

Durchbruch bei Entwicklungen im Bereich EUV-Lithographie

Erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Schott Lithotec AG und Fraunhofer IOF

Sergiy Yulin, Torsten Feigl, Norbert Kaiser, Lutz Aschke*, Agnes Hübscher*

* Schott Lithotec AG, Jena



Sergiy Yulin

Einleitung

Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik hat die Schott Lithotec AG, Jena, in kürzester Zeit ein Beschichtungsverfahren für Mask-Blanks eingeführt, welches dem derzeit höchsten Standards weltweit entspricht. Nach Eröffnung der Advanced Quality Line am Standort Meiningen im November 2000 wurde bereits 2 Monate später die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF Jena begonnen. Ziel dieser Zusammenarbeit als Teil eines vom BMBF geförderten Forschungsprojekts für die EUV-Lithographie war der Transfer der am Institut vorhandenen Beschichtungstechnologie zur Herstellung hochreflektierender Molybdän-Silizium-Schichtsysteme auf die Ionenstrahlputteranlage der Schott Lithotec AG in Meiningen.

Im Rahmen der Kooperation erfolgte neben der Optimierung der optischen Eigenschaften die Optimierung relevanter Beschichtungsparameter in Bezug auf Homogenität der Schichtdicke sowie EUV-Reflexion. Durch die effektive Zusammenarbeit konnten in kurzer Zeit die am Institut gesammelten Erfahrungen an die Schott Lithotec AG überführt werden, und ein Schichtsystem mit einem Reflexionswert der weltweiten Spitzenklasse wurde eingeführt.

EUV Lithographie

Bereits heute müssen zur Einhaltung des Tempos der zwischen Chipherstellern vereinbarten „International Technology Roadmap for Semiconductors“ die Grundlagen für die „Extrem Ultraviolett Lithographie“ (EUVL) gelegt werden. EUVL wird mit einer extrem kurzwelligigen UV-Strahlung von nur noch 13,5 nm Wellenlänge betrieben und ermöglicht Strukturabstände von zunächst 50 nm und später bis unter 35 nm. Der Übergang zur EUVL wird voraussichtlich im Jahre 2006 einsetzen.

Ein EUVL-Mask Blank besteht aus einem polierten Substrat aus Nullausdehnungsmaterial (LTEM), auf dem ein hochreflektierender Mo/Si-Multilayer, eine Absorberschicht und Photoresist aufgetragen werden. Der Photoresist wird im weiteren Herstellungsprozess zusammen mit den anderen Schichten selektiv entfernt. So entsteht die Photomaske, die die präzisen Abbildungen für eine Ebene eines Halbleiterschaltkreises enthält. Bei dem Herstellungsprozess von Halbleitern wird für die optische Übertragung der „Schaltkreise“ auf die Silizium-Wafer ein Satz von ca. 15 bis 30 Photomasken verwendet.

A developmental breakthrough in EUV-Lithography

successful collaboration between Schott Lithotec AG and Fraunhofer IOF Jena

Sergiy Yulin, Torsten Feigl, Norbert Kaiser, Lutz Aschke*, Agnes Hübscher*

* Schott Lithotec AG, Jena

Introduction

Schott Lithotec AG of Jena, Germany, was able to introduce a coating system for EUV photomask blanks, attaining the highest global standards, which has resulted from the company's successful collaboration with the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering (IOF). Cooperation with the Fraunhofer Institute began two months after the launching of Schott Lithotec's Advanced Quality Line in Meiningen, Germany in November 2001, and is part of an EUV lithography project supported by the German federal ministry of education and research. Its goal was to transfer coating-technology expertise on the production of highly reflective molybdenum/silicon multilayers (Mo/Si multilayers) from the Fraunhofer Institute for use in Schott Lithotec's ion-beam-sputtering-tool in Meiningen.

Within the scope of this cooperative project, optical characteristics such as multilayer reflectivity were improved, and the relevant coating parameters such as the homogeneity of the multilayer period and reflection of EUV light were optimized. Due to the effective collaboration between both organizations, the IOF's relevant know-how was put to use by Schott Lithotec within a very short period of time. This enabled Schott Lithotec to develop a Mo/Si multilayer system with outstanding optical performance.

EUV lithography

In order to keep in line with the time-frame agreed by global leaders in microchip production as set down by the „International Technology Roadmap for Semiconductors,“ the foundations for extreme ultraviolet lithography (EUVL) need to be laid down as soon as possible. EUVL, with an extremely short wavelength of 13.5 nm, allows for structure widths of approximately 50 nm, which will in the future be reduced to less than 35 nm. The technological transition to EUVL is expected to take place in 2006.

EUVL-photoblanks are highly polished substrates made of low thermal expansion material (LTEM) coated with highly reflective Mo/Si multilayers, absorber layers and photoresists. The photoresists are selectively removed together with the other layers in order to produce a photomask that contains precision images comprising one layer of an integrated circuit design. A set of 15 to 30 photomasks is used to transfer the circuit images optically onto silicon wafers during the semiconductor manufacturing process.



Torsten Feigl



Norbert Kaiser



Lutz Aschke



Agnes Hübscher

Experimentelle Ergebnisse

Mo/Si-Schichtsysteme verschiedener Beschichtungs- und Designparameter wurden auf 6" LTEM Substraten abgeschieden. Die Schichtstrukturanalyse erfolgte mit Hilfe von Röntgenreflexion, Röntgenbeugung, hochauflösender Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM) und Rasterkraftmikroskopie (AFM).

Die EUV-Reflektivität wurde durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Berlin am Elektronenspeicherring BESSY II charakterisiert, wobei alle Spiegel in einem Wellenlängenbereich von 12,5 nm bis 14,0 nm mit einer Wellenlängenauflösung von 0,02 nm und einer relativen Messunsicherheit von 0,2 % vermessen wurden. Der Einfallswinkel des Messstrahls betrug 1,5° bei einem Spotdurchmesser auf der Spiegeloberfläche von 1,5 mm.

Durch Optimierung des Schichtdesigns sowie des Beschichtungsprozesses gelang die Abscheidung ionenstrahlgesputterter Schichtsysteme mit Reflexionen von $R = 64,8 \% @ 13,77 \text{ nm}$ und $R = 64,6 \% @ 13,49 \text{ nm}$ (Abb. 1). Neben der Optimierung der optischen Eigenschaften erfolgte im Rahmen des gemeinsamen Projektes die Optimierung relevanter Beschichtungsparameter in Bezug auf Homogenität der Schichtdicke sowie der EUV-Reflexion.

In Abb. 2 ist der Reflexionsverlauf an elf Probenpositionen entlang einer Linie auf einem 6" mask blank dargestellt. Der Messpunktabstand beträgt jeweils 15 mm.

Die Abhängigkeiten der Peak-Reflexion sowie der Peak-Wellenlänge von den Probenposition sind in Abb. 3 dargestellt. Die Peak-Reflexionen liegen innerhalb der Messunsicherheit von $\Delta R = 0,2 \%$. Die Standardabweichung der Peak-Wellenlängen beträgt $\sigma = 0,005 \text{ nm}$.

Die dargestellten Ergebnisse der Homogenität der Reflexion sowie der Wellenlänge erfüllen die von der Halbleiterindustrie vorgegebenen Anforderungen an die EUV-Masken für das Jahr 2012 bereits zum jetzigen Zeitpunkt.

Abb. 1: Reflexionsverlauf von Mo/Si-Systemen des Fraunhofer IOF und der Schott Lithotec AG. Messungen: PTB Berlin, BESSY II.

Fig. 1: Measured reflectivity of Fraunhofer IOF and Schott Lithotec AG Mo/Si multilayers. Measurements: PTB Berlin, BESSY II.

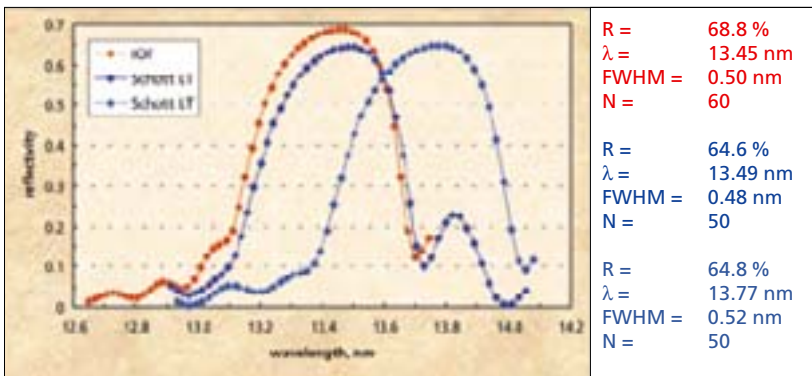
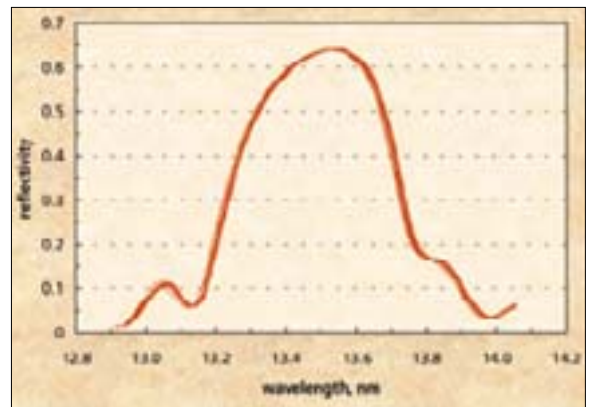


Abb. 2: Reflexionsverlauf an elf Probenpositionen entlang einer Linie auf einem 6" mask blank. Messungen: PTB Berlin, BESSY II.

Fig. 2: Plot of 11 reflection curves, measured at different positions on a 6-inch LTEM substrate. Measurements: PTB Berlin, BESSY II.



Experimental results

Mo/Si multilayers were deposited on 6-inch LTEM substrates. Several parameters of the deposition process and the design of the multilayers were modified. The structural characterization of each multilayer was performed with the help of small-angle X-ray reflection, large-angle X-ray diffraction, cross-section high-resolution transmission electron microscopy (TEM) and atomic force microscopy (AFM).

Normal incidence reflection measurements were performed with synchrotron radiation by the PTB reflectometer at BESSY II, Berlin. Each mirror was measured within the wavelength range of 12.5 nm to 14.0 nm, with a wavelength resolution of approximately 0.02 nm allowing for a relative inaccuracy in the measured reflectance of up to 0.2 %. The incidence angle of the beam was fixed at 1.5° and the spot had a diameter of 1.5 mm at the sample surface.

Due to the optimization of the multilayer design and the deposition process, normal incidence reflectivities of $R = 64.8\%$ at 13.77 nm and $R = 64.6\%$ at 13.49 nm were achieved for ion-beam-sputtered Mo/Si multilayer mirrors (fig. 1). The optimization of the deposition parameters was mainly focused on the homogeneity of the Mo/Si multilayer along the 6-inch LTEM substrates.

Fig. 2 shows a plot of 11 reflection curves which were measured at different positions along a 6-inch LTEM substrate.

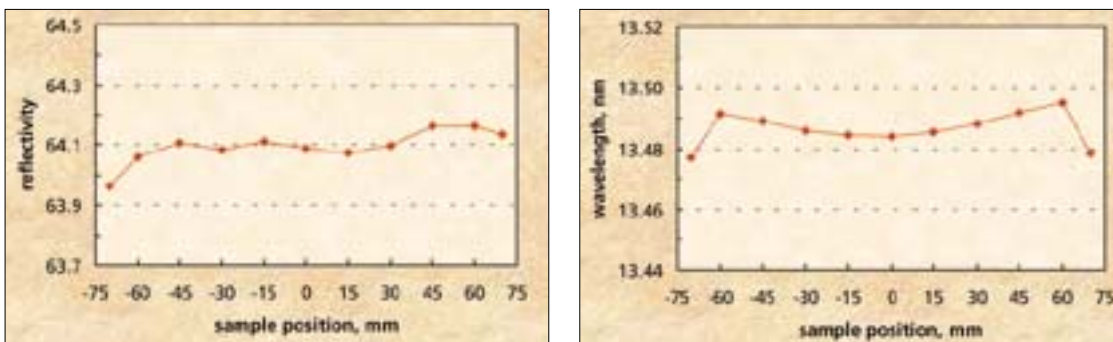
In fig. 3, one can see the measured maximum reflectivity and the corresponding peak wavelengths in relation to their substrate position. An excellent homogeneity of the Mo/Si multilayer mirror along the 6-inch LTEM substrate was achieved.

The deviation of the measured maximum multilayer reflectivity fell within the permitted range of measurement inaccuracy set at $\Delta R = 0.2\%$. The standard deviation of the peak wavelength at 11 different positions along the substrate is $\sigma = 0.005\text{ nm}$.

These findings already meet with the EUV mask homogeneity requirements as laid down for 2012 in the „International Technology Roadmap for Semiconductors.“

Abb. 3:
Peak-Reflexion und Peak-Wellenlänge in Abhängigkeit von der Probenposition auf einem 6" mask blank.

Fig. 3:
Measured reflectivity and peak wavelength in different substrate positions.



In den Abb. 4 und 5 sind transmissions-
elektronenmikroskopische Aufnahmen
des Querschnitts sowie die entspre-
chenden Elektronenbeugungsbilder
zweier Mo/Si-Schichtsysteme mit ver-
schiedenen Designparametern darge-
stellt. Beide Systeme zeigen eine
geschlossene und gleichmäßige
Schichtstruktur sowie eine minimale
und konstante Grenzflächenrauheit.

Aus den Elektronenbeugungsbildern ist
eine Abhängigkeit der kristallinen
Molybdän-Schichtstruktur von der
Molybdän-Schichtdicke erkennbar,
wobei mit wachsendem Absorber-
Schichtdickenverhältnis Γ ($\Gamma = d_{\text{Mo}}/d$)
der Kristallisationsgrad zunimmt.

Strukturanalysen mit hochauflösender
Transmissions-Elektronenmikroskopie
zeigen die bekannte amorphe Silizium-
sowie kristalline Molybdän-Schicht-
struktur, die durch asymmetrische
Silizid-Diffusionszonen getrennt sind.

In naher Zukunft wird ein neuer
Qualitätsstandard für LTEM-Substrate
in Bezug auf thermischen Ausdeh-
nungskoeffizienten, Rauheit und Eben-
heit verfügbar sein. Die F & E-Arbeiten
auf dem Gebiet der Beschichtungstech-
nologie werden sich auf folgende
Schwerpunkte konzentrieren:

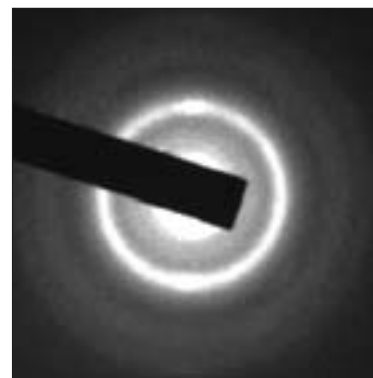
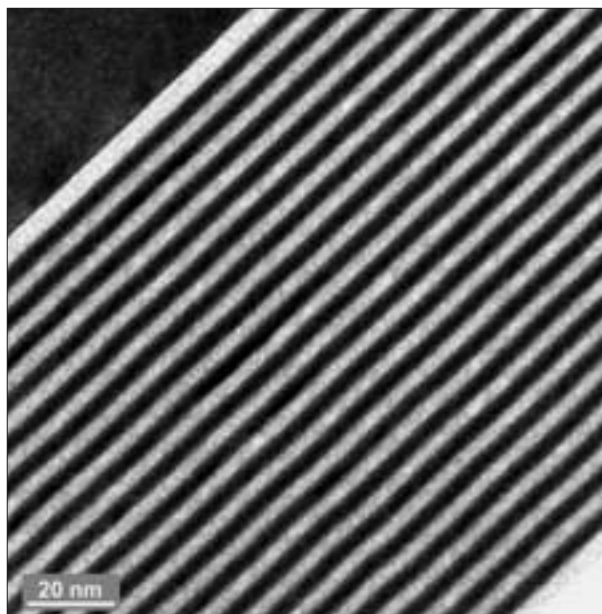
- Verbesserung der optischen
Eigenschaften
- Minimierung der Schichteigen-
spannungen und
- Defektreduzierung.

Literatur:

- /1/ H. Becker, L. Aschke, B. Schubert, J. Krieger,
F. Lenzen, S. Yulin, T. Feigl, T. Kuhlmann,
N. Kaiser: „Ion beam sputter deposition of
low defect EUV mask blanks on 6 inch
LTEM substrates in a real production
environment“,
Proc. SPIE 4688, pp. 503–508, 2002.
- /2/ H. Becker, F. Sobel, L. Aschke, M. Renno,
J. Krieger, U. Buttgerit, G. Heß, F. Lenzen,
K. Knapp, S. Yulin, T. Feigl, T. Kuhlmann,
N. Kaiser: „High performance 6-inch EUV
mask blanks produced under real production
conditions by ion-beam sputter deposition“,
Proc. SPIE 4889, 2002.

Abb.: 4
TEM Aufnahmen und Elektronenbeugung ionenstrahl-
gesputterter Mo/Si-Systeme,
Multilayer Design Parameter: $N = 20$, $\Gamma = 0,35$.
Aufnahme: FSU Jena.

Fig.: 4
TEM and SAED images of ion beam sputtered Mo/Si,
multilayer design parameters: $N = 20$, $\Gamma = 0.35$.
Micrograph: FSU Jena.



The transmission electron microscopy (TEM) images and the corresponding selected area electron diffraction (SAED) of two differently designed Mo/Si multilayers are shown in fig. 4 and 5. Both Mo/Si multilayer systems form a continuous and very smooth layer structure. There are no traces of a growing interface roughness or of thickness deviations within the stack. However, some changes in the crystalline Mo structure occur within different absorber thickness ratios Γ ($\Gamma = d_{\text{Mo}}/d$).

It is clearly visible from the selected electron diffraction images that the degree of perfection of the crystalline Mo layer structure depends on the Mo layer thickness; a larger number of Mo crystallites were detected in the $\Gamma = 0.45$ – sample. Investigations using high-resolution transmission electron

microscopy indicate an amorphous silicon and polycrystalline molybdenum structure separated by diffusion zones of a mixed composition. The width of the interdiffusion zones at the Mo-on-Si interfaces is approx. 1.2 nm and the interdiffusion layer width at the Si-on-Mo interfaces is approx. 0.8 nm.

In the near future, an improved standard of quality will be available for low thermal expansion substrates regarding the coefficients of thermal expansion, roughness and flatness. Future research and development work in the field of Mo/Si multilayer technology will concentrate on the

- enhancement of optical properties
- minimization of coating-internal mechanical stress
- reduction in the number of defects.

References:

- /1/ H. Becker, L. Aschke, B. Schubert, J. Krieger, F. Lenzen, S. Yulin, T. Feigl, T. Kuhlmann, N. Kaise: „Ion beam sputter deposition of low defect EUV mask blanks on 6 inch LTEM substrates in a real production environment“, Proc. SPIE 4688, pp. 503–508, 2002.
- /2/ H. Becker, F. Sobel, L. Aschke, M. Renno, J. Krieger, U. Buttgerit, G. Heß, F. Lenzen, K. Knapp, S. Yulin, T. Feigl, T. Kuhlmann, N. Kaiser: „High performance 6-inch EUV mask blanks produced under real production conditions by ion-beam sputter deposition“, Proc. SPIE 4889, 2002.

Abb.: 5
TEM Aufnahmen und Elektronenbeugung ionenstrahl-
gesputterter Mo/Si-Systeme,
Multilayer Design Parameter: $N = 40$, $\Gamma = 0.45$.
Aufnahme: FSU Jena.

Fig.: 5
TEM and SAED images of ion beam sputtered Mo/Si,
multilayer design parameters: $N = 40$, $\Gamma = 0.45$.
Micrograph: FSU Jena.

