

Herstellung und Charakterisierung von Mo/Si-Multischichten für Anwendungen im extrem ultravioletten (EUV) Spektralbereich

S. Braun, W. Friedrich, P. Gawlitza, S. Lipfert, M. Menzel, S. Schädlich, J. Schmidt, A. Leson

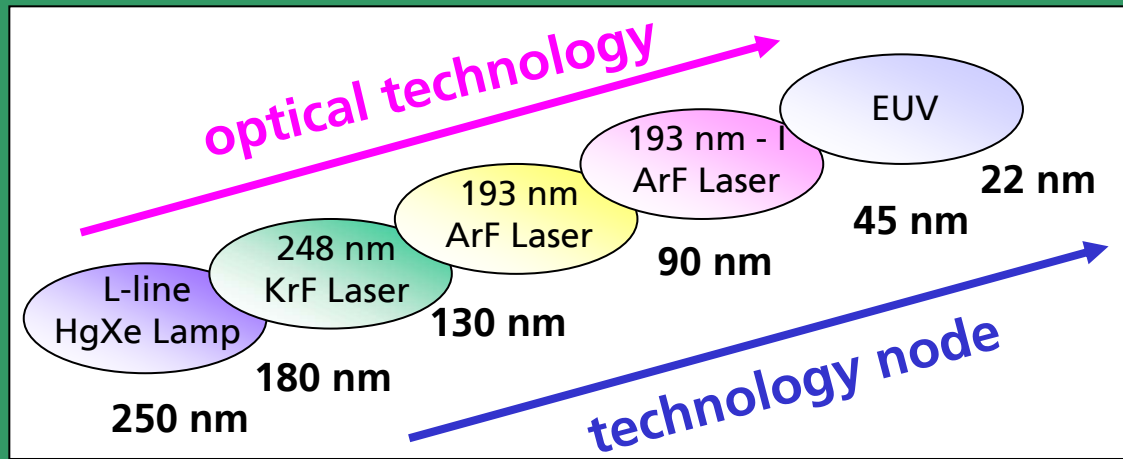
IWS Dresden, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik,
Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

ITRS Roadmap der Halbleiterindustrie



The optical lithography is the technology driver to develop optical components and coatings for shorter wavelengths.



Fraunhofer

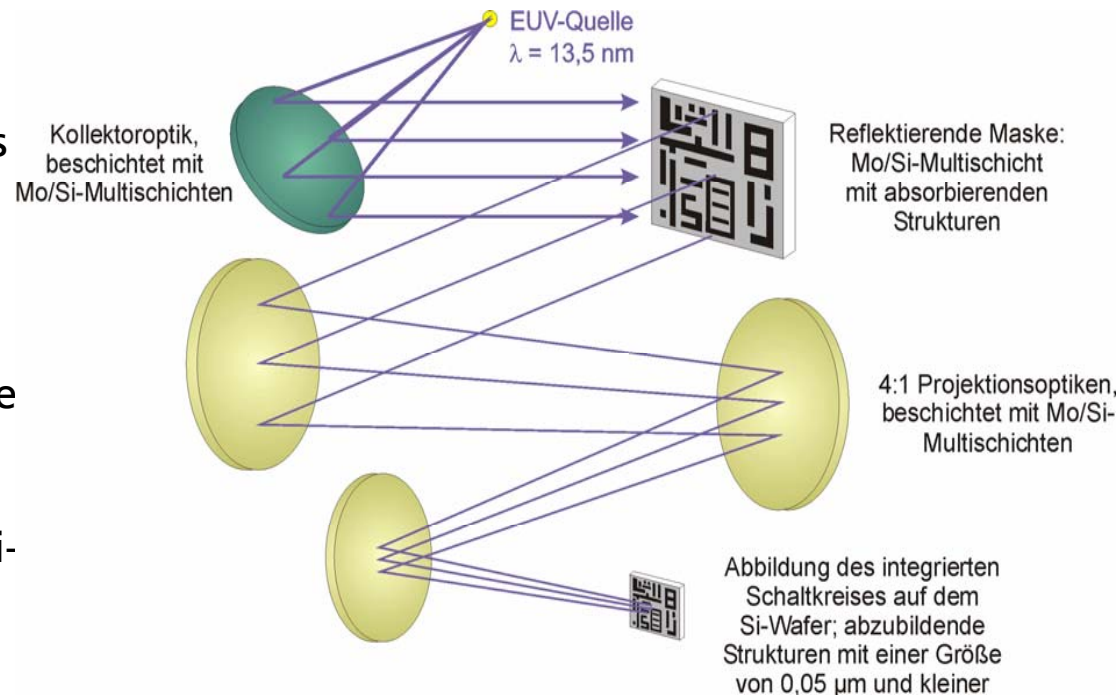
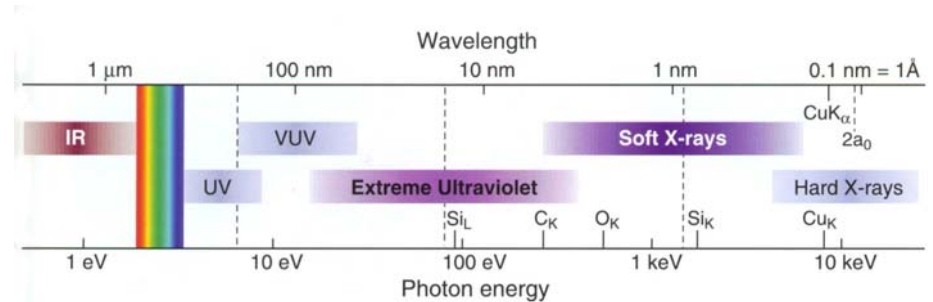
Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Mo/Si für die EUVL

Ziel: Abbildung immer kleinerer Schaltkreisstrukturen mit photolithographischen Abbildungstechniken

Problem: Größe der abbildbaren Strukturen ist begrenzt durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts => Einsatz immer kürzerer Wellenlängen (momentan 248 nm und 193 nm, zukünftig 13,5 nm = EUV)

Folgeproblem: Licht der Wellenlänge 13,5 nm wird von allen Materialien absorbiert => Einsatz von Reflexionsoptiken notwendig (Mo/Si-Multischichten)



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

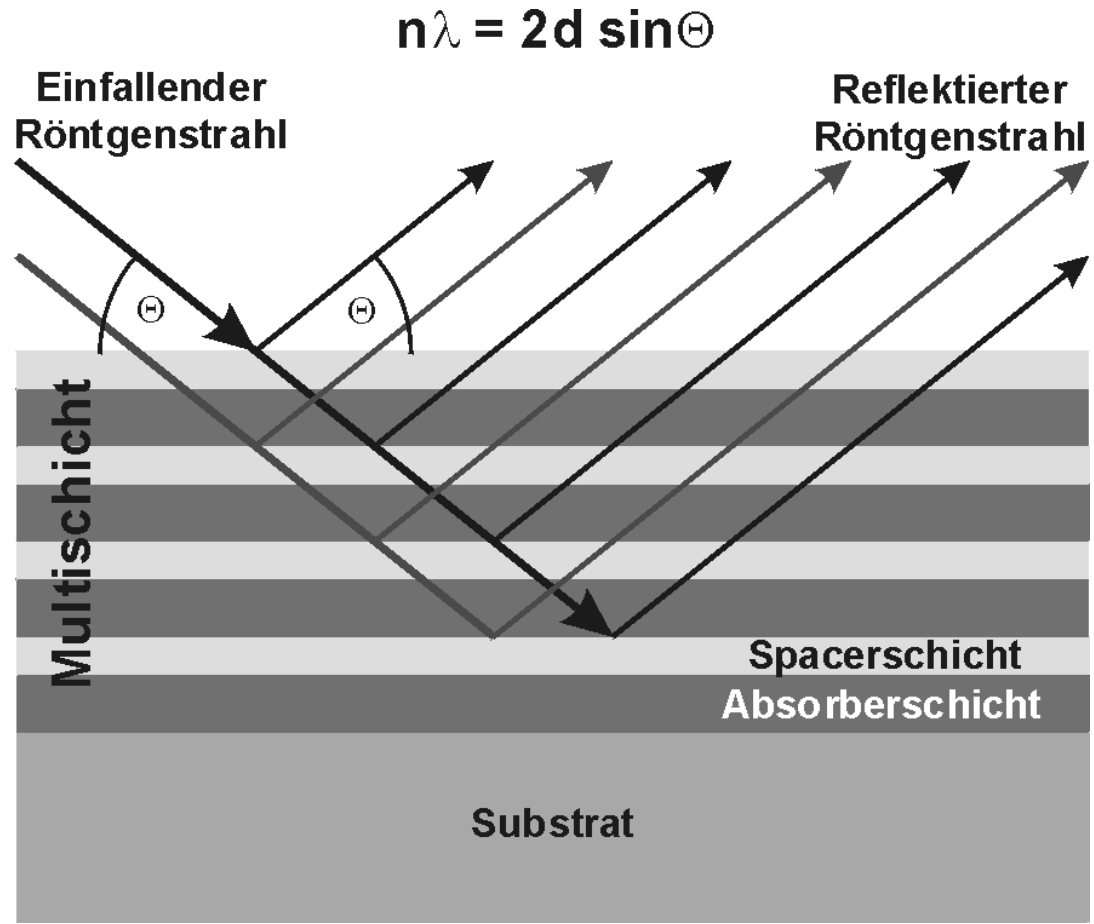
Röntgenreflexion an nm-Multischichten

Interferenz aller reflektierten Teilstrahlen

=> Reflexionen außerhalb der Totalreflexion bis zu 90%

In Abhängigkeit von der Anwendung (λ , Θ) können Schichtmaterialien, Periodendicken und Schichtdickenverhältnisse frei gewählt werden

Möglichkeit der Realisierung von lateralen Schichtdickengradienten



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Anforderungen an EUV- und röntgenoptische Multischichten

- höchste Reflexion (EUVL: 1 % Verbesserung bei einem Spiegel ergibt ~ 15 % Verbesserung beim Gesamtsystem mit ~ 10 Spiegeln)
- präzise Gradienten mit zulässigen Abweichungen von $< 0,1$ %
- hohe run-to-run Reproduzierbarkeiten des Beschichtungsprozesses (alle Spiegel müssen bei der gleichen Wellenlänge reflektieren)
- geringste Eigenspannungen der Multischichten (präzise Kontur des Substrates darf nicht gestört werden)
- thermische und Langzeitstabilität

=> Notwendigkeit geeigneter Beschichtungsverfahren

Kandidaten: Evaporation, Sputter Deposition, Puls-Laser-Deposition

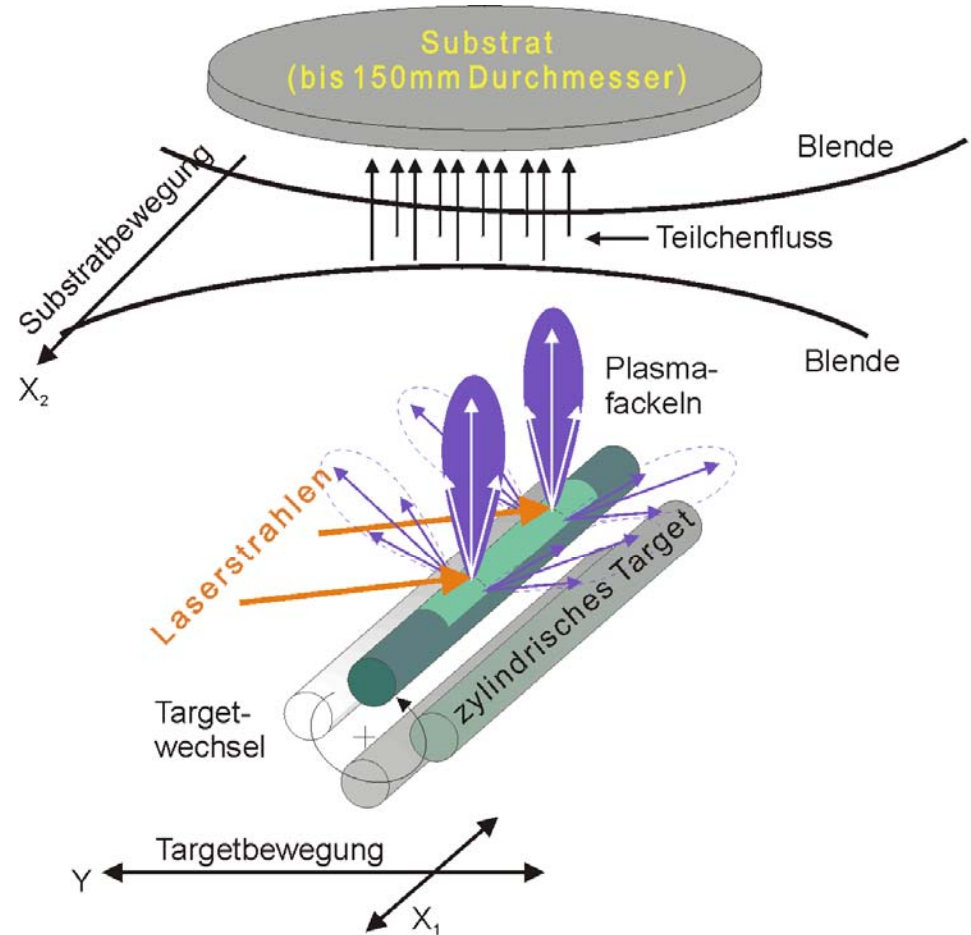


Fraunhofer

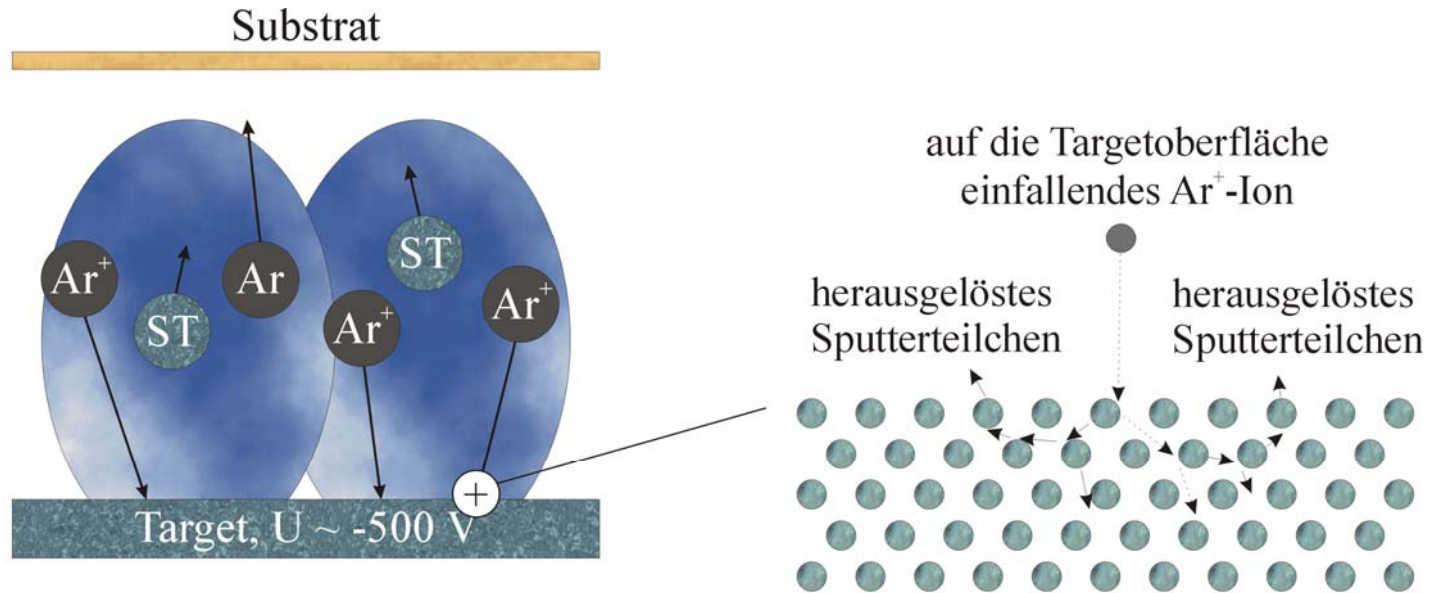
Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Synthese von nm-Multischichten – Puls-Laser-Deposition (PLD)

- UHV-Prozess => hohe Reinheiten der Schichten
- breite Materialpalette
- Teilchenenergien: ~ 100 eV
- signifikante ballistische Durchmischung der Schichten
- extrem glatte Grenzflächen
- $\rho_{\text{Schicht}} < \rho_{\text{bulk}}$



Synthese von nm-Multischichten – Magnetron-Sputter-Deposition (MSD)



- Ar^+ = Ar^+ -Ionen des Plasmas
- Ar = neutralisierte und am Target reflektierte Ar-Atome
- ST = aus dem Target herausgelöste Sputterteilchen (ST)

- > Trajektorie des einfallenden Ar^+ -Ions
- > Trajektorien der Targetatome

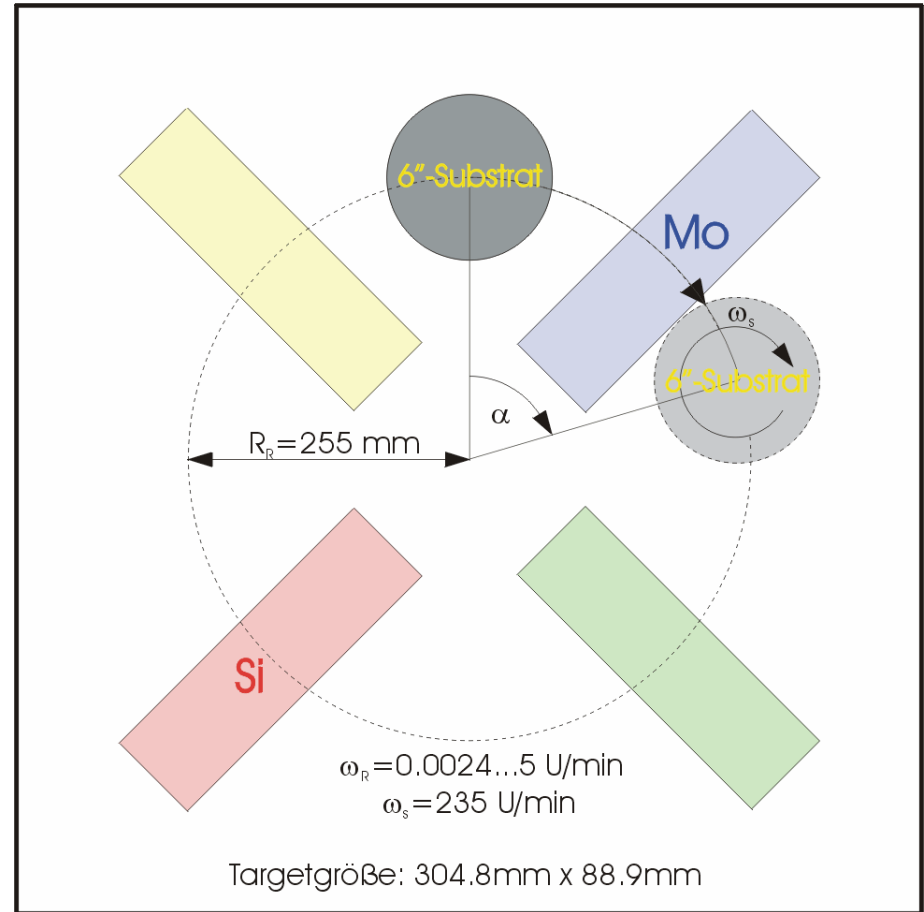


Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Synthese von nm-Multischichten – Magnetron-Sputter-Deposition

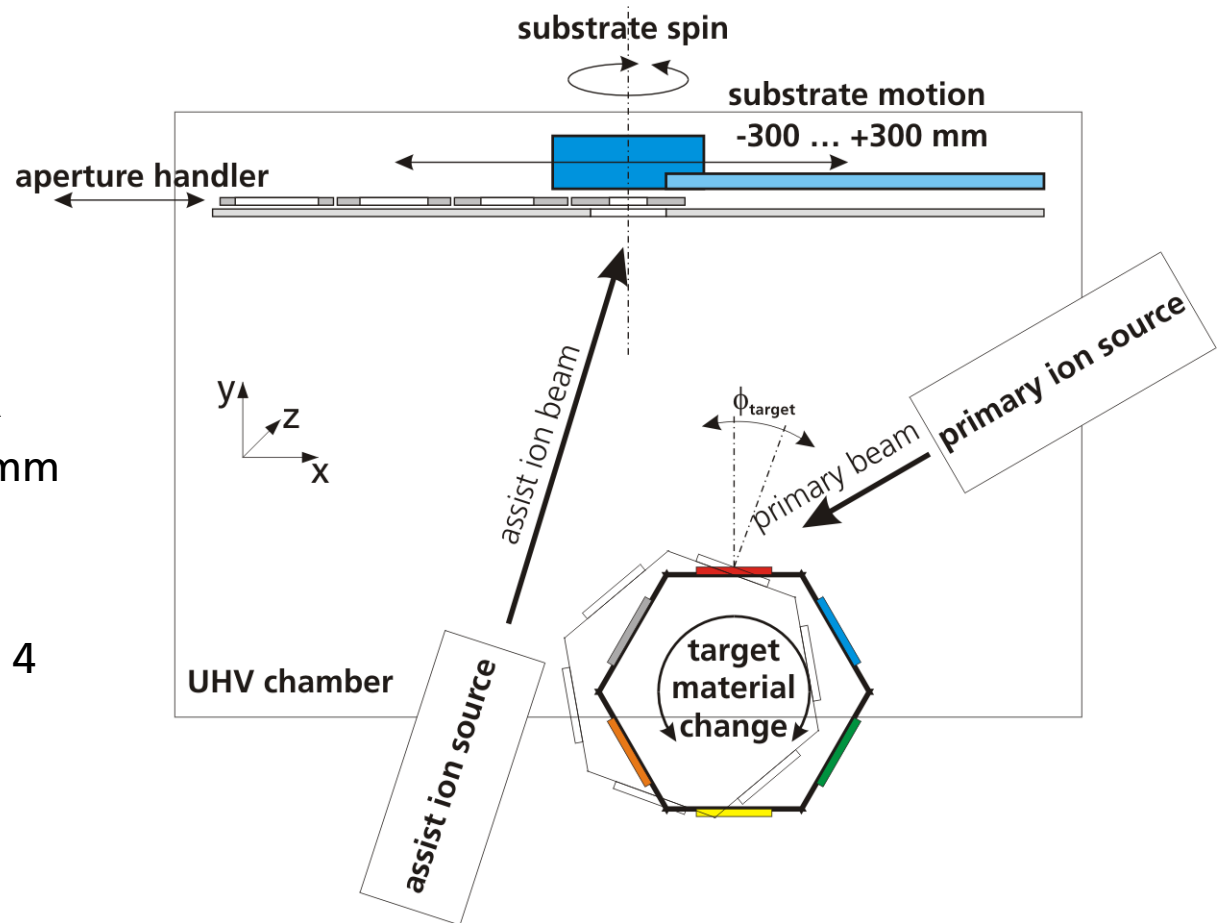
- Sputtergas: Ar,
 $p_{\text{Ar}} \geq 0,7$ mTorr
- Teilchenenergien: ~ 10 eV
- deutlich geringere
Durchmischung der Schichten
als bei der PLD
- „ausreichend“ glatte
Grenzflächen
- $\rho_{\text{Schicht}} \approx \rho_{\text{bulk}}$



Ionenstrahl-Sputter-Deposition (IBSD ... ion beam sputter deposition)

UHV-Spezialanlage
(Roth & Rau, IWS)

- Vakuum: $p < 2,0 \cdot 10^{-8}$ mbar
- Ionenstrahlquellen:
 - Anregungsprinzip: ECR
 - Größe: linear, $L = 400$ mm
 - $E_{\text{ion}} = 50 - 2000$ eV
- Targetanzahl: 6
- Anzahl der Substratblenden: 4
- Substrate:
 - $\varnothing 200$ mm mit Spin
 - $L = 500$ mm ohne Spin



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

ROTH
&RAU

Ionenstrahl-Sputter-Deposition (IBSD ... ion beam sputter deposition)



siehe Workshop-Vortrag am 15.03.06, 12:30:
Peter Gawlitza: „Der Einsatz der Ionenstrahlsputtertechnik zur Abscheidung von hochpräzisen Nanometer-Multischichten“



Fraunhofer

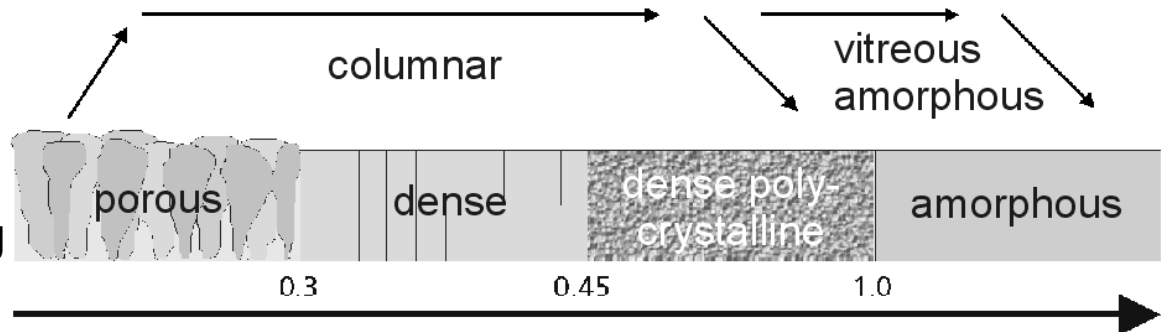
Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

**ROTH
&RAU**

Warum verschiedene Beschichtungsverfahren?

$E_{\text{particle}} \sim 100 \text{ eV}$:

- extrem glatte amorphe Schichten
- ballistische Durchmischung der einzelnen Materialien
- $r_{\text{film}} < r_{\text{bulk material}}$



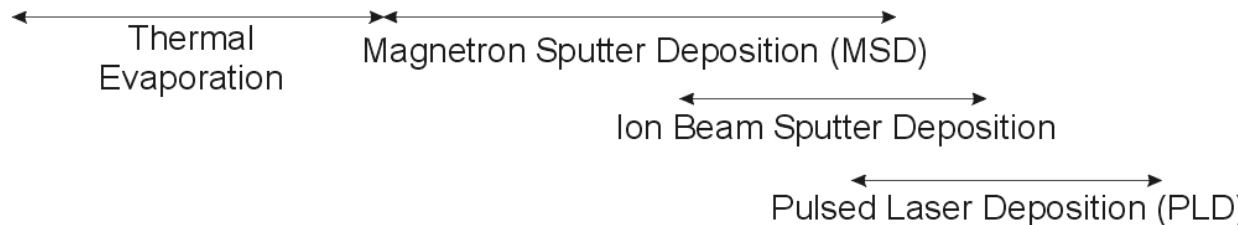
generalized temperatur $T = T_s/T_m = \text{total particle energy} / \text{activation energy}$

T_s = actual total energy (kinetic, electronic, chemical)

T_m = activation energy of surface self-diffusion and free energy of solidification

$E_{\text{particle}} \sim 10 \text{ eV}$:

- reduzierte Durchmischung
- $r_{\text{film}} \approx r_{\text{bulk material}}$
- "ausreichend" glatte Schichten



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Bedingungen für einen hohen Reflexionsgrad der Multischichten

- **Auswahl geeigneter Materialien, Schichtdicken, Periodenzahlen**
=> Modellberechnungen mit Tabellenwerten (Henke-Daten + IMD, D. Windt)
 - **strenge Periodizität der Schichtdicken in Tiefenrichtung der Multischicht**
=> Stabilisierung des Beschichtungsprozesses (Technologieentwicklung)
 - **Multischichten mit abrupten, scharfen Grenzflächen (steile Konzentrationsgradienten)**
=> Einsatz von Diffusions- und Reaktionsbarriereschichten
 - **Multischichten mit morphologisch glatten Grenzflächen (keine Rauheiten)**
=> geeignete kinetische Energien der schichtbildenden Teilchen
 - **Einzelschichten mit geringer Absorption und hohem röntgenoptischem Kontrast**
=> Abscheidebedingungen (Rest- und Sputtergas, Entladungsleistungen), Schichtdicken
 - **geeignete Deckschichten (Oxidation, Kontamination)**
=> chemische Betrachtungen
-



Bedingungen für einen hohen Reflexionsgrad der Multischichten

- Auswahl geeigneter Materialien, Schichtdicken, Periodenzahlen
=> Modellberechnungen mit Tabellenwerten (Henke-Daten + IMD, D. Windt)
- strenge Periodizität der Schichtdicken in Tiefenrichtung der Multischicht
=> Stabilisierung des Beschichtungsprozesses (Technologieentwicklung)
- **Multischichten mit abrupten, scharfen Grenzflächen (steile Konzentrationsgradienten)**
=> Einsatz von Diffusions- und Reaktionsbarriereschichten
- **Multischichten mit morphologisch glatten Grenzflächen (keine Rauheiten)**
=> geeignete kinetische Energien der schichtbildenden Teilchen
- Einzelschichten mit geringer Absorption und hohem röntgenoptischem Kontrast
=> Abscheidebedingungen (Rest- und Sputtergas, Entladungsleistungen), Schichtdicken
- geeignete Deckschichten (Oxidation, Kontamination)
=> chemische Betrachtungen

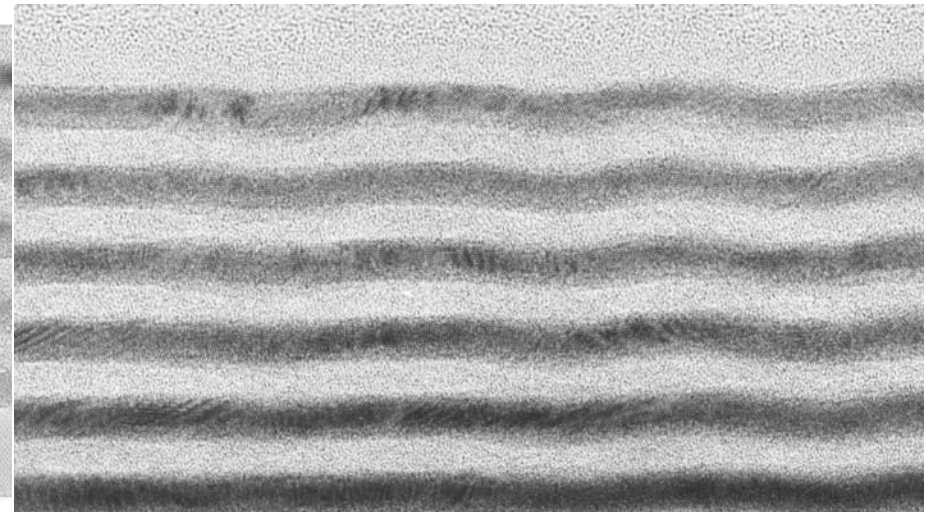
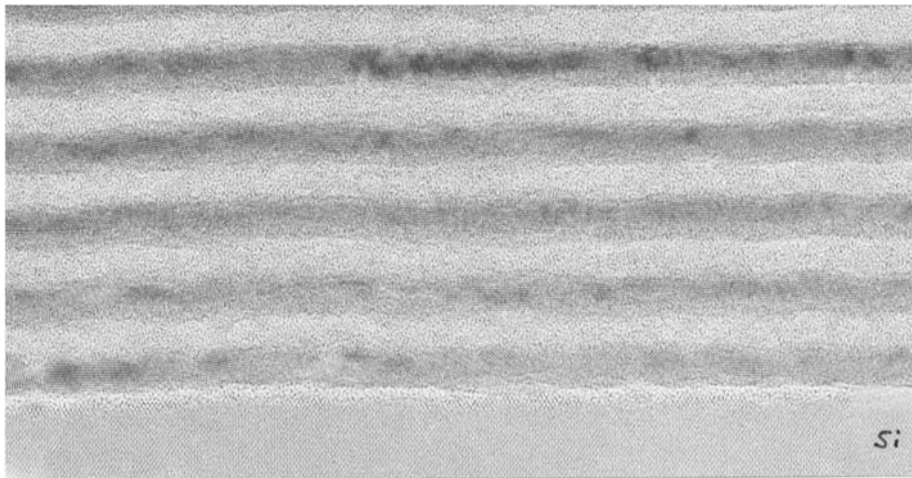


Substrat- und Schichtrauheiten

Akkumulation der Grenzflächenrauheit bei höheren Sputtergasdrücken
=> Nachweis mittels HRTEM

Substratnaher Bereich

Oberflächennaher Bereich



Multischicht: Si-Substrat/40(Mo/Si), $p_{Ar} = 1,5 \times 10^{-3}$ mbar



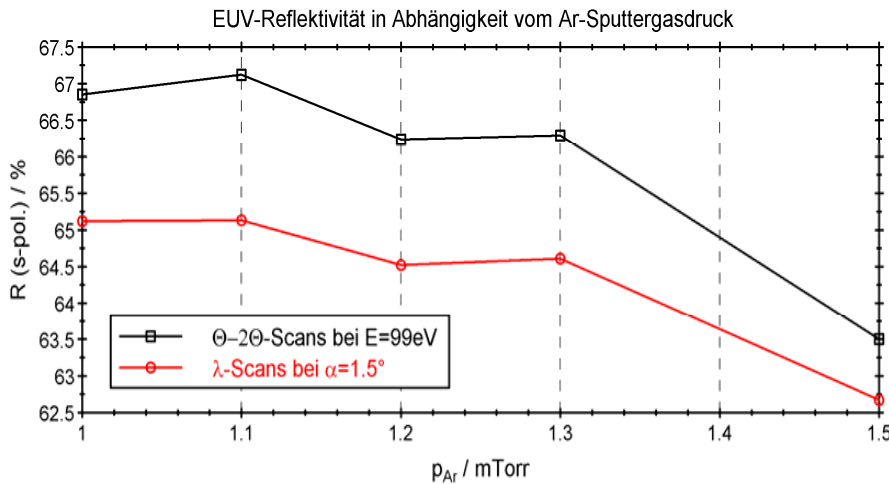
Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

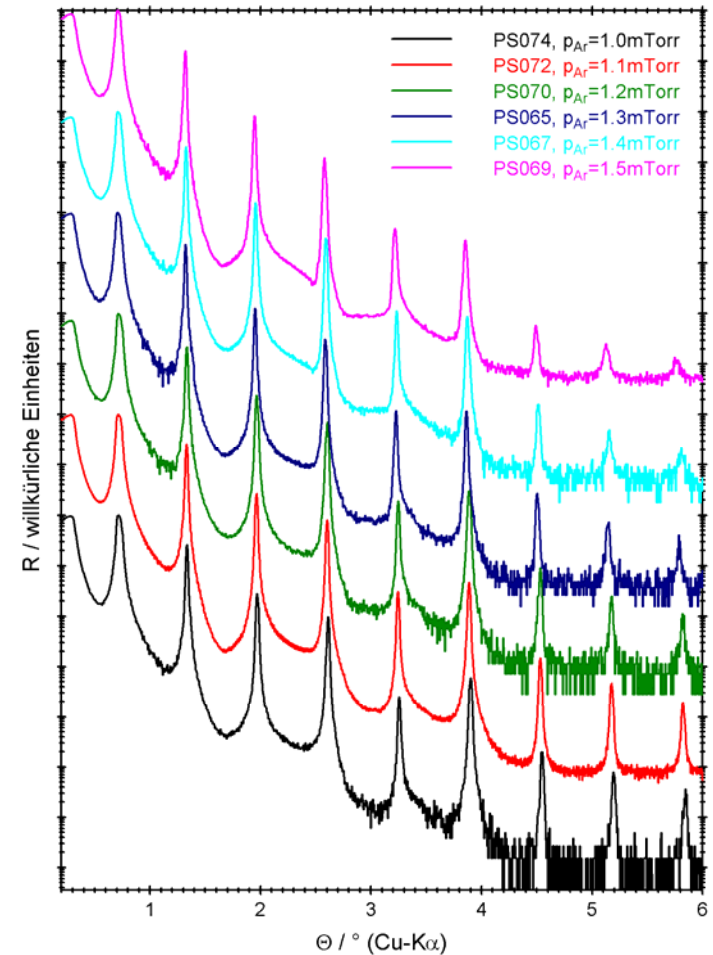
Substrat- und Schichtrauheiten

Variation des Ar-Sputtergasdrucks
 => Beeinflussung der mittleren kinetischen Energie der schichtbildenden Teilchen, Druckerhöhung bewirkt Energieverlust durch höhere Stoßwahrscheinlichkeit

$p = 10^{-3}$ mbar => mittlere freie Weglänge ≈ 60 mm
 (Target-Substrat-Abstand = 65 mm)



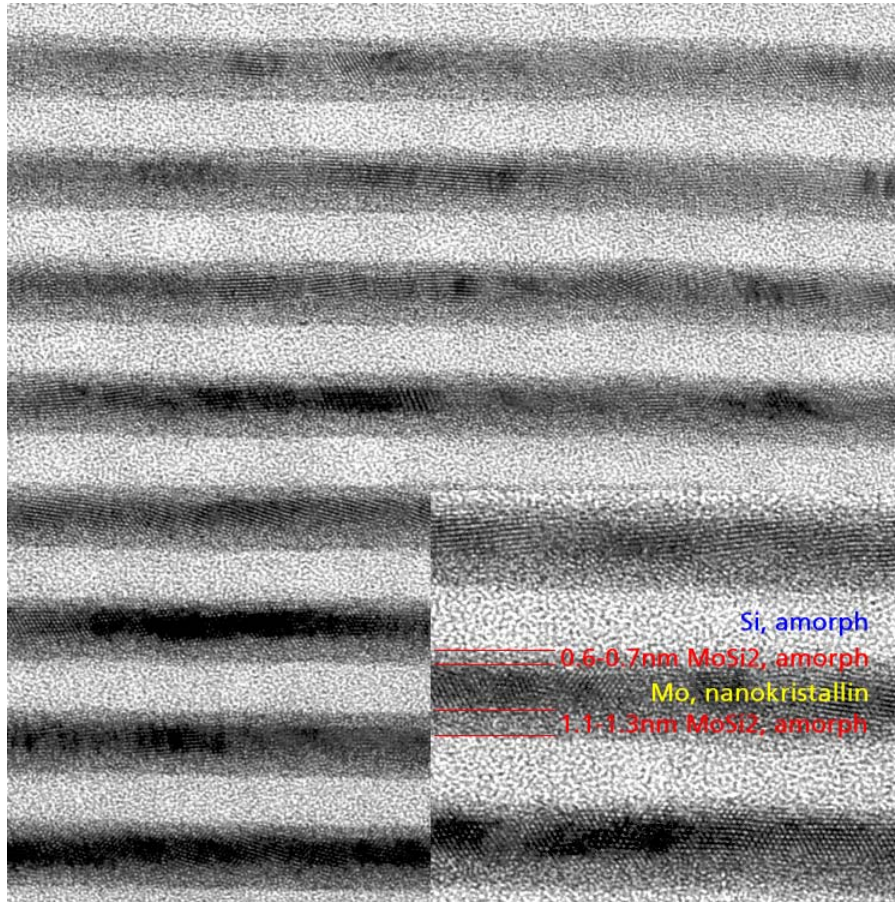
Cu-K α -Reflektogramme von Mo/Si-Multischichten, die bei unterschiedlichen Ar-Drücken gesputtert wurden



Fraunhofer

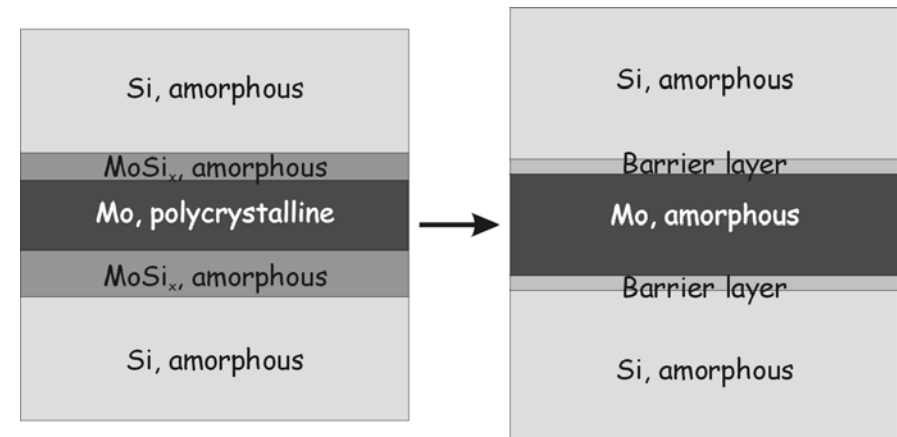
Institut
 Werkstoff- und
 Strahltechnik

Interdiffusion an den Grenzflächen der Multischicht



- Grenzfläche Mo-auf-Si: 1,1-1,3 nm $a\text{-MoSi}_x$
- Grenzfläche Si-auf-Mo: 0,6-0,7 nm $a\text{-MoSi}_x$

Idee: Reduzierung der Grenzflächen-Interdiffusion durch Einsatz von Diffusionsbarriereschichten



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

MSD: Barrierschichten im Mo/Si-Multischichtstapel: optimale Dicken

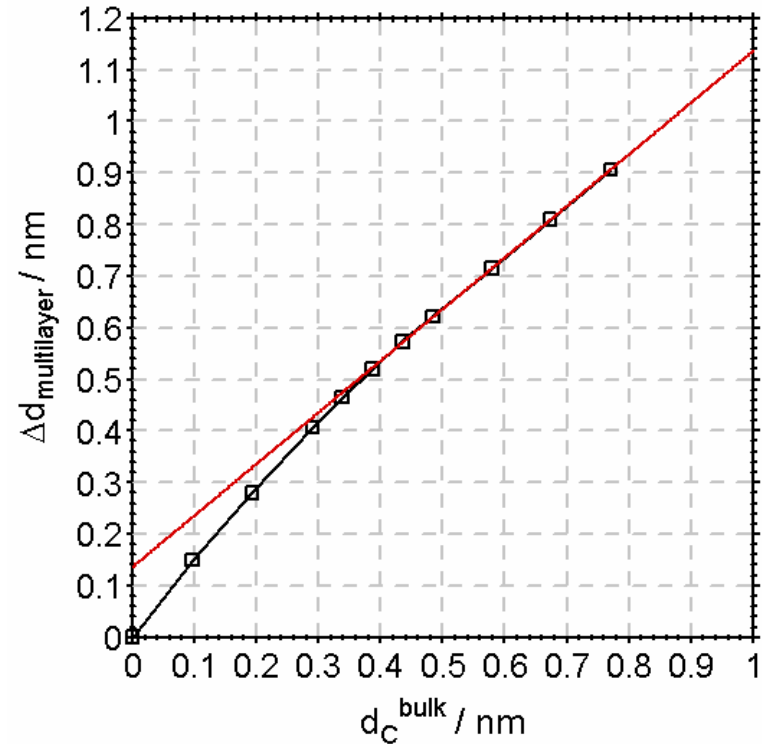
Experimentelle Ergebnisse – Cu-K α -Reflektometrie

Anforderungen an Barrierschichten:

- ausreichend dick, damit Interdiffusion größtmöglich verringert wird
- möglichst dünn, damit optisches Verhalten günstig ist

Bestimmung der notwendigen Barrierschichtdicken:

- Reines Mo/Si:
Periodendickenkontraktion = 0,51 nm
- Einbau von Barrierschichten
=> Verringerung der Kontraktion
- optimale Barrierschichtdicke, wenn keine Kontraktionsverringering mehr möglich ist



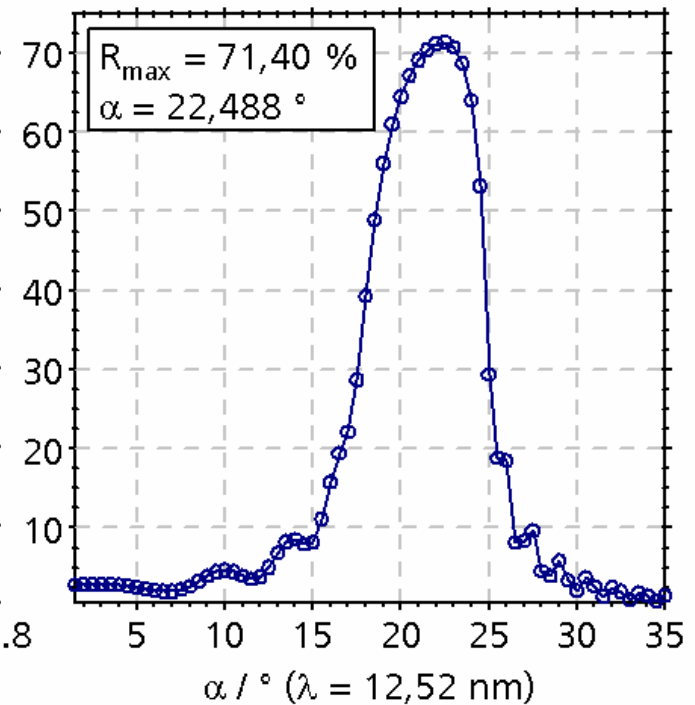
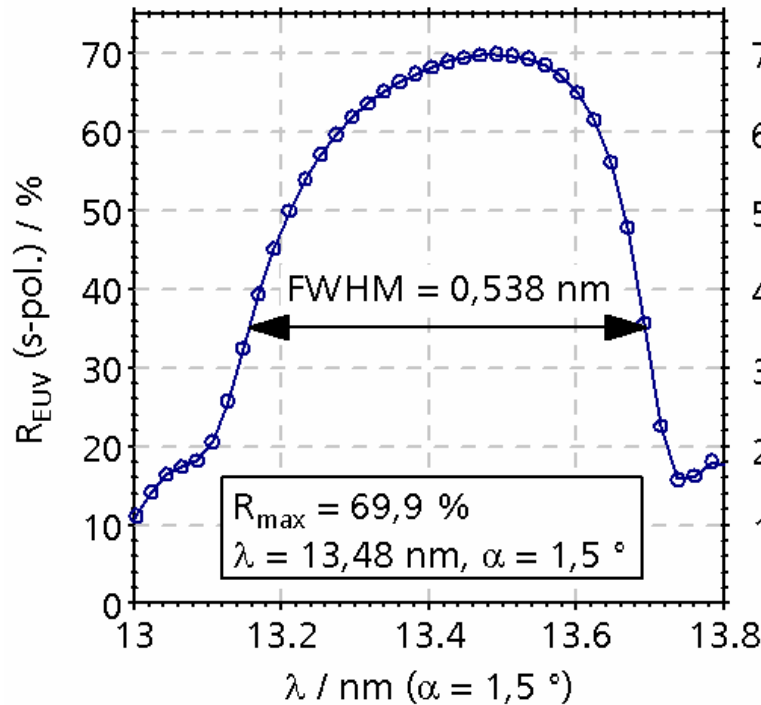
MSD: Barrierschichten im Mo/Si-Multischichtstapel: EUV-Reflexionsgrad

Experimentelle Ergebnisse – EUV-Reflektometrie an $59(\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}/\text{Si}/\text{C})/\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}/\text{Si}$

polykristalline
Mo-Schichten:

$R_{\text{EUV}} = 69,9 \%$
($\lambda = 13,5 \text{ nm}$,
 $\alpha = 1,5^\circ$)

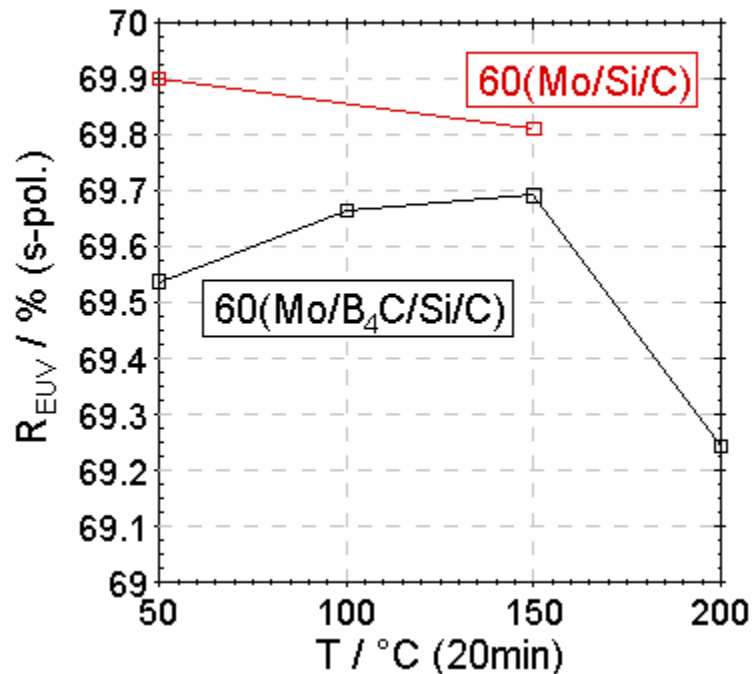
$R_{\text{EUV}} = 71,4 \%$
($\lambda = 12,5 \text{ nm}$,
 $\alpha = 22,5^\circ$)



Mo/Si multilayers for EUV applications

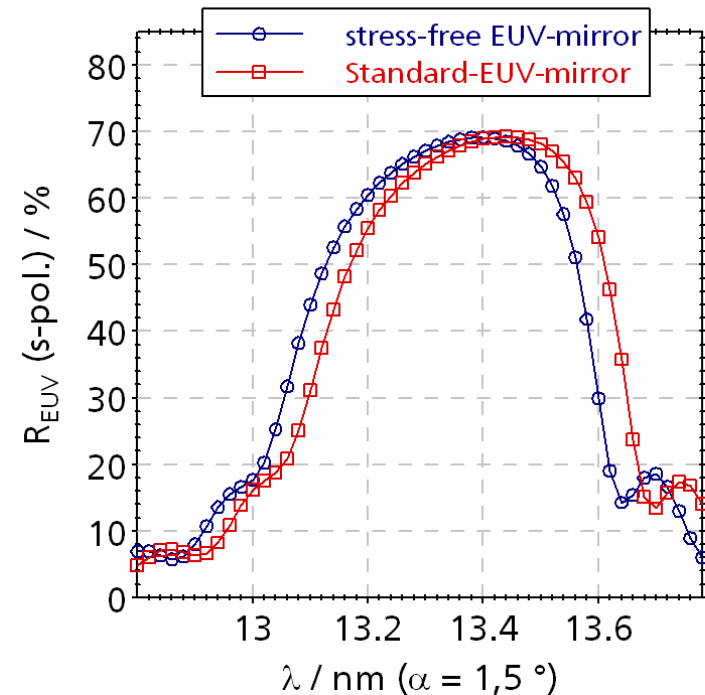
Thermische Stabilität:

=> EUV-Reflexion > 69 % sogar nach
Temperung bei $T = 200\text{ °C}$



Reduzierung der inneren Spannungen:

=> EUV-Reflexionsverlust von 0.1 %



EUV-Reflektometrie

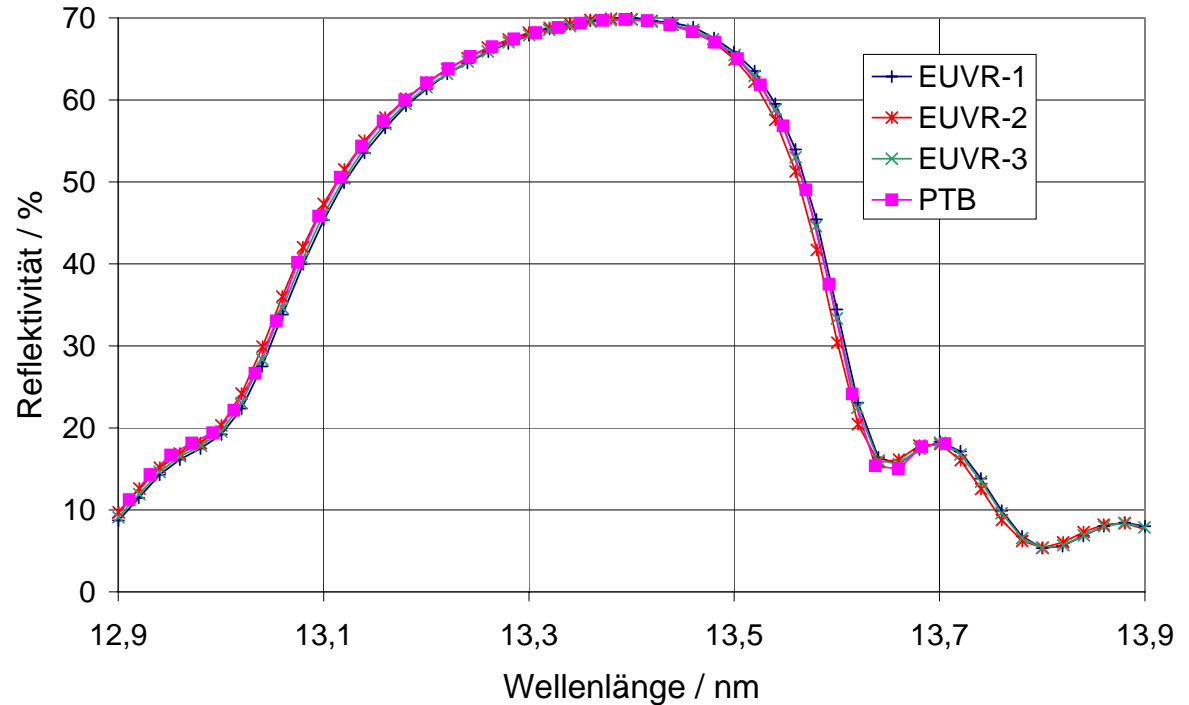
- Wellenlänge: 10 – 16 nm
- Stand-alone Gerät
- höchste Messgenauigkeit
- Probendimensionen:
 - Durchmesser: ≤ 500 mm
 - Dicke: ≤ 200 mm
 - Masse: ≤ 30 kg



Vergleich von EUV-Messungen der PTB und des IWS

- 10 shots / λ
- Theta: 85°

	EUVR	PTB
R	70,02 %	69,81 %
σ (R)	< 0,2 %	0,07 %
λ_{50}	13,331 nm	13,328 nm
σ (λ_{50})	0,02 %	0,008 %
FWHM	0,535 nm	0,537 nm



Kontakt Daten

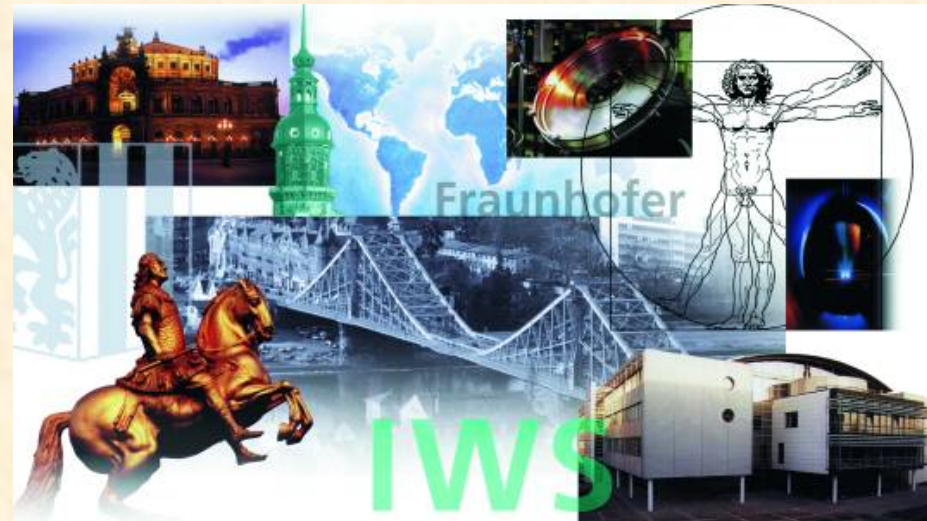
Dr. Stefan Braun

IWS Dresden, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik
Abteilung „EUV- und Röntgenoptiken“
Winterbergstraße 28
01277 Dresden

Telefon: 0351 / 2583 323

Fax: 0351 / 2583 314

E-Mail:
Stefan.Braun@iws.fraunhofer.de



Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik