

## Reduzierung und Kompensation von inneren Spannungen in grenzflächen-optimierten Mo / Si-Multischichten

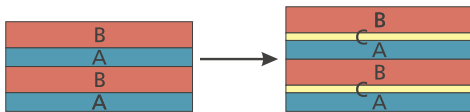
### Aufgabenstellung

Entsprechend der Technologie-Roadmap der Halbleiterindustrie verdoppelt sich die Speicherdichte von Computer-Chips etwa aller 18 Monate (Moore'sches Gesetz). Um diesem Gesetz auch in Zukunft folgen zu können, ist die Entwicklung von Lithographie-Verfahren mit kürzeren Arbeitswellenlängen erforderlich. So sollen Strukturbreiten von  $< 50$  nm künftig mit sogenannter extrem ultravioletter Strahlung (EUV) mit einer Wellenlänge von 13,5 nm belichtet werden. Die Einführung dieser Technologie bedingt auch die Umstellung von transmittierenden zu reflektierenden Optiken, da EUV-Strahlung von nahezu allen Materialien

stark absorbiert wird. Diese reflektierenden Elemente bestehen aus einem extrem glatten und präzise gefertigten Spiegelträger und den darauf aufgebracht Reflexionsschichten, die aus einem Vielfachstapel von Molybdän- und Siliziumlagen mit jeweils wenigen Nanometern Dicke bestehen.

In den vergangenen Jahren wurden im IWS erfolgreich hochreflektierende Mo/Si-Multischichten entwickelt. Durch den Einbau von dünnsten Diffusions- und Reaktionsbarrierschichten zwischen den Molybdän- und Silizium-einzelschichten ist es gelungen, den Reflexionsgrad der Schichten auf 70,1 % ( $\lambda = 13,3$  nm,  $\alpha = 1,5^\circ$ ) bzw. 71,4 % ( $\lambda = 12,5$  nm,  $\alpha = 22,5^\circ$ ) zu erhöhen und damit Weltspitzenwerte zu erzielen. Neben dem möglichst hohen Reflexionsgrad gibt es für EUV-Spiegelbeschichtungen jedoch eine Reihe weiterer Anforderungen. So muss gesichert sein, dass die hochpräzise und oft asphärische Oberflächenkontur des Spiegelsubstrates auch nach der Beschichtung erhalten bleibt. Aus diesem Grunde müssen die inneren Spannungen der Reflexionsschichten minimiert werden. Dies muss erfolgen, ohne dass der Reflexionsgrad verringert wird.

#### 1.) Einbau von zusätzlichen Schichten



Problem: Abbau der Spannungen ist bei gleichbleibender Reflexion i. A. nicht bis auf Null möglich

#### 2.) Kompensationsschichten



Problem: Rauigkeit der Kompensationsschicht

#### 3.) Temperung



Problem: Verminderung der Reflexion durch Interdiffusion an den Grenzflächen der Multischicht

Abb. 1: Möglichkeiten zur Reduzierung und Kompensation von inneren Spannungen in nm-Multischichten

Kombination aller Maßnahmen  
=> spannungsfreie und hochreflektierende Multischichten

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stefan Braun  
Tel.: 0351 / 2583 432  
stefan.braun@iws.fraunhofer.de



Abb. 2: Blick in die Beschichtungskammer mit zwei aktiven Magnetronsputterquellen der Targetmaterialien Molybdän (rechts) und Silizium (links). Über den Quellen bewegt sich das rotierende Substrat.



## Lösungsweg

Die in Nanometer-Multschichten im Allgemeinen auftretenden inneren Spannungen können durch folgende Maßnahmen kompensiert oder reduziert werden:

- Einbau von weiteren Schichten zur Spannungsrelaxation
- Hinzufügen von Schichten oder Schichtstapeln mit entgegengesetztem Spannungszustand zur Spannungskompensation
- Temperaturbehandlung der Schichten zur Spannungsrelaxation.

Jede dieser Einzelmaßnahmen allein führt bei der Anwendung auf Mo/Si-Multschichten jedoch zu einem nicht tolerierbaren EUV-Reflexionsverlust. Daher wurde im IWS der Ansatz gewählt, alle drei Maßnahmen miteinander zu kombinieren (Abb. 1). Dabei zeigte sich, dass Kohlenstoffschichten besonders geeignet sind, innere Spannungen in Mo/Si-Multschichten bei sogar gesteigertem Reflexionsgrad abzubauen. Der Einbau anderer Materialien führt entweder zur Spannungserhöhung (z. B. Borkarbid) oder zur Verringerung des Reflexionsgrades (z. B. Ruthenium).

Zur Kompensation der Spannungen entsprechend der zweiten Option in Abb. 1 kamen Mo/Si/C-Multschichten mit veränderten Schichtdickenverhältnissen zum Einsatz. Durch die Änderung der Schichtdicken kann der Spannungszustand von den typischerweise auftretenden Druckspannungen in den Zugspannungsbereich überführt werden, ohne dass die Rauigkeit der Kompensationsschicht ansteigt.

## Ergebnisse

Der Einbau von Kohlenstoff-Zwischenschichten an den Grenzflächen Mo-auf-Si innerhalb der Multischicht wirkt in dreifacher Hinsicht positiv:

- Reduzierung der inneren Spannungen von typischerweise -420 MPa im reinen Mo/Si-Multschichtstapel auf typischerweise -350 MPa,
- Verringerung der Interdiffusion von Molybdän und Silizium und einem daraus folgenden höheren EUV-Reflexionsgrad,
- Erhöhung der Temperaturstabilität der Multschichten.

Durch den Zusatz von dünnen Kohlenstoffschichten konnten die inneren Spannungen bereits um rund 15 % reduziert werden. Die weitere Reduzierung der Spannungen erfolgte schließlich durch geeignete Kompensationsschichten und Temperung des gesamten Stapels bei  $T = 150 \text{ °C}$ . Damit konnten Spannungswerte von  $|\sigma| < 20 \text{ MPa}$  reproduzierbar erreicht werden, wobei die Größe dieses Wertes vorrangig durch die verfügbare Messgenauigkeit bestimmt ist. Der EUV-Reflexionsgrad der spannungsreduzierten Multschichten liegt typischerweise nur 0,1 % niedriger als bei vergleichbaren Spiegeln ohne Spannungskompensation (Abb. 4).



Abb. 3: Sphärischer Spiegel, beschichtet mit einer Mo/Si-Multischicht

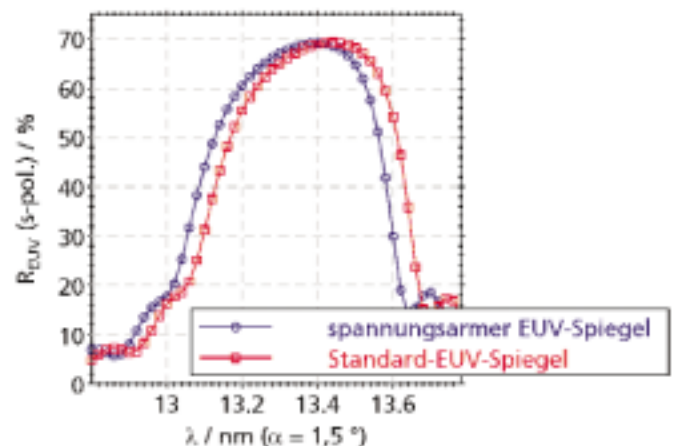


Abb. 4: EUV-Reflexionsgrad von spannungsarmen Mo/Si-Multschichten im Vergleich zu hochreflektierenden Standardspiegeln