

## Radiometrie für die EUV-Lithographie

Frank Scholze\*, Christian Laubis, Annett Barboutis,  
Christian Buchholz, Andreas Fischer, Jana Puls, Christian Stadelhoff

Ein wesentlicher Schritt zur Herstellung integrierter Schaltkreise ist die lithographische Strukturierung von Halbleiterwafern für die Transistor- und Leiterbahnen. Dazu wird ein optisches Lithographieverfahren angewandt, dessen Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt wird. Die derzeit verwendete Wellenlänge eines ArF-Lasers von 193 nm ist zu lang, um die zukünftig benötigten kleinen Strukturen in einem Belichtungsvorgang herzustellen. Nach der „Roadmap“ der Halbleiterhersteller soll für die Lithographie zur Chipfertigung mit Strukturbreiten von weniger als 10 nm zukünftig extrem ultraviolette (EUV) Strahlung bei einer Wellenlänge von 13,5 nm eingesetzt werden [1, 2]. Wesentliche Komponenten für eine EUV-Lithographiemaschine sind eine leistungsstarke EUV-Plasma-Strahlungsquelle, eine Beleuchtungsoptik, die Reflexionsmaske und eine Projektionsoptik, die die Maske verkleinert auf den Wafer abbildet. Alle diese Komponenten haben Spezifikationen, die eine technologische Herausforderung darstellen und umfangreiche Neu- und Weiterentwicklung erfordern. Damit verbunden besteht die Notwendigkeit, die Messtechnik weiterzuentwickeln, insbesondere auch bei der Arbeitswellenlänge um 13 nm („at wavelength“). Da für die Entwicklung hochwertiger Messtechnik brauchbare EUV-Strahlungsquellen fehlten, wurde diese „At-Wavelength-Metrologie“ weltweit zunächst an Elektronenspeicherringen mit Synchrotronstrahlung durchgeführt, in den USA insbesondere an der *Advanced Light Source* (ALS) in Berkeley durch das *Center for X-ray Optics* (CXRO) [3] und beim NIST in Gaithersburg am Speicherring SURF III [4, 5] sowie in Europa bei der PTB in Berlin mit ihren EUV-Strahlrohren an den Speicherringen BESSY I (früher), BESSY II (derzeit) und seit Oktober 2013 auch an der *Metrology Light Source* (MLS) [6].

### EUV-Reflektometrie

Die Reflektometrie [7] ist die Hauptmethode zur „At-Wavelength-Untersuchung“ von Komponenten für die EUV-Lithographie bei der PTB. Neben der Entwicklung leistungsstarker EUV-Strahlungsquellen ist die Herstellung geeigneter optischer Komponenten eine große Herausforderung. Es gibt keine für EUV-Strahlung transparente Materialien. Daher können nur Spiegel als optische Komponenten eingesetzt werden. Durch die Verwendung von periodischen Vielfachschichten als Bragg-Reflektoren kann dabei auch ein ausreichender Reflexionsgrad erreicht werden. Die Bestimmung der Eigenschaften dieser Mo/Si-Vielfachschichten muss jedoch bei der Arbeitswellenlänge erfolgen, da sich aus der sonst notwendigen Umrechnung auf die Arbeitswellenlänge inakzeptable Unsicherheiten durch die verwendeten numerischen Modelle und Materialparameter ergeben.

Von besonderer Bedeutung für die technologische

\* Dr. Frank Scholze,  
Arbeitsgruppe „EUV-  
Radiometrie“, E-Mail:  
frank.scholze@ptb.de

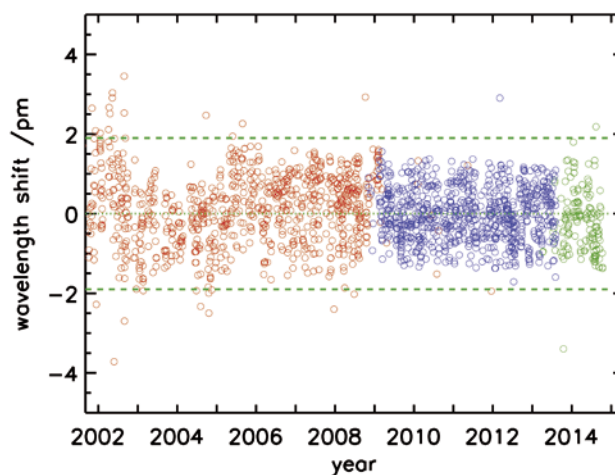


Bild 1:  
Ergebnisse der täglichen Kontrolle der Wellenlänge durch Messung der Be-K- (rot) bzw. der Si-L-Absorptionskante (blau) am SX700-Strahlrohr. Ab 2009 wurde aufgrund der besseren Stabilität Si als Referenzkante genutzt, seit September 2013 am EUVR-Strahlrohr der MLS (grün).

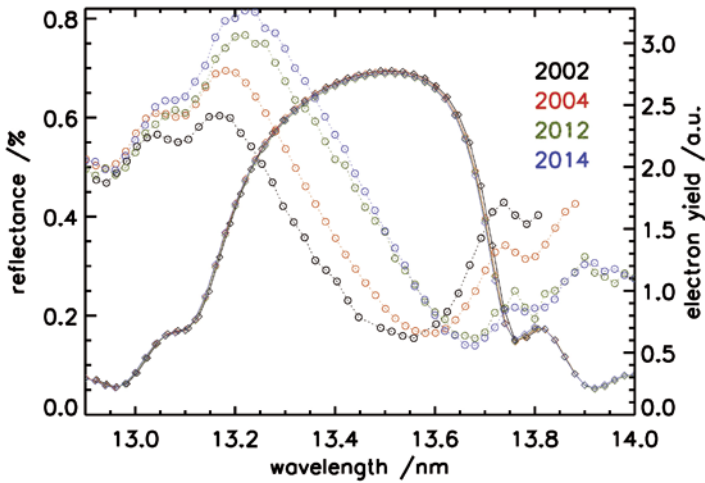


Bild 2: Wiederholungsmessung des Reflexionsgrades eines Spiegels mit 60 Mo/B<sub>4</sub>C/Si/C-Schichten (Rauten, linke Skala). Der Photostrom von der Oberfläche des Spiegels (Kreise, rechte Skala) wurde ebenfalls gemessen. Die Phasenverschiebung des Signals entspricht einer Dickenzunahme der Oberflächenschicht durch Kohlenstoff-Kontamination von etwa 1,0 nm.

Entwicklung ist die Reproduzierbarkeit der Messungen über lange Zeiträume, um die asymptotisch immer kleineren Fortschritte der Technologie einerseits und die geforderte Langzeitstabilität der Komponenten andererseits sicher nachweisen zu können. Die Reproduzierbarkeit der Messung des Reflexionsgrades und der Wellenlänge wird daher kontinuierlich überprüft. Bild 1 zeigt über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren die im EUV-Reflektometer am SX700-Strahlrohr bei BESSY II [6, 8] bzw. ab September 2013 am EUVR-Strahlrohr an der MLS täglich zur Kontrolle gemessene Wellenlänge der Absorptionskante eines spektralen Filters [6, 9]. Die Streuung der Werte über längere Zeiträume resultiert aus minimalen Dejustagen der optischen Komponenten des Strahlrohres aufgrund von z. B. thermischen Effekten und der Setzung des Gebäudes. Für die Reproduzierbarkeit wurde ein Toleranzbereich von 2 pm für die Wellenlänge festgelegt [10] (grün gestrichelte Linien in Bild 1). Bei Überschreitung der Toleranz wird der Monochromator neu justiert.

Die Reproduzierbarkeit der Messungen wird regelmäßig auch mit einer Gruppe von Referenzspiegeln überprüft, deren Reflexionsgrad und Zentralwellenlänge gemessen werden. Dadurch werden nicht nur Änderungen des Strahlrohres sondern z. B. auch mögliche Abweichungen der Justierung oder Einflüsse der Alterung des Photodetektors im Reflektometer erfasst [7]. Zur Erfüllung der Bragg-Bedingung für 13,5 nm muss die Dicke einer Doppelschicht aus Mo und Si ca. 7 nm betragen. Diese sehr dünnen Schichten sind thermodynamisch nicht stabil. Es können sich beispielsweise Molybden-Silicide bilden. Dadurch erhöht sich die mittlere Dichte, und die Dicke der Doppelschichten nimmt ab. Bei erhöhter Temperatur wird der Prozess stark beschleunigt. Zur thermischen Stabilisierung werden deshalb weitere Zwischenschichten als Diffusionsbarrieren eingefügt. Bild 2 zeigt Messungen des Reflexionsgrades eines Spiegels mit diffusionsstabilisiertem Mo/Si-Vielschichtsystem (60 x Mo/B<sub>4</sub>C/Si/C) über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren. Die Änderungen von Reflexionsgrad und Wellenlänge liegen an der Grenze der Nachweisbarkeit. Der Photostrom von der Spiegeloberfläche zeigt jedoch eine deutliche Änderung. Er korreliert mit der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche des Spiegels. Ausgehend von einer festen räumlichen Korrelation zwischen reflektiertem Wellenzug und Vielschichtsystem, kann diese Änderung nur durch eine Verschiebung der Oberfläche relativ zum stehenden Wellenfeld verursacht sein. In diesem Falle ist die Ursache das Aufwachsen einer Kohlenstoff-Kontaminationsschicht von ca. 1,0 nm Dicke. Damit ist die geringe Änderung des Reflexionsgrades eindeutig durch eine leichte Veränderung

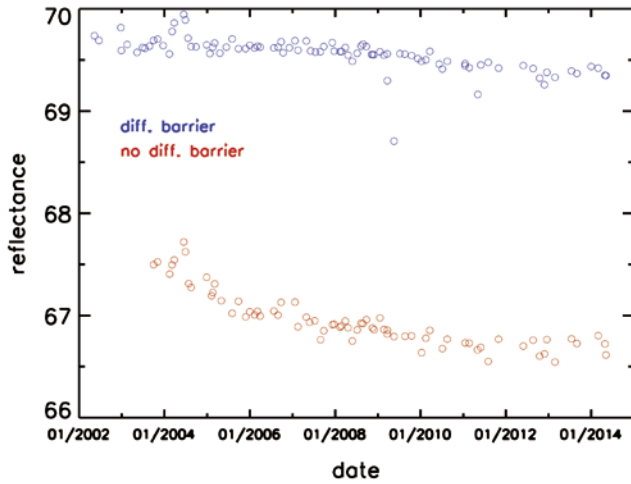


Bild 3: Reflexionsgrad für zwei EUV-Spiegel über einen Zeitraum von 12 Jahren, blau: Spiegel mit Diffusionsbarrieren, rot: ohne Diffusionsbarriere.

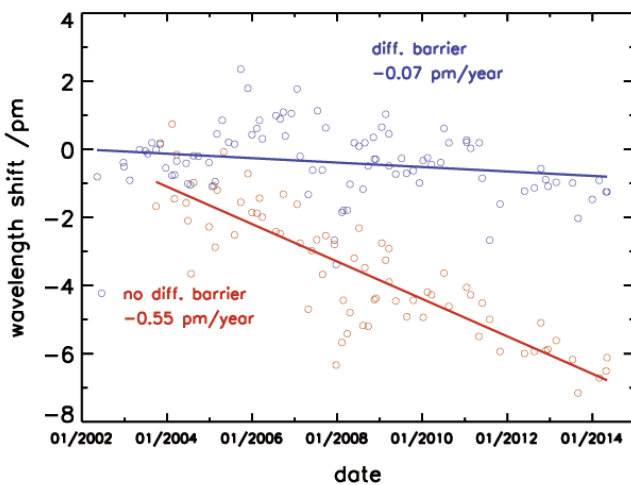


Bild 4: Gemessene Verschiebung der Zentralwellenlänge für zwei EUV-Spiegel über einen Zeitraum von 12 Jahren, blau: Spiegel mit Diffusionsbarrieren, rot: ohne Diffusionsbarriere.

der Probe und nicht durch Messabweichungen verursacht. Diese in der PTB entwickelte simultane Messung von Reflexionsgrad und Photostrom liefert besonders detaillierte Informationen über geringe Änderungen des Oberflächenzustandes von Spiegeln, die mit anderen Methoden nicht zugänglich sind [11]. Im August 2013 erfolgte der Umzug des EUV-Reflektometers [7] vom SX700-Strahlrohr bei BESSY II an das EUVR-Strahlrohr an der MLS [6]. Die gute Übereinstimmung der Messung von 2014 aus Bild 2 mit den vorhergehenden belegt gute Reproduzierbarkeiten nach dem Umzug.

Die Ergebnisse für zwei typische EUV-Spiegel über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren sind in Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Obwohl die gemessenen Änderungen an der Nachweisgrenze liegen, zeigen sich deutliche Trends. Die beiden Spiegel unterscheiden sich in der fehlenden bzw. vorhandenen Diffusionsbarriere zwischen den Si- und Mo-Schichten. Der Reflexionsgrad weist in beiden Fällen einen sichtbaren Abwärtstrend auf, der sich auch hier mit dem langsamen Wachstum einer Oberflächen-Kontaminationsschicht erklären lässt. Der Spiegel ohne Diffusionsbarriere zeigt jedoch – vor allem zu Beginn – eine deutlich stärkere Abnahme, was auf die Verringerung des optischen Kontrastes an den Schichtgrenzen durch die Diffusionsprozesse hinweist.

Die reproduzierbare Einstellung der Wellenlänge (Bild 1) erlaubt die Kontrolle des Verhaltens von EUV-Spiegeln über lange Zeit. Bild 4 zeigt die Verschiebung der Zentralwellenlänge für die beiden o. g. EUV-Spiegel. Für den Spiegel mit der diffusionsstabilisierten Vielschicht bleibt die Zentralwellenlänge über den gesamten Zeitraum konstant, während sie für den Spiegel ohne Diffusionsbarriere leicht aber signifikant abnimmt. Neben der Stabilität der Messungen über lange Zeiträume belegen diese Ergebnisse gleichzeitig, dass die Messunsicherheiten der PTB ausreichen, auch sehr kleine Veränderungen über lange Zeit nachzuweisen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für Lebensdaueruntersuchungen, wie sie ebenfalls abgestützt auf Messungen des PTB-Laboratoriums durchgeführt werden [12].

Mit der Inbetriebnahme des EUVR-Strahlrohrs an der MLS verfügt die PTB über zwei Strahlrohre für den Spektralbereich des EUV [6]. Die Messgeräte, das EUV-Reflektometer am EUVR-Strahlrohr der MLS und das EUV-Ellipso-Scatterometer am SX700-Strahlrohr bei BESSY II [7], sind in Bild 5 gezeigt. Als eine typische Probe für die EUV-Lithographie (EUVL) zeigt Bild 6 einen Kollektorspiegel für eine EUV-Laserplasmaquelle mit einem Durchmesser von 670 mm, montiert im EUV-Reflektometer. Bild 7 zeigt die Ergebnisse für eine Messung des Reflexionsgrades eines solchen Spiegels über die gesamte optische Fläche.

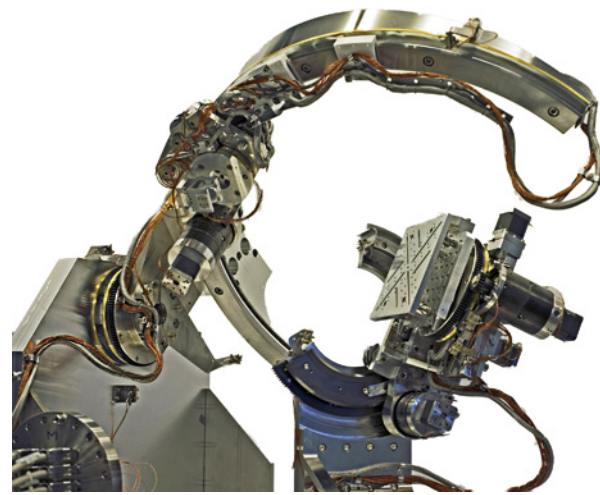


Bild 5: Messgeräte für die EUV-Reflektometrie: EUV-Reflektometer mit Reinraumumgebung am EUVR-Strahlrohr der MLS (oben), Mechanik für Probenmanipulation und Detektorbewegung des neuen EUV-Ellipso-Scatterometers am SX700-Strahlrohr bei BESSY II (unten).

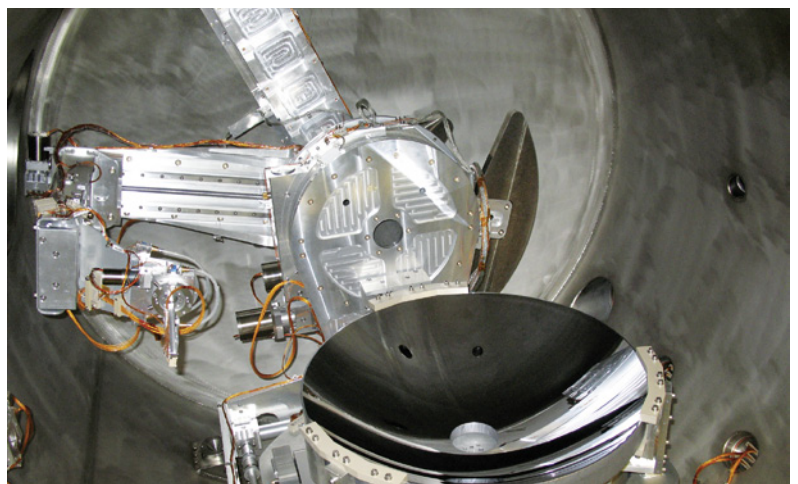


Bild 6: Kollektorspiegel für eine EUV-Plasmaquelle montiert auf dem Proben-Goniometer im EUV-Reflektometer (mit freundlicher Erlaubnis von Fraunhofer IOF und CYMER).

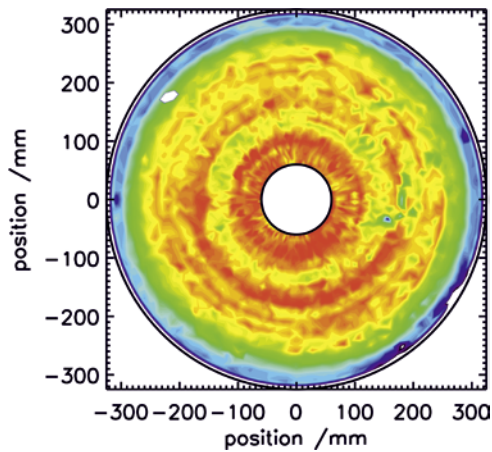


Bild 7: Beispiel des Messergebnisses bei 13,5 nm für eine Kollektoroberfläche mit einer Farbskala für den Reflexionsgrad von 50 % (dunkelblau) in Schritten von 0,1 % bis 55,5 % (rot).

Ein wichtiger Parameter für die Charakterisierung der Kollektoren für die Plasmaquellen ist der Polarisationszustand der einfallenden Strahlung. Die Plasma-Strahlungsquellen emittieren unpolarisierte Strahlung während die Messung bei der PTB mit hochgradig linear polarisierter Strahlung erfolgt. Mit dem neuen Ellipso-Scatterometer besteht die Möglichkeit, dieses zu berücksichtigen und mit hoher Auflösung polarisationsaufgelöst zu messen, ähnlich wie im VUV [7]. Insbesondere der Bereich des sog. Brewster-Winkels, an dem die Reflexion für P-Polarisation ausgelöscht wird, ist nun zugänglich. Dazu wird als Detektor ein linearer Brewster-Polarisationsanalysator eingesetzt [13]. Mit diesem Aufbau wurde ein Unterdrückungsverhältnis von  $10^4$  für die P-orientierte Komponente am Brewster-Winkel eines Mo/Si-Vielschichtspiegels gemessen (Bild 8). Untersuchungen dieser Art eröffnen auch den Zugang zu den optischen Konstanten vergrabener Schichten.

### EUV-Detektoren

Ein anderes wichtiges Arbeitsfeld zur Unterstützung von EUV-Technologie ist auch die Charakterisierung von Strahlungsempfängern [14]. Für den Einsatz von Detektoren ist insbesondere deren Stabilität unter Bestrahlung und Lagerung sowie die Empfindlichkeit von Bedeutung. Hier wurden seitens der PTB schon vor längerer Zeit zahlreiche Untersuchungen durchgeführt [15]. Ein wesentliches Problem ist die geringe Anzahl kommerziell verfügbarer EUV-stabiler Photodetektoren. In einem gemeinsamen Projekt mit Partnern aus Industrie und Forschung wurden deshalb systematisch die kommerziell verfügbaren Detektoren untersucht und neue Varianten entwickelt. Die PTB hat diese Aktivitäten durch die Messung der spektralen Empfindlichkeit im Bereich des VUV und EUV unterstützt sowie umfangreiche Untersuchungen zur Detektorstabilität durchgeführt [16]. In Bild 9 sind typische Empfindlichkeiten entsprechender Photodioden gezeigt. Die neuen, an der TU Delft entwickelten „PureB-Diodes“ [17] kommen der idealen Empfindlichkeit sehr nahe und sind auch unter Bestrahlung stabil [18].

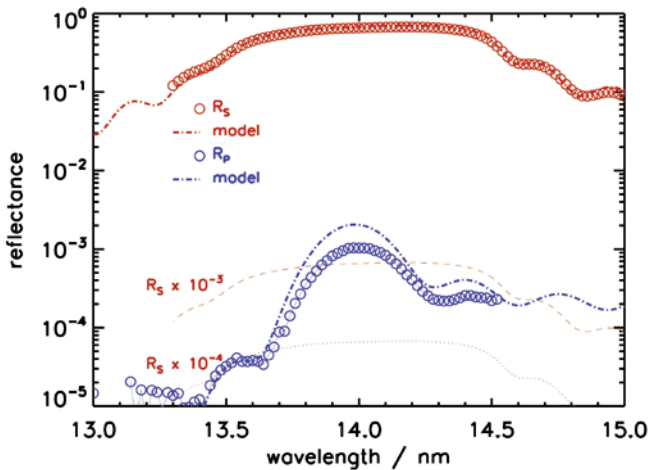


Bild 8: S- und P-Reflexionsgrad eines EUV-Spiegels am Brewster-Winkel. Zum Vergleich sind berechnete Werte gezeigt. Die Strukturparameter wurden an den gemessenen Reflexionsgrad für S-Polarisation angepasst.

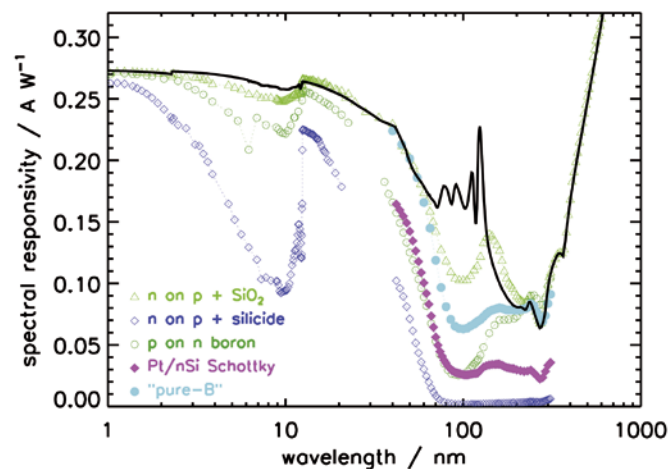


Bild 9: Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Photodioden im Bereich der weichen Röntgenstrahlung sowie im EUV und VUV. Die schwarze Kurve zeigt eine Modellberechnung für eine ideale Diode.

**Literaturverzeichnis**

- [1] *P. Gargini*: Proc. SPIE **4688**, 25 (2002)
- [2] [http://www.itrs.net/Links/2012Winter/1205%20Presentation/Lithography\\_12052012.pdf](http://www.itrs.net/Links/2012Winter/1205%20Presentation/Lithography_12052012.pdf) (letzter Aufruf: 22.10.2014)
- [3] *E. M. Gullikson, S. Mrowka, B. B. Kaufmann*: Proc. SPIE **4343**, 363 (2001)
- [4] *C. Tarrío, R. E. Vest, S. Grantham*: Proc. SPIE **4450**, 94 (2001)
- [5] *S. Grantham, C. Tarrío, M. B. Squires, T. B. Lucatorto*: Proc. SPIE **4688**, 348 (2001)
- [6] *M. Richter, G. Ulm*: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [7] *M. Krumrey, L. Cibik, A. Fischer, A. Gottwald, U. Kroth, F. Scholze*: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 35 (2014)
- [8] *F. Scholze et al.*: Proc. SPIE **4344**, 402 (2001)
- [9] *F. Scholze, J. Tümmeler, G. Ulm*: Metrologia **40**, S224 (2003)
- [10] *C. Laubis, A. Kampe, C. Buchholz, A. Fischer, J. Puls, C. Stadelhoff, F. Scholze*: Proc. SPIE **7636**, 76362R (2010)
- [11] *M. Wedowski, F. Scholze, J. Tuemmler*: Method For Manufacturing Reflective Optical Element, Reflective Optical Elements, Euv-Lithography Apparatus And Methods For Operating Optical Elements And Euv-Lithography Apparatus, Methods For Determining The Phase Shift, Methods For Determining The Layer Thickness, And Apparatuses For Carrying Out The Methods, Patent US20070285643 (2007)
- [12] *R.-M. Klein, A. Gottwald, F. Scholze, R. Thornagel, J. Tümmeler, G. Ulm, M. Wedowski, F. Stietz, B. Mertens, N. B. Koster*: Proc. SPIE **4506**, 105 (2001)
- [13] [http://www.ipfdd.de/fileadmin/user\\_upload/ax/OEA/8th\\_Workshop\\_Ellipsometry/Scholze.pdf](http://www.ipfdd.de/fileadmin/user_upload/ax/OEA/8th_Workshop_Ellipsometry/Scholze.pdf) (letzter Aufruf: 22.10.2014)
- [14] *A. Gottwald, U. Kroth, M. Krumrey, P. Müller, F. Scholze*: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 21 (2014)
- [15] *F. Scholze, R. Klein, T. Bock*: Appl. Opt. **42**, 5621 (2003)
- [16] *L. Shi, S. Nihtianov, S. Xia, L. K. Nanver, A. Gottwald, F. Scholze*: IEEE Trans. Instrum. Meas. **61**, 1268 (2012)
- [17] *F. Sarubbi, L. K. Nanver, T. L. M. Scholtes, S. N. Nihtianov, F. Scholze*: Proc. of 38<sup>th</sup> European Solid-State Device Research Conference (ESS-DERC 2008), Edinburgh, Scotland, UK, p. 278 (2008)
- [18] *L. Shi, S. N. Nihtianov, F. Scholze, L.K. Nanver*: Proc. 38<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON12), Montreal, Canada, p. 3952 (2012)