

UV-Licht

HERAUSFORDERUNG AN OPTISCHE SYSTEME

Ultraviolettes Licht gewinnt in vielen Hightech-Anwendungen, etwa in der Halbleiterproduktion, an Bedeutung. Um es nutzen zu können, sind optische Komponenten und Systeme nötig, welche die besonderen Anforderungen des UV-Spektrums erfüllen. Optikentwickler brauchen spezielle Kenntnisse und müssen die Techniken zum Herstellen und Vermessen dieser Optiken beherrschen.

THOMAS THÖNISS
STEFAN MEWES

Optische Systeme für ultraviolettes Licht unterhalb von zirka 400 nm haben seit Langem bekannte Einsatzgebiete: die optische Detektion von elektrischen Entladungen (Solar-Blind-Verfahren), die Kriminalistik (Crime-Scene Inspection) oder die spektroskopische Analytik. In den letzten Jahren eroberte UV-Licht auch andere klassische Anwendungen optischer Systeme, beispielsweise die industrielle Inspektion oder die Lasermaterialbearbeitung. Ein anderes Hightech-Gebiet, die Mikrochipherstellung, ist ohne UV-Licht nicht denkbar. Der Kampf um größere Speicherkapazitäten mithilfe kleinerer Halbleiterstrukturen ist direkt verknüpft mit der Verwendung von Licht mit immer kürzeren Wellenlängen (Bild 1). Vor diesem Hintergrund lohnt es sich, das ultraviolette Spektrum näher zu betrachten.

Optische Systeme für den UV-Bereich lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Breitband- und Schmalbandsysteme. Breitbandsysteme kommen bei der Verwendung

von breitbandigen Lichtquellen wie Xenonlampen zum Einsatz. Das Spektrum kann sich weit über den eigentlichen UV-Bereich hinaus über sichtbares Licht bis hin zum nahen Infrarot erstrecken. Eine typische Anwendung ist die Inspektion von Waferoberflächen mittels Streulichtauswertung. Dafür sind hochauflösende abbildende optische Systeme erforderlich, die oftmals – hinsichtlich ihrer optischen Anforderungen – klassischen Mikroskopobjektiven ähneln.

Die zweite Kategorie umfasst Systeme, die für spezifische (Laser-) Wellenlängen entwickelt werden. Ein Anwendungsgebiet von schmalbandigen, hochauflösenden Systemen ist wiederum die (Schmalband-) Waferinspektion. Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld von UV-Optiken ist die Lasermaterialbearbeitung. Mit geeigneten Laserlichtquellen und optischen Systemen, wie F-Theta-Objektiven und Strahlauflerungssystemen, werden in der Elektronik Leiterplatten (Printed-Circuit Boards, PCBs) strukturiert.

Die Motivation, Licht mit immer kürzerer Wellenlänge einzusetzen, liegt darin be-

gründet, die Auflösung der genannten Verfahren zu steigern, beispielsweise um immer feinere Strukturen zu erzeugen oder zu erkennen. Dem Beugungsgesetz der Optik folgend kann eine höhere Auflösung nur erreicht werden, wenn entweder die Öffnung des optischen Systems vergrößert oder die Wellenlänge verringert wird. Aus technischer Sicht sind höhere Öffnungen zumeist schon ausgereizt oder häufig nicht sinnvoll realisierbar. Also bleibt nur die Verringerung der Wellenlänge. Beispiele für UV-Objektive zeigt Bild 2.

Herausforderung an die Optikdesigner

Optische Systeme erlangen ihre hohe Abbildungsleistung unter anderem, indem man optische Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes und Dispersionen sinnvoll miteinander kombiniert. Im Gegensatz zum sichtbaren Spektrum stehen dem Optikrechner im Ultravioletten nur wenige Kristallmaterialien für die Auslegung optischer Systeme zur Verfügung. Ursache ist die Transmissionsgrenze der optischen Gläser bei etwa 330 nm. Die typischen UV-Materialien, wie Quarz (SiO_2) und Kalziumfluorid (CaF_2), besitzen eine vergleichsweise sehr geringe Brechzahl. Um also die gleiche zerstreue oder sammelnde Wirkung wie bei einer Linse aus einem hochbrechenden Flintglas zu erzeugen, müssen die Krümmungsradien der jeweiligen Linse stark angespannt oder die Wirkung durch mehrere Komponenten erzielt werden.



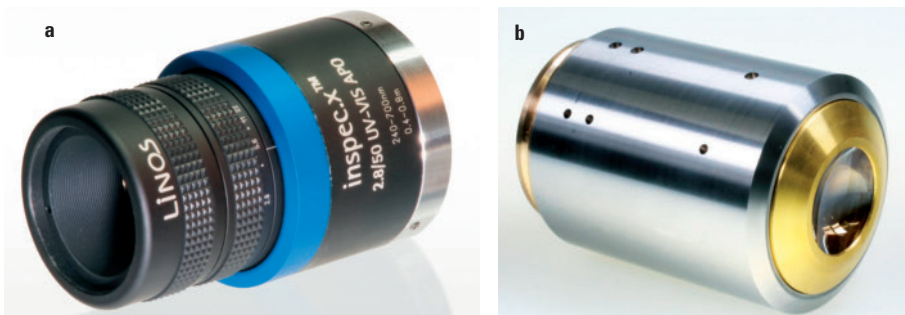
1 Simulation der Auflösungssteigerung mittels Verringerung der Wellenlänge: Abbildung einer Teststruktur bei (a) 1064 nm, (b) 532 nm und (c) 266 nm durch ein abbildungsfehlerfreies optisches System

Die Korrektur der chromatischen Abbildungsfehler ist ein weiterer wesentlicher Aspekt – nicht nur bei der Auslegung optischer Systeme für einen breiten Spektralbereich. Auch bei hochauflösenden schmalbandigen Lasersystemen kann allein die Bandbreite des Lasers oder die schwankende Zentralwellenlänge im Bereich von wenigen Pikometern schon zu einem deutlichen Verfall der Auflösung führen. Nicht selten müssen daher auch schon diese Systeme farbkorrigiert werden.

Wirkungsvolle Spiegelsysteme

Der Einsatz von Pilot- oder Autofokuswellenlängen im sichtbaren oder IR-Spektrum macht ebenfalls eine Farbkorrektur notwendig. Die beiden Hauptmaterialien Quarz und CaF_2 schränken mit ihren Dispersionseigenschaften die Korrekturmöglichkeit von Farbfehlern gerade bei Breitbandsystemen stark ein. Andere UV-transparente Materialien, wie LiF, sind

Ein weiteres wichtiges Korrektionswerkzeug fehlt dem Optikrechner beim Auslegen von UV-Optiken – das Verkitten zweier optisch wirksamer Flächen von Linsen aus unterschiedlichen Materialien. Optische Kitte, die im UV transparent und langzeitstabil sind und nicht ausgasen oder altern, stehen in der Regel nicht zur Verfügung. Alternativ dazu können die optischen Elemente möglichst dicht aneinander positioniert werden, wobei ein minimaler Luftspalt verbleibt. Das stellt für die Konstruktion und Fertigung derartiger Systeme eine besondere Herausforderung dar, auf die im Folgenden noch eingegangen wird [1]. UV-Systeme stellen den Anspruch höchster Auflösung. Auftretendes Streulicht, aufgrund von Oberflächenstreuung an den optisch wirksamen Flächen oder durch Reflexion an Fassungselementen, kann bei abbildenden Systemen vom Detektor als Falschsignal aufgenommen werden. Die Folge ist das Herabsetzen des Bildkontrasts. Hochauflösende Systeme werden somit neben der



2 Beispiel für ein UV-VIS-Breitbandkameraobjektiv für 240 bis 700 nm (a) und ein hochauflösendes Long-Distance-Inspektionsobjektiv für 266 nm (b)

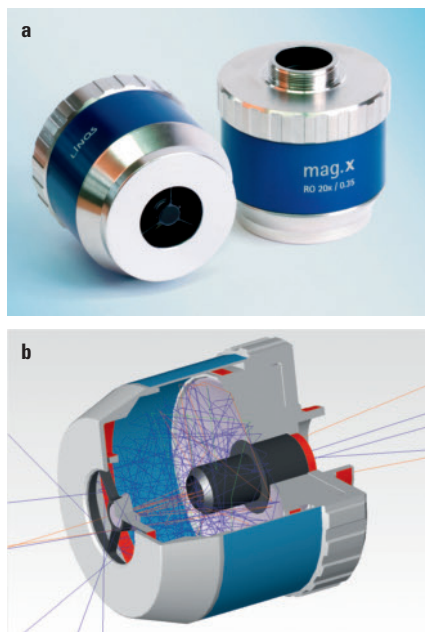
wegen ihrer Materialeigenschaften nur mit einem sehr hohen technologischen Aufwand einsetzbar. Unterhalb von etwa 130 nm absorbieren auch die optischen Kristalle, sodass nur noch Spiegelsysteme für die Realisierung von Optiken infrage kommen.

Spiegelsysteme (Bild 3a) sind generell eine interessante Alternative zu refraktiven Optiken. Spiegelobjektive haben keine Farbfehler und können somit je nach Spiegelschicht über einen großen Spektralbereich schmal- oder breitbandig eingesetzt werden. Beispielsweise zeichnen sich die in der Mikroinspektion häufig eingesetzten Spiegelobjektive des Schwarzschild-Typs doppelt aus: durch ihre vergleichsweise großen Arbeitsabstände und durch eine hohe »Transparenz« aufgrund ihrer wenigen Flächen.

eigentlichen optischen Korrektur auch einer Optimierung des Falschlichts unterzogen. Im Gegensatz zum klassischen Optikdesign kommen hier spezielle Softwarepakete oder Module zum Einsatz – die nichtsequenziellen Raytracer wie »TracePro« von Lambda Research (Bild 3b).

Herausforderung Optikfertigung und Coating

Optische UV-Materialien zu bearbeiten, ist eine besonders anspruchsvolle Aufgabe. Materialien wie Kalziumfluorid sind sehr empfindlich und neigen zu Mikrorissen und Aussprünge. Sie können nicht mit herkömmlichen Poliermitteln bearbeitet werden. Trotz sorgfältigsten Läppens oder Polierens der optischen Komponenten verbleibt nach dem Prozess in jedem Fall ▶



3 UV-VIS-Spiegelobjektiv (a); Untersuchung der Streulichtverteilung in einem Spiegelobjektiv mittels nichtsequenziellen Raytracings mit der Software TracePro (b)

► eine Restrauigkeit der optischen Oberflächen. Bei abbildenden Systemen für sichtbares Licht liegen typische Oberflächenrauheiten zwischen 1 und 2 nm. Der Anteil des an dieser Mikrostruktur gestreuten Lichts ist im Vergleich zum Nutzlicht, das zur Abbildung beiträgt, verschwindend gering. Der Transmissionsverlust und die Kontrastminderung halten sich in vertretbaren Grenzen. Das Streuvermögen einer Oberfläche steigt jedoch mit abnehmender Wellenlänge stark an [2]. Dieser Umstand macht eine besondere Güte der Oberflächen notwendig. Durch spezielle aufwendige, zum Teil mehrstufige Polierverfahren (Superpolishing) werden somit Mikrorauigkeiten von 1 bis 0,1 nm erreicht.

Wie bei den optischen Werkstoffen steigen auch bei den meisten Aufdampfmaterialeien die Absorptionsverluste im UV stark an. Damit sinken sowohl die Gesamttransmission des optischen Systems als auch die Zerstörschwellen der Einzelkomponenten. Die Herausforderung bei der Vergütung von Optiken mit reflexionsmindernden oder hochreflektierenden Beschichtungen bei kürzeren Wellenlängen besteht daher – wie beim Optikdesign auch – in der deutlich reduzierten Anzahl von nutzbaren Schichtmaterialien. Typische oxidische Aufdampfmaterialeien für sichtbare Wellenlängen scheiden für viele UV-Anwendung aus, da sie bei 193 nm

schon deutliche Absorptionsverluste aufweisen. Konventionell aufgedampfte, fluoridische Materialien können die Absorption verringern, jedoch neigen sie aufgrund ihrer Charakteristik beim Schichtwachstum (Schichtmorphologie) zu erhöhter Streuung und zur Bildung von Mikrorissen. Die Folge der eingeschränkten Materialauswahl bei kürzeren Wellenlängen und des großen spektralen Bereichs bei Breitbandsystemen sind immer komplexere Schichtdesigns, um dennoch eine hohe Transparenz oder bei Spiegelsystemen eine hohe Reflektivität zu gewährleisten (Bild 4).

Auch die Anforderungen an den Beschichtungsprozess selbst steigen, da dieser die Oberflächenqualität (Sauberekeit, Mikrorauigkeit) und die Oberflächenform (Passe) der optischen Bauelemente entscheidend beeinflussen kann. Die hohe Abbildungsgüte der Systeme erfordert optische Bauelemente mit einer Oberflächengenauigkeit von zum Teil weit unterhalb $\lambda/10$. Die Vergütungsprozesse müssen so optimiert sein, dass diese hohe Oberflächengüte auch nach der Beschichtung erhalten bleibt.

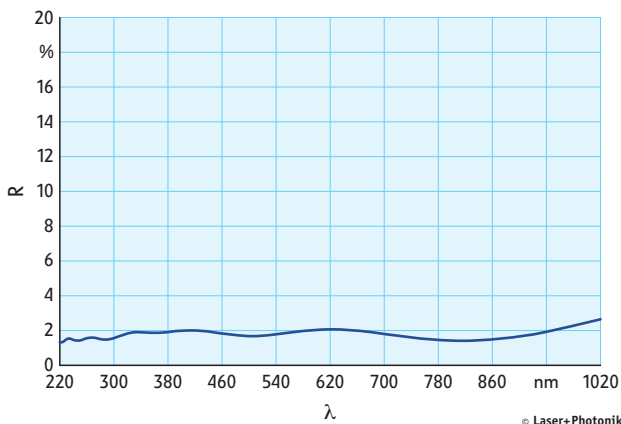
Präzise Fassungstechnik

Die hohen Anforderungen an die Leistung von optischen Systemen machen generell eine präzise Fassungstechnik unverzichtbar, da kleinste Lagefehler zum deutlichen Verlust der Abbildungsqualität führen. UV-Systeme unterliegen zusätzlichen Herausforderungen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass bei refraktiven UV-Systemen dünnste Luftspalte erforderlich sind. Diese zum Teil nur wenige Mikrometer dünnen Spalte zwischen einzelnen optisch wirksamen Flächen sind extrem empfindlich: Herkömmliche Lagefehler – bedingt durch Fertigungstoleranzen der optischen Elemente und Einbautoleranzen wie longitudinaler, lateraler Versatz und Verkippung bei der Montage – können schon in der Größen-

KONTAKT

Linios Photonics GmbH & Co. KG,
D-37081 Göttingen,
Tel. +49 (0) 5 51 /69 35 -2 00,
Fax +49 (0) 5 51 /69 35 -3 33,
www.linios.de

AR-Coating



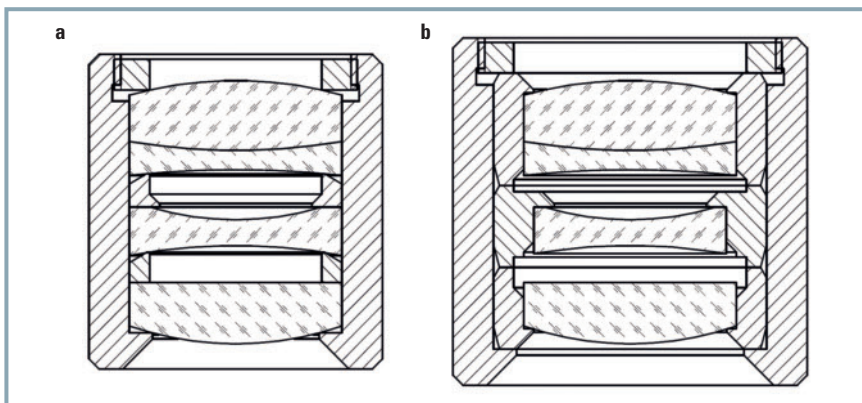
4 Superbreitband-Antireflexbeschichtung von 220 bis 950 nm

ordnung des eigentlichen Luftabstands liegen. Die Fertigungstoleranzen der mechanischen Fassungselemente und der optischen Bauteile weiter zu verringern, ist nicht sinnvoll. Um dennoch eine hohe Abbildungsleistung zu garantieren, sind bei der Montage derartiger Systeme Spezialtechniken notwendig. Zum einen können optische Komponenten oder Teilsysteme eines Objektivs unter entsprechender Beobachtung der Abbildungsqualität justiert werden. Hierzu werden optische Komponenten im Optikdesign ausgesucht, die einen gezielten Einfluss auf bestimmte Abbildungsfehler haben. Diese Elemente fließen so in die Konstruktion ein, dass sie sich definiert lateral oder longitudinal verschieben und nach der Justage fixieren lassen (Bild 5a). Diese Justageverfahren sind zum Teil sehr aufwendig.

Ein weiteres Verfahren ist schon seit Langem aus der Mikroskopobjektivherstellung bekannt. Einzelne Linsen eines Systems werden in eigene Subfassungen montiert (Bild 5b). Diese Fassungen werden auf Spezialmaschinen optisch ausge-

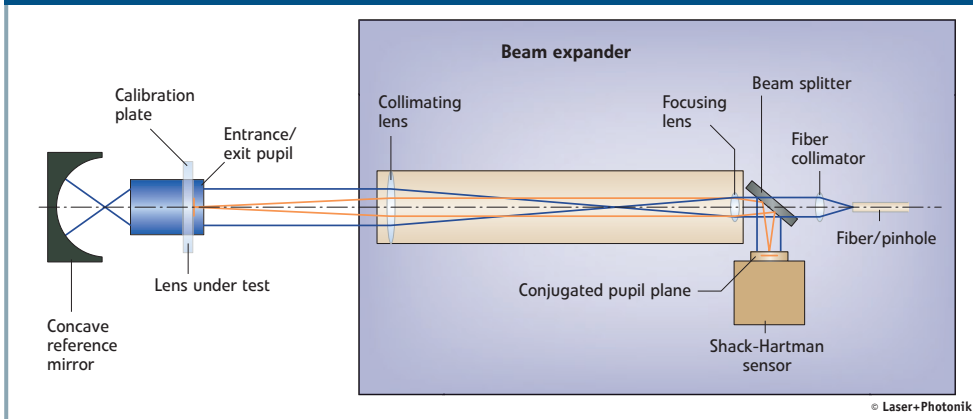
richtet und der Fassungsdurchmesser sowie die Fassungslänge durch Diamantdrehverfahren mit höchster Genauigkeit bearbeitet. Somit besitzen die einzelnen subgefassten optischen Elemente eine hohe definierte Grundgenauigkeit. Werden diese Elemente nun in einer präzisen zylindrischen Außenfassung aufgenommen, lässt das so entstandene optische System schon eine hohe Abbildungsleistung erwarten. Zusätzliche Justageschritte lassen eine weitere Optimierung der Abbildungsleistung zu. Namhafte deutsche Firmen und Institute haben diese Technik in einem anspruchsvollen Förderprojekt zu höchster Präzision getrieben. Typische Toleranzen reichen nach modernster Bearbeitung bis unter 1 µm [3].

Eine andere Herausforderung ist das Fixieren der optischen Elemente in der Fassung. Bei einfachen Systemen kommen lediglich Vorschraubringe zum Einsatz, die die jeweilige Linse in ihrem Linsensitz mit einer hinreichenden Genauigkeit fixiert. Diese Genauigkeit reicht für hochanspruchsvolle Systeme bei Weitem ▶



5 Fassungsbeispiele mit (a) klassischer Passspielmontage und (b) Präzisionsfassungstechnik mit subgefassten Optikkomponenten

Aufbau zur Wellenfrontmessung



6 Schema des bei Linos realisierten Wellenfrontmesssystems für UV-Anwendungen zur Vermessung von hochauflösenden Objektiven

► nicht aus. Das bei Systemen für den sichtbaren Bereich übliche Fixieren der Linsen mittels Justierkleben unter optischer Beobachtung ist im UV oftmals nicht zulässig. Die organischen Klebematerialien sind in derartigen Systemen direktem oder gestreutem UV-Licht ausgesetzt; sie unterliegen einer beschleunigten Alterung und gasen aus. Das Ausgasen kann wiederum zu lichtabsorbierendem Niederschlag auf den optischen Komponenten führen. Aus diesem Grund sind spezielle präzise Fassungstechniken notwendig, die ohne Klebstoffe auskommen. Da optische Kristalle wie Kalziumfluorid auf mechanische Belastung empfindlich reagieren, müssen die Konstrukteure auf entsprechend spannungsarme Verfahren zurückgreifen.

Messtechnik für das ultraviolette Spektrum

Die optische Abbildungsleistung wird bei abbildenden Systemen in der Regel durch die Ermittlung der Modulationstransferfunktion (MTF) auf der Basis von Punkt- oder Kantenbildauswertung bestimmt. Dieses klassische Verfahren ist bei UV-Systemen nur bedingt anwendbar. Zum einen existieren kaum kommerzielle Messvorrichtungen zur MTF-Messung im UV, und zum anderen ist die Auflösung derart hoch, dass dieses Messverfahren auch an seine physikalischen Grenzen stößt [4]. Die Auswertung der Wellenfront, die das zu testende optische System erzeugt, ist ein übliches Verfahren, um beispielsweise hochauflösende Mikroskopobjektive zu beurteilen. Hierzu werden Interferometer verwendet, die für eine spezifische Wellenlänge ausgelegt sind. Das Beurteilen von Systemen über einen größeren Spektralbereich oder bei mehreren diskreten Wellenlängen ist im Allgemeinen nicht möglich oder sehr aufwendig.

Ein sinnvolle Alternative ist die Wellenfrontmessung mit Wellenfrontsensoren nach dem Hartmann-Shack-Prinzip [5, 6]. Derartige Sensoren sind zum einen aufgrund ihres prinzipiellen Aufbaus weniger kostspielig und zum anderen durch ihre robusten Auswerteverfahren über einen größeren Spektralbereich nutzbar. Die Anpassung derartiger Sensoren auf andere Spektralbereiche ist ebenfalls mit vertretbarem Aufwand möglich. Linos hat bei der Umsetzung eines Systems zur Vermessung hochwertiger Systeme Prinzipien aus der klassischen Interferometrie und der Hartmann-Shack-Methode miteinander kombiniert (Bild 6). So werden optische Systeme im doppelten Durchgang von einer Welle durchlaufen. Der Rücklauf wird mittels Reflexion an einer hochgenauen Fläche – beispielsweise einer Hohlkugel – realisiert. Die eigentliche Auswertung der Welle nimmt letztendlich ein Hartmann-Shack-Sensor vor. ■

lenlänge ausgelegt sind. Das Beurteilen von Systemen über einen größeren Spektralbereich oder bei mehreren diskreten Wellenlängen ist im Allgemeinen nicht möglich oder sehr aufwendig. Eine sinnvolle Alternative ist die Wellenfrontmessung mit Wellenfrontsensoren nach dem Hartmann-Shack-Prinzip [5, 6]. Derartige Sensoren sind zum einen aufgrund ihres prinzipiellen Aufbaus weniger kostspielig und zum anderen durch ihre robusten Auswerteverfahren über einen größeren Spektralbereich nutzbar. Die Anpassung derartiger Sensoren auf andere Spektralbereiche ist ebenfalls mit vertretbarem Aufwand möglich. Linos hat bei der Umsetzung eines Systems zur Vermessung hochwertiger Systeme Prinzipien aus der klassischen Interferometrie und der Hartmann-Shack-Methode miteinander kombiniert (Bild 6). So werden optische Systeme im doppelten Durchgang von einer Welle durchlaufen. Der Rücklauf wird mittels Reflexion an einer hochgenauen Fläche – beispielsweise einer Hohlkugel – realisiert. Die eigentliche Auswertung der Welle nimmt letztendlich ein Hartmann-Shack-Sensor vor. ■

Fazit: Kooperationen und Förderprojekte nötig

Ohne Spezialkenntnisse und -technologien ist die Herstellung von optischen Systemen für das UV undenkbar. Die technischen Herausforderungen wachsen, da der Trend zu immer kürzeren Wellenlängen und höheren Auflösungen sich auch künftig fortsetzen wird. So arbeiten schon jetzt namhafte Institute

und Unternehmen wie das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena an den nächsten Generationen optischer Systeme für das EUV/XUV bis an den Rand des weichen Röntgenlichts. Hier kommen nur noch Spiegelsysteme mit speziell polierten und beschichteten Flächen zum Einsatz [7]. Weitere damit verbundene Probleme, wie das Vermeiden von Fotokontamination durch das sachgerechte Handling optischer Komponenten für diesen Bereich, sind bislang wenig be-

schrieben worden. Der Haupttreiber für derartige Systeme ist derzeit die EUV-Lithografie. Der technologische Aufwand für diese Systeme ist enorm und von einzelnen Unternehmen kaum zu bewältigen. Die Kooperation zwischen verschiedenen Firmen und Instituten ist unabdingbar und die Unterstützung von Projekten auf diesem Gebiet durch entsprechende Förderprogramme wünschenswert.

AUTOREN

THOMAS THÖNISS leitet die Entwicklungsabteilung, und STEFAN MEWES ist Entwicklungsingenieur und Projektleiter bei Linos in Göttingen.

LITERATUR

- 1 C. Gunkel, T. Sure: »Mikroskopobjektiv-Fertigung: auf dem Weg von der Mikrometerskala zur Nanotechnologie«; Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Schiele & Schön (2004), S. 43–70
- 2 J. M. Bennett, L. Mattsson: »Introduction to Surface Roughness and Scattering«; Optical Society of America, June 2008
- 3 FERMI: BMBF-Förderprojekt innerhalb des Rahmenkonzepts »Forschung für die Produktion von morgen« (02PD540-44); Projektträger: Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien
- 4 J. Heil, J. Wesner, W. Müller, T. Sure: »Artificial star test by real-time video holography for adjustment of high-numerical-aperture micro-objectives«; Applied Optics Vol. 42, No 25 (2003), S. 5073–5085
- 5 J. Pfund, M. Beyerlein, J. Schwider: »Der Shack-Hartmann-Sensor«; Laser+Photonik 2 (2003), S. 58–61
- 6 A. Faulstich: »Optische Vermessung mit Wellenfrontsensoren«; tm – Technisches Messen 4 (1998), S. 137–141
- 7 N. Kaiser: »Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten«; Photonik 6 (2006), S. 50–52