

Automatisierte 100%-Charakterisierung mikrooptischer Bauelemente

Mathias Beyerlein, Johannes Pfund, Ralf Dorn,
Optocraft GmbH, Erlangen

Mikrooptische Bauelemente wie sphärische, asphärische und zylindrische Mikrolinsen(-arrays) oder auch Laserdiodenarrays werden in den unterschiedlichsten Anwendungen benötigt - in besonders hoher Qualität u.a. bei der optischen Datenkommunikation oder der Strahlhomogenisierung in der Halbleiterlithographie. Die dazugehörige Messtechnik erlaubt jedoch häufig nur eine langsame, stichprobenartige Charakterisierung einzelner Prüflinge. Zur Fertigungsoptimierung und gezielten Selektion einzelner Komponenten ist aber eine 100%-Prüfung der Bauteile erforderlich. Dies ist nur mit einer schnell getakteten automatisierten Plattform möglich, die Komponenten auf Form und Funktion prüfen kann. Ein solches Prüfsystem, das auf Wellenfrontsensoren basiert, kann dann auch zur automatischen Justage und Montage kompletter optischer Systeme eingesetzt werden.

1 Einsatzfelder mikrooptischer Bauelemente

Mikrolinsen werden heute in zunehmender Qualität und Zahl z.B. zur Faserkopplung in optischen Netzwerken verwendet (siehe **Bild 1**). Als Mikrolinsenarrays finden sie Einsatz in Strahlhomogenisierern für die UV-Lithographie oder auch in Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren. Qualitativ hochwertige Zylinderlinsen (sog. FAC Linsen) sind unabdingbar bei der Strahlformung von Hochleistungs-Laserbarren für die Materialbearbeitung. Auch aktive Bauelemente wie Laserdioden können als Teilkomponenten mikrooptischer Systeme ggf. in eine Prüfung mit einbezogen werden. Die Größenskala dieser Bauelemente beginnt bei einigen 10 µm. Begrifflich weiter gefasst zählen auch Bauteile mit Abmessungen von bis zu einigen Millimetern dazu, die z.B. in größeren Stückzahlen in Plastik spritzgegossen oder abgeformt werden. Hierzu gehören u.a. asphärische Linsen für Fotoapparate, Handyoptiken oder Fokussierlinsen für optische Datenspeicher.

2 Prüfverfahren für die Mikrooptik

Zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren für die Prüfung mikrooptischer Oberflächen gehören abtastende profilometrische Messmethoden. Mechanische, taktile Messgeräte erlauben so zwar die Vermessung nahezu beliebiger Oberflä-

chenformen, sind aber zu langsam für eine 100%-Prüfung und ermöglichen keinen Funktionstest.

Zu den optischen Prüfverfahren zählen die scannende Weißlichtinterferometrie sowie die optische Profilometrie. Sie zeichnen sich durch eine hohe räumliche Auflösung aus. Jedoch kann Licht, das an steilen Objektflächen reflektiert wird, wegen der begrenzten numerischen Apertur der Empfangsoptik häufig nicht mehr detektiert werden. Daher sind z.B. Mikrolinsen mit großer Oberflächenapertur nicht bis zum Rand messbar. Da die Prüflingsoberfläche auch hier abgerastert werden muss, sind diese Verfahren ebenfalls relativ langsam. Die Vermessung der Wellenfront einer Testwelle, die am kompletten Prüfling reflektiert oder durch ihn transmittiert wurde, erlaubt eine Form- bzw. eine Funktionsprüfung, ohne das Objekt abtastern zu müssen.

Im Vergleich zur Prüfung von Makrooptiken stellen sich bei der Mikrooptikprüfung wesentlich höhere Anforderungen: Durch den kleinen Linsenradius wächst der relative Beitrag des Linsenrandes zur gemessenen Fläche und führt zur Verstärkung von Beugungseffekten. Wegen der notwendigen vergrößernden Abbildung werden aufgrund der Wellenpropagation die Randeffekte objektseitig auf kürzeren Strecken wirksam. Die Messung der Flächenabweichungen oder der Wellenaberrationen erfordert deshalb eine größere Sorgfalt beim Abbilden des Objekts auf den Detektor.

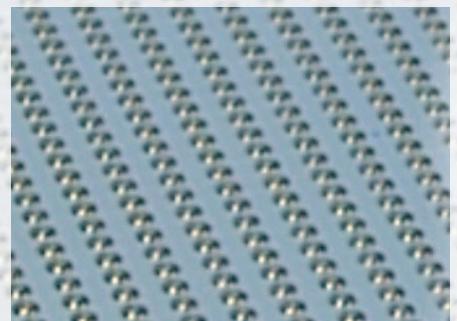


Bild 1: Array von Silizium-Mikrolinsen

3 Vergleich von Auflicht- und Durchlichtmessverfahren

Prinzipiell unterscheidet man zwischen Durchlicht-Funktionstests bei der Designwellenlänge und Formmessungen, bei denen die Messwellenlänge von der Designwellenlänge abweichen kann. Die Durchlichtmessung liefert dem Anwender u.a. relevante Daten zur gezielten Selektion einzelner Bauelemente. Ein hierfür geeignetes Messsystem ist z.B. ein Mach-Zehnder Interferometer. Mit Hilfe gespeicherter Messdaten lassen sich damit einzelne Mikrolinsen mit passenden Modulen kombinieren oder Mikrolinsen in bestimmte Klassen einteilen.

Die Kenntnis der Oberflächenform hingegen gibt entscheidende Hinweise zur Optimierung der Fertigungsprozesse. Dies ist insbesondere bei waferbasierter Herstellung von Bedeutung, wenn in einer sog. Wafermap die wesentlichen Geometrieparameter der Mikrolinsen vorliegen, wie z.B. mittlerer Krümmungsradius, Dicke und

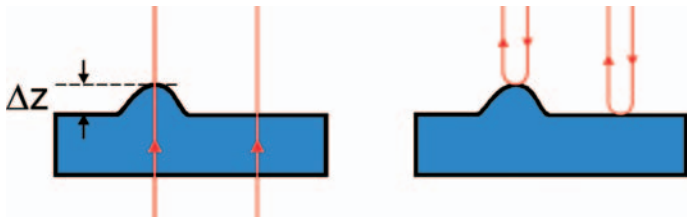


Bild 2: Optischer Weglängenunterschied an einer Oberflächen deformation bei Durchlicht- und Auflichtmessung

Oberflächenabweichungen. Die Wafermap gibt Auskunft über die räumliche Verteilung der Geometrieparameter auf einem Mikrolinsen-Wafer. Mit geeigneter Messwellenlänge lassen sich auch Lacklinsen prüfen, so dass z.B. das Auftreten räumlicher Inhomogenitäten der Krümmungsradius-Verteilung einzelnen Prozessschritten zugeordnet werden kann. Zur Vermessung einzelner Prüflinge ist ein Twyman-Green Interferometer für Mikrooptiken ein geeignetes Werkzeug.

Ob die Messung im Auflicht oder im Durchlicht für Oberflächenfehler empfindlicher ist, hängt von der verwendeten Messwellenlänge λ und der Brechzahl n des Prüflings ab. **Bild 2** verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Bei einer Durchlichtmessung führt eine ungewünschte Deformation der Prüflingsoberfläche um Δz bei einem Strahl, der diesen Defektbereich durchtritt, in grober Näherung zu einem optischen Weglängenunterschied von $(n-1)\Delta z$ gegenüber einem unbeeinflussten Strahl. Bei einer Auflichtmessung ist der optische Weglängenunterschied unabhängig von der Brechzahl und beträgt $2\Delta z$. Dies bedeutet, dass Auflichtmessungen erst ab einer Brechzahl von $n > 3$ (z.B. bei Silizium) weniger sensitiv für Oberflächenabweichungen wären, als Durchlichtmessungen (z.B. bei Nutzwellenlängen von 1300 nm oder 1550 nm). Allerdings gilt dies nur, wenn beide Messungen mit Licht der gleichen Wellenlänge durchgeführt werden. Da sich der optische Weglängenunterschied (OPD) über

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} OPD \quad (Gl.1)$$

in den (interferometrisch gemessenen) Phasenunterschied Φ überträgt, lässt sich bei Auflichtmessungen eine höhere Sensitivität erreichen, wenn die Messung bei einer Wellenlänge erfolgt, die kürzer ist als die Designwellenlänge des Prüflings.

4 Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren

Obwohl die Interferometrie durch die berührungslose Erfassung von Wellenfrontfehlern im Sub-Lambda-Bereich das vorrangige

Prüfverfahren für Mikrooptiken darstellt, zeigt sie beim industriellen Einsatz den signifikanten Nachteil der Vibrationsempfindlichkeit. Dieses generelle Stabilitätsproblem lässt sich durch die Verwendung von Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren vermeiden, die Wellenfronten aus ihrem Gradientenfeld mittels geeigneter Integrationsverfahren rekonstruieren. Die Gradientenfelder werden mit Hilfe eines Mikrolinsenfeldes und eines Arraydetektors (z.B. CCD-Kamera) gemessen (siehe **Bild 3**).

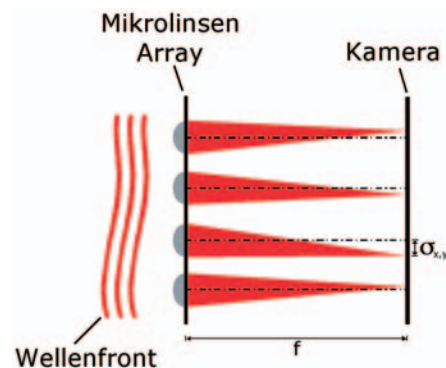


Bild 3: Funktionsprinzip des Shack-Hartmann-Sensors

Das Mikrolinsenfeld tastet die Wellenfront ab und erzeugt in einer parallelen Ebene ein Feld von Fokusflecken, deren geometrischen Lagen in der Detektorebene über eine Schwerpunktsberechnung erfasst werden. Die Komponenten des Gradientenvektors α_x, α_y folgen aus den Verschiebungen σ_x, σ_y und der Brennweite f der Mikrolinsen nach der Formel

$$\alpha_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + f^2}}; \quad \alpha_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + f^2}} \quad (Gl.2)$$

Die Wellenfront wird durch Anpassen eines geeigneten Polynoms an die Werte dieses Gradientenfeldes rekonstruiert. Im Unterschied zum Interferometer ist hierfür kein Phasenschieben notwendig. Die benötigte Information ist bereits in einem einzigen Kamerabild enthalten, was die Messung schneller und stabiler macht.

Durch spezielle Algorithmen lässt sich ein extremer Messbereich bzgl. der Wellenfrontkrümmung erreichen. Der messbare minimale lokale Krümmungsradius kann damit auf etwa die doppelte Brennweite der Mikrolinsen reduziert werden. Durch diese enorme Wellenfrontdynamik können z.B. asphärische Oberflächen ohne exakte Nulllinse geprüft werden, was bei einer

interferometrischen Messung aufgrund der zu hohen Streifendichte nur mit deutlich größeren Einschränkungen möglich wäre. Gegenüber dem Interferometer besitzt der Shack-Hartmann-Sensor eine geringere laterale Auflösung, die jedoch bei vielen Anwendungen in Kauf genommen werden kann und gleichzeitig die Auswertung wesentlich beschleunigt.

Aufgrund dieser Überlegungen eignet sich der Shack-Hartmann-Sensor besonders für den Aufbau schneller, automatisierter Messsysteme für die Produktion.

5 Automatisierte Vermessung von Plankonvex-Mikrolinsen

Im Folgenden wird exemplarisch ein Aufbau zur Vermessung waferbasierter, plankonvexer Silizium-Mikrolinsen vorgestellt. Das System erfasst durch eine Auflichtmessung den mittleren Krümmungsradius R , die Scheiteldicke d und die Maßhaltigkeit der Oberflächenform. **Bild 4** zeigt den schematischen Aufbau.

Je ein optisches System tastet die Oberfläche mit Hilfe eines hochaperturigen Mikroskopobjektivs ($NA = 0,75$) von der Ober- und Unterseite her an. Je eine Beleuchtungs- und Abbildungsoptik bereitet das von einer Laserdiodenquelle ($\lambda = 635 \text{ nm}$) stammende Licht auf und bildet den Prüfling auf den Shack-Hartmann-Sensor ab. Zur Vermessung werden die in **Bild 4** gezeigten

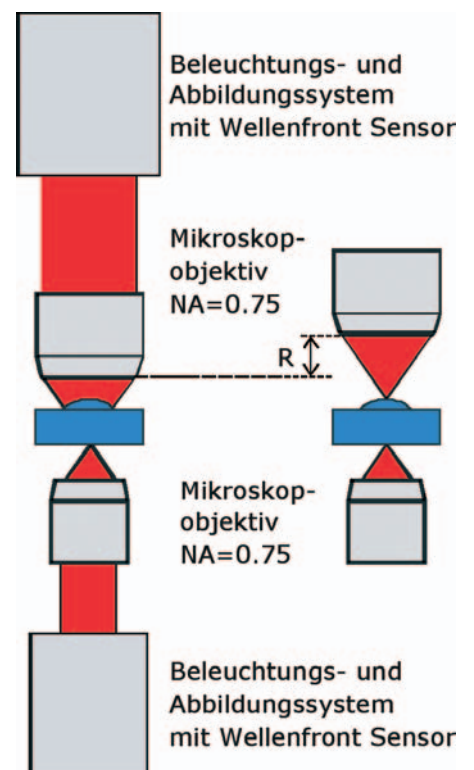


Bild 4: Schematischer Aufbau des Messsystems und Messpositionen

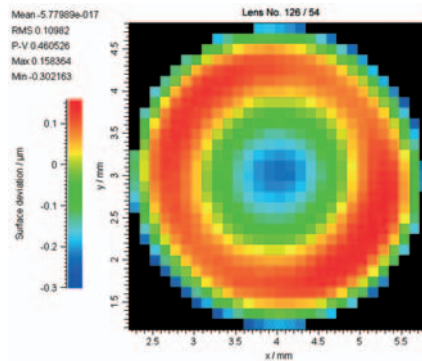
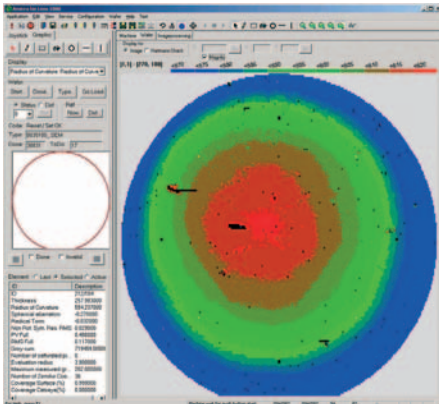


Bild 5: Krümmungsradius-Verteilung von 38000 Mikrolinsen auf einem Wafer und (rechts) Abweichung einer Einzellinse von der sphärischen Form

Messpositionen eingenommen.

Die Dickenmessung erfolgt dadurch, dass durch axiales Verschieben der optischen Systeme die beiden Foki auf den Linsenscheitel bzw. die Waferunterseite gelegt werden (rechtes Teilbild). In dieser sog. "Cat's-eye-Position" wirkt die Kombination aus Linsenoberfläche und Mikroskopobjektiv wie ein Retroreflektor. Der vom Shack-Hartmann-Sensor ermittelte Krümmungsradius der Wellenfront erlaubt die Berechnung des Stellweges bis zum Erreichen der Cat's-eye-Position. Selbstverständlich kann diese Messung nicht nur am Scheitel der Mikrolinse, sondern auch zwischen zwei Mikrolinsen durchgeführt werden, so dass sich die Linsenhöhe oder die Waferdicke bestimmen lässt.

Zur Bestimmung des mittleren Krümmungsradius der Mikrolinse – entsprechend dem Krümmungsradius der am besten an die Mikrolinse angepassten Sphäre – wird der Verschiebeweg zwischen der Cat's-eye-Position am Scheitel und einer Position bestimmt, an der der Fokus des Mikroskopobjektivs mit dem Krümmungsmittelpunkt der Mikrolinse zusammenfällt.

An dieser Position treffen bei einer sphärischen Linsenoberfläche alle einfallenden Strahlen senkrecht auf die Linse (links in Bild 4). Die von der Prüfoptik erzeugte Welle ist an die Oberflächenform angepasst

und nach nochmaligem Durchgang durch das Mikroskopobjektiv detektiert der Wellenfrontsensor eine Planwelle. Abweichungen von der Sollform treten dann als Aberrationen der Planwelle auf. Obwohl aus der Optikprüfung bekannt ist, dass diese Nulltest-Konstellation eingehalten werden sollte, um auch kleine Abweichungen messen zu können, kann man auch gezielt sogenannte Nicht-Nulltests durchführen. Durch die hohe Wellenfrontdynamik des verwendeten Shack-Hartmann-Sensors ist dies auch bei der Prüfung von Mikroasphären in gewissen Grenzen möglich, ohne dass ein auf die Asphäre abgestimmtes diffraktives strahlformendes Element gefertigt werden muss.

Im diskutierten Anwendungsbeispiel ergibt sich eine Zykluszeit von unter 3 Sekunden pro Mikrolinse, wodurch die 100% Prüfung von kompletten Wafern mit mehreren zehntausend Linsen sinnvoll möglich wird.

Bild 5 zeigt die gemessene Verteilung der Krümmungsradien von 38000 Mikrolinsen auf einem Wafer und die typische Abweichung einer einzelnen Mikrolinse von der sphärischen Form.

6 Fazit

Automatisierte optische Messsysteme auf Basis von Shack-Hartmann-Wellenfront-

sensoren sind für die schnelle und umfassende Kontrolle von Optiken bestens geeignet. Interferometer besitzen zwar eine höhere laterale Auflösung, sind jedoch durch ihre hohe Vibrationsempfindlichkeit und die niedrigere Messgeschwindigkeit nur bedingt zur Automation geeignet.

Neben dem Test waferbasierter Mikrooptik – wie in der beispielhaft gezeigten Auflichtprüfung – ist auch die automatisierte Prüfung von Einzelelementen und die Integration in automatisierte Justage- und Montagesysteme möglich. Die Durchlichtmessung erlaubt u.a. die Bestimmung von Wellenfront, MTF, PSF, Brennweite und Schnittweite. So können auch Zylinderlinsen automatisiert geprüft oder vor einer Laserquelle aktiv justiert und montiert werden.

Literaturhinweise:

- [1] J. Schwider, et al., „Optikprüfung von refraktiven Mikrolinsen“, *Technisches Messen* 69 (11), 467-482 (2002)
- [2] J. Pfund, M. Beyerlein, „Shack-Hartmann-Sensoren für Qualitätskontrolle in klassischer und Laser-Optik“, *Photonik* 4 (2002) 60-62
- [3] J. Pfund, M. Beyerlein, J. Schwider, „Der Shack-Hartmann-Sensor“, *Laser+Photonik* 2 (2003) 58-61
- [4] J. Pfund, N. Lindlein, and J. Schwider, „Nonnull testing of rotationally symmetric aspheres: a systematic error assessment“, *Applied Optics* 40 (4), 439-446 (2001)

Ansprechpartner:

Dr. Mathias Beyerlein
 Dr. Johannes Pfund
 Dr. Ralf Dorn
 Optocraft GmbH
 Am Weichselgarten 7
 D-91058 Erlangen
 Tel. 09131/6915-10
 Fax 09131/6915-11
 eMail: m.beyerlein@optocraft.de
 Internet: www.optocraft.de



Mathias Beyerlein