

Erzeugung komplexer Mikrooptiken durch Lithographie und UV-Abformung



Peter Dannberg



Uwe Detlef Zeitner



Peter Schreiber



Sylke Kleinle



Wieland Stöckl

Einleitung

In vielen Anwendungsbereichen wächst der Einsatz mikro-optischer Elemente, aktuell z. B. bei LED-Beleuchtung und Strahlformung, Displays oder Datenspeicherung. Vermehrt ergibt sich dabei die Forderung nach Integration mehrerer Elemente zu Subsystemen, d. h. neben der lateralen Anordnung in Arrays zusätzlich eine axiale Stapelung. Ein bereits vielfach angewendetes derartiges Subsystem sind CCD- oder CMOS-Kamerachips integriert mit Farbfilterstrukturen und mit Mikrolinsenarrays zur Verbesserung des Füllfaktors. Der hohe Herstellungs- und Justageaufwand solcher Module lässt sich dabei durch die Fertigung im Wafermaßstab in Grenzen halten. Die Kombination mikro-optischer Technologien zur Verschmelzung mehrerer optischer Funktionen in einem Element mit entsprechend komplexer Oberfläche wurde bereits gezeigt /1/; oftmals sind in der Optik aber Systeme gefordert, bei denen zwischen zwei optischen Funktionsflächen eine Ausbreitungslänge L liegt (Abb. 1), so für mikrooptische Kondensoren oder Teleskope. Im vorliegenden Beitrag sollen Voraussetzungen für eine derartige Systemintegration erläutert und der erreichte technologische Stand unter Verweis auf bereits realisierte Anwendungsbeispiele vorgestellt werden.

Technologiekonzept für gestapelte mikro-optische Module

Kern der hier vorgestellten Integrations-technik ist die schon seit einigen Jahren am IOF betriebene UV-Abformung /2/. Ihr Potenzial liegt einerseits in den moderaten Kosten, andererseits in der hohen Präzision der erzeugten Oberflächen, der hohen Stabilität der verwendeten UV-härtbaren organisch-anorganischen Hybridpolymere /3/, der geringen Belastung für die Substrate und der Kompatibilität mit weiteren technologischen Schritten.

Entscheidend für das Übereinanderstapeln mehrerer Waferebenen sind die hohe laterale Präzision der UV-Abformung sowie die lithographische Herstellung der Masterstrukturen. Folgerichtig wird für die Abformung ein modifizierter Mask-Aligner (SUSS MA6) verwendet. Dessen Rückseitenmikroskopie erlauben eine laterale Justage von zwei Waferebenen (Abstand bis 6 mm) auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau. Die axiale Präzision wird durch spezielle Chucks und mechanische Versteifungen erreicht. Die Steuerung der z-Achsenbewegung erlaubt die Kontrolle der abgeformten Polymerschichtdicke und damit die korrekte Fokussierung der Module.

Eine große Vielfalt denkbarer Systeme auf dieser Plattform ergibt sich nun, wenn die verschiedenen abgeformten optischen Oberflächen mit bereits im Substrat vorhandenen Strukturen oder zusätzlichen großflächigen oder lithographisch strukturierten Beschichtungen kombiniert werden (Abb. 2).

Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding

Introduction

Recently, more and more micro-optical elements have come into operation especially in fields like LED illumination or beam forming, displays, and optical data storage. Furthermore, there is a trend to integrate several of these elements into modules which is equivalent to an axial stacking. Prominent examples of these modules are CCD or CMOS camera chips integrated with colour filters and lens arrays for fill-factor enhancement. The labour-intensive work involved in patterning and alignment can be reduced by parallel fabrication of a large number of systems on a wafer scale. The combination of micro-optics technologies for the generation of "merged" multi-purpose optical elements with correspondingly complex surfaces has been shown recently /1/. However, there is often a demand for systems where 2 optically functional surfaces are separated by a certain propagation distance L (Fig. 1), i. e. for micro-optical telescopes or condensors. In this paper we would like to discuss the requirements for such kinds of integration, present the state of the art at Fraunhofer IOF and present already realized application demonstrators.

Technical concept for stacked micro-optical modules

The basis of our integration approach is a process which has been studied at the IOF for several years; the UV replication of thin polymer films onto arbitrary substrates /2/. Its advantages are: moderate fabrication costs together with high precision of the replicated functional surfaces, high stability of the utilized organic-inorganic hybrid polymers /3/, operability at room temperature and under ambient pressure and its compatibility with

further process steps. A high level of lateral precision and the master generation by lithography are crucial for the stacking of several wafer levels so the UV-molding is carried out in a modified mask-aligner (SUSS MA6). The back side microscopes of the MA6 allow for the precise lateral alignment ($\pm 1 \mu\text{m}$) of two wafer planes with an axial distance of up to 6 mm. Special chucks and mechanical reinforcement assure high

axial accuracy. The replicated polymer thickness can be controlled by the z-axis of the machine, which in turn allows the focussing of the modules .

A large variety of modules can be generated by combining different functional optical surfaces as well as large-area or lithographically patterned coatings on the substrate (see Fig. 2).

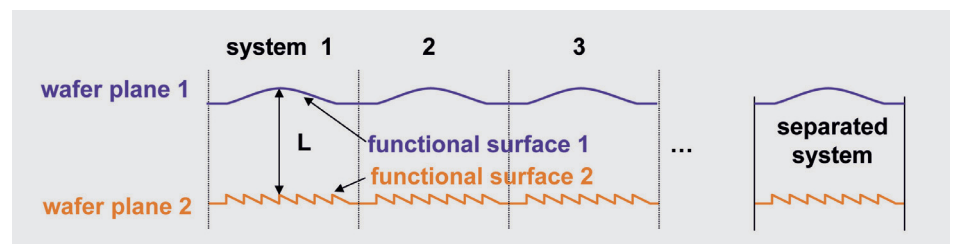


Abb. 1: Allgemeines Schema mikro-optischer Module im Waferverbund, jeweils bestehend aus zwei komplexen Funktionsflächen, getrennt durch eine Ausbreitungslänge L .

Fig. 1: General scheme of micro-optical modules on a wafer scale; each system consisting of two complex functional surfaces separated by a propagation length L .

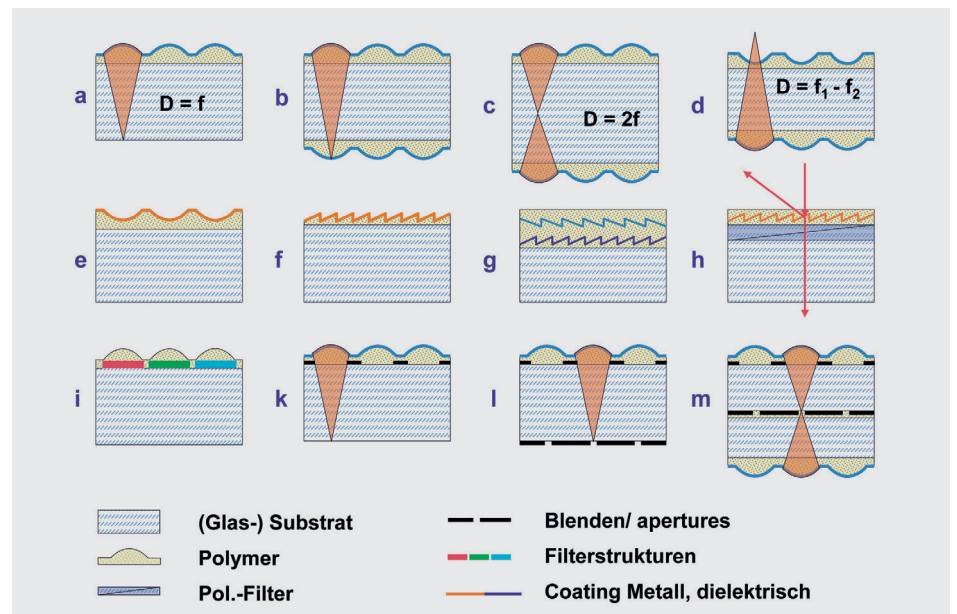


Abb. 2: Beispiele für realisierte mikro-optische Module (schematisch).

Fig. 2: Examples of realized micro-optical modules.

Abformung auf Optoelektronikwafer

Die direkte Erzeugung mikro-optischer Elemente z. B. auf CMOS-Wafern mit Topologie wurde realisiert (Abb. 3). Durch selektive Belichtung konnten polymerfreie Bereiche für elektrische Kontaktierung etc. erzeugt werden. Die Polymerhaftung auf üblichen Passivierungsschichten (SiO_2 , Si_3N_4) ist durch Silanisierung erreichbar.

Beidseitige UV-Abformung

Beidseitige UV-Abformung auf Glaswafer geschieht derzeit nacheinander; im 2. Schritt wird lateral justiert. Keilfehlerausgleich und z-Achse können so gesteuert werden, dass der vorgesehene Scheitelabstand der Elemente auf Vorder- und Rückseite auch bei schwankenden Substratdicken eingehalten wird. Zur Beurteilung der erreichbaren Präzision wurde an verschiedenen Positionen auf einem 4" Wafer mit Zylinderlinsenteleskopen (Abb. 2c) der Defokus durch eine Wellenfrontmessung bestimmt (Abb. 4).

In den hierbei gemessenen sehr geringen Fehlern von $\sim 0,1\lambda$ rms (entspricht einem Defokus von $20\ \mu\text{m}$) sind neben Durchbiegung und Dickenschwankungen außerdem die Radienschwankungen enthalten. Die realisierten Module (Abb. 2b–d, m) werden in LED-Beleuchtungssystemen /4/ bzw. zur Faserkopplung von Hochleistungs-Laserdiodenbarren /5/ eingesetzt.

Dielektrische Beschichtung

Abgeformte Polymeroberflächen können mit einer speziellen APS Bedampfungstechnologie und angepasstem Schichtdesign mit großflächigen dielektrischen Schichtsystemen versehen werden /6/. Für komplexe Module ist eine Entspiegelung der

Oberflächen oft unerlässlich. Daneben wurden auch aufwändige Filtersysteme erfolgreich realisiert. Es wurde gezeigt, dass Stapel aus Polymerabformungen und dielektrischen Beschichtungen im Wechsel aufgebaut werden können (Abb. 2g).

Metallbeschichtung

Zur Erzeugung reflektiver Systeme wurden gesputterte Metallschichten auf refraktive und diffraktive mikro-optische Elemente aufgebracht. Optimierte Gold-Reflektoren für Diodenlasermodule /5/ zeigten geringe Oberflächenrauheit, gute Stabilität und hohe Reflektivität (98 % bei $\lambda = 940\ \text{nm}$). Wenige 10 nm dünne Goldschichten wurden auf diffraktive Elemente gesputtert und mit Polymermaterial eingeebnet, um die diffraktive Wirkung (z. B. Strahlteiler) nur im reflektierten Anteil, nicht aber in Transmission zu erhalten (Abb. 2h). Darüber hinaus wurden Metallschichten (Cr, Ti) durch Lithographie und nasschemisches Ätzen strukturiert, um Reflektorstrukturen, Blenden oder Pinholes zu erzeugen.

Schwarze Blendenstrukturen

Das Einfügen absorbierender Schichten in komplexere Systeme zur Unterdrückung von Streulicht und Reflexen ist bei mikro-optischen Arrays oft entscheidend. Fotostrukturierbares Black Matrix Polymer (PSK 2000, Brewer Science) wurde zur Erzeugung von Blendenstrukturen, Pinholes, Beleuchtungsspalten usw. auf Glas und Siliziumwafern verwendet und anschließend mit UV-abgeformten refraktiven sowie diffraktiven Mikrolinsen überschichtet.

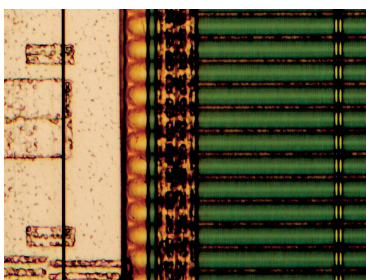


Abb. 3: Zylinderlinsenarrays zur Füllfaktor-erhöhung von CMOS-Sensoren (grün) mit polymerfreien Bond-Bereichen (links).

Fig. 3: Cylindrical lens arrays for fill factor improvement of CMOS sensors (green) and polymer-free areas for bonding (left hand).

Replication onto opto-electronic wafers

The direct replication of microlens arrays on top of e.g. CMOS detectors exhibiting a surface topology has been realized (Fig. 3). Polymer-clad areas were restricted to the detector regions by selective UV-curing and subsequent treatment with solvent. Adhesion to standard planarization layers (SiO_2 , Si_3N_4) was realized by silanization.

Double sided UV molding

Double sided UV molding onto glass wafers was realized in a two step process where the second replication is laterally and axially aligned to the first one. Wedge error compensation and z axis can be controlled in a way that the designed distance between front and reverse side elements can be realized even in the case of non-uniform substrate thickness. A 4" glass substrate with microlens telescopes was fabricated and the wavefront deviation (defocus) at different positions was measured in order to evaluate the axial alignment uniformity across the wafer (Fig. 4). Note that the very low wavefront errors of about 0.1λ rms (equivalent to a defocus of $\sim 20 \mu\text{m}$) also include the non-uniformity of the lens radii. The major applications of the microlens condensers and telescopes (Fig. 2b–d, m) are LED illumination /4/ and fiber coupling of high-power laser diode bars /5/.

Dielectric coating

Dielectric coating of replicated polymer surfaces was carried out using a special APS coating technology including a thin film design adapted to polymer substrates /6/. One application (which is crucial for complex systems) is the anti-reflective coating of every functional

surface. In addition, we realized more complex filter characteristics: it was shown that stacks of polymer structures and dielectric coatings (appearing alternately) are achievable (Fig. 2g).

Metal coatings

Metal coatings were realized by HF-sputtering onto diffractive and refractive polymer elements in order to generate reflective micro-optical systems. Optimized gold reflectors for use in laser diode modules /5/ showed low surface roughness, good stability and a high reflectivity of 98 % at a wavelength of 940 nm.

A few ten nanometer thick gold layers were sputtered onto diffractive elements and subsequently smoothed with polymer in order to achieve diffraction (i.e. beam splitting) in reflection but not in transmission (Fig. 2h). In addition, sputtered metal films (Cr, Ti) were patterned by lithography and wet etching in order to generate reflectors, apertures or pinholes.

Black aperture structures

The introduction of black, absorbing layers for stray light and flare reduction is often crucial for the performance of micro-optical arrays. Photo-patternable black matrix polymer (PSK2000, Brewer Science) was used for structuring apertures, pinholes, illumination slits etc. onto glass or silicon substrates and was subsequently covered by replicated polymer films with refractive as well as diffractive microlenses.

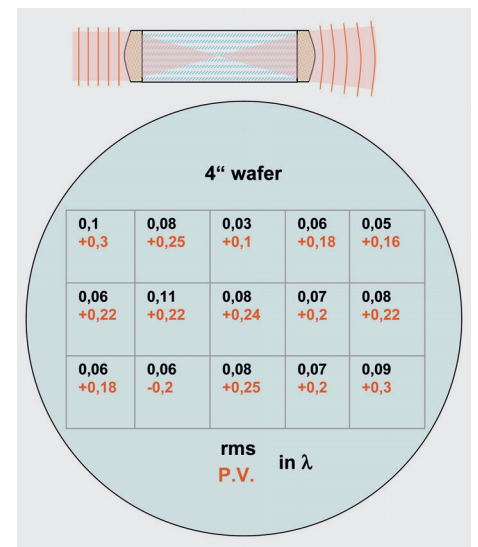


Abb. 4: Positionsabhängiger Wellenfrontfehler von Zylinderlinsenteleskopen auf 4" Wafer. Die geringen Defokus-Werte zeigen die gute axiale Justage im Wafer-Maßstab sowie eine geringe Brennweitenschwankung der lithographisch erzeugten Mikrolinsenmaster.

Fig. 4: Wavefront error (defocus) of cylindrical lens telescopes in dependence on the position on a 4" glass wafer. Low numbers indicate precise axial alignment on wafer scale as well as a low focal length variation of the lithographically fabricated master structures.

Strukturierte Farbfilter

Strukturierte Farbfilter spielen bei Kamera- und Sensoranwendungen eine Rolle. So gibt es verschiedene Konzepte, die am IOF entwickelten ultra-dünnen Kameraobjektive mittels Filterstrukturen farbtauglich zu machen. Entsprechende polymerbasierte Filtermaterialien (PSC/ Brewer Science) wurden nacheinander auf einem Glaswafer aufgebracht und fotostrukturiert (Abb. 5). Anschließend können durch Kombination mit Mikrolinsenarrays z. B. einzelne farbkodierte Kanäle erzeugt werden.

Polarisatoren

Linearpolarisatoren in einem interferometrischen Positionssensor wurden durch Abformung auf spezielle Glaswafer mit auflaminierten großflächigen Polarisationsfiltern (Codixx) integriert.

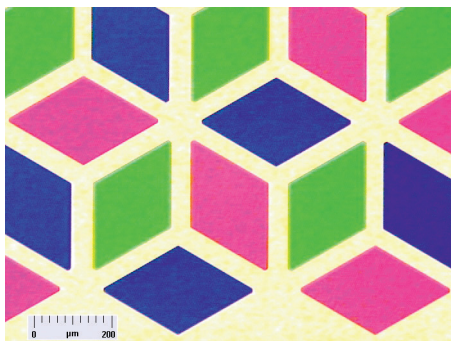


Abb. 5: Lithographisch strukturierte absorptive Farbfilterstrukturen auf Glaswafer.

Fig. 5: Photo-patterned absorptive RGB color filters on a glass wafer.

Stapeln von Wafern

Für das Erzeugen von mehr als zwei brechenden Polymer-Luft-Grenzflächen ist im Allgemeinen das Stapeln mehrerer Wafer erforderlich. In einer Anwendung zur LED-Linienfokusbeleuchtung wurden hierfür nach Strukturierung mit Blenden und Abformung von refraktiven Zylinderlinsenarrays zwei entsprechende Wafer im Maskaligner zueinander justiert und großflächig verklebt.

Da sich lithographische Strukturierung nur durch die parallele Erzeugung vieler Chips auf einem Wafer mit vertretbarem Aufwand realisieren lässt, werden besonders bei umfangreichen Prozessen die Verwendung immer größerer Waferdurchmesser sowie die Minimierung des Platzbedarfes auf dem Chip wesentlich. Optische Systeme lassen sich prinzipbedingt allerdings nur begrenzt verkleinern; sodass eine wirtschaftliche Herstellung bei großflächigen Modulen schwierig ist. In der derzeitigen Entwicklungsphase konnte gezeigt werden, dass sich einseitig und doppelseitig strukturierte Wafer sowie Waferstapel bis $d = 4,3$ mm mit Standard-Wafersägen in guter Qualität vereinzeln lassen. Module für einen Abstandssensor (wie Abb. 21) nach der Vereinzlung zeigt Abb. 6.

Zusammenfassung

Lithographische Strukturierung und UV-Abformung dünner Polymerfilme auf beliebige Substrate können als Plattform zur Integration mehrerer optischer Funktionen sowie der Erzeugung mikrooptischer Module im Wafermaßstab verwendet werden. In vorausgehenden Arbeiten wurden dazu Lithographie und Abformung qualifiziert (Präzision, Parameterbereich, Gleichmäßigkeit). Zusätzlich wurden lithographisch erzeugte Blenden- und Farbfilterstrukturen sowie großflächige Beschichtungen einbezogen. Darauf aufbauend konnten vielfältige Integrationsmöglichkeiten erarbeitet und anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert werden. Entscheidend für die Realisierbarkeit des Ablaufes (Abb. 7) war die Kompatibilität der UV-Abformung mit den Beschichtungs- und Lithographieprozessen sowie der Vereinzlung.

Literatur:

- /1/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", SPIE Proceedings 4440 (2001), pp. 44–50.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: "Polymer UV-molding for microoptical systems and opto-electronic integration", SPIE Proceedings 4179 (2000) 137–145.
- /3/ Houbertz, R.; Domann, G.; Cronauer, C.; Schmitt, A.; Martin, H.; Park, J.-U.; Fröhlich, L.; Buestrich, R.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.: "Inorganic-Organic Hybrid Materials for Application in Optical Devices", Thin Solid Films, 442, pp. 194–200, 2003.
- /4/ Schreiber, P.; Kudaev, S.: "Mikrooptik für LED-Lichtquellen", Photonik 3 (2005), 80–82.
- /5/ Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.: »Mikrooptik für Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern«, Photonik 35 (2003) 6 S. 50.
- /6/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: "Antireflective coating design for plastic optics", Appl. Opt. 42 (2003) 1346–1351.

Color filter structures

RGB filters are used in camera and sensor applications. There are also several concepts to introduce color vision to the ultra-flat image sensors currently investigated at IOF. Corresponding polymer based filter materials (PSC/ Brewer Science) were subsequently coated and patterned on glass or silicon wafers (Fig. 5). The combination with microlenses allows e.g. for the generation of color coded channels.

Polarizer

Linear polarizers in an interferometric position sensor were integrated by replication of the optical elements on top of special glass wafers with large-area laminated Codixx polarizers (Fig. 2h).

Wafer stacking

The Stacking of wafers is mandatory when more than two air-polymer interfaces are needed. In an application of such stacks for a LED line focus generator, apertures were first generated, cylindrical lens arrays then replicated and finally two 4" glass wafers were aligned to each other and mounted together in the MA6 mask aligner.

For complex systems in particular the costs of a large number of lithographic fabrication steps can be kept to a moderate level only by use of larger and larger wafers and by reduction of the chip area. But in the case of optical systems a size reduction is difficult as a matter of principle so the cost effective fabrication of large area modules becomes critical. In the current level of development it was shown that single and double side patterned wafers, as well as wafer stacks with a thickness of up to 4.3 mm, could be separated with

good quality using a standard dicing saw (Disco). Figure 6 shows modules for a distance sensor (corresponding to Fig. 2l) after dicing.

Summary

Lithographic patterning in combination with UV-molding of thin polymer films onto arbitrary substrates can act as a basis for the integration of several optical functions and the generation of micro-optical modules on a wafer scale. The assessment of lithography and replication (precision, uniformity, parameter range) for this purpose was done in previous projects. In addition to double sided replication we introduced lithographically generated aperture and color filter structures as well as large area coatings. On the basis of this technology a number of integration schemes have been carried out and several applications have been realized. The compatibility of the UV molding technology with the coating, lithographic processes and the dicing was crucial for the success of the approach (Fig 7).

References:

- /1/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", SPIE Proceedings 4440 (2001), pp. 44–50.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: "Polymer UV-molding for micro-optical systems and opto-electronic integration", SPIE Proceedings 4179 (2000) 137–145.
- /3/ Houbertz, R.; Domann, G.; Cronauer, C.; Schmitt, A.; Martin, H.; Park, J.-U.; Fröhlich, L.; Buestrich, R.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.: "Inorganic-Organic Hybrid Materials for Application in Optical Devices", Thin Solid Films, 442, pp. 194–200, 2003.
- /4/ Schreiber, P.; Kudaev, S.: "Mikrooptik für LED-Lichtquellen", Photonik 3 (2005), 80–82.
- /5/ Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.; »Mikrooptik für Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern«, Photonik 35 (2003) 6 S. 50.
- /6/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: "Antireflective coating design for plastic optics", Appl. Opt. 42 (2003) 1346–1351.

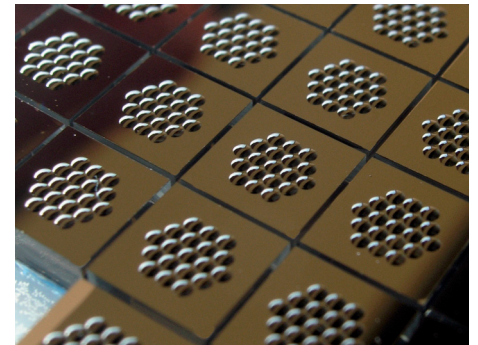


Abb. 6: Sensorchips mit entspiegelten refraktiven Mikrolinsenarrays, Blenden und Pinholestrukturen nach der Vereinzelung.

Fig. 6: Sensor chips including anti-reflection coated microlens arrays, black apertures and pinholes after dicing.

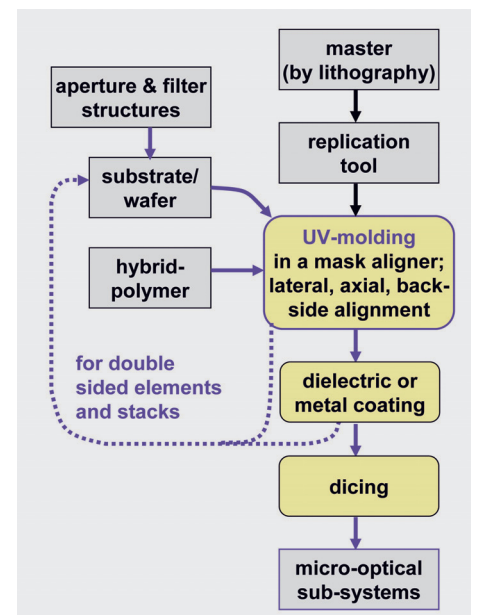


Abb. 7: Schema des technologischen Ablaufes. Master und Abformwerkzeug müssen dabei nur ein Mal erzeugt werden.

Fig. 7: Scheme of the technological cycle. Master and embossing tools have to be generated only once.