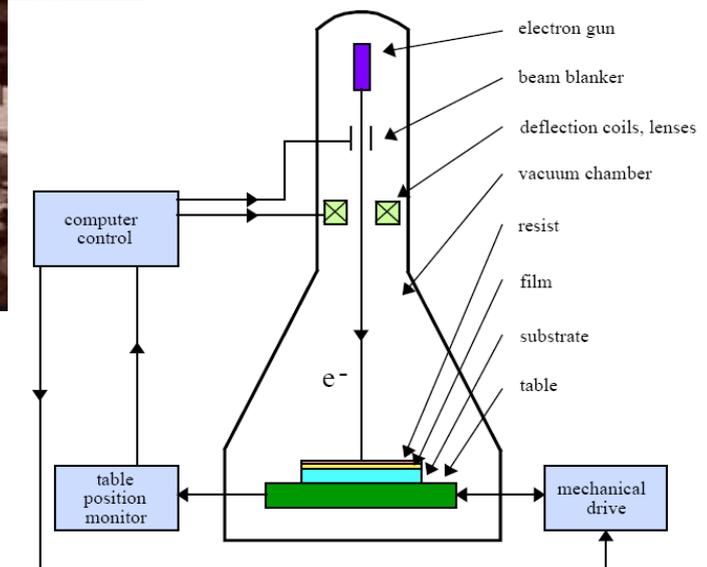
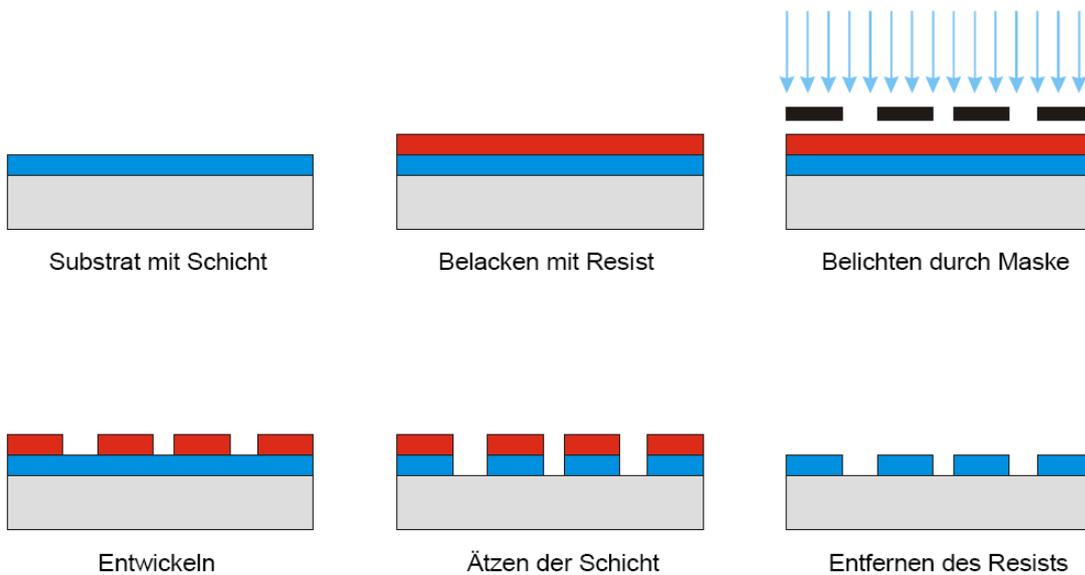


Fotolithografie

Elektronenstrahl-Lithografie

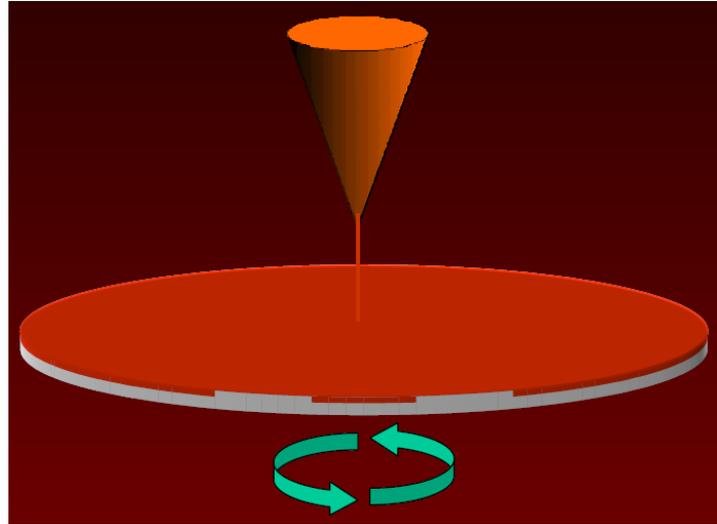


3.5. Lithografie: Prozess mit Positivlack



3.5. Lithografie: Resist Prozess (I)

- ➔
- Aufschleudern von Resist
 - Maskenjustage
 - Belichtung
 - Ausheizen (soft bake)
 - Entwicklung
 - Ausheizen (hard bake)
 - Ätzen / Beschichtung
 - Resistentfernung



3.5. Lithografie: Resist Prozess (II)

- ➔
- Aufschleudern von Resist
 - Maskenjustage
 - Belichtung
 - Ausheizen (soft bake)
 - Entwicklung
 - Ausheizen (hard bake)
 - Ätzen / Beschichtung
 - Resistentfernung



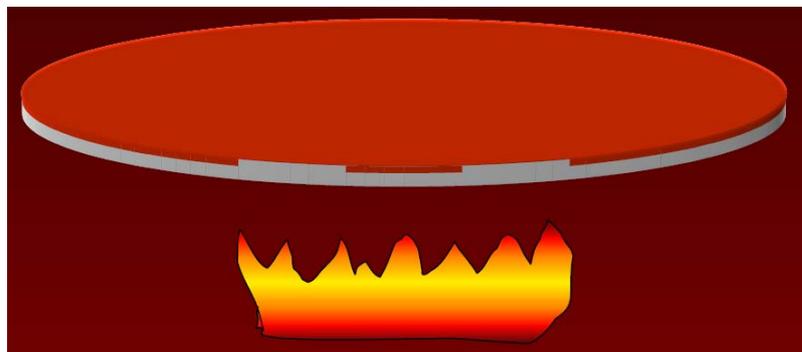
3.5. Lithografie: Resist Prozess (III)

- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- •Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung



3.5. Lithografie: Resist Prozess (IV)

- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- •Ausheizen (soft bake)
- Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung



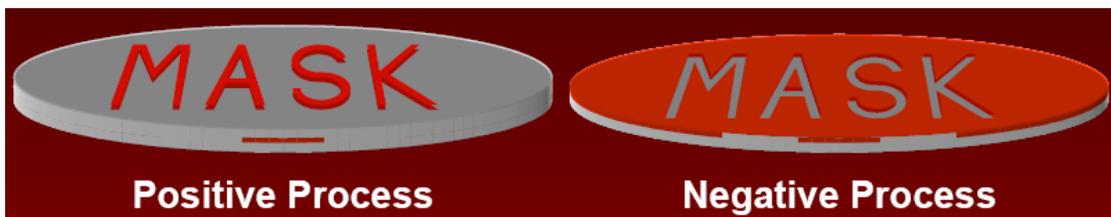
3.5. Lithografie: Resist Prozess (V)

- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- •Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung



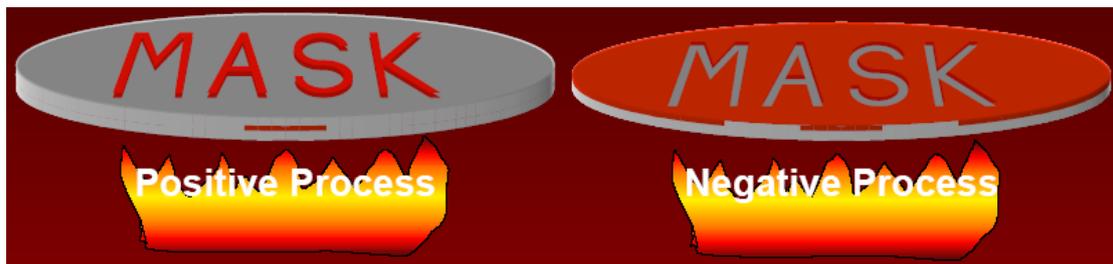
3.5. Lithografie: Resist Prozess (VI)

- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- •Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung



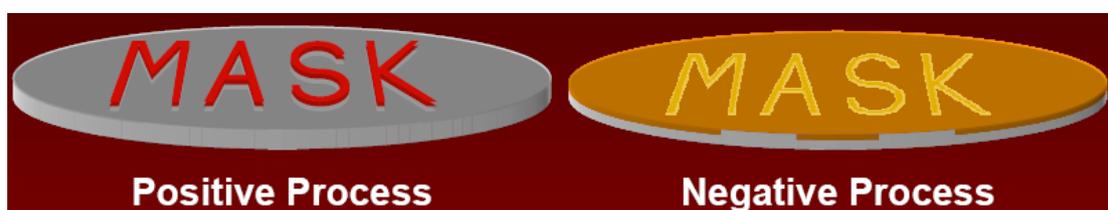
3.5. Lithografie: Resist Prozess (VII)

- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- Entwicklung
- •Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung

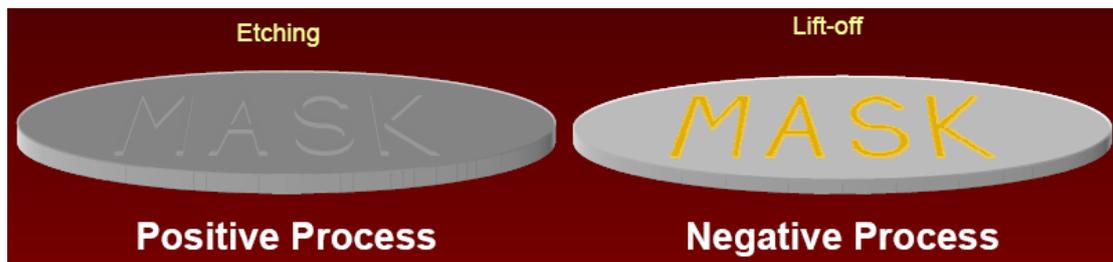


3.5. Lithografie: Resist Prozess (VIII)

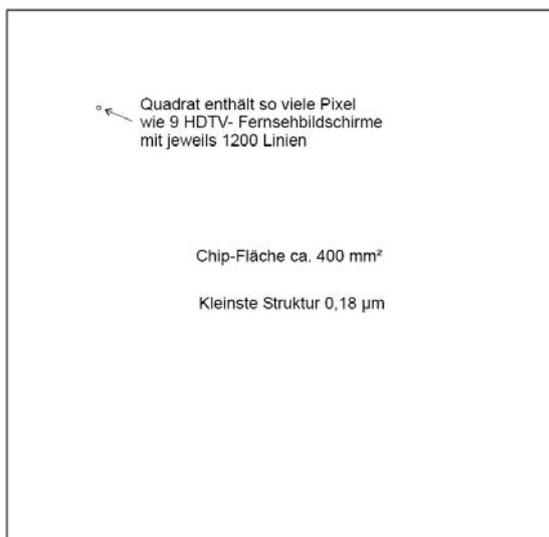
- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- •Ätzen / Beschichtung
- Resistentfernung



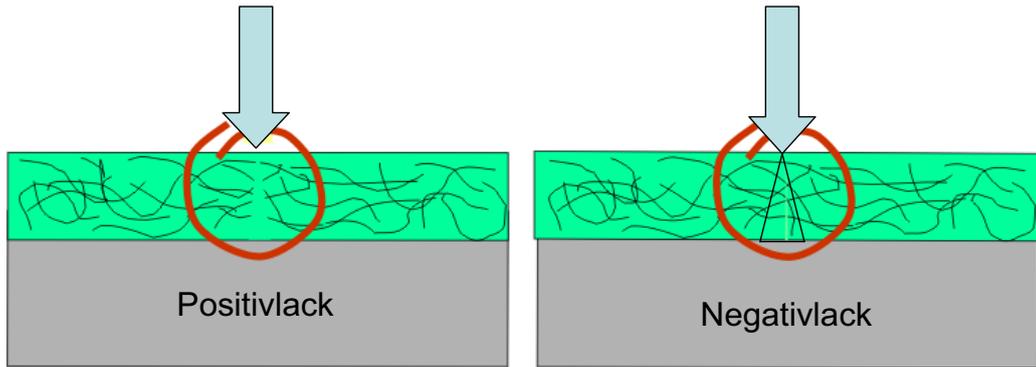
- Aufschleudern von Resist
- Maskenjustage
- Belichtung
- Ausheizen (soft bake)
- Entwicklung
- Ausheizen (hard bake)
- Ätzen / Beschichtung
- •Resistentfernung



Kleinste Strukturgröße	0,5 μm	0,2 μm	0,07 μm
Linienbreite	0,5 \pm 0,13 μm	0,2 \pm 0,06 μm	0,07 \pm 0,02 μm
Overlay Accuracy	0,15 - 0,2 μm	0,06 - 0,08 μm	0,02 - 0,025 μm
Resistdicke	0,5 μm	< 0,25 μm	< 0,1 μm



3.5. Lithografie: Fotolacke (Resist)

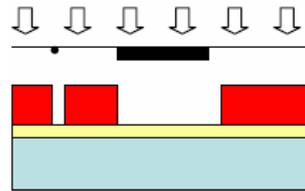
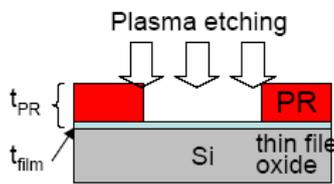


Lichteinwirkung \Rightarrow Aufspaltung
d.h. Molekulargewicht wird kleiner

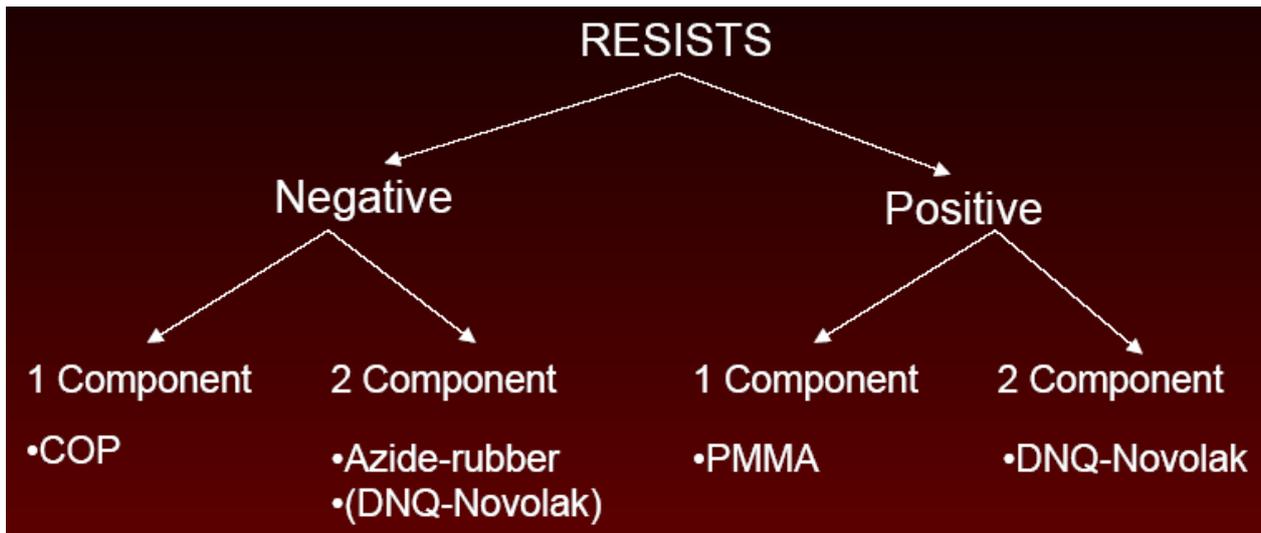
Lichteinwirkung \Rightarrow Polymerisation
d.h. Molekulargewicht wird größer

Nachteil: max. 4:1 (Aspektver.)

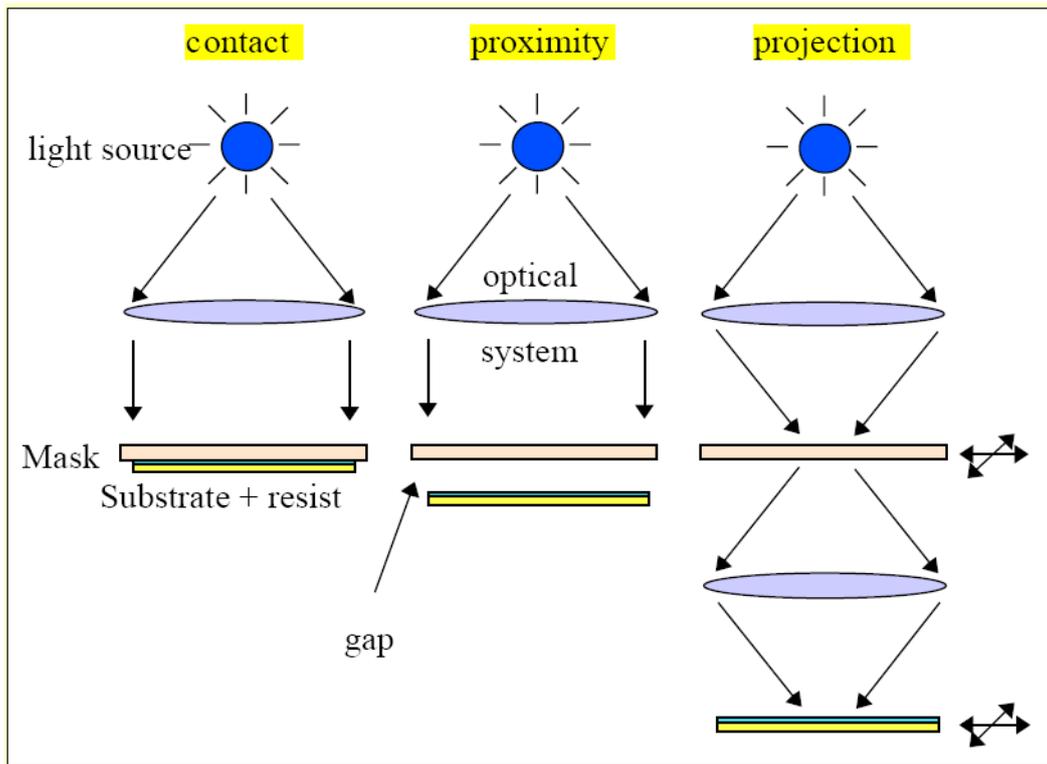
Nachteil:



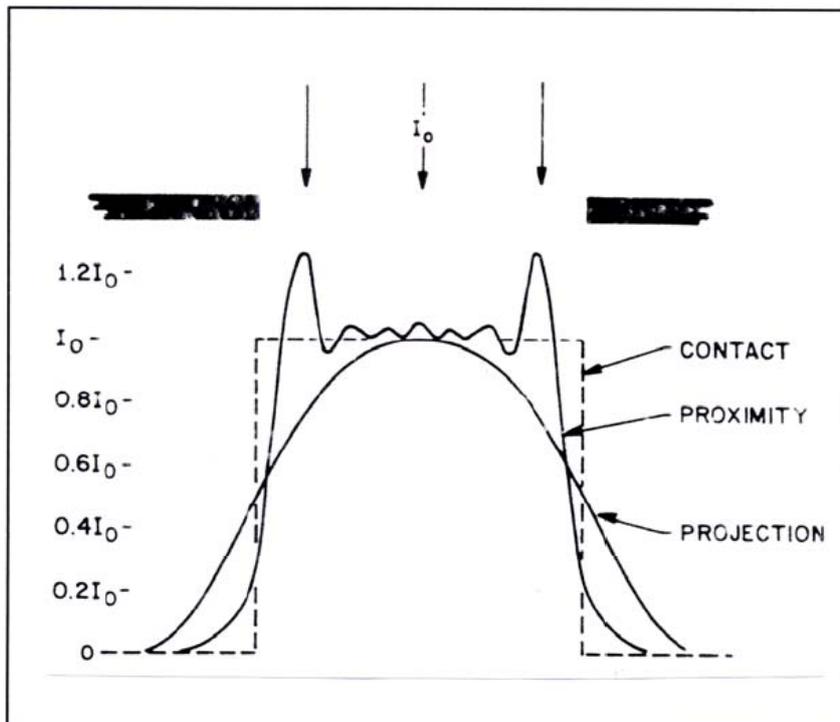
3.5. Lithografie: Resist - Übersicht



3.5. Lithografie: Belichtungsverfahren



3.5. Lithografie: Beugungsgrenze

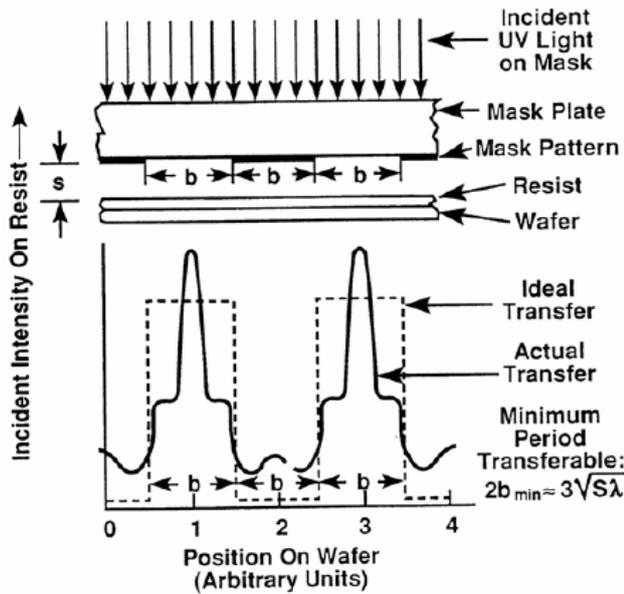


Minimale Linienbreite

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

$$k_1 = 0.5 - 0.9$$





1:1 Abbildung

Spalt: 0 bis einige 100µm

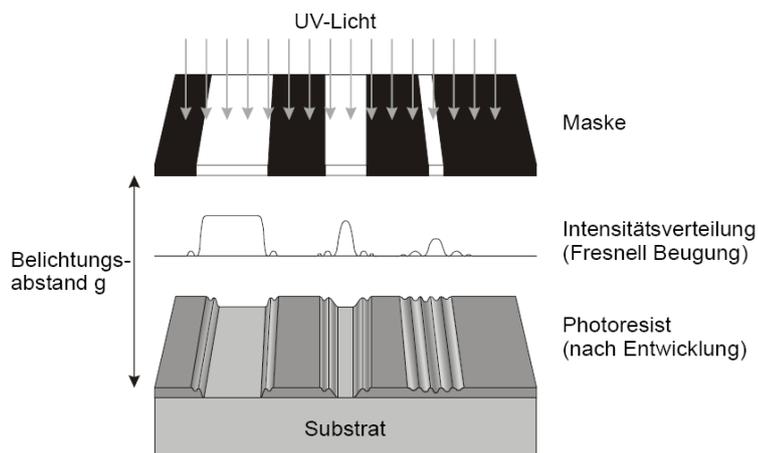
Beugungsgrenze

S: Proximity Spalt

k: Kontrastkonstante

d: Resistdicke

Praktische Grenzen: 0.7 – 1 µm
niedrige Kosten, mittlere Auflösung,
kleine Stückzahlen
Empfindlich betr. kleiner Partikel



5:1 – 10:1 Abbildung

Minimale Linienbreite:

$$b_{\min} = k\lambda / NA$$

Hohe NA:

- langsamer Durchlauf der Wafer
- komplexes Linsensystem
- höchste Anforderungen an Mechanik und Linsen

...TEUER!

Praktische Grenzen : < 0.2 µm
hohe Kosten, hohe Auflösung
Große Stückzahlen
(Massenproduktion)

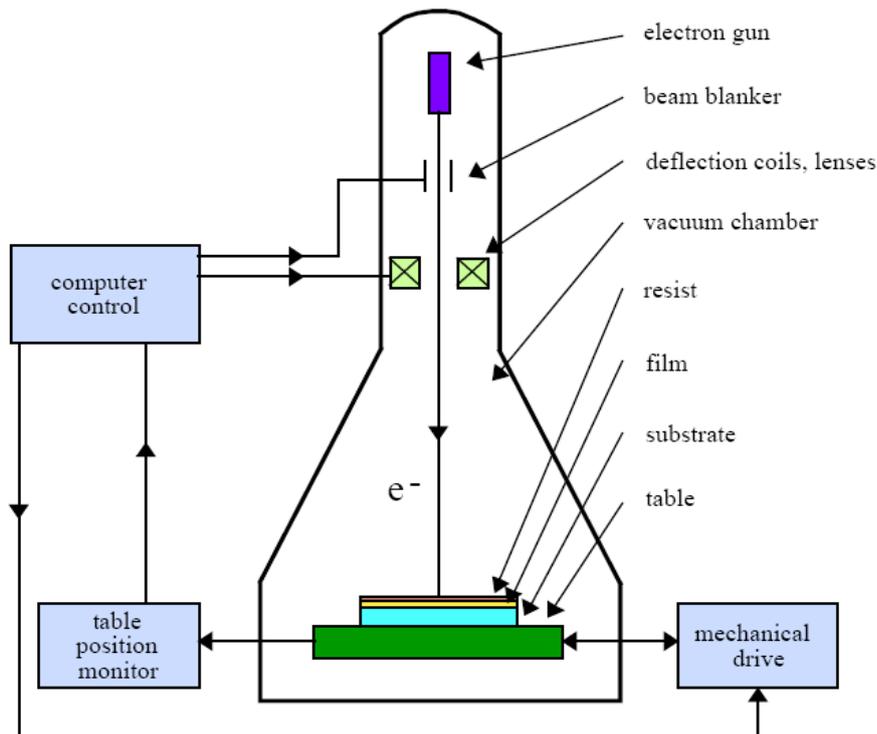


3.5. Lithografie: Wellenlängen und Lichtquellen

Bereich	Wellenlänge λ [nm]	Beispiele für Strahlungsquellen
optische Lithographie		
VIS (visible light)	450-700	Glühlampe, LED
NUV (near UV)	350-450	Hg-Dampf Lampe i-Linie: 365 nm h-Linie: 405 nm g-Linie: 436 nm
MUV (mid UV)	280-350	Eximerlaser XeF: 351 nm I ₂ : 342 nm XeCl: 308 nm ClF: 284 nm
DUV (deep UV)	220-280	Eximerlaser KrF: 248 nm KrCl: 222 nm
EUV (extreme UV)	150-220	Eximerlaser ArF: 193 nm F ₂ : 157 nm
Röntgenlithographie		
	0,5-25	
Elektronenstrahlolithographie		
5...20 keV	0,02-0,01	
Ionenstrahlolithographie		
2...40 keV	< 0,001	

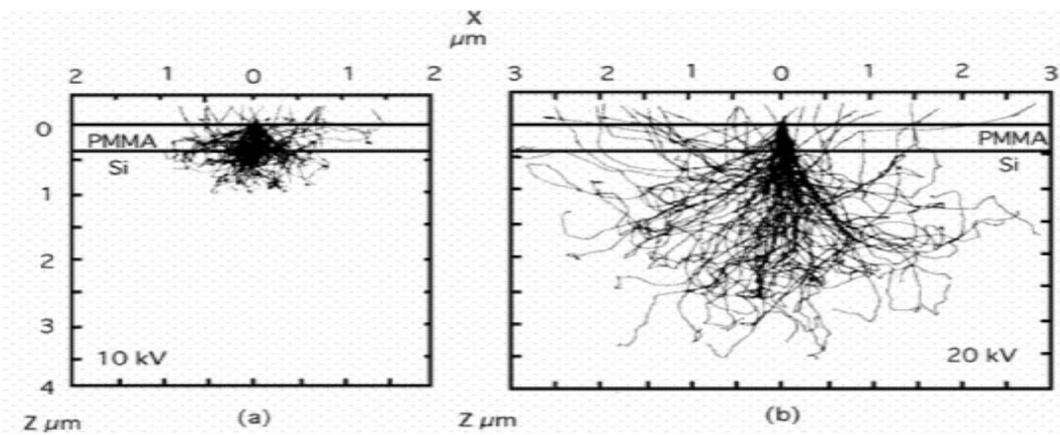


3.5. Lithografie: Elektronenstrahl-Lithografie (I)

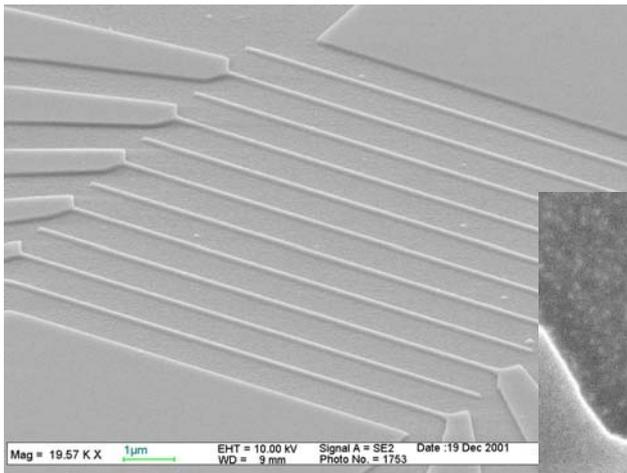
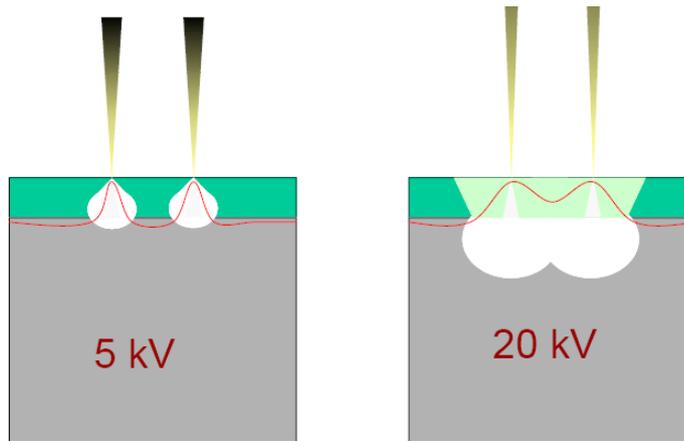




Elektronenstreuung

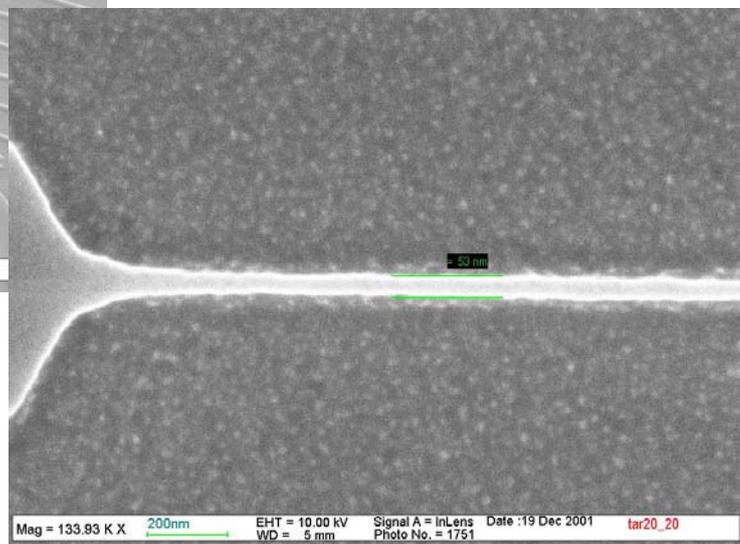


Proximity-Effekt



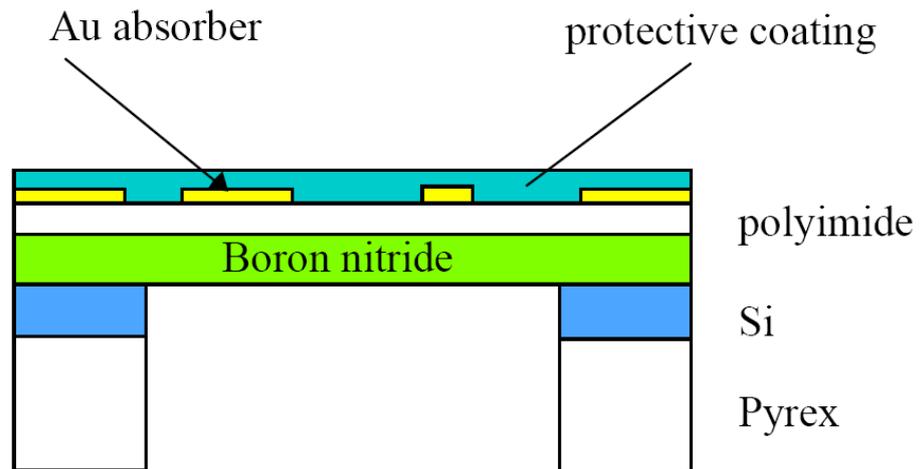
Typische Linienbreiten: < 50nm

Schreibfelder: 100×100 μm



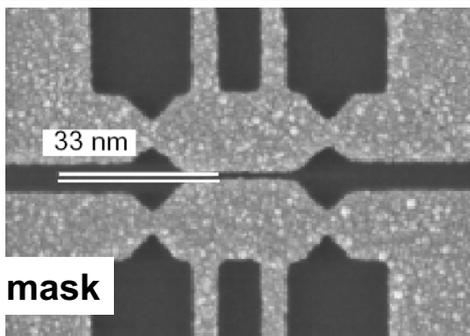
3.5. Lithografie: Röntgen – Lithographie (I)

Schattenmaskenkonzept: ($\lambda=1$ nm)

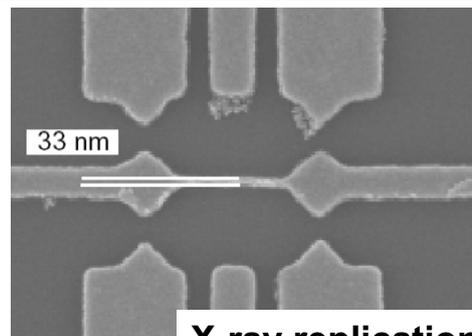


3.5. Lithografie: Röntgen - Lithographie (II)

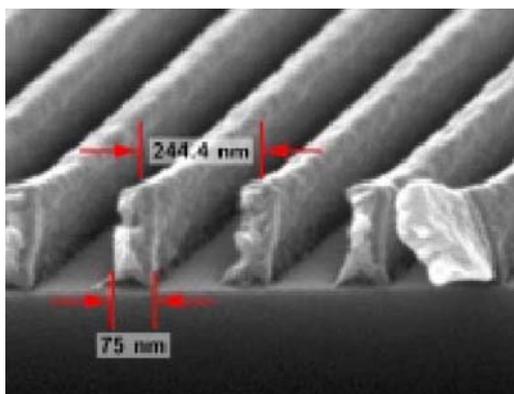
X-ray mask



X-ray replication
& liftoff (Ti/Au)

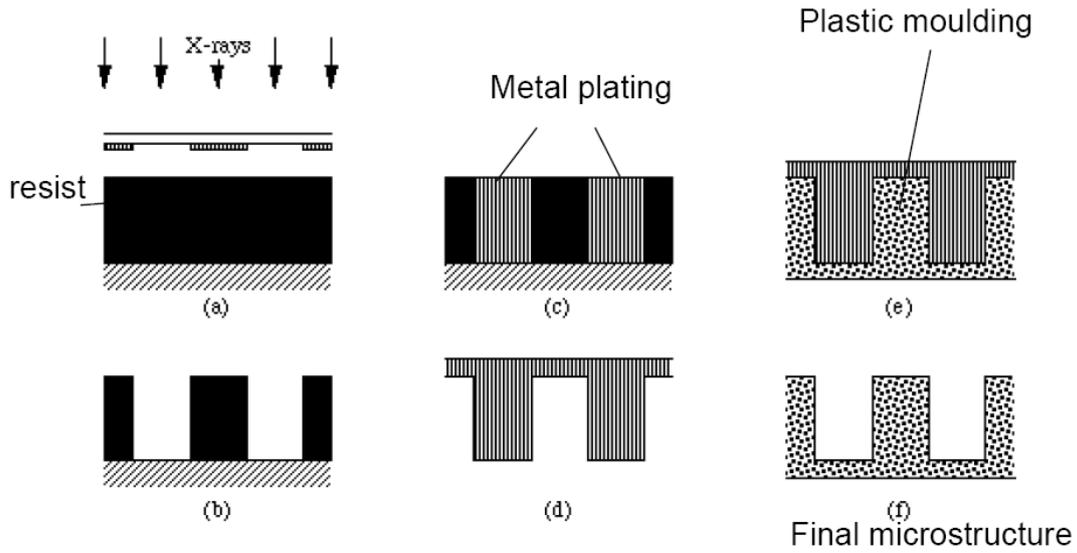


X-ray lithography done with
laser plasma x-ray source

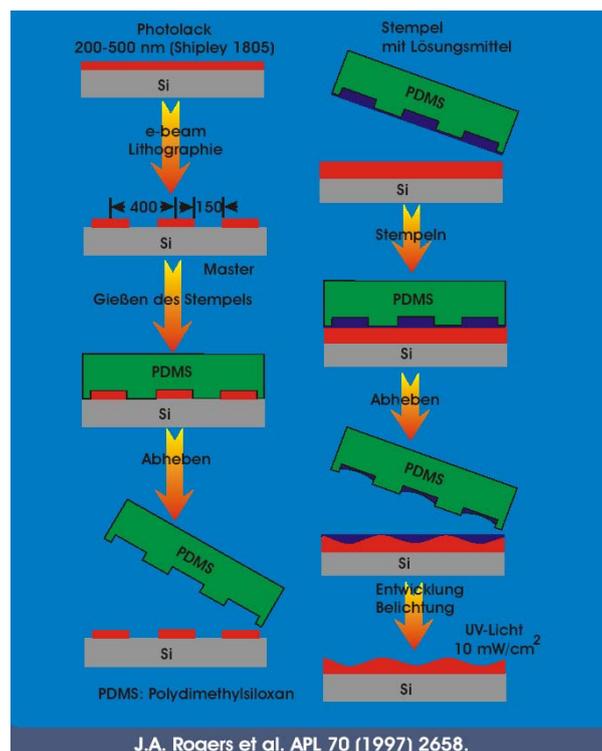


3.5. Lithografie: LIGA - Verfahren

LIGA (*L*ithographie, *G*alvanoformung, *A*bformung)



3.5. Lithografie: Imprint - Verfahren (I)



3.5. Lithografie: Imprint - Verfahren (II)

Definition des Layouts:	Photolithographie	"soft lithography"
Materialien die direkt strukturiert werden können:	Photomaske (strukturierter Cr-Film auf einer Quarzplatte)	Kunststoffstempel (PDMS-Block mit strukturierter Oberfläche)
Auflösung:	UV, 250 nm EUV, 10 nm	30 nm
Vorteile:	kostengünstig, bequem, verfügbar, komplexe (dreidimensionale) Strukturierung, kein Beugungslimit, gute Kontrolle über Oberflächenchemie, anwendbar auf viele Materialien, große Flächen	
Nachteile:	Deformation von Stempel oder Druckmasse, Kompatibilität mit industriellen Fertigungstechniken? höhere Defektkonzentrationen.	



3.6. Strukturierung

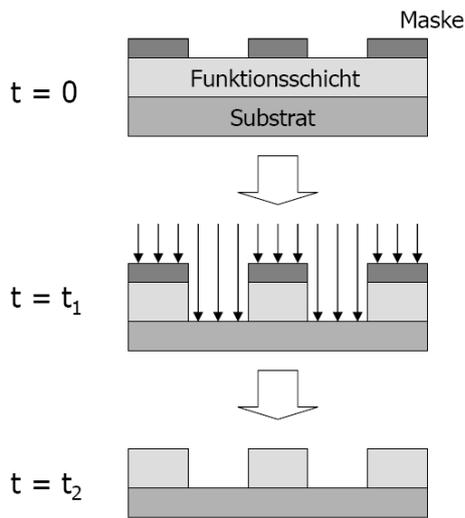
3.6.1. Definitionen und Begriffe

3.6.2. Naßchemisches Ätzen

3.6.3. Reaktives Ionenätzen (Reactive Ion Etching – RIE)

3.6.4. Ionenätzen





- Relieferzeugung unter Verwendung einer ätzmittel-resistenten Maske
- Abtragsprozess durch Phasenübergang v. Atomen aus fester in bewegl. Phase
- Strukturabmessungen bis zu 10 nm möglich



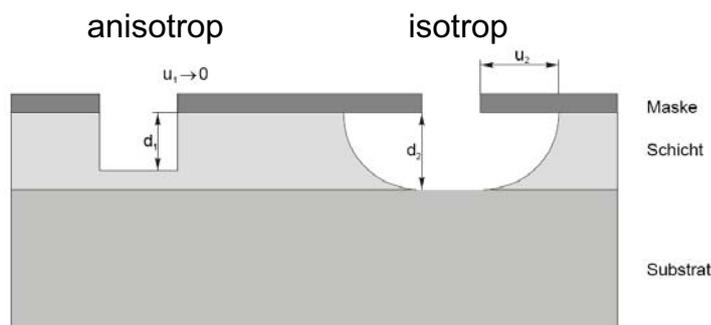
3.6.1. Definitionen und Begriffe (I)

Ätzrate: $r_A = \frac{d}{t}$

Ätzfaktor (Unterätzung der Maske):
u: laterale Unterätzung

$$f_A = \frac{u}{d}$$

Anisotropiefaktor: $A_f = 1 - \frac{u}{d}$

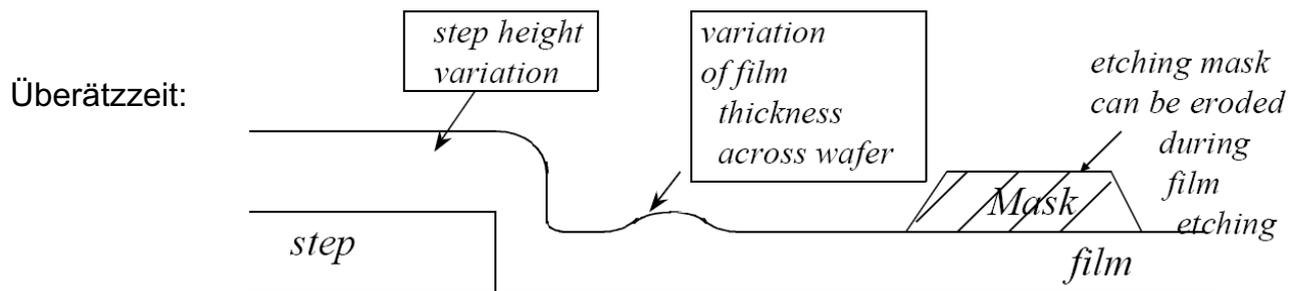


3.6.1. Definitionen und Begriffe (II)

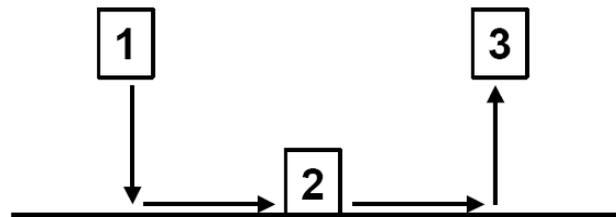
Selektivität:
$$S = \frac{r_{A1}}{r_{A2}},$$

mit r_{A1} : Ätzrate der Schicht 1,
 r_{A2} : Ätzrate der Schicht 2.

Homogenität:
$$\Delta r_A = \frac{r_{A\max} - r_{A\min}}{r_{Amittel}} \cdot 100\%$$



3.6.2. Naßchemisches Ätzen (I)



- Diffusion reaktiver Komponenten zur Oberfläche
- Adsorption und Reaktion an der Oberfläche
- Abtransport der Reaktionsprodukte

Diffusionsbegrenzter Ätzprozeß (Ätzmittel mit geringer Konzentration):

$$j_A = D \cdot \frac{C_V - C_S}{\delta_x}$$

j_A : Ätzteilchenfluß,
 D : Diffusionskonstante,
 δ_x : Dicke der Diffusionsschicht,
 C_V : Konzentration des Ätzmittels im Volumen,
 C_S : Konzentration des Ätzmittels an der Substratoberfläche



Diffusionsbegrenzter Ätzprozeß (Ätzmittel mit geringer Konzentration):

$$r_A = k_R C_S e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

k_R : Reaktionskonstante,
 E_A : Aktivierungsenergie.

- Hauptbestandteile von
- Oxidationsmittel,
 - Komplexbildner,
 - Lösungsmittel,
 - Inhibitoren,
 - spezielle Zusätze.
- Oxidationsmittel,
- Komplexbildner,
- Lösungsmittel,
- Inhibitoren,
- spezielle Zusätze.



SiO₂ mit Flußsäure:



gepufferter Flußsäure:

NH₄F (40 %) : HF (50 %) : H₂O

im (Volumen-) Verhältnis 7 : 1 : 1

Si₃N₄ mit Phosphorsäure:

H₃PO₄ bei Temperaturen 130°C – 180°C



Selektivität gegenüber SiO₂: 10:1

Selektivität gegenüber Si: 30:1



3.6.2. Naßchemisches Ätzen: Metalle

Schicht	Ätzlösung	T [°C]	Bemerkungen
Al	76 H ₃ PO ₄ , 10 CH ₃ COOH, 3 HNO ₃ , 5 H ₂ O, 1-5% NH ₄ F	40	selektiv zu SiO ₂ , auch für Al-Si
	4 H ₃ PO ₄ , 4 CH ₃ COOH, 1 HNO ₃ , 1 H ₂ O	25	geringe Unterätzung
	80-75 H ₃ PO ₄ , 5 HNO ₃ , 0-20 H ₂ O	40	auch für Al-Cu
	74,1 H ₃ PO ₄ , 7,4 HNO ₃ , 18,5 H ₂ O	50	für dünne Linien
	75 g Na ₂ CO ₃ , 35 g Na ₃ PO ₄ ·12 H ₂ O, 16 g K ₃ [Fe(CN) ₆], 0,5 l H ₂ O	24	geringe Unterätzung
Al-Ti	10 HCl, 1 HNO ₃ , 9 H ₂ O	49	
Cr	HCl verdünnt		
	HNO ₃ verdünnt		
	1 (50 g NaOH, 100 ml H ₂ O), 3 (100 g K ₃ [Fe(CN) ₆], 300 ml H ₂ O)	25	für Cr-Masken
	164,5 g Ce(SO ₄) ₂ (NH ₄) ₂ SO ₄ ·2H ₂ O, 43 ml HClO ₄ in 1 l H ₂ O	28	für gesputtertes Cr
Mo	1 H ₂ SO ₄ , 1 HNO ₃ , 1-5 H ₂ O	25	
	22 Gew.-% Ce(SO ₄) ₂ (NO ₃) ₆ in 1% HNO ₃	25	
	92 g K ₃ [Fe(CN) ₆], 20 g KOH, 300 ml H ₂ O		
Pd	1 HCl, 10 HNO ₃ , 10 CH ₃ COOH	25	
Pt	7 HCl, 1 HNO ₃ , 8 H ₂ O	85	
Ta	2 HNO ₃ , 1 HF, 1 H ₂ O	25	
	9 NaOH oder KOH (30%-ig), 1 H ₂ O ₂	90	Metallmaske nötig
Te	2 HNO ₃ , 3 H ₂ O		
Ti	1 HF, 9 H ₂ O	32	
	1 HF, 2 HNO ₃ , 7 H ₂ O	32	
W	34 KH ₂ PO ₄ , 13,4 g KOH, 33 g K ₃ [Fe(CN) ₆] in 1 l H ₂ O		



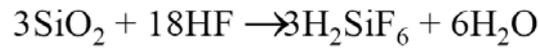
3.6.2. Naßchemisches Ätzen: Silicide

Material	Herstellung	Ätzlösung
PtSi	Sputtern, CVD, Elektronenstrahlverdampfung	verdünntes Königswasser (3 HCl, 1 HNO ₃), 4 mit J ₂ gesättigte CH ₃ COOH, 3 HNO ₃ , 1 HF
MoSi ₂	Magnetron-Sputtern	HF - HNO ₃
TaSi ₂	Reaktives Sintern aus gesputtertem Tantal	BHF
TiSi ₂	Reaktives Sintern aus gesputtertem Titan	BHF
WSi ₂	RF-Sputtern	98% HNO ₃ , 2% NH ₄ F



3.6.2. Naßchemisches Ätzen: Silizium (I)

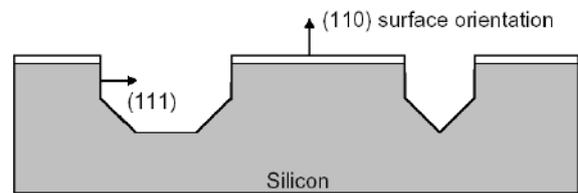
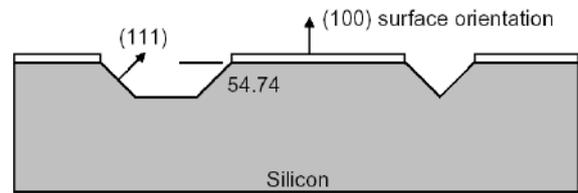
Isotropes Ätzen: 55%HNO₃ + 10% CH₃COOH + 1,5% HF + H₂O (Rest)



Anisotropes Ätzen: KOH

Ätzrate von Silizium
in KOH : H₂O : Isopropyl-Alkohol

- <111> 0,006 µm/min
- <110> 0,1 µm/min
- <100> 0,6 µm/min

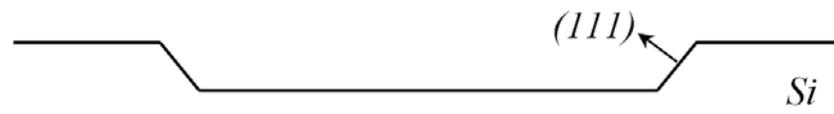


3.6.2. Naßchemisches Ätzen: Silizium (II)

Kanäle in Si:

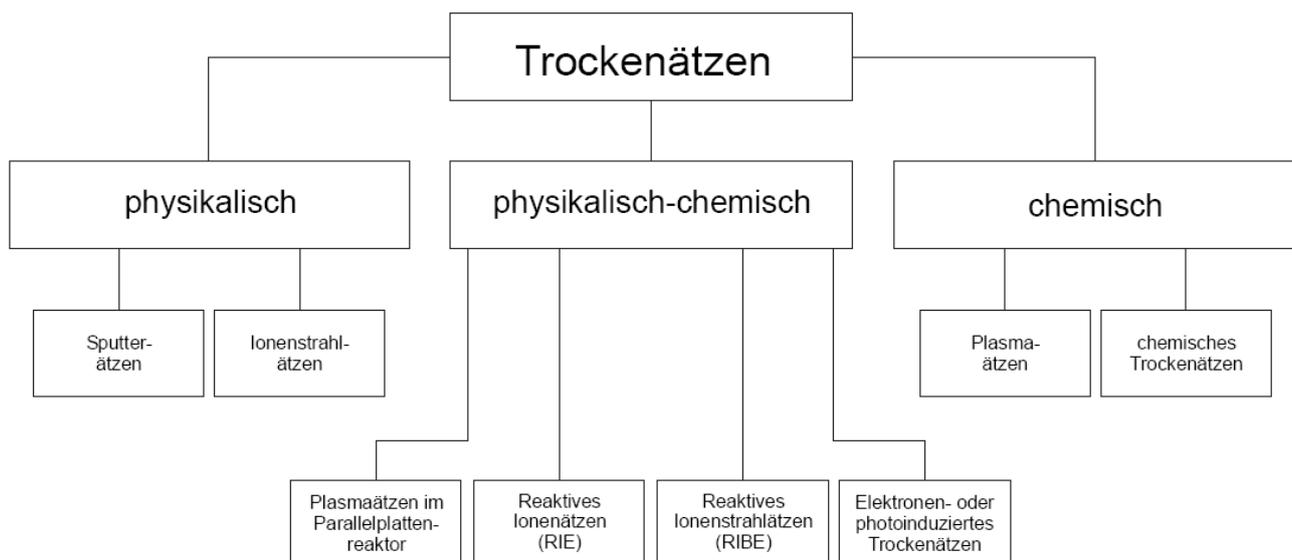


Si-Membranen

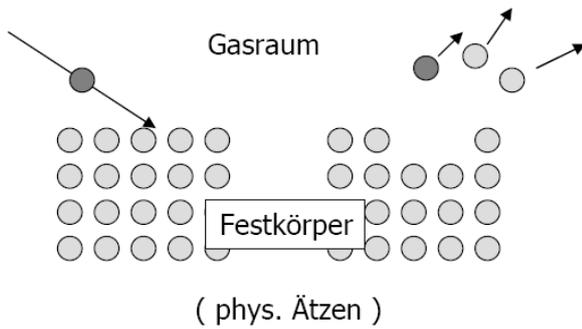


- Geringe Anisotropie
- Schlechte Prozeßkontrolle/Automatisierung
- Starke Verunreinigung der Waferoberfläche
- Minimale Strukturgrößen ca. 1 µm

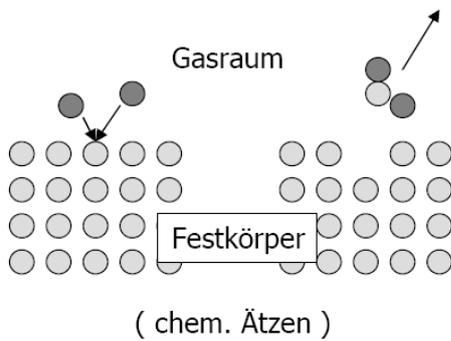
⇒ **Einsatz nur für nicht-kritische Strukturen !!!**



3.6.3. Trockenätzverfahren (II)



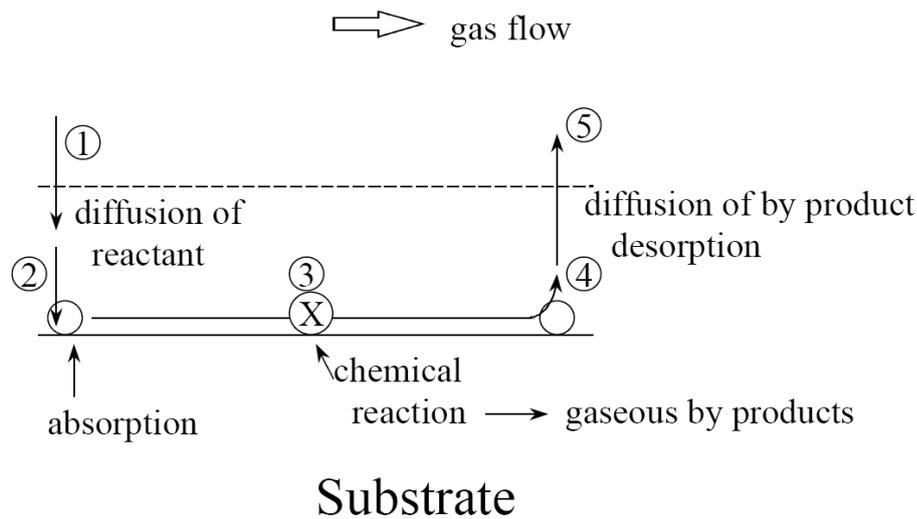
1. Übertragung in Gasraum durch mech. Impuls
2. Umwandlung in flüchtige Spezies (chem. Reaktion)



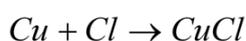
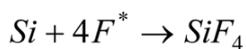
- abpumpen der Reaktionspartner
- reaktive Gaskomponenten nachliefern



3.6.3. Reaktives Ionenätzen (RIE-I)

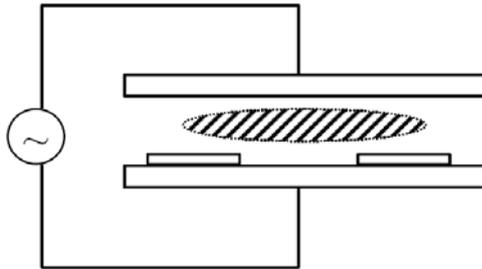


Beispiele

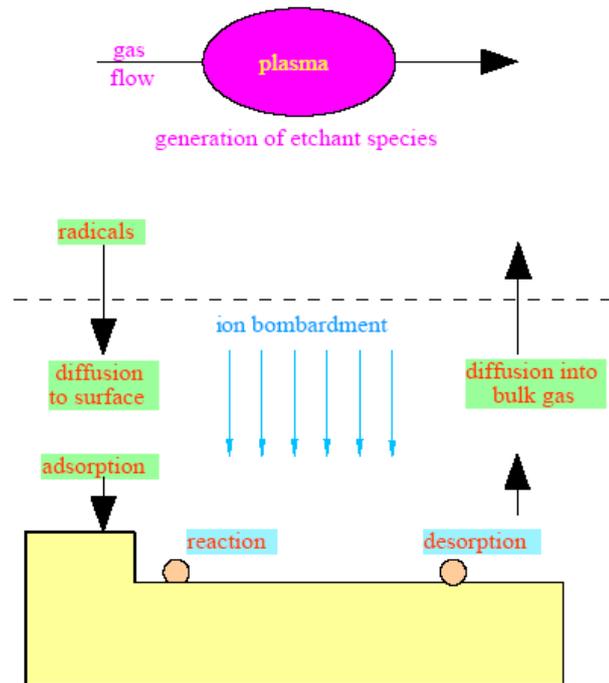


3.6.3. Reaktives Ionenätzen (RIE-II)

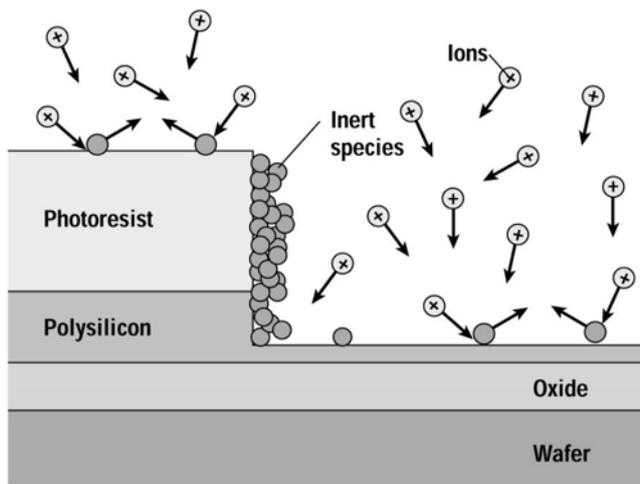
Parallelplatten-Reaktor



mechanism (1)

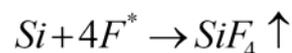
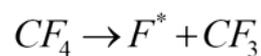


3.6.3. Reaktives Ionenätzen (RIE-III)

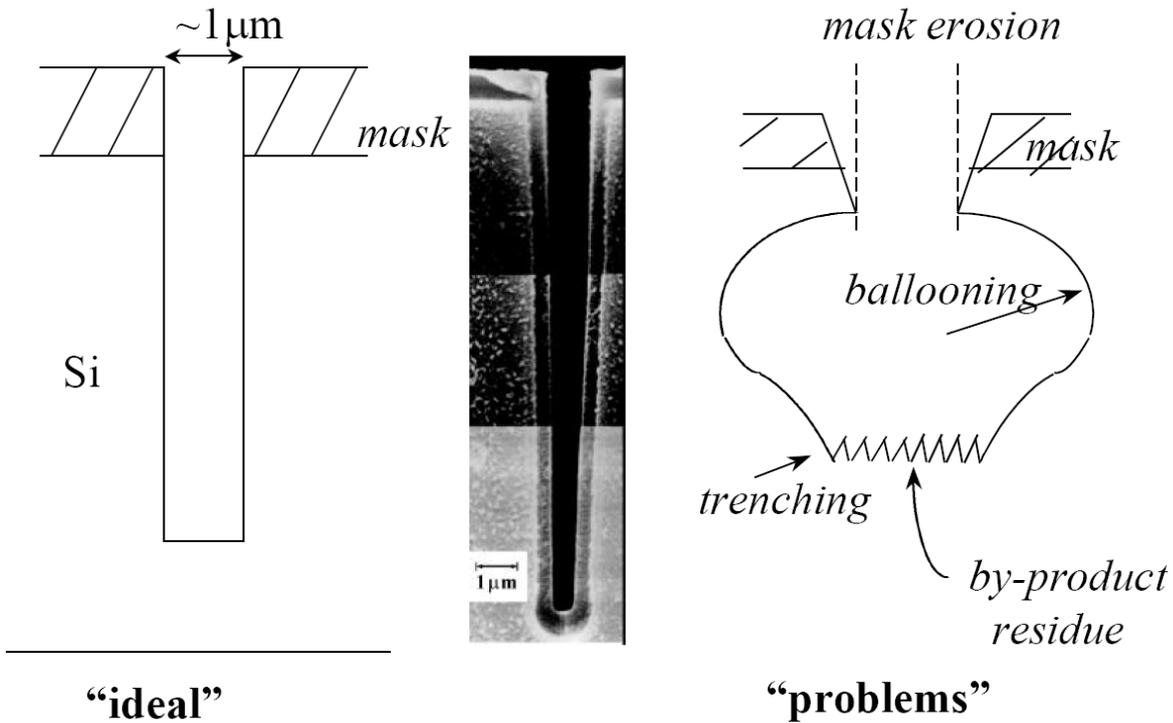


- Fluor-Prozess (CF_4)
Si, Ge, SiC, W, Mo, SiO_2 , Si_3N_4
- Chlor-Prozess (CCl_4)
GaAs, InP, GaN, Al, Ti, Cr, Al_2O_3
- Schwierige Fälle
Cu, Pt, Pd, Ni, Fe, Co, Au

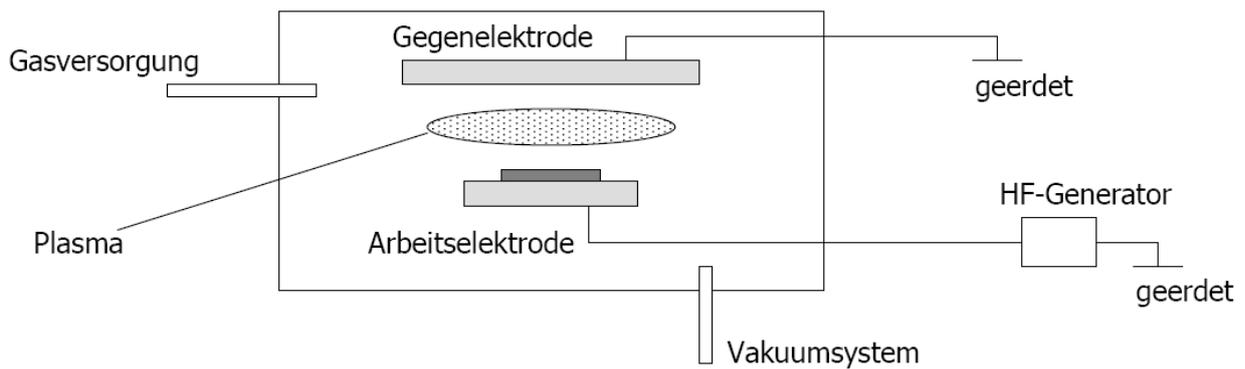
- Beispiel:
RIE von Silizium mit CF_4 -Gas



3.6.3. Reaktives Ionenätzen: Gräben (Trenches)



3.6.4. Ionenätzen (I)



Betriebsart	Sputterätzen	reakt.Ionenätzen
Substrat-Elektrode	HF-Elektrode	HF-Elektrode
Gegenelektrode	Masse	Masse
Ätzgas	Inertgas(Ar)	Reaktivgas
Druckbereich	0,1-5 Pa	0,2-10 Pa



Sputterätzen

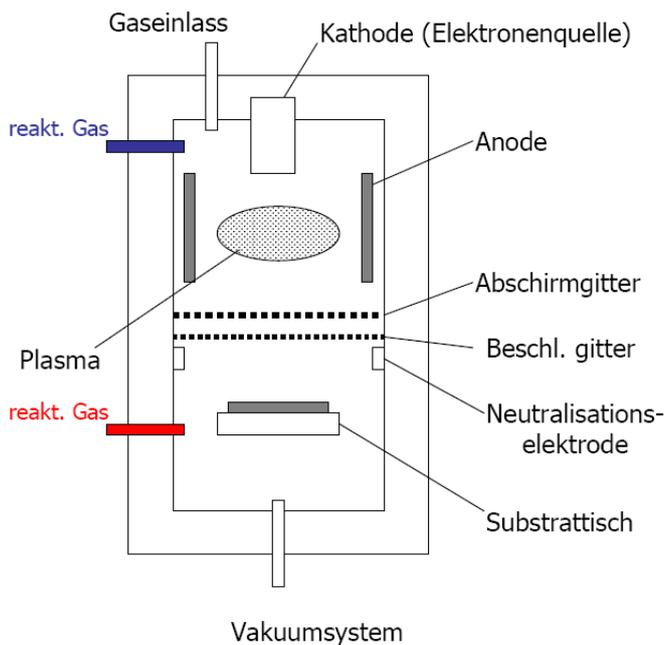
- Edelgas als Atmosphäre
- nur Teilchen hoher kin. Energie (Sputterplasma)
- anisotroper Abtrag
- nicht selektiv
- Anwendung bei chem. sehr inerten Materialien

reaktives Ionenätzen

- reaktives Gas als Atmosphäre
- Eigenschaften des Sputterätzens und des Plasmaätzens
- anisotroper Abtrag
- hohe Selektivität



3.6.4. Ionenstrahlätzen (I)



- **reaktives** bzw. **chemisch unterstütztes** I.-Strahlätzen
- Abtrag durch Sputterprozess
- Ionenerzeugung & Sputtertarget separat (entkoppelt)
- Beschleunigungselektrode
- Neutralisationselektrode
- u.U. separate Gasversorgung



3.6.4. Ionenstrahlätzen (II)

Reaktives Ionenstrahlätzen

- reaktives Gas als Quelle für Ionenstrahl
- neben Gasversorgung mit inertem Trägergas auch Gasversorgung für reaktives Ätzgas
- u.U. hohe Bauteilbelastung

chem. unterst. Ionenstrahlätzen

- reaktive Gaskomponenten direkt in Ätzreaktor geführt
- Ionenstrahlerzeugung von Zufuhr reaktiver Teilchen entkoppelt
- geringe Belastung der Quelle und der Einbauten



3.6.4. Trockenätzen: Zusammenfassung

Ätzprozess	Mechanismus	ätzende Teilchen	Druckbereich	Ätzprofil	Selektivität
Plasma-ätzen	chem.	reaktive Radikale	10-100 Pa	isotrop	hoch
reaktives Ionenätzen	phys/chem	Radikale & reaktive Ionen	0,2-10 Pa	anisotrop	ausreichend
reaktives Ionenstrahl-ätzen	phys/chem	reaktive Ionen	<0,01 Pa	anisotrop	ausreichend
Sputter-ätzen	phys.	inerte Ionen	0,1-5 Pa	anisotrop	gering
Ionenstrahl-ätzen	phys.	inerte Ionen	<0,01 Pa	anisotrop	gering

