

Übersicht

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

4.2 Optische Lithografie

4.3 Elektronenstrahlithografie

4.4 Nanoimprint-Lithografie

4.5 Rastersonden-Lithografie

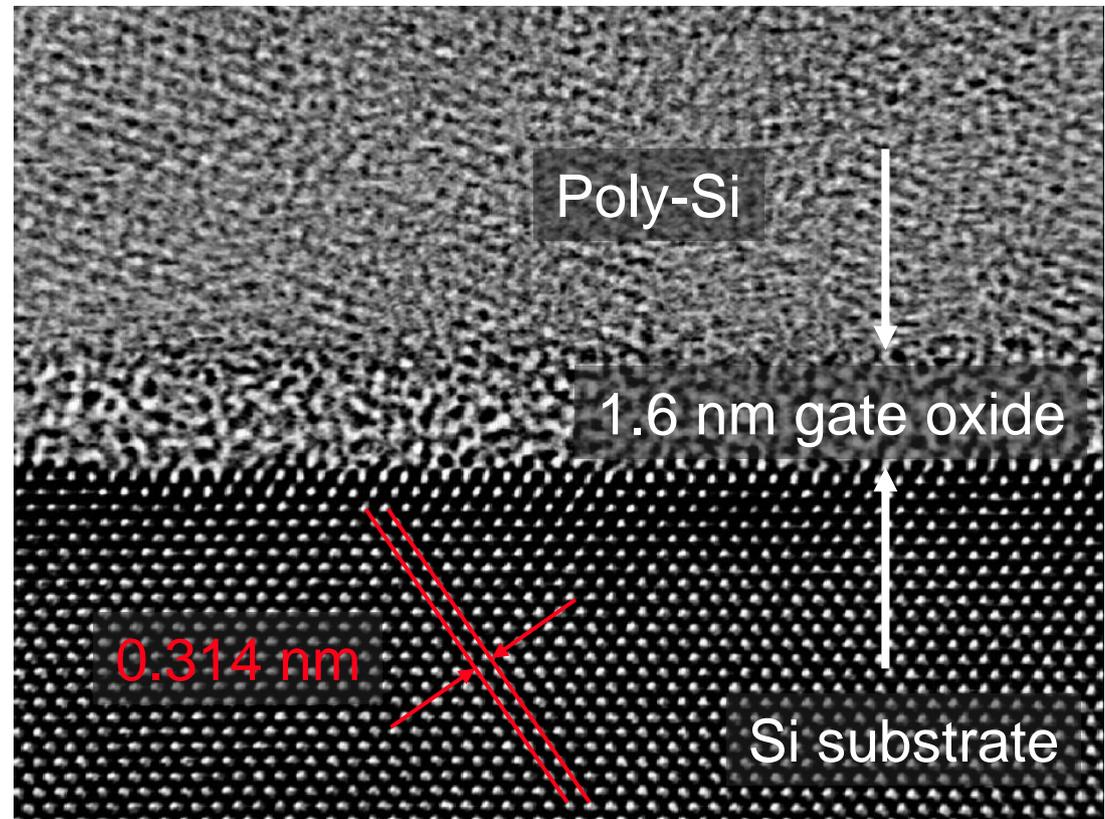
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

MOS-Transistor

Thermische Oxidation
erzeugt abrupte Grenzfläche
zwischen kristallinem Silizium
und amorphem SiO_2

Rauigkeit: $<0.2 \text{ nm}$



TEM-Aufnahme einer MOS-Struktur

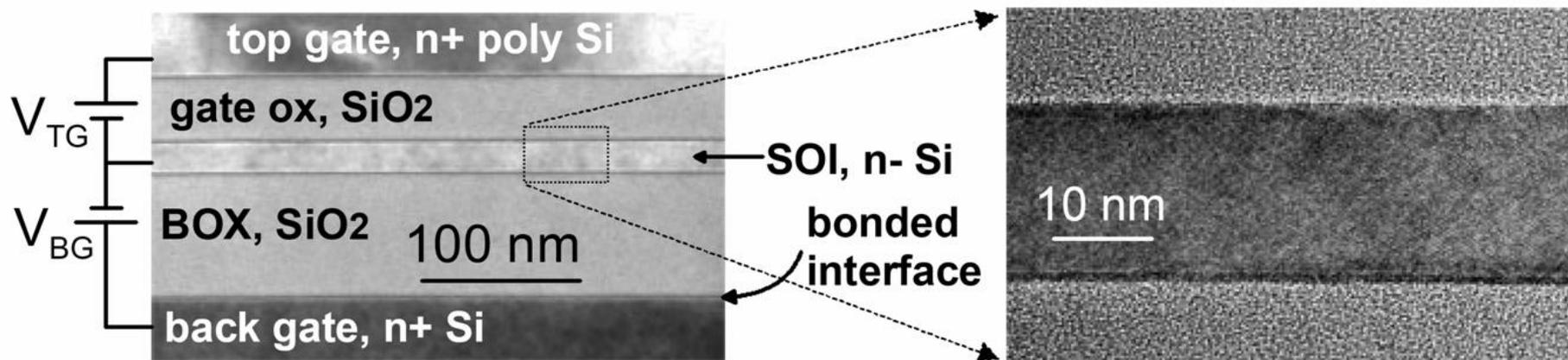
U. Schwalke *et al.*, IEEE Electron Device Letters **20**, 363 (1999)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

MOS-Transistor

Thermische Oxidation + Wafer-Bonding: Si on Insulator (SOI)
erzeugt vergrabenen kristallinen Si-Film zwischen amorphem SiO_2



TEM-Aufnahme einer SOI-Struktur

M. Prunilla, J. Ahopelto, H. Sakaki, phys. stat. sol. (a) **202**, 970 (2005)

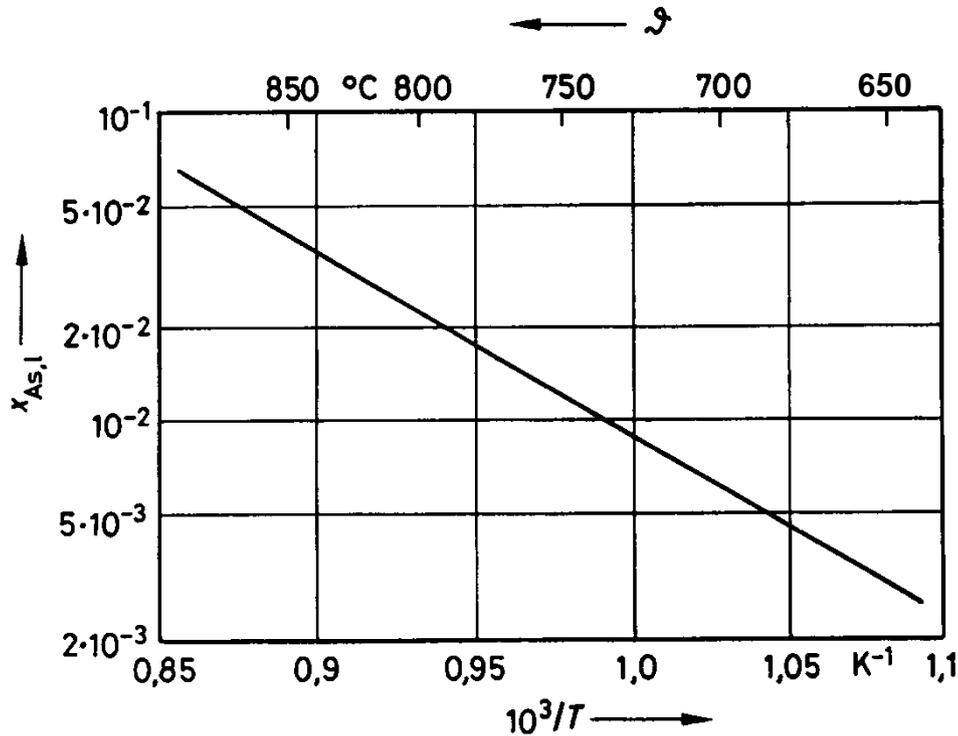
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

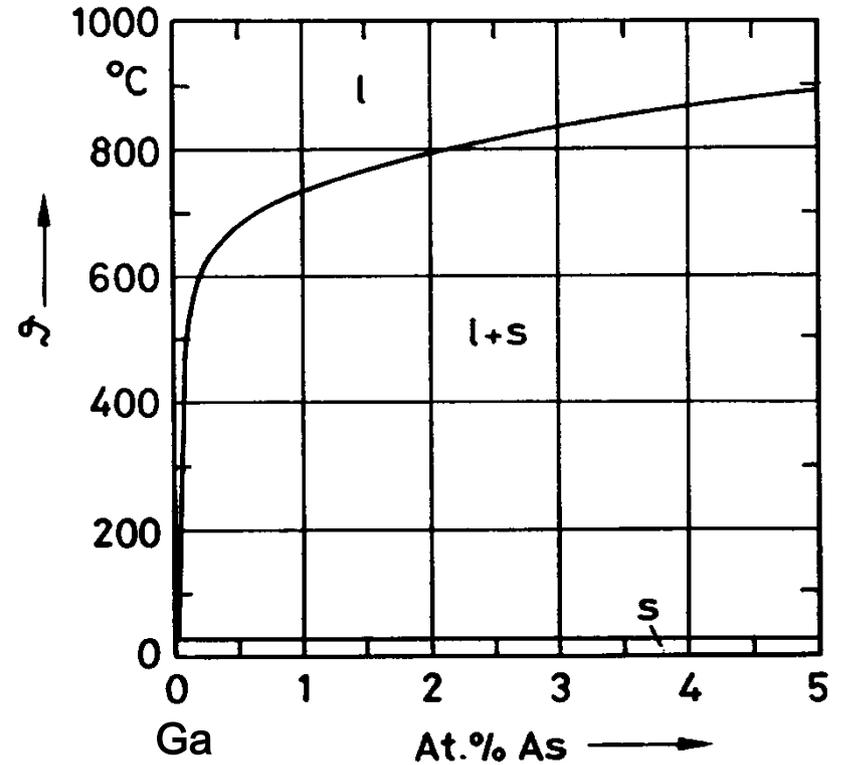
Epitaxie

Abscheidung kristalliner Schichten

Beispiel: **AlGaAs/GaAs**



Löslichkeit von As in Ga (Arrhenius-Darstellung)



Phasendiagramm:
Geringe Löslichkeit
weit unter 1 At.% As

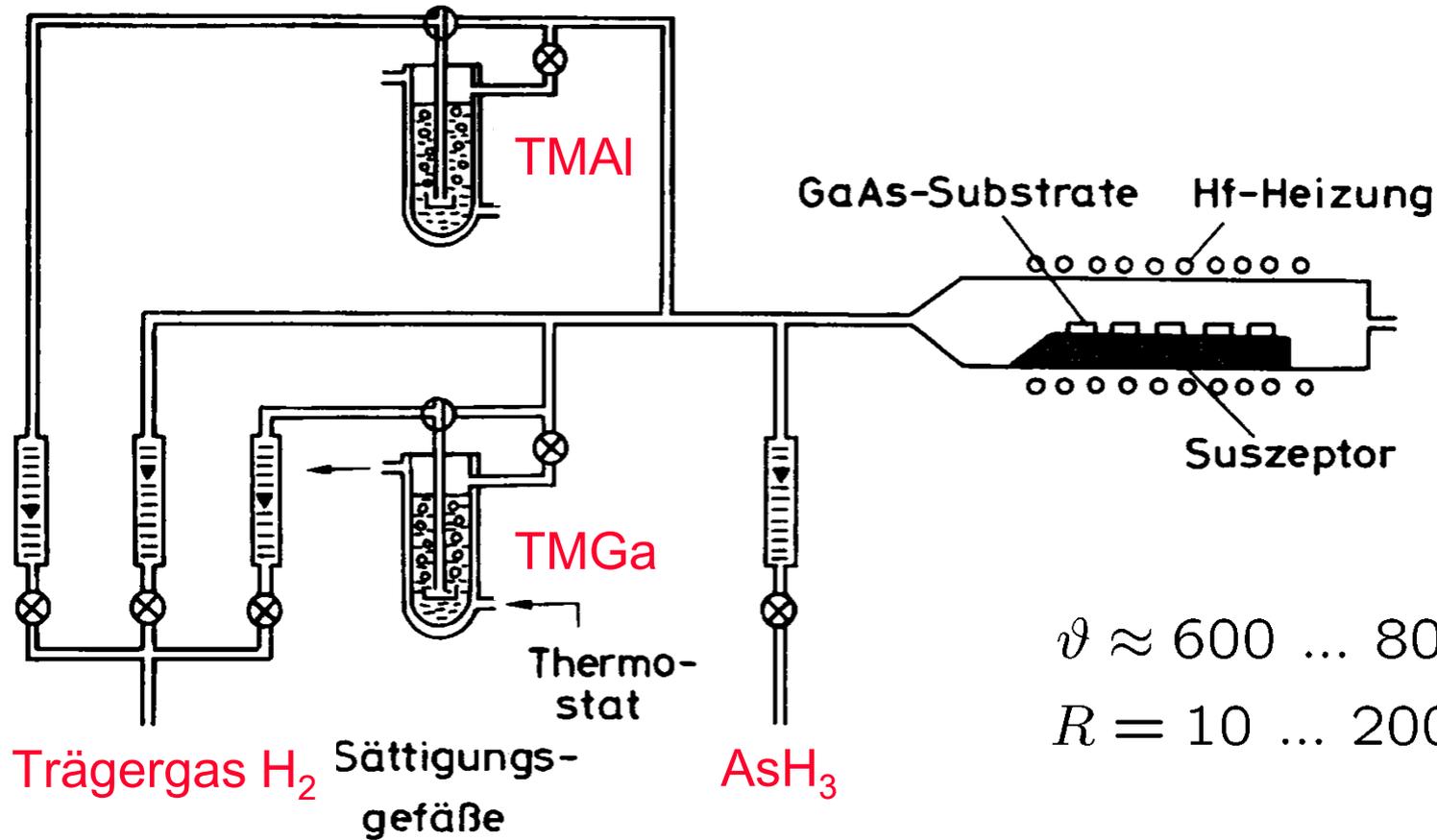
W. von Münch: Einführung in die Halbleitertechnologie. Teubner, Stuttgart 1993

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

Metallorganische Gasphasenepitaxie: MOVPE, MOCVD



$$\vartheta \approx 600 \dots 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 10 \dots 200 \text{ nm/min}$$

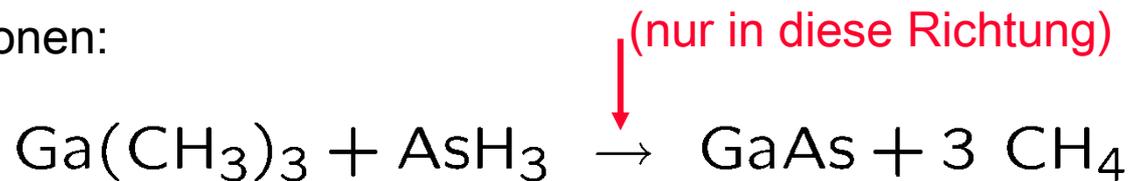
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

Metallorganische Gasphasenepitaxie: MOVPE, MOCVD

Reaktionen:



Abscheiderate wird bestimmt durch den Fluss von $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$

Heterostrukturen durch umschalten zwischen TMGa und TMAI.

Schichtpräzision bei $\vartheta \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta d \leq 1 \text{ nm}$

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

MBE-Prozess

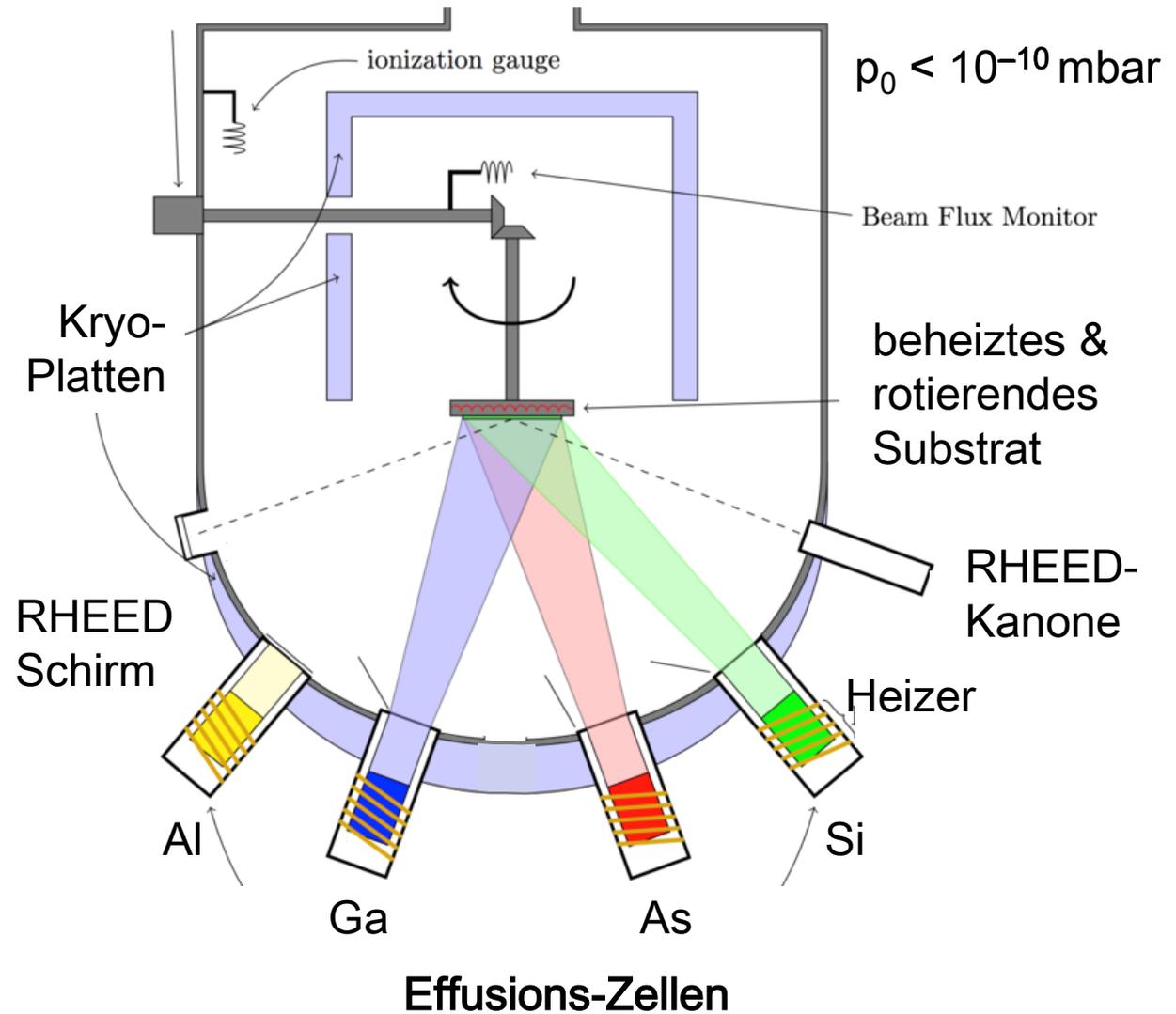
Abscheidung
im UHV

$\vartheta \approx 400 \dots 700 \text{ } ^\circ\text{C}$

$R = 1 \dots 20 \text{ nm/min}$

Schichtpräzision bei

$\vartheta \leq 700 \text{ } ^\circ\text{C}: \Delta d \leq 1 \text{ nm}$



W. Prost: Technologie der III/V-Halbleiter. Springer, Berlin 1997

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

MBE-Prozess

- Substrat aufheizen: **Desorption von Restgas**

- Effusionszellen heizen:

$$\vartheta_{Ga} = 930 \dots 980 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Fluss} = 10^{14} \dots 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\vartheta_{Al} = 1070 \dots 1130 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Fluss} = 10^{14} \dots 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\vartheta_{As} = 300 \dots 330 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Fluss} = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Haftkoeffizient der Ga-, Al-Atome ist 1, As haftet nur auf Ga-, Al-Atomen.

As-Überschuss sichert stöchiometrisches Wachstum.

Ga-, Al-Fluss bestimmt Abscheiderate.

Braun *et al.*, Phys. Rev. B **55**, 1689 (1997).

4. Herstellung von Nanostrukturen

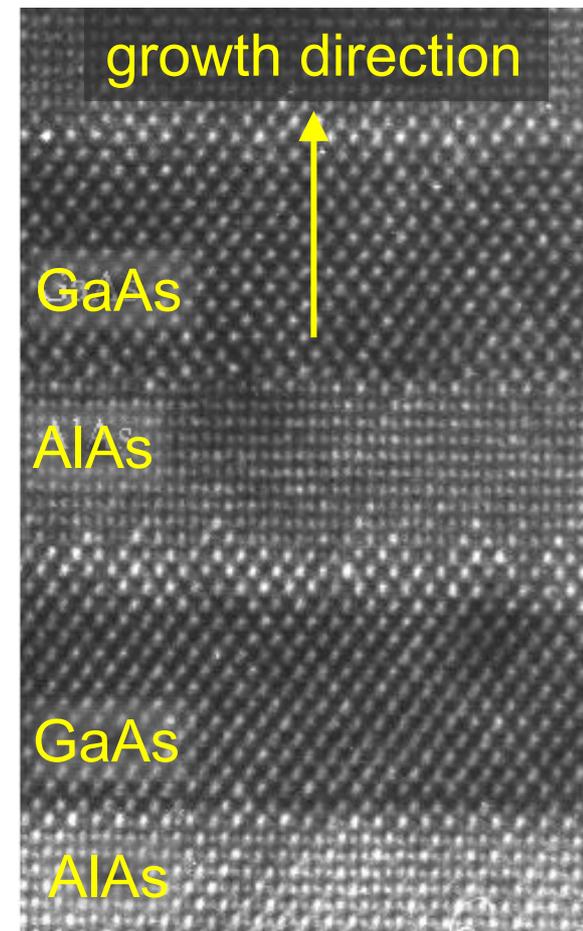
4.1 Schichten

Epitaxie

MBE-Prozess

Die Grenzfläche der GaAs-AlAs-Heterostruktur ist atomar abrupt, aber nicht perfekt eben. Die in Wachstumsrichtung untere Grenzfläche ist stets glatter.

TEM-Aufnahme einer GaAs-AlAs-Heterostruktur.



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

MBE-Prozess

Dotierstoffe: Donator: Si $N_D \leq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Si wird bei 650 °C auf Ga-Platz, über 700 °C auf As-Platz eingebaut.

Si ist bei hohen Konzentrationen amphoter.

In $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sinkt die Ionisationsrate mit steigendem Al-Gehalt:

Für n-Typ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ gilt bevorzugt $x < 0.35$.

Akzeptor: Be, C $N_A \leq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

Substrattemperatur:

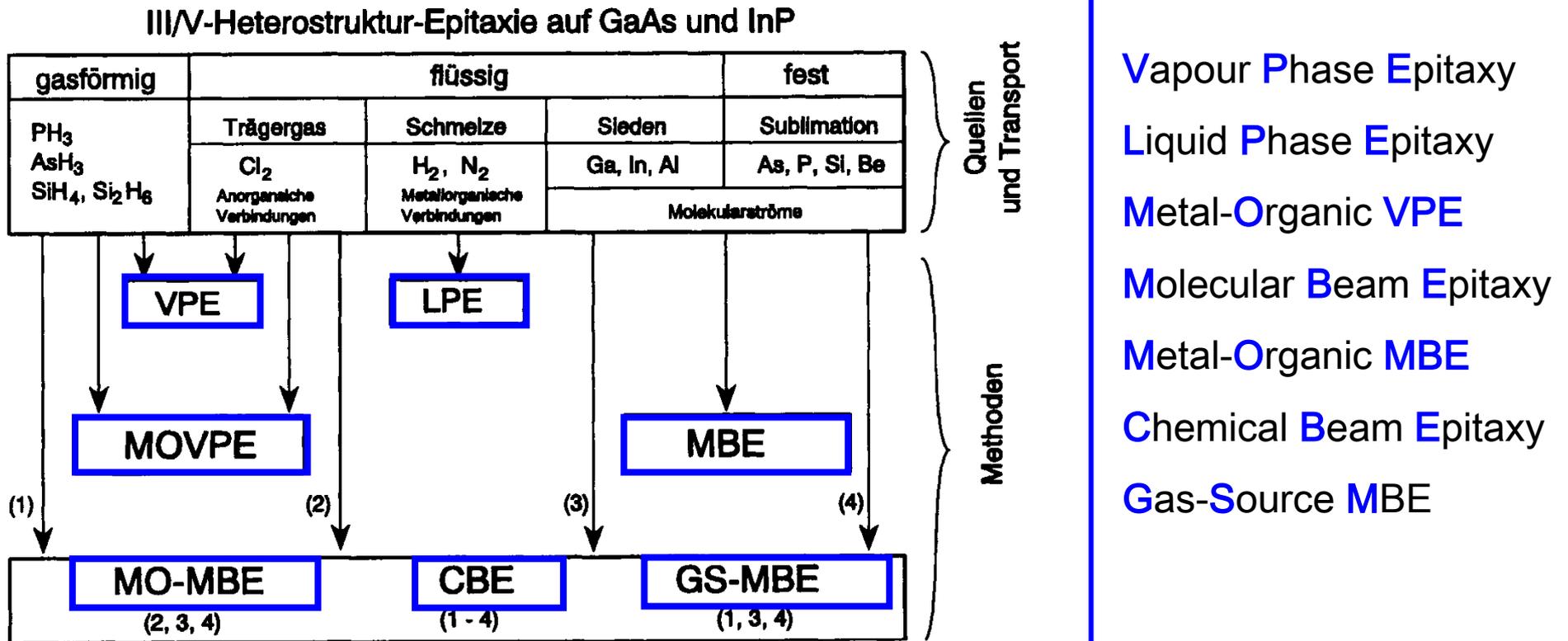
Niedrig für geringe Interdiffusion, hoch für eine Oberflächenbeweglichkeit der Atome zum Einbau in einen Gitterplatz.

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

Epitaxie

Weitere Verfahren – Quellen der Epitaxiesysteme für GaAs- und InP-Substrate



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.1 Schichten

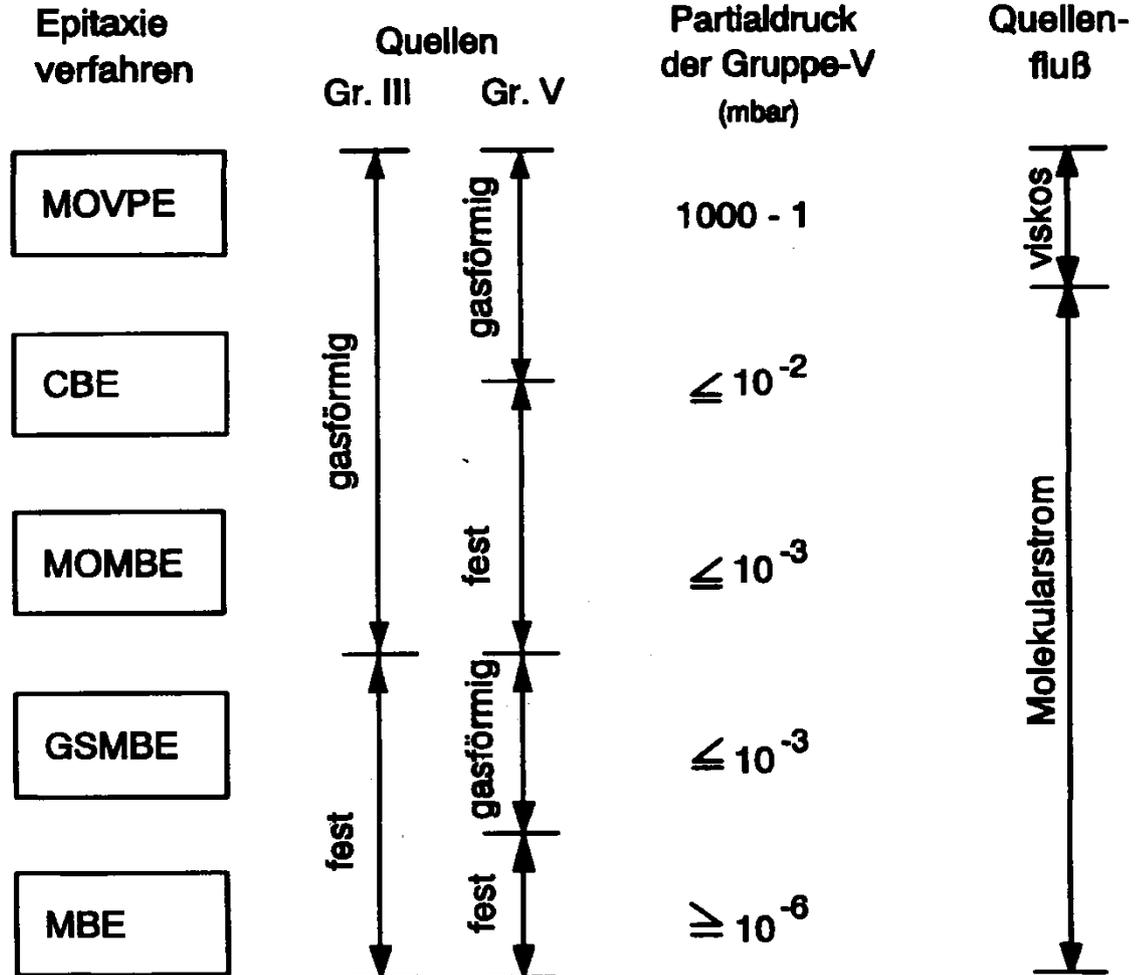
Epitaxie

Weitere Verfahren

Partialdruck und Quellenform

Gasquellen:
Kontinuierliche Abscheidung möglich

Ultra-Hoch-Vakuum:
In-Situ Messtechnik möglich



4. Herstellung von Nanostrukturen

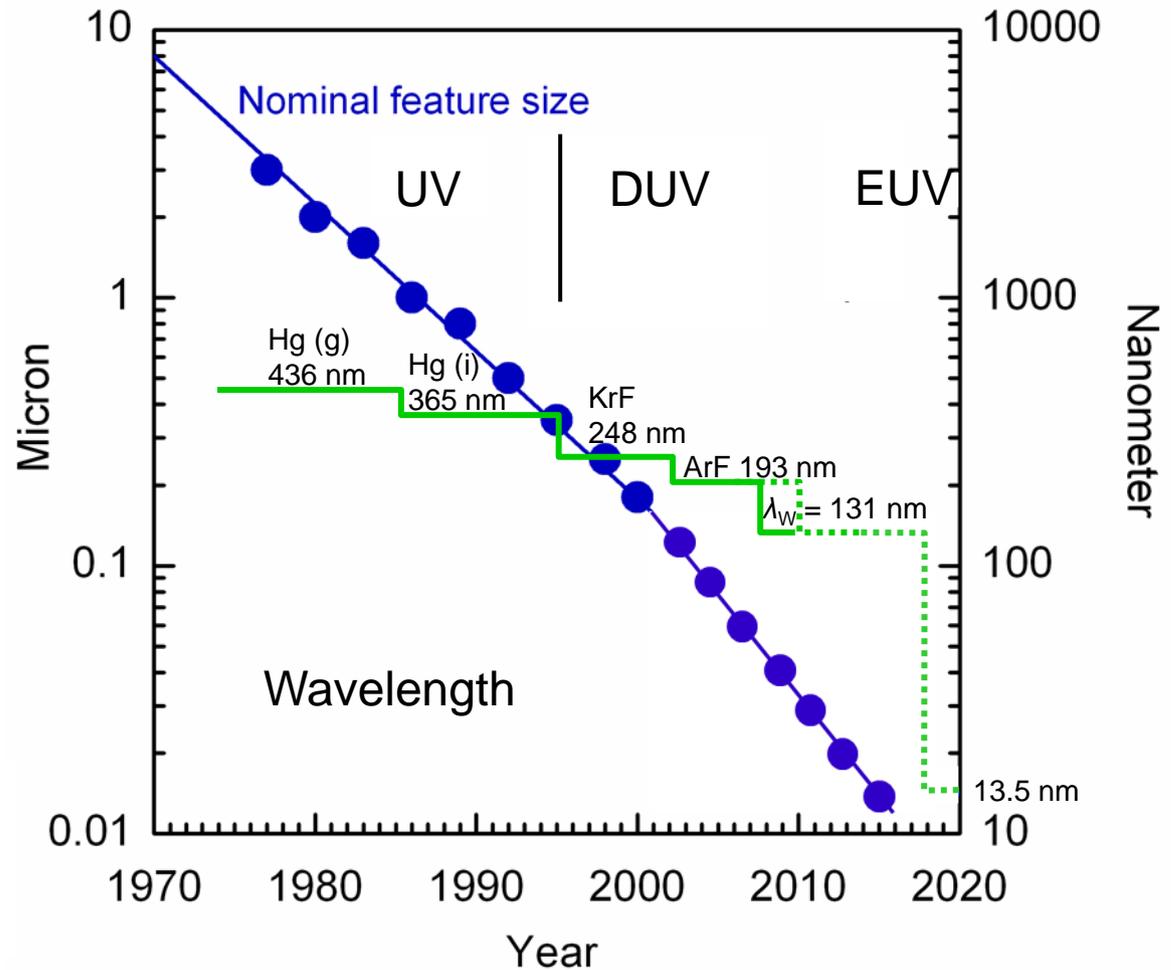
4.2 Optische Lithografie

Entwicklung industrieller Prozesse

Hg = Hochdrucklampe
 KrF = Excimerlaser
 ArF = Excimerlaser

UV = *Ultraviolet*
 DUV = *Deep Ultraviolet*
 EUV = *Extreme Ultraviolet*

EUV-Plasmaquelle,
 13.5 nm, Vakuum,
 Reflexionsoptik



N. Harned, IEEE Spectrum **36**, 35 (1999); R. van den Berg, Opto and Laser Europe **129**, 29 (2005)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Grundlagen

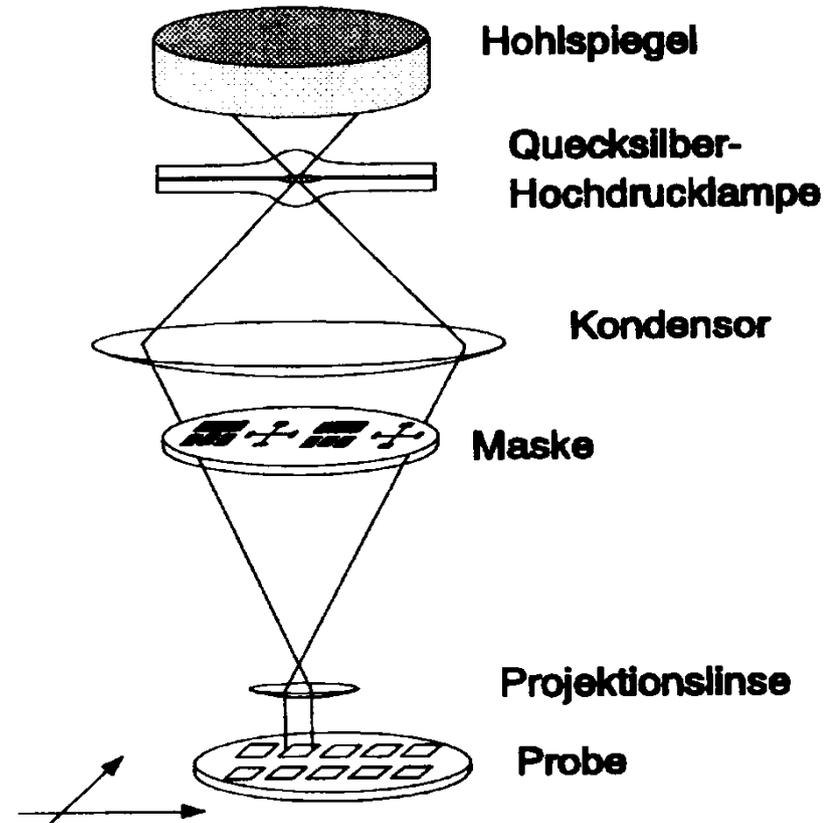
Projektions-Lithographie:
Stepper und Scanner

Auflösungsgrenze R durch
Fraunhofer-Beugung (Fernfeld):

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

Schärfentiefe DOF (Depth Of Field)
durch Fraunhofer-Beugung:

$$DOF \approx \pm k_2 \frac{\lambda}{NA^2}$$



Verkleinerte Projektion,
typische Verkleinerung um Faktor 4

IBM J. Res. Development **41**, 1-200 (1997)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Grundlagen

Projektions-Lithographie:
Beugungslimit

Auflösungsgrenze R durch
Fraunhofer-Beugung (Fernfeld):

$$2R \sin \theta = m\lambda$$

$$R = \frac{m\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$m = 1 \quad \text{und} \quad \sin \theta = NA$$

$$R = 0.5 \frac{\lambda}{NA} \quad \text{allg.:} \quad R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

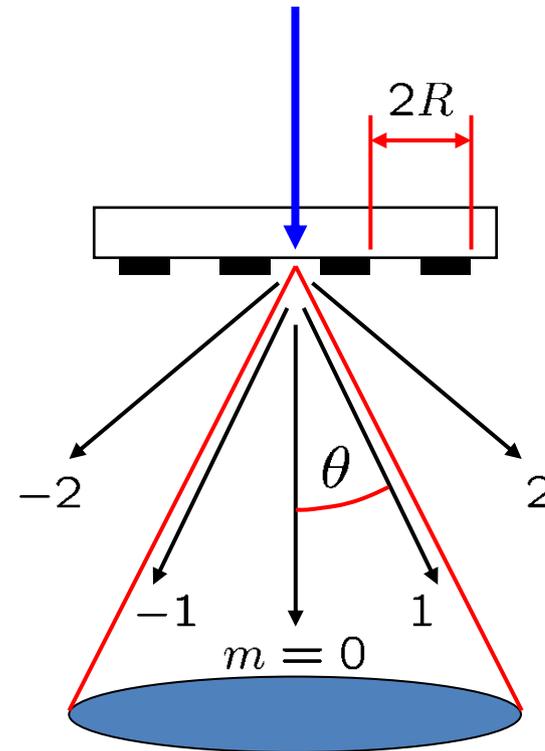


Abbildung periodischer Strukturen
an der Auflösungsgrenze

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Grundlagen

Projektions-Lithographie:
begrenzende Faktoren

k_1, k_2 : empirische Konstanten $\approx 0.5 \dots 1$

(Linsenfehler, Grad der Kohärenz;
Intensitätsverteilung in der Aperturebene,
optische Eigenschaften der Maske,
Geometrie und Mechanik,
Resistfilm und Prozessparameter)

DOF > Resistdicke,
> Wafer-Unebenheit

numerische Apertur

$$NA \approx 0.5 \dots 0.9$$

G-Linie, $\lambda = 436 \text{ nm}$

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = 1$$

$$NA = 0.8$$

$$\Rightarrow R \approx 550 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow DOF \approx 1.2 \mu\text{m}$$

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Grundlagen

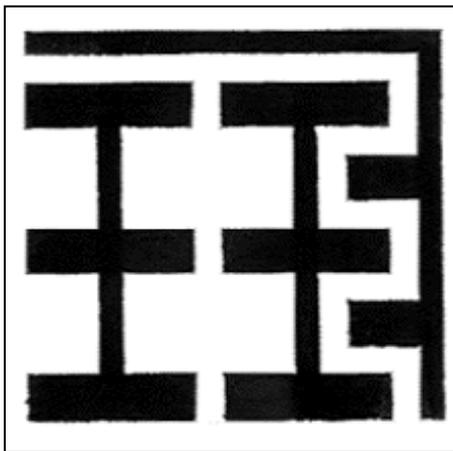
Projektions-Lithographie:
Lithografie an der
Auflösungsgrenze

Ist das Beugungslimit

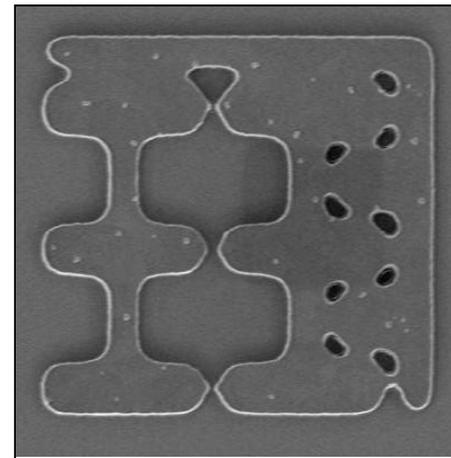
$$R > 0.5\lambda$$

die ultimative Grenze?

Maske



Struktur nach Übertragung



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

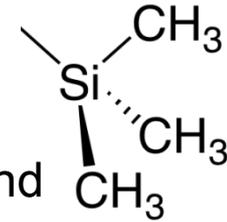
Verbesserungen

Projektions-Lithographie:

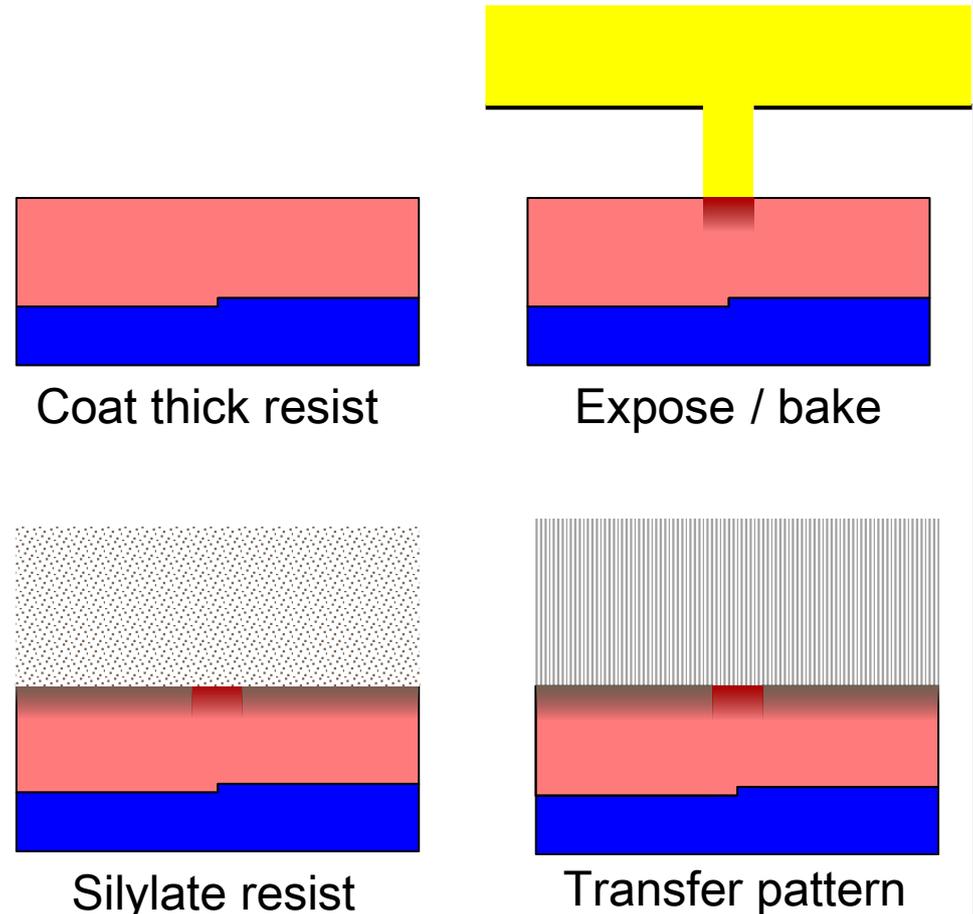
Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

1. Thin-Film Imaging, Top-Surface Imaging (TSI) – Wafer

Stark absorbierender Negativ-Resist, nur wenige 100 nm belichtet, geringere DOF erforderlich; **Silylierung nicht vernetzter Bereiche**, resistenter gegen Sauerstoff-Plasma; unbelichteter Teil bleibt stehen (Positiv-Prozess)



Trimethyl-Silyl Ligand



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Verbesserungen

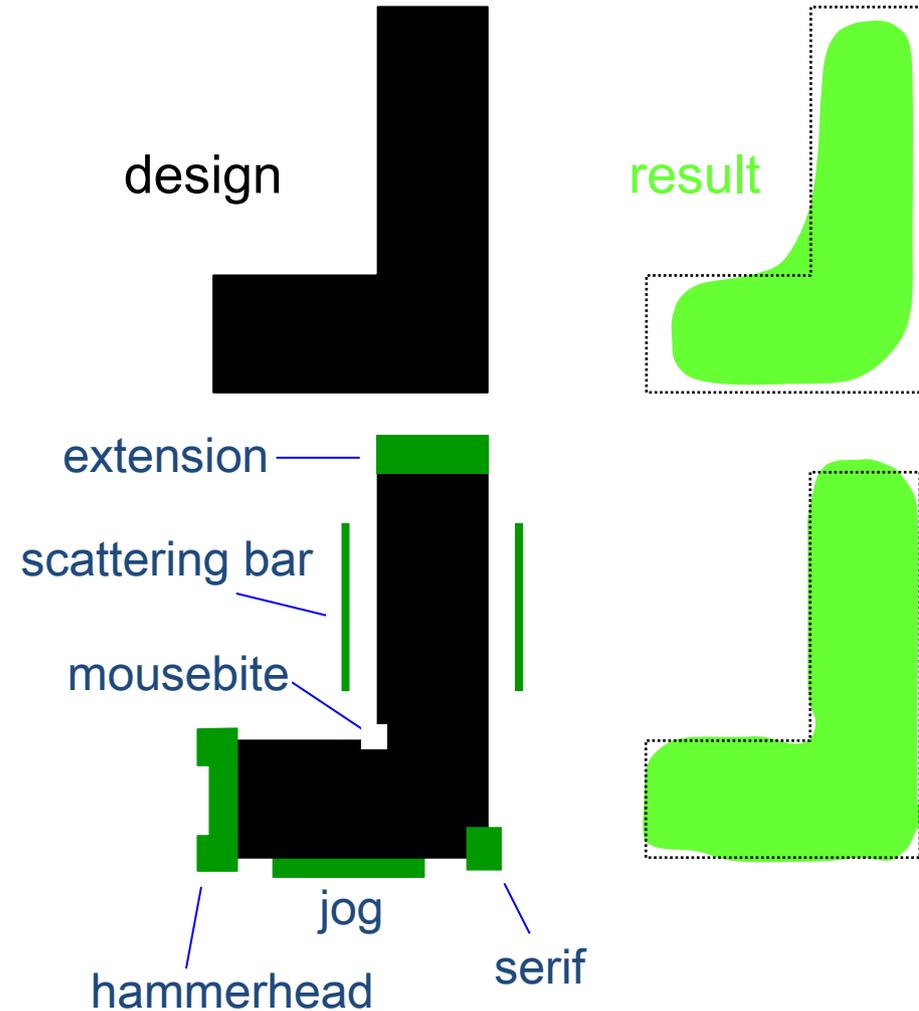
Projektions-Lithographie:

Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

2. Optical Proximity Correction (OPC) – Maske

3. Sub-Resolution Assist Features (SRAF) – Maske

Einfluss der Beugung auf die übertragene Geometrie optimieren durch geometrische Korrekturen, die mittels Simulationen ermittelt werden.



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Verbesserungen

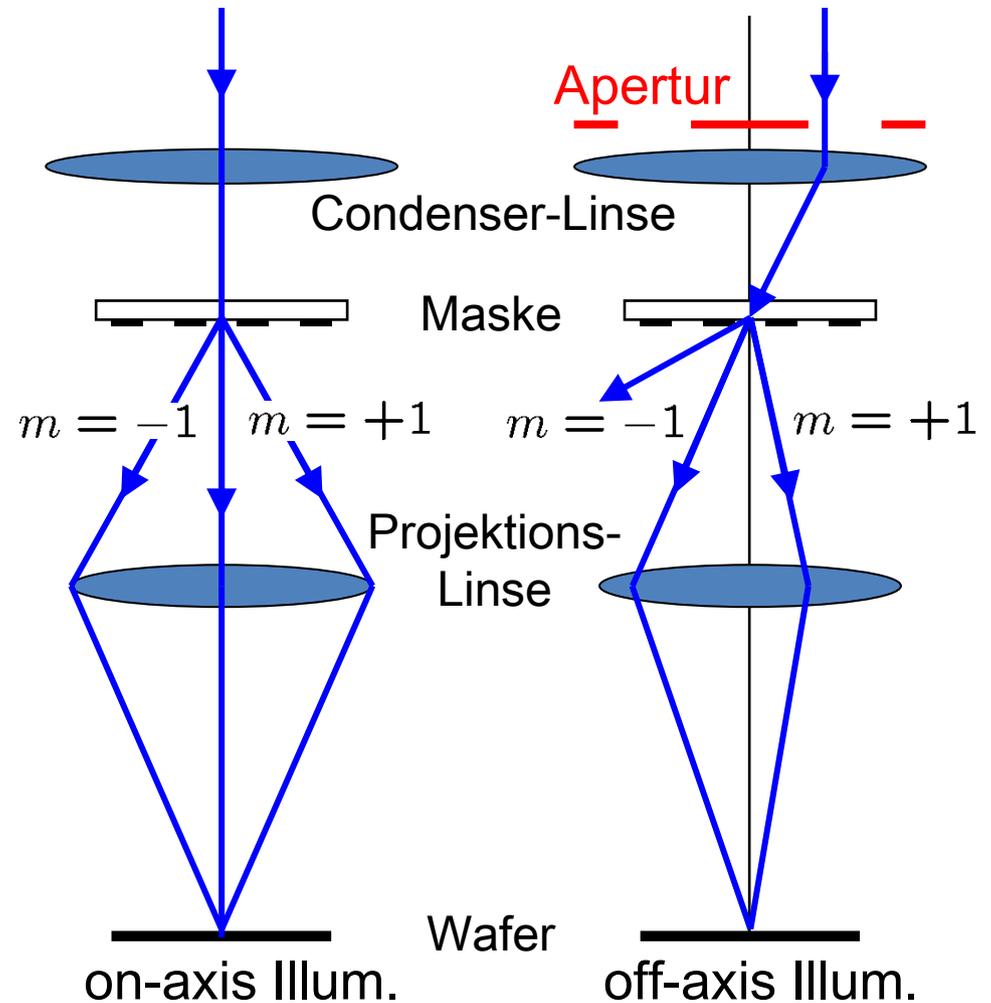
Projektions-Lithographie:

Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

4. Off-Axis Illumination (OAI) – Illuminator

Unterdrückung der 0. Ordnung, Transmission der 1. Ordnung = räumlicher Hochpass, halbiert theoretische Auflösung:

$$k_1 > 0.25$$



4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Verbesserungen

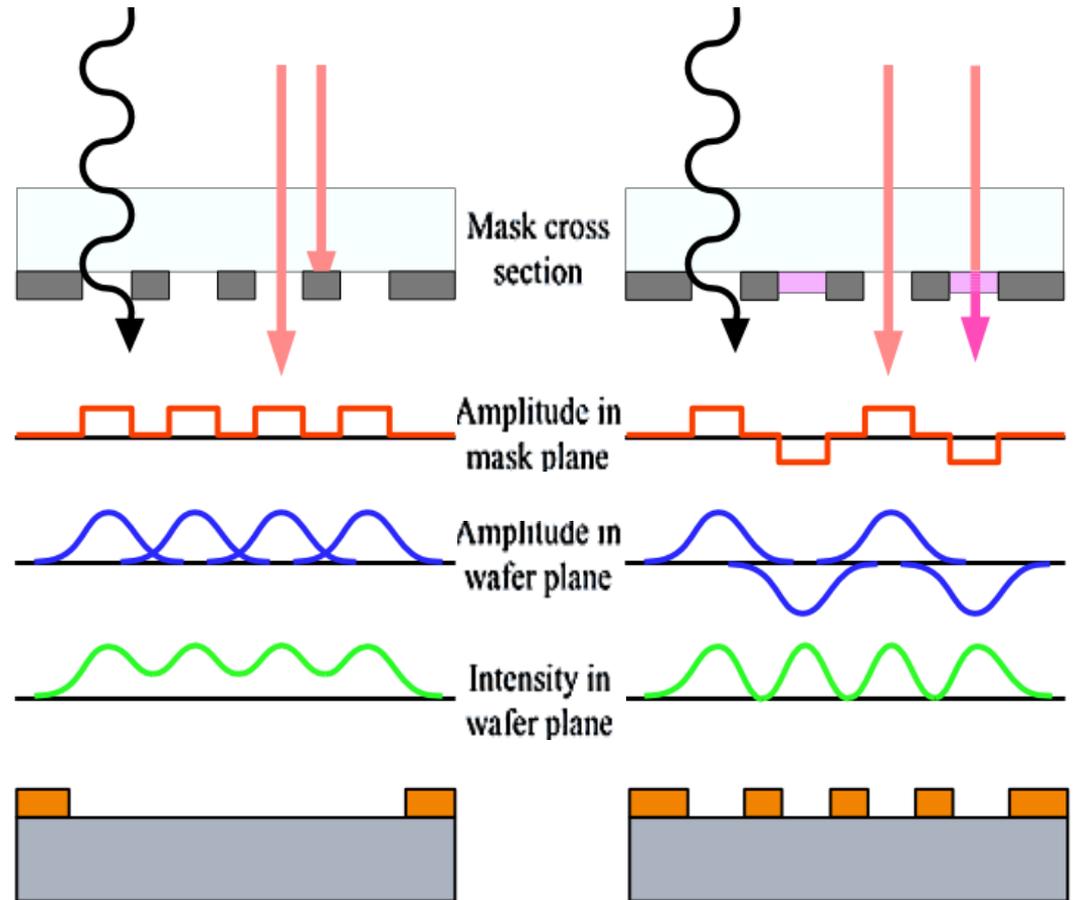
Projektions-Lithographie:
Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

5. Phase-Shift Mask (PSM) – Maske

Verdopplung der räumlichen Frequenz durch Interferenz halbiert theoretische Auflösung:

$$k_1 > 0.25$$

Principle of phase-shift masking



Liebmann *et al.* IBM J. Res. Development **45**, 651 (2001)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

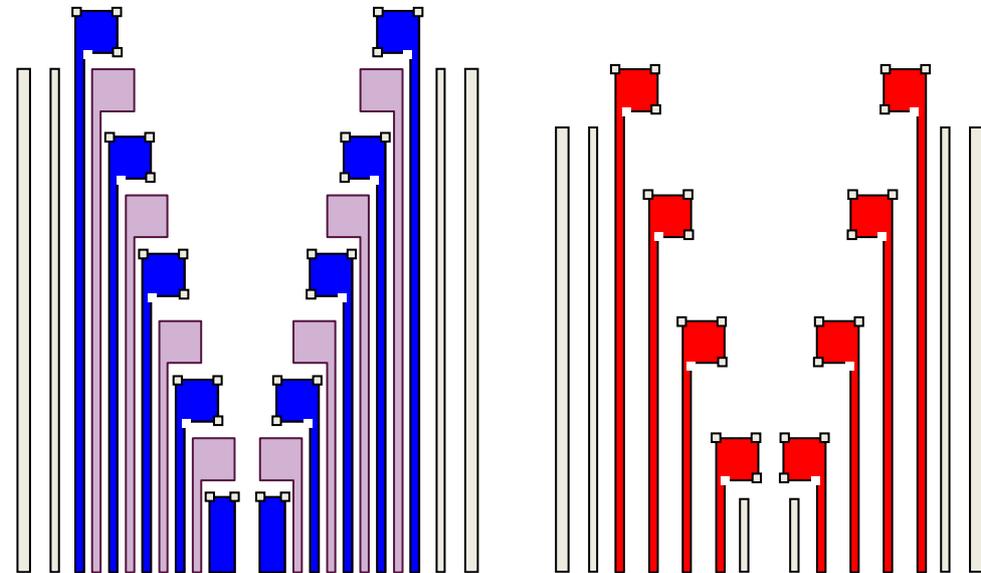
Verbesserungen

Projektions-Lithographie:

Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

6. Double Patterning Technology (DPT) – Maske, Wafer

Design split, sukzessive Belichtung "halber" Strukturen vergrößert das Prozessfenster



OPC: Mask A

OPC: Mask B

J. Park *et al.* Proc. SPIE 6349, 634922 (2006); C. A. Mack, IEEE Spectrum, 46, November 2008

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

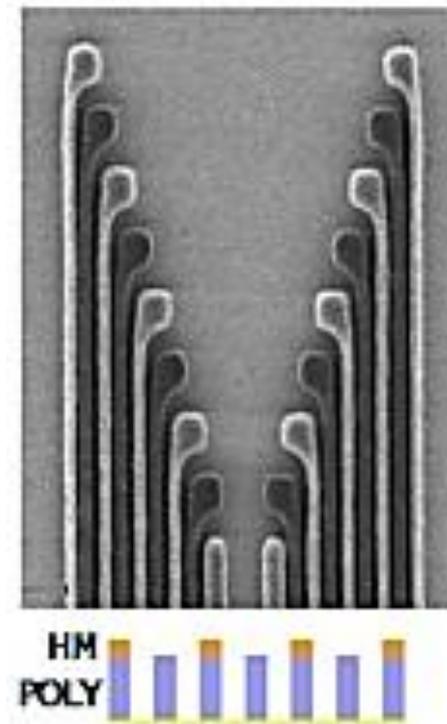
Verbesserungen

Projektions-Lithographie:

Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

6. Double Patterning Technology (DPT) – Maske, Wafer

Design split, sukzessive Belichtung "halber" Strukturen vergrößert das Prozessfenster



Poly Patterning

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Verbesserungen

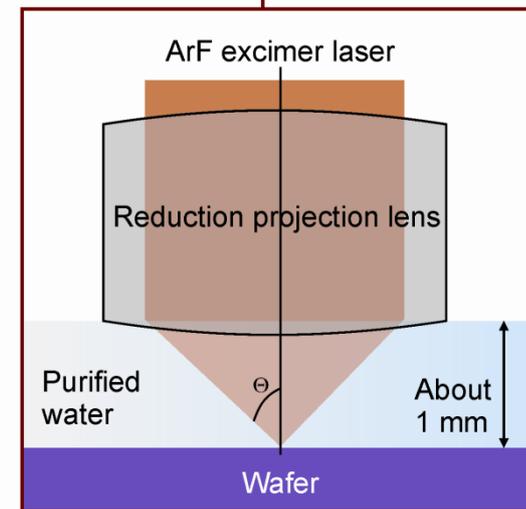
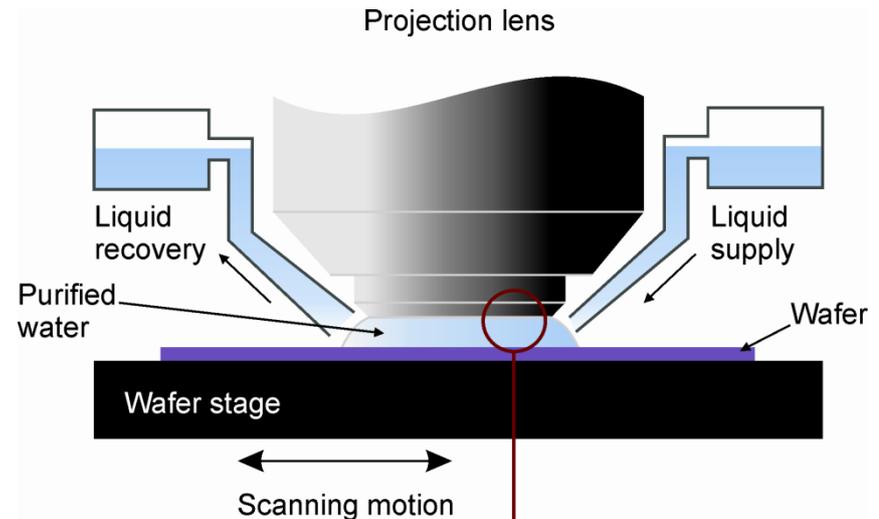
Projektions-Lithographie:
Resolution Enhancement Techniques (RET) – k_1 , Process Window

7. Liquid Immersion Technology (LIT) – Optics

Immersion mit Reinstwasser verkürzt die Wellenlänge, vergrößert die mögliche numerische Apertur auf $NA > 1.3$

$$\lambda_{med} = \lambda_{vac} / n_{med}$$

$$n_{med} = 1.44 \quad n \sin \theta = NA$$



<https://www.asml.com/en/news/stories/2023/how-immersion-lithography-saved-moores-law>

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Extremes Ultraviolett

EUV-Plasmaquelle: $\lambda = 13.5 \text{ nm}$, Vakuum, 250 W

Reflexionsoptik: 50x(Mo 2.5 nm + Si 4.6 nm), Reflektivität $\approx 65\%$



ASML/Carl Zeiss
SMT GmbH 2015

<https://semiengineering.com/why-euv-is-so-difficult/>

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.2 Optische Lithografie

Extremes Ultraviolett

Stand 2023: EUV-Lithografie wird eingesetzt ab 7 nm mit 28 nm Pitch (Intel, Samsung). TSMC plant den Einsatz ab 5 nm. Durchsatz 2020 bei 100–170 Wafer pro Stunde, abhängig vom Resist. Der Übergang zum Node 3 nm steht bevor. Bis dahin soll es mit *Single Patterning* reichen, dann evtl. ab 2 nm mit *Double Patterning*.

Ausblick: Die Standardleistung der EUV-Quelle beträgt derzeit 250 W. Ein Ausbau auf 500 – 1000 W erscheint möglich. Die numerische Apertur von derzeit $NA = 0.33$ wird in Kürze auf $NA = 0.55$ gesteigert, damit erreicht man eine Auflösung von 16 nm Pitch am 1.5 nm Node. In der Produktion verfügbar ab 2025. Auch der Resist für die $NA = 0.55$ Optik ist derzeit noch nicht verfügbar, ein Kandidat ist der Metalloxid-Resist. Aktuell wird die resistfreie Lithografie diskutiert (mit H-terminierter Si-Oberfläche), 5 nm große Strukturen wurden demonstriert, auch ein trockener Resist ohne *spin coating* ohne chemischen Abfall wie bei flüssiger Beschichtung ist möglich. $NA = \rightarrow 0.75$ ist in der Entwicklung, dauert etwa noch 10 Jahre.

<https://www.cyberoptics.com/improving-euv-process-efficiency/>

<https://semiengineering.com/making-chips-at-3nm-and-beyond/>

<https://semiengineering.com/high-na-lithography-starting-to-take-shape/>

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.3 Elektronenstrahlithografie

Direktschreiben

Strahlerzeugung

Fokussierter Elektronenstrahl
z.B. Elektronenmikroskop.

$$E = 1 \dots 100 \text{ keV}$$

Kathode bestimmt
Schreibkonditionen.

Fokus je nach Kathode
und Elektronenenergie.

Kathode	W	LaB ₆	ZrO ₂ /W	W
Prinzip	TE	TE	TFE	FE
I_{max} (µA)	1	1	0.1	10 ⁻⁴
ΔE (eV)	2–3	1.3	0.35	0.22
T (K)	2700	1800	1800	300
I_{rausch} (%)	1	1	1	5–10
p (hPa)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
bei 1 kV	25 nm	20 nm	1.4 nm	1.2 nm
bei 25 kV	3.5 nm	3.0 nm	0.6 nm	0.4 nm
bei 200 kV	0.2 nm	0.2 nm	0.1 nm	0.1 nm

W. Prost: Technologie der III/V-Halbleiter. Springer, Berlin 1997

4. Herstellung von Nanostrukturen

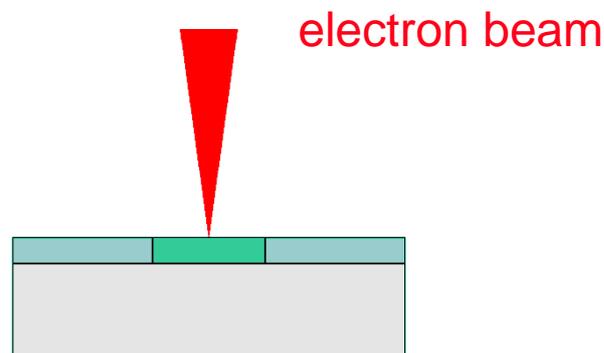
4.3 Elektronenstrahlithografie

Direktschreiben

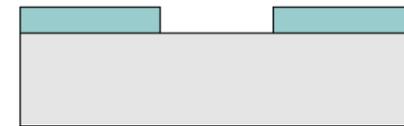
Prozess mittels Positiv-Resist



Resist (PMMA)
aufschleudern und
trocknen, aushärten,
Schichtdicke
50 – 500 nm



Bestrahlen mit
Elektronen
hoher Energie,
Bindungen
aufbrechen



Entwickeln,
bestrahlte Teile
entfernen

W. von Münch: Einführung in die Halbleitertechnologie. Teubner, Stuttgart 1993

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.3 Elektronenstrahlolithografie

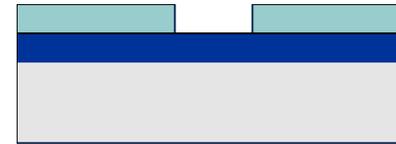
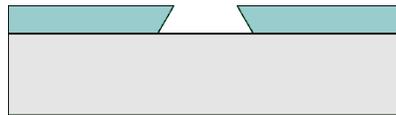
Direktschreiben

Strukturübertragung

Lift-off

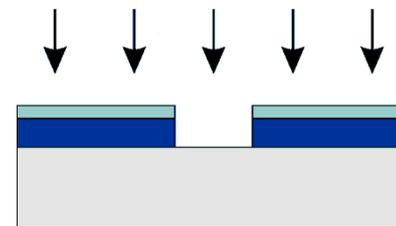
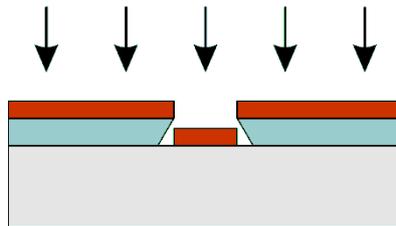
Ionenätzen

1. Belichten,
Entwickeln



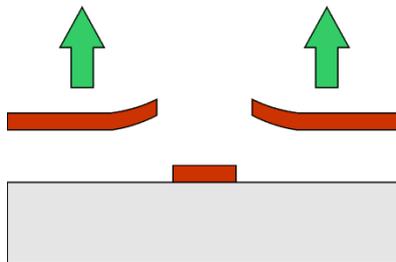
1. Belichten,
Entwickeln

2. Metall
aufdampfen



2. Ätzen, z.B.
mit Cl-Ionen

3. Lift-off



3. Übrigen Resist
entfernen

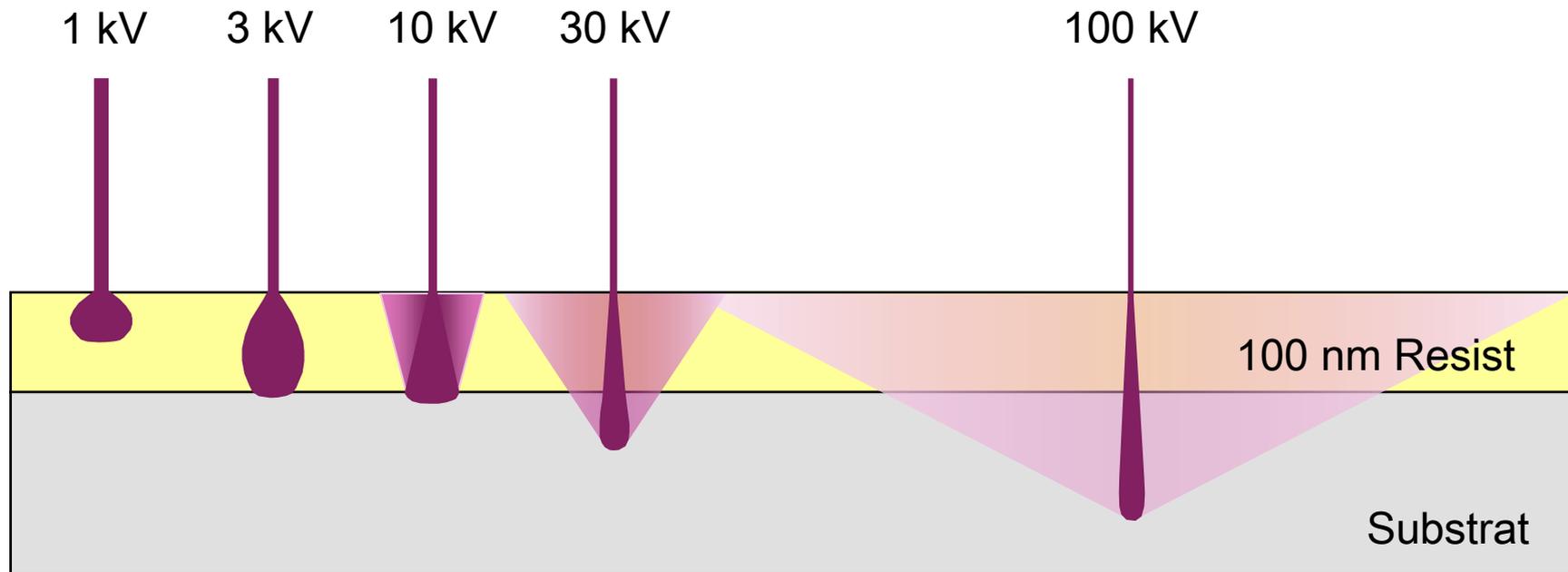
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.3 Elektronenstrahlolithografie

Direktschreiben

Wechselwirkung der Elektronen mit Resist und Substrat

Proximity-Effekt maximal bei mittleren Energien (≈ 20 keV), WW bestimmt Auflösungsgrenze



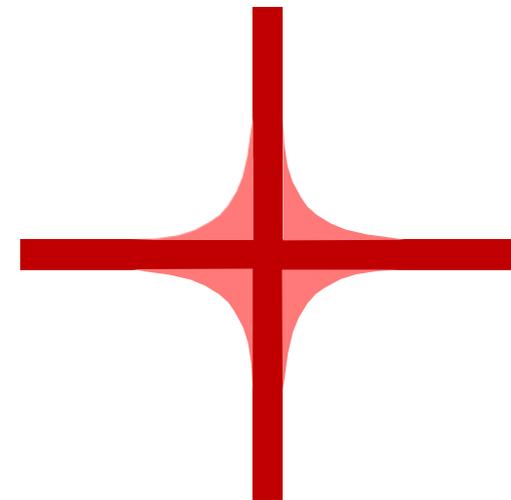
A.N. Broers, A.C.F. Hoole, J.M. Ryan, *Microelectronic Engineering* **32**, 131 (1996).

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.3 Elektronenstrahlolithografie

Direktschreiben

Proximity-Effekt



Strategien zur Vermeidung des Proximity-Effekts:

Elektronenenergie	<5 keV (Niederenergie)	>80 keV
Mechanismus	nur Vorwärtsstreuung	breite Rückstreuung aus dem Substrat
Empfindlichkeit	hoch [Tilke <i>et al.</i>]	gering [Fujita <i>et al.</i>]
Auflösung im Resist	ca. 20 nm [Golzhäuser <i>et al.</i>]	ca. 5 nm [Word <i>et al.</i>]
Nachteil	spezielle Kathode!	Strahlenschäden [Tilke <i>et al.</i>]

A. Tilke *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **17**, 1594-1597 (1999); A. Golzhäuser *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 3414 (2000); J. Fujita *et al.* Microelectronic Engineering **41/42**, 323 (1998); M.J. Word, I. Adesida, P.R. Berger, J. Vac. Sci. Technol. B **21**, L12 (2003)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.3 Elektronenstrahlithografie

Direktschreiben

Minimale Strukturgröße

* Abkürzungen:

- PMMA = Polymethylmethacrylate
- CX = Calixarene
- C5/C5 = Hexapentyloxytriphenylene
- HSQ = Hydrogen silsesquioxane

Elektronenenergie (keV)	35	30	30	300	30	50
Resist (Typ) *	PMMA (p)	LiF +10% AlF ₃ (p)	CX (n)	PMMA (n)	C5/C5 (n)	HSQ (n)
Strukturübertragung	lift-off	keine	keine	keine	keine	keine
Lines / spaces (nm)	10 / 30	5 / 60	10 / -	15 / 15	14 / -	6 / 21
Literatur	Fischer, Chou	Fujita <i>et al.</i> 1995	Fujita <i>et al.</i> 1996	Hoole <i>et al.</i>	Robinson <i>et al.</i>	Word <i>et al.</i>

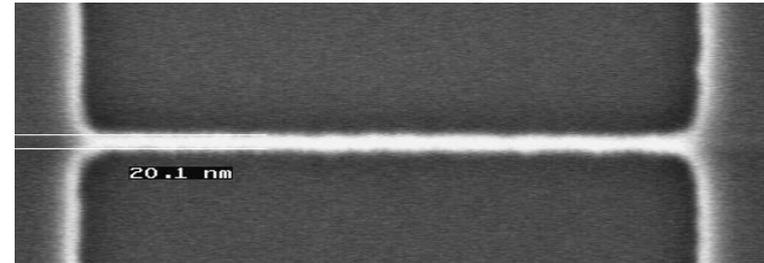
P.B. Fischer, S.Y. Chou, Appl. Phys. Lett. **62**, 2989-2991 (1993).; J. Fujita *et al.* Appl. Phys. Lett. **66**, 3065 (1995); J. Fujita *et al.* Appl. Phys. Lett. **68**, 1297 (1996); A. C. F. Hoole *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **12**, 1166 (1997); P. G. Robinson *et al.* J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 2730 (2000); Word *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **21**, L12 (2003)

4. Herstellung von Nanostrukturen

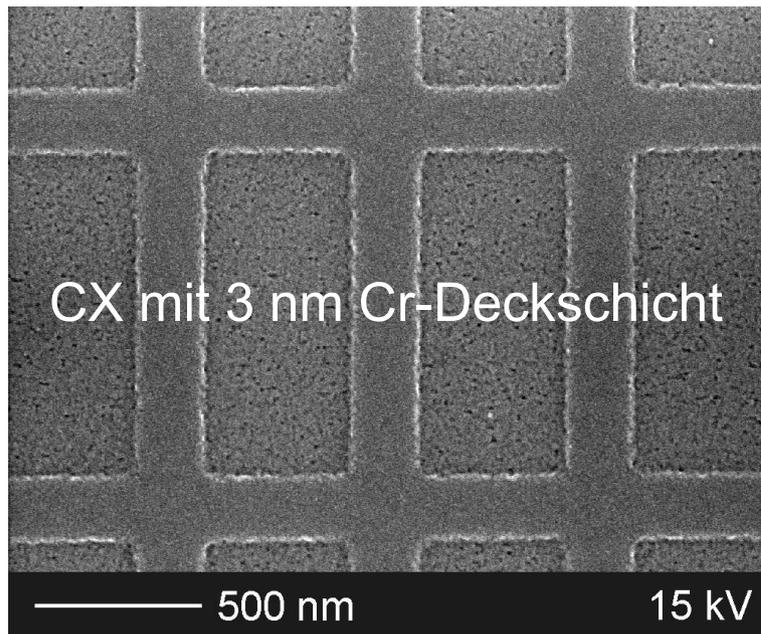
4.3 Elektronenstrahlolithografie

Direktschreiben

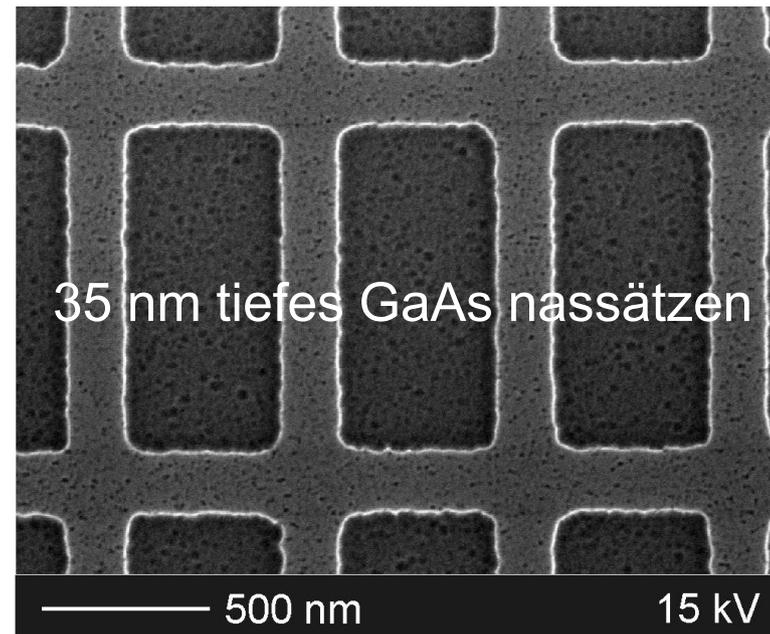
Beispiele für 2.0 kV in CX



20 nm-Linie übertragen durch RIE in Si



CX mit 3 nm Cr-Deckschicht



35 nm tiefes GaAs Nassätzen

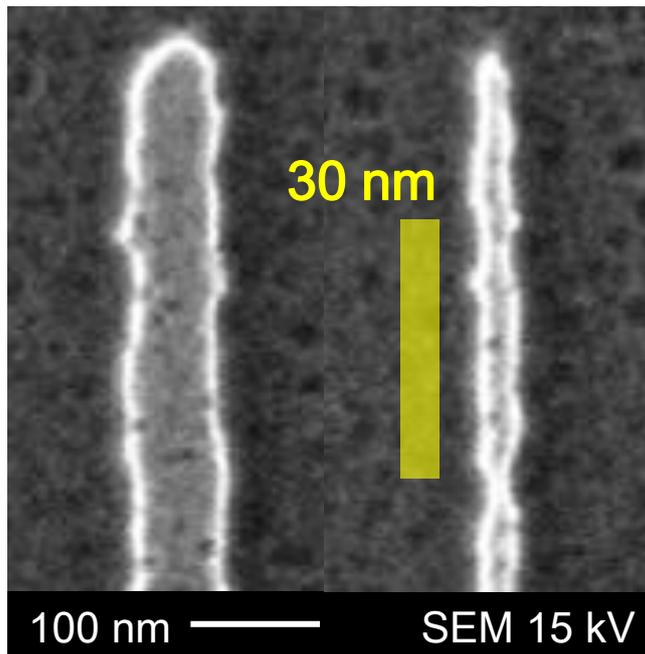
M. Knop *et al.* *Semicond. Sci. Technol.* 20, 814-18 (2005).

4. Herstellung von Nanostrukturen

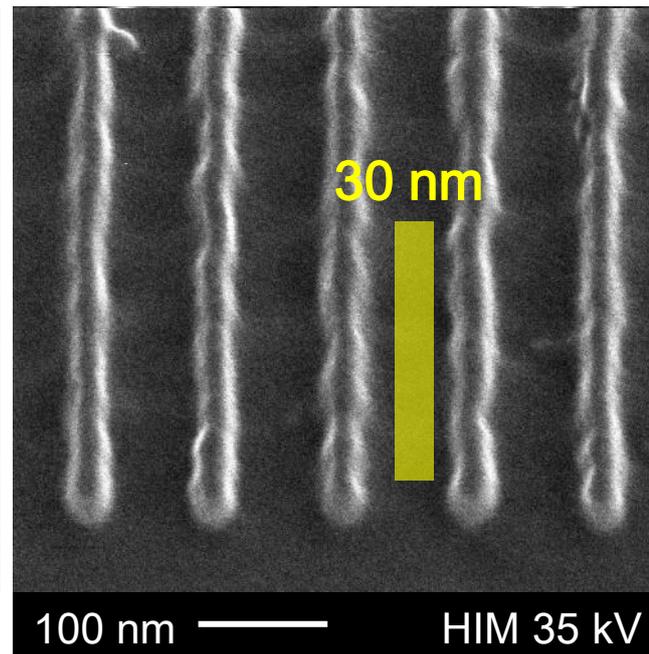
4.3 Elektronenstrahlolithografie

Direktschreiben

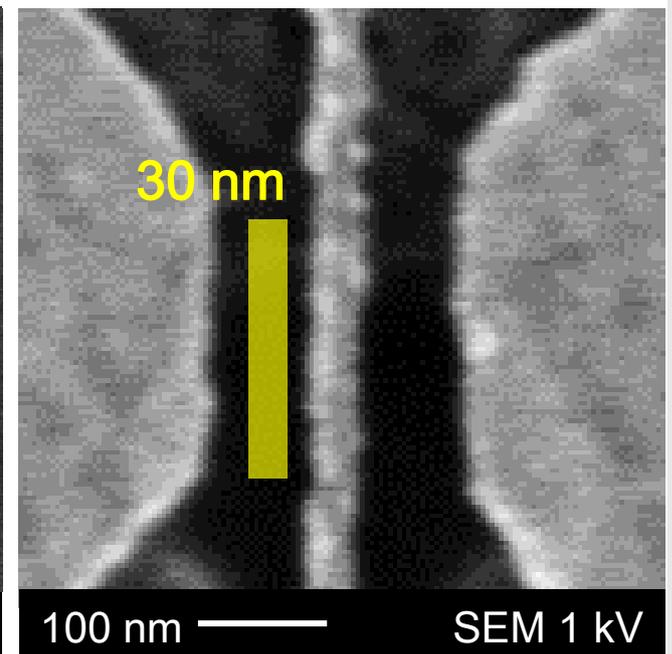
GaAs, 2.0 kV in CX
 Ätzen in $C_6H_8O_7 + H_2O_2$



Si, 2.0 kV in CX
 Low-damage Plasma $CF_4 + O_2$



Pd, 5.0 kV in PMMA
 Loft-Off Process



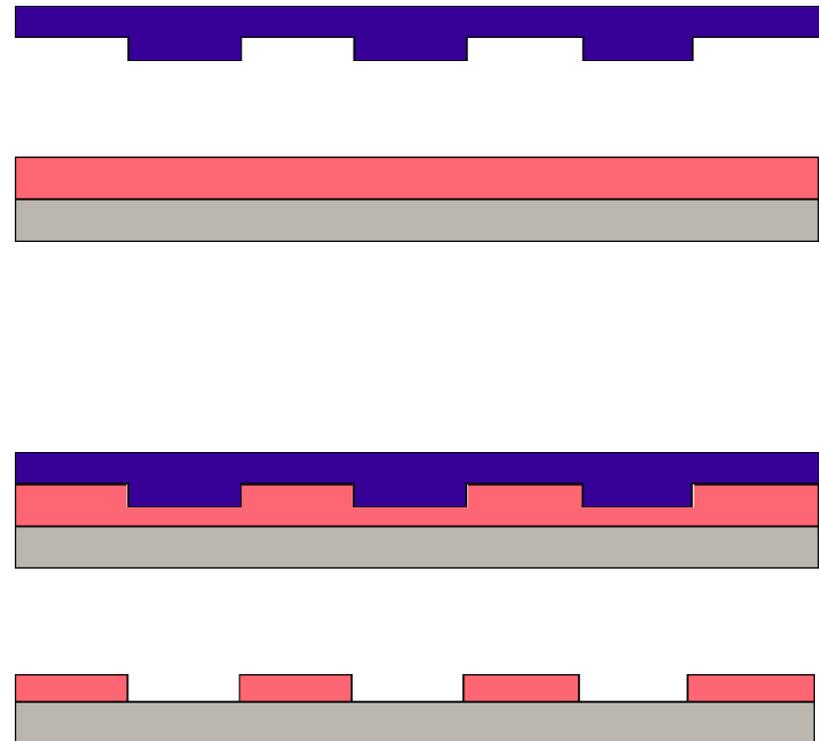
Carl Zeiss SMT – ORION PLUS helium ion microscope

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.4 Nanoimprint-Lithografie

Thermoplastisches Verfahren

1. Si/SiO₂-Pressform herstellen
2. Substrat mit PMMA beschichten
3. Schicht auf 140-180 °C aufheizen, Struktur bei 40-130 bar einprägen
4. Abkühlen, Form abheben
5. Strukturübertragung durch RIE



L. J. Guo J. Phys. D: Appl. Phys. **37**, R123-R141 (2004)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.4 Nanoimprint-Lithografie

Thermoplastisches Verfahren

Stand der Technik

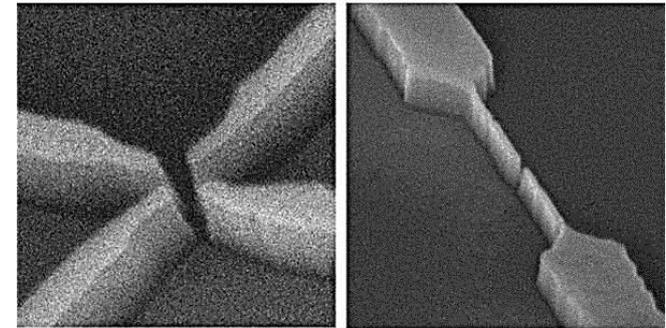
Feldgröße 100 mm Durchmesser

Verarbeitung von 100 mm-Wafern

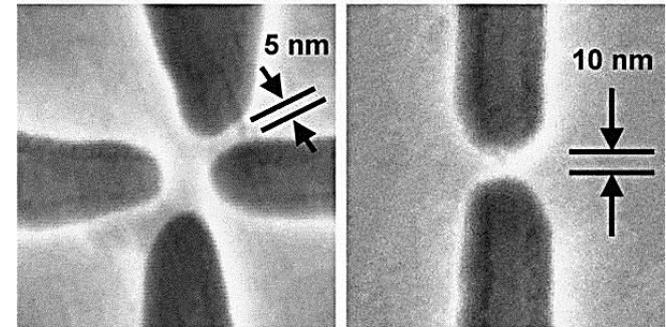
Justierung mehrerer Ebenen
durch Rückseiten-Marken auf 250 nm

Minimale Strukturgröße 5 nm,
abhängig von der mittels
EBL gefertigten Form

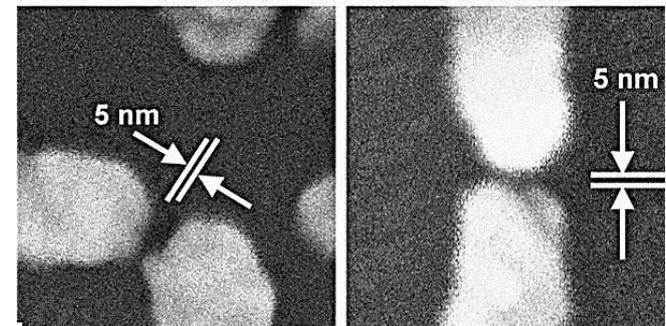
(a) SiO₂ NIL Mold



(b) NIL Polymer Imprint



(c) Au 5 nm Contacts



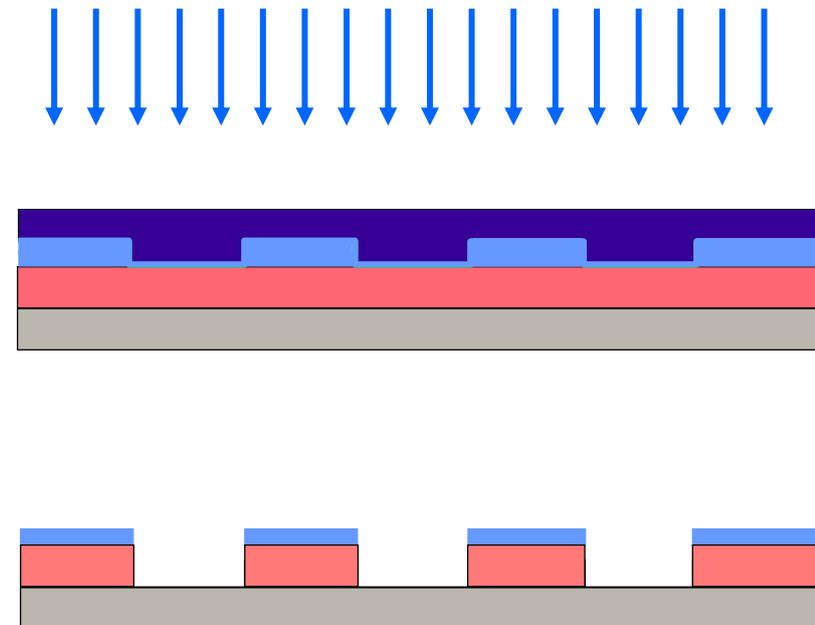
M. D. Austin *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 5299 (2004); H. Gao *et al.*, Nano Lett. **6**, 2438 (2006).; H. Schiff, J. Vac. Sci. Technol. B **26**, 458 (2008)

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.4 Nanoimprint-Lithografie

Step & Flash Verfahren

1. SiO₂-Pressform herstellen,
mit Ablösefilm beschichten
2. Substrat mit Transferschicht +
Negativ-Resist beschichten
3. Struktur bei **0.05 bar** einprägen,
durch 365 nm UV-Belichtung
bei **RT** polymerisieren
4. Form abheben
5. Strukturübertragung durch RIE
Halogen: Neg.-Resist,
Sauerstoff: Transferschicht



T. C. Bailey *et al.*, J. Photopolymer Sci. Tech. **15**, 481 (2002).

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.4 Nanoimprint-Lithografie

Step & Flash Verfahren

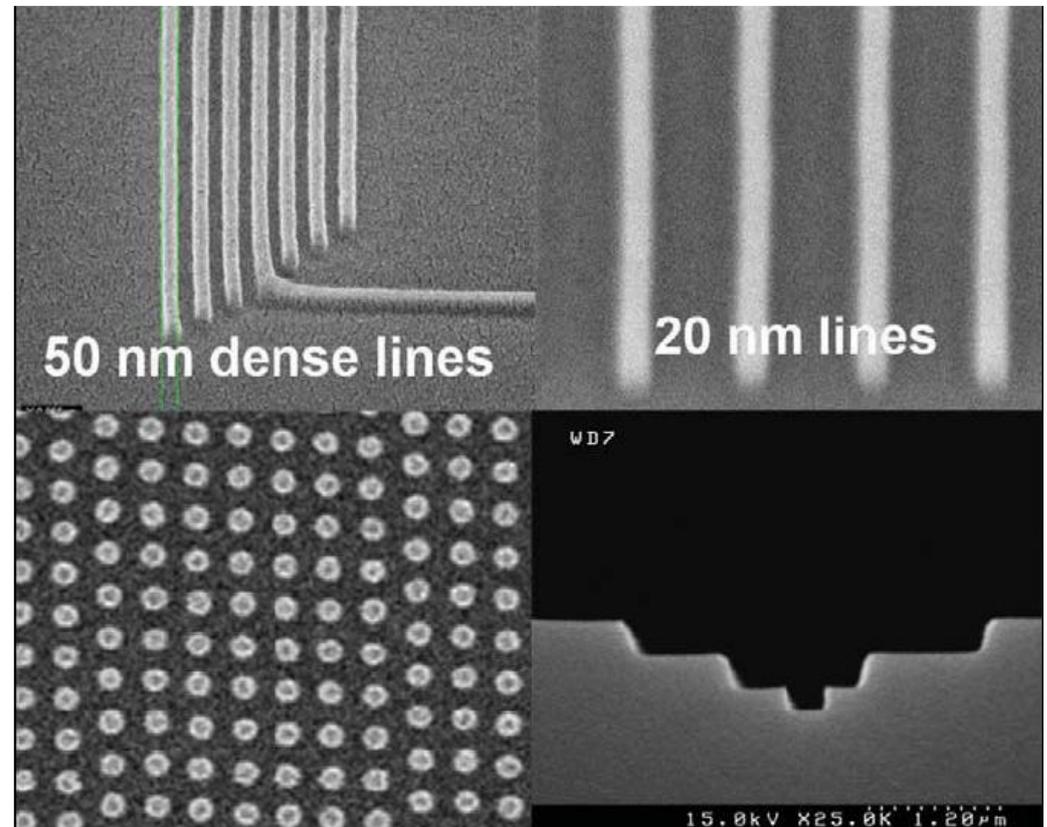
Stand der Technik

Feldgröße 26 x 32 mm²

Verarbeitung von 300 mm-Wafern

Justierung mehrerer Ebenen durch optische Marken auf <10 nm

Minimale Strukturgröße 20 nm, abhängig von der mittels EBL gefertigten Form



50 nm / 20 nm Linien,
60 nm Säulen, 3-fach gestufter Graben in Si

D.J. Resnick, S.V. Sreenivasan, C. G. Willson, Materials Today 34 (2005).

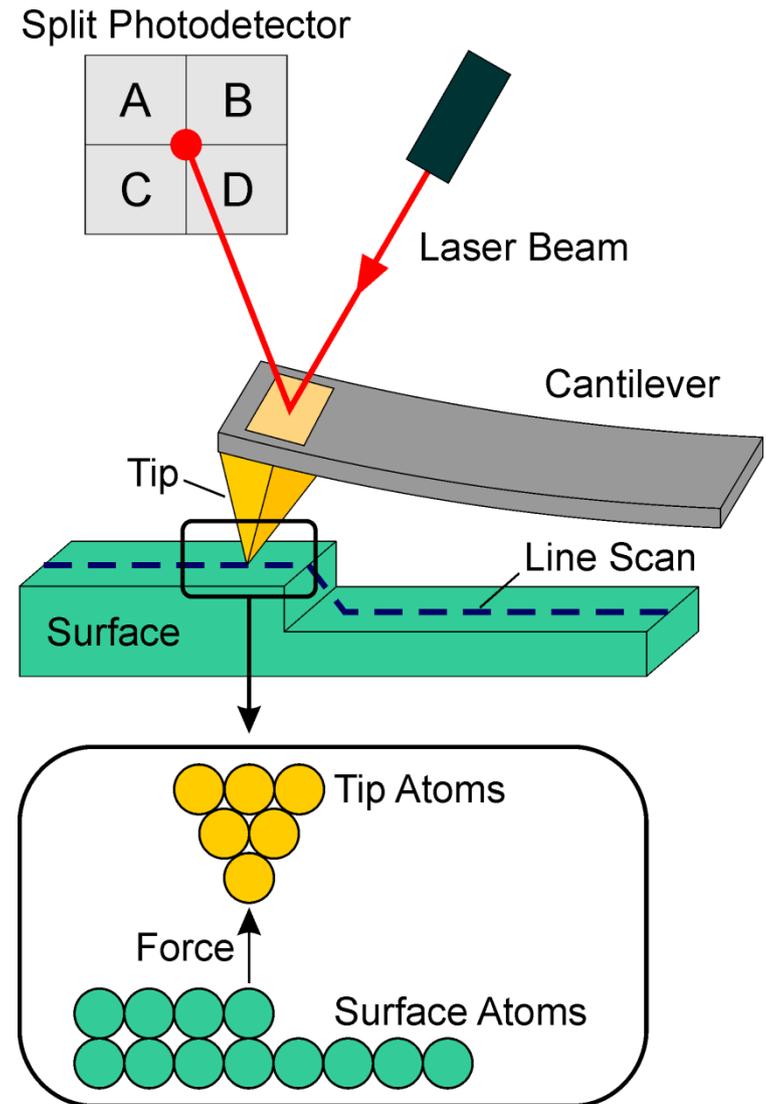
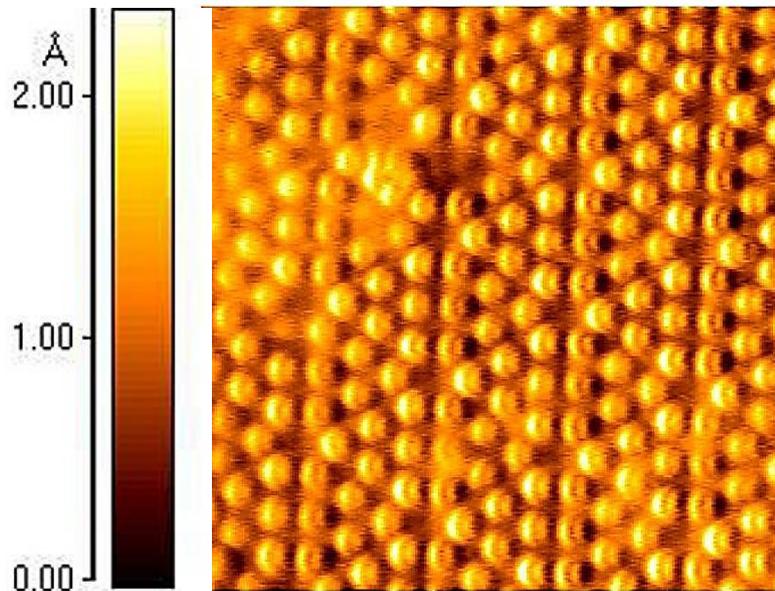
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.5 Rastersonden-Lithografie

Atomic Force Microscope (AFM)

Funktionsweise

Strukturauflösung < 1 nm:
 Beispiel: Si(111)-Oberfläche 10x10 nm²



F. J. Giessibl, Reviews in Modern Physics **75**, 949 (2003); http://www.molec.com/what_is_afm.html

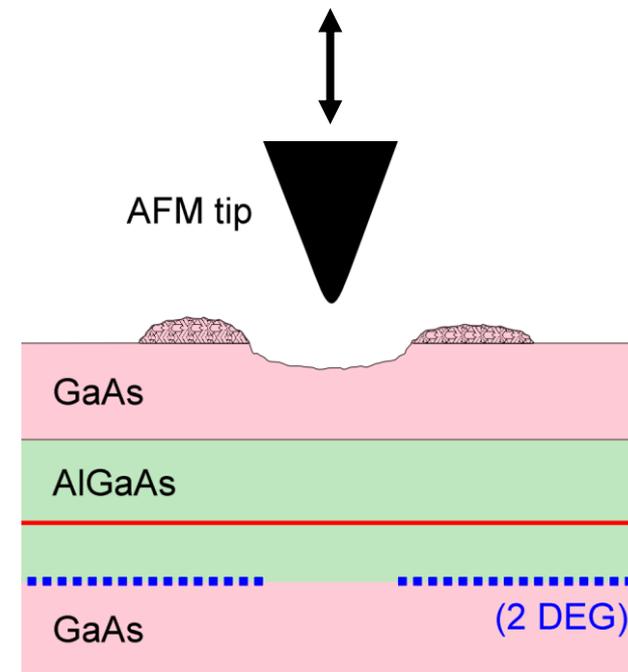
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

Direct Machining

GaAs/AlGaAs mechanisch
direkt bearbeiten mit
Silizium- oder Diamant- Spitze
im *Tapping* oder *Contact Mode*



C. K. Hyon *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 292 (1999); H. W. Schumacher *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 1107 (1999).;
M. Versen *et al.*, Ultramicroscopy **82**, 159 (2000); J. Regul *et al.*, Appl. Phys. Lett. **81**, 2023-2025 (2002).

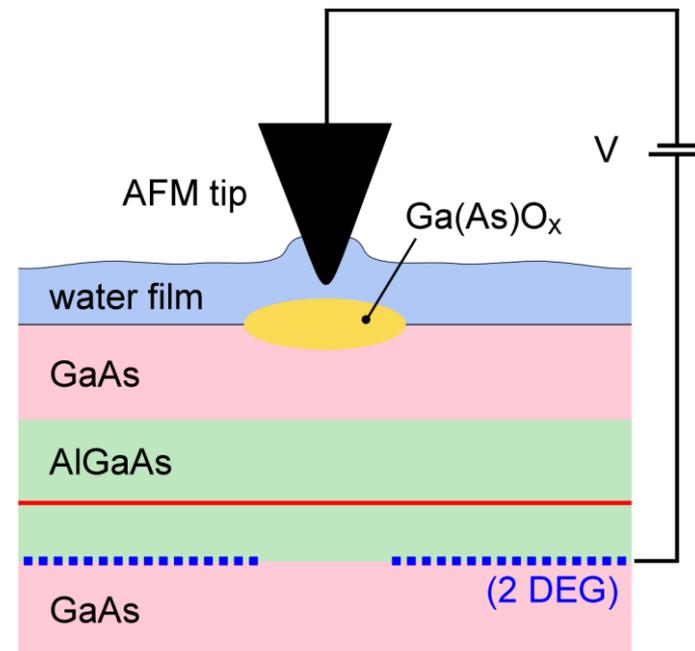
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

Anodic Oxidation

GaAs/AlGaAs anodisch oxidieren
mit leitender Silizium-Spitze
im *Tapping* oder *Contact Mode*



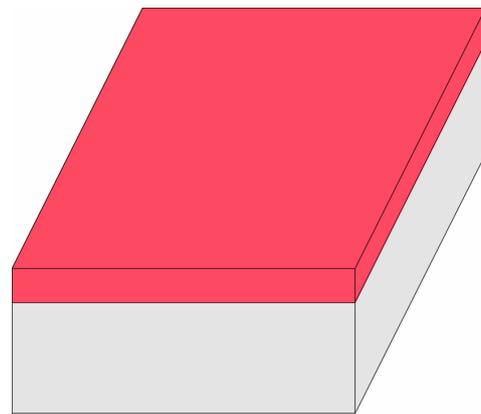
M. Ishii, K. Matsumoto, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, 1329 (1995);
R. Held *et al.*, Appl. Phys. Lett. **73**, 262 (1998); A. Fuhrer *et al.*, Superlattices Microstruct. **31**, 19 (2002)

4. Herstellung von Nanostrukturen

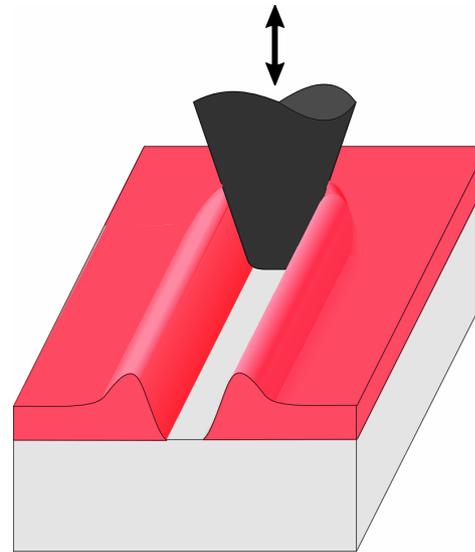
4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

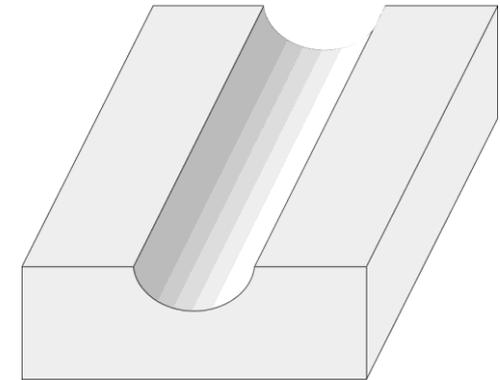
Dynamic Ploughing



5 – 7 nm
Resist aufschleudern



Pflügen erzeugt
Nano-Furche



Übertragung durch
Nassätzen

B. Klehn, U. Kunze, J. Appl. Phys. **85**, 3897 (1999);
G. Apetrii *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **17**, 735 (2002); U. Kunze, Superlattices Microstruct. **31**, 3 (2002).

4. Herstellung von Nanostrukturen

4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

Dynamic Ploughing

Entwurf:

Scan-Feld ($s = 5 \mu\text{m}$)

Vibrationsamplitude ($a = A/A_0$)

Translation ($\Delta x, \Delta y$)

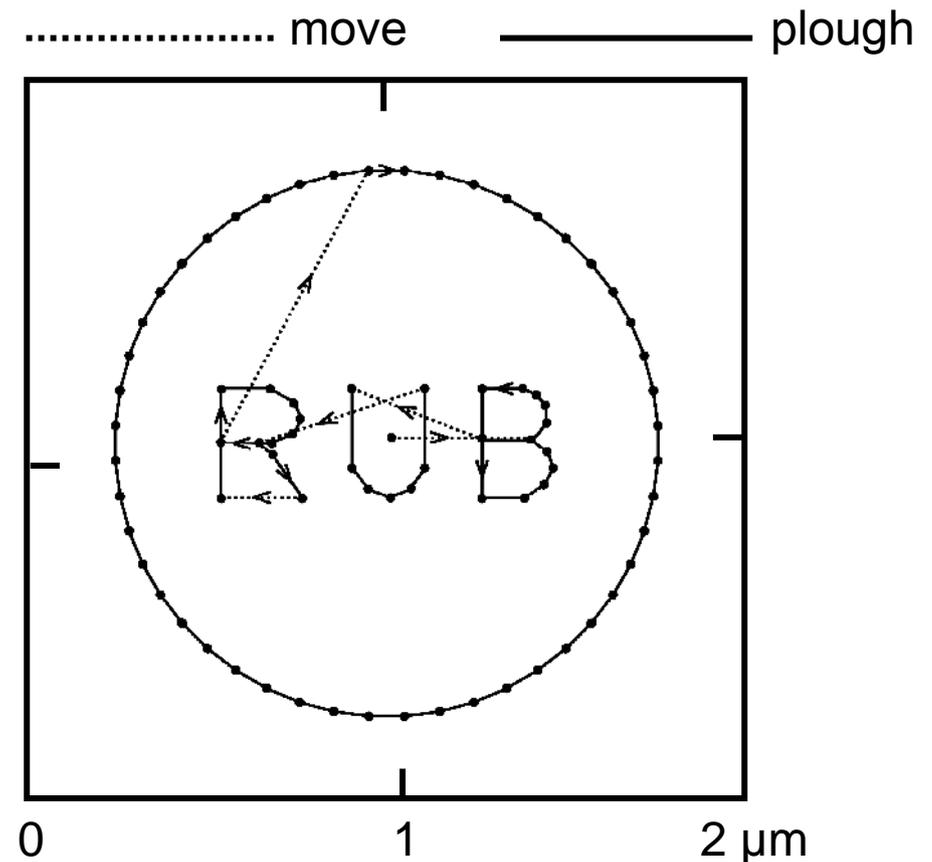
Geschwindigkeit ($v = 1 \mu\text{m/s}$)

Wartezeit ($t = 10 \text{ ms}$)

Beispiel:

320 nm RUB

1.55 μm 48-Eck

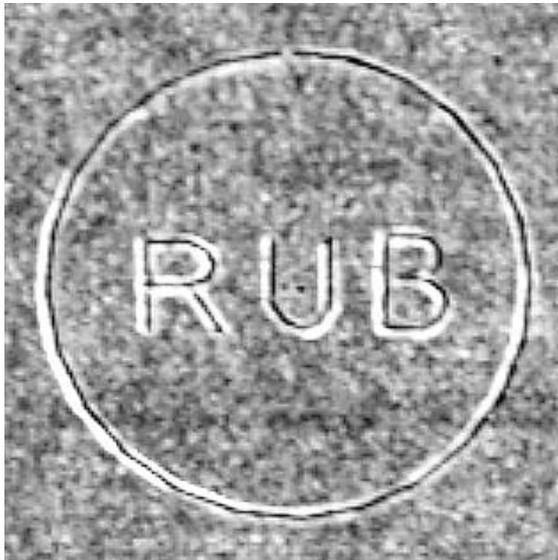


4. Herstellung von Nanostrukturen

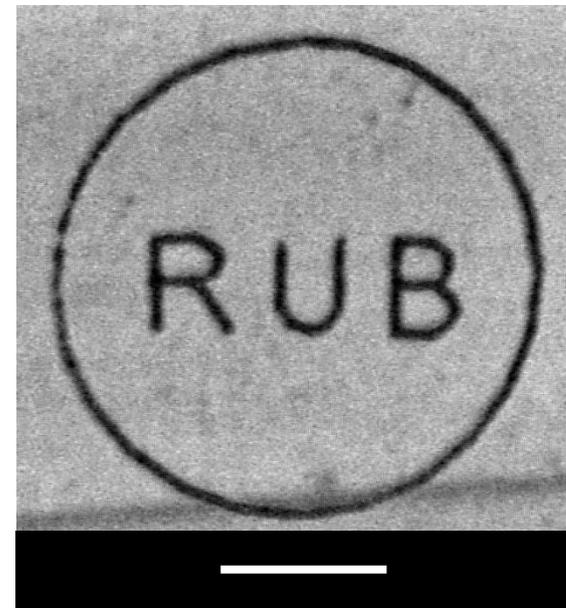
4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

Dynamic Ploughing



Resistfilm nach dem Pflügen
(AFM-Abb., $1.8 \times 1.8 \mu\text{m}^2$)



SiO₂ ($\sim 2 \text{ nm}$) auf Si nach Übertragung
durch Nassätzen (REM-Abb.)

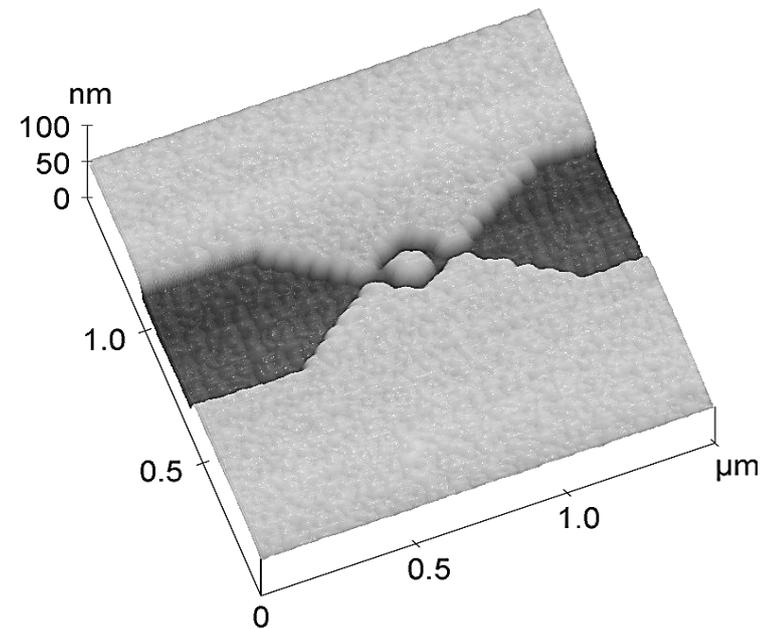
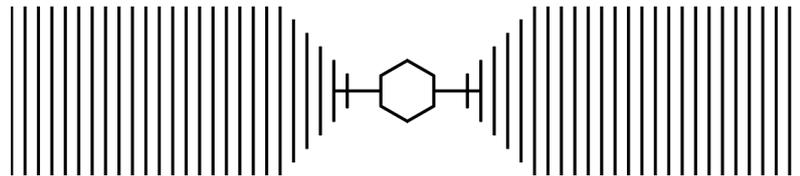
4. Herstellung von Nanostrukturen

4.5 Rastersonden-Lithografie

AFM-Lithografie

Dynamic Ploughing

Flächen und Linien kombinieren
Liniengitter verschmelzen



Struktur im GaAs/AlAs
nach Übertragung durch
20 nm tiefes Nassätzen (Stopp)

D. Kähler *et al.*, *Microelectronic Engineering* **61-62**, 619 (2002)

4. Herstellung von Nanostrukturen

Weitere Themen zur IC-Herstellung

- Cleaning
- Oxidation
- Diffusion
- Implanting
- Resist Deposition
- Level Adjustment
- Atomic Layer Deposition (ALD)
- Plasma Etching
- Metal Deposition
- Interlayer Vias
- Bonding
-
-