzt, eine Online-Messung der Vitalität von menschlichen Zellen. Hierbei werden gleichzeitig Enzymkonzentrationen, Blutfluss und Blutvolumen bestimmt. Im Bereich der konfokalen Lasermikroskopie werden Lasermodule mit Single-Mode-Faseran-kopplung für anspruchsvolle Anwendungen wie Einzelmoleküldetektion oder „total internal reflection fluorescence“ (TIRF) eingesetzt.

Das derzeit wohl stärkste Absatzgebiet der blauviolettten Laserdioden findet sich in der Druckindustrie. Der Begriff „Computer-to-Plate“ beschreibt eine Technologie, bei der eine Computergrafik ohne langwierige Zwischenstufen digital auf die Druckplatte belichtet wird. Kurzweiliges Licht ist hier besonders interessant, da es besser fokussiert werden kann und somit die Druckqualität steigert – alternativ lässt sich bei gleicher Druckauflösung eine kleinere Umlenkoptik wählen und damit die Rotationsgeschwindigkeit

Integration elektronischer Intelligenz macht die Laser tauglich für den Einsatz in der Industrie, aber auch in Luft- und Raumfahrt. Weitere aktuell verfolgte Ansätze sind die Nachverstärkung mit geeigneten Diodenlaserstrukturen, das Schließen von spektralen Lücken im optischen Spektrum durch nichtlineare Verfahren und die Untersuchung neuer Technologien (VECSEL, kohärente Addition intensiver Quellen, etc.).

Die intensive Zusammenarbeit mit der deutschen Forschungslandschaft wirkt in beide Richtungen befruchtend, und wir hoffen, dass Erfahrungen aus dem industriellen Einsatz auch „feed-back“ für künftige Labor-Laser liefern werden. Leider mussten wir auch realisieren, dass gerade die Öffnung der Massenmärkte für die blaue Diode die spektrale Vielfalt der Laserdioden nachhaltig reduziert und damit den Einsatz in der Wissenschaft beschränkt hat.

Auch wenn Europa bei der Herstellung blauer Laserdioden technologisch bislang nicht aufgeschlossen hat, so haben diese Dioden doch auch hierzulande ein unerwartet breites Anwendungsfeld gefunden und neue technologische Trends einläuten können. Der intensive und offene Austausch mit einer damals noch weithin unbekanntem japanischen Firma und ihrer Schlüsselfigur war für TOPTICA ausschlaggebend zum Erfolg für heute 60 Mitarbeiter (17 Physiker, 19 Ingenieure). Für die Zukunft kann man sich nur wünschen, dass es auch in Deutschland an Hochschulen und Instituten ähnlich mutige Grundlagenentwicklung im Bereich der Halbleiterlaser gibt, sich aber gleichzeitig eine offene Firmenpolitik der Großindustrie durchsetzt, die in enger Zusammenarbeit mit der Innovationskraft junger Firmen erfolgreich neue Märkte erschließt.

**Literatur**

- ▶ S. Nakamura, W.G. Kaenders, Market-ready blue diodes excite spectroscopists, Laser Focus World, April 99
- ▶ S. Nakamura, Gerd Fasol, The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers, Springer Verlag 1997, ISBN 3-5409-61590-3:
- ▶ H. Leinen, G. Gläßner, H. Metcalfe, R. Wynands, D. Haubrich, D. Meschede, Appl. Phys. B 70, 567 (2000)
- ▶ L. Ricci, M. Weidemüller, T. Esslinger, A. Hemmerich, C. Zimmermann, V. Vuletic, W. König, T. W. Hänsch, Optics Commun. 117, 541 (1995)

keit der Belichtungsoptik erhöhen. In Zukunft werden auch die kostengünstigeren Fotopolymer-Druckplatten direkt mit violetten Lasern belichtet werden können, und damit die Druckvorstufe „violett“ werden.

**TOPTICA heute**

Die Zeitspanne von etwa vier Jahren zwischen der Verfügbarkeit erster Labormuster der blauen Laserdiode und der nun anstehenden Überführung in eine Massentechnologie hat uns als junger Firma eine einzigartige Chance geboten, sich an der Erfolgsgeschichte dieser Laserquelle zu beteiligen. Ziel der Firma bleibt die innovative Weiterentwicklung und das Erschließen neuer Anwendungsfelder von Diodenlasersystemen. Die