

# Monomodige DFB-Quantenkaskadenlaser mit Metall-Bragg-Rückkopplungsgittern

*Jochen Seufert, Johannes Koeth, Marc Fischer, nanoplus GmbH, Gerbrunn, Sven Höfling, Johann-Peter Reithmaier, Alfred Forchel, Universität Würzburg*

Manuskripteingang: 26. November 2004; zur Veröffentlichung angenommen: 19. März 2005

Auf der Basis von GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen wurden monomodige Quantenkaskadenlaser im Wellenlängenbereich von 9–11  $\mu\text{m}$  entwickelt. Die Rotations-Schwingungs-Grundzustände vieler industriell wichtiger Gase fallen in diesen Spektralbereich im mittleren Infrarot. Daher eignen sich diese Laser in besonderem Maße für den sensitiven Nachweis von beispielsweise  $\text{CO}_2$  (9,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge),  $\text{O}_3$  (9,7  $\mu\text{m}$ ) und  $\text{NH}_3$  (10,7  $\mu\text{m}$ ). Die Laser werden auf standardisierte c-mounts montiert, die sehr einfach in komplexere Optikmodule eingebaut werden können. Im gepulsten Betrieb liefern die hergestellten Bauteile bei Peltiertemperaturen Ausgangsleistungen von einigen mW und erweisen sich aufgrund ihres kontinuierlichen Durchstimbarkeitsverhaltens der Emissionswellenlänge insbesondere für spektroskopische Anwendungen als geeignet.

**Schlagwörter:** Quantenkaskadenlaser, DFB-Laser, Gassensorik, mittleres Infrarot, Spektroskopie

## Single Mode Quantum Cascade DFB-Lasers with Metal Bragg gratings

We have developed quantum cascade Fabry-Perot and DFB lasers based on GaAs with emission wavelengths around 9...11  $\mu\text{m}$ . This wavelength range is particularly suitable for the sensitive detection and monitoring of a variety of important pollutant gases such as  $\text{CO}_2$  (9.5  $\mu\text{m}$ ),  $\text{O}_3$  (9.7  $\mu\text{m}$ ), and  $\text{NH}_3$  (10.7  $\mu\text{m}$ ) or for investigations of liquids. The lasers are mounted on standard c-mounts and can easily be incorporated into a module. In pulsed mode these devices emit peak power levels of a few mW at Peltier temperatures and exhibit continuous wavelength tuning by temperature and current.

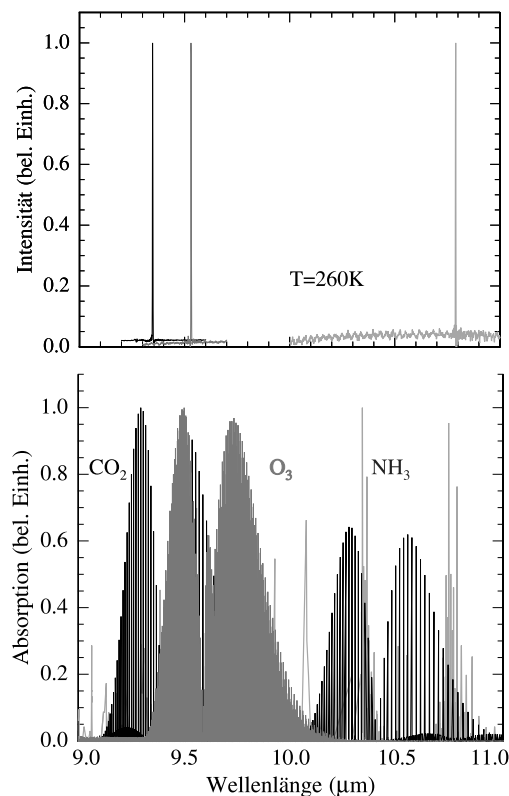
**Keywords:** Quantum cascade laser, gas sensing, DFB laser, mid-infrared, spectroscopy

### 1 Einleitung

Aufgrund des stetigen Interesses an neuartigen, ständig sensitiveren Messtechniken zum Nachweis von chemischen Stoffen wurden in den letzten Jahren vielerlei innovative Detektionssysteme entwickelt. Ein Großteil dieser Systeme auf dem Weltmarkt basieren auf dem Prinzip der optischen Absorption. Typische Anwendungsfelder erstrecken sich von der medizi-

nischen Diagnostik über die Prozesskontrolle bis hin zur Umweltanalytik und vielen weiteren Bereichen. Die meisten dieser Sensoren beinhalten kohärente Lichtquellen wie beispielsweise konventionelle Halbleiterlaserdioden, die im Nahen Infrarot emittieren, d. h. in dem Spektralbereich, in dem die höherharmonischen Schwingungs-Rotations-Spektren der technologisch interessantesten Gase liegen (z. B.,  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ ). Aufgrund der Tatsache, dass in diesem Falle Absorp-

tionsbanden von *angeregten* elektronischen Zuständen mit *niedrigen* Übergangswahrscheinlichkeiten abgetastet werden, haben diese konventionellen Systeme inhärent eine begrenzte Nachweisempfindlichkeit. Alternative Detektionssysteme mit einer erhöhten Sensitivität, welche für hochaufgelöste und hochselektive Messungen erforderlich ist, benötigen daher kohärente Lichtquellen, die spektroskopisch Übergänge innerhalb der Grundzustands-Absorptionsbanden der zu untersuchenden Spezies anregen. Diese Übergänge liegen im Allgemeinen im Mittleren Infrarot (MIR). Beispielhaft zeigt der untere Teil von Bild 1 die Absorptionsspektren von drei besonders aus umweltanalytischer Sicht wichtigen Gasen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{O}_3$ .



**Bild 1:** Unterer Teil: Absorptionsspektren von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{NH}_3$ . Oberer Teil: Spektren von drei exemplarischen GaAs/AlGaAs-QC-DFB-Lasern, die nahe am Absorptionsmaximum der zugehörigen Gase emittieren. (Zur besseren Übersicht sind Spektren- und Absorptionsdaten normiert aufgetragen).

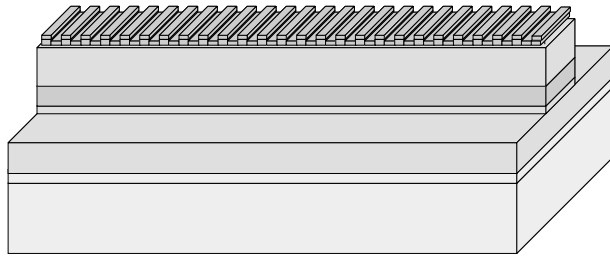
**Figure 1:** Bottom: Absorption spectra of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{NH}_3$ . Top: Spectra of three GaAs/AlGaAs-QC-DFB-lasers, each with an emission wavelength close to the absorption maximum of the corresponding gas. (The spectra and absorption data are normalized for clarity.)

Bis vor kurzem war dieser Spektralbereich nur mit auf Bleisalzlasern basierenden Detektionssystemen zugänglich, deren Betrieb üblicherweise teures und zeitaufwändiges Kühlen mit flüssigem Stickstoff erfordert. Der MIR-Bereich kann nun aber auch mit Quantenkaskadenlasern (QCL), d. h. unipolaren Halbleiterlasern, abgedeckt werden, bei welchen die Laseremission auf Intrabandübergängen im Leitungsband der Heterostruktur basiert. Im Rahmen von QUANSYS wurden hierbei Laser auf der Basis von GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen hergestellt. Diese Laser arbeiten im gepulsten Betrieb bei Raumtemperatur oder knapp darunter. Ein weiterer Vorteil des Quantenkaskadenlaser-Konzepts liegt darin, dass im Gegensatz zu konventionellen Halbleiterlasern, bei denen die Emissionswellenlänge von der Bandlücke vorgegeben ist, bei QCLs kein fundamentales Limit für die maximal erreichbare Laserwellenlänge existiert. Seit der ersten Realisierung eines QCL durch Lucent Technologies im Jahre 1994 [1] wurden diese weltweit für laserspektroskopische Verfahren in vielen industriellen und universitären Forschungslabors eingesetzt [2]. Bisher haben sich im Wesentlichen zwei Materialsysteme für die Herstellung von QCLs etabliert: GaInAs/AlInAs, basierend auf InP-Substrat, wo die kurzwellige Grenze aufgrund des Leitungsbandoffsets bei  $4,2 \mu\text{m}$  Emissionswellenlänge liegt und das GaAs/AlGaAs-Materialsystem mit einer minimal erreichbaren Wellenlänge von etwa  $8 \mu\text{m}$ .

Im Nachfolgenden werden wir einen kurzen Überblick über die Herstellungstechnologie unserer monomodig emittierenden GaAs-basierten Laser mit verteilter Rückkopplung (engl.: distributed feedback, DFB) geben und die typischen Eigenschaften dieser Bauteile im Hinblick auf deren Eignung für spektroskopische Messverfahren vorstellen.

## 2 Herstellungstechnologie/ Charakterisierung

Die Laser wurden mittels Molekularstrahlepitaxie nach einer von Page et al. [3] vorgeschlagenen Schichtabfolge auf GaAs-Substrat aufgewachsen. Die aktive Schicht besteht dabei aus 48 Perioden GaAs/AlGaAs, die beidseitig von GaAs-Wellenleiter-Schichten mit einem optimierten Dotierprofil eingeschlossen sind. Zunächst wurden multimodig emittierende Fabry-Perot(FP)-Laser d. h. Stegwellenleiterstrukturen mit Stegbreiten zwischen  $18 \mu\text{m}$  und  $24 \mu\text{m}$ , hergestellt. Durch das Ätzen eines Oberflächengitters mit einer genau festgelegten Periode konnten monomodig emittierende DFB-Laser realisiert werden.



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines DFB-Lasers mit Oberflächen-gitter.

**Figure 2:** Schematic of a DFB laser with top grating.

Bild 2 zeigt schematisch einen solchen DFB-Laser mit Oberflächen-gitter.

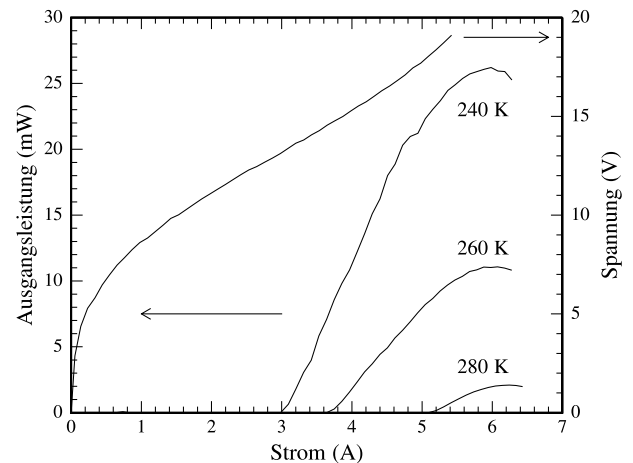
Nach dem Spalten der so erzeugten Bauteile auf eine Resonatorlänge von 1,0 mm wurden die Laser auf standardisierte c-mounts (polierte und entsprechend bondfähig beschichtete Kupfermounts) montiert. Diese Submounts werden im Allgemeinen für Anwendungen mit Hochleistungslasern eingesetzt und können recht einfach beispielsweise in ein optisches Modul integriert werden.

Zur Charakterisierung der Bauteile unterhalb von Raumtemperatur wurden die Laser an den Kaltfinger eines He-Flusskryostaten angebracht und im gepulsten Betrieb bei einer Pulslänge von 100 ns und Repetitionsraten zwischen 1 kHz und 10 kHz auf ihre optischen und elektrischen Eigenschaften hin untersucht. Dabei wurde ein HgCdTe-Detektor mit einer Bandbreite von 20 MHz eingesetzt. Zur Untersuchung des Emissionsspektrums der Laser wurde ein schnelles Fast-Fourier-Transform-Spektrometer (spektrale Auflösung  $0,2 \text{ cm}^{-1}$ ) verwendet.

## 3 Lasereigenschaften

### 3.1 Elektrische Kenngrößen und Leistungskennlinie

Die hergestellten Laserstrukturen können im gepulsten Modus bei Raumtemperatur oder knapp darunter (z. B. auf thermoelektrischen Peltierkühlern montiert) betrieben werden. Bild 3 zeigt die typische Strom-Lichtleistungs-Kennlinie sowie die Strom-Spannungs-Kennlinie eines DFB-Lasers mit einer Emissionswellenlänge um  $9,3 \mu\text{m}$  für verschiedene Betriebstemperaturen von 240 K bis 280 K. In diesem Temperaturintervall weisen die Laser Ausgangsleistungen von mehreren mW auf. Dieser Leistungsbereich ist für die meisten Anwendungen in der Sensorik und Spektroskopie ausreichend.

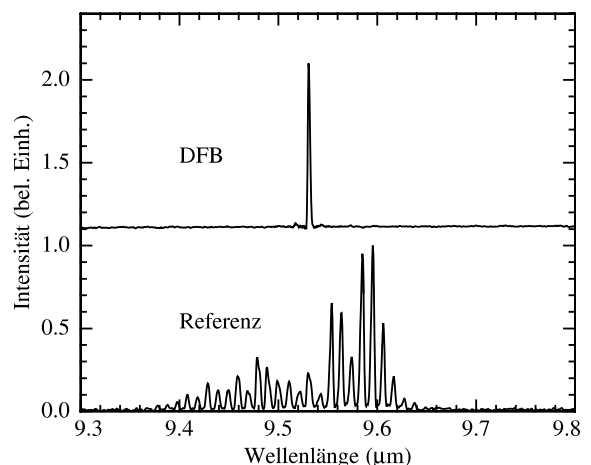


**Bild 3:** Strom-Lichtleistungs- und Strom-Spannungs-Kennlinien eines QC-DFB-Lasers mit einer Emissionswellenlänge um  $9,3 \mu\text{m}$  bei verschiedenen Temperaturen.

**Figure 3:** Current vs. output power and current vs. voltage curves of a QC-DFB laser with an emission wavelength around  $9,3 \mu\text{m}$  at various temperatures.

### 3.2 Spektrale Charakteristik

Während die FP-Laser eine spektral breite Emissionscharakteristik haben – die für manche spektroskopische Anwendungen durchaus von Interesse ist (z. B. mess-



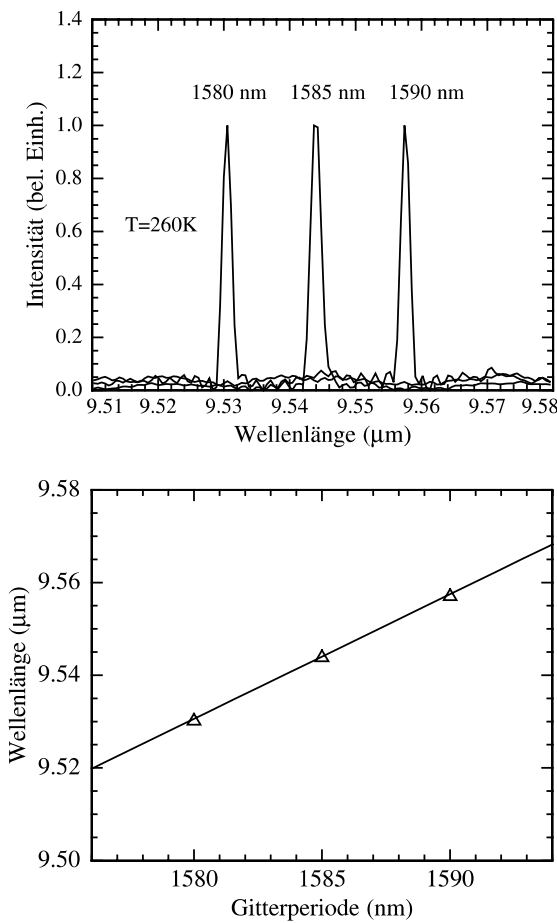
**Bild 4:** Laserspektren eines FP-Lasers (oben) und eines DFB-Lasers (unten), die auf der gleichen Epitaxiescheibe hergestellt wurden.

**Figure 4:** Laser spectra of a FP laser (top) and of a DFB laser (bottom), which have been processed from the same wafer.

technische Verfahren mit externen Resonatoren) – weisen die DFB-Laser aufgrund des Rückkopplungsgitters eine spektral scharfe, monomodige Emission auf. Somit erlaubt der Einsatz von DFB-Lasern das direkte Abtasten einzelner Absorptionslinien. Die Emissionswellenlänge der DFB-Laser kann über die Periode des Rückkopplungsgitters präzise auf einen gewünschten Wert eingestellt werden: Die Lichtwelle innerhalb des Stegwellenleiters wechselwirkt mit dem Metall-Bragg-Gitter, das eine periodische Modulation des Real- und Imaginärteils des Brechungsindex darstellt und somit

eine verteilte Rückkopplung verursacht, die zu einer monomodigen Emission führt. Im Gegensatz zu rein indexgekoppelten Lasern, wo sich das Gitter innerhalb der aktiven Zone befindet, ist mit diesem Konzept der Top-Metall-Bragg-Gitter eine vereinfachte Prozesstechnologie verbunden, da auf ein Überwachen der Gitterstruktur verzichtet werden kann und gleichzeitig eine höhere Ausbeute an monomodigen Bauteilen zu erwarten ist.

Der Einfluss des Rückkopplungsgitters auf die Emissionscharakteristik der Laser ist in Bild 4 gezeigt, wo vergleichend die Spektren eines FP- und DFB-Lasers dargestellt sind, die auf dem gleichen Wafer hergestellt wurden. Dieser Vergleich zeigt, dass der spektrale Gainbereich des Lasers etwa 200 nm umfasst, d. h. dieser Bereich kann bei entsprechender Wahl der Gitterperiode zur Herstellung singlemodig emittierender Bauteile genutzt werden. Bisher haben sich die Arbeiten bei nanoplus auf DFB-Laser im Wellenlängenbereich um 10 µm konzentriert, insbesondere 9,3 µm (z. B. für die CO<sub>2</sub>-Sensorik), 9,5 µm (z. B. für die O<sub>2</sub>-Detektion) und 10,7 µm (z. B. für den NH<sub>3</sub>-Nachweis). Repräsentative Spektren dieser Lasertypen sind im oberen Teil von Bild 1 dargestellt. Gemäß der Bragg-Bedingung  $\lambda = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$ , ist die Emissionswellenlänge  $\lambda$  des Lasers über den effektiven Brechungsindex  $n_{\text{eff}}$  linear mit der Gitterperiode  $\Lambda$  verknüpft. Beispielhaft sind hierzu in Bild 5 drei Spektren von DFB-Lasern mit unterschiedlichen Gitterperioden gezeigt. Der Einfluss des Gitters manifestiert sich wie erwartet in einer linearen Abhängigkeit der Emissionswellenlänge von der Gitterperiode (unterer Teil von Bild 5).

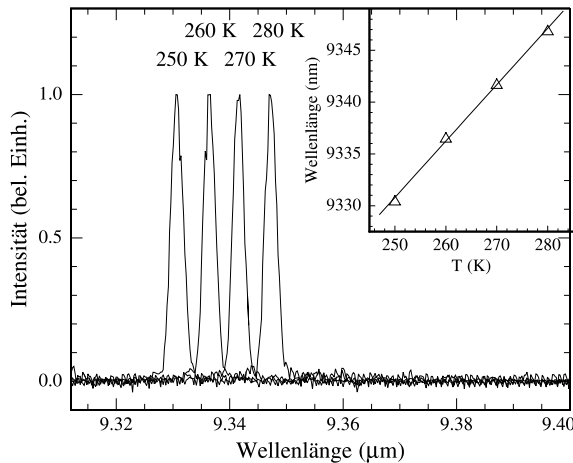


**Bild 5:** Oben: Spektren von drei QC-DFB-Lasern mit unterschiedlicher Gitterperiode. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Daten normiert aufgetragen. Unten: Abhängigkeit der Emissionswellenlänge von der Gitterperiode. Die durchgezogene Linie ist eine lineare Anpassung.  
**Figure 5:** Top: Spectra of three QC-DFB lasers with different grating periods. For clarity the data are shown normalized. Bottom: Wavelength dependence on grating period. The solid line is a linear fit to the data.

### 3.3 Wellenlängendurchstimmung

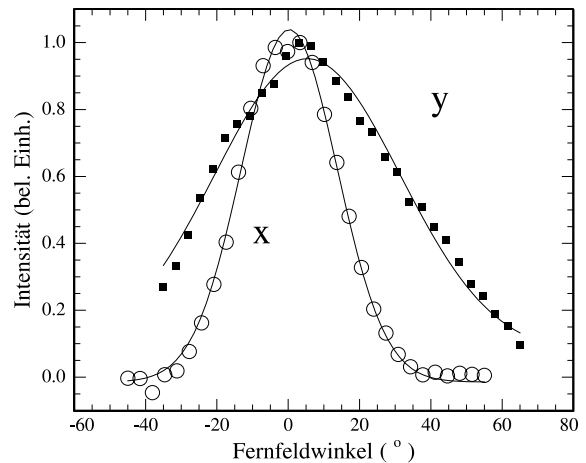
Die Durchstimmbarkeit der DFB-Wellenlänge ist einer der Schlüsselfaktoren für den erfolgreichen Einsatz der Bauteile in der Laserspektroskopie. Im Hinblick auf eine gute Sensitivität und schnelle Datenaufnahme sind sowohl eine hohe Durchstimmrate als auch ein spektral möglichst breiter Durchstimmbereich der Laser in Sensorikanwendungen wünschenswert. Eine grobe Wellenlängenverschiebung kann über eine Veränderung der Lasertemperatur erzielt werden, während die Feineinstellung der Wellenlänge über den Laserstrom erreicht werden kann. In Bild 6 ist das Spektrum eines DFB-QCL bei verschiedenen Temperaturen von 250 K bis 280 K gezeigt. Innerhalb dieses Intervalls kann der Laser einen Wellenlängenbereich von 16 nm abdecken. Die Durchstimmrate der Wellenlänge beträgt 0,54 nm/K. Die beobachtete Wellenlängenverschiebung ist eine Folge der Temperaturabhängigkeit des effektiven Brechungsindex.

Im Gegensatz dazu weisen FP-Laser etwa die dreifache Durchstimmrate auf. Dies ist in der Tatsache



**Bild 6:** Spektrum eines DFB-QCL bei verschiedenen Temperaturen. Die Spektren sind der Übersichtlichkeit wegen normiert aufgetragen. Im Inset ist die Abhängigkeit der Emissionswellenlänge von der Temperatur dargestellt.

**Figure 6:** Spectrum of a DFB-QCL at different temperatures. The spectra are normalized to unity for clarity. The inset shows the dependence of the emission wavelength on temperature.



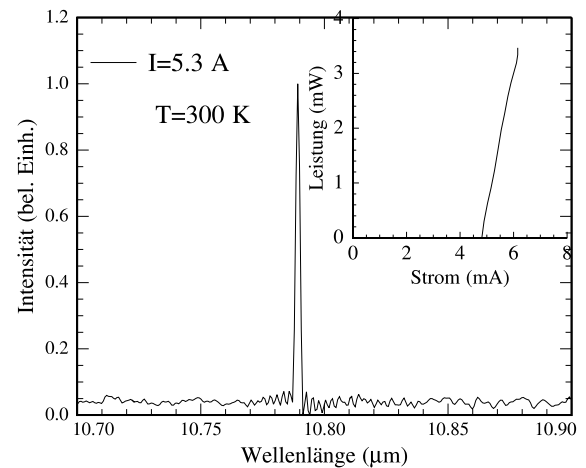
**Bild 7:** Strahlprofil eines QC-DFB-Lasers mit einer Emissionswellenlänge um 9,5 μm bei einer Temperatur von 270 K. Die durchgezogenen Linien sind Kurvenanpassungen mit einer Gaussfunktion.

**Figure 7:** Beam profile of a QC-DFB laser with an emission wavelength around 9.5 μm at a temperature of 270 K. The solid lines are Gaussian fits to the data.

begründet, dass in diesem Fall die Laserwellenlänge bei verschiedenen Temperaturen von der Temperaturabhängigkeit des spektralen Gains abhängt, die wesentlich größer als die Temperaturabhängigkeit des effektiven Brechungsindex ist.

### 3.4 Fernfeldeigenschaften

Ein wesentliches Kriterium für eine effektive Integration der QCL-Bauteile in optische Systeme wie beispielsweise Gassensorik-Module ist eine ausreichend kleine Strahldivergenz. Um diese Fernfeldeigenschaften der DFB-Laser zu ermitteln, wurden winkelaufgelöste Messungen des Strahlprofils bei verschiedenen Temperaturen bis 270 K durchgeführt. Bild 7 zeigt den vertikalen und horizontalen Querschnitt des Strahlprofils eines DFB-Lasers mit einer Emissionswellenlänge um 9,5 μm. Im Fernfeld erkennt man klar die laterale Monomodigkeit des Lasers, d. h. es wird Emission aus dem  $TM_{00}$ -Grundzustand beobachtet. Die Fernfeldwinkel betragen 28° in horizontaler und 52° in vertikaler Richtung. Aufgrund der relativ großen Breite und Höhe des geätzten Stegwellenleiters sind diese Fernfeldwinkel ausreichend klein, was eine einfache Kollimation bzw. Fokussierung des Strahls mit konventioneller MIR-Optik erlaubt.



**Bild 8:** Spektrum und Kennlinie (Inset) eines QCL-DFB auf Basis des Bound-to-continuum-Designs bei Raumtemperatur (gepulster Betrieb).

**Figure 8:** Spectrum and current vs. power curve of a QCL-DFB based on the bound-to-continuum design at room temperature (pulsed operation mode).

## 4 Ausblick und Zusammenfassung

Durch Verwendung eines neuartigen Schichtaufbaus für die Quantenkaskaden-Heterostrukturen (sog. Bound-to-continuum-Design [5]) konnten auf der Basis von GaAs bei nanoplus kürzlich DFB-QCLs realisiert werden, die auch bei Raumtemperatur betrieben werden können. Exemplarisch zeigt Bild 8 das Spektrum und die Lichtleistungskennlinie (Inset) eines solchen Bauteils.

Auf der Basis von GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen wurden mithilfe des Konzeptes der Metall-Bragg-Gitter monomodig emittierende Quantenkaskadenlaser mit einer Emissionswellenlänge um  $10\ \mu\text{m}$  hergestellt. Diese weisen im gepulsten Betrieb bei Temperaturen knapp unter Raumtemperatur Ausgangsleistungen von mehreren mW auf.

### Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die Förderung im Rahmen des Verbundprojektes QUANSYS (FKZ 13N8019) sowie allen Verbundpartnern für die gute Zusammenarbeit. Insbesondere danken wir Herrn Dr. Thomas Beyer und Frau Susanne Hartwig am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg für die Durchführung der Fernfeldmessungen.

### Literatur

- [1] Faist, J.; Capasso, F.; Sivco, D.L.; Sirtori, C.; Hutchinson, A.L.; Cho, A.Y.: Quantum cascade laser, *Science*, **264**, 553 (1994).
- [2] Einen detaillierten Überblick über die vielfachen Anwendungen von QCLs in der Sensorik geben Kosterev, A.A.; Tittel, F.K.: Chemical sensors based on quantum cascade lasers, *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 582 (2003).
- [3] Page, H.; Becker, C.; Robertson, A.; Glastre, G.; Ortiz, V.; Sirtori, C.: 300 K operation of a GaAs-based quantum cascade laser at  $\lambda \approx 9\ \mu\text{m}$ . *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3529 (2001).
- [4] Faist, J.; Gmachl, C.; Capasso, F.; Sirtori, C.; Sivco, D.L.; Baillargeon, J.N.; Hutchinson, A.L.; Cho, A.Y.: Distributed feedback quantum cascade lasers. *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2670 (1997).
- [5] Flügl, C.; Schrenk, W.; Anders, S.; Strasser, G.; Becker, C.; Sirtori, C.; Bonetti, Y.; Müller, A.: High temperature performance of GaAs-based bound-to-continuum quantum-cascade lasers. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4698 (2003).



**1 Dr. Johannes Koeth** ist Geschäftsführer der nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH.

**Adresse:** s. Seufert, E-Mail: koeth@nanoplus.com

**2 Dr. Jochen Seufert** leitet die Abteilung Messtechnik bei der nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH.

**Adresse:** nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH, Oberer Kirschberg 4, 97218 Gerbrunn, Tel.: +49 (0)931-90827-0, Fax: +49 (0)931-90827-19, E-Mail: seufert@nanoplus.com

**3 Dr. Marc Fischer** leitet die Laserprozesslinie bei der nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH.

**Adresse:** s. Seufert, E-Mail: fischer@nanoplus.com

**4 Sven Höfling** ist Doktorand in der Forschungsgruppe Optoelektronik am Lehrstuhl für Technische Physik der Fakultät für Physik und Astronomie an der Universität Würzburg.

**Adresse:** s. Forchel, E-Mail: hoefling@physik.uni-wuerzburg.de

**5 Prof. Dr. Johann Peter Reithmaier** ist Leiter der Forschungsgruppe Optoelektronik am Lehrstuhl für Technische Physik der Fakultät für Physik und Astronomie an der Universität Würzburg.

**Adresse:** s. Forchel, E-Mail: reithmaier@physik.uni-wuerzburg.de

**6 Prof. Dr. Alfred Forchel** ist Leiter des Lehrstuhls für Technische Physik der Fakultät für Physik und Astronomie an der Universität Würzburg.

**Adresse:** Technische Physik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, E-Mail: forchel@physik.uni-wuerzburg.de