

Laser zur Terahertz-Erzeugung

Die Frequenzlücke schließt sich.

Anselm Deninger und Thomas Renner

Dr. Anselm Deninger, Dr. Thomas Renner, TOPTICA Photonics, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing, www.toptica.com

In den Landkarten der Renaissance bezeichnete der Begriff „terra incognita“ das unbekannte Land: Gegenden jenseits der bekannten Grenzen, die noch nicht erforscht und vermessen worden waren. In der modernen Naturwissenschaft stellt der Terahertz-Bereich die letzte „terra incognita“ des elektromagnetischen Spektrums dar. Obgleich die Terahertz-Forschung der vergangenen Jahre eine Vielzahl neuer Möglichkeiten in der Spektroskopie, Bildgebung oder Telekommunikation aufgezeigt hat, steckt die industrielle Umsetzung noch in den Kinderschuhen. Zwei laserbasierte Verfahren zur Terahertz-Generierung – einerseits mit nahinfraroten DFB-Dioden, andererseits mit Femtosekunden-Faserlasern – könnten dazu beitragen, die „Terahertz-Lücke“ zu schließen.

Terahertz-Anwendungen

Der Terahertz-Spektralbereich liegt zwischen fernem Infrarot und Mikrowellen und deckt Frequenzen von 300 GHz bis 10 THz ab, also Wellenlängen zwischen 1 mm und 30 μm . Bei diesen Frequenzen zeigt

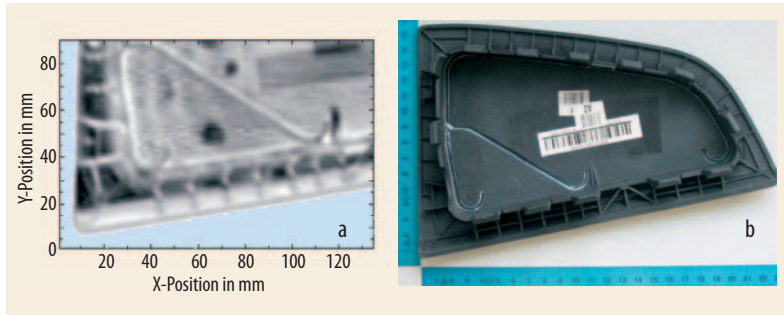


Abb. 2 Terahertz-Bild (links) und Foto (rechts) einer Airbag-Abdeckung: Mittels Terahertz-Bildgebung lässt sich die Dicke der Sollbruchstellen berührungs-

frei untersuchen. Die Terahertz-Aufnahme wurde unter Verwendung zweier Toptica DFB-Diodenlaser angefertigt.

elektromagnetische Strahlung einzigartige Eigenschaften. So durchdringen Terahertz-Wellen eine Vielzahl amorpher Substanzen, die weithin als lichtundurchlässig gelten, wie etwa Kleidung, Papier oder Kunststoff. Der Grund hierfür liegt in der geringeren Streuung, welche das Terahertz-Licht im Vergleich zu sichtbaren oder nahinfraroten Wellenlängen erfährt: Hieraus resultiert eine größere Eindringtiefe. Andererseits wird Terahertz-Strahlung von Wasser absorbiert, wobei die flüssige Phase noch stärker absorbiert als Wasserdampf.

Kombiniert man beide Eigenschaften – Materialdurchleuchtung sowie Absorption durch Wasser –, so eröffnet sich eine erste vielversprechende Anwendung: die Messung des Wassergehalts von Papier. Die Feuchte zu kontrollieren ist in der Papierherstellung sehr wichtig, da sie entscheidend die Papierqualität beeinflusst. Traditionelle Messmethoden verwenden Mikrowellen, Infrarotemitter oder Betastrahler, doch alle haben ihre Nachteile (schlechte Auflösung, geringe Eindringtiefe oder Radioaktivität). Die Terahertz-Durchleuchtung hingegen erlaubt eine genaue, ortsaufgelöste Feuchtemessung, da sowohl die Amplitude als auch die Phase der transmittierten Welle propor-

tional zum Wassergehalt der Probe variieren (Abb. 1).

Auch zur Bildgebung lässt sich Terahertz-Strahlung verwenden, wie verschiedene universitäre und industrielle Forschungsgruppen gezeigt haben. So wurden jüngst Terahertz-Aufnahmen z. B. von einem versteckten Keramikmesser [1], von Euro-Münzen [2] oder von Airbag-Abdeckungen [3] veröffentlicht (Abb. 2). Bislang entstehen solche Bilder allerdings durch punktweise Abrasterung der Probe, und die Aufnahmezeiten liegen im Bereich einer halben Stunde. Ein aktuelles BMBF-Verbundprojekt zielt deshalb auf die Entwicklung einer echtzeitfähigen, Multi-Pixel-Terahertz-Kamera ab [4].

Die Terahertz-Strahlung erlaubt jedoch nicht nur die Bildgebung versteckter Objekte, sondern liefert darüber hinaus spektroskopische Informationen. Zahlreiche chemische Verbindungen, darunter Spreng- und Giftstoffe, haben charakteristische Absorptionslinien zwischen 0,5 und 5 THz (Abb. 3). In nicht allzu ferner Zukunft könnte ein Terahertz-Scanner Drogen oder chemische Kampfstoffe in Paketen und Briefumschlägen orten und auch gleich anhand ihres spektralen „Fingerabdrucks“ identifizieren. Andere Anwendungen, die von

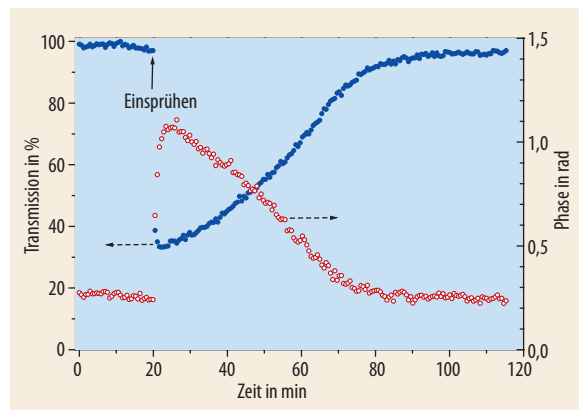
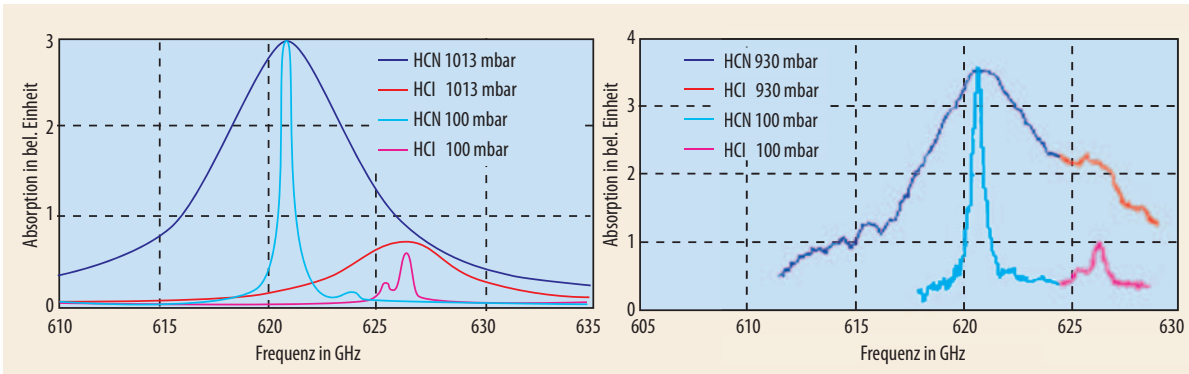


Abb. 1 Trocknungskurve eines Papiertaschentuchs nach Einsprühen mit einem Reinigungsmittel: Sowohl in der transmittierten Amplitude als auch in der Phase der Terahertz-Welle ($f = 200$ GHz) ist die Änderung der Feuchte quantitativ nachvollziehbar.

Best of



Alexander Majewski, Goodrich Corp.

Abb. 3 Bei den simulierten (links) und gemessenen (rechts) Terahertz-Spektren

eines Gemischs von Zyanid und Salzsäure (bei Drücken von 930 mbar und 100

mbar) ist die Druckverbreiterung der Absorptionslinien deutlich erkennbar.

einem bildgebenden Terahertz-Spektrometer profitieren könnten, sind die Qualitätskontrolle von Pharmazeutika oder die Analyse von Lebensmitteln selbst durch eine luftdichte Verpackung hindurch.

Terahertz-Erzeugung

Intensive, leistungsstarke THz-Strahlung lässt sich weder optisch noch elektronisch leicht erzeugen. Ferninfrarote Quantenkaskaden-Laserdioden, die potenziell auf direktem Weg Terahertz-Strahlung emittieren könnten, haben mit der thermischen Besetzung des oberen Laserniveaus zu kämpfen. Demzufolge werden Quantenkaskaden-Laser meist kryogen betrieben und sind dennoch auf Frequenzen oberhalb von 2 THz beschränkt.¹⁾ Auf der niederfrequenten Seite des Terahertz-Spektrums bieten elektronische Quellen (Schottky- oder Gunn-Dioden mit Frequenzvervielfachern) sehr hohe Ausgangsleistungen (100 bis 1000 mW bei 100 GHz). Allerdings nimmt die Leistung zu hohen Frequenzen hin mit fünf bis sechs Größenordnungen pro Frequenzdekade ab. Zudem sind diese Quellen in ihrer Frequenz kaum oder gar nicht abstimmbar.

Der spektroskopisch interessante Frequenzbereich zwischen 0,5 und 5 THz wird derzeit mit laser-gestützten Verfahren erschlossen. Die zwei gängigsten Verfahren basieren auf photoleitenden Antennen oder nichtlinearen Kristallen, die das Laserlicht in Terahertz-Strahlung umwandeln, je nach eingesetzter

Methode breitbandig oder spektral aufgelöst. Der wesentliche Vorteil dieser optoelektronischen Technologien besteht darin, dass zuverlässige und gut steuerbare Laser im sichtbaren oder nah-infraroten Spektralbereich zur Verfügung stehen: im ersten Fall durchstimmbare cw-Diodenlaser, im zweiten Fall Femtosekunden-Faserlaser.

Dauerstrichbetrieb ...

Abstimmbare Dauerstrich- (cw) Terahertz-Strahlung erhält man durch sog. Photomischen. Die Ausgangsstrahlen zweier Laser benachbarter Wellenlänge (z. B. 853 und 855 nm oder 1550 und 1555 nm) werden auf einer speziellen Antennenstruktur überlagert, üblicherweise einer spiralförmigen Metallstruktur, die in einen Halbleiter eingebettet ist (z. B. „low-temperature-grown“ GaAs). Das Herzstück der Antenne bildet der eigentliche Photomischer, eine verzahnte Fingerstruktur (Abb. 4), auf welche der Zwei-Farben-Laserstrahl fokussiert wird. Durch die Laserbestrahlung werden im Halbleiter freie Ladungsträger erzeugt, die eine angelegte Spannung zu den Elektroden hin beschleunigt. Der entstehende Photostrom ist mit der Differenzfrequenz beider Laser moduliert. Die Antenne übersetzt ihrerseits das Schwingungssignal in eine neue elektromagnetische Welle, deren Frequenz der (Terahertz-) Differenzfrequenz der beiden Laser entspricht.

Die Laserquellen der Wahl sind Distributed Feedback Diodenlaser

(DFB), und zwar aus mehreren Gründen: Die Laser vereinen eine hohe Ausgangsleistung und eine schmale Linienbreite, und sie bieten zudem eine weite kontinuierliche Frequenzabstimmung von über 1000 GHz. Bei geschickter Auswahl der beiden Laserwellenlängen erhält man somit eine Differenzfrequenz, die sich von 0 bis 2 THz, oder von 1 bis 3 THz variieren lässt.

Moderne Zwei-Farben-Lasersysteme nutzen faseroptische Komponenten zur Überlagerung der Ausgangsstrahlen (Abb. 5). Polarisationserhaltende „Faser-Combiner“ erlauben einen kompakten Aufbau und gewährleisten zudem die korrekte optische Ankopplung an den Photomischer. Die Leistung dieser Lasersysteme beträgt ca. 60 mW pro Zwei-Farben-Ausgang, was je nach Photomischer und eingestellter Differenzfrequenz eine Terahertz-Leistung von 50 bis 1000 nW ergibt. Für spektroskopische Anwendungen reicht diese Leistung oft aus, zumal sich Signal-zu-Rausch-Verhältnisse von über 70 dB erzielen lassen.

Ein wesentlicher Vorteil der DFB-Laser besteht in der Möglichkeit, die optische Frequenz hochgenau zu kontrollieren. Bei TOPTICA haben wir eine Laser-

1) Quantenkaskaden-Laser für den Raumtemperatur-Betrieb sind zwar auf dem Markt, haben aber deutlich höhere Emissionsfrequenzen von 35 bis 70 THz.

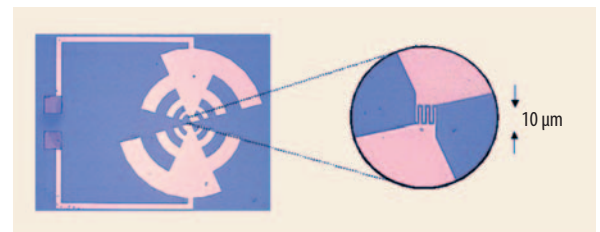
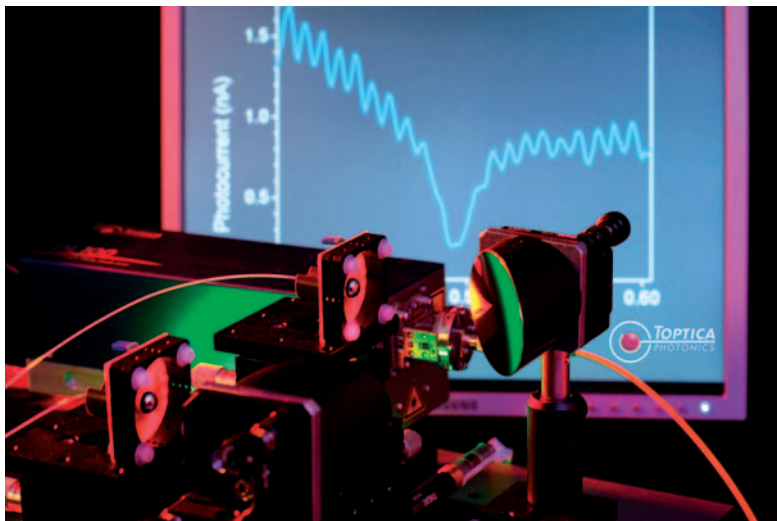


Abb. 4 Antennenstruktur zur cw-Terahertz-Erzeugung: Die Vergrößerung rechts zeigt die Fingerstruktur des Photomischers.

T. Göbel, C. Sydlo, TU Darmstadt

Best of

Abb. 5 Faserbasiertes cw-Terahertz-Spektrometer: Gut zu sehen sind die Silizium-Linsen auf den Terahertz-Antennen sowie einer der Parabolspiegel zur Strahlfokussierung.



stabilisierung entwickelt, welche die Terahertz-Linienbreite auf 1.2 MHz reduziert [5]. Die präzise, computergesteuerte Einstellung von Terahertz-Frequenzen eröffnet neue Möglichkeiten in der hochauflösenden Spektroskopie, etwa zum Nachweis gefährlicher Spurengase in Industrieanlagen oder zur Überwachung der Luftreinheit in U-Bahn-Anlagen.

... und gepulste Strahlung

Gepulste Terahertz-Wellen lassen sich mithilfe von Femtosekunden-Lasern generieren. Auch hier dient eine spezielle Antennenstruktur als Terahertz-Emitter. Der auftreffende Femtosekunden-Impuls erzeugt freie Ladungsträger, die von inneren oder äußeren elektrischen Feldern beschleunigt werden. Diese Stromänderung induziert ein transientes, spektral breitbandiges elektromagnetisches Feld. So entspricht z. B. eine Pulslänge von 100 fs im nah-infraroten Spektralbereich einer spektralen Breite von 4 bis

5 THz. Auf der niederfrequenten Seite ist das erzeugte Spektrum hingegen durch die Repetitionsrate des Lasers begrenzt (typisch 100 MHz). Verschiedene Halbleiter- und Kristall-Emitter erlauben eine Laseranregung bei entweder 800 nm oder bei Telekom-Wellenlängen um 1550 nm.

Als kompakte, preiswerte und zuverlässige Laserquelle eignen sich Kurzpuls-Faserlaser (Abb. 6). Femtosekunden-Laser auf Basis Erbium-dotierter Glasfasern beispielsweise emittieren breitbandige Lichtimpulse von unter 100 fs Dauer und 1550 nm Zentralwellenlänge mit über 250 mW mittlerer Leistung. Per Frequenzverdopplung lässt sich die Wellenlänge zudem in den Sensitivitätsbereich von GaAs-Antennen konvertieren.

Zur Detektion wird die Terahertz-Welle optisch „abgerastert“, vergleichbar mit einem klassischen „pump-probe“ Experiment. Der von einer Probe reflektierte oder transmittierte Terahertz-Strahl („pump“) wird zusammen mit einem zweiten Kurzpuls-Laser-

strahl („probe“) auf dem Empfänger überlagert, wobei die zeitliche Verzögerung der Strahlen relativ zueinander variiert wird. Aus dem solcherart rekonstruierten elektrischen Feld der Terahertz-Welle gewinnt man mittels Fourier-Transformation die gewünschte spektrale Information.

Flexibilität mit Optoelektronik

Ob für eine konkrete Anwendung eher Puls- oder Dauerstrich-Terahertz-Strahlung eingesetzt wird, hängt vom jeweiligen Experiment ab. Gepulste Wellen liefern binnen kürzester Zeit eine breite spektrale Information. Zudem lässt sich durch optische Laufzeitmessungen, ähnlich wie bei LIDAR oder Radar, eine zusätzliche Tiefeninformation über die Probe gewinnen. Cw-Terahertz bietet umgekehrt eine höhere spektrale Leistung und dementsprechend eine bessere Frequenzauflösung. Folglich eignet sich diese Methode bevorzugt zur Messung schmalbandiger spektraler Signaturen. Zudem sind die verwendeten DFB-Lasersysteme preiswerter als aktuell verfügbare Femtosekunden-Quellen.

Der Einsatz der Terahertz-Strahlung in der Bildgebung, Spektroskopie und Kommunikation eröffnet äußerst interessante Zukunftsfelder. Derzeit überwiegen die Anwendungswünsche oft noch gegenüber den technologischen Realisierungsmöglichkeiten. Frequenzmischung über DFB-Diodenlaser bzw. mit Femtosekunden-Faserlasern stellen erfolversprechende Schritte dar, welche derzeit sowohl Forschungslabore als auch erste Industrieinstallationen bedienen.

Abb. 6 System aus zwei phasenstabilisierten Femtosekunden-Faserlasern für die Erzeugung und den Nachweis von gepulster Terahertz-Strahlung.



- [1] I. S. Gregory et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 204104 (2005)
- [2] T. Löffler et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 91111 (2007)
- [3] R. Wilk et al., Appl. Optics **47**, 3023 (2008)
- [4] www.lynkeus-3d.de
- [5] A. Deninger et al., Rev. Sci. Instr. **79**, 44702 (2008)