

Ladungen lokal getrennt werden. Transportprozesse in der Gewitterwolke führen dann zu einer großräumigen Trennung der Ladungsträger, sodass elektrische Felder bis zu vielen hunderttausend Volt pro Meter erreicht werden können, die mit Ballonaufstiegen innerhalb von Gewitterwolken nachgewiesen wurden [2]. Wird eine kritische Spannung überschritten, so entsteht ein

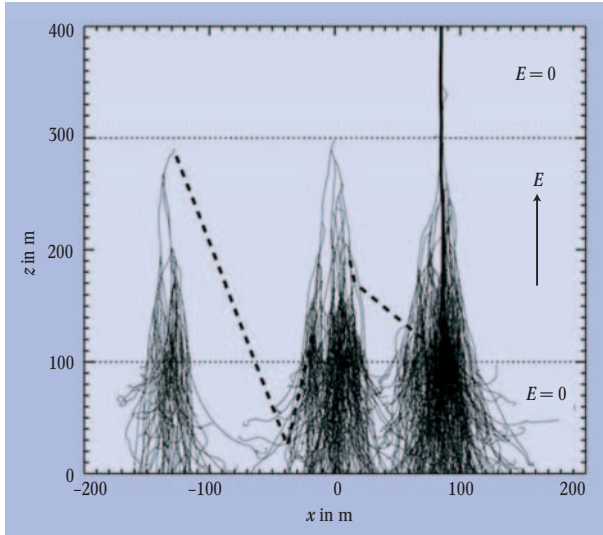


Abb. 2: In der Simulation laufen Photonen (gestrichelt) und Positronen (dicke schwarze Linie) gegen die durch das vorherrschende elektrische Feld definierte Lawinenrichtung und lösen so zusätzliche Lawinen energiereicher Elektronen aus. Gewitterwolken bilden sich meist in einer Höhe von 4–5 km, dabei erstreckt sich das hohe elektrische Feld, das sich schließlich im Blitz entlädt, typisch über einige hundert Meter (aus [1]).

Blitz, der einen Ladungsausgleich in der Gewitterwolke herstellt. In der allerersten Phase der Blitzgenese wird hochenergetische Strahlung emittiert, die sich am Erdboden messen lässt [3]. Hierbei ließ sich jedoch bislang nur darauf schließen, dass es sich um Strahlung mit einer Energie von über 10 keV handeln muss. Ob es sich dabei jedoch um Röntgen-, Gammastrahlung oder um relativistische Elektronen handelt, konnte mit dem verwendeten Detektor (NaI(Tl)-Szintillationsdetektor) nicht unterschieden werden. Präzise Messungen an Blitzen in Gewittern sind natürlich relativ schwierig. In Ref. [3] wurde der Blitz künstlich durch eine Rakete ausgelöst.

Die theoretische Beschreibung der Blitzgenese, die Joseph Dwyer vom Florida Institute of Technology gerade vorgeschlagen hat [1], könnte drei Beobachtungen kausal miteinander verknüpfen: das maximal gemessene elektrische Feld im Innern einer Gewitterwolke, die beobachtete hochenergetische Strahlung und die Entstehung des Blitzes. Der

vorgeschlagene Mechanismus ist eine Erweiterung des Konzepts der so genannten Runaway-Elektronen, das im letzten Jahrzehnt von russischen Wissenschaftlern ausgearbeitet und auf Blitze angewendet wurde [4]. Dabei handelt es sich um Elektronen, die so hohe Energien haben, dass trotz fortwährender Stöße mit dem Neutralgas die Wahrscheinlichkeit für die Stoßionisierung eines neutralen Moleküls wieder sehr klein wird. Die Elektronen werden darum im hinreichend starken elektrischen Feld immer weiter beschleunigt und können dann eine Lawine von schnellen Elektronen mit Energien im MeV-Bereich erzeugen. Ein einziges hochenergetisches kosmisches Teilchen, das in ein Gebiet mit einem hohen elektrischen Feld im Innern der Gewitterwolke eintritt, kann eine Lawine aus Runaway-Elektronen auslösen, die sich entweder direkt oder durch ihre Bremsstrahlung als energetische Strahlung nachweisen lassen. Der Mechanismus legt daher einen direkten Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und der Entstehung von Blitzen nahe.

Allerdings ist die Ausbeute der Lawine pro kosmisches Teilchen dadurch beschränkt, dass das hohe elektrische Feld sich nur über einige hundert Meter ausdehnt, sodass die Anzahl der Generationen von energiereichen Elektronen begrenzt bleibt. Die neue Arbeit schlägt nun vor, dass die primäre Lawine weitere Lawinen erzeugt, und so die lokale Plasmadichte sehr schnell weiter zunimmt: Dazu sollen Photonen und/oder Positronen gegen die durch das Feld definierte Lawinenrichtung laufen und so weitere Lawinen energiereicher Elektronen auslösen (Abb. 2). Dabei könnten die Positronen durch Paarbildung aus energiereichen Photonen entstehen, während die Photonen aus der Bremsstrahlung der Elektronen in Materie hervorgehen. Mit diesem sehr schnellen und lokal begrenzten Prozess ließe sich die beobachtete hochenergetische Strahlung erklären, ebenso die Erzeugung des Plasmakeims für den späteren Durchschlag eines Blitzes. Diese mögliche Quelle hochenergetischer Strahlung von Blitzen würde somit auch zu einer neuen Bewertung früherer Beobachtungen führen. Satelliten beobachten hin und wieder hochenergetische Strahlungsimpulse terrestrischen Ursprungs, die ursprünglich „Sprites“ zugeschrieben wurden [5].

Sprites sind kurzzeitige, rot-bläuliche Leuchterscheinungen oberhalb von Gewitterwolken, die bis zur Ionosphäre hinaufreichen können und von außergewöhnlich starken Blitzen in Gewittern ausgelöst werden. Sie wurden erst 1990 in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben und werden seither vielfältig untersucht. Aber sind Sprites wirklich nötig für die Erklärung der von Satelliten beobachteten hochenergetischen Strahlung? Oder könnte die Wolke selbst zum Zeitpunkt der Blitzentstehung durch den vorgeschlagenen Mechanismus wesentlich stärker strahlen als bislang angenommen? Eine experimentelle Überprüfung des vorgeschlagenen neuen Prozesses zur hochenergetischen Strahlung und Entstehung von Blitzen ist daher sicher genauso wünschenswert, wie eine ausführlichere Beschreibung der verwendeten numerischen Modellrechnungen und Parametrisierungen.

MARTIN FÜLLEKRUG UND
UTE EBERT

- [1] J. R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2055 (2003)
- [2] T. C. Marshall, M. P. McCarthy und W. D. Rust, *Journal of Geophysical Research* **100**, 7097 (1995)
- [3] J. R. Dwyer et al., *Science* **299**, 694 (2003)
- [4] A. V. Gurevich und K. P. Zybin, *Physics Uspekhi* **44**, 1119 (2001)
- [5] G. J. Fishman et al., *Science* **264**, 1313 (1994)

Mikrolaser mit Potenzial

Seit der ersten Realisierung im Jahr 1962 [1] haben Halbleiterlaser einen weitreichenden Siegeszug in zahlreiche Bereiche des täglichen Lebens angetreten, von der Unterhaltungselektronik über die Telekommunikation bis zur optischen Sensorik. Gegenüber anderen Laserarten zeichnen sich Halbleiterlaser durch mehrere anwendungsrelevante Vorteile aus. Hierzu gehört einerseits die Möglichkeit, elektrischen Strom direkt in kohärente Lichtemission umzuwandeln. Gleichzeitig ist die Verstärkung pro Länge in diesen Festkörperlasern sehr groß, sodass schon kleine, nur Bruchteile eines Millimeters große Bauelemente ausreichen, um Leistungen von vielen hundert mW zu erzeugen. Die Kombination sehr kompakter Geometrien mit einer hohen Konversions-effizienz von elektrischer zu

Priv.-Doz. Dr.
Martin Füllekrug,
Institut für Meteorologie und Geophysik, Feldbergstr. 47, 60323 Frankfurt am Main;
Prof. Dr. Ute Ebert,
Centrum voor Wiskunde en Informatica, P.O.Box 94079, NL-1090 GB Amsterdam, Niederlande

Lichtleistung erlaubt es weiterhin, Halbleiterlaser mit sehr geringen Stromstärken zu betreiben. Für die meisten Anwendungen werden kantenemittierende Laser eingesetzt, bei denen das Licht aus einer seitlichen Oberfläche der Laserschicht austritt. In jüngster Zeit sind besonders für Anwendungen in der Datenkommunikation oberflächenemittierende Laser attraktiv geworden, da diese Strukturen sehr kompakt sind und sich besonders kostengünstig herstellen und testen lassen. Noch kleinere Laser und damit vielfältigere Einsatzmöglichkeiten verspricht die Kombination dieser Laser mit sog. photonischen Kristallen [2]. Dieses Ziel haben Wissenschaftler der Bell Laboratories und Kollegen kürzlich erstmals mit Quantenkaskadenlasern erreicht [3].

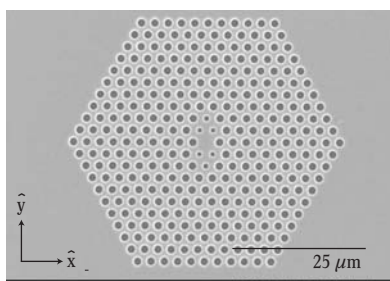


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Quantenkaskadenlasers mit photonischem Kristall (Lochgitter). Im Zentrum der Struktur wurde ein künstlicher Defekt durch Auslassen eines Lochs sowie durch die Variation der Größe einiger benachbarter Löcher eingebaut. Der Durchmesser der gesamten Struktur beträgt nur ca. $40 \mu\text{m}$ (aus [3]).

Wie alle Laser basieren auch Halbleiterlaser auf stimulierter Emission, bei der ein zunächst spontan emittiertes Photon die kohärente Emission weiterer Photonen gleicher Energie bewirkt. Voraussetzung für die Lichtverstärkung im Laser ist eine Besetzungsinversion, die durch eine höhere Besetzung des angeregten Zustandes, aus dem die Laseremission auftritt, gegenüber dem Grundzustand gekennzeichnet ist. In Halbleiterlasern, wie sie in der Nachrichtentechnik oder der Unterhaltungselektronik gegenwärtig eingesetzt werden, findet diese Besetzungsinversion zwischen hoch n- und p-dotierten Gebieten statt und der Laserübergang zwischen der Leitungs- und der Valenzbandkante der Materialien. Man bezeichnet diese Laser deshalb als Interband-Laser.

Bereits 1971 haben Kazarinov

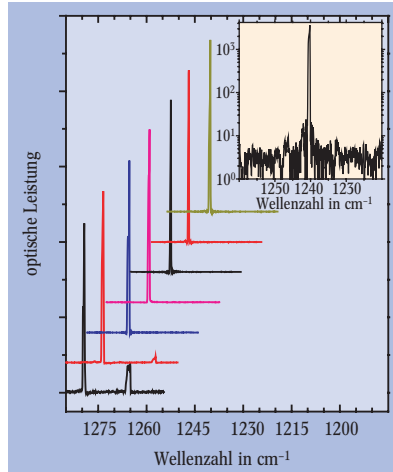
und Suris ein alternatives Laserkonzept vorgeschlagen, das auf einer Besetzungsinversion zwischen Zuständen in einem Band beruht [4]. Bei diesen unipolaren Laserstrukturen wird im Leitungsband durch wenige Nanometer dicke Halbleiter-Heteroschichten eine Subbandstruktur erzeugt, in der Elektronen durch stimulierte Emission Lichtverstärkung auslösen können. Für eine ausreichende Verstärkung ist es notwendig, die Laserübergänge in Form einer Kaskade hintereinander zu schalten – daher die Bezeichnung Quantenkaskadenlaser. Der erste Quantenkaskadenlaser wurde 1994 von einer Arbeitsgruppe um F. Capasso bei den Bell Laboratories realisiert [5]. Da der Energieabstand der Subbänder typischerweise bei ca. 100 meV liegt, emittieren diese Laser im mittleren infraroten (MIR) Spektralbereich. Sie werden hauptsächlich für die Sensorik von Spurenverunreinigungen in Gasen und Flüssigkeiten entwickelt, da beispielsweise die fundamentalen Übergänge der Rotations-Vibrationspektren von kleinen Molekülen im MIR-Bereich liegen. Dieser Spektralbereich lässt sich mit Interband-Lasern nur bei tiefen Temperaturen erreichen (typisch 77 K), während mit Quantenkaskadenlasern Betrieb bei Raumtemperatur möglich ist. Allerdings sind Quantenkaskadenlaser verhältnismäßig groß (typisch einige mm lang), weisen eine hohe elektrische Leistungsaufnahme auf (typisch mehrere 10 W) und haben bei Raumtemperatur nur eine geringe Konversionseffizienz.

Ein Ansatz zur Verbesserung der Eigenschaften von Quantenkaskadenlasern besteht darin, die Laserfläche zu reduzieren. Hierzu sind in den letzten Jahren bei Interbandlasern verschiedene Versuche mit sog. photonischen Kristallen unternommen worden. Photonische Kristalle sind Materialien, in denen der Brechungsindex eine starke periodische Modulation auf der Skala der Lichtwellenlänge aufweist. Analog zur elektronischen Bandstruktur, die durch den periodischen Aufbau von Einkristallen bewirkt wird, ergibt sich aus der Periodizität des Brechungsindex eine Bandstruktur für Photonen mit Energiebändern und Energielücken [6]. Sehr attraktiv für den Einsatz in Lasern ist die Möglichkeit, die photonische Bandstruktur und damit die Zustandsdichte über die Geometrie der Kris-

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 λ^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 mm × 10 μm) 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 μm und einer Tiefe von ca. 5 μm 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 μm lange Quantenkaskadenlaser realisiert werden konnten [7].

ALFRED FORCHEL UND
MARTIN KAMP

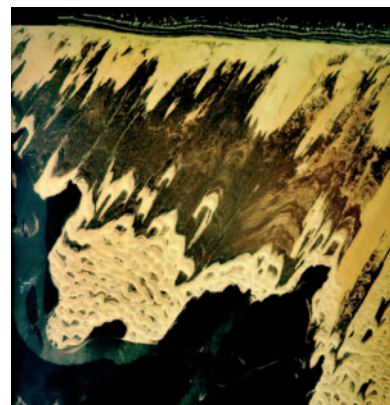
- [1] N. Holonyak und S. F. Bevacqua, Appl. Phys. Lett. **1**, 82 (1962), R. N. Hall et al., Phys. Rev. Lett. **9**, 366 (1962); M. I. Nathan et al., Appl. Phys. Lett. **1**, 62 (1962)
- [2] O. Painter et al., Science **284**, 1819 (1999); T. Happ et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 4 (2003)
- [3] R. Colombelli 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)