Zuerst ersch. in : Photonik : Fachzeitschrift für Optische Technologien ; (2014), 1. - S. 24-26
http://www.photonik.de/index.php?id=11&np=5&artid=1124

Laserbasierte Ultraschallpulse für Messtechnikanwendungen

Nico Krauß, Thomas Dekorsy, Universität Konstanz

Die optische Erzeugung und Detektion von Ultraschall durch Absorption ultrakurzer Laserpulse ermöglicht die Messung charakteristischer Materialparameter. Mit einem Hochgeschwindigkeits-Anrege-Abfrage-System, basierend auf zwei zueinander synchronisierten Titan-Saphir-Lasern, können Schichtdicken von Vielschichtsystemen mit kHz-Abtastraten und einer Tiefenauflösung im sub-nm-Bereich bestimmt werden. Durch eine flexible Glasfaserkopplung eignet sich das Messsystem für große und komplexe Flächen sowie für schwer zugängliche Bereiche.

1 Laser-Ultraschall

Laserbasierte Ultraschallspektroskopie ist eine nichtinvasive und kontaktfreie Methode zur Untersuchung verschiedener Material- und Schichtsysteme vom Mikrometer- bis in den Nanometer-Bereich. Das Verfahren liefert Informationen über Schallgeschwindigkeiten, Elastizitätsmodule, Schichtdicken, Grenzflächeneigenschaften oder Delaminationsverhalten, die sonst über Röntgenbeugung, optische Spektroskopie, konventionellen Ultraschall oder invasive mechanische Testverfahren gewonnen werden. Bei der laserbasierten Ultraschallspektroskopie entsteht durch Absorption eines ultrakurzen Laserpulses aufgrund der photoelastischen Wechselwirkung eine oberflächennahe Verspannung mit Pikosekunden (ps)-Dauer, die sich mit Schallgeschwindigkeit in der Probe ausbreitet (**Bild 1**). Dieser Spannungspuls wird an Grenzflächen und Defekten teilweise reflektiert und gestreut. Der reflektierte Anteil induziert bei der Rückkehr zur Oberfläche eine Änderung der Reflektivität, die mit einem zeitverzögerten Abfragepuls detektiert wird. Über sukzessive Variation der Zeitverzögerung zwischen den Pulsen kann somit tiefenaufgelöste Information über die Probe gewonnen werden. Die laterale Auflösung hängt vom Fokusdurchmesser der Laserstrahlen ab und kann von 1 µm bis mehrere 100 µm betragen. Neben akustischen Echos durch Reflexion an einzelnen Grenzflächen treten in Vielschichtsystemen durch Vielfachreflexion diskrete Schwingungsmoden auf, die weitere Informationen über die untersuchte Struktur wie z.B. die Periodizität liefern.

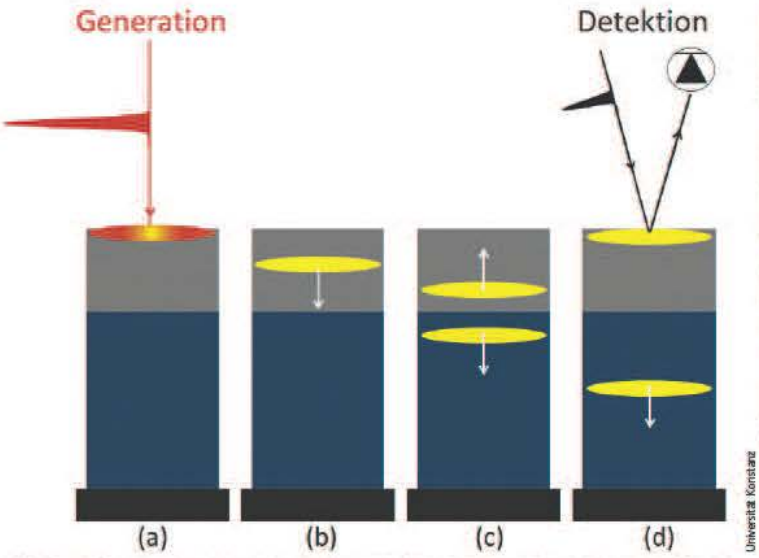


Bild 1: Prinzip der laserbasierten Ultraschallspektroskopie: Ein fs-Laseranregepuls wird an der Oberfläche der Probe absorbiert (a) und erzeugt einen ps-Ultraschallpuls, der in das Medium propagiert (b). Grenzflächen und Defekte reflektieren den Ultraschallpuls teilweise (c). An der Oberfläche kann der reflektierte Anteil mit einem zeitverzögerten Laser-Abfragepuls detektiert werden (d)

2 Asynchrones optisches Abtasten

Bisher wurde laserbasierte Ultraschall-Spektroskopie mit nur einem gepulsten Laser mit Pulslängen im fs- bis ps-Bereich durchgeführt. Die Zeitverschiebung zwischen Anrege- und Abfragepuls wird durch eine mechanische Verzögerungseinheit ermöglicht. Das bringt jedoch einige fundamentale Nachteile mit sich: Die variierende Weglänge führt zu einer variierenden Strahlgröße sowie – bei imperfekter Ausrichtung der Optiken – zu einer variierenden Strahlposition auf der Probe. Zudem arbeiten mechanische Verzögerungseinheiten mit geringer Geschwindigkeit, was zu langen Messzeiten im Bereich von Minuten führt. Vor kurzem konnte ein neues Verfahren realisiert werden, das all diese Nachteile überwindet.

Das sogenannte Asynchrone optische Abtasten (asynchronous optical sampling, ASOPS) basiert auf zwei gepulsten Titan-Saphir-Lasern mit einer Wiederholrate f von circa 1 GHz [1]. Die Wiederholraten weichen um einen konstanten Wert Δf von einigen kHz voneinander ab. Dadurch ändert sich der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen beider Laser nach jedem

Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-261224

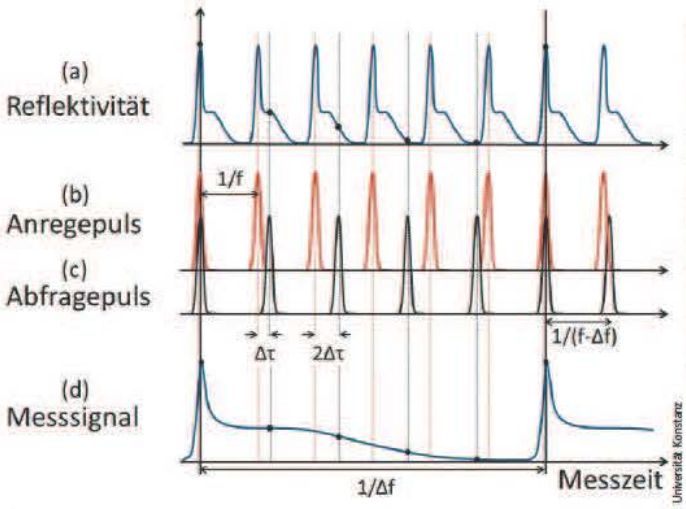


Bild 2: Prinzip des asynchronen optischen Abtastens: Der zeitliche Verlauf der Reflektivität der Probe (a) wird durch die Änderung des Zeitabstands zwischen Anrege- und Abfragepuls (b und c) aufgrund der unterschiedlichen Laser-Wiederholraten linear abgetastet. Das detektierte Messsignal (d) ist dadurch verglichen mit der zeitabhängigen Reflektivität der Probe um einen Faktor von circa fünf Größenordnungen zeitlich gestreckt

Puls um ein Zeitinkrement $\Delta\tau = \Delta f/f^2$ im Bereich weniger Femtosekunden (**Bild 2**). Wird nun jeweils ein Laser zur Erzeugung und zur Detektion des Ultraschallpulses verwendet, kann die Antwort der Probe in einem Zeitfenster von 1 ns (Abstand zwischen zwei Pulsen) linear abgetastet werden. Eine solche stroboskopische Messung streckt die Realzeit um einen Faktor $f/\Delta f$. Selbst ultraschnelle Vorgänge, wie Elektronenrelaxationen in Festkörpern oder akustische Schwingungen mit Frequenzen im THz-Bereich, lassen sich so mit kommerzieller Elektronik (A/D-Wandler und Speicherkarten mit 100 MHz Bandbreite) aufnehmen. Die Dauer einer ASOPS-Messung entspricht dem Inversen der Wiederholratendifferenz und liegt somit im Bereich von ungefähr 100 µs im Vergleich zu mehreren Minuten bei konventionellen Systemen. Aufgrund dieser hohen Messgeschwindigkeit sind die Messungen lediglich durch das Schrotrauschen in den Photodetektoren limitiert. Bei einer Messdauer von einer Sekunde wird ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 10^7 erreicht. Die Zeitauflösung des Systems konnte durch stetige Verbesserung der elektronischen Stabilisierung der Wiederholratendifferenz auf das Limit der Lichtpulsdauer von circa 50 fs verkürzt werden [2].

3 Faserkopplung

Durch die hohen Abtastraten eignet sich ASOPS sehr gut für bildgebende Verfahren durch die Abrasterung größerer Flächen, wie es z.B. für die Inline-Kontrolle industrieller Fertigungsprozesse notwendig ist. Realisierbar ist dies durch eine flexible Glasfaserkopplung von Anrege- und Abfragestrahl. Dadurch wird der Detektionsprozess vom restlichen System unabhängig und der Bau einer kompakten Detektionseinheit möglich. Das erleichtert die Integration in Vakuums- oder Kryostat-Aufbauten und liefert potentielle Lösungen im zahnmedizinischen Bereich.

Aus der Vielzahl an kommerziell verfügbaren optischen Fasern lässt sich anhand weniger Kriterien der geeignete Fasertyp für eine Faserkopplung des ASOPS-Systems finden: Um im Detektionsprozess Anrege- und Abfragestrahl überlagern und trennen zu können, ist eine klar definierte Polarisation am Faserausgang essentiell. Außerdem gilt es für die Erzeugung von akustischen Schwingungen in Materialien die Leistungsverluste bei der Faserkopplung und der Pulspropagation entlang der Faser möglichst gering zu halten. Schließlich ist vor allem bei hochfrequenten Ultraschallmessungen eine kurze Pulsdauer am Probenort nötig, da diese den limitierenden Faktor der Zeitauflösung darstellt. Mit polarisationserhaltenden Monomodenglasfasern lassen sich diese Kriterien erfüllen.

Um die pulsverbreiternden Mechanismen der Glasfasern zu kompensieren, werden Pulskompressoren eingesetzt, die mit hocheffizienten Gittern sehr kompakt und verlustarm gebaut werden können. Die resultierende Pulsdauer nach vier Metern Faser ist dabei durch Dispersion dritter Ordnung auf weniger als 200 fs beschränkt (**Bild 3**). Nichtlineare Effekte in der Faser beeinflussen aufgrund der, im Vergleich zu konventionellen laserbasierten Ultraschallsystemen, niedrigen Pulsenergie die Pulsdauer unwesentlich.

Die aus der Faser ausgekoppelten Strahlen werden im Messkopf überlagert und auf die Probe fokussiert. Dabei wird mit einem Mikroskopobjektiv eine wellenlängenlimitierte laterale Auflösung von bis zu 1 µm erreicht. Durch Verfahren des Messkopfes ist es infolge der langen Fasern möglich, quadratmetergroße Flächen abzutasten und dabei auf der gesamten Fläche eine sub-nm-Tiefenauflösung zu erzielen.

4 Charakterisierung von EUV-Röntgenspiegeln

Zur Demonstration möglicher Anwendungen der ASOPS-Ultraschallspektroskopie stellen wir die Charakterisierung von dielektrischen Spiegeln für die Lithographie im extrem ultravioletten Spektralbereich (EUV) vor. Aufgrund der geringen Wellenlänge von 13 nm bei der EUV-Lithographie müssen die Schichtdicken der dielektrischen Spiegel für hohe Reflektivitätswerte sub-nm-Toleranzen auf einer Fläche von

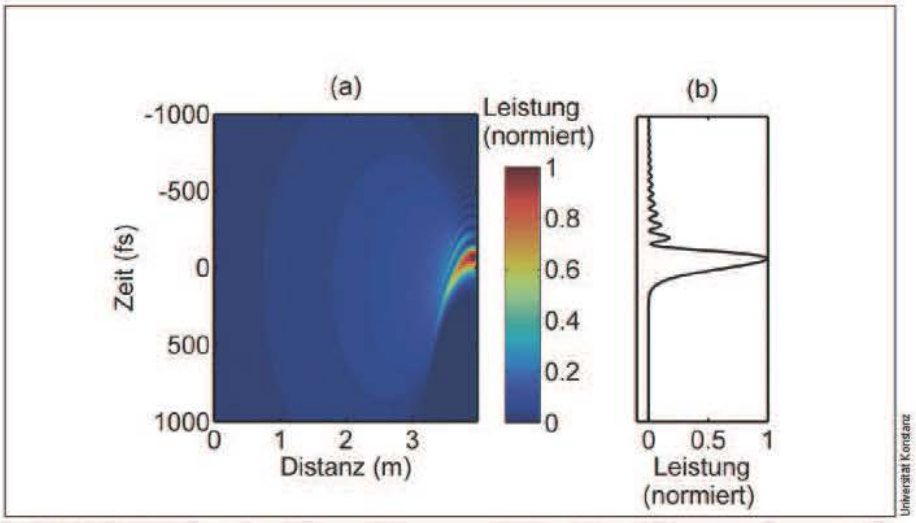
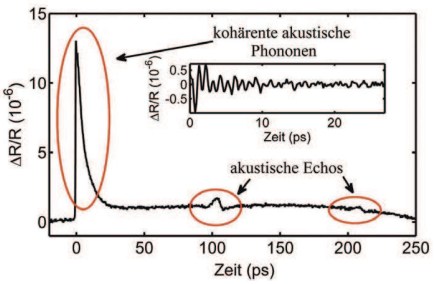
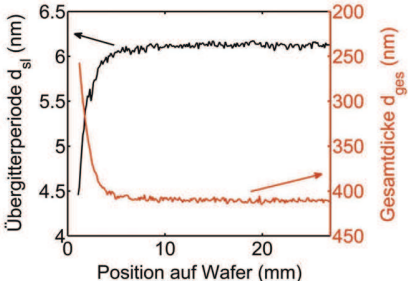


Bild 3: Farbkodierte Ergebnisse einer numerischen Simulation zur Propagation eines durch optische Gitter verbreiterten Pulses entlang einer vier Meter langen Monomodenglasfaser (a) und resultierendes Pulsprofil am Faserende (b)



Blindtext Blindtext

Bild 4: In Reflexion aufgenommene ASOPS-Ultraschallmessung eines EUV-Spiegels. Einschub: kohärente Phononen nach Subtraktion des Hintergrundsignals



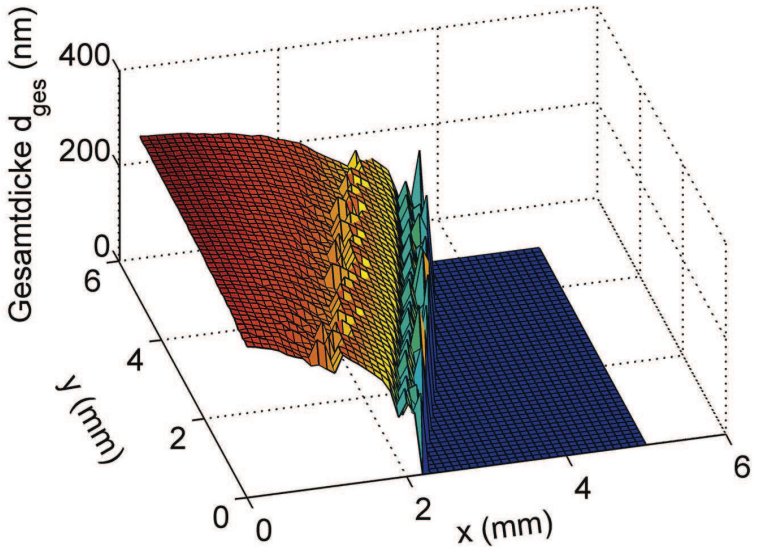
Universität Konstanz

Bild 5: Aus einem Linien-Scan extrahierte Übergitterperiode und Gesamtdicke eines EUV-Spiegels in Abhängigkeit des Abstands von der Wafer-Kante

mehreren dm^2 erfüllen. EUV-Spiegel bestehen aus Silizium/Molybdän (Si/Mo) Bragg-Spiegeln. Die in diesem Experiment untersuchte Probe besteht aus 60 Si/Mo-Schichten, die mittels Sputtern auf einem monokristallinen Silizium-Wafer aufgebracht wurden. Die Übergitterperiode beträgt 6,8 nm, resultierend in eine Gesamtdicke des Bragg-Spiegels von 408 nm.

Die Reflektivitätstransiente einer beispielhaften ASOPS-Messung des EUV-Spiegels ist in **Bild 4** gezeigt. Zum Zeitpunkt der Anregung (Zeitnullpunkt) zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Reflektivität durch Anregung der Elektronen, gefolgt von einem exponentiellen Zerfall mit einer Zeitkonstante von ungefähr 30 ps aufgrund von Elektron-Phonon-Streuung. Mit einer Verzögerung von $\tau_{echo} \approx 130$ ps ist nach der Anregung in der Transiente ein akustisches Echo durch den am Substrat reflektierten akustischen Puls zu sehen. Überlagert wird die Messung durch eine schwächere kohärente akustische Schwingung mit einer Frequenz von $f_{ph} \approx 1$ THz innerhalb der ersten 10 ps. Diese resultiert aus der Periodizität der Schichtstruktur.

Mit Kenntnis der gemittelten longitudinalen Schallgeschwindigkeit v_l in Si/Mo erhält man durch die Ultraschallmessung über die Beziehungen $d_{sl} = v_l/f_{ph}$ und $d_{ges} = \tau_{echo} \cdot v_l/2$ direkt die Periode des Bragg-Spiegels d_{sl} und die Gesamtdicke d_{ges} des Röntgenspiegels. Aufgrund von Unsicherheiten in den Literaturwerten der Schallgeschwindigkeit eignet sich das Verfahren ohne zusätzliche Informationen nicht zur exakten Messung absoluter Dicken. Jedoch lassen sich relative Dickeninhomogenitäten entlang der Probe mit einer Genauigkeit von besser als 1% detektieren. **Bild 5** und **Bild 6** zeigen die Resultate ortsaufgelöster ASOPS-Ultraschallmessungen an einem Röntgenspiegel. Am Wafer-Rand zeigt sich eine deutliche Abnahme der Gesamtdicke und der Übergitterperiode infolge der Unregelmäßigkeiten im Beschichtungsprozess. In Richtung Wafer-Mitte wird die Homogenität größer, die gemessene Standardabweichung der Übergitterperiode beträgt in diesem Bereich weniger als 0,1 nm.



Universität Konstanz

Bild 6: Aus einer ortsaufgelösten Ultraschallmessung extrahierte Gesamtdicke eines EUV-Spiegels. Das Messgitter besteht aus 50 x 50 Messpunkten in einem Abstand von 0,1 mm. Schwankungen der Gesamtdicke entlang des Wafer-Rands entstehen durch Reflexionsverluste

5 Zusammenfassung

Die kontaktfreie Struktur- und Materialuntersuchung durch laserinduzierten Ultraschall ist eine etablierte Methode mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten in der Wissenschaft, der Medizin und der Industrie. Durch die Entwicklung eines neuen Hochgeschwindigkeits-Messsystems (ASOPS) sind laserbasierte Ultraschallmessungen erstmalig mit Abtastraten im kHz-Bereich realisierbar. Mit einer zusätzlichen Glasfaserkopplung eignet sich das ASOPS-System auch zur Abrasterung großer Flächen oder für den Einsatz an schwer zugänglichen Orten. Anhand der ortsaufgelösten Schichtdicken-Charakterisierung von Röntgenspiegeln wurden die Vorteile der Messmethode aufgezeigt.

Die Arbeiten werden durch die Baden-Württemberg Stiftung gGmbH im Rahmen des Forschungsprojekts „MASOPS“ finanziert.

Literaturhinweise:

[1] A.Bartels et al., *Femtosecond time-resolved optical pump-probe spectroscopy at kilohertz scan rates over nanosecond time delay without mechanical delay line*, Appl. Phys. Lett. 88, 041117 (2006)

[2] R.Gebs et al., *High-speed asynchronous optical sampling with sub-50fs time resolution*, Optics Express 18**,** 5974 (2010)

Ansprechpartner:

Dipl.-Phys. Nico Krauß
Universität Konstanz
Universitätsstraße 10
D-78457 Konstanz
Tel. 07531 88 3843
eMail: nico.krauss@uni-konstanz.de
Internet: http://cms.uni-konstanz.de/physik/dekorsy

Universität Konstanz

Prof. Thomas Dekorsy
Universität Konstanz
Universitätsstraße 10
D-78457 Konstanz
Tel. 07531 88 3820
Fax: 07531 88 3072
eMail: thomas.dekorsy@uni-konstanz.de
Internet: http://cms.uni-konstanz.de/physik/dekorsy

Universität Konstanz