

Interferometrie mit ultrakurzen Terahertz-Pulsen

A. Brahm***, A. Weigel*, S. Riehemann*, G. Notni*, A. Tünnermann***

*Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF), Jena

**Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik (IAP), Jena

<mailto:anika.brahm@iof.fraunhofer.de>

Wir präsentieren ein zerstörungsfreies interferometrisches Messverfahren mit ultrakurzen Terahertz-Pulsen. Das System basiert auf einem Michelson-Interferometer zur tiefenaufgelösten Untersuchung innerer Strukturen und Schichten verschiedenster Materialien. Es werden erste Messergebnisse einer Stufenprobe zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen vorgestellt.

1 Einführung

Die langwellige Terahertz (THz)-Strahlung (30 μm - 3 mm) durchdringt die meisten Kunststoffe, Keramiken, Bekleidungsstoffe, trockene Hölzer und Halbleitermaterialien. Dies eröffnet neue Anwendungsgebiete der Qualitätskontrolle und Produktionsüberwachung verschiedenster Industriezweige [1].

In einigen Fällen spielt die Untersuchung von vergrabenen Strukturen oder Schichten im μm -Bereich eine wesentliche Rolle. Zerstörende Inspektionen, Tastschnittverfahren, Ultraschall oder Reflektometrie sind aufgrund invasiver Messtechnik oder ungünstigen Absorptionseigenschaften der Strahlung gegenüber den Materialien nicht immer geeignet. Eine Alternative hierfür bietet die berührungslose und zerstörungsfreie Interferometrie mit ultrakurzen THz-Pulsen, welche aufgrund ihrer geringen Energien keine direkten Schutzmaßnahmen erfordert.

Als zusätzliches Verfahren zur Laufzeitmessung mit ultrakurzen THz-Pulsen ermöglicht die THz-Interferometrie Auflösungen im sub- μm Bereich [2].

2 Ultrakurze THz-Pulse

Ultrakurze THz-Pulse entsprechen einer Schwingung der elektrischen Feldstärke und werden am IOF mit Lock-In Technologie kohärent gemessen. Aus dem zeitlich abgetasteten Signal kann mittels Fourier Transformation das Spektrum berechnet werden (Abb. 1).

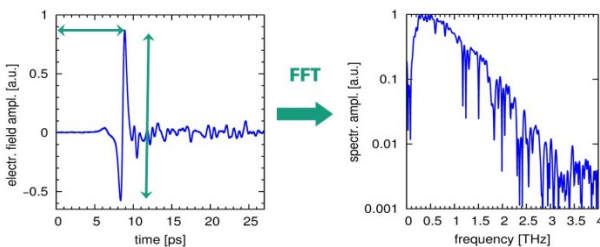


Abb. 1 Eine elektromagnetische Schwingung im Zeitbereich (links) – Spektrum des THz-Pulses mit Absorptionslinien von Wasser in der Umgebungsluft (rechts).

Während die spektralen und zeitlichen Informationen vorwiegend für Anwendungen wie THz-Spektroskopie und –Bildgebung verwendet werden, arbeitet das interferometrische Messprinzip mit der Auswertung der maximalen Pulsamplituden.

3 Systemaufbau

Das THz-System (Abb. 2) besteht aus einem Femtosekunden (fs)-Laser mit einer Wellenlänge von 800 nm, 100 fs Pulsbreite, 80 MHz Repetitionsrate und 1 W mittlerer Ausgangsleistung. Die fs-Pulse treffen auf einen Oberflächenemitter, welcher ultrakurze THz-Pulse generiert. Eine optische Verzögerungsstrecke realisiert mit dem THz-Detektor und Lock-In Technologie die zeitliche Abtastung der THz-Pulse. Nähere Erläuterungen zum Detektionsprinzip finden sich in [3].

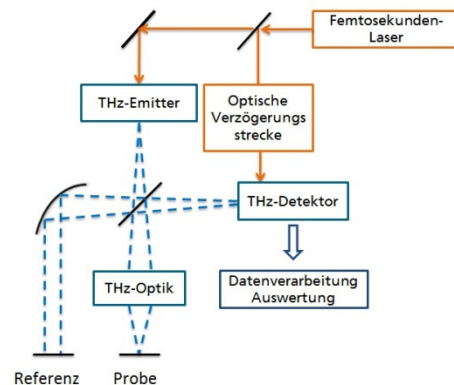


Abb. 2: Schematischer Aufbau des THz-Interferometrie Systems – Referenz und Probenarm dienen der zeitlichen Überlagerung zweier THz-Pulse.

Mit einem Silizium-Wafer wird die THz-Strahlung in einen Referenz- und Probenweg geteilt. Dort reflektieren die THz-Pulse an einem Referenzspiegel bzw. der Probe und treffen anschließend auf den Detektor. In Abhängigkeit der Differenz zwischen Proben- und Referenzsignal kann die Struktur der Probe mit Hilfe einer Kalibrierkurve bestimmt werden.

4 Kalibrierkurve

Voraussetzung für interferometrisches Messen ist die Überlagerung zweier ultrakurzer THz-Pulse. Besitzen diese gerade eine Phasendifferenz von $\Delta\phi$ gleich π , sowie eine zeitlich exakte Überlagerung löschen sich beide THz-Pulse gegeneinander aus. Der Grad der Auslöschung wird im Zeitsignal anhand der Differenz der maximalen und minimalen Pulsamplitude definiert (Peak-to-Peak-Amplitude, kurz: PP).

Damit strukturelle Informationen einer Probe gewonnen werden können, werden die PP-Werte einer Probenmessung mit einer Kalibrierkurve verrechnet. Die Kalibrierkurve wird vor der eigentlichen Messung aufgenommen und ist in Abb. 3 dargestellt. Die PP-Werte ergeben sich durch die Verschiebung der Referenzstrecke gegen ein festes reflektierendes Referenzelement im Probenarm. Löschen sich beide Pulse aus, nimmt der PP-Wert minimale Werte an.

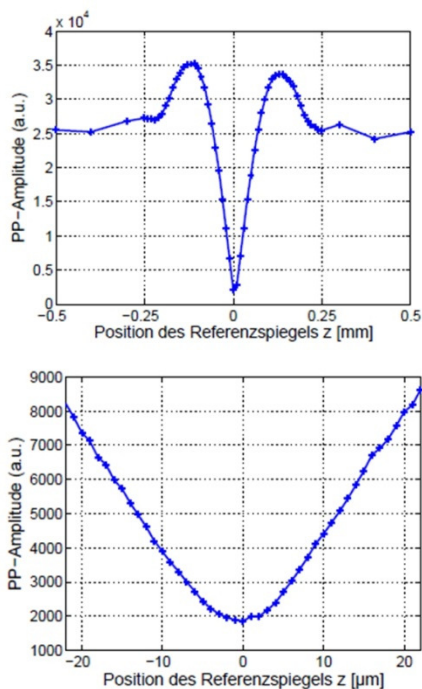


Abb. 3 Kalibrierkurve durch die Weglängenänderung der Referenzstrecke gegen das Referenzelement Silizium-Wafer (oben) – (unten) Ausschnitt der Kalibrierkurve.

5 Beispielmessung - Stufenprobe

Zur Verifizierung des interferometrischen Messverfahrens wurde eine Messingprobe mit definierten Stufen im μm -Bereich charakterisiert ($40\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$). Dabei wurde die Referenzstrecke mittig in eine Flanke der Kalibrierkurve positioniert und die Stufenprobe lateral mittels Verschiebetische gescannt.

Die THz-Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zur Vergleichsmessung mit einem berührenden Tast-

schnittgerät (vgl. Abb. 5). Die Form der $2\ \mu\text{m}$ Stufe ist fertigungsbedingt geschuldet.

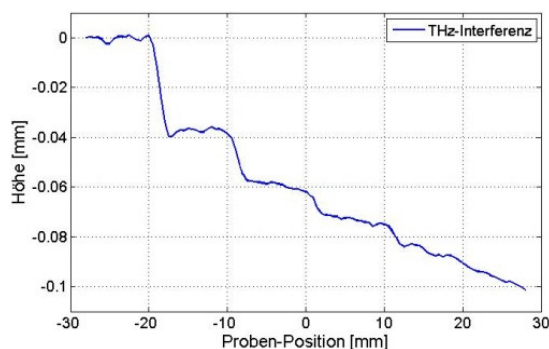


Abb. 4 Messergebnisse der zerstörungsfreien THz-Interferometrie.

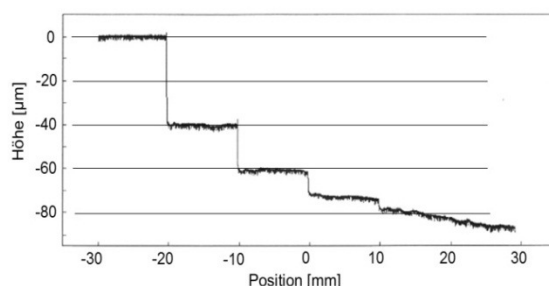


Abb. 5 Ergebnisse einer Tastschnittmessung.

Mit der THz-Interferometrie können alle Stufen bis $5\ \mu\text{m}$ aufgelöst werden, wobei Abweichung von der Tastschnittmessung Justage bedingt entstanden sind. Die Unsicherheit der Messung ist kleiner $3\ \mu\text{m}$.

6 Zusammenfassung

Das Messverfahren der THz-Interferometrie erzielte in einer ersten Charakterisierung eine axiale Auflösung von $5\ \mu\text{m}$. Mit den Eigenschaften der THz-Strahlung verschiedenste Stoffe zu durchdringen, die in anderen Spektralbereichen nicht transparent sind, bietet dieses Verfahren eine Alternative zur Untersuchung innerer Strukturen und dünner Schichten. Mittels Interpolation der PP-Werte an die Kalibrierkurve wird eine axiale Auflösung unter $5\ \mu\text{m}$ erwartet.

Literatur

- [1] B. Pradarutti et al.: „Kompakte THz-Imaging Systeme unter Nutzung von fs-Faserlasern“ in: *Optik und Photonik* 1, 39-43 (2007)
- [2] J. L. Johnson et al.: „Interferometric Imaging With Terahertz Pulses“ in: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 7 (4), 592-599 (2001)
- [3] A. Brahm et al.: „Volumetric spectral analysis of materials using terahertz-tomography techniques“ in: *Appl. Phys. B.* 100, 151-158 (2010)