

Halbleitertechnik für bessere Mobiltelefon-Kameras

Die derzeitige Fertigung von Kameras für Mobiltelefone ist noch immer von aufwendigen manuellen und halbautomatischen Arbeitsschritten geprägt. Um die Herstellungs- und Montagekosten zu reduzieren und die Qualität der Kameras zu verbessern, gilt das Konzept der **WAFER-LEVEL-KAMERA** als sehr erfolgversprechend.

Bild 1. Fotografie mit Hindernissen: Handy-Kamera mit 3 Megapixeln



REINHARD VÖLKEL

Digitale Kameras in Mobiltelefonen gibt es seit viel kürzerer Zeit, als allgemein zu vermuten wäre. Das allererste Mobiltelefon mit Kamera, das Toshiba ›Camesse‹, kam vor nicht einmal zehn Jahren in Japan auf den Markt. Erst drei Jahre später, ab dem Jahr 2002, wurden auch in Deutschland Kamera-Mobiltelefone in größerem Umfang eingeführt. Unter dem Motto ›Wer will schon mit dem Telefon fotografieren?‹ zunächst als Marketing-Gag mit zweifelhaftem Nutzen belächelt, sind heute in über 80 Prozent aller Mobiltelefone Kameras integriert. In den meisten Telefonen sind sogar zwei Kameras zu finden: eine Videokamera mit niedriger Auflösung und eine weitere Kamera mit einer Auflösung von bis zu zehn Megapixeln für hochauflösende Fotos.

Hochauflösende Digitalkameras – vor einigen Jahren noch eine teure Anschaffung – werden damit zu billigen und jederzeit verfügbaren Wegwerfartikeln. Dies wirft für Technikinteressierte einige Fragen auf: Wie werden wir in fünf Jahren fotografieren? Wird es eine 50-Megapixel-Kamera in einer Stecknadel geben? Welche Auswirkungen hat diese nahezu beliebige Verfügbarkeit von intelligenten Kameramodulen für andere Anwendungen und Märkte?

Miniaturisierung einer digitalen Kamera

In der Elektronik ist kleiner immer besser. Die fortschreitende Miniaturisierung in der Halbleiterindustrie ermöglicht immer höhere Rechenleistungen und Datenraten, größere Datenspeicher und weniger Energieverbrauch. Das Moore'sche Gesetz von 1965 bleibt auch über das Jahr 2009 hinaus gültig. Nachdem CCD- und

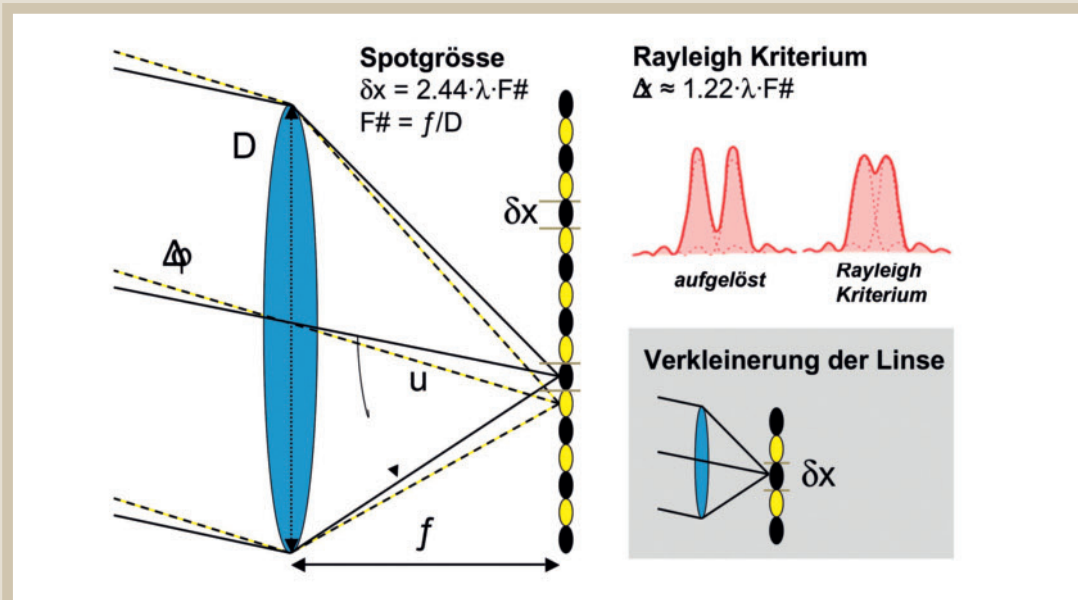


Bild 2. Miniaturisierung in der Optik: Die Größe eines beugungsbegrenzten Bildpunktes δx ist nur abhängig von der Wellenlänge λ und der Blendenzahl $F\#$

CMOS-Bildsensoren der Kameras mit denselben waferbasierten Fertigungstechnologien der Halbleiterindustrie hergestellt werden, ist die Entwicklung der Bildsensoren ähnlich stürmisch verlaufen wie die der Computertechnologie. Aus der Halbleiterindustrie kommt auch die Roadmap für zukünftige Generationen von CMOS-Bildsensoren. Um Kosten zu sparen, versuchen die Hersteller die Größe der Bildpixel weiter zu reduzieren. Nach den heute üblichen 2,2- μm - und 1,75- μm -Pixeln in Mobiltelefon-Kameras kommen 1,5 μm und 1,3 μm . Gemäß der Logik der Halbleiterindustrie bedeuten kleinere Pixel eine höhere Auflösung oder eine Verkleinerung der teuren Sensorfläche bei gleicher Auflösung. Je kleiner der Bildsensor, desto kleiner ist die Kamera und desto leichter ist die Integration in ein Mobiltelefon bei geringeren Kosten für das jeweilige Modul. Leider gibt es hier ein fundamentales Missverständnis. In der Optik ist kleiner nicht automatisch besser – im Gegenteil. Bei Objektiven bedeutet eine Miniaturisierung praktisch immer eine Verschlechterung der Bildqualität.

Negative Auswirkungen der Miniaturisierung

Der Grund dafür ist die Beugung des einfallenden Lichts an der Blende des Kameraobjektivs. Der kleinste Lichtpunkt, den ein Objektiv in der Bildebene erzeugen kann, wird nur durch die Wellenlänge und die Blendenzahl des Objektivs bestimmt. Verkleinert man eine Kamera, so ändert sich bei gleicher Wellenlänge und Blendenzahl nichts an der Größe des kleinsten Bildpunktes. In **Bild 2** wird dieser Zusammenhang an einem einfachen Beispiel erläutert.

Der Durchmesser eines beugungsbegrenzten Bildpunktes δx einer Linse mit Durchmesser D und Brennweite f ergibt sich aus $\delta x = 2,44 \cdot \lambda \cdot F\#$, wobei λ die Wellenlänge und $F\#$ die Blendenzahl mit $F\# = f/D$ ist. Zwei benachbarte Bildpunkte werden mit gutem Kontrast aufgelöst, wenn sie in der Bildebene mindestens den Abstand $\Delta x \geq \Delta x/2$ voneinander entfernt sind (Rayleigh-Kriterium). Verkleinert man ein Objektiv, so verringert sich analog auch die Größe des Bildfeldes, wogegen bei gleichbleibender Blendenzahl die

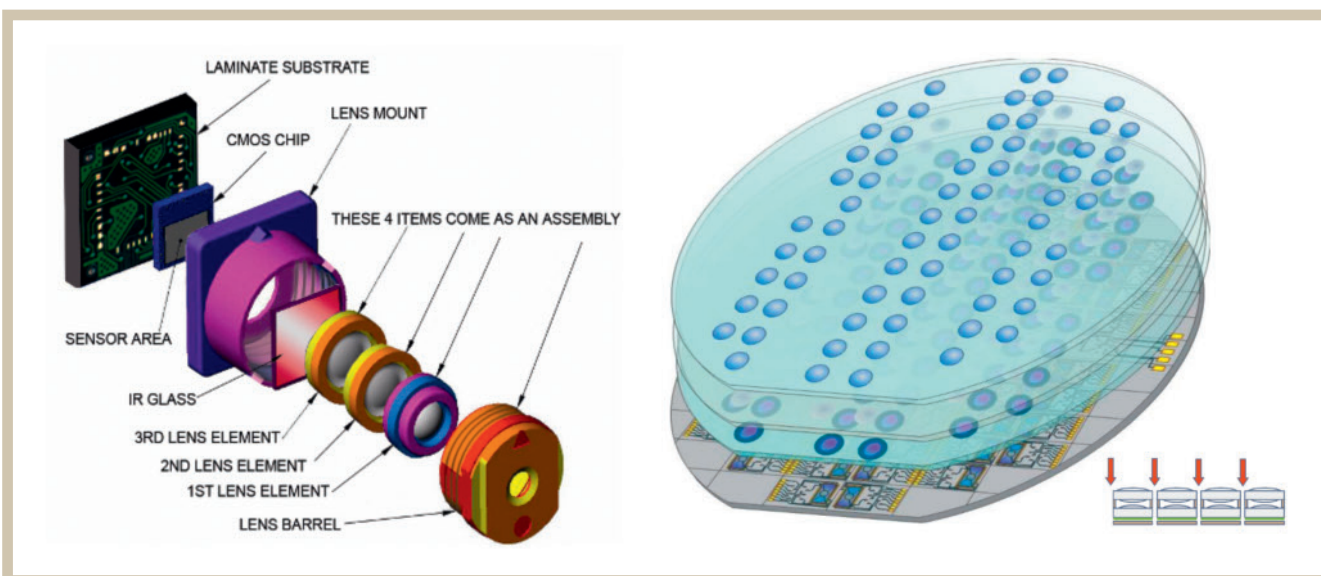
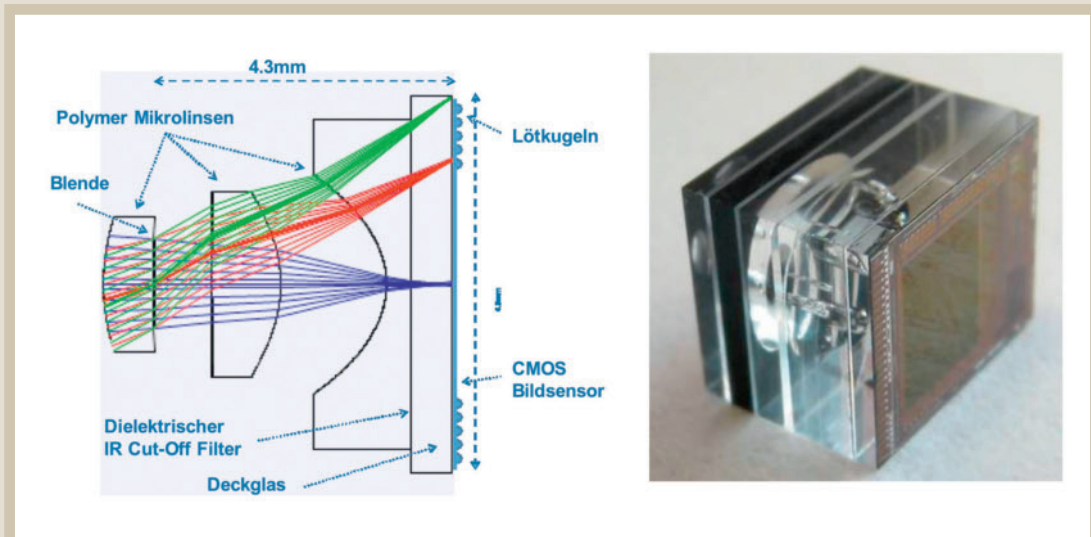


Bild 3. Links: Aufbau einer Mobiltelefon-Kamera und Wafer-Level-Kamera; rechts: Bei der Wafer-Level-Kamera werden die auf Waferbasis hergestellten Linsenwafer mit Sub- μm -Präzision montiert und vereinzelt

Bild 4. Schema und Bild einer Wafer-Level-Kamera, die im Rahmen des EU-IST-Projekts »Walori« (2002 bis 2005) realisiert wurde



Größe des beugungsbegrenzten Bildpunktes δx gleich bleibt. Eine Verkleinerung bedeutet demnach, dass die Anzahl der darstellbaren Bildpunkte mit der Größe des Bildfeldes abnimmt. Fazit: Es kann keine stecknadelgroße 50-Megapixel-Kamera geben.

Worin besteht bei einer Miniaturisierung jetzt der fundamentale Unterschied zur Elektronik? In der Elektronik verringert man die Strukturgrößen und die Anzahl der Elektronen pro Bit. Der Optiker kann Objektive verkleinern, nicht aber die Wellenlänge des Lichtes. Nachdem der kleinste Bildpunkt nur von der Wellenlänge und der Blendenzahl abhängt, führt eine Verkleinerung eines Objektivs nicht zu einer Verkleinerung des einzelnen Bildpunktes. Die Größe der »optischen Bits« bleibt bei einer Verkleinerung der Kamera gleich. Deshalb führt eine Verkleinerung des Bildsensors bei gleicher Blendenzahl automatisch zu einer massiven Reduktion der Bildinformation. Natürlich ließe sich die Blendenzahl und somit die Größe des beugungsbegrenzten Bildpunktes verkleinern. Das ist in der Praxis aber wenig sinnvoll, da die Aberrationen respektive Bildfehler eines Objektivs bei kleinen Blendenzahlen stark ansteigen und die Konstruktion von hochgeöffneten Objektiven sehr teuer und aufwendig machen.

Beispiel einer typischen Kamera eines Mobiltelefons

Eine typische Mobiltelefon-Kamera mit 3,2 Megapixeln hat eine Blendenzahl von $F\# = 2,8$ mm und eine Brennweite von $f = 5,6$ mm. Beugungsbegrenzt ergibt sich ein Bildpunkt von $\delta x \approx 3,4 \mu\text{m}$. Typischerweise wird ein 1/4-Zoll-Bildsensor mit einem Bildfeld von $3,6 \text{ mm} \times 2,7 \text{ mm}$ und 2048×1536 Pixeln mit jeweils $1,75 \mu\text{m} \times 1,75 \mu\text{m}$ Pixelgröße verwendet. Gemäß dem Rayleigh-Kriterium würde die optische Auflösung bei einem beugungsbegrenzten Objektiv gut mit der Pixelgröße des Sensors übereinstimmen, sofern das Objektiv beugungsbegrenzt ist. In der Realität sind die in Mobiltelefon-Kameras verwendeten Objektive leider deutlich schlechter. Selbst auf der optischen Achse sind die Bildpunkte in der Regel 2- bis 3-mal größer als die Beugungsgrenze. Im Randbereich

> KONTAKT

HERSTELLER
SUSS MicroOptics SA
 CH-2000 Neuchâtel
 Tel. +41 32 7205103
 Fax +41 32 7205713
www.suss.ch

SUSS MicroTec AG
 85748 Garching
 Tel. +49 89 320070
 Fax +49 89 32007162
www.suss.com

des Bildfeldes fällt die Auflösung meist stark ab.

Was bedeutet dies in der Praxis? Bereits mit heutigen CMOS-Bildsensoren wird in einer Kamera eines Mobiltelefons ein einzelner Bildpunkt von bis zu 20 Sensor-Pixeln abgetastet. Die Kamera detektiert und speichert zwar 3,2 Millionen Pixel, die wirkliche Auflösung ist aber meist sehr viel schlechter. Eine 5-Megapixel-Mobiltelefon-Kamera erreicht selten die Bildqualität einer alten 2-Megapixel-Digicam mit 8 bis $10 \mu\text{m}$ großen Pixeln. Speziell bei schlechten Lichtverhältnissen (bei Nacht oder direkter Sonneneinstrahlung) fällt die Bildqualität der Mobiltelefon-Kameras oft dramatisch ab. Eine weitere Verkleinerung der Sensor-Pixel macht aus Sicht der Optik wenig Sinn – im Gegenteil. Betrachten wir nun die Bauhöhe des beschriebenen 3,2-Megapixel-Kameramoduls. Die Bauhöhe ergibt sich aus der Brennweite, dem Abstand von der ersten Linse zur Blende und der Dicke des Bildsensors und liegt bei unserem Beispiel bei 8 bis 10 mm. Es ist leicht vorstellbar, welche Bildqualität von einem Kameramodul mit 2 bis 3 mm Bauhöhe noch zu erwarten ist.

Gibt es einen Ausweg? Bildsensoren sind in der Regel durch das Photonenrauschen limitiert. Je kleiner die Pixel des Bildsensors werden, desto weniger Photonen werden absorbiert und desto schlechter ist das Signal-Rausch-Verhältnis. Bildsensorhersteller versuchen jetzt durch im Chip integrierte Elektronik und



Bild 5. Mask Aligner »MA/BA8 Gen3« von Suss MicroTec mit speziell für Mikrolinsen-Imprint-Lithografie (»Smile«) und das Packaging von Wafer-Level-Kameras entwickelten Modulen

Bildbearbeitung die Signale zu verbessern. Ein sehr interessanter Ansatz ist die vertikale Integration der Farbdetektion. Normalerweise werden pixelierte Farbfilter verwendet. Um ein RGB-Pixel zu detektieren, bilden dabei drei oder vier Pixel jeweils eine Einheit. Bei der vertikalen Integration werden diese Pixel gestapelt. Semitransparente Filter und Sensoren erlauben eine Farbdetektion in der Tiefe. Sicherlich hält die Elektronik noch weitere Ideen und Kunstgriffe parat, mit denen Kameras für Mobiltelefone kleiner und billiger werden können. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass entgegen den Wünschen der Mobiltelefonhersteller und den Roadmaps der CMOS-Bildsensorhersteller Kameras für Mobiltelefone nicht wesentlich weiter verkleinert werden können, ohne dass die Bildqualität leidet. Entscheidend für die Bildqualität einer Kamera im Mobiltelefon ist neben der Qualität des Objektivs nur die Diagonale des Bildsensors. Je größer der Bildsensor, desto mehr optische Bildpunkte können detektiert werden. Ob diese Bildpunkte dann von einem oder 20 Sensor-Pixeln detektiert werden, macht wenig Unterschied.

Objektive für Mobiltelefon-Kameras

Die erste digitale VGA-Kamera für den Consumer-Markt, die Apple »QuickTake«, kostete 1994 etwa 800 US-Dollar. Heute kosten Kameramodule für Mobiltelefone meist weniger als 5 US-Dollar. Auf der Seite der Bildsensoren lässt sich dieser niedrige Preis mit den immensen Fortschritten der Halbleiterindustrie erklären. DRAM-Halbleiterfabriken der vorletzten Generation können für die kostengünstige Herstellung von CMOS-Sensoren weiterverwendet werden. Weltweit wurde im Jahr 2008 mit Bildsensoren ein Umsatz von über 7 Milliarden US-Dollar erzielt. Auf der Seite der Objektive und beim Zusammenbau der Kameras ist die Kostenreduktion schwieriger nachzuvollziehen. Der Preis hochwertiger Fotoobjektive hat sich in den letzten 25 Jahren nicht wesentlich verändert. Wie war es nun möglich, innerhalb von wenigen Jahren eine Optikfertigung aufzubauen, die Milliarden

von Kameraobjektiven für 1 bis 2 US-Dollar pro System herstellen kann?

Eine Mobiltelefon-Kamera besteht aus 10 bis 20 verschiedenen Komponenten, beispielsweise Kunststoff- oder Glaslinsen, Blenden, Filtern, Aktuatoren, Haltern, Tubus und dem Bildsensor (**Bild 3**). Diese Komponenten werden einzeln gefertigt und dann zusammengesetzt. Die Herstellung der Linsen erfolgt meist durch Spritzguss von Polymeren oder durch Heißprägen von niedrigschmelzenden Gläsern. Die gefassten Linsen werden in einen Tubus (Barrel) gesetzt, das Objektiv wird geprüft und dann in einem Halter (Mount) auf den Bildsensor ausgerichtet. Bedingt durch die bei Spritzguss und bei Montage im Tubus erreichbare Genauigkeit bleibt die Qualität der Objektive beschränkt. Die arbeitsintensive Montage bleibt ein wesentlicher Kostenfaktor, deshalb befindet sich die auf Mobiltelefon-Kameras spezialisierte Industrie praktisch ausschließlich in Asien.

Seit einigen Jahren wird versucht, auch die Optik in Wafertechnologie herzustellen. Mittels Mikrolinsen-



Bild 6. Linsen-Master-Array (8 Zoll) aus Messing von Kaleido Technology und mittels Mikrolinsen-Imprint-Lithografie (»Smile«) repliziertes Mikrolinsen-Array

Imprint-Lithografie werden Polymerlinsen auf Glaswafern doppelseitig geprägt. Diese Linsenwafer werden dann mit Sub- μm -Präzision in einem Mask Aligner montiert und die fertigen Kameramodule anschließend vereinzelt.

Das Prinzip der Wafer-Level-Kamera

Von 2002 bis 2005 wurden im Rahmen des EU-IST-Forschungsprojekts ›Walori‹ vom Fraunhofer IOF aus Jena, Fresnel Optics aus Apolda, Suss MicroOptics und IMT aus Neuchâtel/Schweiz sowie von CEA LETI und ATMEL aus Grenoble/Frankreich erste Wafer-Level-Kameras aufgebaut. Europäische Unternehmen wie Heptagon aus Zürich und Anteryon aus dem niederländischen Eindhoven haben mittlerweile erfolgreich Produktionslinien für Wafer-Level-Kameras aufgebaut (**Bild 4**).

Das Konzept der Wafer-Level-Kamera wird als sehr erfolgversprechend angesehen, um Herstellungs- und Montagekosten zu reduzieren und die Qualität der Kameras zu verbessern. Bewährte Wafertechnologie aus der Halbleiterfertigung soll die arbeitsintensiven manuellen und halbautomatischen Schritte bei der derzeitigen Kamerafertigung ersetzen. Die Einfachheit dieses Ansatzes der Wafer-Level-Kamera führt leicht zu der Annahme, dass mit bestehenden CMOS-Technologien auch Optikwafer hergestellt und montiert werden könnten. Dies ist leider so nicht der Fall. Für die Herstellung der Linsenwafer und das Packaging mussten neue Konzepte und Technologien entwickelt werden:

- Bestehende Halbleitertechnologie ist nicht geeignet, um auf einem dünnen 8-Zoll-Glaswafer asphärische Mikrolinsen mit einigen Hundert Mikrometern Scheitelhöhe zu fertigen.
- Die in der Halbleiter- und Optikindustrie etablierten Polymermaterialien sind für die Mikrolinsen-Imprint-Lithografie und den bei der Montage auf der Platine benötigten Reflowprozess (260 °C) nicht geeignet.
- Da auf den CMOS-Bildsensor einer Wafer-Level-Kamera ein Glaswafer geklebt wird, muss der Chip durch Kontaktlöcher (TSV-Technologie) von der Rückseite kontaktiert werden. Eine andere Methode ist die Rückseitenbeleuchtung (BSI-Technologie).

Mikrolinsen-Imprint-Lithografie (›Smile‹)

Trotz vielfacher Probleme werden erste CIF- und VGA-Wafer-Level-Kameras in Serie produziert und als Video-Objektive in Mobiltelefone eingebaut. Führende Mobiltelefonhersteller haben sich klar zu dem Konzept der Wafer-Level-Kameras bekannt und sie in ihre Roadmaps aufgenommen. Dieser mögliche Technologiewechsel bei der Optikfertigung hat natürlich bei den derzeitigen Kamera- und Optikherstellern einige Unruhe ausgelöst.

Eine der Schlüsseltechnologien für die Wafer-Level-Kamera ist eine geeignete Lithografie-Methode,

um auf 8-Zoll-Glaswafern kosteneffizient asphärische Linsen mit hoher lateraler Präzision und Profiltreue herstellen zu können. Die derzeit favorisierte Technologie ist eine UV-Replikation, beispielsweise die Mikrolinsen-Imprint-Lithografie (›Smile‹) von Suss, bei der ein flüssiges Polymer mit einem transparenten PDMS-Stempel in einem Mask Aligner auf dem Glaswafer aufgebracht und durch UV-Belichtung fixiert wird. Suss MicroTec hat dazu kürzlich den Mask Aligner ›MA/BA8 Gen3‹ vorgestellt (**Bild 5**). Dieser Mask Aligner, der speziell für Mikrolinsen-Imprint-Lithografie und das Packaging von Wafer-Level-Kameras entwickelt wurde, erlaubt ein beidseitiges Imprinten von Mikrolinsen-Arrays und die Justage von Linsenwafern mit einer Präzision von bis zu $\pm 0,25 \mu\text{m}$. Schlüsselemente für die Imprint-Lithografie sind geeignete Master-Arrays zur Replikation, wobei zwei unterschiedliche Ansätze existieren. Aus kleineren Arrays kann mittels Step-and-Repeat-Lithografie, zum Beispiel mit einem ›NPS 300‹-System von SET, ein 8-Zoll-Master-Array hergestellt werden. Von diesen Master-Arrays werden Stempel in PDMS hergestellt und für die Imprint-Lithografie verwendet. Mittels Diamantdrehen oder 8-Zoll-Mikrooptik-Fertigung können auch vollflächige Master-Arrays hergestellt werden. Suss MicroOptics und Kaleido Technology bieten ein breites Spektrum von Master-Arrays für Mikrolinsen-Imprint-Lithografie an (**Bild 6**). Kaleido Technology fertigt Master-Arrays mittels Diamantdrehen und Mikrofräsen mit einer maximalen Scheitelhöhe von 300 μm und einer lateralen Präzision von 1 bis 2 μm über den Wafer. Suss MicroOptics fertigt hochpräzise Linsen-Master mittels Fotolithografie, Schmelztechnologie und Reaktivem Ionenätzen (RIE) mit einer maximalen Scheitelhöhe von 100 μm . Für Kundendemonstrationen und Prototyping steht am IMT Neuchâtel ein Kompetenzzentrum mit einer Suss MicroTec ›MA/BA8 Gen3‹ für PDMS-Stempelherstellung, Imprint-Lithografie und Wafer-Level-Packaging zur Verfügung.

Ausblick

Neben dem kostensensitiven Markt für Consumer-Kameras bietet die waferbasierte Optikherstellung noch eine Vielfalt von anderen interessanten Anwendungen, zum Beispiel in der Sensorik und der Medizintechnik. Solche Ansätze werden derzeit im Rahmen des BMBF-VDI-Verbundprojekts ›Comika‹ (FKZ 13N9410-7) untersucht. Zu dessen Partnern gehört das Fraunhofer IOF aus Jena, der Sensorhersteller Sick aus Waldkirch, das Berliner Unternehmen MSG Lithoglas, Fresnel Optics aus Apolda, Continental Automotive aus Hannover, Aspect Systems aus Dresden, Schott aus Mainz und Suss MicroTec Lithography aus Garching bei München. ■ MI110018

AUTOR

Dr. REINHARD VÖLKELE ist Geschäftsführer bei Suss MicroOptics in Neuchâtel/Schweiz; voelkel@suss.ch