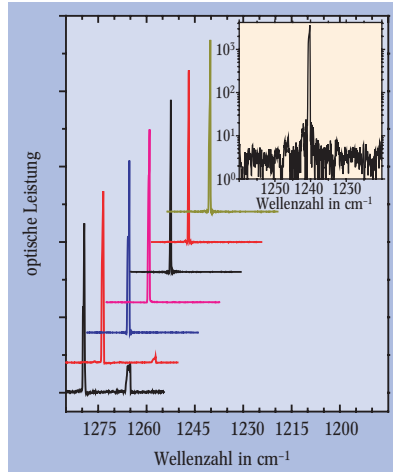


talle maßzuschneidern. Während sich die photonische Energielücke ausnutzen lässt, um kompakte hochreflektierende Laserspiegel herzustellen, ermöglichen Defekte im Kristall beispielsweise lokalisierte Lasermoden mit sehr kleinem Modenvolumen (typisch  $\lambda^3$ ).

Die nun veröffentlichte erstmalige Kombination dreier zunächst völlig unabhängiger Konzepte – Quantenkaskadenlaser, Oberflächenemission und photonische Kristallstrukturen

**Abb. 2:** Die Laserenergie des Mikroquantenkaskadenlasers hängt von der Gitterkonstante  $a$  ( $a = 2,84 \mu\text{m}$  für die beiden unteren,  $a = 2,92 \mu\text{m}$  für die anderen Kurven) sowie vom Verhältnis von Lochradius  $r$  zu Gitterkonstante  $r/a$  (variiert von 0,28 bis 0,32) ab. Das Inset zeigt die Emission in eine einzige Mode (aus [3]).



– ergibt ein Bauelement mit großem Potenzial. Die photonische Kristallstruktur besteht darin aus einem hexagonalen Gitter von Löchern in der Halbleiterstruktur (Abb. 1). Im Verhältnis zu bisher vorgestellten Quantenkaskadenlasern (typische Abmessungen  $2 \text{ mm} \times 10 \mu\text{m}$ ) ist die Laserfläche auf ca. ein Zehntel reduziert. Diese geringe Ausdehnung wird durch die starke Wechselwirkung zwischen optischer Mode und photonischem Kristall ermöglicht. Wie in der Arbeit durch Modellrechnungen zur photonischen Bandstruktur gezeigt wird, hat eine zweidimensional periodische Brechungsindexmodulation durch den Einbau von Löchern mit typischen Durchmessern von ca.  $2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe von ca.  $5 \mu\text{m}$  einen starken Einfluss auf die photonische Bandstruktur. Allerdings zeigt sich für die TM-polarisierten Moden der Quantenkaskadenlaser noch keine Energielücke für eine Wellenausbreitung in der Ebene. Hierzu wäre es notwendig, den Lochdurchmesser weiter zu erhöhen, was jedoch zu einer Reduzierung des aktiven Materials und damit zu einer Abnahme der Verstärkung im Laser führt. Durch den zentralen Defekt entstehen zusätzliche Defektmoden, die allerdings weniger zur Festlegung der Emissionswellenlänge als zur Er-

höhung des Anteils von aktivem Material in der Struktur relevant sind.

Entscheidend für die Laseremission ist der Überlapp eines Bereichs hoher photonischer Zustandsdichte an der Kante eines Bandes mit dem Verstärkungsspektrum des Materials. Da die Bandkante von der Gitterperiode und dem Lochradius abhängt, lässt sich die Energie der Lasermode durch die Variation der Kristallstruktur gezielt einstellen (Abb. 2). Wegen der geringen Strukturgröße sind die Laserspektren einmodig (Inset in Abb. 2). Dies ist besonders für Sensorikanwendungen wichtig. Bei einer Betriebstemperatur von 10 K wurde eine Laserleistung von ca. 1 mW realisiert.

Auch wenn die vorgestellten Laser noch auf tiefe Arbeitstemperaturen und geringe Leistungen beschränkt sind, so ist beispielsweise klar absehbar, dass miniaturisierte Quantenkaskadenlaser mit photonischen Kristallen neue Freiheitsgrade z.B. zur Optimierung des für Quantenkaskadenlaser kritischen Verhältnisses aus elektrischer Leistungsaufnahme und der Ableitung der Verlustwärme ermöglichen werden. Dies sollte es erlauben,

Quantenkaskadenlaser bei noch höheren Temperaturen als bisher gepulst oder im Dauerstrichbetrieb einsetzen zu können. In diese Richtung gehen auch in Würzburg durchgeführte Arbeiten, bei denen durch den Einsatz von tiefgeätzten eindimensionalen photonischen Kristallen (geätzten Bragg-Spiegelstrukturen)  $180 \mu\text{m}$  lange Quantenkaskadenlaser realisiert werden konnten [7].

ALFRED FORCHEL UND  
MARTIN KAMP

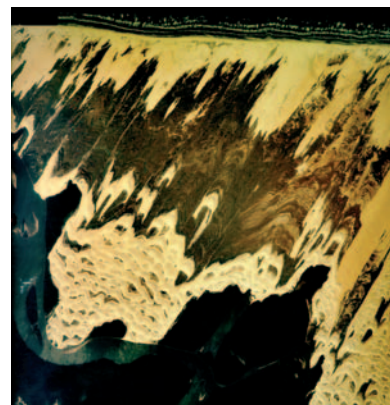
- [1] N. Holonyak und S. F. Bevacqua, Appl. Phys. Lett. **1**, 82 (1962), R. N. Hall et al., Phys. Rev. Lett. **9**, 366 (1962); M. I. Nathan et al., Appl. Phys. Lett. **1**, 62 (1962)
- [2] O. Painter et al., Science **284**, 1819 (1999); T. Happ et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 4 (2003)
- [3] R. Colombelli et al., Science **302**, 1374 (2003)
- [4] R. F. Kazarino und, R. Suris, Sov. Phys. Semicond. **5**, 707 (1971)
- [5] J. Faist et al., Science **264**, 553 (1994)
- [6] J. D. Joannopoulos et al., Photonic crystals: Molding the flow of light, Princeton University Press, Princeton (1995)
- [7] S. Höfling et al., Electr. Lett., Februar 2004

Prof. Dr. Alfred Forchel, Dr. Martin Kamp, Lehrstuhl für technische Physik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

## Wenn Dünen wandern

Sand und Wind – das sind die notwendigen Zutaten für die Entstehung von Dünen. Zu den bekannten charakteristischen Formen gehören die sog. Barchane. Diese sichelförmigen Wanderdünen entstehen, wenn nur relativ wenig Sand vorhanden ist und der Wind immer aus der gleichen Richtung bläst. Die Geschwindigkeit der Barchane ist umgekehrt proportional zu ihrer Höhe und kann einige 10 Meter pro Jahr betragen. Hans J. Herrmann von der Uni Stuttgart ist es nun gemeinsam mit Mitarbeitern gelungen, die Bewegungsgleichungen im Rahmen eines Kontinuummodells zu lösen und damit die Beobachtung zu erklären, dass sich Barchane unterschiedlicher Größe scheinbar überholen können [V. Schwämm-

le, H. J. Herrmann, Nature **426**, 619 (2003)]. Die Simulationen zeigen, dass die anfangs kleinere und schnellere Düne nach dem Einholen der größeren solange Sand von dieser aufnimmt, bis sie selbst groß und langsam geworden ist und die Form der großen Düne



angenommen hat. Zugleich ist die anfangs große Düne „abgeschmolzen“ und entteilt nach vorne. Das Luftbild zeigt den Nationalpark Lençóis Maranhenses im Nordosten Brasiliens, in dem verschiedene Dünenformen vorkommen.

Der Wind bläst konstant vom Atlantik (oben) und trägt Sand mit sich. Links unten ist zu erkennen, wie einzelne Barchane zu Vorläufern von „gewöhnlichen“ transversalen Dünen verschmelzen. (Foto: Embrapa)