

Ultraplanare Elektrostatische Chucks für Next-Generation-Lithographie



Gerhard Kalkowski



Stefan Risse



Sandra Müller



Gerd Harnisch

Einleitung

Im Wettlauf um immer kürzere Rechenzeiten und kleinere Strukturen bei mikroelektronischen Schaltkreisen setzt der Lithographieprozess die Grenzen. Die Wellenlänge hat in der optischen Lithographie in den letzten Jahren kontinuierlich abgenommen und mittlerweile 193 nm erreicht. Mittels Flüssig-Immersion (Wasser) werden inzwischen Strukturbreiten von 65 nm (half pitch) erzielt und sogar 45 nm wurden demonstriert. Für Strukturen von 32 nm und darunter wird dies jedoch nicht ausreichen und es werden neue Lithographie-Verfahren wie z. B. die Extrem Ultraviolett Lithographie (EUVL) (mit einer Wellenlänge von 13 nm), die direkt-schreibende Elektronenstrahl-Belichtung oder sogar Nano-Druck-Techniken für die kritischen Strukturen zum Einsatz kommen /1/. Im Hinblick auf große Stückzahlen ist die EUVL ein besonders aussichtsreicher Kandidat.

Die Vakuumverhältnisse von zukünftigen EUVL-Steppern sind weitgehend identisch mit jenen in heutigen Elektronenstrahl-Lithographie-Anlagen, so dass das hochstabile Halten der Maske und des Wafers mittels elektrostatischer Haltevorrichtungen erfolgen kann. Die Prozesseigenschaften sind dabei vergleichbar mit dem bekannten Halten durch Unterdruckkräfte an Luft: die elektrostatische Anziehung sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Haltekräfte über die gesamte Fläche, einen guten Wärmeaustausch und reduzierten Abrieb, bzw. Partikelanfall, gegenüber klassischen 3-Punkt-Auflagen mit hohen Belastungen und Deformationen im Berührungspunkt.

Durch einen elektrostatischen Chuck (ESC) kann ein durchgebogener Wafer oder eine Maske »glattgezogen« werden, sofern die Kräfte groß genug sind und der Chuck eben und steif ist. Tatsächlich stellt die Ebenheit für die EUVL die größte Herausforderung dar, da sich Höhenfehler (out-of-plane distortions, OPD) empfindlich als Strukturfehler (in-plane distortions, IPD) niederschlagen und durch nicht-telezentrische Beleuchtungsverhältnisse verschärft werden.

Das Arbeitsprinzip des ESC

Das Prinzip des elektrostatischen Chuckens ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Die Anordnung ist vergleichbar mit einem Plattenkondensator, wobei eine Elektrode und das Dielektrikum durch den Chuck geliefert werden, während die andere Elektrode durch das zu haltende Werkstück (Wafer oder Maske) gebildet wird. Das Werkstück muss elektrisch leitend sein (die intrinsische Leitfähigkeit von Silizium genügt) oder mit einem dünnen Metallfilm beschichtet werden. Wird das Werkstück auf den Chuck gelegt und eine elektrische Spannung U an die beiden Platten angelegt, so ziehen Coulomb-Kräfte das Werkstück mit einer Kraft proportional zum elektrischen Feld, bzw. $(U/d)^2$, auf die Chuck-Oberfläche, wenn d der Plattenabstand ist. Die Materialeigenschaften des Dielektrikums gehen über die relative Dielektrizitätskonstante ϵ ein und es gilt für ein ideales Dielektrikum (bei verschwindendem Aufspalt) $F/A = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon^2 (U/d)^2 / 2$. Größenordnungsmäßig kann mit einer Spannung von 1 kV und einer Dielektrikumstärke von 100 μm leicht ein elektrostatischer Auflagedruck von etwa 10 kPa erzielt werden.

Ultra-planar electrostatic chucks for next generation lithographies

Introduction

In the race for faster computing speed and shorter paths in micro-electronic circuits, the lithographic structuring process sets the limits. The wavelength in optical lithography has continuously decreased in recent years and has now reached 193 nm. Using liquid immersion techniques, structures of 65 nm (half pitch) are current state of the art, and even 45 nm have been demonstrated. For future manufacturing at the 32 nm node and beyond, however, even immersion based optical technologies come to an end and Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) (at a wavelength of about 13 nm), besides Electron-Beam Direct-Write (e-beam) and Nano-Imprint, are considered as possible alternatives [1]. In particular, as far as high volume production is concerned, EUVL is one of the most promising candidates for next-generation lithography technologies.

Vacuum conditions in future EUVL steppers will be similar to current e-beam lithography tools, and clamping of the mask, as well as the wafers to be exposed, proceeds via electrostatic chucking. This is in many respects comparable to the well established vacuum chucking process under ambient conditions: it ensures a homogeneous distribution of clamping forces over the whole clamping area, good heat transfer and greatly reduced wear and particle generation as compared to 3-point mounts with very high loads and deformations at the points of contact.

Using an electrostatic chuck (ESC), flattening of a bended wafer or mask is possible if chucking forces are sufficiently high and the chuck is flat and stiff. In fact, flatness is the most demanding parameter in EUV lithography, since out-of-plane distortions (OPD) very readily translate into in-plane distortions (IPD) and the non-telecentric illumination conditions accentuate this sensitivity.

ESC principle

The basic principle of an ESC is schematically illustrated in Fig. 1. The geometry is similar to a parallel plate capacitor, with the chuck providing one electrode plus the dielectric, while the substrate (wafer or mask) to be chucked, constitutes the second electrode. Note, that the substrate must be electrically conductive (intrinsic conductivity of Silicon is sufficient) or coated with a thin metallic layer.

When the substrate is laid onto the chuck and a voltage U is applied between the two plates, Coulomb forces build up and attract the substrate to the chuck with a force proportional to the electric field, respectively $(U/d)^2$, where d is the distance between the two plates. Material properties of the dielectric enter into the electrostatic forces via the relative electrical permittivity ϵ . For an ideal dielectric, the force F per area A amounts to $F/A = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon^2 (U/d)^2$ in the limit of a vanishing vacuum gap [2]. As an order of magnitude, an electrostatic pressure of about 10 kPa may easily be obtained with a voltage of about 1 kV and a dielectric thickness of about 100 μm .

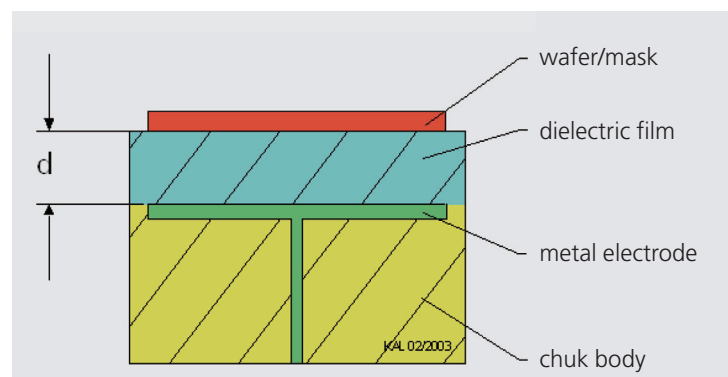


Abb. 1:
Schema des elektrostatischen Chucks.

Fig. 1:
Electrostatic chuck principle (schematic).

Für die Lithographie sind Anlagen-Genauigkeit und Stabilität entscheidende Kriterien. Eine Längenänderung durch Temperaturgang ist kaum zu beherrschen und Materialien mit sehr geringer thermischer Ausdehnung (LTEM, low thermal expansion material) sind gefragt. Am IOF werden Bearbeitungsprozesse und Klebetechniken entwickelt, um ESC aus Glas und Glas-Keramik mit »Null-Ausdehnung«, bzw. einem Ausdehnungskoeffizienten $< 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ nahe Zimmertemperatur (etwa zwei Größenordnungen weniger als bei gewöhnlichen Materialien) herzustellen.

Si-Wafer-Chuck

Für die Elektronenstrahl-Lithographie ebenso wie für die EUVL werden große elektrostatische Wafer-Halter benötigt. Abbildung 2 zeigt einen am IOF gefertigten Wafer-Chuck mit 12 Zoll Durchmesser aus LTEM. Es handelt sich um eine Leichtgewicht-Ausführung, in der durch Bohrungen im Chuck-Körper eine Gewichtsreduzierung um fast 50 % erzielt wurde.

Drei große Durchgangsbohrungen auf etwa halbem Chuck-Radius dienen zum Ausheben des Wafers und seine Übergabe an einen Transportroboter.

Bedeutsamer, aber nicht unmittelbar erkennbar in der Abbildung, ist die hohe Ebenheit der Wafer-Auflagefläche. Tatsächlich liegt die globale Ebenheit (gesamter Durchmesser) für diese Fläche unter $1 \mu\text{m}$ und die lokale Ebenheit über jeden $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ großen Ausschnitt ist noch über eine Größenordnung besser. Ein Blick auf Abb. 2 zeigt, dass die Chuck-Oberfläche strukturiert ist: Es liegt eine Auflagefläche aus lauter kleinen Stiften (Pins) vor. Dies erleichtert den Entchuck-Vorgang und reduziert drastisch das Risiko von Ebenheitsabweichungen auf Grund von Partikeln an der Grenzfläche von Chuck und Wafer. Erfahrungsgemäß ist die Partikel-Problematik unter Produktionsbedingungen immer ein Thema und kann verheerende Folgen haben, da Höhenabweichungen (OPD) beim Lithographie-Prozess unmittelbar in laterale Verzerrungen (IPD) umgesetzt werden und die Überdeckungsgenauigkeit beeinträchtigen.

Auf Basis der elastischen Plattentheorie /3/ wurden die Auswirkungen eines Partikels auf laterale Verzerrungen für einen 12 Zoll-Silizium-Wafer mit einer Dicke von $775 \mu\text{m}$ für verschiedene elektrostatische Drücke analytisch berechnet.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis für ein Partikel mit effektivem Durchmesser von $0,5 \mu\text{m}$ (d. h. der lokale Höhenunterschied nach Berücksichtigung der Hertz'schen Flächenpressung beträgt $0,5 \mu\text{m}$). Die Reichweite der Störung beträgt etwa 10 mm und die laterale Verzerrung (IPD) erreicht etwa 30 nm unter realistischen Bedingungen. Dies ist nicht mehr tolerabel für Strukturen von 65 nm und darunter. Obwohl der analytische Ansatz eine Vereinfachung darstellt und durch Finite-Element-Rechnungen (FEM) verbessert werden kann, illustriert dieses Ergebnis die Ebenheitsanforderungen und die Partikel-Empfindlichkeit kommender Lithographiegenerationen.

EUV-Masken-Chuck

Die zukünftige EUVL sieht vor, Strukturen von einer quadratischen Maske auf den Si-Wafer abzubilden, wobei reflektive Optiken mit alternierenden Mo-Si-Vielfachschichten zum Einsatz kommen. Als Substrate für Spiegel und Masken sind lediglich »Null-Ausdehnungs«-Materialien (LTEM) zugelassen. Die Maske erhält eine dünne Rückseiten-Metallisierung, um sie elektrostatisch halten zu können. Die Chuck-Eigenschaften und die zulässigen Materialien sind kürzlich in einem SEMATECH-Standard festgelegt worden /4/, wobei extreme Ebenheitsanforderungen auftreten: Lediglich Abweichungen von 6 nm sind zulässig innerhalb von Feldern der Größe $(20 \text{ mm})^2$ und weniger als 50 nm über die gesamte Maskenfläche von $(152 \text{ mm})^2$. Um eine Einebnung der $6,35 \text{ mm}$ dicken EUV-Maske zu erzielen, werden Haltekräfte von $15 \text{ kPa} \pm 10 \%$ und eine hohe Biegesteifigkeit ($> 30 \text{ kNm}$) gefordert.

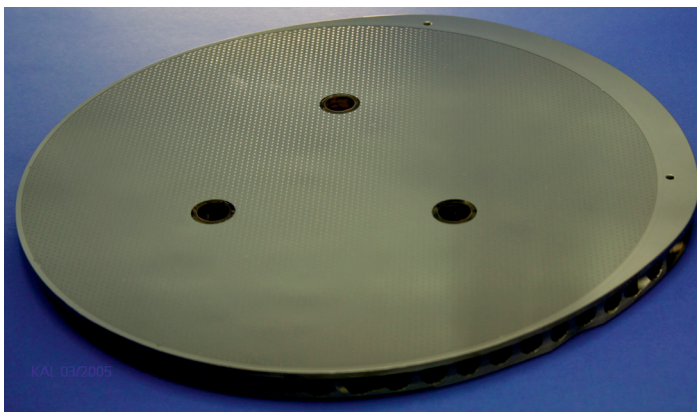


Abb. 2: Elektrostatischer Wafer-Chuck mit Pins (12 Zoll).

Fig. 2: 12-inch electrostatic pin chuck.

For lithography, precision and stability of all tools and processes is of the utmost importance. Dimensional variation according to temperature is difficult to control and materials with low thermal expansion (LTEM) are needed. At IOF, processes have been developed for manufacturing ESC out of "zero-expansion" glass and glass-ceramics, using optical machining and adhesive bonding technologies. "Zero-expansion" refers to a coefficient of thermal expansion of $< 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ at room temperature, which is about two orders of magnitude smaller than that of common materials.

Si-Wafer chuck

For applications in e-beam lithography as well as future EUVL, large electrostatic wafer chucks are required. Figure 2 shows a 12-inch wafer chuck as developed at IOF and manufactured from "zero-expansion" glass and glass-ceramics. A light-weight design was realized by applying bore holes to the chuck body and thus reducing mass by nearly 50 %. There are three large holes visible at about half the wafer radius. These are apertures for a lifting mechanism to transfer the wafer to a handling unit.

More important – but not visible from the figure – is the extreme flatness of the area that supports the wafer. In fact, flatness is better than $1 \mu\text{m}$ across the whole area and more than an order of magnitude better on any local field of $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. A glance at Fig. 2 shows, that there is a fine patterning of the chuck surface, due to the wafer supporting area being made of a large number of small pins. This is beneficial for the de-chucking process and drastically reduces the risk of flatness distortions from particle contamination at the chuck to wafer interface.

In our experience, particle contamination is always an issue under production conditions and can have severe consequences, out-of-plane distortions (OPD) directly translating into in-plane-distortions (IPD) during the lithography process and affecting overlay accuracy.

Sensitivity to particle distortions has been calculated on the basis of simple plate bending theory [3] and is shown in Fig. 3. For a Silicon wafer thickness of $775 \mu\text{m}$, a particle of effective (compressed) height $0.5 \mu\text{m}$ produces height distortions with a radial extent of about 10 mm . The height gradient locally induces an IPD (pattern distortion) of about 30 nm at reasonable chucking pressures. This is intolerable for structures of 65 nm or less. Although the analytic approach is a simplification and can be improved upon by Finite Element Modelling (FEM), these results illustrate the particle sensitivity and the tight constraints regarding flatness for future generations of lithography.

EUV-Mask Chuck

In up-coming EUVL, circuit patterns from a square mask will be projected onto the wafer using reflective mirrors made from Mo-Si multilayer coatings. Only LTEM materials are acceptable for the mask and optics substrates. For the clamping of the EUV-mask, the reverse side of the mask has to be coated with a metallic film in order that an electrostatic chuck can be used. Basic chuck parameters and admissible materials are specified in a recent standard proposed by SEMATECH [4].

In particular, chuck flatness is absolutely critical since deviations are limited to $< 6 \text{ nm}$ for any square area of $(20 \text{ mm})^2$ and to $< 50 \text{ nm}$ for the whole mask size of $(152 \text{ mm})^2$. To ensure flattening of a standard EUV mask made from 6.35 mm thick LTEM, a chuck with bending stiffness $> 30 \text{ kNm}$ and a clamping pressure of $15 \text{ kPa} \pm 10 \%$ is demanded.

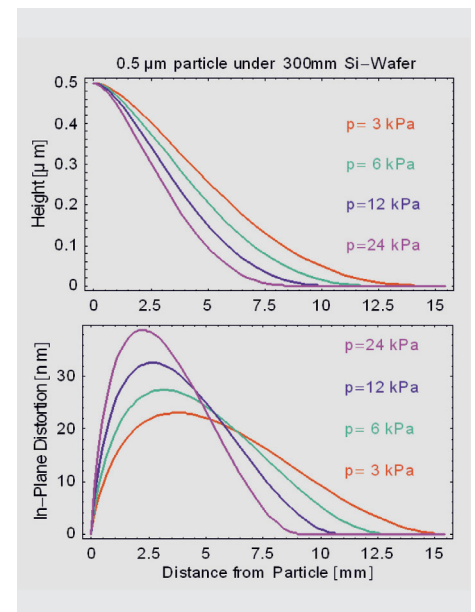


Abb. 3: Verzerrungen In-der-Ebene (IPD) und Aus-der-Ebene (OPD) durch ein $0,5 \mu\text{m}$ Partikel.

Fig. 3: In-plane (IPD) and out-of-plane (OPD) distortions from a $0.5 \mu\text{m}$ particle.

Am IOF wurde damit begonnen, geeignete Fertigungstechnologien für derartige EUV-Masken-Chucks zu sondieren. Abbildung 4 zeigt einen ersten Prototyp aus LTEM /5/. Aus Fertigungsgründen wurden eine runde Chuckform und ein Durchmesser kleiner als die Maskendiagonale gewählt. Hierdurch kann die Maske außerhalb des Chuckbereichs an ihren Ecken gegriffen und zum Transport gehandhabt werden. Es liegen keine Öffnungen im Innern des Chucks vor, um einerseits das Partikelrisiko zu senken und andererseits im Fertigungsprozess sehr hohe Ebenheiten zu erzielen.

Auffällig ist die Chuck-Höhe (ca. 5-fache Masken-Dicke), die sicherstellt, dass der Chuck die Maske einebnet und nicht umgekehrt. Angemerkt sei, dass in die Biegesteifigkeit das E-Modul nur linear eingeht, während die Dicke zur Steifigkeit in dritter Potenz beiträgt. Theoretische Abschätzungen ergeben eine Biegesteifigkeit von knapp 300 kNm, also eine Größenordnung mehr als nach SEMATECH gefordert.

Da die Materialien für den Chuck-Körper und das Dielektrikum transparent sind, kommen die metallischen Chuck-Elektroden in Abb. 4 deutlich zum Vorschein. Es wurden zwei Elektroden in symmetrischer, bipolarer Konfiguration gewählt. Damit kann die Maske geschuckt werden, ohne eine direkte elektrische Verbindung zwischen Maske und Chuck-Elektrode herstellen zu müssen. Dies reduziert das Partikel-Risiko.

Wie Abb. 4 zu entnehmen ist, liegt ein hexagonales Pin-Muster auf der quadratischen Chuck-Fläche vor, die den direkten mechanischen Kontakt von Chuck und Maske auf wenige Prozent der Masken-Rückseite begrenzt.

Die Pin-Höhen bewegen sich im μm -Bereich, während Durchmesser und Abstände im mm-Bereich liegen. Wie beim Wafer-Chuck wird damit das Entchucken erleichtert und das Partikel-Risiko reduziert, ohne Zugeständnisse in der Ebenheit zu machen. Während die elektrostatische Kraft und Steifigkeit dieses EUV-Chucks die strengen SEMATECH Anforderungen bereits erfüllen, ist die geforderte Ebenheit der Pin-strukturierten Fläche fast, aber noch nicht vollständig erreicht /5/. Entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung sind eingeleitet.

Zusammenfassung

Am Fraunhofer IOF werden hochgenaue elektrostatische Haltevorrichtungen für Anwendungen in der Elektronenstrahl- und EUV-Lithographie entwickelt. Dies reicht von der Konstruktion und Modellierung bis hin zur Optimierung von Fertigungsprozessen bei externen Partnern. Aus »Null-Ausdehnungs«-Gläsern und Glas-Keramiken wurden Si-Wafer-Chucks mit Durchmessern bis zu 12 Zoll und ein erster Prototyp für einen EUV-Masken-Chuck mit sehr hoher Ebenheit und Steifigkeit gefertigt und charakterisiert. Aktivitäten sind im Gange, um die außerordentlichen Ebenheitsanforderungen der EUV-Lithographie bald voll zu erfüllen.

Danksagung

Wir freuen uns über eine seit langem geführte, anregende Diskussion zu Fragen des Chuckens von Si-Wafern mit Peter Hahmann, Bernd Brendel, Matthias Slodowski, Karl-Heinz Kliem, Ulf Kirschstein und Thomas Händel von Leica Microsystems Lithography GmbH (Jena).

Außerdem danken wir Roxann Engestad und ihren Mitarbeitern an der Universität von Wisconsin (Madison, USA) für wertvolle Debatten und einen regen Meinungsaustausch zum Chucken von EUV-Masken und geeignete FEM-Simulation.

Literatur:

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2004 update, <http://public.itrs.net>
- /2/ D. R. Wright et al., Manufacturing Issues of Electrostatic Chucks, Journal of Vacuum Science and Technology B 13, no. 4 (1995) 1910–1916
- /3/ Landau, L.; Lifschitz, E.: Theoretische Physik, Vol. 7, Paragraph 12: Elastizitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1989)
- /4/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, issue 2003, <http://www.semiatech.org>
- /5/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, Proc. of the 31st Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19–22 September 2005, Vienna, Austria (to be published)

At IOF, a technology analysis has started to identify suitable manufacturing processes for EUV mask chucks made from “zero-expansion” materials. Figure 4 shows the first resulting prototype /5/. Chuck shape is circular for ease of precision manufacturing, with a diameter slightly less than the mask diagonal to allow for mask gripping outside of the chuck surface upon loading/de-loading. The chuck surface has no apertures to avoid particle contamination of the inner surface area. Note, that optical manufacturing technologies work well on a circular plate with a closed surface and much higher flatness values can be obtained than with a rectangular shape or with openings/holes in the surface.

Also, chuck height is quite notable (about 5 times mask thickness), to ensure mask flattening by the chuck and not vice versa. Chuck bending stiffness is highly dependent on height, since it scales essentially linearly with the elastic modulus but to the power of three with height. In fact, from theoretical estimates we expect a bending stiffness of nearly 300 kNm, i.e. about an order of magnitude larger than required by SEMATECH.

Since the materials used for the chuck dielectric and the chuck body are transparent, the metallic chuck electrodes are visible as rectangular areas in Fig. 4. Two electrodes are used in a symmetric bipolar configuration. This allows for chucking without establishing any direct electrical contact between mask and chuck electrode and minimizes particle generation in the chucking process.

As can be seen from Fig. 4, there is a hexagonal pattern of pins within the quadratic chucking area. Pin height is in the μm -range, and size and distances are chosen in the mm-range so as to reduce direct mechanical contact between mask and chuck to only a

few percent of the mask reverse side without compromising mask flatness. Again, this simplifies de-chucking and significantly reduces the risk of pattern distortions from inevitable particle contamination of the mask reverse side. While force and stiffness objectives have been met, flatness of the pin surface is close to but not fully within the stringent requirements of SEMATECH /5/. Activities are underway to further improve upon flatness and finally meet the EUVL specification.

Summary

At Fraunhofer IOF, high precision electrostatic chucks for use in e-beam and EUV lithography are developed. This comprises chuck design and modeling, as well as optimization of manufacturing technologies with external partners. From “zero-expansion” glass and glass-ceramic materials, Si-Wafer chucks up to 12-inch diameter and an EUV-mask chuck prototype of high flatness and extreme stiffness have been manufactured and characterized. Activities for meeting the stringent EUVL flatness requirements are underway.

Acknowledgement

We greatly appreciate long-standing and stimulating discussions on Si-wafer chucking with Peter Hahmann, Bernd Brendel, Matthias Slodowski, Karl-Heinz Kliem, Ulf Kirschstein and Thomas Händel from Leica Microsystems Lithography GmbH (Jena). Further, we would like to thank Roxann Engelstad and her co-workers from the University of Wisconsin (Madison, USA) for fruitful debates and an intense exchange of ideas on EUV-mask chucking and appropriate FEM modeling.

References:

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2004 update, <http://public.itrs.net>
- /2/ D. R. Wright et al., Manufacturing Issues of Electrostatic Chucks, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 13, no. 4 (1995) 1910–1916
- /3/ Landau, L.; Lifschitz, E.: *Theoretische Physik*, Vol. 7, Paragraph 12: Elastizitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1989)
- /4/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, issue 2003, <http://www.semiatech.org>
- /5/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, Proc. of the 31st Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19–22 September 2005, Vienna, Austria (to be published)

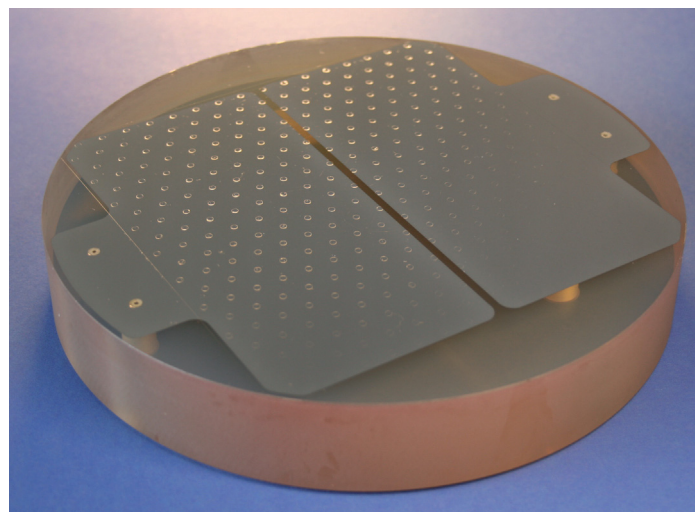


Abb. 4: EUV-Masken-Chuck.

Fig. 4: EUV-mask chuck prototype.