

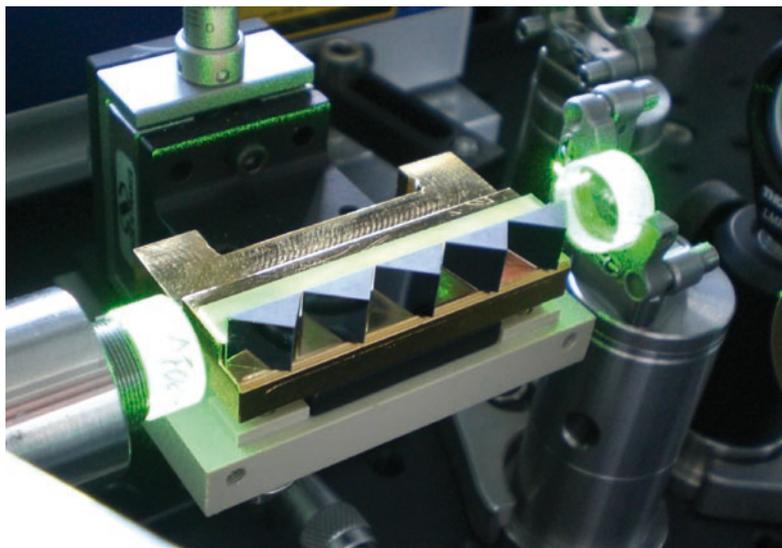
■ Terahertz im Aufwärtstrend

Neue Methoden ermöglichen leistungsfähigere Terahertz-Quellen.

#) Vgl. J. Jonuscheit, M. Herrmann und R. Beigang, Transparente Analyse, Physik Journal, Januar 2009, S. 31

Im elektromagnetischen Spektrum klafft eine Lücke, die sich noch nicht zufriedenstellend nutzen lässt: der Bereich der Terahertz-Strahlung mit Frequenzen von 0,1 bis 10 THz bzw. Wellenlängen von 3 mm bis 30 μm .^{#)} Die physikalischen Eigenschaften dieser Strahlung versprechen viele Anwendung in der Technik sowie der Grundlagenforschung. Das umfasst die Werkstoffprüfung, medizinische Bildgebung, Sicherheitskontrollen und Spektroskopie, hier insbesondere von Schwingungs- und Rotationsniveaus von Molekülen. Technisch gesehen fällt die Erzeugung von THz-Strahlung zwischen Elektronik und Optik und ist noch aufwändig und teuer. Daher kommt sie bislang nur dort zum Einsatz, wo keine andere Technik die gewünschten Informationen zur Verfügung stellen kann und finanzieller wie technischer Aufwand eine untergeordnete Rolle spielen. Beispiele dafür finden sich in Astronomie und Raumfahrt. Um eine größere Verbreitung der Technik zu erreichen, ist es nötig, THz-Quellen zu entwickeln, die möglichst einfach und robust sind, sich bei Raumtemperatur betreiben lassen und Ausgangsleistungen im Milliwatt-Bereich liefern.

Christof Fattering und Daniel Grischkowsky setzten 1988 zum ersten Mal photoleitende Schalter ein, um THz-Strahlung zu erzeugen [1]. Diese speziellen Halbleiterelemente mit lithographisch aufgetragenen Elektroden werden optisch gepumpt [2]. Ein Jahr später gelang es den beiden Forschern, diese Wellen kohärent nachzuweisen. Damit wurde eine neue Ära der THz-Messtechnik eingeläutet. Seitdem vergrößert sich die THz-Community und deren Produktivität stetig, was sich in der rasant steigenden Anzahl der Veröffentlichungen äußert. Photoleitende Schalter sind mittlerweile sehr ausgereift und eine Art Standard für THz-Quellen und -Empfänger. Ihre Leistungsfähigkeit ist



THz-Strahlung lässt sich u. a. mit einem linearen optisch parametrischen Oszillator erzeugen. Dieser besteht hier aus

zwei Resonatorspiegeln, dem nicht-linearen Kristall und Siliziumprismen zum Auskoppeln der THz-Wellen [6].

jedoch nahezu ausgereizt. Zudem sind ihre mittlere Ausgangsleistung und spektrale Bandbreite für einige Anwendungen nicht optimal. Daher werden weltweit viele unterschiedliche Ansätze zu neuartigen THz-Quellen verfolgt, insbesondere auf Basis von Lasern und bei Frequenzen unterhalb 3 THz. (Rein elektronische Quellen und Großgeräte wie Beschleuniger oder Freielektronen-Laser werden hier nicht berücksichtigt.)

Quantenkaskadenlaser (QCL) erscheinen zum jetzigen Zeitpunkt die einzigen Festkörperquellen zu sein, die THz-Strahlung mit einer mittleren Leistung im höheren mW-Bereich direkt erzeugen können. QCLs bestehen aus Halbleiterstrukturen mit Schichtdicken von einigen Nanometern. Die QCL-Struktur ist grob in Emissions- und Injektorbereiche unterteilt. Letztere haben die Aufgabe, die Elektronen in den oberen Zustand des nächsten optischen Übergangs zu leiten und zu kühlen. Für die Injektion verfolgt man dabei unterschiedliche Konzepte.

Quantenkaskadenlaser im THz-Bereich erfordern eine Kühlung auf Temperaturen von etwa 190 K oder niedriger. Da dies für viele Anwendungen ein großes Hindernis ist, liegt ein Schwerpunkt der

weltweiten Forschung darauf, die Temperatur zu erhöhen. Aus den veröffentlichten Messdaten ergibt sich ein Zusammenhang zwischen maximaler Betriebstemperatur T_{max} und Emissionsfrequenz ν : $k_{\text{b}} T_{\text{max}} \sim h\nu$. Diese Grenze ist allerdings eine empirische und keine prinzipielle oder theoretische. Sie zu überschreiten, wäre somit ein wichtiger Fortschritt. Dies gelang kürzlich einer Arbeitsgruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT), die eine andere Injektions-Methode („scattering-assisted injection“) anstelle der sonst bei THz-QCL üblichen („resonant-tunneling injection“) verwendete [3]. Damit ließ sich bei 1,8 THz ein stabiler Pulsbetrieb (300 ns und 300 Hz) bei einer Kühlkörpertemperatur von 163 K erreichen. Bei gegebener Emissionsfrequenz entspricht dies einer um den Faktor 1,9 höheren Temperatur im Vergleich zum empirischen Gesetz. Trotz dieses großen Fortschritts bleibt abzuwarten, ob jemals ein Betrieb mit mW-Ausgangsleistungen bei oder nahe Raumtemperatur möglich sein wird.

Ein anderer Ansatz zur Erzeugung von THz-Strahlung mit QCLs bei Raumtemperatur ist es, einen QCL zu verwenden, der im

Dr.-Ing. Joachim Jonuscheit, Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM), Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 56, 67663 Kaiserslautern

mittleren IR (MIR) auf zwei benachbarten Linien emittiert. Resonatorinterne Erzeugung der Differenzfrequenz (DFG) kann dann die gewünschte THz-Strahlung produzieren [4]. MIR-QCLs lassen sich im Allgemeinen bei Raumtemperatur betreiben. Die Herausforderung bei diesem Ansatz ist allerdings, die Effizienz des DFG-Prozesses und der THz-Auskopplung zu steigern.

Um nichtlineare Methoden wie Frequenzmischen und parametrische Prozesse (optical parametric oscillation, OPO) effizient zu betreiben, sind hohe Leistungen notwendig, die oftmals nur innerhalb eines Resonators zu erreichen sind. Maik Scheller und seine Kollegen von der Universität Marburg haben kürzlich eine kontinuierliche Quelle vorgestellt [5]. Dafür brachten sie einen periodisch gepolten Lithium-Niobat-Kristall (PPLN) in einen Laserresonator ein. Frequenzselektive Elemente erzwangen einen Zweiwellenbetrieb bei etwa $1\ \mu\text{m}$. Diese beiden Wellen wurden im PPLN gemischt. Die resonatorinterne Leistung bei $1\ \mu\text{m}$ wurde mit 500 W angegeben, die ausgekoppelte THz-Leistung mit 2 mW.

Technische Tücken ergeben sich nicht nur, wenn es darum geht, THz-Strahlung zu erzeugen, sondern auch bei ihrer Detektion. Im Marburger Experiment diente

dazu eine relativ unempfindliche Golay-Zelle, welche die Detektdynamik einschränkt. Kürzlich präsentierten zwei Arbeitsgruppen aus Frankfurt und Kaiserslautern ein sehr empfindliches kohärentes Nachweisverfahren, das elektrooptisches Abtasten mit gepulster THz-Erzeugung in einem OPO verbindet [6]. Ein Drei-Wellen-Mischprozess erzeugt dabei in einem externen Resonator aus einer Pumpwelle eine resonante Signalleiste und eine sofort ausgekoppelte THz-Welle. Die tatsächlich erzeugte THz-Leistung ist wie bei allen Arbeiten mit PPLN deutlich höher, da sich aufgrund interner Absorption und Auskoppelverluste ein Großteil der erzeugten THz-Strahlung nicht aus dem PPLN auskoppeln lässt.

Andere Ansätze für möglichst einfache und kostengünstige THz-Systeme verwenden Multimode-Laserdioden, was bereits im Jahr 2000 gezeigt werden konnte [7]. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit der Marburger Forscher wird die Erzeugung und der Nachweis von THz-Strahlung mittels eines Multimode-Diodenlasers und photoleitenden Schaltern demonstriert [8]. In Multimode-Laserdioden schwingen gleichzeitig verschiedene longitudinale Moden mit einem äquidistanten Frequenzabstand. Die unterschiedlichen Frequenzen

mischen im photoleitenden Schalter und erzeugen ein THz-Spektrum mit diskreten Frequenzen, deren Abstand den Modenabständen des Multimode-Diodenlasers entspricht. Es gibt auch Ansätze, mit Multimode-Laserdioden ein kontinuierliches THz-Spektrum zu erzeugen. Damit wäre man nicht mehr auf diskrete Spektrallinien beschränkt und könnte prinzipiell auch schmalbandige Absorptionslinien erkennen.

Aufgrund der zahlreichen Aktivitäten besteht die begründete Hoffnung, dass demnächst neue Quellen für THz-Strahlung zur Verfügung stehen, die robust, klein sowie preiswert sind und damit die Leistungsanforderungen vieler wissenschaftlicher und technischer Anwendungen erfüllen.

Joachim Jonasch

- [1] Ch. Fattinger und D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 1480 (1988)
- [2] D. H. Auston, *Appl. Phys. Lett.* **43**, 713 (1983)
- [3] S. Kumar et al., *Nature Physics* **7**, 166 (2011)
- [4] M. A. Belkin et al., *Nature* **1**, 288 (2007)
- [5] M. Scheller et al., *Optics Express* **18**, 27112 (2010)
- [6] F. Z. Meng et al., *Optics Express* **18**, 11316 (2010)
- [7] O. Morikawa et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1219 (2000)
- [8] M. Scheller et al., *Optics Express* **18**, 15887 (2010)

KURZGEFASST

■ Einzelspin misst Magnetfeld

So genannte NV-Zentren (NV: nitrogen vacancy) in Diamant bestehen aus einem Stickstoffatom auf einem Kohlenstoffplatz sowie einer benachbarten Fehlstelle. In seiner einfach negativ geladenen Version enthält ein solcher Gitterdefekt zwei ungepaarte Elektronen, die sich in ihrem Grundzustand zum Spin $S = 1$ koppeln. Zwei Experimentalphysikern der FU Berlin ist es nun gelungen, ein hochempfindliches Magnetometer auf Basis eines einzelnen NV-Zentrums zu bauen. Dessen Spin dient dabei als Rastersonde. Die Methode ist mit einer Auflösung von rund 30 Mikrottesla zwar weniger genau als andere, liefert aber dafür rascher und mit weniger Aufwand zweidimensionale Feldverteilungen mit Nanometer-Genauigkeit. Davon versprechen sich die Forscher neue Einsichten in Zellbiologie,

Nanoelektronik und magnetische Nanostrukturen.

R. S. Schoenfeld und W. Harneit, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 030802 (2011)

■ Myon-Lebensdauer neu bestimmt

Ein internationales Forscherteam hat am MuLan-Experiment (Muon Lifetime Analysis) an der Beschleunigeranlage des Schweizer Paul-Scherrer-Instituts den bislang präzisesten Wert für die mittlere Myon-Lebensdauer gemessen. Aus der sehr umfangreichen Messreihe ergab sie sich zu $2,1969803 \pm 0,0000022$ Mikrosekunden. Daraus leitet sich mit $1,1663788(7) \times 10^{-5}$ GeV⁻² auch der bislang genaueste Wert für die Fermi-Konstante ab, die ein Maß für die Stärke der Schwachen Kraft ist.

D. M. Webber et al. (MuLan Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **106**, 041803 (2011)

■ Mehrfachgeburten im frühen Kosmos

Die ersten Sterne des Universums entstanden nicht wie bisher angenommen als Einzelsterne von hundertfacher Sonnenmasse, sondern gemeinsam mit einer Vielzahl kleinerer Begleitsterne. Darauf deuten Computersimulationen, die Forscher der Universität Heidelberg zusammen mit Kollegen des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching und der University of Texas in Austin (USA) durchgeführt haben. Demnach bildeten sich aus Fragmenten der Gasscheiben, welche die massereichsten Sterne umgaben, neue Sterne, die wesentlich kleiner und darum langlebiger waren. Einige von ihnen könnten daher heute noch existieren und neue Einblicke in die frühesten Epochen der Sternentstehung bieten.

P. C. Clark et al., *Science Express*, doi: 10.1126/science.1198027 (3. Feb. 2011)