



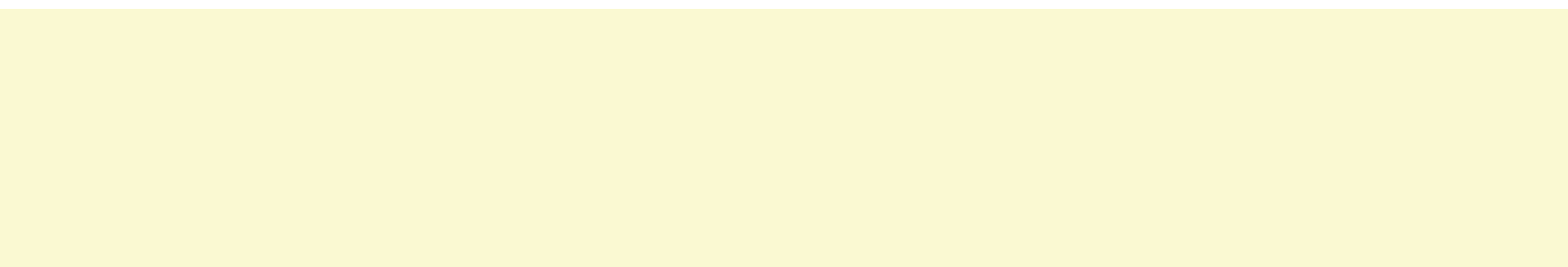
Forschungsergebnisse

# Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

---

**Multiskaliges asynchrones optisches Abtasten**



# Multiskaliges asynchrones optisches Abtasten

Die optische Erzeugung und Detektion von Ultraschall durch Absorption ultrakurzer Laserpulse ermöglicht die nichtinvasive und kontaktfreie Untersuchung verschiedenster Materialien und Strukturen. Im Rahmen eines von der Baden-Württemberg Stiftung finanzierten Projekts wurde ein fasergekoppeltes Hochgeschwindigkeits-Ultraschallmesssystem zur Untersuchung großflächiger Dünnschichtsysteme realisiert.

Laserbasierte Ultraschallspektroskopie ist eine kontaktfreie hochfrequente Ultraschallmessmethode zur Prüfung und Charakterisierung von Dünnschichtsystemen und Nanostrukturen. 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. Grundlage der laserbasierten Ultraschallspektroskopie ist die Absorption eines ultrakurzen Laserpulses an der Oberfläche des Materials, wodurch aufgrund Elektron-Phonon-Streuung ein Ultraschallpuls

mit einer Dauer von ca. einer Pikosekunde entsteht. Dieser Spannungspuls propagiert mit der longitudinalen Schallgeschwindigkeit in das Medium und wird an Grenzflächen und Defekten teilweise reflektiert. 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. In Vielschichtsystemen entstehen mehrere akustische Schwingungsmoden, die weitere Informationen über die untersuchte Struktur wie z.B. die Periodizität liefern.

In einem konventionellen Messaufbau wird ein einzelner Femtosekunden-Laser verwendet und die Zeitverzögerung zwischen den Pulsen über eine mechanische Verschiebeeinheit kontrolliert. Das limitiert die Messung hinsichtlich Geschwindigkeit und Sensitivität. An der Universität Konstanz wurde ein Hochgeschwindigkeits-Messsystem ohne bewegte Optomechaniken demonstriert. Das System basiert auf zwei hochrepetitiven Femtosekunden-Lasern, deren

Wiederholraten um einen konstanten Wert im Bereich einiger kHz voneinander abweichen. Dadurch wird der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen beider Laser nach jedem Puls-Paar um wenige Femtosekunden größer. So lässt sich der volle Zeitbereich zwischen den Pulsen (1 ns) stroboskopisch abtasten. Die Dauer einer sogenannten ASOPS-Messung (asynchrones optisches Abtasten) entspricht dem Inversen der Wiederholratendifferenz und liegt im Bereich von ungefähr 100  $\mu$ s im Vergleich zu mehreren Minuten bei konventionellen Systemen. Durch Mittelung wird innerhalb weniger Sekunden ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von  $10^7$  erreicht. Die Zeitauflösung der Messung ist durch eine optimierte Regelungselektronik zur Stabilisierung der Wiederholratendifferenz lediglich durch die Pulsdauer limitiert. Durch die hohen Abtastraten eignet sich ASOPS für bildgebende Verfahren durch die Abrasterung größerer Flächen, wie es z.B. für die Inline-Kontrolle industrieller Fertigungsprozesse notwendig ist. Ziel des von der Baden-Württemberg Stiftung finanzierten Projekts war es, das ASOPS-Messsystem durch die Kopplung an optische Fasern einem breiteren Anwendungsspektrum, wie der

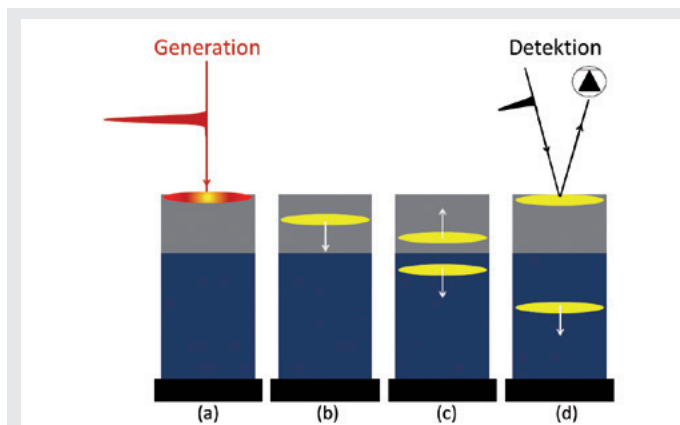


Bild 1: Prinzip der laserbasierten Ultraschallspektroskopie: Ein fs-Laseranregepuls wird an der Oberfläche der Probe absorbiert (a) und erzeugt einen ps-Ultraschallpuls, der in das Medium propagiert (b). Grenzflächen und Defekte reflektieren den Puls teilweise (c). An der Oberfläche kann der reflektierte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

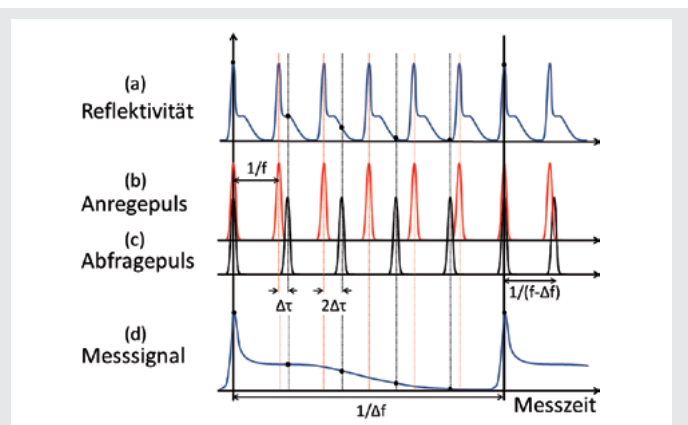


Abb. 2: Prinzip des asynchronen optischen Abtastens: Der zeitliche Verlauf der Reflektivität der Probe (a) wird durch die Änderung des Zeitabstands zwischen Anrege- und Abfragepuls (b und c) aufgrund der unterschiedlichen Wiederholraten linear abgetastet. Das detektierte Messsignal (d) ist dadurch verglichen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

Untersuchung großer Flächen oder der Anwendung im Vakuum, zugänglich zu machen.

Für die Faserkopplung eignen sich polarisationserhaltende Monomoden-Glasfasern aufgrund deren geringer Verluste und deren Stabilität. Eine Kopplung beider Laserstrahlen in eine einzelne Faser ist aufgrund der Wechselwirkung der Laserpulse in der Faser nicht möglich, daher muss jeder Strahl in eine separate Faser gekoppelt werden. Um die pulsverbreitenden Mechanismen der Glasfasern zu kompensieren, wurde im Rahmen des Projekts

gestrahlt überlagert und auf die Probe fokussiert. Nach Reflektion an der Probe wird der Abfragestrahl in eine dritte Faser zur Detektion gekoppelt. Durch Verfahren des Messkopfes entlang der Probe können somit laserbasierte Ultraschallmessungen zur Schichtdickenprüfung großer Werkstücke im m<sup>2</sup>-Bereich mit einer lateralen Auflösung im Bereich weniger µm realisiert werden.

Eine potentielle Anwendung des fasergekoppelten ASOPS-Aufbaus ist die Schichtdickeninspektion dielektrischer Bragg-Spiegel für die EUV-Lithografie

die Gesamtdicke und die Übergitterperiode des Spiegels mit sub-nm Genauigkeit extrahiert werden. Die Genauigkeit der Messung ist dabei limitiert durch die Unsicherheit in der Schallgeschwindigkeit, welche sich für Si/Mo Übergitter deutlich von den zugehörigen Werten der einzelnen Materialien unterscheiden kann. Im Rahmen des Projekts wurde die Schichtdickencharakterisierung dielektrischer EUV-Spiegel mit dem fasergekoppelten Ultraschall-Anrege-Abfrage-System auf einer Fläche von einigen cm<sup>2</sup> demonstriert. Auf der gesamten Fläche wurde eine sub-nm Auflösung erzielt.

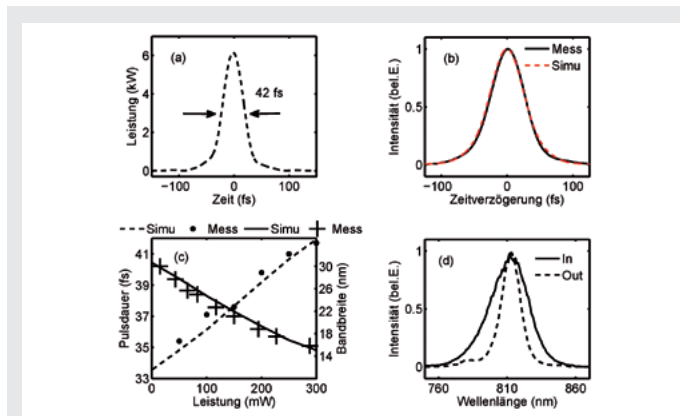


Abb. 3: Pulscharakterisierung nach 6 m Faser: (a) Das Ergebnis der numerischen Simulation bei einer Durchschnittsleistung von 300 mW. (b) Die zugehörige simulierte und gemessene Intensitätsautokorrelation. (c) Messung der Bandbreite und der Pulsdauer in Abhängigkeit der Ausgangsleistung. Bei steigender Leistung führen Nichtlinearitäten in der Faser zu einer größeren Pulsdauer und einer geringeren Bandbreite. (d) Vergleich zwischen der Bandbreite vor und nach der Faser bei maximaler Ausgangsleistung

ein effizienter Pulskompressor aus einer Kombination von hocheffizienten Transmissionsgittern und antireflexbeschichteten Prismen aufgebaut. Damit konnte eine Ausgangsleistung von ca. 300 mW bei einer Pulsdauer von weniger als 50 fs nach 6 m optischer Faser übertragen werden. Die Messergebnisse werden von numerischen Simulationen zur Propagation von Femtosekunden-Laserpulsen in der Faser untermauert. Dabei zeigt sich, dass die Laserpulsdauer am Faserende lediglich durch Dispersion vierter Ordnung und nichtlineare Effekte in der Faser limitiert sind. Um die volle Flexibilität der optischen Fasern zu nutzen, wurde ein kompakter fasergekoppelter Messkopf entworfen. Im Messkopf werden Anrege- und Abfra-

(extremes Ultraviolett). Aufgrund der extrem kurzen verwendeten Wellenlänge von 13,5 nm in der EUV-Lithografie müssen die EUV-Spiegel sub-nm Toleranzen auf dm<sup>2</sup> Flächen erfüllen. Die Spiegel bestehen üblicherweise aus über 50 Doppelschichten Silizium/Molybdän. Die in diesem Experiment untersuchte Probe besteht aus 60 Si/Mo-Schichten, die mittels Sputtern auf einem monokristallinen Silizium-Wafer aufgebracht wurden. In Ultraschall-Experimenten tritt in dieser Übergitterstruktur neben dem akustischen Puls noch eine hochfrequente akustische Schwingungsmode auf. Über den Zeitpunkt des akustischen Echos und die Frequenz der Schwingungsmode kann unter Kenntnis der longitudinalen Schallgeschwindigkeit

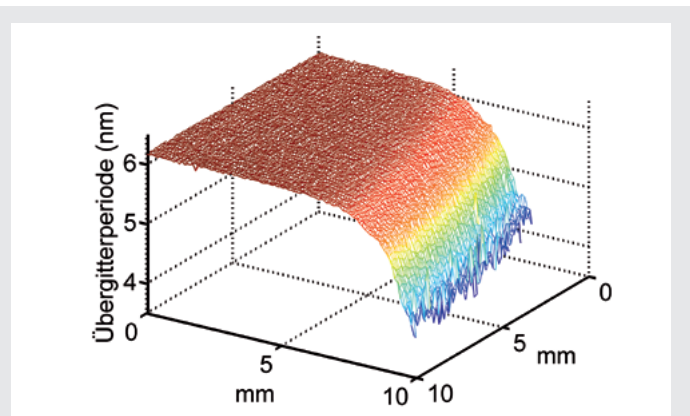


Abb. 4: Ergebnis einer ASOPS-basierten ortsauflösten Schichtdickenmessung eines EUV-Spiegels. Der fasergekoppelte Messkopf wurde auf einer Fläche von 1 cm<sup>2</sup> in 100 µm Schritten bewegt. In Richtung Wafer-Rand zeigt sich eine Abnahme der Übergitterperiode, die aus Inhomogenitäten im Beschichtungsprozess resultiert. Der aus den Daten errechnete Mittelwert der Übergitterperiode im Bereich der Wafer-Mitte liegt bei 6,106±0,006 nm

Kontakt:

Prof. Dr. Thomas Dekorsy  
 Universität Konstanz  
 Fachbereich Physik  
 Fach M 700  
 78457 Konstanz

Tel. 07531 883820  
 Fax 07531 883072

thomas.dekorsy@uni-konstanz.de

Nico Krauß  
 Universität Konstanz  
 Fachbereich Physik  
 AG Thomas Dekorsy

Tel. 07531 883843

nico.krauss@uni-konstanz.de