Erster mobiler stickstoffgekühlter Terahertz-Quantenkaskadenlaser

Johannes Kunsch, Laser Components GmbH, Olching
Erik Bründermann, Ruhr-Universität Bochum

Vorgestellt wird der Prototyp einer kompakten Laserquelle für den Terahertz-Bereich (THz). Der neu entwickelte Laser ist ein lediglich Flüssigstickstoff-gekühlter Quantenkaskadenlaser (quantum cascade laser, QCL), der auch mobile Applikationen ermöglicht. Messwerte zu optischer Leistung, Spektrum, Polarisation und Fernfeld werden angegeben. Eine einfache THz-Bildgebung bei Videofrequenz und die Detektion des THz-Lichts bei Raumtemperatur werden demonstriert.

In den vergangenen zehn Jahren ist der THz-Frequenzbereich zwischen dem Infraroten und den Mikrowellen in den Fokus der Fachwelt und der Medien gerückt. 1 THz entspricht 33 cm^{-1} bzw. 300 µm; THz-Licht hat besondere Eigenschaften, die es für verschiedene Anwendungen attraktiv macht: Einerseits sind Kunststoffe, Papier und viele trockene Feststoffe im THz-Bereich transparent, andererseits weisen kristalline organische Stoffe ein charakteristisches THz-Spektrum auf, einen ausgeprägten „chemischen Fingerabdruck". Diese Fingerabdrücke sind auf intermolekulare Resonanzen und Schwingungen innerhalb großer Biomoleküle zurückzuführen. Die Details dieser Wechselwirkungen sind Gegenstand der aktuellen Grundlagenforschung. Dennoch ist es jetzt mittels THz-Spektroskopie bereits möglich, rein phänomenologisch z.B. Drogen von Zucker zu unterscheiden, und zwar in geschlossenen Behältern und in Verpackungen wie Briefumschlägen oder Plastiktüten. Beliebte Laborexperimente, die auf Konferenzen vorgestellt werden, sind z.B. die Sichtbarmachung von Streichhölzern in ihrer Schachtel oder Messer in Turnschuhen. Diese Anwendungsmöglichkeiten der THz-Technologie verhalfen ihr bereits zu einer für die Wissenschaft eher ungewohnten Publizität [1].

1 Terahertz-Quellen

Bisher hat sich im THz-Bereich noch keine praktikable und wirklich einfach zu handhabende Strahlquelle etabliert. Verwendet werden Gaslaser, freie Elektronenlaser, Germanium-Laser, Femtosekundenlaser mit Auston-Schalter, Photomischer (nach dem Prinzip der Differenzfrequenzerzeugung) und auch Quantenkaskadenlaser. Letztere wurden bisher mit hohem apparativem Aufwand auf 10 K und darunter gekühlt. Erstmals ist nun aber auch ein neu entwickelter THz-Quantenkaskadenlaserkopf verfügbar, der bei deutlich höheren Temperaturen betrieben werden kann, nämlich unter einfacher Stickstoffkühlung bei 77 K. Er liefert in handlicher Form ausreichend Signalintensität selbst für ungekühlte Detektoren. Experimentelle Ergebnisse werden im Folgenden in gekürzter Form vorgestellt, eine ausführliche Beschreibung findet sich in [2].

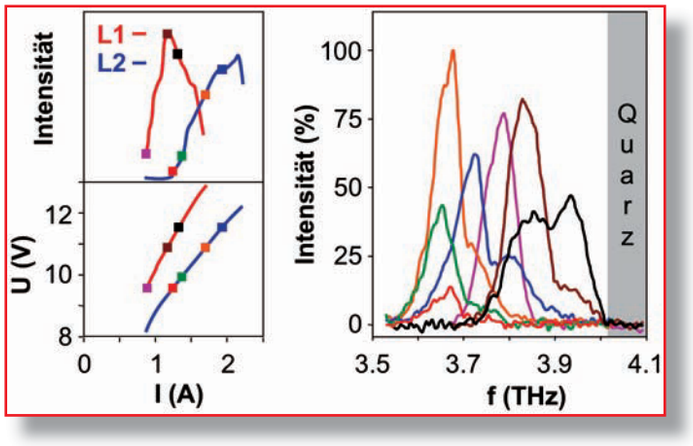

Bild 1: *Strom-Spannungs- sowie Strom-Intensitätskennlinien der Laser L1 und L2, sowie zugehörige Spektren [2]. Die Intensitätsskala ist für beide Laser identisch normiert. Strahlung oberhalb ca. 4 THz wird durch das Quarzfenster des Dewar-Gefäßes blockiert*

2 THz-QC-Laser: Eigenschaften, Spektren und Modenprofile

Die Experimente wurden mit zwei Terahertz-Quantenkaskadenlasern im Pulsbetrieb durchgeführt. Die beiden THz-QC-Laser L1 und L2 wurden in einen kleinen, mit flüssigem Stickstoff gekühlten Kryostaten bei 77 K betrieben. Die Breite der aktiven Zone von Laser L1 war 110 µm bei einer Chiplänge von 1,7 mm. Die aktive Zone von L2 war 210 µm breit. Die Strukturdetails beider Laser sind separat in [3] beschrieben – demgegenüber haben die hier vorgestellten Laser allerdings eine etwa zehnfach verminderte Leistung, da auf eine

hoch reflektierende (HR-) Beschichtung zur Leistungsverstärkung verzichtet wurde. Getestet wurden bewusst die schwächeren Laser, um die Eigenschaften von Laserchips zu demonstrieren, die im Gegensatz zu Spitzenmodellen aus der gegenwärtigen Forschung jederzeit verfügbar sind. Aus dem gleichen Grund erhielt im Test der Pulsbetrieb mit Tastverhältnissen bis max. 1% den Vorzug vor dem Dauerstrich-Betrieb. Es wurden zwar schon THz-QC-Laser im cw-Betrieb (continuous wave) realisiert, aber neben der Verfügbarkeit stellen sich auch Fragen zur Lebensdauer, die derzeit noch unbeantwortet sind. Der Pulsbetrieb stellt so aus heutiger Sicht den sinnvollsten Ansatz für ein QCL-basiertes THz-„Arbeitspferd" dar.

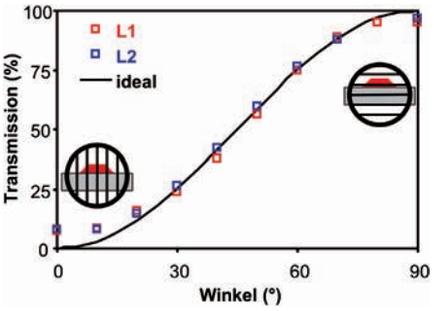

Bild 2: *Polarisation der Laser L1 und L2, gemessen mit einem Drahtgitter als Polarisationsfilter [2]. Die durchgezogene Linie entspricht der theoretischen Kurve für vollständig linear polarisiertes Licht, gemessen mit einem idealen Polarisator*

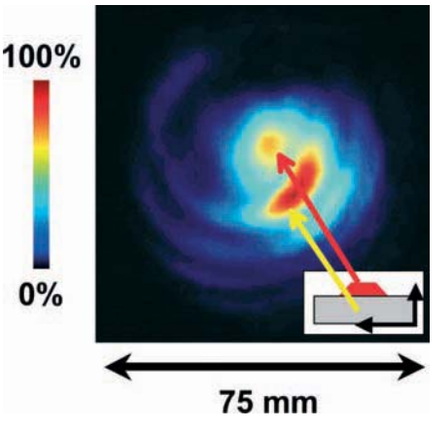

Bild 3: *Gemessene Fernfeldverteilung des Lasers L1 in 133 mm Entfernung [2]. Die Verteilung zeigt 2 Maxima entsprechend Emissionen aus der eigentlichen aktiven Zone (roter Pfeil) und aus dem Substrat. Die gemessene Intensitätsverteilung spiegelt das berechnete interne Modenprofil wider, auch die stärkere Emission aus dem Substrat [5]. Eine anschauliche Klärung dafür fällt schwer, wir stellen es uns aber so vor: Das Substrat ist ausgedehnter als die aktive Zone. Bei der aktiven Zone, deren Höhe kleiner ist als die Wellenlänge der emittierten Strahlung, sorgt der Übergang vom Chip zum Vakuum für Verluste*

In einem ersten Experiment wurde das Emissionsspektrum der Laser mit einem Gitterspektrographen vermessen. Die Laser emittieren spektral multimodig im Bereich von 3,5 bis 4,0 THz (**Bild 1**).

In einem weiteren Experiment wurde die Polarisation der Laser mittels eines freistehenden Drahtgitters für den THz-Bereich bestimmt. Die Laserstrahlung ist nahezu vollständig linear polarisiert, und zwar senkrecht zur Substratebene und zum angelegten elektrischen Potential (**Bild 2**).

Ermittelt wurden auch die Fernfeldverteilungen von L1 und L2. Der Strahldivergenzwinkel gemessen als Vollwinkel des Intensitätsabfalls auf 1/e beträgt 32° bei L1 und 42° bei L2. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das Modenprofil zwei räumliche Emissionsmaxima zeigt, deren Einzelprofile eine deutlich kleinere Divergenz aufweisen. Besonders deutlich ist dies am Beispiel des Lasers L1 in einer Entfernung von 133 mm vom Chip zu erkennen (**Bild 3**).

3 Versuchsaufbau zur Detektion bei Raumtemperatur

Der Versuchsaufbau mit der neuartigen THz-QC-Laserquelle ist sehr kompakt (**Bild 4**). Der Laser ist in weniger als fünf Minuten nach Einfüllen des Stickstoffs betriebsbereit. Eine einzige Füllung ist für einen Betrieb über zwölf Stunden ausreichend. Für die Strahlprofil- und Leistungsmessung wurde ein pneumatischer Detektor nach dem Golay-Prinzip verwendet, der die dissipierte Energie anhand temperaturabhängiger Druckänderungen misst, die eine Membran verformen (optional ortsaufgelöst durch Rastern). Die am Detektor gemessene Peakleistung des Lasers betrug zwischen 0,1 und 0,2 mW bei 300 ns Pulsdauer und Pulswiederholraten von 20 bis 90 kHz, entsprechend einer mittleren Leistung von etwa 0,5 bis 5 µW. Zur Messung wurden die Pulszüge durch niederfrequente elektronische Modulation (electronic chopping, z.B. mit 50 Hz) an Videoraten angepasst.

4 Demonstrationsexperiment: mobile Bildgebung

Ein wichtiges potenzielles Anwendungsgebiet ist das THz-Imaging. Diese Technik könnte künftig die medizinische Bildgebung wie Ultraschall- und Röntgen-Diagnostik ergänzen oder z.B. die Detektion verborgener Gefahrstoffe erleichtern. Typische THz-Imaging Anordnungen rastern bisher die Probe ab, während der Fokalpunkt festgehalten wird – anders ausgedrückt: Die Probe wird bewegt, die Strahlquelle steht fest. Bei sehr großen oder schwer beweglichen Objekten kommt man mit diesem Ansatz nicht weiter, dann müssen vielmehr Strahlquelle und Detektor beweglich sein. Ein kleiner und leichter THz-QC-Laser kann auf einen Verschiebetisch montiert werden, so dass er eine Probe hochgradig mobil abtasten kann.

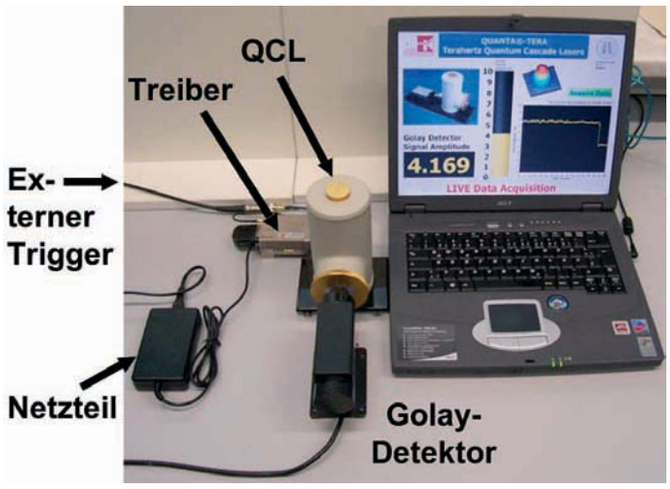

Bild 4: *Kompakter Versuchsaufbau mit QUANTA-TERA im Dewar-Gefäß [2]. Dargestellt ist ein einfaches Vorexperiment, bei dem zum einen die Signalabhängigkeit von der niederfrequenten Modulationsfrequenz und zum anderen die Signalschwächung durch Metall und dünne Materialproben wie Papier gemessen wurde [4]*

Zur Demonstration wurden hier nur einfache, leicht zu interpretierende bildgebende THz-Experimente durchgeführt. In einer Messung rastert der THz-QC-Laser in kurzer Distanz über die Eingangsapertur des Golay-Detektors. Hier ist der größte Teil der emittierten Strahlung auf einen Bereich von circa 1 mm Durchmesser beschränkt. Durch das Verschieben der Laserquelle kann somit die räumliche Empfindlichkeitsverteilung der Eingangsapertur vermessen werden (**Bild 5**). Die elektronische Modulation wurde auf 51 Hz eingestellt. Bei einer Integrationszeit von 20 msec entsprechend einer 50 Hz-Videorate für jedes einzelne

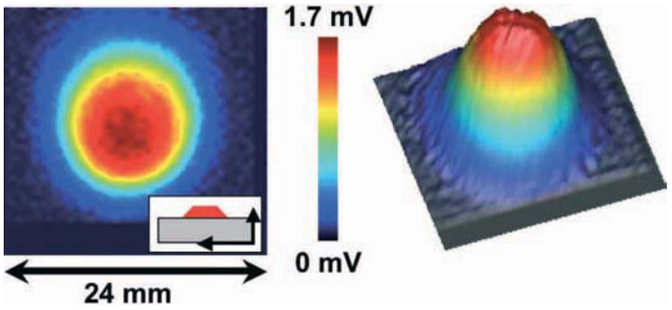

Bild 5: *Profilmessung der Eingangsapertur des Golay-Detektors [2]. Die dreidimensionale Darstellung illustriert das gute SNR. Ein Teil des Randbereiches ist hierbei künstlich auf Null gesetzt worden, um den geringen Rauschuntergrund sichtbar zu machen*

Pixel wurde so ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) von 85:1 erreicht.
Dieses Experiment beweist, dass es möglich ist, mit Hochtemperatur-QC-Lasern und ungekühlten Detektoren mobile THz-Bildgebung mit Videofrequenz zu realisieren. Somit kann man den untersuchten Quantenkaskadenlaser zu Recht als Prototypen einer einfach handhabbaren THz-Strahlquelle bezeichnen.

5 Ausblick

Vorgesehen ist zunächst eine Weiterentwicklung der Strahlquelle in Richtung auf Erweiterung der verfügbaren Wellenlängen. Daneben steht bereits die nächste Technikstufe der THz-Bildgebung auf dem Arbeitsplan: die relativ langsame Rastertechnik soll durch eine echte zweidimensionale Detektion ersetzt werden. Aussichtsreiche Detektorkandidaten sind hierbei Mikrobolometer-Focal-Plane-Arrays, wie sie auch in Wärmebildkameras Verwendung finden. Im THz-Bereich wurde kürzlich ein solches Demonstrationsexperiment mit einem Gaslaser als THz-Quelle realisiert [6].
Mittelfristig zielt die Entwicklung auch darauf ab, eine THz-Bildgebung an realen biologischen oder medizinischen Objekten zu ermöglichen. Die THz-Spektroskopie ist eine leistungsfähige Methode, um reale Biomoleküle zu untersuchen. Diese zeichnen sich allerdings durch einen hohen Gehalt an Wasser aus, das im THz-Bereich sehr stark absorbiert. Untersuchungen erfolgten darum bisher nur außerhalb der natürlichen Umgebung in getrocknetem Zustand. Die Untersuchung von Biomolekülen in wässriger Umgebung sowie medizinische Anwendungen sind zurzeit Gegenstand der Grundlagenforschung. Neue Forschungsarbeiten [7] brachten Laserchips mit Spitzenleistungen von 100 mW bei 77 Kelvin hervor. Dies ist eine über 100-fach höhere Leistung im Vergleich zu den hier präsentierten Lasern, so dass in Zukunft auch im THz-Bereich schwer abzubildende feuchte Proben untersucht werden könnten.

Literaturhinweise:

[1] Spiegel 47/2002, *Splitternackt auf dem Monitor*, 18.11.2002 (Zitat: „Eine geheimnisvolle Strahlung hält die Physiker in Bann: Allgegenwärtig und doch kaum nachweisbar strahlen die Terahertz-Wellen im Frequenzbereich zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen. Nun sollen sie die Krebsvorsorge verbessern und die Flughäfen sicherer machen.“)

[2] E. Bründermann, M. Havenith, G. Scalari, M. Giovannini, J. Faist, J. Kunsch, L. Mechold, M. Abraham, *Turn-key compact high temperature terahertz quantum cascade lasers: imaging and room temperature detection*, Opt. Express 14, 1829-1841 (2006), *www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-14-5-1829*

[3] G. Scalari, N. Hoyler, M. Giovannini, J. Faist, *Terahertz bound-to-continuum quantum cascade lasers based on optical-phonon scattering extraction*, Appl. Phys. Lett. 86, 181101-3 (2005)

[4] Unter http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Erik.Bruendermann/Quanta-Tera-200s.avi Video einer original Beispielmessung, s. auch Webcode **3001**

[5] R. Sachs, H.G. Roskos, *Mode calculations for a terhertz quantum cascade laser*, Opt. Express 12, 2062-2069 (2004)

[6] A.W.M. Lee, Q. Hu, *Real-time, continous wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array*, Opt. Lett. 30, 2563-2565 (2005)

[7] B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J. L. Reno, *High-power terahertz quantum-cascade lasers*, Elec. Lett. 42, 3331–3339 (2006)

[8] J. Kunsch, *Quantenkaskadenlaser: Technologie und Anwendungen*, Photonik 6/2003

Ansprechpartner:

Dipl.-Phys. Johannes Kunsch
Gruppenleiter IR-Detektoren und Diodenlaser
Laser Components GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
D-82140 Olching
Tel. 08142/2864-28
Fax 08142/2864-11
eMail: j.kunsch@lasercomponents.com
Internet: www.lasercomponents.com

OPTATEC: Stand 3.0 D01

Dr. Erik Bründermann
Ruhr-Universität Bochum
Physikalische Chemie II,
NC 7/68
D-44780 Bochum
Tel. 0234/32-24239
Fax 0234/32-14183
eMail:
erik.bruendermann@rub.de
Internet: www.rub.de/pc2/thz_de.html
homepage.rub.de/erik.bruendermann

www.photonik.de ▸Webcode **3001**