

Quantenkaskadenlaser-Module werden industriell einsetzbar

043 Lars Mechold, Mario Abraham,
Laser Components GmbH, Olching

Viele Experten der spektroskopischen Sensorik erwarten seit Jahren, dass mit Quantenkaskadenlasern (QCLs) stabile Strahlungsquellen verfügbar werden, die bei Raumtemperatur hohe Leistungen im mittleren Infrarot emittieren. Sie hoffen, damit für industrielle Sensorikaufgaben nun endlich einen Spektralbereich erschließen zu können, in dem die Fundamentalbanden vieler Moleküle hochempfindliche, selektive und schnelle spektroskopische Messungen weit unter einer Sekunde zulassen. Aus dem noch kleinen Markt der Spektroskopie-basierten Sensorik könnte dann eine zukunftsreiche Wachstumsbranche werden.

Bei der Weiterentwicklung einer solchen Diagnostikmethode vom Labor hin zu kommerziellen Anwendungen dürfen aber industrielle Anforderungen wie einfache Handhabbarkeit, schnelle Austauschbarkeit der Laser und Liefersicherheit nicht außer Acht gelassen werden, bei Laserdioden insbesondere auch die einfache Justierbarkeit. Im zurückliegenden Jahr wurde eine ganze Palette zentraler Bauteile für die Anwendung spektroskopischer Laserdioden entwickelt. Der vorliegende Fachaufsatz thematisiert die Weiterverarbeitung von Laserchips insbesondere für Quantenkaskadenlaser und stellt die kommerzielle Peripherie für solche Laserdioden vor.

1 Technischer Hintergrund

Die optische Absorptionsspektroskopie wird in zunehmendem Maße als Diagnostikmethode erkannt, die viele Sensorikprobleme lösen kann. Ob bei niedrigem oder normalem Druck, in reaktiver Umgebung plasmabasierter Beschichtungsprozesse oder in der Umweltanalytik – unter verschiedensten Bedingungen zeigt sich die Anwendung des Absorptionsgesetzes nach Lambert-Beer als geeignet, um Moleküle nachzuweisen, ihre Konzentrationen absolut zu messen oder zu überwachen. In verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln wurde über die Messung z.B. von Kohlenwasserstoffkonzentrationen in beschichtungsnahen Plasmaanlagen berichtet [1,2]. Dazu gehören neben den stabilen Molekülen Methan, Ethan, Ethen, und Ethin auch reaktivere radikalische Bestandteile wie zum Beispiel das Methylradikal CH_3 . Andere Beispiele wie die Sauerstoffsensoren um 761 nm zeigen, dass eine industrielle Umsetzung dieser Methode möglich ist [3].

Der wissenschaftliche Durchbruch für die Herstellung von Quantenkaskadenlaser-Halbleiterstrukturen wurde Mitte der Neunziger Jahre in den Bell-Laboratorien erzielt [4]. Seitdem wurde insbesondere in Europa vielerorts an solchen Laserstrukturen gearbeitet [5,6]. Da man die Forschungsarbeiten in erster Linie auf die eigentlichen Halbleiterstrukturen und ihre Abstrahleigenschaften konzentrierte, standen applikative Aspekte wie die Weiterverarbeitung der Laserchips in Standardgehäuse zunächst im Hintergrund.

Die Autoren sehen hier ihren Anknüpfungspunkt, genau diese Adaption vorzunehmen und darüber hinaus eine Lasersteuerung



Bild 1: Quantenkaskadenlaser mit integriertem Peltier-Element und Temperatursensor, aufgebaut im TO-8-Standardgehäuse

anzubieten, so dass sich Interessenten dieser Technologie voll auf die Applikation konzentrieren können.

2 Quantenkaskadenlaser im Standardgehäuse

Eine klare Zielstellung ging den Entwicklungen voraus:

- Strom- und Temperatursteuerung müssen integriert sein
- Der Laser muss hermetisch dicht verschlossen sein
- Für den Aufbau sind ausschließlich Standardbauteile zu verwenden
- Peltier-Element muss am Laser integriert sein
- Trotz der in Nanosekunden zu schaltenden Ströme dürfen in der Umgebung keine elektromagnetischen Verunreinigungen auftreten

Der Aufbau von Quantenkaskadenlasern in TO-Standardgehäusen wie in **Bild 1** ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu industriellen Anwendungen. Der empfindliche Chip ist thermisch unter Kontrolle, mit Strom versorgt und gleichzeitig mechanisch und chemisch geschützt. Die dicht schließende Kappe ist unter Ausschluss von Sauerstoff und Luftfeuchte mit einem Inertgas befüllt. Dies ermöglicht die Verarbeitung empfindlicher Rohmaterialien im Chip und verlängert gleichzeitig die Standzeit weiterer Komponenten wie Wärmesenke und Temperatursensor. Die Verwendung von Standardgehäusen ermöglicht die Einbeziehung verschiedener Lieferanten, die nach denselben Normen für die Geometrie der Gehäuse arbeiten, und verbessert zugleich die Chancen auf eine wirtschaftliche Produktion. Das keilige Fenster in der Kappe wird der Emissionswellenlänge entsprechend ausgewählt. Dabei steht das Optimum aus Transmission und Handhabbarkeit im Mittel-

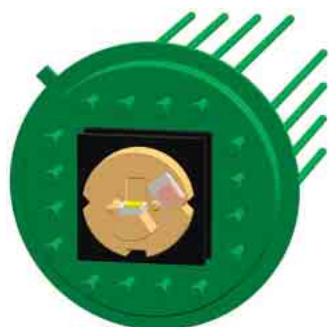


Bild 2: Detailaufbau eines Quantenkaskadenlaserchips in einem TO-8-Gehäuse

punkt. Gerade im Bereich der mittleren Infrarotstrahlung ist die Transmission des Fensters meist nur durch sehr spezielle Kristalle gewährleistet, wie z.B. ZnSe oder BaF₂. Allerdings können diese Kristalle oftmals nur schwer gereinigt werden, wenn sie z.B. bezüglich Alkohol oder Aceton löslich oder hygroskopisch sind.

Bild 2 zeigt den optimierten internen Aufbau gepulster Quantenkaskadenlaser für den Einsatz in Raumtemperatur-Umgebung. Zur Temperaturstabilisierung ist ein Peltier-Element integriert, das mit einem Maximalstrom von 1,8A einen Temperaturunterschied von 66 K erzeugt. Die Wärmeabfuhr vom Chip hin zum Peltier-Element ist über eine spezielle Wärmesenke hergestellt. Der Einsatz standardisierter Gehäuse gestattet nun auch die Verwendung von Peltier-Elementen, die sich bezüglich Leistung und Geometrie unterscheiden. Damit kann der Aufbau speziellen Bedürfnissen angepasst und optimiert werden. Sowohl mehrstufige Peltier-Elemente als auch größere TO-Gehäuse sind vorstellbar. Im vorliegenden Aufbau hat sich die Verwendung eines einstufigen Peltier-Elements im TO-8 als optimal erwiesen.

Für die Verarbeitung dieser neuartigen Strahlungsquellen wurde ein spezieller Arbeitsplatz entwickelt: eine Quantenkaskadenlaser-Workstation (**Bild 3**), mit der verschiedenste kantenemittierende Laser und damit auch Quantenkaskadenlaser unterschiedlicher Hersteller in Standardgehäuse appliziert werden können. Der Arbeitsplatz besteht aus einer Montagekammer, die mit verschiedenen Werkzeugen für den Aufbau bestückt werden kann, und den beiden Mikroskopen. Diese gestatten es dem Betrachter, den Prozess aus zwei unterschiedlichen Richtungen zu überwachen und dadurch eine möglichst präzise Positionierung zu gewährleis-

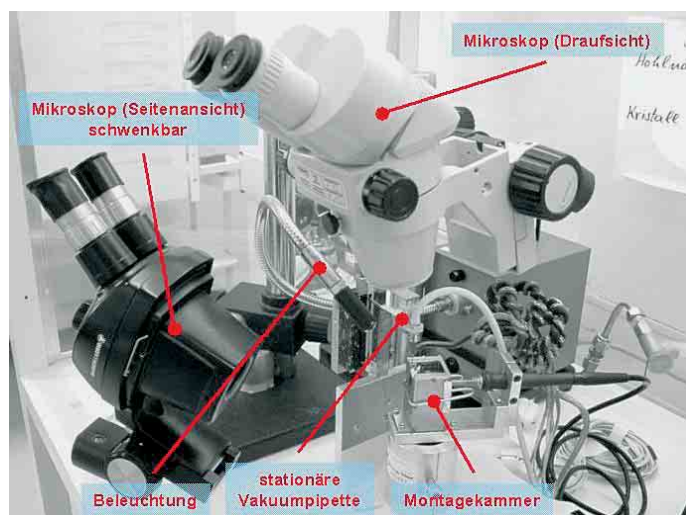


Bild 3: Workstation zur Verarbeitung von Quantenkaskadenlasern in Standardgehäuse

¹ Keilige Fenster sind im Gegensatz zu planparallelen Fenstern für spektroskopische Anwendungen besser geeignet. Sie bewahren den Laserresonator vor ungewollten Rückkopplungen durch Reflexionen im Fenster und gewährleisten damit interferenzfreie Laserstrahlung aus dem Gehäuse heraus.

Bild 4: QUANTA, der erste OEM-Treiber für Quantenkaskadenlaser



ten. Für das schonende Handling der Halbleiter-Bauteile ist eine Vakuumpipette integriert.

3 Kompakte Steuerungsmodule für QCLs

Der Betrieb von Quantenkaskadenlasern stellt hohe Anforderungen an die Elektronik. Hierzu haben wir das Treibermodul QUANTA und die Steuereinheit GENPULSE entwickelt, kompakte Geräte, die speziell auf gepulste Quantenkaskadenlaser im Raumtemperatur-Betrieb abgestimmt sind.

Das modulare Treibermodul (**Bild 4**), das in die meisten vorhandenen Prozesssteuerungen integriert werden kann, dient zur Ansteuerung und Überwachung der Laserdiode. Es können Impulsbreiten von 22 bis 300 ns generiert werden, bei Frequenzen von 1 Hz bis 200 kHz. Strom und Spannungsabfall über der Laserdiode lassen sich in Echtzeit beobachten. Das Pulsregime der Laserdiode, also Amplitude,



Bild 5: GENPULSE, Strom- und Temperatursteuerung für gepulste Quantenkaskadenlaser bei Raumtemperatur

Folgefrequenz und Tastverhältnis, lassen sich extern steuern. Zur Steuerung von Strom und Temperatur kann die in **Bild 5** gezeigte GENPULSE-Steuerung eingesetzt werden. Neben den Einstellungen für das Treibermodul gestattet es, den Betriebszustand und die Temperatur am Peltier-Element zu beobachten. In Verbindung mit der Integration der Quantenkaskadenlaser-Chips in Standardgehäuse machen diese beiden geradezu unscheinbaren Module aus sensiblen Labormustern industrietaugliche Laserstrahlquellen. Dies ist schon daran zu erkennen, dass ein Laserwechsel inklusive Neujustierung nun innerhalb von 15 Minuten reproduzierbar zu schaffen ist. Vor allem aber wird eine Vielzahl hochinteressanter neuer Anwendungen im mittleren IR ermöglicht!

4 Ergebnisse

Die Eigenschaften der Strahlungsmodule, bestehend aus ein- und mehrmodigen Quantenkaskadenlasern mit Strom- und Temperatursteuerung, wurde durch Referenzmessungen an verschiedenen Laserstrukturen ermittelt.

4.1 Mehrmodige QCLs

Das Walter-Schottky-Institut in Garching [6] lieferte im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes Nr. 302a/98, das von der Bayerischen Landesregierung unterstützt wurde, Laserstrukturen (QCL-Chips) für mehrmodige Laser.

Bild 6 zeigt die Modenkarte eines mehrmodigen InP-Quantenkas-

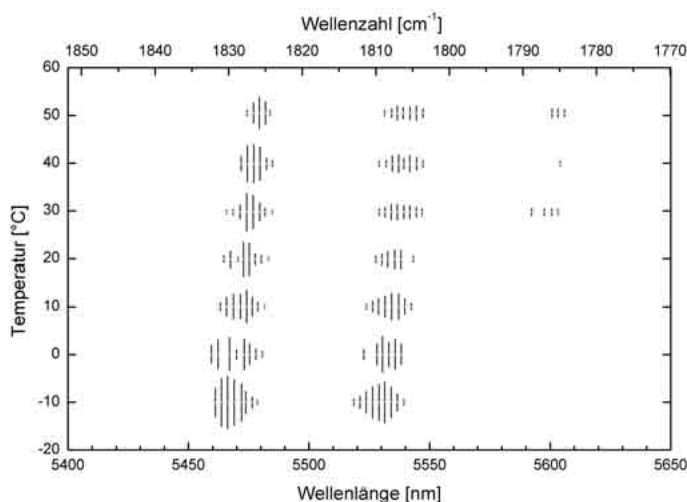


Bild 6: Modenkarte eines Fabry-Perot-Quantenkaskadenlasers im TO-8 ($I_{amp} = 4 A$; $f = 2,5 kHz$; $t_{puls} = 50 ns$).

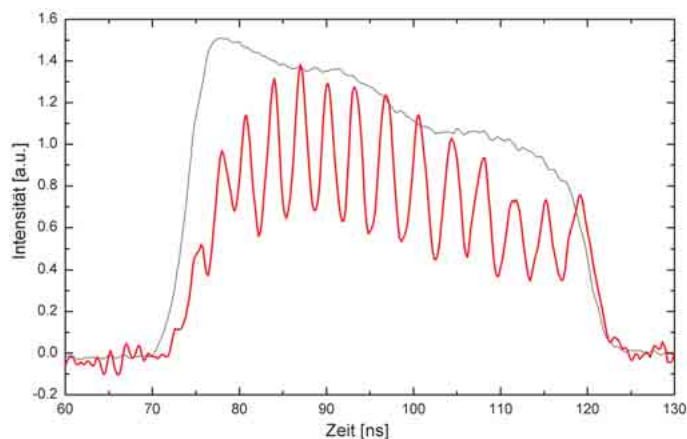


Bild 7: Zeitlicher Verlauf eines Pulses (Schwarze Kurve: Lasersignal; Rote Kurve: Lasersignal mit Germanium-Etalon)

kadenlasers. In dieser Darstellung wird für konstante Pulsbedingungen, d. h. konstante Amplitude, Pulslänge und Pulswiederholfrequenz, die Temperatur am Peltier-Element variiert. Dabei zeigen sich neben der Hauptmode bei 1827 cm^{-1} auch zwei Nebenmoden bei 1807 cm^{-1} und 1787 cm^{-1} . Die Mode hat eine typische Breite von $3\text{--}5 \text{ cm}^{-1}$ und ihre Länge ergibt sich als stetige Funktion über mehrere Temperaturen. Die Substrukturierung, die anhand der senkrechten Linien illustriert ist, zeigt die mit dem Monochromator in der Hauptmode gefundenen zusätzlichen lokalen Maxima. Jede senkrechte Linie steht für ein lokales Intensitätsmaximum, und je länger die Linie, um so größer ist die Strahlungsintensität. Die integrale Strahlungsleistung im Puls liegt oberhalb von 500 mW . Ein Beispiel für den Einsatz mehrmodiger Quantenkaskadenlaser mit einem Monochromator, nun aber zeitaufgelöst im Einzelpuls, ist in **Bild 7** gezeigt, mit dem reinen Emissionssignal der Laserdiode und dem Emissionsbild bei Verwendung eines Germanium-Etalons. Die erwartete Interferenzstruktur des Etalons ist deutlich zu erken-

² Bei konstruktiver Überlagerung der mehrfach im Ge-Festkörper reflektierten Strahlen mit dem transmittierten Strahl entsteht ein charakteristisches Interferenzmuster. Der spektrale Abstand dieser Interferenzstrukturen ist proportional zur Dicke des Ge-Festkörpers.

³ Sind Interferenzen vorhanden, dann wird die Absorptionslinie mittels Durchstimmen der Laser-Wellenlänge sichtbar gemacht, so dass Spektroskopie durchführbar wird.

nen. Mit einem Etalon kann man zeigen, dass spektroskopische Anwendungen bei geeigneter Wahl der Betriebsbedingungen und einer Modenselektion durchaus auch mit mehrmodigen Lasern bedient werden können. Nach Angaben von Chipherstellern ist für die zukünftige Produktion der Quantenkaskadenlaser ein sehr viel geringerer Preis für mehrmodige Laserstrukturen zu erwarten. Aber nicht nur Monochromatoren sind zur Modenfilterung geeignet. Sehr schmalbandige Interferenzfilter im mittleren Infrarot, so wie sie von der Firma NOC angeboten werden, eignen sich ebenso zur Filterung einer speziellen Mode (**Bild 8**). Im Bereich von 1 bis $20 \mu\text{m}$ können die zentralen Positionen der Filterkurve auf die gewünschte Mode angepasst werden. Die Bandbreite kann $0,9\text{--}6\%$ betragen. In unserem Beispiel beträgt der Abstand der Hauptmoden des Lasers $\sim 20 \text{ cm}^{-1}$, die maximale Transmission des Filters 60% und die volle Halbwertsbreite 2% . Die Besonderheit einer Filteranwendung liegt sicher darin, dass seine Transmissionswellenlänge nicht variabel ist, andererseits machen die Kosten nur ein paar Prozent der Aufwendungen für einen Monochromators aus.

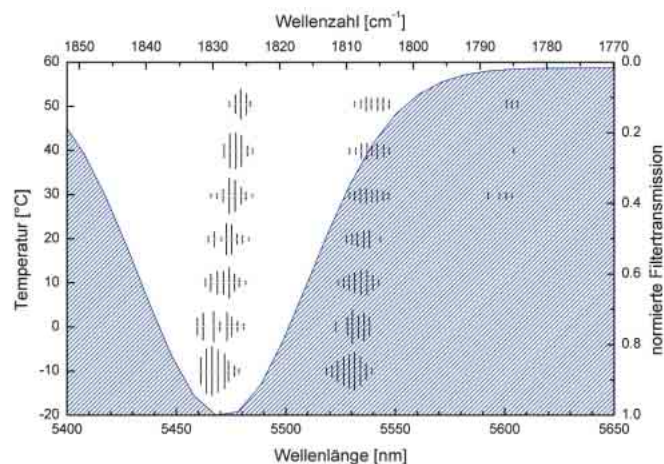


Bild 8: Modenkarte eines Fabry-Perot-Quantenkaskadenlasers im TO-8 ($I_{amp} = 4 A$; $f = 2,5 kHz$; $t_{puls} = 50 ns$). Der nicht-schraffierte Bereich zeigt den Transmissionsbereich des Filters. Das Filtersignal ist auf eine maximale Transmission von 60% normiert.

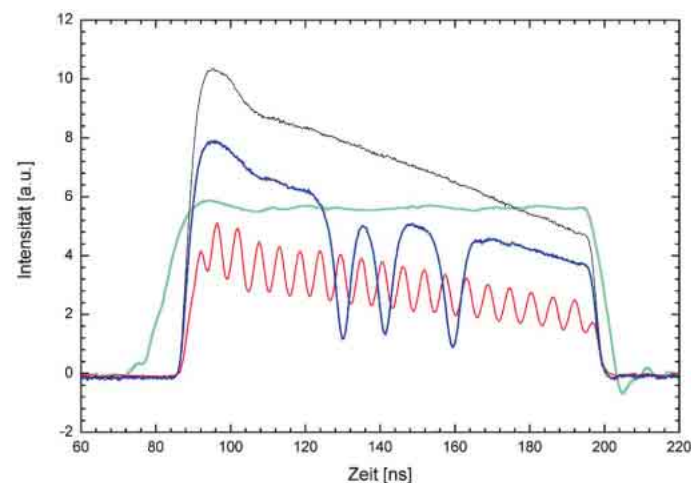


Bild 9: Absorptionslinien (blau) des $^{15}\text{NH}_3$ und Interferenzen eines Germanium-Etalons (rot). Linienpositionen von rechts nach links [cm^{-1} : $882,85$; $883,01$; $883,11$] ($I_{amp} = 5,6 A$; $f = 8 kHz$; $t_{puls} = 120 ns$). Zum Vergleich sind das reine Lasersignal (schwarz) und der Strompuls des Treibers (grün) dargestellt.

4.2 Einmodige QCLs

Einmodige Quantenkaskadenlaserchips tragen in den meisten Fällen ein DFB-Gitter (Distributed Feedback). Die verwendeten DFB-Laserstrukturen wurden in der Arbeitsgruppe von Prof. Strasser an der TU Wien hergestellt [7,8].

In Voruntersuchungen wurde die Einmodigkeit mittels Monochromator verifiziert und eine Pulsleistung von ~100 mW bestimmt. Damit bestätigt sich, dass einmodige DFB-Laserdioden geringere Pulsleistungen haben, als mehrmodige Laserdioden.

Bild 9 zeigt verschiedene Signale einer einmodigen Laserdiode bei 883 cm^{-1} . Wegen der Einmodigkeit der Infrarotstrahlung konnte für die dargestellten Experimente auf einen Monochromator verzichtet werden. Es zeigt sich, dass die Laserstrukturen um 883 cm^{-1} sehr gut zur Messung des $^{15}\text{NH}_3$ geeignet sind. Anhand der Etalon-Interferenzen (s. 4.1), die einen Abstand von $\sim 0,05\text{ cm}^{-1}$ haben, konnte die spektrale Position eindeutig identifiziert werden. Über den gesamten Temperaturbereich von -10 °C bis 50 °C fand sich eine Durchstimmung von $0,05\text{ cm}^{-1}/\text{K}$. Die sich daraus ergebende gesamte Durchstimmung von 3 cm^{-1} zwingt die Produktion der Quantenkaskadenlaser in eine höchstmögliche Präzision für die spektrale Position der Laseremission.

Eine etwas höhere spektrale Abstimmung von $0,07\text{ cm}^{-1}/\text{K}$ konnte für weitere DFB-Laserstrukturen bei 1054 cm^{-1} gefunden werden. Die Position wurde anhand von $^{14}\text{NH}_3$ identifiziert.

Diese sehr erfolgreichen Experimente sowohl mit mehrmodigen als auch mit einmodigen Quantenkaskadenlasern und ihre Ergebnisse wurden im Verlaufe des Jahres 2003 auf verschiedenen Messen, Konferenzen und Workshops in Deutschland und rund um die Welt präsentiert.

5 Zusammenfassung

Der Markt der spektroskopischen Laserdioden ist durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet. Insbesondere im mittleren Infrarotbereich können Quantenkaskadenlaserquellen neue Akzente setzen. Auch auf dem 4. QCL-Workshop im Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg, abgehalten am 25. September 2003, wurde deutlich, dass echte Perspektiven für industrielle Anwendungen existieren.

Dazu gibt es jetzt ein Strahlungsmodul, das sowohl die Laserdiode, den Quantenkaskadenlaser, als auch die Ansteuerung umfasst. Für die Halbleiterstrukturen wurde ein zuverlässiger und robuster Aufbau in Standardgehäuse entwickelt, der auch einen Temperatursensor und ein Peltier-Element enthält. Tests haben ergeben, dass das Strahlungsmodul mit ein- und mehrmodigen Laserdioden – auch von verschiedenen Herstellern – verwendbar ist.

Mit einmodigen Laserdioden konnten Messungen an zwei Ammoniakisotopen ($^{14}\text{NH}_3$, $^{15}\text{NH}_3$) durchgeführt werden. Der Temperatur-Abstimmkoeffizient variierte zwischen $0,05\text{ cm}^{-1}/\text{K}$ und $0,07\text{ cm}^{-1}/\text{K}$ für den Bereich von -10 °C bis 50 °C .

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die erfolgreiche Zusammenarbeit und hilfreiche Diskussionen bezüglich QUANTA und GENPULSE bei Dipl.-Ing. J. Rohr vom Ing.-Büro Rohr, sowie für den Bereich der Laserchips bei Dr. R. Meyer, Dr. G. Scarpa, Dr. N. Ulbrich und A. Wiczorek vom Walter-Schottky-Institut in Garching, und bei Prof. G. Strasser, Dr. S. Anders und Dr. W. Schrenk von der TU Wien. Für die kurzfristige Unterstützung bei der zeitaufgelösten Vermessung des Emissionssignals danken wir Dr. T. Beyer und Dr. A. Lambrecht vom Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg.

Literaturhinweise

- [1] J.B. McManus, D. Nelson, M. Zahniser, L. Mechold, M. Osiac, J. Röpcke and A. Rousseau, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2709 (2003).
- [2] L. Mechold, J. Röpcke, X. Duten and A. Rousseau, *Plasma Sources Sci. Technol.* **10**, 52 (2001).
- [3] J. Kunsch, *Laser+Photonik*, September, (2003).
- [4] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson and A.Y. Cho, *Science* **264**, 553 (1994).
- [5] W. Schrenk, N. Finger, S. Gianordoli, L. Hvozدارa, G. Strasser, E. Gornik; *Appl. Phys. Lett.* **76**, 253 (2000).
- [6] N. Ulbrich, G. Scarpa, A. Sigl, J. Roßkopf, G. Böhm, G. Abstreiter and M.-C. Amann, *IEEE Electron. Lett.* **37**, 1341 (2001).
- [7] W. Schrenk, E. Gornik, H. Page, C. Sirtori, V. Ortiz, G. Strasser, *Physica E* **13**, 840 (2002).
- [8] G. Strasser, W. Schrenk, S. Anders, E. Gornik, *Microelectronic Engineering* **63**, 179 (2002).

Ansprechpartner:

Dr. Lars Mechold
Produktionsleiter F&E
Laserdioden für die Spektroskopie
Laser Components GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 15
D-82140 Olching
Tel. 08142/2864-45, Fax 08142/2864-11
eMail: l.mechold@lasercomponents.com
Internet: www.lasercomponents.com

