

THz-Bildgebung – von der Komponente zum System



Boris Pradarutti



Claudia Brückner



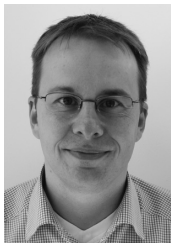
Stefan Riehemann



Gunther Notni



Gabor Matthäus¹



Stefan Nolte¹



Thomas Käsebier¹



Ernst-Bernhard Kley¹

Wolfgang Richter²

Einleitung

Der Frequenzbereich der Terahertz (THz)-Strahlung (10^{11} Hz bis 10^{13} Hz) bildet im elektromagnetischen Spektrum die Grenze zwischen der Infrarot- und der Mikrowellenstrahlung (Abb. 1). THz-Strahlung durchdringt die meisten Kunststoffe, Papier und Halbleiter, wird absorbiert von Wasser und reflektiert von Metallen. Zudem existieren viele Rotationsübergänge von interessanten Molekülen, so z. B. von organischen Substanzen, Medikamenten und illegalen Drogen, die man mit THz-Strahlung identifizieren und detektieren kann /1/.

Besonders die Erzeugung und Detektion von ultrakurzen THz-Pulsen führt zu zahlreichen potentiellen Anwendungen in der Spektroskopie und der Bildgebung. Die Nutzung von gepulsten Lasersystemen mit Pulsdauern von 200 fs und kürzer ermöglicht die Emission und kohärente Detektion ultrakurzer THz-Pulse mit nur einer Schwingung der elektrischen Feldstärke (Abb. 2). Die kohärente Detektion erlaubt die direkte Bestimmung der spektralen Amplitude und Phase, wobei sich aufgrund der Pulsform das Spektrum typischerweise über mehr als eine Dekade erstreckt. Des Weiteren sind Laufzeitmessungen der ultrakurzen THz-Pulse bis zu einer Genauigkeit unterhalb der Abtastpulsdauer möglich.

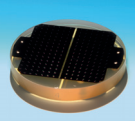
THz-Hochleistungsemitter

Als THz-Emitter haben sich hierbei vor allem ultraschnelle, photoleitende Schalter etabliert. Über Laserpulse werden kurzlebige Ladungsströme an Halbleiteroberflächen induziert. Abhängig von den spezifischen Materialparametern existieren die angeregten Ladungsträger nur für wenige Pikosekunden. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes werden die Elektronen beschleunigt und emittieren elektromagnetische Wellen im THz-Frequenzbereich. Da die abgegebene Leistung quadratisch von der Ladungsträgergeschwindigkeit abhängt, verwendet man bevorzugt mikroskopisch kleine Elektrodenabstände, was einerseits zu hohen Feldstärken im kV/cm-Bereich für die Beschleunigung der Elektronen führt, andererseits aber die eingestrahelte optische Leistung auf einige wenige Milliwatt beschränkt. Andernfalls würden die zu hohen Leistungsdichten eine Zerstörung des Halbleitermaterials herbeiführen. Bei den üblich eingesetzten THz-Emittieren und zu erwartenden Konversionseffizienzen von 10^{-6} – 10^{-4} ergeben sich somit nur wenige Mikrowatt an nutzbarer THz-Leistung.

¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

² BATOP GmbH

THz imaging – from the component to the complete system



Introduction

The frequency range of Terahertz radiation (10^{11} Hz bis 10^{13} Hz) represents the border of infrared and microwave radiation in the electromagnetic spectrum (Fig. 1). THz radiation penetrates paper, plastics, and semiconductors, is absorbed by water and reflected by metal. In addition many rotational transitions of interesting molecules, e.g. bio molecules, pharmaceuticals, and drugs can be identified and detected by THz radiation.

Especially the generation and detection of ultrashort THz pulses lead to many potential applications in spectroscopy and imaging. The use of pulsed laser systems with pulse durations of 200 fs

and less allows the emission and detection of ultrashort THz pulses with only one oscillation of the electric field (Fig. 2). The coherent detection affords the direct measurement of the spectral amplitude and phase, whereas the spectrum ranges over more than one decade due to the pulse shape. Furthermore, time of flight measurements of the ultrashort pulses with accuracy better than the gate pulse length are possible.

THz high power emitter

For ultrashort pulse THz generation photoconductive switches are used. Transient photo currents are induced by femtosecond laser pulses. Depending on the material parameters, the

currents exist only for a few picoseconds. By applying an electric field the electrons are accelerated and electromagnetic radiation in the THz frequency range is emitted. Because the emitted power depends quadratically on the electron velocity, small electrode distances are used. This gives high electric field strengths in the range of kV/cm, which leads to high electron acceleration, but the optical power is limited to several milliwatts due to the damage threshold of the semiconductor material. Thus, typical THz emitters with conversion efficiencies of $10^{-6} - 10^{-4}$ generate only several microwatts.

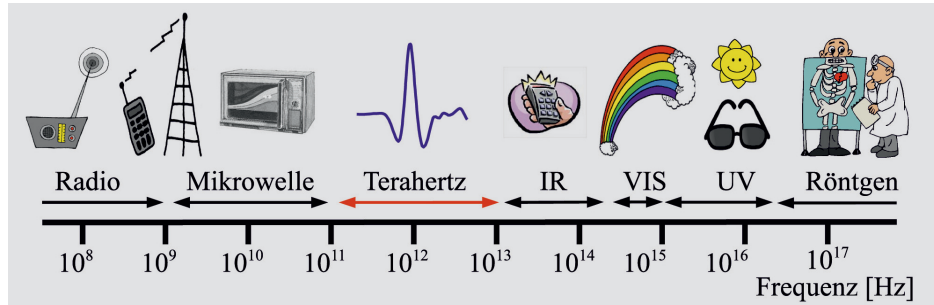
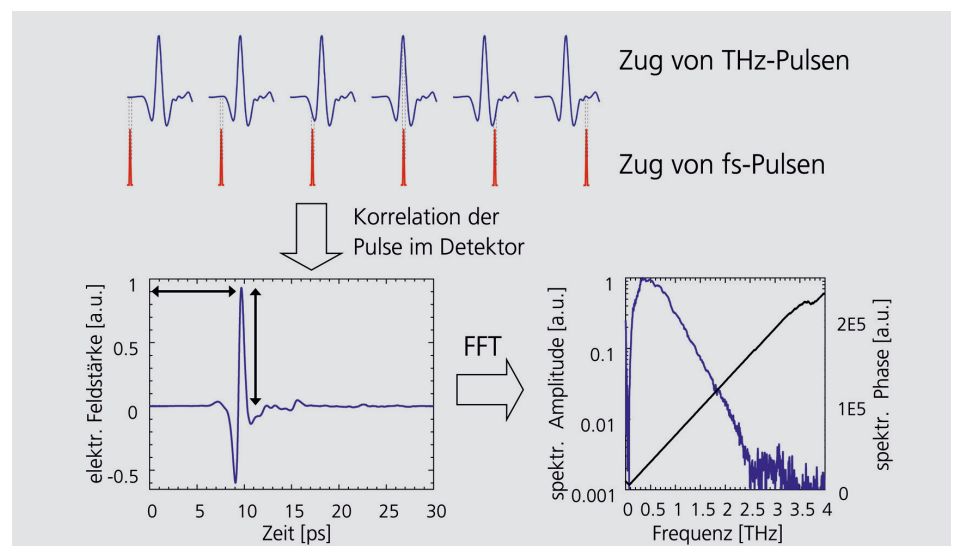


Abb. 1:
Elektromagnetisches Spektrum.

Fig. 1:
Electromagnetic spectrum.

Abb. 2:
Abtastung der THz-Pulse durch fs-Pulse (oben);
resultierender zeitlich aufgelöster THz-Puls mit
den Messgrößen Amplitude (vertikaler Pfeil)
und Laufzeit (horizontaler Pfeil) (unten links);
Spektrum des THz-Pulses (unten rechts).

Fig. 2:
Sampling of THz pulses by fs-pulses (top);
resulting time resolved THz pulse with the
measurands amplitude (vertical arrow) and
time delay (horizontal arrow) (bottom left);
spectrum of the THz pulse (bottom right).



In Zusammenarbeit mit der BATOP GmbH und dem Institut für Angewandte Physik (IAP) wurde ein neuartiger großflächiger Emittor entwickelt, welcher einerseits die Erzeugung hoher interner Feldstärken erlaubt, andererseits aber dennoch mit mehreren Watt optischer Leistung betrieben werden kann. Dieser Emittor basiert auf einem hexagonalen Mikrolinsensystem welches über einer Fingerelektrodenstruktur auf GaAs angeordnet ist /2/ (Abb. 3). Bei optischer Beleuchtung werden Hunderte einzelne THz-Quellen aktiviert, welche sich im Fernfeld konstruktiv überlagern. Für eine Anregungsleistung von ca. 3 W wurden 0,28 mW mittlere THz-Leistung gemessen. Dieser Wert übersteigt die Ausgangsleistung vergleichbarer Emittortypen um das 10- bis 100-fache. Somit würden zukünftige THz-Zeitbereich-Spektrometer basierend auf diesen Mikrolinsen-Emittoren bei gleichem Signal – Rausch – Verhältnis etwa nur ein Zehntel der Messzeit benötigen.

THz-Optiken – Entspiegelung

Für die Optikkomponenten werden im THz-Bereich meistens reflektive Optiken eingesetzt, da viele für optische Komponenten genutzte Materialien wie Glas oder Kunststoff die THz-Strahlung absorbieren. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von hochohmigem Fließzonen-Silizium, eines der für THz-Strahlung hochtransparenten Materialien. Der hohe Brechungsindex von 3,42 erlaubt die Entwicklung von Optiken für den THz-Spektralbereich mit großer Apertur und zur Abbildung großer Felder. Allerdings führen die mit dem hohen Brechungsindex verbundenen Fresnelreflexionen zu großen Transmissionsverlusten und störenden Nachpulsen in Abbildungssystemen.

Aufgrund fehlender Materialien für eine breitbandige Entspiegelung im THz-Spektralbereich mittels Interferenzschichtsystemen wurde am Fraunhofer IOF erstmals die Entspiegelung durch Mikrostrukturen erreicht. Dabei ist die Strukturperiode kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung, so dass sie von der Strahlung nicht aufge-

löst werden kann und die Ausbreitungsrichtung des Lichts nicht beeinflusst. So kann durch Oberflächenstrukturen mit steigendem Füllfaktor ein effektiver Brechzahlverlauf von Luft zum Substratmaterial erzeugt werden. Die erforderlichen Strukturparameter für den THz-Spektralbereich (Periode 50 μm , Tiefe 500 μm) können durch tiefes reaktives Ionenätzen (Bosch®-Prozess) hergestellt werden.

Abbildung 4 zeigt eine derartige Ätzstruktur. Dabei wird mit abwechselnden Gasarten geätzt («Gas Chopping»), d. h. Passivierungs- und isotrope Ätzzyklen wechseln sich ab. Dadurch wird eine Anisotropie des Ätzprozesses erreicht. In einem ersten Schritt wurden binäre Strukturen mit einem Aspektverhältnis von über 1 : 10 auf Silizium-Wafern hergestellt. Dabei konnte die Transmission um über 20 % gesteigert werden. Als nächstes erfolgte eine Optimierung des Ätzprozesses zur Realisierung von geringen positiven Flankenwinkel (ca. 2,5°) .

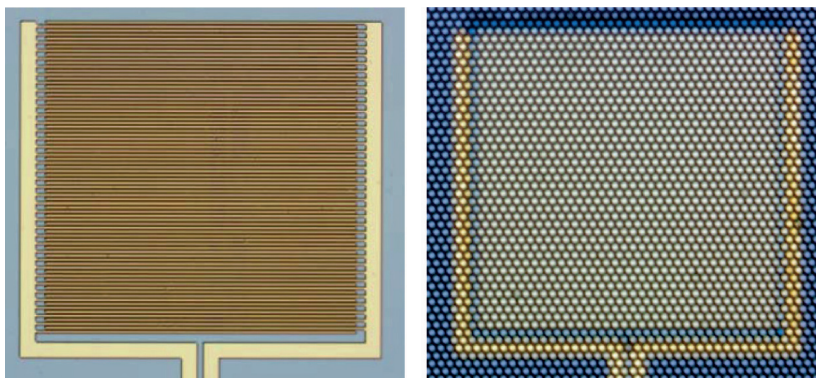
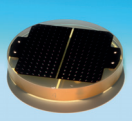


Abb. 3:
Großflächiger Fingerelektrodenemittor vor (links) und nach (rechts) der Kombination mit einem hexagonal angeordneten Mikrolinsensystem. Der Abstand zwischen den einzelnen Elektroden beträgt 5 μm . Die gesamte aktive Fläche ist 1 mm^2 groß.

Fig. 3:
Large area interdigital emitter before (left) and after (right) the attachment of a hexagonal microlens array. The distance between the electrodes is 5 μm . The resulting active area is 1 mm^2 .



In cooperation with BATOP GmbH and the Institute of Applied Physics (IAP) a new large area emitter has been developed, allowing both the generation of high power electric field strengths and the use of several watts of optical power. The emitter is based on a hexagonal microlens array which is placed on an interdigital electrode structure located on It-GaAs (Fig. 3) [2]. By irradiating the array, several hundred THz sources are excited which interfere constructively in the far field. For an excitation power of 3 W ca. 0.28 mW average THz power has been measured. This value exceeds the output power of other THz emitters by a factor of 10 to 100. With such a high power emitter, THz time domain spectrometers based on microlens emitters with the same signal will only need about one tenth of measurement time.

THz optics – antireflection treatment

For the optic components, reflective optics are often used in the THz range. Many materials typically used for optical components like glass or plastics absorb THz radiation. Another possibility is the use of high resistive float zone silicon, one of the most transparent materials in the THz range. The high refractive index of 3.42 allows the development of optical components with high apertures and for the imaging of large fields. But the high refractive index is associated with Fresnel reflections leading to high transmission losses and secondary pulses.

Due to missing materials for broadband antireflection layers in the THz spectral range by interference layers the anti-reflective treatment by microstructures has been demonstrated for the first time by the Fraunhofer IOF. The structure period is thereby smaller than the

wavelength of the radiation and does not influence the propagation direction of the radiation. So by an increasing fill factor an effective refractive index progress can be generated from air to the substrate material. The required structure parameters for the THz spectral range (period 50 μm , depth 500 μm) can be realized by deep reactive ion etching (Bosch® process).

Fig. 4 shows such structures. They are etched by alternating gases, whereby passivation and isotropic etch cycles take turns. In the first step, deep binary structures with an aspect ratio of 1 : 10 have been realized on a silicon wafer. Thereby the transmission has been increased by 20 %. In a next step the etching process will be optimized to small slopes (ca. 2.5°).

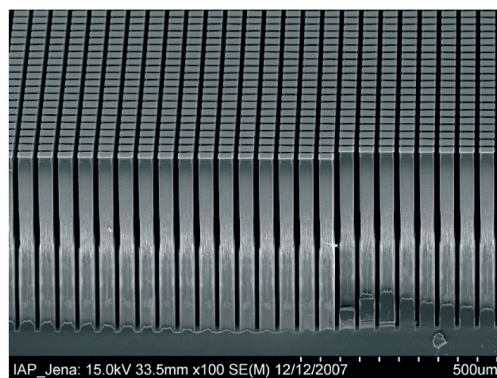
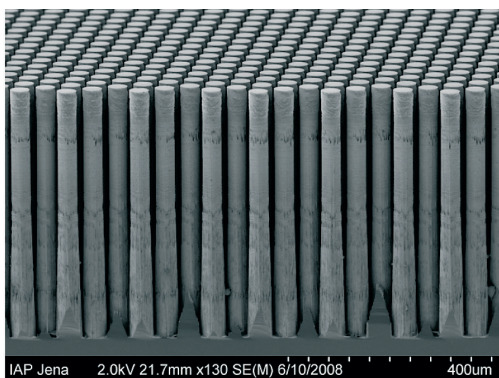


Abb. 4:
Anti-Reflex-Strukturierung von Silizium:
hexagonales Gitter (links),
rechteckiges Gitter (rechts).

Fig. 4:
Antireflection-structure of silicon:
hexagonal grating (left),
rectangular grating (right).

THz-Mehrkanaldetektion

Zur Detektion wird der THz-Puls auf einen Halbleiter mit einer Elektrodenstruktur, einer photoleitenden Antenne, fokussiert. Der THz-Puls induziert eine Spannung zwischen den Elektroden. Wenn gleichzeitig ein fs-Puls zwischen die Elektroden fokussiert wird, fließt ein Strom proportional zur momentanen elektrischen Feldstärke des THz-Pulses. Da der fs-Puls eine Größenordnung kürzer als der THz-Puls ist, kann durch eine zeitliche Verzögerung der beiden Pulse die elektrische Feldstärke zeitlich aufgelöst abgetastet werden (Abb. 2). Durch die Antennengeometrie und die daraus resultierende Spotgröße und Justagegenauigkeit des fs-Strahls von wenigen Mikrometern wurden bisher nur Systeme mit einem Detektionskanal verwendet.

Am Fraunhofer IOF wurde erstmals ein Linienarray von photoleitenden Antennen mit 16 Detektionskanälen entwickelt. Dabei wird jeder einzelne photoleitende Schalter durch den Fokus einer Mikrolinse angeregt (Abb. 5). Der Fokus der Mikrolinsen liegt auf der Rückseite des Substrats, so dass das Mikrolinsenarray direkt auf den Wafer aufgebracht und mit einer sub-Mikrometer Genauigkeit justiert werden kann. Durch die simultane Detektion von 16 ultrakurzen THz-Pulsen konnte die Messgeschwindigkeit um mehr als eine Größenordnung gesteigert werden /4/. Das Verfahren ist sehr gut skalierbar und ein System mit 128 Detektionskanälen ist bereits in Planung.

Mobiles THz-Bildgebungssystem

Für die Bildgebung mit ultrakurzen THz-Pulsen wurden die vorgestellten Techniken in einem portablen System integriert (Abb. 6). Dabei wird eine Linie von ultrakurzen THz-Pulsen erzeugt und in die Probe fokussiert. Die transmittierte Linie der THz-Strahlung wird dabei durch mehrere Detektionskanäle simultan detektiert. Die Probe wird durch den Linienfokus abgerastert und die detektierten THz-Pulse hinsichtlich Amplitude und Laufzeit ausgewertet (Abb. 2). Mit Hilfe dieses portablen THz-Systems können verschiedenste Proben aus den Bereichen Sicherheitstechnik und Qualitätsmanagement untersucht werden (Abb. 7 und Abb. 8).

Abb. 5:
Schematische Darstellung der Elektroden einer photoleitenden Antenne (links) mit Anregungs-spot (rot), 16-Kanal-Detektor mit Mikrolinsenarray (rechts).

Fig. 5:
Schematic view of the electrodes of a photoconductive antenna with excitation spot (red) (left), 16-channel-detector with microlens array (right).

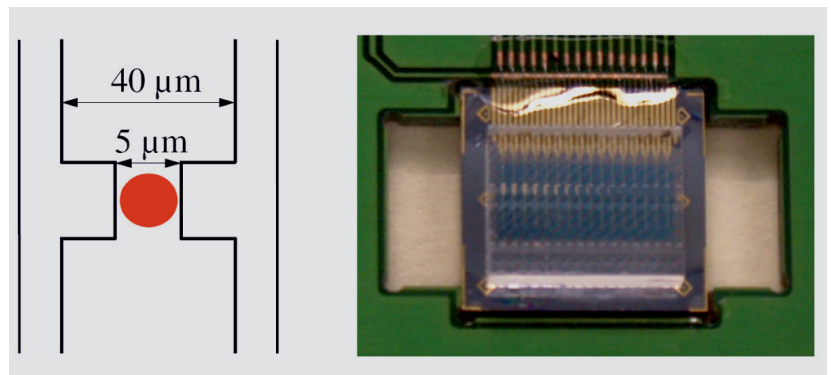
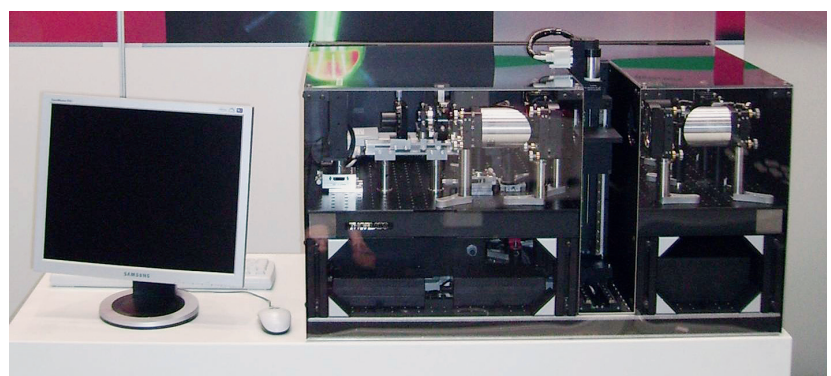
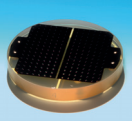


Abb. 6:
Portabler Systemdemonstrator mit Liniendetektion.

Fig. 6:
Portable system demonstrator with line detection.





THz multichannel detection

For detection, the THz pulse is focused to a semiconductor with an electrode structure, a photoconductive antenna. The THz pulse induces a voltage between the electrodes. If an fs-pulse is focused between the electrodes, a current proportional to the electrical electric field strength of the THz-pulse is generated. Because the fs-pulse is an order of magnitude shorter than the THz pulse, the electric field trace can be time-resolved sampled by a time delay between the two pulses (Fig. 2). Due to the antenna geometry, the resulting spot size and the adjustment accuracy of the fs-beam THz systems have up to now had only one detection channel. At the Fraunhofer IOF an array of photoconductive antennas with

16 detection channels has been developed for the first time. Every single photoconductive switch is excited by the spot of a microlens (Fig. 5). The foci of the lenses are at the backside of the substrate, so that the microlens array can be attached to the antennas and adjusted with sub-micron precision. By the simultaneous detection of 16 ultrashort pulses the measurement speed can be accelerated by an order of magnitude $/4/$. This technique is scalable to a high number of detection channels and a system with 128 detection channels is in development.

Mobile THz imaging system

For THz ultrashort pulse imaging the presented techniques have been integrated into a portable system (Fig. 6). In this process, a line of THz pulses is generated and focused into the sample. The transmitted line of THz pulses is detected simultaneously by several detection channels. The sample is scanned through the line focus and the detected pulses are analyzed with respect to amplitude and time delay (Fig. 2). With the help of this system demonstrator, different samples from security applications or quality management can be investigated (Fig. 7 and Fig. 8).

Abb. 7:
Untersuchung von
Paketen und Briefen zur
Sicherheitskontrolle:
Photo (links),
THz-Absorption (rechts).

Fig. 7:
Analysis of letters and
parcels for security
checks:
photo (left),
THz absorption (right)

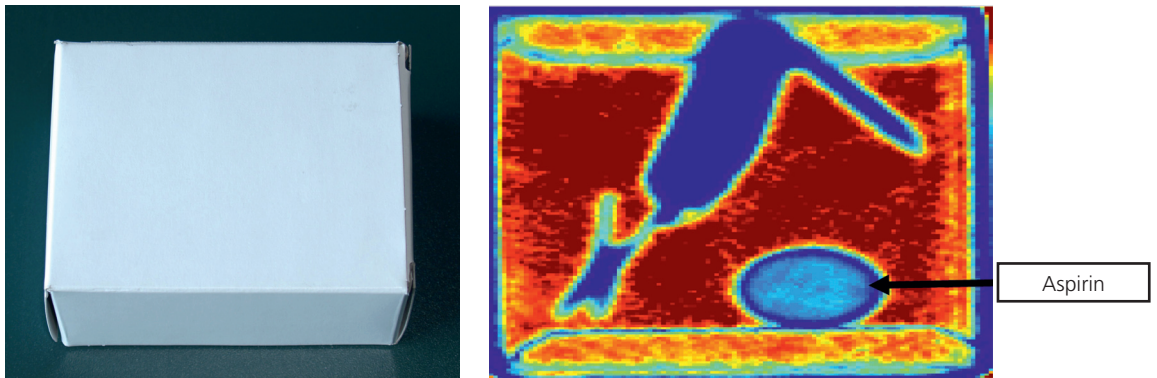
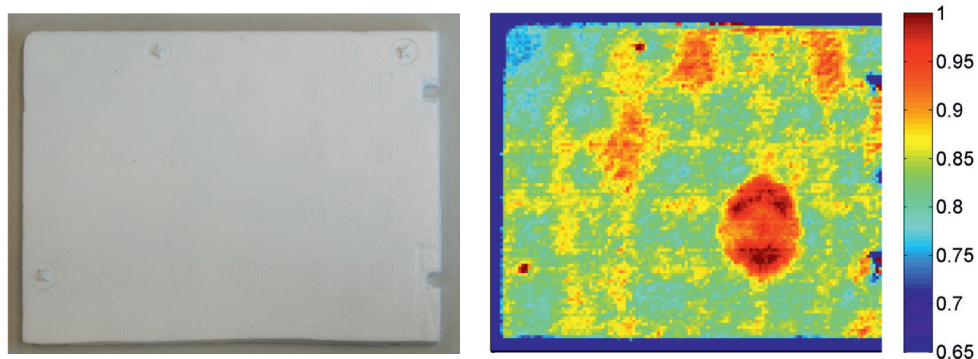


Abb. 8:
Untersuchung von
Polystyrol auf
Inhomogenitäten:
Photo (links),
THz-Puls-Zeitverzögerung (rechts).

Fig. 8:
Analysis of polystyrol
in respect of
inhomogeneities:
photo (left),
THz pulse delay (right).



Tomographie

Aufgrund der zeitaufgelösten Detektion bieten ultrakurze THz-Pulse neue Möglichkeiten für den Einsatz in der Schichtdickenmessung an optisch nichttransparenten Schichten und in der Tomographie. So erlaubt die gleichzeitige Messung von Amplitude und Laufzeit der THz-Pulse in Transmission und Reflexion die innere Struktur aufzulösen. Abbildung 9 zeigt hier die Vermessung der Schichtdicke einer Wärmeschutzschicht aus ZrO auf einem Turbinenblatt.

Über Anwendungen in der Tomographie mit ultrakurzen THz-Pulsen wurde bisher entweder nur in Transmission oder nur in Reflexion berichtet. Am Fraunhofer IOF wurde erstmals ein System mit drei Detektionskanälen aufgebaut, das gleichzeitig sowohl in Transmission als auch in Reflexion (unter 0° und unter 15°) detektiert. Für eine Messung wird das Objekt in einem THz-Strahlfokus platziert und sowohl verschoben als auch gedreht, wobei jeweils ein ultrakurzer THz-Puls aufgenommen wird. Aus den gewonnenen THz-Zeitbereichsdaten werden erst die einzelnen THz-Pulse extrahiert und evtl. Mehrfachpulse, die z. B. durch Reflexionen an Grenzflächen entstehen, aufgelöst. Durch verschiedene Algorithmen kann ein zweidimensionales Bild (axial und lateral) berechnet werden (Abb. 10). Dabei steht die Algorithmik zur Berücksichtigung von Laufzeiten und Mehrfachpulsen noch am Anfang der Entwicklung und ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

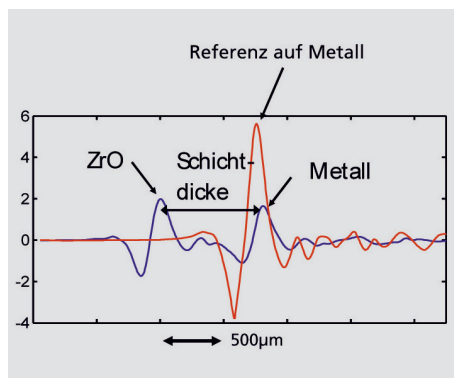
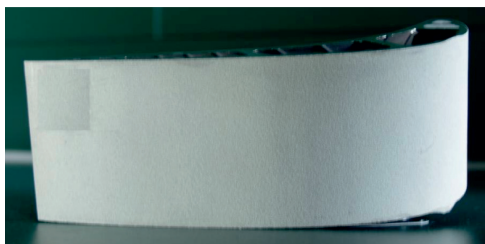
Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG (MAVO 813907).

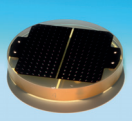
Literatur:

- /1/ Riehemann, S., Pradarutti, B.; Notni, G.: Kompakte THz-Imaging Systeme unter Nutzung von fs-Faserlasern, Optik und Photonik, Vol. 1 S. 39–43 (2007).
- /2/ Matthäus, G.; Nolte, S.; Hohmuth, R.; Voitsch, M.; Richter, W.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.: Microlens coupled interdigital photoconductive switch, Appl. Phys. Lett. 93, 091110 (2008).
- /3/ Brückner, C.; Käsebier, T.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: Broadband Antireflective Structures for the THz Spectral Range Fabricated on High Resistive Float Zone Silicon, Joint 33rd Intl. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16th Intl. Conference on Terahertz Electronics (IRMMW & THz) 2008.
- /4/ Pradarutti, B.; Müller, R.; Freese, W.; Matthäus, G.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Terahertz line detection by a microlens array coupled photoconductive antenna array, Optics Express 16, 18443–18450 (2008).

Abb. 9: Bestimmung der Schichtdicke einer Wärmeschutzschicht auf einem Turbinenblatt (links), Ergebnis der Schichtdickenmessung (rechts).

Fig. 9: Determination of the coat thickness of a heat shield on a turbine wheel: photo (left); Results of the coat thickness measurement (right).





Tomography

The time resolved detection of ultrashort THz pulses offers new possibilities in coat thickness measurements of optical opaque materials and tomography. The simultaneous measurement of amplitude and time delay offers the possibility to resolve the inner structure of samples. Figure 9 shows the thickness measurement of a ZrO heat protection shield of a turbine wheel.

Tomography with ultrashort THz pulses has been shown only in transmission or reflection up to now.

At the Fraunhofer IOF for the first time a system with 3 detection channels has been developed, that can measure in transmission and reflection (0° and 15°). For a measurement, the sample is placed in the focus and both moved and rotated, whereby at each position an ultrashort pulse is measured in transmission and reflection. The single or multiple THz pulses, which are generated by reflections at borders or etches, are extracted out of the time domain data. By applying different algorithms, a two dimensional picture (axial and lateral) can be calculated (Fig. 10). Thereby the algorithmic has just started to develop and is an active area of research.

This work is supported by the FhG internal program (MAVO 813907).

References:

- /1/ Riehemann, S., Pradarutti, B.; Notni, G.: Kompakte THz-Imaging Systeme unter Nutzung von fs-Faserlasern, Optik und Photonik, Vol. 1 S. 39–43 (2007).
- /2/ Matthäus, G.; Nolte, S.; Hohmuth, R.; Voitsch, M.; Richter, W.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.: Microlens coupled interdigital photoconductive switch, Appl. Phys. Lett. 93, 091110 (2008).
- /3/ Brückner, C.; Käsebier, T.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: Broadband Antireflective Structures for the THz Spectral Range Fabricated on High Resistive Float Zone Silicon, Joint 33rd Intl. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16th Intl. Conference on Terahertz Electronics (IRMMW & THz) 2008.
- /4/ Pradarutti, B.; Müller, R.; Freese, W.; Matthäus, G.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Terahertz line detection by a microlens array coupled photoconductive antenna array, Optics Express 16, 18443–18450 (2008).

Abb. 10:
Testobjekt zur Tomographie bestehend aus Polystyrol, Teflon und Metall (links),
Rekonstruktion des Testobjekts aus den Transmissionsdaten (rechts).

Fig. 10:
Sample for tomography consisting of polystyrol, teflon and metal (left);
reconstruction of the sample out of the transmission data (right).

