

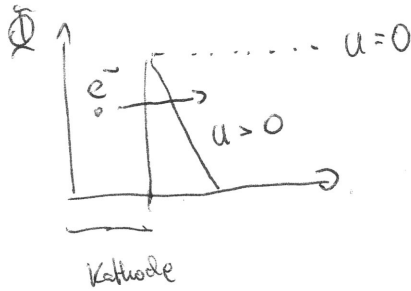
29. Oktober 2015

1.2 Prinzipieller Aufbau eines Elektronenmikroskops

1. Elektronenquellen: Erzeugung und Beschleunigung d. Elektronen

- Thermische Kathoden: z.B. V-förmige Spitzen Wolfram (2500°C)
LaB₆ (1500°C)

- Feldemissionskathoden z.B. W-Spitzen mit $R = 100\text{ nm}$
 $E \sim \frac{U}{R} = 10^9 \frac{\text{V}}{\text{m}}$



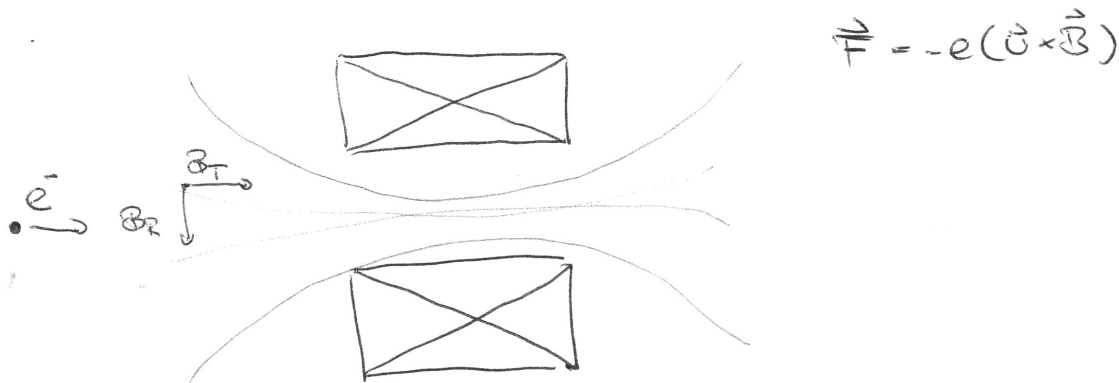
(Tunnelemissionsstrom)

Vorteile: $\sim 10^6$ fach höhere Stromdichte

- kleinerer Emissionsfleck
 $\Rightarrow$ hohe Brillanz β

Nachteil: Ultrahochvakuum (UHV) $\sim 10^{-9} \text{ Pa}$ notwendig

2. Elektronenlinsen (meist magnetische Linsen)



$$\theta = \sqrt{\frac{e}{8m\omega^*}} \cdot B \cdot L \quad \omega^* = \omega \left(1 + \frac{eU}{2E_0}\right)$$

$\hookrightarrow$ Rotationswinkel $\sim B$

Projektion in Meridianebene:

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8m\omega^*} B^2 L$$

Brechkraft $\sim B^2 > 0$

$\rightarrow$ nur Sammellinsen

$B \propto I$

$\rightarrow$ Brennweite kontinuierlich veränderbar

Man unterscheidet:

- Kondensorlinsen (Abbildung d. Quelle auf Probe, Beleuchtungsbedingungen)
- Objektivlinsen $f = 1-3 \text{ mm}$ $V = 10-100 \times$
- Zwischenlinsen, Projektivlinsen

Linienfehler

• sphärische Aberration (Öffnungsfehler)

$$r_s = \frac{1}{4} C_s \alpha^3$$

α ist der halbe Öffnungswinkel der Linse

$\Rightarrow \alpha$ sollte klein sein

aber: Rayleigh-Kriterium: $d_o = \frac{0.61 \lambda}{n \cdot \sin(\alpha)}$

$\Rightarrow \alpha$ sollte groß sein

$$\Rightarrow \text{optimaler Öffnungswinkel } \alpha_{\text{opt}} = 1.14 \left(\frac{\lambda}{C_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$d_o = 0.43 (C_s \lambda^3)^{\frac{1}{4}}$$

Bsp.: $U_0 = 100 \text{ keV}$ $f = 4 \text{ mm}$ $C_s = 3.5 \text{ mm}$

$$\alpha_{\text{opt}} \approx 0.6^\circ \quad d_o \approx 0.5 \text{ nm}$$

kleine λ perher $\Rightarrow$ große Tiefenschärfe

• chromatische Aberration (Farbfehler)

hervorgehen durch: Fluktuationen der Beschleunigung δU ,

Instabilität des Stromes durch Linsenspulen δI

Energieverlust durch Streuung

$\rightarrow$ Schwankung der Brechzahl und der Elektronengeschw.

$$r_c = C_c \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta E}{E} = C_c \cdot \alpha \left(2 \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta U}{U} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Bsp: $C_c = 3.6 \text{ mm}$, $r_c = 0.45 \text{ nm}$, $\alpha = 0.6^\circ$

$$\Rightarrow \Delta E = 5.2 \text{ eV}$$

$\Rightarrow$ benötige hohe Stabilität d. Linsenstromes und d. Beschleunigungsspannung

• Astigmatismus (Fokus in x- und y-Ebene unterschiedlich)

Ursache: Herstellungsfehler

Abläufe: Stigmatoren (2 schwache Zylinderlinsen senkrecht zueinander, x + y stigmator)

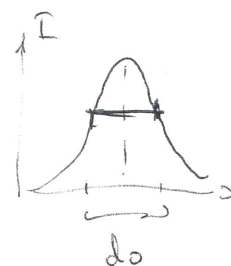
Weitere Fehler

• endliche Ausdehnung der Elektronenquelle

begrenzt Auflösung $d_0 = \left(\frac{4 F_P}{\pi^2 \beta} \right)^{1/2} \alpha^{-1} = C_0 \cdot \alpha^{-1}$

Summe aller Fehler:

$$d^2 = \left(\frac{C_0}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} C_s \alpha^3 \right)^2 + \left(\frac{0.6 \lambda}{\alpha} \right)^2 + \left(C_c \frac{\Delta E}{E} \cdot \alpha \right)^2$$



3. Detektoren

Abhängig von den zu detektierenden Signalen

1. Was wird detektiert?

2. Wie entsteht ein Bild?

1.3 WW des Elektronenstrahls mit der Probe

Der einfallende Elektronenstrahl kann

1. elastisch / inelastisch gestreut werden

$$\Theta > \frac{\pi}{2} \quad \text{Rückstreuungselektronen}$$

$$\Theta < \frac{\pi}{2} \quad \text{Transmittierte Elektronen}$$



2. ein Leitungs-/Valenzelektron heraus-schlagen $\rightarrow$ Sekundärelektronen ($< 50 \text{ eV}$)

3. Kernelektronen heraus-schlagen

- Leerstelle wird aufgefüllt $\rightarrow$ char. Röntgenstrahlung

- {kernelektron. EL. / oder Photon} Licht anderer Elektronen heraus $\rightarrow$ tuger-Elektronen

4. Weitere Sekundärprozesse

1.4 Rasterelektronenmikroskopie (SEM/ZEM)

Mögliche Prozesse im SEM:

1. el. Rückstreuung $E = E_0$

2. inel. Rückstr. $E \approx E_0 \sim 50 \text{ eV}$

3. Emission char. Röntgenstr.

4. + " - von tuger-Elektronen $E \approx 0.1 \dots 1 \text{ keV}$

5. - " - von Sekundärelektronen $E < 50 \text{ eV}$

Interpretation der SEM-Abbildung

- Kenntnis des Rückstreuungskoeffizienten $\eta = \eta(\Theta, Z, E)$

- " - der Sekundärelektronen ausbeute $\delta = \delta(\Theta, Z, E)$

$\Rightarrow$ Kenntnis von $\frac{d^2\eta}{dE d\Omega}$

a) Abbildung mittels Sekundärelektronen

Energieverlust entlang Elektronen Trajektorie modelliert durch 'Continuous-Slowing Down-Approximation' (Bethe's Verlustformel, Bremsvermögen).

Mittlerer Energieverlust $E_m = N \cdot Z \cdot \int_{W_{min}}^{W_{max}} \frac{d\sigma}{dw} W dw$

↑
Coulomb-WW

$$S = \left| \frac{dE}{ds} \right| \sim E^{-1} \ln\left(\frac{E}{J}\right)$$

Energieverlust
pro Weglänge

J : mittleres Anregungspotential d. Probe

bzw für nicht-relativistische Energien $E \leq E_0 = mc^2$

$$S = \left| \frac{dE}{ds} \right| = 7.8 \cdot 10^{10} \frac{Z}{A} \frac{1}{E} \ln\left(1.166 \frac{E}{J}\right)$$

} semi-empirische Formel

$$J = 8.76 Z + 58.8 Z^{-0.13}$$

Zur Berechnung der SE-Ausbeute:

Annahme: 1. S ist konstant auf Länge $t_{SE} \ll R$

$$2. p(z) = P(0) \cdot \exp\left(-\frac{z}{t_{SE}}\right)$$

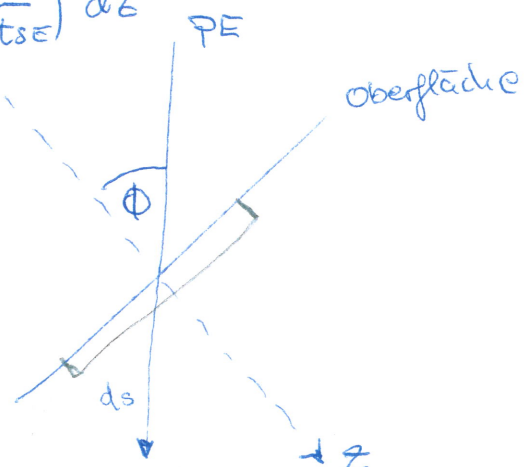
Wahrscheinlichkeit,
dass SE ausstritt

~~SE-Tiefe~~
SE Signaltiefe

Tiefe der WW-Binne

$$\Rightarrow S \sim E^{-1} \ln\left(\frac{E}{J}\right) \frac{1}{\cos \phi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z}{t_{SE}}\right) dz$$

$$\sim E^{-0.8} \cdot t_{SE} \cdot \frac{1}{\cos \phi}$$



b) Abbildung mittels Rückstreuungselektronen (BSE)

$\eta(\phi) \rightarrow$ topographischer Kontrast

$\eta(z) \rightarrow$ Materialkontrast, Zusammensetzung

empirischer Zusammenhang

$$\eta(z, \phi) = (1 + \cos \phi)^{-\frac{9}{12}}$$

• Materialkontrast ist höher bei großer z -Differenz

$\Rightarrow$ Atomzahlkontrast $C = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1}$

$\eta(z, \phi)$ ist stark anisotrop $\Rightarrow$ Kristallorientierungskontrast (Channeling)

Voraussetzung: - Strahldivergenz $< 0,1$ mrad

- Spitzeneraperker $\approx 1-10$ mrad

- „hervorragende“ (glatte) Oberfläche

Ursache: WW der PE mit Kristallelektronen (Blochwellen)

max. Änderung $\frac{\Delta \eta}{\eta} \approx 1-10\%$ für $E_0 = 1-20 \text{ keV}$

$\Rightarrow$ zur Abbildung d. Kristallorientierung

$\Rightarrow$ — + — von Kristalldefekten

1.5 Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

Zwei Betriebsmodi: - Abbildungsmodus
- Beugungsmodus

Voraussetzung: dünne, für e^- transparente Proben

↓
- $< 100 \text{ nm}$ für Experimente mit geringer Auflösung
- $< 10 \text{ nm}$ für HRTEM

⇒ hoher Präparationsaufwand

Interpretation der Daten schwierig, insbesondere bei HRTEM.

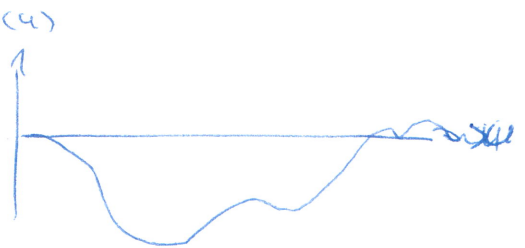
Wichtig: Kenntnis der Kontrasttransferfunktion

$$T(u) = A(u) \cdot E(u) \cdot \exp(i\chi(u))$$

↑ ↑ ↑
Apertur Kohärenz- Phasebeitrag
 verlust
 (≙ chrom.
 Aberration)

$$[u] = \frac{1}{\lambda \cdot f} \quad 1$$

$$\chi(u) = \frac{\pi}{\lambda} \left(\Delta f u^2 + \frac{C_s}{2} \cdot u^4 \right)$$



u ist ~~Venialle~~ im Fourierraum $u = k$

→ 1. Nulldurchgang von $T(u) \hat{=}$ Auflösung des TEM
Phasenfaktor: Vorzeichenwechsel → Kontrastumkehr

u

1.6. Weitere analytische Verfahren

► EELS: Electron energy loss spectroscopy

Energiebereich der Gitteranregungen (Phononen)

$\sim 10 - 100 \text{ meV}$

der kollektiven Anregungen des El. Systems
(Plasmonen) $\sim 1 - 50 \text{ eV}$

der Anregungen der inneren Elektronen
 $> 100 \text{ eV}$

Energieauflösung: $< 10 \text{ meV}$

↳ HREELS, Vermeidung der Mehrfachstreuung

↳ SPEELS (spin polarized eels), Untersuchung der mag. Struktur

► XPS: x-ray photoelectron spectroscopy

► AES: Auger electron spect.

XPS, AES: Untersuchung der elektronischen Eigenschaften
(Bandstruktur, Bindungsenergie)

Man unterscheidet:

UV 365 - 436 nm

deep UV (DUV) 157 - 250 nm

extreme UV (EUV) 11 - 14 nm

Röntgen < 10 nm

Hg-Dampf Lampe:

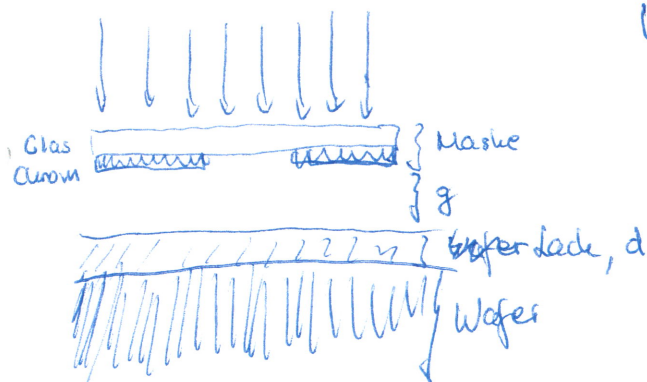
→ 436 nm	g-Linie	} meist verwendet
→ 405 nm	n-Linie	
→ 365 nm	i-Linie	

3.1 Grundprinzipien

3.1.1 "mask aligning" = 1:1 Abbildungsverfahren

Kontaktlithografie $\xrightarrow{\text{Abstand Maske-Substrat}}$ Proximity-Lithografie

vacuum contact $\rightarrow$ hard contact $\rightarrow$ soft contact



Unschärfe des Abbildes $w = k \cdot \sqrt{\lambda(g+d)}$

Materialkonstante (Lack abhängig) $\downarrow$

Wellenlänge λ Abstand Lochdi. $g+d$

Ausrichten der Maske über zwei Ausrichtungsmarkierungen (Kreuze)

3.1.2 Projektionslithografie:

1:1 Abbildung
Reduktionsprojektion ($S=1$)

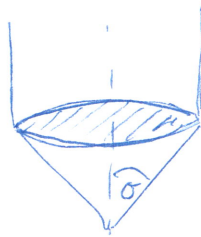
Qualität des Abbildes hängt ab

- von der Auflösung R der Abbildungsoptik

$$R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

Technologie-Konstante
 $\approx 0.5 \dots 0.9$

numerische Apertur: Auflösungsverm. eines Objektivs



$$NA = n \cdot \sin \sigma$$

- von der Tiefenschärfe DOF

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}$$

R soll mögl. klein
 DOF soll mögl. groß
sein!

Bsp.: $\lambda = 436 \text{ nm} \rightarrow$ ein Strahlengt. $d = 0.65 \mu\text{m}$ (für $NA = 0.4$)

$$DOF = \pm 0.7 \mu\text{m}$$

$$\lambda = 365 \text{ nm}$$

$$DOF = \pm 0.8 \mu\text{m}$$

(für $NA = 0.45$)

Verfahren zur Verbesserung der Auflösung

3.1.3

Phasenschiebertechniken (PSM)

Ziel: zusätzliches Licht im Abb. Strahlengang mit 180°

Phasendifferenz zum Abb. Strahl

$\rightarrow$ durch Superposition wird Auslöschung erzielt

$\rightarrow$ Kontrasterhöhung, Verbesserung d. Auflösung + Tiefenschärfe

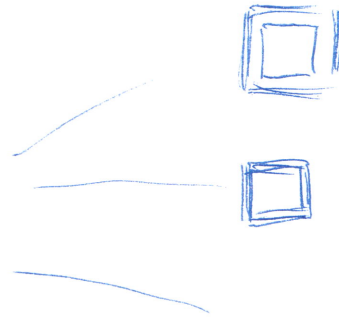
$$\phi = (n-1) \frac{2\pi d}{\lambda} = \pi \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\lambda}{2(n-1)} \quad \text{Dicke des Phasenschiebers}$$

Attenuated PSM: teildurchdringende Schicht (statt Cr-Schicht MoSiO)

Bsp: Intel MOSFET mit 30 nm Gate-Länge
(268 nm phase shift tool)

weitere PS-Techniken:

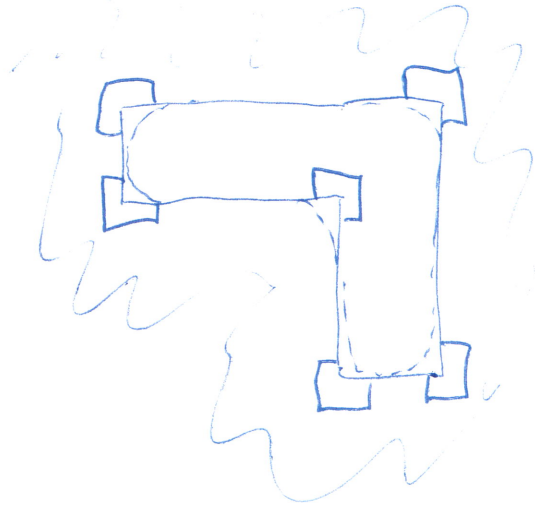
- auxiliary PSM
- rim PSM
- chromeless PSM



3.1.4 Off-axis-Beleuchtung (Folie 13)

Kontrasterhöhung (auch opt. Mikroskopie)
Verbesserung des Auflösungsvermögens
Vergrößerung der Fokustiefe

3.1.5 Optische Proximity-Korrektur (OPC)



unscharfes Abbildungsverhalten
führt zu Abminderungen
↳ optischer proximity effect

OPC: Bewusste Änderung der Maske
um Intensitätsunterschiede
auszugleichen, hinzufügen / weglassen
von Teilen der Maske

Zwei Methoden: - rule-based OPC

⊕ schnell ⊖ ungenau

- model-based OPC,

Berechnung der Intensitätsverteilung

⊕ genau ⊖ aufwändig, evtl. mehrere Iterationen

9. Januar.

3.1.6 Zusammenfassung: Grenzen d. opt. Lithografie

- Verkürzung der Wellenlänge: g-Linie $\rightarrow$ i-Linie $\rightarrow$ DUV $\rightarrow$ vacuum UV (EUV)
- Erhöhung der Auflösung:
 - off-axis Beleuchtung
 - phaseshift masks
 - opt. proximity - Korrekter
- verbesserte Resiste
 - Verringerung k_1 -Faktor < 0.3

$\Rightarrow$ Kombination der Methoden

3.2 Graustufen - Fotolithografie

zur Herstellung gekrümmter Photoresist (PR) - Profile
z.B. für mikroopt. Komponenten

Verwendung von Fotolacken mit geringem Kontrast z.B. DNQ-PR und mit geringer Ätzelektivität

Idee: Rastern der Fotomaske $\rightarrow$ Graustufen
(Variation der Pixeldichte /
#größe)

- pulse density modulation
- pulse width modulation

Pixelgröße $\lambda <$ Auflösungsvermögen der opt. Abbildung

$$R = \frac{\lambda}{(1+\sigma)NA} \quad \sigma: \text{Kohärenzfaktor}$$

$\delta = 0$: komplett kohärente Beleuchtung

$\delta = 1$: " inkohärente "

Verbesserung: • durch computerunterstützte Verfahren, z.B. 256 Graustufenstufen

Modelle: GRADED, LITHANO

Modelle: GRADED, LITHANO

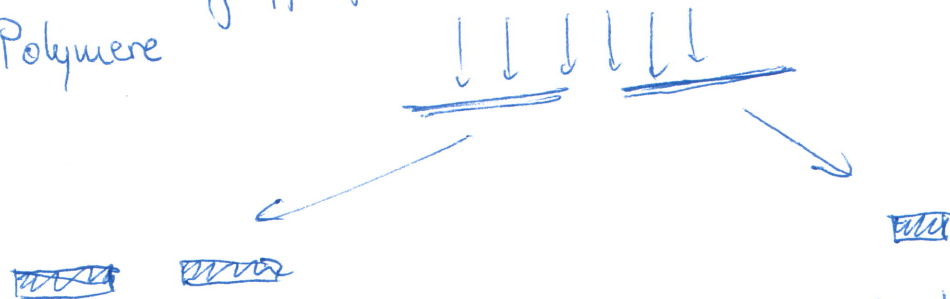
• Verwendung von HEBS-Glas als Maske

3.3 Direktschreibende Verfahren

siehe Folien

4. Fotolacke

Sammelbegriff für alle lichtempfindlichen makromolekularen Polymere



Positivlack

lange Kettenmoleküle werden aufgebrochen

lange Moleküle im Entwickler unlöslich
kurze " " " löslich

Negativlack

kurze Molekülketten werden zu langen Ketten vernetzt

4. Zutaten:
1. Harz / Polymer
 2. Lösungsmittel
 3. photoaktive Komponente (PAC)
 4. Additive

4.1 Charakteristische Eigenschaften und Beispiele

1. Empfindlichkeit:

- bestimmt die Belichtungslosis
- Parameter D_0 „dose to clear“ (mJ/cm^2)

2. Kontrast:

- direkter Einfluss auf die Auflösung
- hängt von Belichtungseigenschaften d. Laches ab.

Angabe eines Kontrastparameters:

$$\gamma_{\pm} = \frac{t_d - t_u}{\log_{10} D_d - \log_{10} D_u} = \pm \frac{1}{\log_{10} \left(\frac{D_d}{D_u} \right)}$$

t_d : Dichte des belichteten Resists

t_u : — — — unbelichteten „

$$\begin{pmatrix} t_d = 0 & t_u = 1 & \text{für } PR^+ \\ t_d = 1 & t_u = 0 & \text{für } PR^- \end{pmatrix}$$

3. Auflösung:

- bestimmt durch
- Molekulargewicht
- Kontrast und Resistdicke
- Entwicklungsbedingungen

4. $\bar{A}_k$ -Selektivität: $= \frac{\bar{A}_{\text{rate d. Substrats}}}{\bar{A}_{\text{rate des Lacks}}}$

5. Belichtungsspielraum $\rightarrow$ Folien

6. Prozessierungsspielraum

großer $\# \rightarrow$ Unempfindlichkeit gegen Abweichung von optimalen Parametern (T, t, c)

7. therm. Stabilität (Glastemperatur)

8. Aufquellen des Lacks

$\rightarrow$ Deformation der Struktur durch Einlagerung von Entwicklermolekülen

9. Viskosität

- bestimmt u.a. die Lackdicke

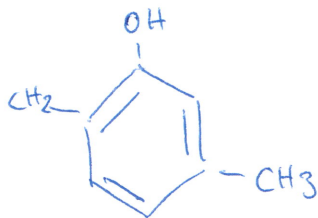
10. Haltbarkeit

L.1.1 Fotolacke für opt. Lithografie

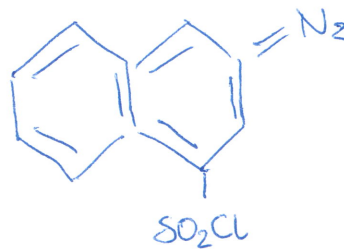
a) Positiv - Resist:

► Novolack / diazonaphthoquinonester (DNQ)

↑
Harz
"phenolisches Polymer"



↑
PAC



90% Marktanteil

Wasserlöslich

Für g- und i-Linien Lithografie

Wirkungsweise: DNQ $\left\{ \begin{array}{l} \text{unbelichtet: Löslichkeithemmer} \\ \text{belichtet: Löslichkeitserlöser} \end{array} \right.$

$\Rightarrow$ belichtete Regionen werden $\sim 100\times$ schneller aufgelöst

typ. Entwickler: NaOH (Natriumhydroxid)

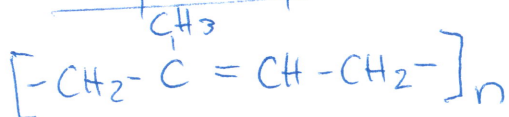
TMAH $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$

b) Negativ - Resist:

► Kodak Thin Film Resist

Auflösungsgrenze $\sim 2\mu\text{m}$ (Verwendung bis 1972)

Polymer: synth. Gummi

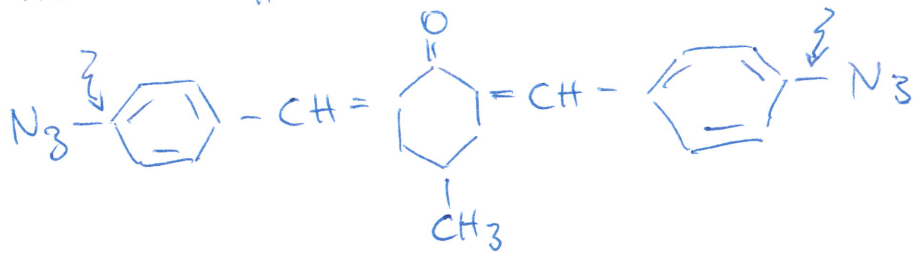


Molekulargewicht $\sim 150\,000$

löslich in unpolaren organ. Lösungsmitteln

PAAC: bis-arylacide

trize: Stoffe mit ein oder mehreren N_3 -Gruppen



Wirkungsweise: Dissoziation unter Belichtung
in Nitrene + N_2

↓
reagiert mit Gummi

↳ Vernetzung, unlöslich im Entwickler

Lösungsmittel: Toluol, Xylol, halogenierte Kohlenwasserstoffe

Nachteil: Luftquellen

c) CAR (chemically amplified resist)

Einsatz für 200 nm (DUV)

Wirkungsweise: Zugabe von sog. "photo acid generators" (PAG)

PAG bildet unter Belichtung Säure (H^+ -Ionen) welche mit Harz reagieren. Pro PAG 500-1000 Reaktionen. (beim 2. Ausbacke)

Gibt es als Positiv- und Negativlack.

Bsp.: tBOC → (i) Säuregenerator z.B. Oniumsalze
↳ (ii) protected polystyrene PBH08T

4.1.2 Hochauflösende Fotolacke für Elektronenstrahl-lithografie

1. PMMA polymethylmethacrylat (Polymer)

üblicherweise 5-10% PMMA (Polymer) in Chlorobenzol
oder Anisole (Lösungsmittel) $\rightarrow$ Viskosität

z.B. 2500 μmin spin coating

9% Lsg $\rightarrow$ 2 μm Dicke

4% Lsg $\rightarrow$ 0.5 μm

Eigenschaften: hohe Auflöserfähigkeit

hoher Kontrast

geringe Empfindlichkeit, abh. von Molekulargewicht u. Konzentration d. Exzitators

geringe Ätzselektivität, PMMA auf SiO_2 1:1

2. ZEP-520 (Zeon / Japan)

Eigenschaften: hohe Auflöserfähigkeit

hoher Kontrast

Empfindlichkeit $\sim 5-10\times$ Empf. PMMA

Ätzselektivität $\sim 5\times$ Ätz. PMMA

3. ma-N2600 (Microresist Technologie) (D)

konv. Negativlack

höhere Toleranz

Empfindlichkeit: PMMA < ma-N < ZEP520

Kontrast: $\sim$ wie PMMA

Ätzselektivität: $\sim$ ZEP520

4. H8Q (hydrogen silsesquioxane)

Dow Corning: FOX-12

anorg. Resist auf SiO_2 -Basis

Negativlack

Kontrast, Sensitivität wie PMMA

hohe Auflösung $\approx 6 \mu\text{m}$

5. Chem. verst. Fotolacke (CTR)

Pos./Neg. Lack

Vorteile: hohe Empfindlichkeit
hoher Kontrast

Nachteile: Abhängigkeit von Prozessparametern
(insbesondere post-exposure bake)

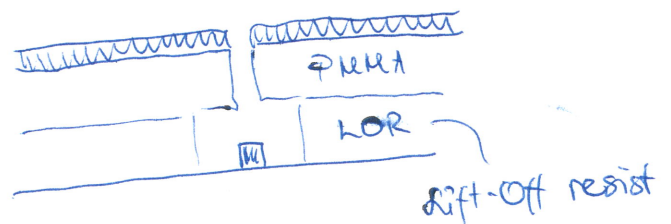
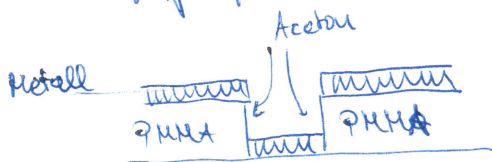
- PED-Effekt

- Oberflächenverunreinigungen

Multilagen-Resist-Prozesse

- zur Herstellung geeigneter Resistprofile für Lift-Off
- zur Einbringung der Oberflächentopografie
- für hochauflösende Lithografie

Lift-Off:



(oder: Schattenbedampfung)

4.1.3 Fotolacke für Dickschicht-Lithografie

für Anwendungen in Mikrosystemtechnik bzw. MEMS

→ Schichtdicken 10...100 μm

vers. Fotolacke:

- Novolack-basierte ~~h~~konv. PR
 - SU-8 (Epoxidharz basiert)
 - QMMA
- } lithographisch
- } Elektronenstrahl

(i) konventionelle PR

Bsp.: AZ 4000 Serie
AZ 8000 Serie

Spincoating bei niedrigen U-Zahlen

1000 U/min → 15-20 μm Schichtdicke

Aspektverhältnis 5-10 erreichbar

Anwendungsbereich: Formwerkzeuge für Galvanisierung
LIGA-Verfahren

(ii) SU-8 photoresist

Negativ-Fotolack

größte Empfindlichkeit 350-400 nm (i-line Lithografie)

geringe Absorption der I-Linie

Bsp.: 100 μm SU-8 46% Transmission
100 μm AZ-PR 1% ———

↳ große Aspektverhältnisse möglich

Anwendungsbereich auch für Röntgenlithografie u. e^- -lith.

Auch als Werkstoff verwendet (wo Silizium nicht erwünscht ist)

4.2 Beladungstechniken

1. Vorbereitung der Oberfläche, Haftverbesserung

2. Spin Coating

→ Filmdicken bestimmt durch

$$h_{\text{film}} = \gamma_f \cdot \frac{a^{1/2} \nu_0^{1/4}}{\Omega^{1/2}}$$

γ_f : dimensionsloser Parameter

a : $k \Omega^{1/2}$ k : Massentransferkoeff.

Ω : Rot. geschw.

ν_0 : Viskosität

• Rot. geschw.

• Viskosität

(Rot. dauer, wenn $< 10\text{ s}$)
nur Anfangsphase

3. Entfernen der Kanten

4. Soft bake (Pre-bake)

- Aufheizen zur Reduktion des Lösungsmittelgehalts
Abbau von Spannung, Verbesserung der ~~Adhäsion~~ ^{Haftungs} auf Substrat

- Aufheizdauer ($\approx 60\text{ s}$)

- Wahl der idealen soft bake Temperatur

$T > T_s$: Siedetemp. d. Lsg.-mittel $\sim 140^\circ\text{C}$

$T < T_D$: Dekompositionstemp.

(DQN $100^\circ\text{--}120^\circ\text{C}$)

$T > T_g$: Glasübergangstemp. d. PR

eventuell optionale Prozessschritte:

- post exposure bake

- zus. Antireflexschichten (BARC)

z.B. TiN auf Al

Si_3N_4 auf Si

5. Entwicklung

Entwicklungsergebnis hängt ab von:

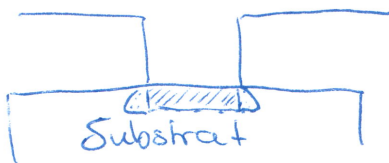
- Konzentration d. Entwicklers
- Temperatur d. Entwicklerbades
- Belichtungsgrad

5. Ätzverfahren

28. Jan. 2016

Man unterscheidet:

- physikalische Verfahren (Sputtern)
- chemische Verfahren
 - ↳ Nassätzen (5.1)
 - ↳ Trockenätzen (5.2)



$$\text{Anisotropie } A = 1 - \frac{ER_L}{ER_V}$$

ER: Ätzrate in $\mu\text{m}/\text{min}$

$$ER_L = 0 \rightarrow A = 1 \quad \text{anisotropes Ätzen}$$

$$ER_L \neq 0, \rightarrow A < 1 \quad \text{isotropes Ätzen}$$

$$ER_V > ER_L$$

chem. Verfahren meist isotrop

(Ausnahme: Nassätzen von einkristallinen Mat., z.B. Si)

5.1 Nassätzverfahren

wichtige Ätzlösungen:

- verdünnte Flußsäure zur Entfernung von SiO_2



meist Pufferung mit NH_4F



- Ätzlösungen zur Entfernung von Fotomasken, sog. 'Stripper'

organ. Stripper: Lösungsmittel des Fotolacks

anorgan. Stripper: H_2O_2 , verdünnt mit H_2SO_4 oder H_3PO_4
bzw. oxidierende

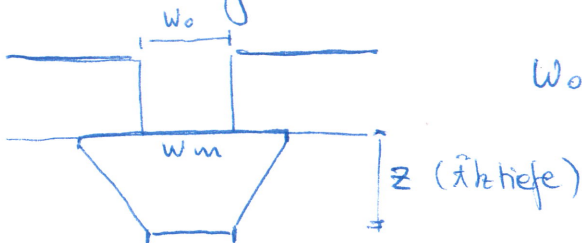
▷ anisotropes Nassätzen von Si (Folie 3)

Si: kub. Kristallstruktur $\Rightarrow$ $\langle 111 \rangle$ geringe ER (höchste Atomdichte)
 $\langle 110 \rangle$
 $\langle 100 \rangle$ höchste ER

(Ebene)

Si-Wafer in $\langle 100 \rangle$ Ebene geschnitten

$\Rightarrow$ V-Ätzgruben mit Öffnungswinkel 54.74°



$$w_0 = w_m + \sqrt{2} z$$

Si-Wafer in $\langle 110 \rangle$ Ebene geschnitten

$\Rightarrow$ kopplizierte Struktur & Schnitt $\langle 111 \rangle$ mit $\langle 110 \rangle$
4 senkrecht, 4 mit $35,26^\circ$

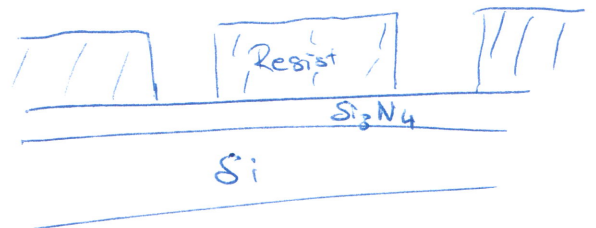
Anwendung: Ätzen von Strukturen oder Profilen

Ätzlösungen: KOH, EDP, TMAH

$$ER_{\text{KOH}}^{<100>} = 2.6 \cdot 10^6 \cdot W^{2.5} \cdot \exp\left(\frac{W/300 + 0.48}{k(T+273)}\right) \frac{\mu\text{m}}{\text{min}}$$

(empirische Formel für $C_{\text{KOH}} = 20\% - 25\%$) (typ: $1 - 10 \frac{\mu\text{m}}{\text{min}}$)

Ätzmasken für KOH: Si_3N_4 (LPCVD), Selektivität 10^4



für EDP: SiO_2 , Selektivität 10^2

↓
Ätzrate hängt vom Dichtungsgrad ab.
Bsp: Si₃N₄ $ER_{10^{18}} \approx 100 \cdot ER_{10^{20}}$

⇒ isotropes Ätzen von Si (Folie 6)

Ätzlösung: HNA (Mischung aus HF, HNO₃, CH₃COOH)

5.2 Trockenätzverfahren

= Plasmaätzverfahren

Reaktortypen:

- Plasmaäther
- Ionenstrahläther

Ätzmechanismen:

- Sputter-Äßen
- chem. Äßen

Plasmaerzeugung:

- Kammer mit Gas bei geringem Druck $10^{-3} - 10$ mbar
- typ. Plasmadichten $10^8 - 10^{12}$ Ionen / cm^3
- typ. Frequenzen: 13,65 MHz, 600 kHz (zur Verhinderung von Raumladungseffekten)
- typ. Spannungen: 200 - 500 V (Biasspannung, damit $I_{\text{ion}} = I_{e^-}$)

=> Ionisation der Gasatome / Moleküle,
Bildung freier Radikale

Mögliche Dissoziationsprozesse:

- Ionen und Elektronen-Bildung



- Atom- und Radikalbildung



unerwünscht: Wärme und Photonenbildung



mögliche Verlustmechanismen:

- Elektron-/Ion-Rekombination



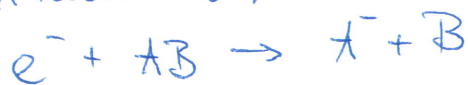
- Ion-Ion-Rekombination



- Ladungstransfer



- Attachment:



- Diffusion



Reaktor Bauweisen

- Barrel-Reaktor (Folie 8)

↳ auch zur Reinigung durch Plasmaverschmelzung eingesetzt

- Plasma-Reaktor: Trioden-Typ (Folie 10/11)

↳ Plasmadichte und Ionendichte getrennt kontrollierbar

- Ionenstrahl-Reaktoren

5.2.3 Grundlegende Methoden

1. Relatives Ionenätzen (RIE)

Kombination aus phys. (Ionenbombardement) und chem. Ätzen

RIE-Parameter:

- Gasfluss

- Leistung d. Plasmaquelle (kin. Energie d. Ionen)
- Kammerdruck (Klass. verhil zur Pumpe), typ. $< 10^{-3}$ mbar

häufige reaktive Ätzgase: meist auf Halogenbasis

Pumpen auch ~~Edelgas~~ Edelgas

2. Deep reactive ion etching (ICP-RIE)

Verbesserung der Richtionalität durch Erhöhung der Plasmadichte

↳ ICP-Quellen: Plasmadichte $> 5 \cdot 10^{11} / \text{cm}^3$

Ätzraten $> 20 \mu\text{m} / \text{min}$

Selektivität $\text{Si} / \text{PR} = 100$

$\text{Si} / \text{SiO}_2 \approx 200$

3. Ionenstrahlätzen (Kathodenzerstäubung)

Rein physik. Prozess

weist Ar

→ Ätzprozess ist abhängig v. Ionenenergie:

$< 10 \text{ eV}$: Absorption der Ar^+

$10 \text{ eV} - 5 \text{ keV}$: Ionenstrahlätzen

$> 10 \text{ keV}$: Ionenimplantation

2 Arten:

(i) Plasmasputtern (geringe Ätzrate)

(ii) Ionenstrahlsputtern / -fräsen

4. Reaktiv-Gas-Ätzen

chem. Ätzen ohne Plasmaproduktion mit XeF_2



XeF_2 : Dampfdruck $\sim 5 \text{ hPa}$ bei 25°C (sublimiert)

Vorteile: $\rightarrow$ hohe Selektivität
- hohe Ätzeraten $\sim 1-3 \mu\text{m}/\text{min}$
- komplett isotropes Ätzen

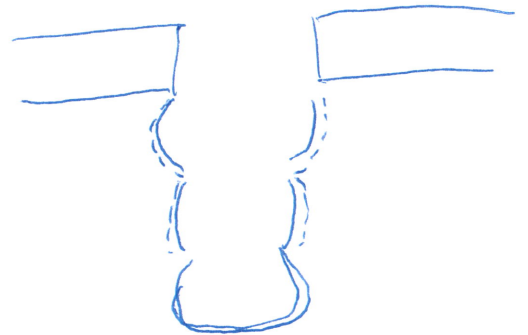
Nachteil: - Rauigkeit der Oberfläche

5.2.1 Anwendungsbeispiele

(i) Ätzen von Si

$\rightarrow$ Bosch-Prozess

1. Schritt: ~~Ätzen mit SF_6 Plasma~~ Isotropes Ätzen von Si
2. Schritt: Ätzen mit C_4F_8 , Passivierung der Oberfläche ----
3. Schritt: Isotropes Ätzen mit SF_6



(ii) Ätzen von Dielektrika (SiO_2 , Si_3N_4)

(iii) Ätzen von Metallen

Aluminium: Meist Cl -Chemie (heiß F)

Edelmetalle: Bei hohen Temp (200°C) mit O

(iv) Ätzen von Verbindungshalbleitern

(v) Fotoresistverätzung / Polymerverätzung

(vi) metallische Multilagen

(vii) Ätzen komplexer Oxid-Verbindungen

Kap. 6 Abscheidetechniken

Anwendungsbereich: opt. Beschichten
tribologische Schichten
Hochtemp. Supraleiter
Mikro/Nanotechnologie

breites Methodenspektrum, abh. von Materialien

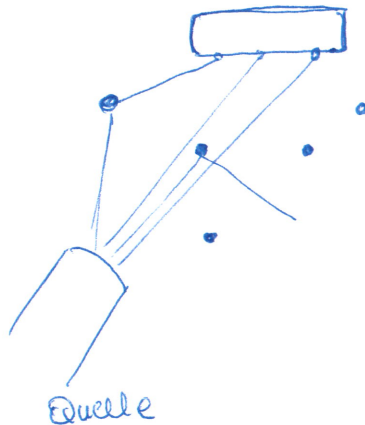
Aufdampfen: Abscheiden aus der Gasphase

phys. (PVD)
(def. Quelle, Flug
durch Vakuum)

chem. (CVD)

6.1 Grundlagen des Aufdampfens

(i) Kinetik d. Gasatome



mittlere freie Weglänge

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \left(\frac{N}{V}\right) d^2}$$

$$\text{ideales Gas: } \frac{N}{V} = \frac{P}{k_B T}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi P d^2}$$

Luft $P = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$
 $T = 300 \text{ K}$
 $d = 0.36 \text{ nm}$

$$\Rightarrow 15 \text{ cm}$$

Zahl der Restgasatome, die aufs Substrat treffen

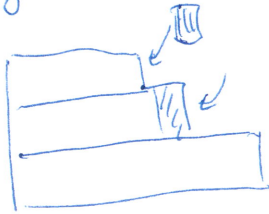
$$I_i = P_i \sqrt{\frac{1}{2 \pi k_B m_i T}}$$

i = incorporated

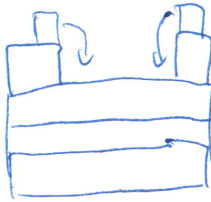
(ii) Filmwachstum

- Homoepitaxie: Filmwachstum auf einkristallem Substrat aus gleichem Material.

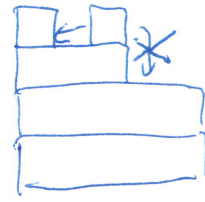
mögliche Formen:



Stufenwachstum



2D-Inselwachstum



Mehrlagewachstum

schwöbel-Barriere
zu hoch

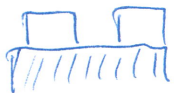
- Heteroepitaxie: Filmwachstum abh. von Oberflächenenergie & Gitterfehlanpassung

bei geringer Fehlanpassung...

$$\dots \text{ und } \gamma_{\text{Schicht}} + \gamma_{\text{Substrat}+\text{Schicht}} \leq \gamma_{\text{Substrat}}$$

→ perfekte Benetzung → Frank-van der Merwe-Wachstum

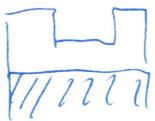
$$\dots \text{ und } \gamma_{\text{Schicht}} + \gamma_{\text{Substrat}+\text{Schicht}} > \gamma_{\text{Substrat}}$$



⇒ Inselwachstum ⇒ Volmer-Weber-Wachstum

bei großer Fehlanpassung

⇒ Inselwachstum ⇒ Stranski-Krastanov-Wachstum

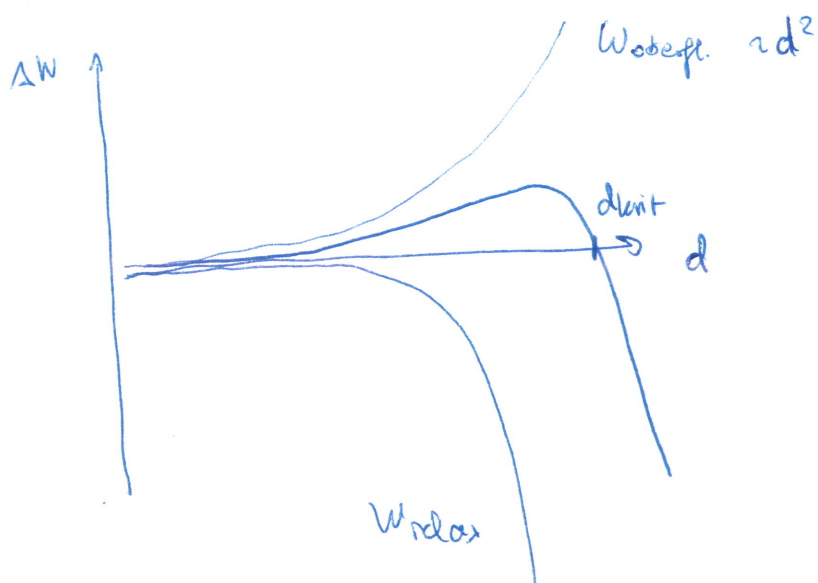


I dünn

Stranski-Krastanov-Wachstum



Energiedif. $\Delta W = W_{\text{elast}} + W_{\text{relax}} = \text{const}_1 \int d^2 - \text{const}_2 \cdot k \cdot \int f^2 \cdot d^3$



(iii) Thermodynamik / Phasendiagramm

bei Mischmaterial: Filmwachstum hängt von Mischbarkeit / Phasendiagramm ab
 Dampfdruck + Temperatur bestimmen die Aufdampfrate

6.2 Physik. Abscheidetechniken

6.2.1 Therm. Aufdampfen / Molekularstrahl-Epitaxie (MBE)

Aufdampfanlage:

- Quellen: einfache therm. Verdampfer
 - Elektronenstrahlverdampfer
 - Knudsen Zellen

Aufdampfrate:
$$N_e = \frac{p_e A_e}{12 \pi m k_B T}$$

Hertz -
Knudsen -
Langmuir -
Gleichung

- Strahlunterbrecher (Shutter)
- Prozessumgebung: Edelstahl- / Glasrezipienten

große MBE-Anlagen:

Hauptkammer
 Transferkammer
 Schlenke

- UHV - geeignete Materialien
- Pumpsysteme : Ölfreie Scrollpumpen
Turbopumpen
Kryopumpen
Ionengetterpumpen
- Druckmessröhren : Pirani } Kaltkathoden
Penning }
Bayard - Alpert } Heißkathoden
- In-situ Analysetechniken
zur Kontrolle des Wachstums und zur Oberflächen-
analyse.
z.B. RHEED