

**Grundlagen der Nanotechnologie I
(Ringvorlesung des CFN)**

Halbleiternanostrukturen

Dr. Daniel M. Schaadt

MBE-Nachwuchsgruppenleiter des CFN

24.11. / 1.12.2008

11:30 – 13:00

Lehmann Hörsaal 30.22 Physik Flachbau

Literatur:

S. Sze, Physics of semiconductor devices

S. Tiwari, Semiconductor heterostructures

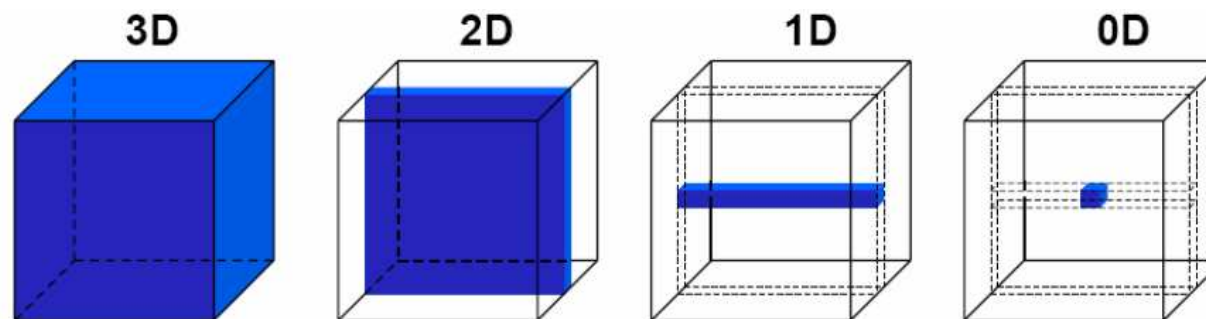
Klingshirn, Semiconductor optics



1. Einführung
2. Halbleiter
3. Fermigas in niederen Dimensionen
4. Halbleiterheterostrukturen
5. Heteroepitaxie
6. Halbleiterquantenpunkte
7. Anwendungen

1. Einführung – Was sind niederdimensionale Systeme?

- Halbleiternanostrukturen sind niederdimensionale Systeme.
- Niederdimensionale Systeme unterscheiden sich von „Normal-“ dimensional Systemen vor allem durch die eingeschränkte Ladungsträgerbewegung in einer oder mehreren Dimensionen.
- Das erklärt die Bezeichnungsweise, 3D, 2D, 1D und 0D, die angibt in wie vielen Dimensionen sich die Ladungsträger noch frei bewegen können.



- Eingeschränkte Ladungsträgerbewegung tritt auf, wenn die Abmessungen eines Bauteils die deBroglie-Wellenlänge λ der Ladungsträger, z.B. Elektronen, erreicht. Z.B. für $\lambda_{\text{GaAs}}(T = 5 \text{ K}) = 200 \text{ nm}$.
- In solchen Systemen sind Quantisierungseffekte zu erwarten; die vielfältigen Auswirkungen unter anderem auf die Elektronenbewegung, Zustandsdichte und Optische Übergänge zeigen.

1. Einführung – Warum niederdimensionale Systeme?

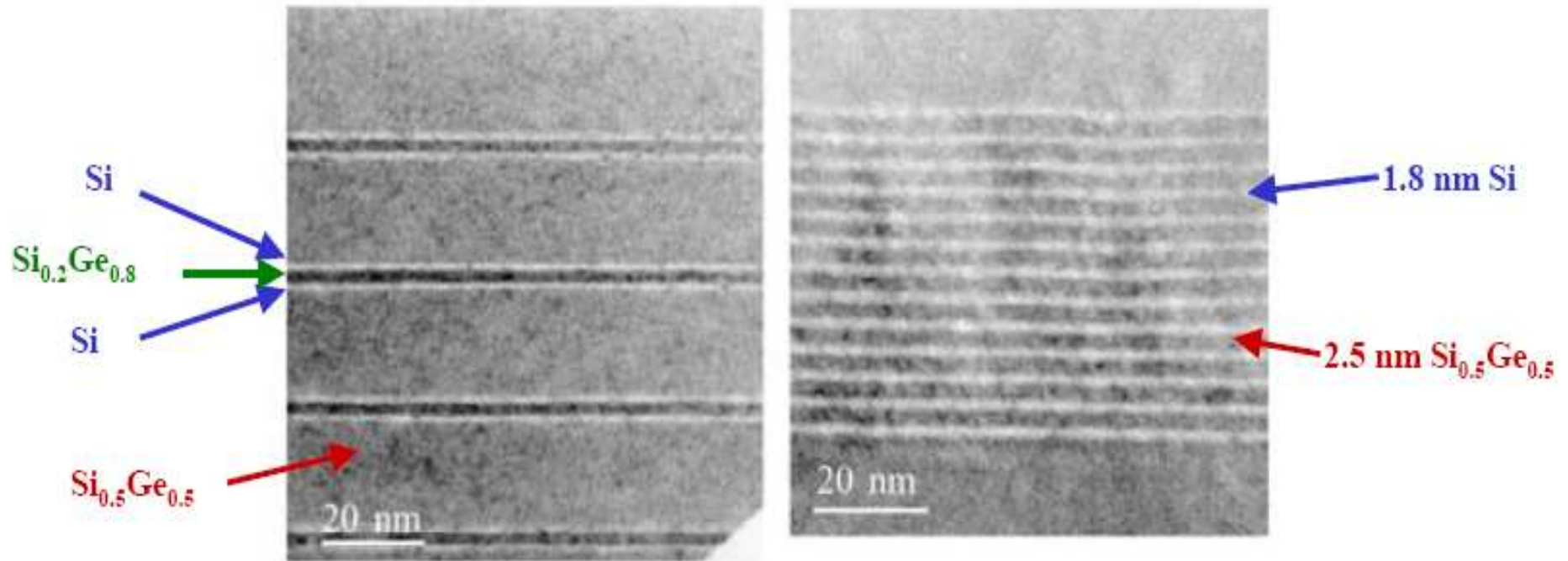


- Heterostrukturen, z.B. AlAs/GaAs/AlAs erlauben viele neue Bauelementkonzepte, die mit einfachen 3D Halbleitern nicht erreichbar sind.
- Verbesserte Bauelementeigenschaften durch Quantisierungseffekte, z.B.:
 - High Electron Mobility Transistor (HEMT):
Stark reduzierte Streuwahrscheinlichkeit der Elektronen
→ kürzere Schaltzeiten und eine geringere Leistungsaufnahme verglichen mit „klassischen“ Transistoren
 - Quantenpunktlaser:
geringerer Schwellstrom und verringerte Temperaturabhängigkeit
- Optische Eigenschaften zeigen auch eine starke Dimensionsabhängigkeit, z.B.:
 - Energetische Lage der optischen Übergänge kann gezielt zu beeinflusst werden.
 - Anwachsen der Emissions- und Absorptionsstärke beim Übergang von 3D nach 0D vorhanden.
- Speicherung und Manipulation einzelner Ladungsträgern und deren Spins ermöglicht neuartige Bauelemente, z. B. zur Quanteninformationsverarbeitung.

1. Einführung – Beispiele für Halbleiternanostrukturen (2D)



Si/Ge Quantenfilme und Übergitter



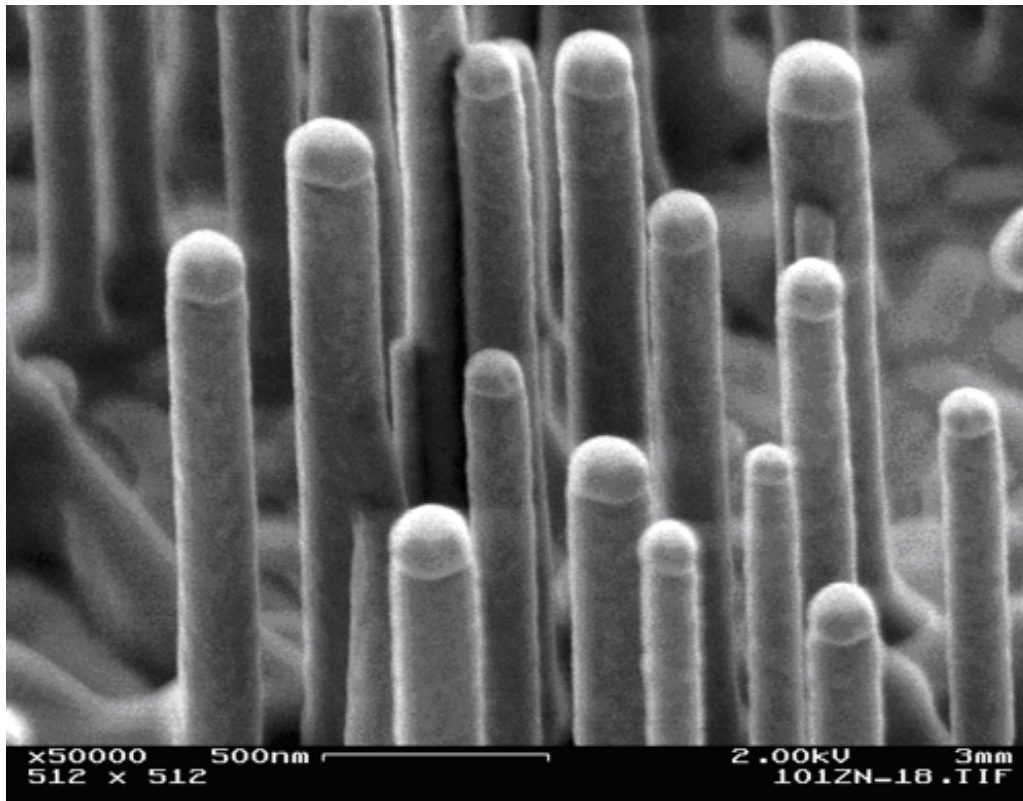
[Diehl et al., Physica E 2003]

Hochauflösende Transmissionselektronenaufnahme

1. Einführung – Beispiele für Halbleiternanostrukturen (1D)

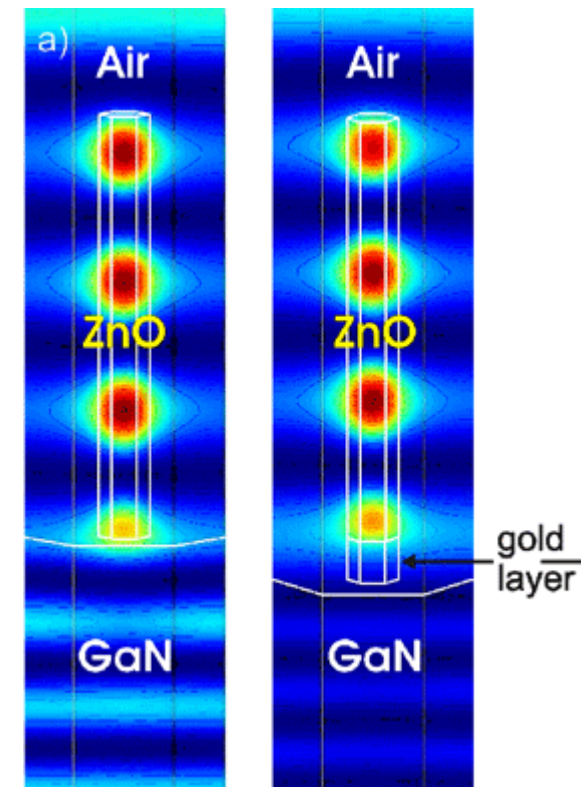


ZnO Quantendrähte



[Sauer und Thonke, Ulm]

ZnO-Drähte gewachsen auf Au-Oberfläche. Au/Zn ist dabei ein Katalysator, der als Tröpfchen auf den Drähten oben aufliegt.

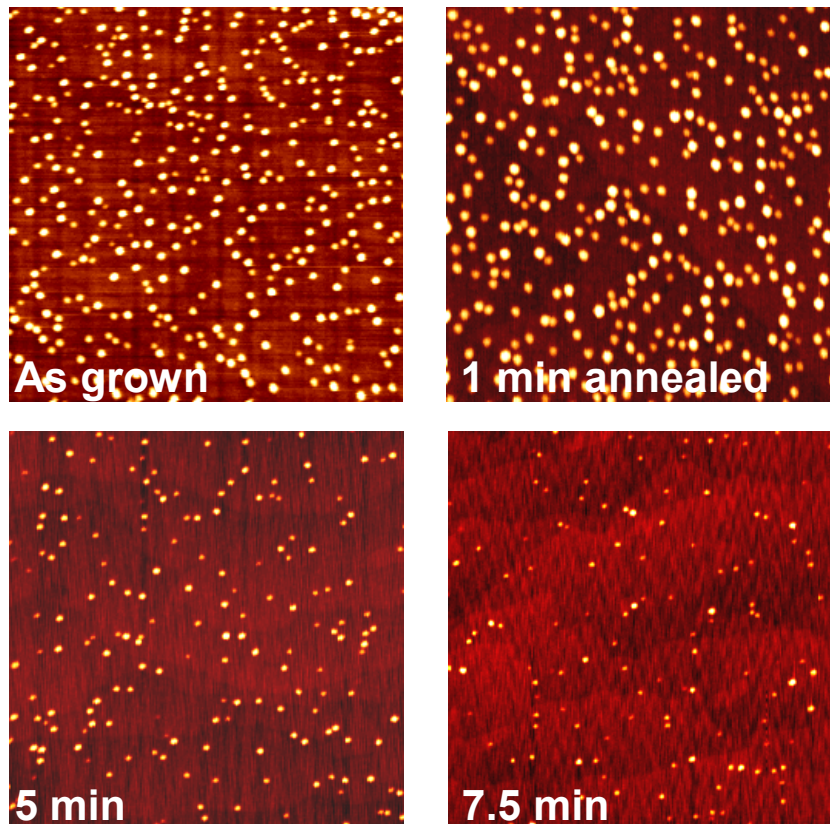


[Kalt, Karlsruhe]

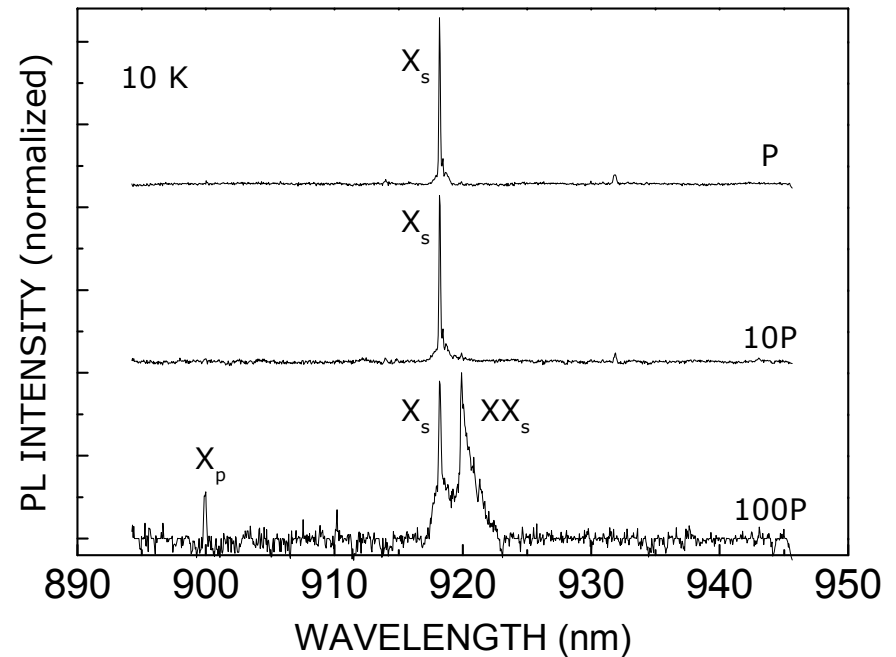
Berechnung der Intensitätsverteilung des elek. Feldes

1. Einführung – Beispiele für Halbleiternanostrukturen (0D)

Selbstorganisierte InAs Quantenpunkte



Rasterkraftmikroskopieaufnahme von InAs Quantenpunkten, die mittels Molekularstrahlepitaxie gewachsen und anschliessend angelassen wurden



Spektroskopie an einem Quantenpunkt:

x_s : Emission vom Grundzustand (Exziton)

x_p : Emission vom 2. Zustand (Biexziton)

→ Künstliches Atom



1. Einführung

2. Halbleiter

- **Metalle, Halbleiter und Isolatoren**
- **Kristallgitter**
- **Bandstruktur**
- **Ladungsträgerkonzentration**

3. Fermigas in niederen Dimensionen

4. Halbleiterheterostrukturen

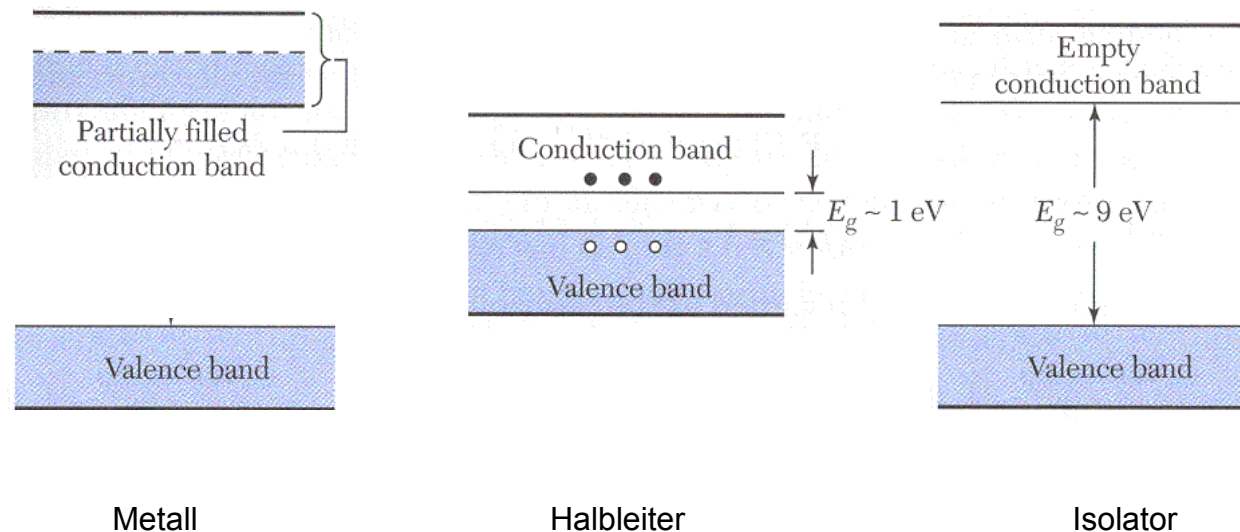
5. Heteroepitaxie

6. Halbleiterquantenpunkte

7. Anwendungen

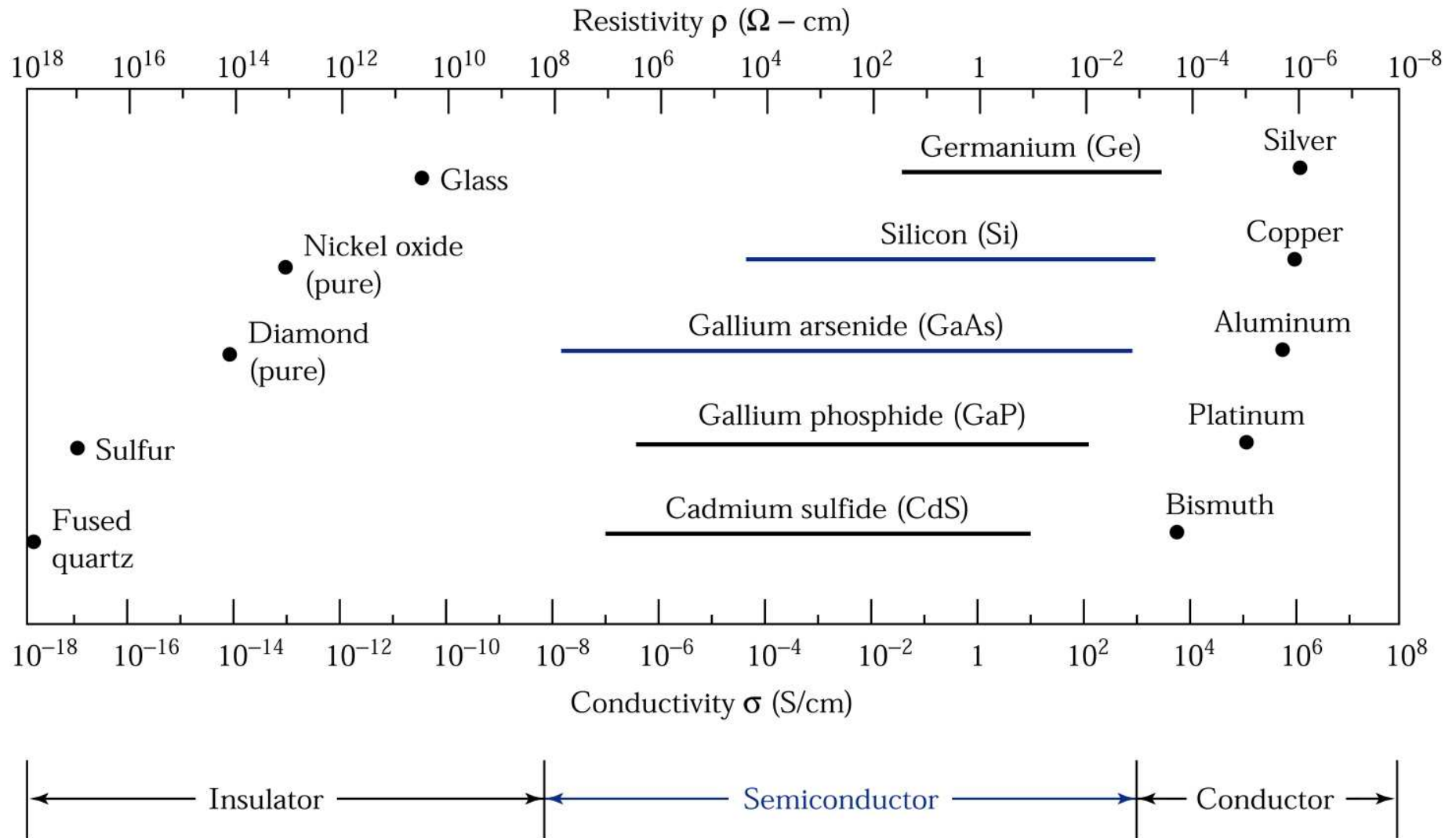
2. Halbleiter – Metalle, Halbleiter und Isolatoren

- Unter einem Halbleiter versteht man einen Festkörper, den man hinsichtlich seiner elektrischen Leitfähigkeit sowohl als Leiter als auch als Nichtleiter betrachten kann.
- In der Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes sind Halbleiter Isolatoren.



- Bei Raumtemperatur sind sie je nach materialspezifischem Abstand E_g von Leitungs- und Valenzband leitend oder nichtleitend.
- Die Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu.
- Die Leitfähigkeit lässt sich durch das Einbringen von Fremdatomen (Dotieren) aus einer anderen chemischen Hauptgruppe in weiten Grenzen gezielt beeinflussen.

2. Halbleiter – Metalle, Halbleiter und Isolatoren



Leitfähigkeit (conductivity): σ (S/cm) = $1/(\text{resistivity } \rho$ ($\Omega \cdot \text{cm}$))

2. Halbleiter – Materialien



Elementare Halbleiter

- Germanium
 - Wurde v.a. Anfang der 1950-Jahre als Hauptmaterial für Halbleiter benutzt
 - Teuer
- Silizium
 - Besser Bauelementeigenschaften
 - SiO₂ als Isolatorschicht mit hoher Qualität verwendbar
 - Billig
 - Jedoch indirekte Bandlücke

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

2. Halbleiter – Materialien



Verbindungshalbleiter

- Bieten direkte Bandlücke für alle optischen Wellenlängen
- Höhere Elektronmobilitäten
- Erweitern Anwendungsspektrum durch Bandgap-Engineering

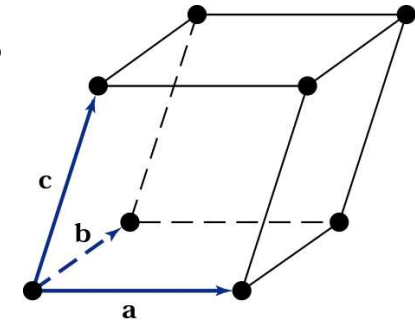
General Classification	Semiconductor		
	Symbol	Name	
Element	Si	Silicon	
	Ge	Germanium	
Binary compound			
IV-IV -----	SiC	Silicon carbide	
III-V -----	AlP	Aluminum phosphide	
	AlAs	Aluminum arsenide	
	AlSb	Aluminum antimonide	
	GaN	Gallium nitride	
	GaP	Gallium phosphide	
	GaAs	Gallium arsenide	
	GaSb	Gallium antimonide	
	InP	Indium phosphide	
	InAs	Indium arsenide	
	InSb	Indium antimonide	
	II-VI -----	ZnO	Zinc oxide
		ZnS	Zinc sulfide
		ZnSe	Zinc selenide
ZnTe		Zinc telluride	
CdS		Cadmium sulfide	
CdSe		Cadmium selenide	
CdTe		Cadmium telluride	
HgS		Mercury sulfide	
IV-VI -----	PbS	Lead sulfide	
	PbSe	Lead selenide	
	PbTe	Lead telluride	
Ternary compound	$Al_xGa_{1-x}As$	Aluminum gallium arsenide	
	$Al_xIn_{1-x}As$	Aluminum indium arsenide	
	$GaAs_{1-x}P_x$	Gallium arsenic phosphide	
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Gallium indium arsenide	
	$Ga_xIn_{1-x}P$	Gallium indium phosphide	
Quaternary compound	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide	
	$Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$	Gallium indium arsenic phosphide	

2. Halbleiter – Kristallgitter

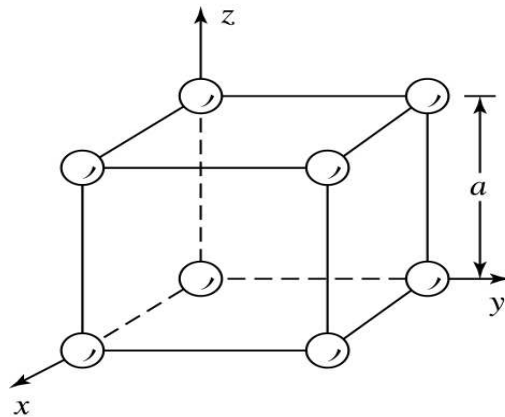
- Kristall: Atome sind in drei Dimensionen periodisch angeordnet
- Gitter: Periodische Anordnung der Atome im Kristall
- Einheitszelle: Repräsentative Darstellung des gesamten Gitters

Beispiel: kubisches Gitter

Gitterpunkt $R = na+mb+pc$ kann durch die Gittervektoren a , b und c ausgedrückt werden.

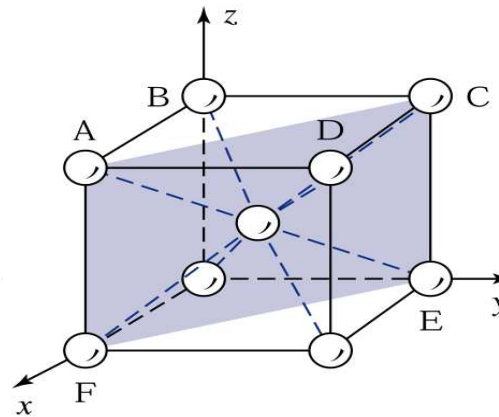


- Typen von kubische Gittern



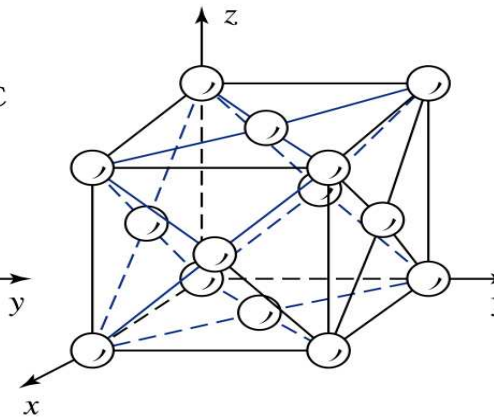
Primitiv:

- Atom pro Ecke
- 6 nächste Nachbarn
- Gitterkonstante: a
- Beispiel: Polonium



Raumzentriert:

- Zusätzliches Atom im Zentrum
- 8 nächste Nachbarn
- Beispiel: Wolfram



Flächenzentriert:

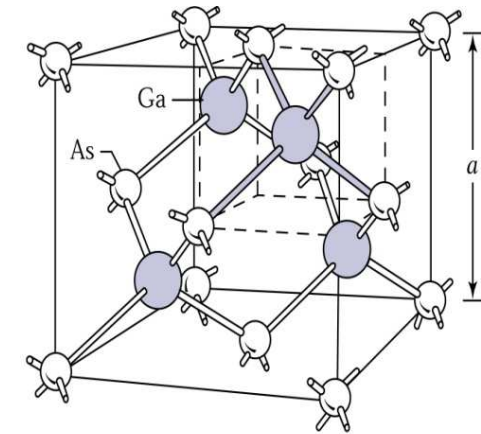
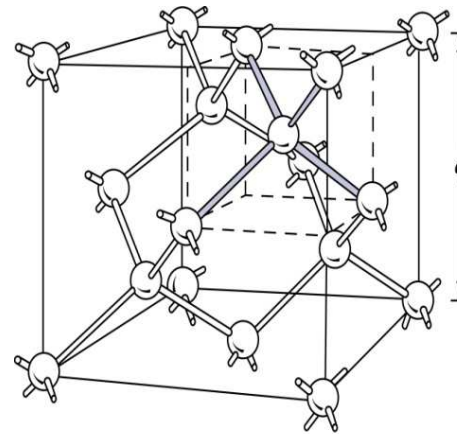
- Zusätzliche Atome in der Flächenmitte
- 12 nächste Nachbarn
- Beispiel: Gold

2. Halbleiter – Kristallgitter



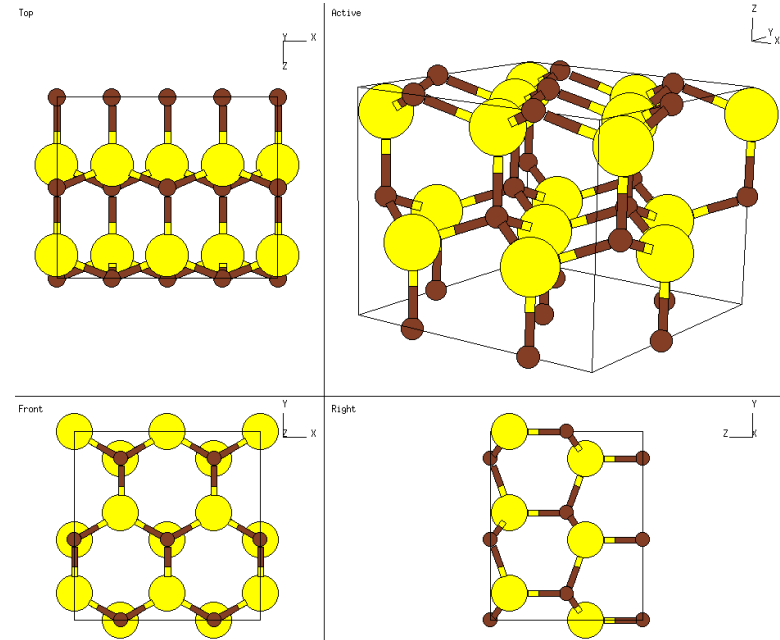
- Diamantstruktur

- Besteht aus zwei sich gegenseitig durchdringenden kubisch flächenzentrierten Gittern.
- Einheitszelle besteht aus Tetrahedron.
- 4 gleichentfernte Nächste-Nachbarn.
- Beispiele:
 - Si, Ge
 - GaAs (Zinkblendestruktur)



- Wurtzitstruktur

- Hexagonale Struktur
- Gitterkonstanten a und c
- Beispiele:
 - ZnS (Wurtzit)
 - GaN



2. Halbleiter – Kristallgitter

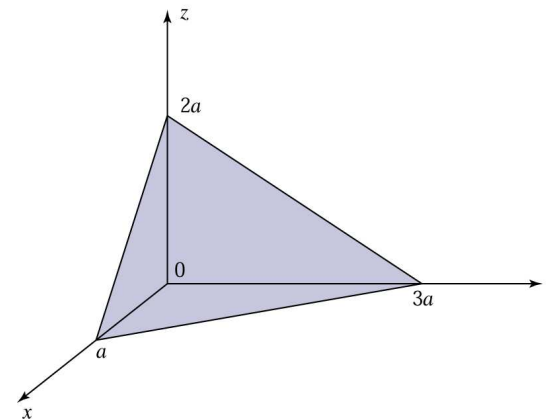


Kristallflächen und Miller'sche Indizes

- Eigenschaften hängen von Richtungen bzw. der Orientierung des Kristalls ab.
- Miller'sche Indizes:
 - Finde die Schnittpunkte einer Fläche mit den drei Kartesischen Koordinaten als Vielfaches von Gittervektoren ausgedrückt.
 - Nimm die reziproken Werte und reduziere sie auf die kleinsten ganzen Zahlen mit den gleichen Verhältnissen
 - Schreibe diese Werte in runde Klammern (abc).

Beispiel:

- Schnittpunkte sind a , $3a$ und $2a$
- Reziproke Werte: 1 , $1/3$ und $1/2$
- Multiplikation mit 6 liefert kleinste ganze Zahlen 623 mit gleichen Verhältnissen.
- Miller'sche Indizes: (623)

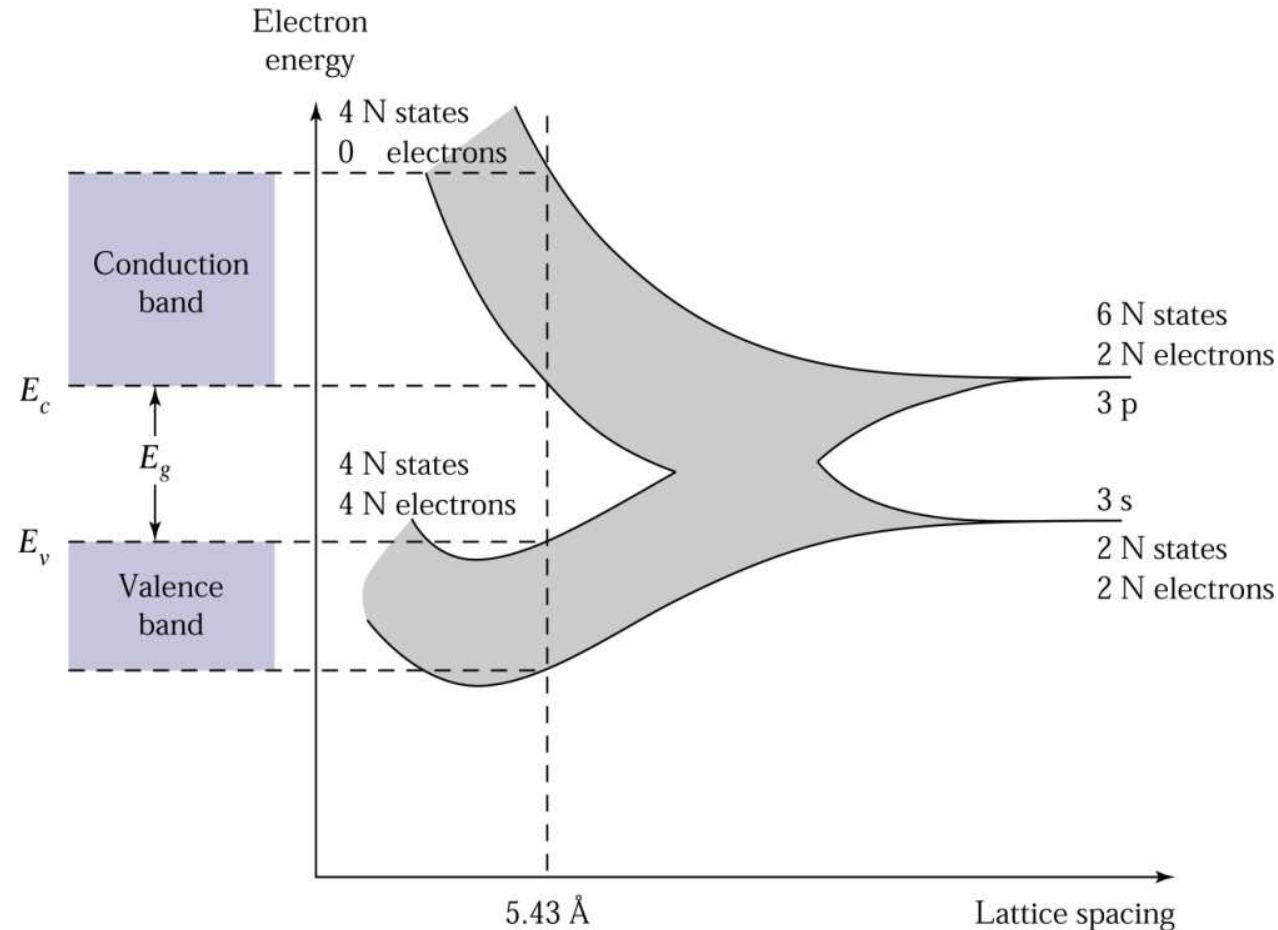


- Konventionen:

- Falls negative Richtung: benutze Überstrich, z.B. $(\overline{100})$
- Äquivalente Flächen können zusammengefasst werden: $\{100\} = (100), (010), \text{etc.}$
- Richtung senkrecht zu (100) : $[100]$
- Äquivalente Richtungen: $\langle 100 \rangle = [100], [010], \text{etc.}$

2. Halbleiter – Bandstruktur

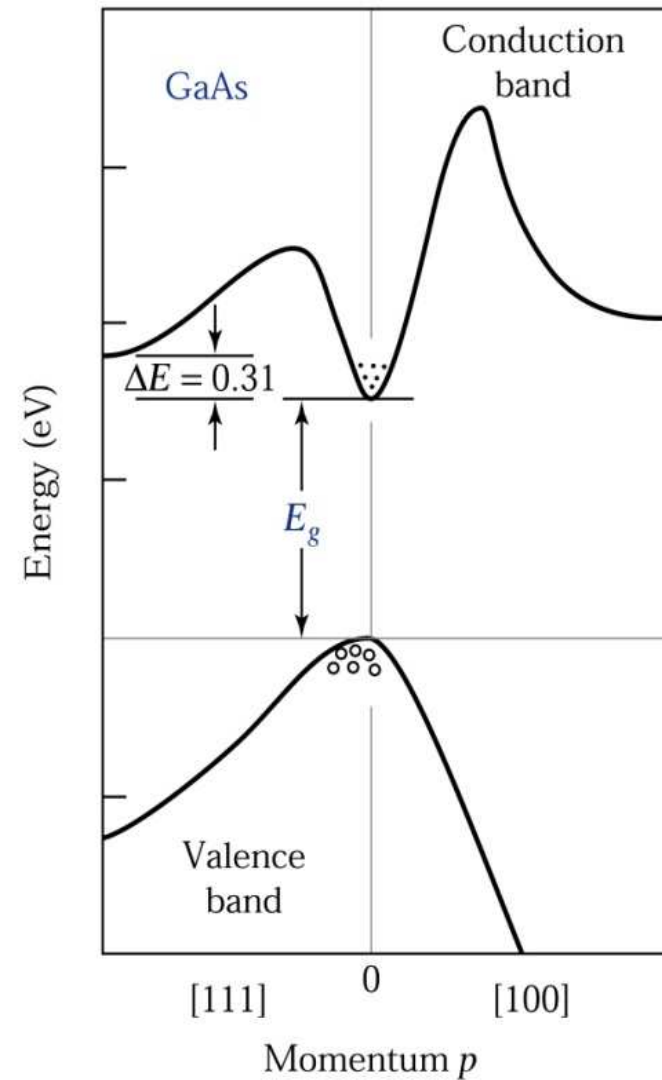
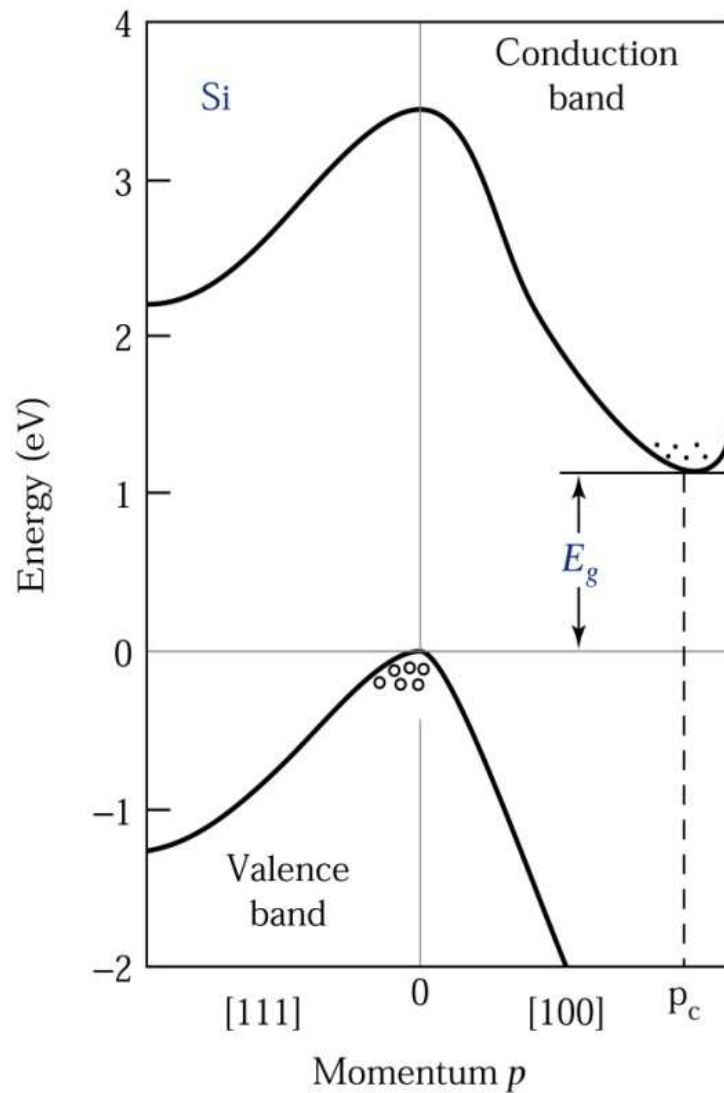
- Entstehung der Bänder im Si-Kristall aus N einzelnen, isolierten Si-Atomen



- Elektronen bewegen sich in periodischen Potential, können als quasifreie Teilchen mit effektiver Masse betrachtet werden.

2. Halbleiter – Bandstruktur

- Vergleich der Bandstrukturen von Si (indirekt) mit GaAs (direkt)

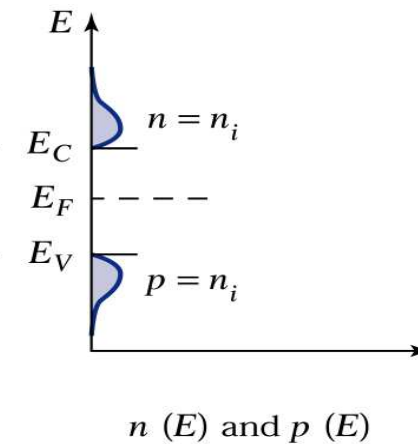
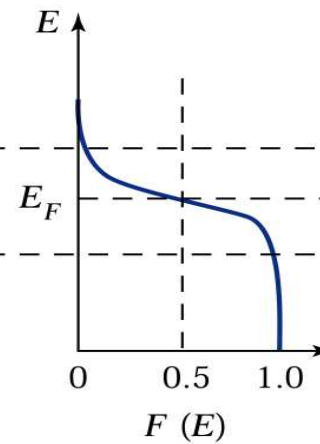
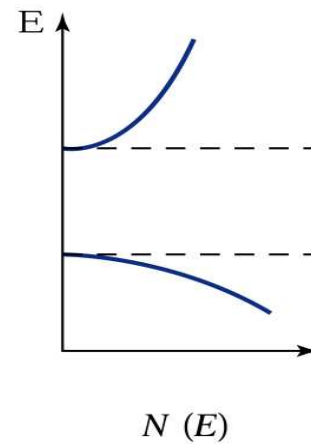
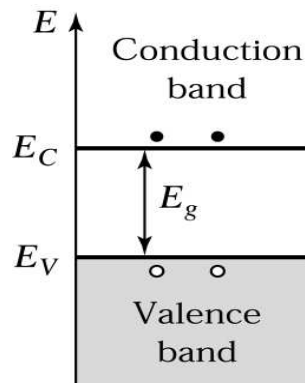
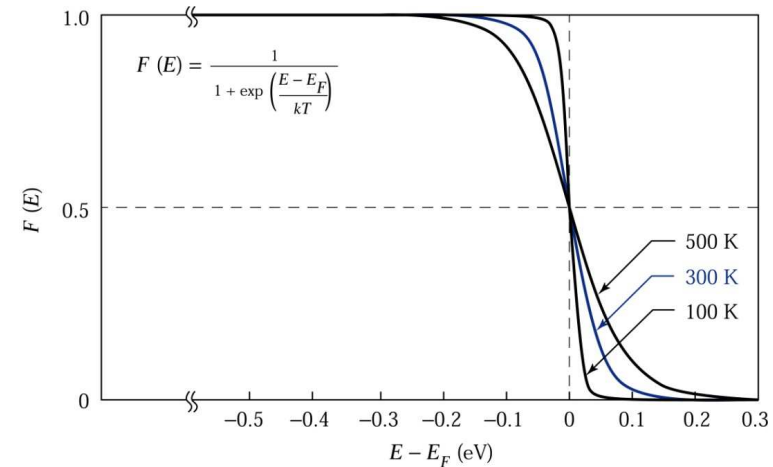


2. Halbleiter – Ladungsträgerkonzentration



Intrinsische Halbleiter

- Enthält nur geringe Menge an Verunreinigungen verglichen mit freien Elektronen und Löchern
- Elektronen werden thermisch aktiviert.
- Gleiche Anzahl von Elektronen und Löchern.
- Berechnung der Elektronenzahl über Fermi-Dirac-Verteilung:
 - Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron einen Zustand mit Energie E besetzt.
 - $F(E) = \frac{1}{2}$ beim Fermi-Level E_F



$$n = \int_0^{E_{top}} n(E) dE = \int_0^{E_{top}} N(E) F(E) dE$$

2. Halbleiter – Ladungsträgerkonzentration



Donatoren und Akzeptoren

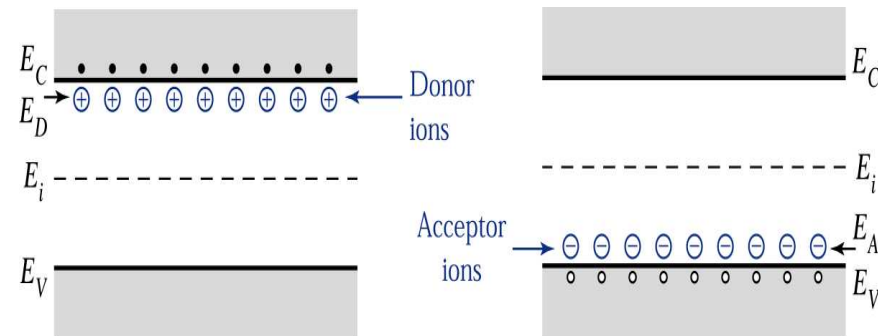
- Zusätzliche Level in der Bandlücke, die durch Verunreinigung definiert werden.

- Donatoren:

Atome, die zusätzliches Elektron liefern

- Akzeptoren:

Atome, die zusätzliches Loch liefern



- Ionisationsenergien:

	Sb	P	As	Ti	C	Pt	Au	O
	0.039	0.045	0.054	0.21	0.25	0.25		0.16
								0.38
							0.54	0.51
							A	0.41
				0.34	0.35	0.36	0.29	
					D	0.3	D	
	0.045	0.067	0.072	0.16				
Si								
1.12								
	B	Al	Ga	In	Pd			

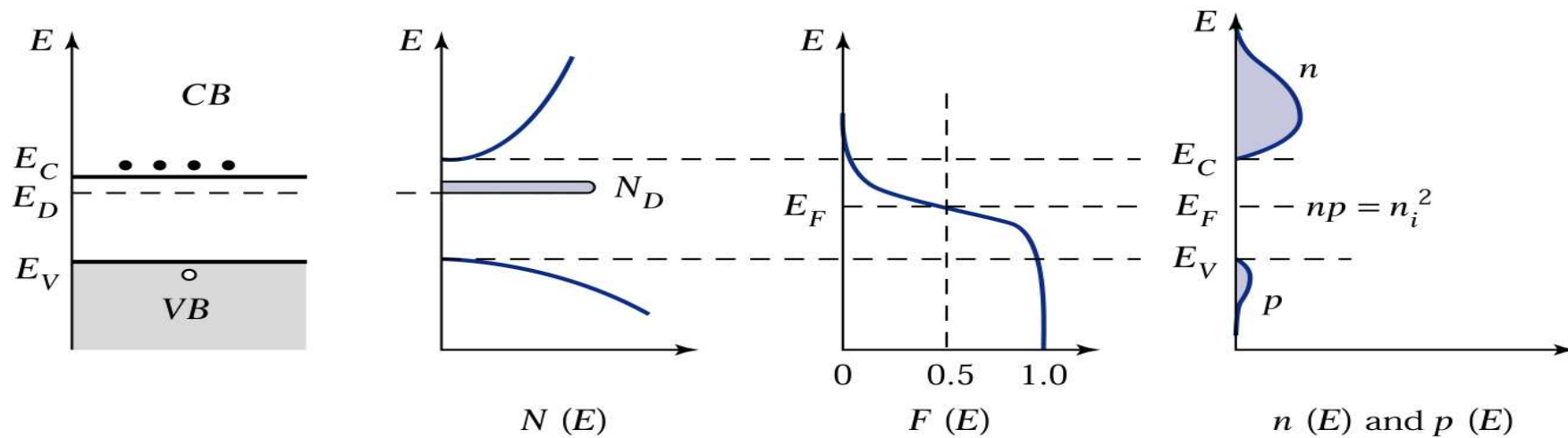
	S	Se	Sn	Te	Si	C	0
	0.006	0.006	0.006	0.03	0.0058	0.006	
							0.4
							0.63
							0.67
							D
						0.44	
						0.24	
	0.028	0.028	0.031	0.035	0.035	0.026	0.14
GaAs							
1.42							
	Be	Mg	Zn	Cd	Si	C	Cu
							Cr

2. Halbleiter – Ladungsträgerkonzentration

Extrinsische Halbleiter

- Halbleiter, die durch Verunreinigungen dotiert sind.
- Elektron- bzw. Lochkonzentration gegeben durch Energiedifferenz $E_C - E_D$ bzw. $E_A - E_V$ sowie Massenwirkungsgesetz $np = n_i^2$

Beispiel:
n-dotierter Halbleiter





1. Einführung

2. Halbleiter

3. Fermigas in niederen Dimensionen

- **Energieeigenwerte und Zustandsdichte in 3D, 2D, 1D und 0D**
- **Energieniveaus bei Quantenpunkten**

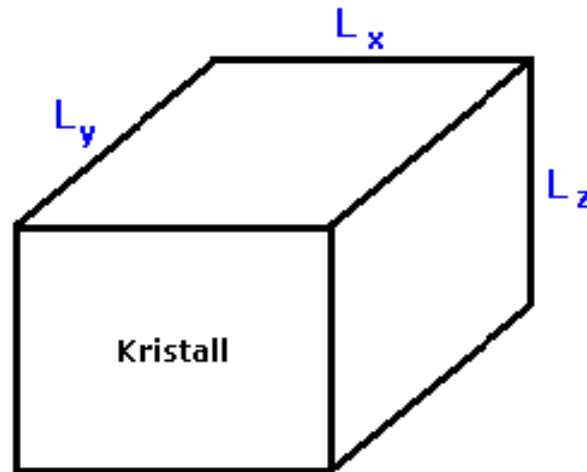
4. Halbleiterheterostrukturen

5. Heteroepitaxie

6. Halbleiterquantenpunkte

7. Anwendungen

3. Fermigas in niederen Dimensionen – 3D



$$L_x, L_y, L_z \gg \lambda_F > 1\text{\AA}$$

Energieeigenwerte aus Lösung der Schrödingergleichung:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = \frac{\hbar^2}{2m^*} k^2$$

Quasi-kontinuierliche k-Werte,
Normale Energiebänder

3. Fermigas in niederen Dimensionen – 3D



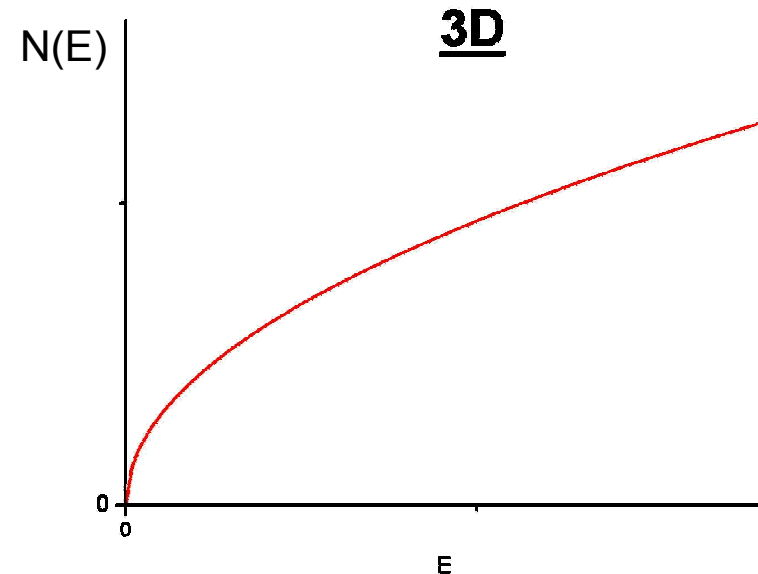
Zustandsdichte:

$$N(E) = \sum_{\sigma, \vec{k}} \delta(E - E(\vec{k}))$$

$$\xrightarrow{3D} \frac{V}{(2\pi)^3} \cdot 2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(E - E(\vec{k})) d^3k \quad \text{Polark.} = \frac{2V}{(2\pi)^3} \cdot 4\pi \cdot \int_0^{+\infty} k^2 \delta(E - E(\vec{k})) dk$$

$$\stackrel{\text{Dispers.}}{=} \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_0^{+\infty} \sqrt{E(\vec{k})} \delta(E - E(\vec{k})) dE(\vec{k})$$

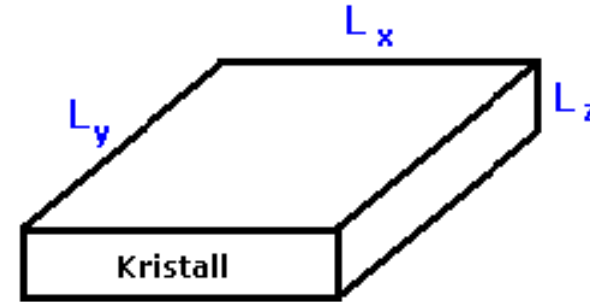
$$= \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E}$$



3. Fermigas in niederen Dimensionen – 2D

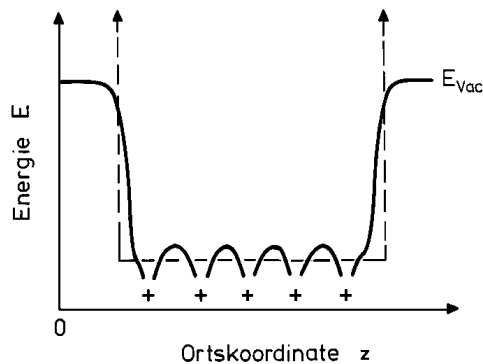


Mache L_z sehr klein (typisch wenige 10 nm)



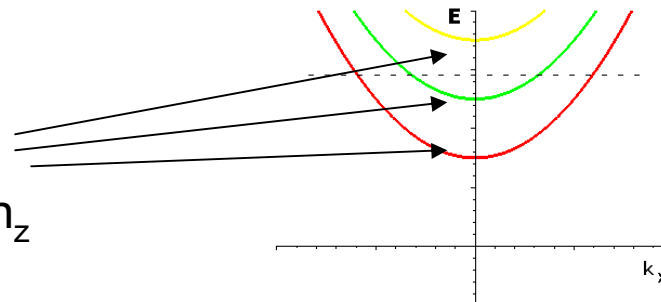
Energieeigenwerte:

Annäherung durch Kastenpotential



$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$
$$= \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) + E_z(n_z)$$

Subbänder zu verschiedenen Quantenzahlen n_z



3. Fermigas in niederen Dimensionen – 2D

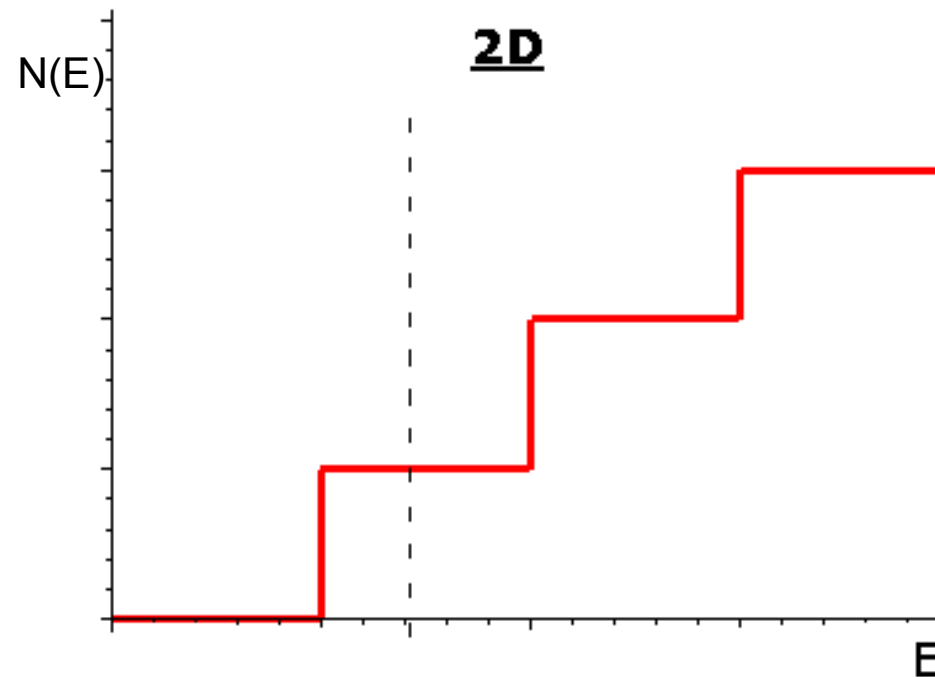


Zustandsdichte:

$$N(E) = \sum_{\sigma, \vec{k}} \delta(E - E(\vec{k}))$$

$$\xrightarrow{2D} \sum_{k_z} \frac{L_x L_y}{(2\pi)^2} \cdot 2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(E - E(\vec{k})) d^2 k = \frac{L_x L_y}{(2\pi)^2} \frac{2m^*}{\hbar^2} \cdot N_s(E)$$

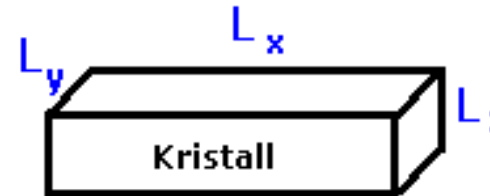
↓
Anzahl Subbänder



3. Fermigas in niederen Dimensionen – 1D



Mache zusätzlich L_y sehr klein



Energieeigenwerte:

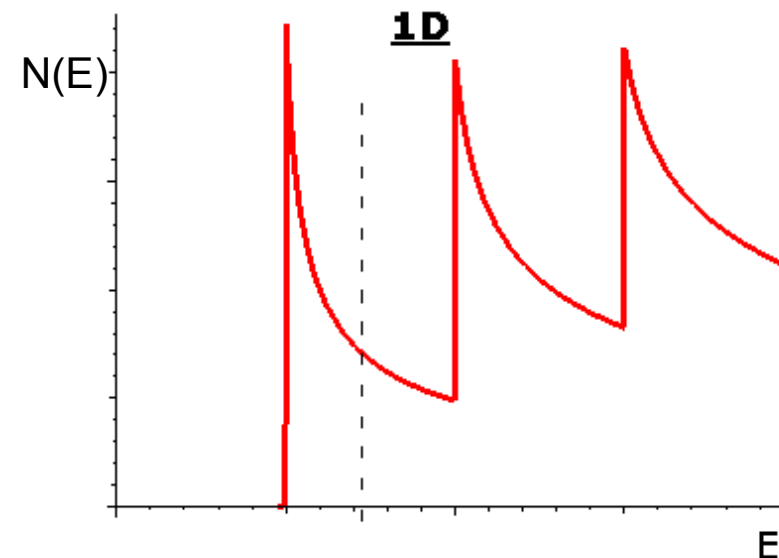
Zusätzliche Quantisierung von k_y , Subbänder wie im 2D-Fall

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = \frac{\hbar^2}{2m^*} k_x^2 + E_{yz}(n_y, n_z)$$

Zustandsdichte:

$$\sum_{k_y, k_z} \frac{L_x}{2\pi} \cdot 2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(E - E(\vec{k})) dk$$

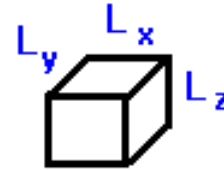
$$= \frac{L_x \sqrt{2m^*}}{\pi \hbar} \sum_{k_y, k_z} \frac{1}{\sqrt{E - E_{yz}}}$$



3. Fermigas in niederen Dimensionen – 0D



L_x, L_y, L_z der Größenordnung 10 nm



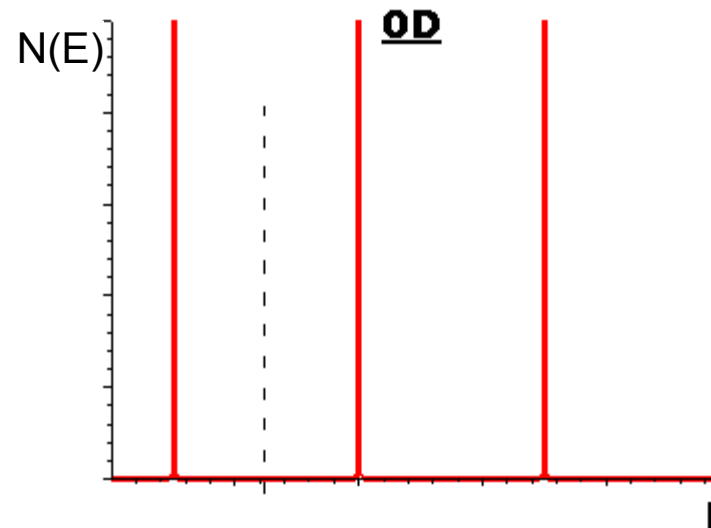
Energieeigenwerte:

Quantisierung aller k-Werte

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = E_{xyz}(n_x, n_y, n_z)$$

Zustandsdichte:

$$2 \cdot \sum_{k_x, k_y, k_z} \delta(E - E(\vec{k}))$$

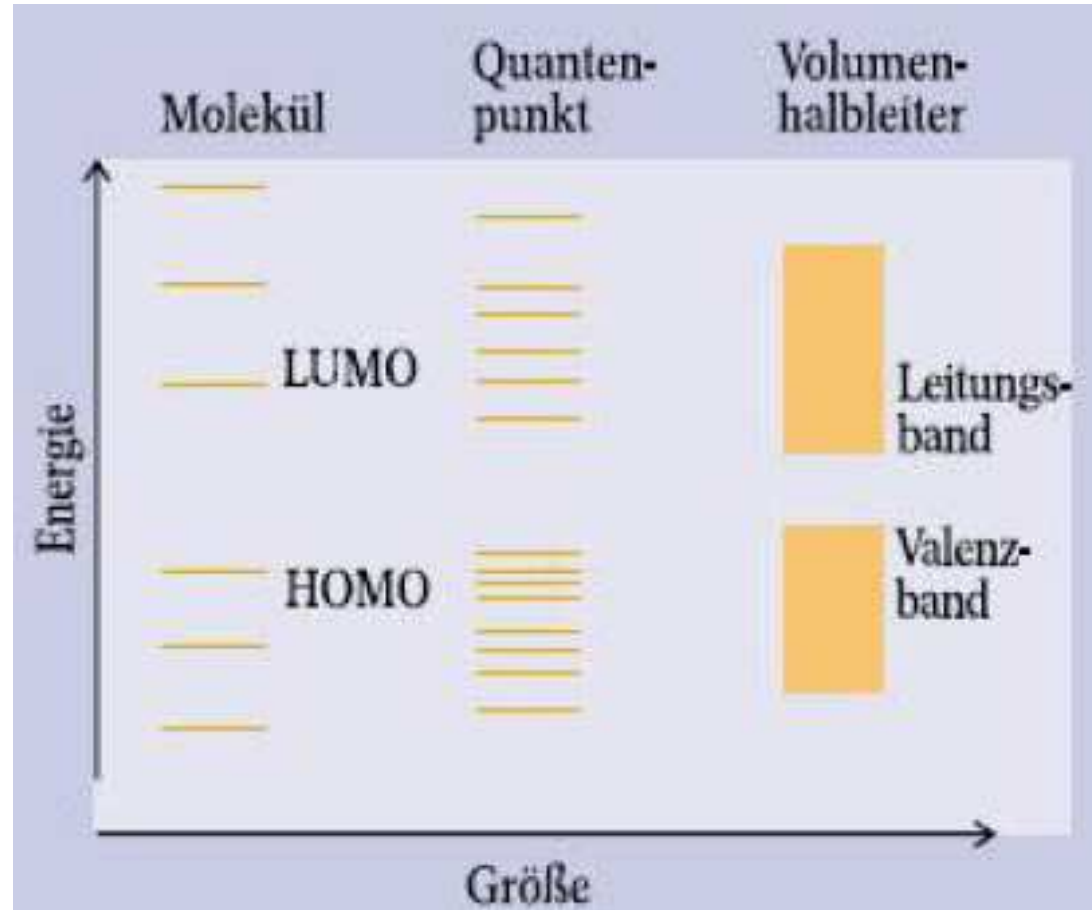


3. Fermigas in niederen Dimensionen – 0D



Energieniveaus bei Quantenpunkten

- Die Energieniveaus von Quantenpunkten sind diskret.
- Das niedrigste Energieniveau liegt höher als die Leitungsbandkante.
- Es wurde durch die Quantisierungsenergie angehoben



HOMO: highest occupied molecular orbital



1. Einführung

2. Halbleiter

3. Fermigas in niederen Dimensionen

4. Halbleiterheterostrukturen

- **Homo- und Heterojunction**
- **Bauelementbeispiele**
- **Materialsysteme**

5. Heteroepitaxie

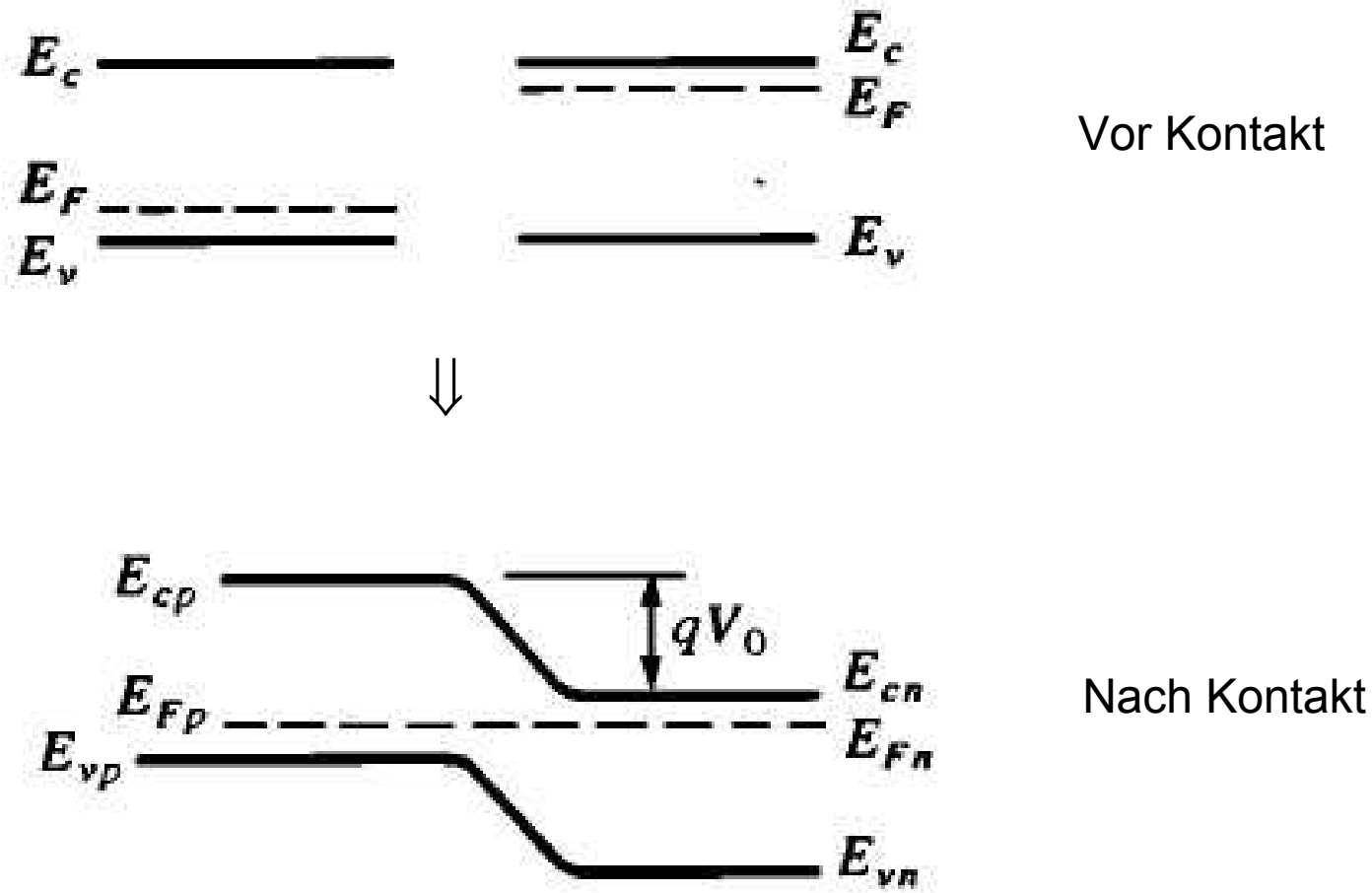
6. Halbleiterquantenpunkte

7. Anwendungen

4. Heterostrukturen – Homo- und Heterojunction

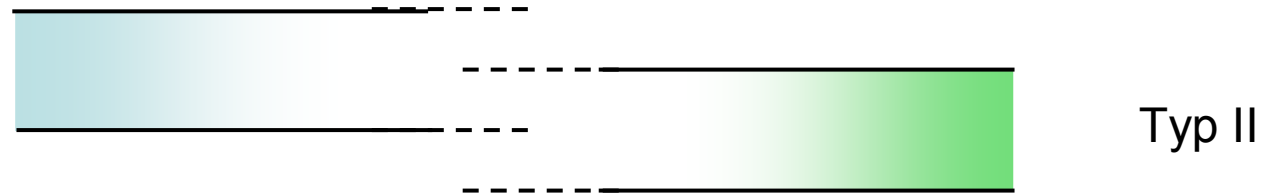
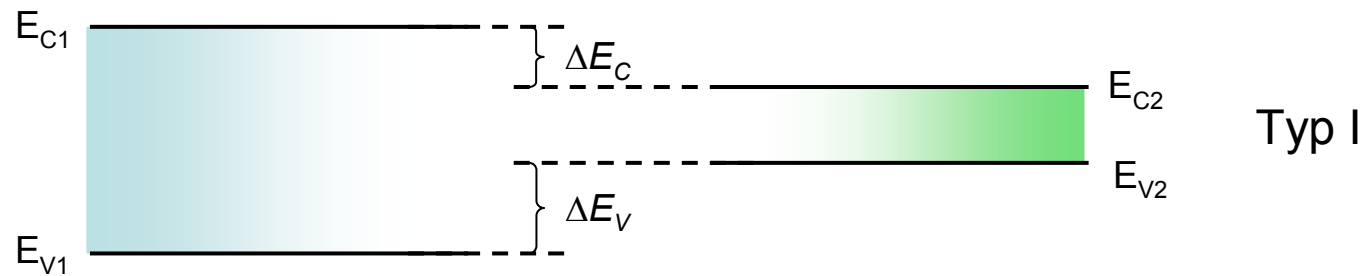


np-Homojunction



4. Heterostrukturen – Homo- und Heterojunction

- Bringe zwei Halbleiter mit unterschiedlicher Bandlücke zusammen.
- Beachte Bandoffsets ΔE_C und ΔE_V für Leitungsband und Valenzband.
- Mögliche Kombinationen:



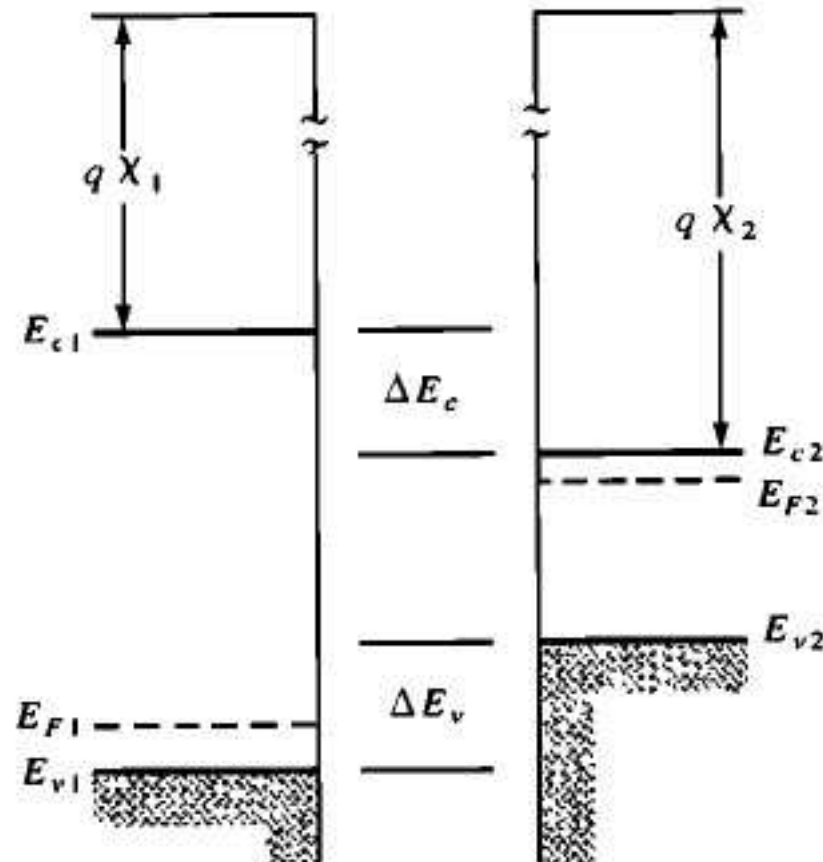
4. Heterostrukturen – Homo- und Heterojunction

Heterojunction

- p-Typ Halbleiter 1 mit E_{g1}
- n-Typ Halbleiter 2 mit E_{g2}

$$\bullet E_{g1} > E_{g2}$$

Vor Kontakt:

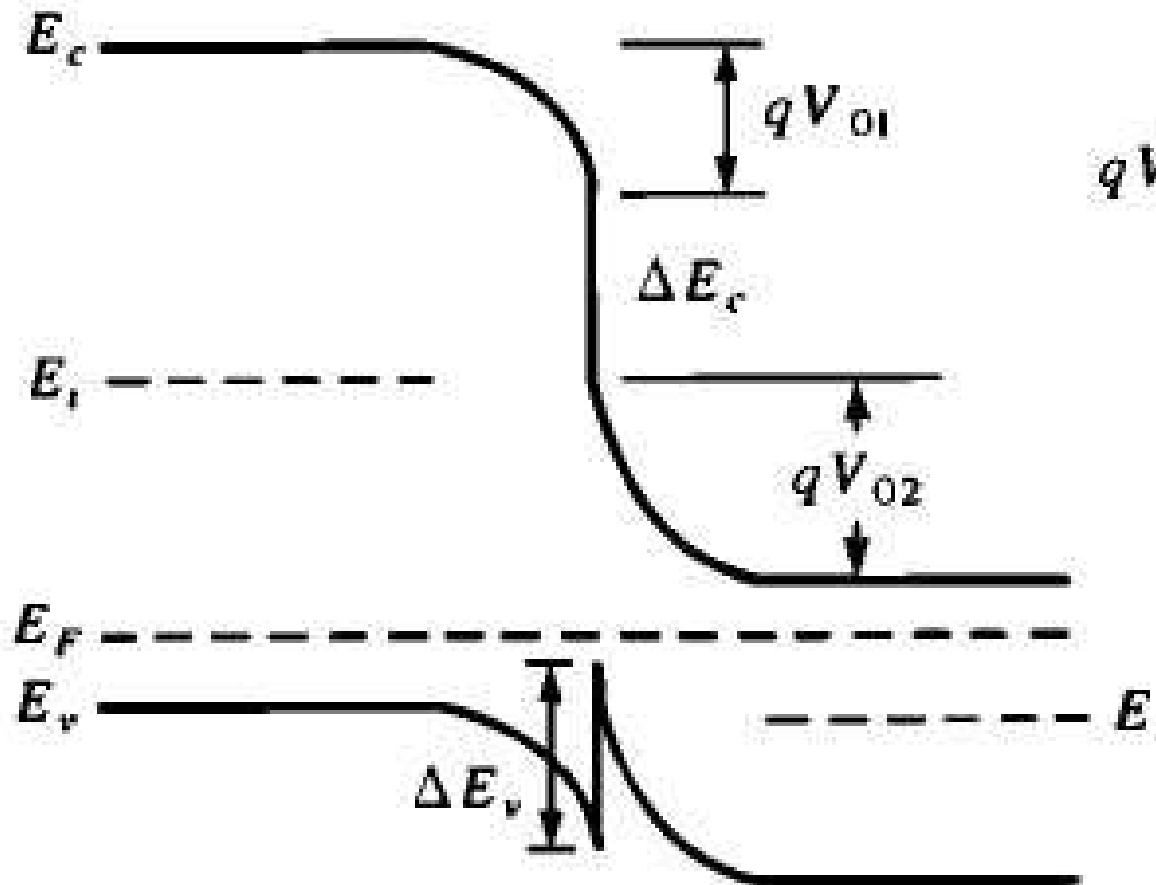


$$\begin{aligned} \Delta E_g &= E_{g1} - E_{g2} \\ &= \Delta E_c + \Delta E_v \end{aligned}$$

4. Heterostrukturen – Homo- und Heterojunction



Nach Kontakt:



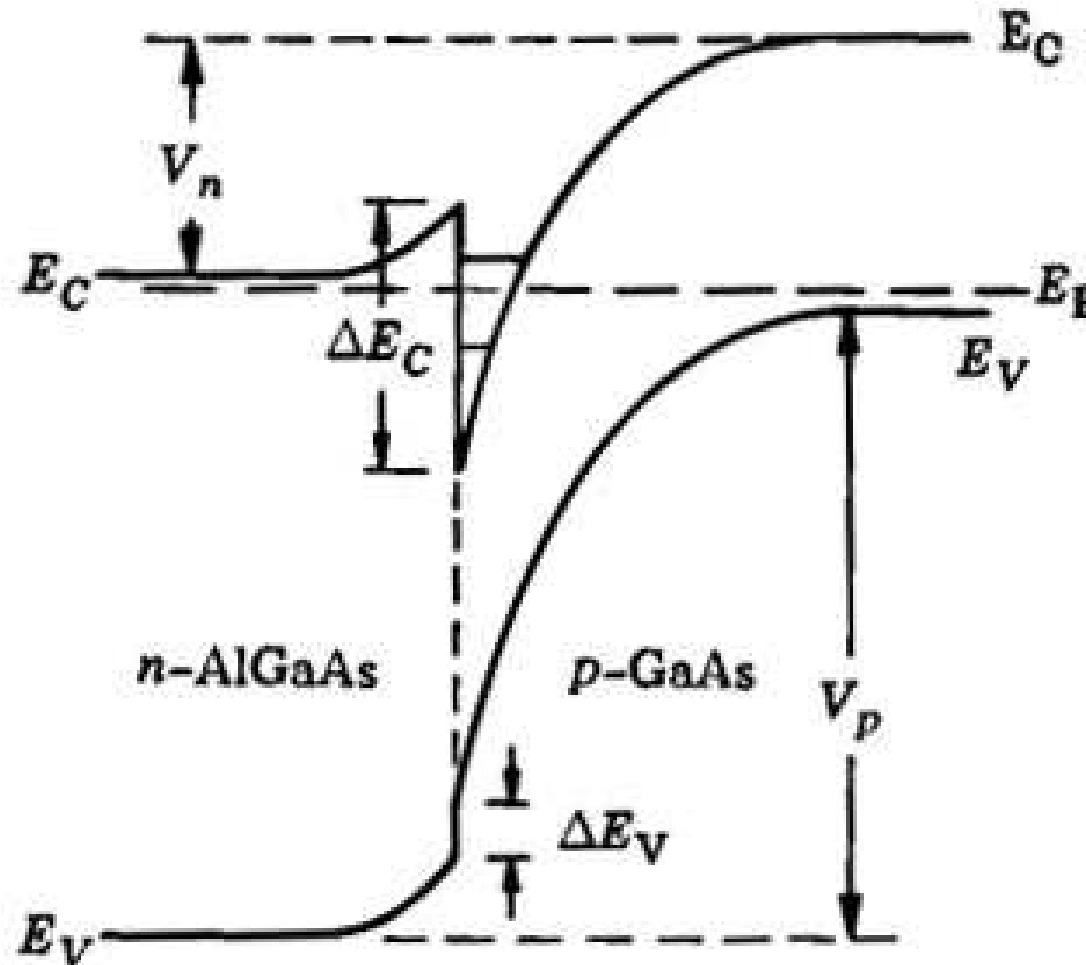
$$qV_0 = q(V_{01} + V_{02})$$

$$\frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{\epsilon_2 N_{d2}}{\epsilon_1 N_{d1}}$$

4. Heterostrukturen – Homo- und Heterojunction

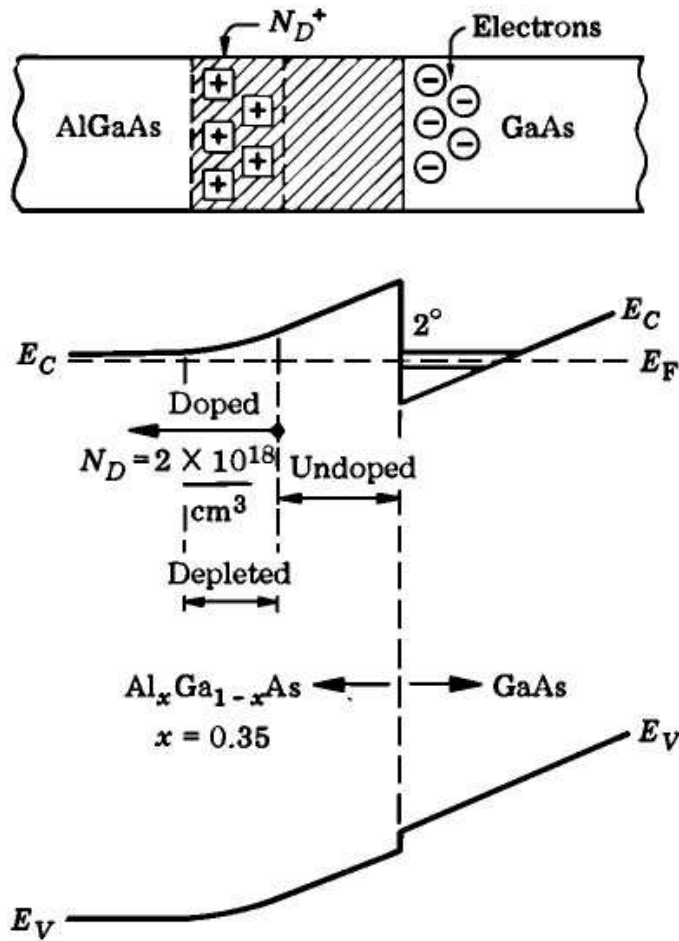
Beispiel:

Erzeugung eines zwei-dimensionalen Elektronengases (2DEG)

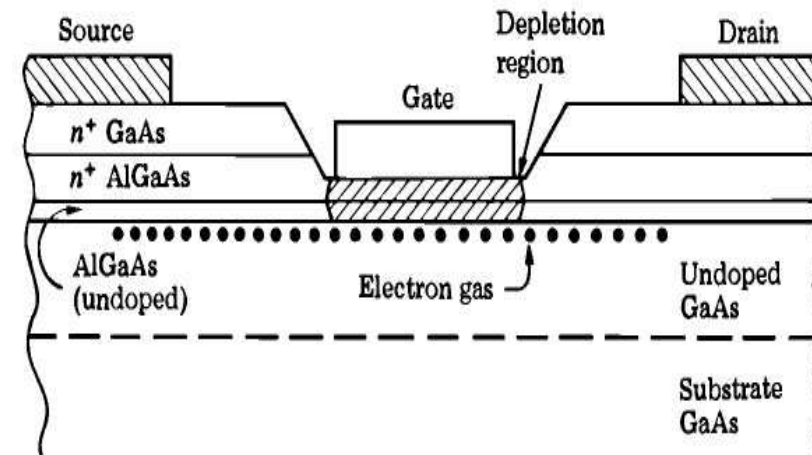


4. Heterostrukturen – Bauelementbeispiele

Modulation doping



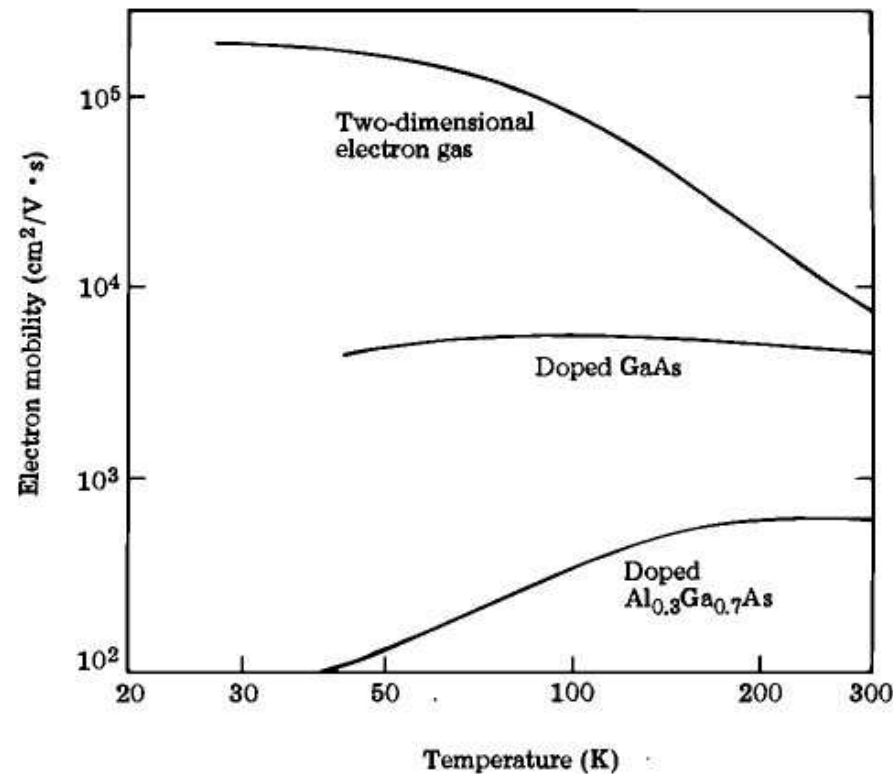
Modulation doped field effect transistor (MODFET) or Heterojunction field effect transistor (HEMT)



4. Heterostrukturen – Bauelementbeispiele

Vorteile des GaAs MODFET:

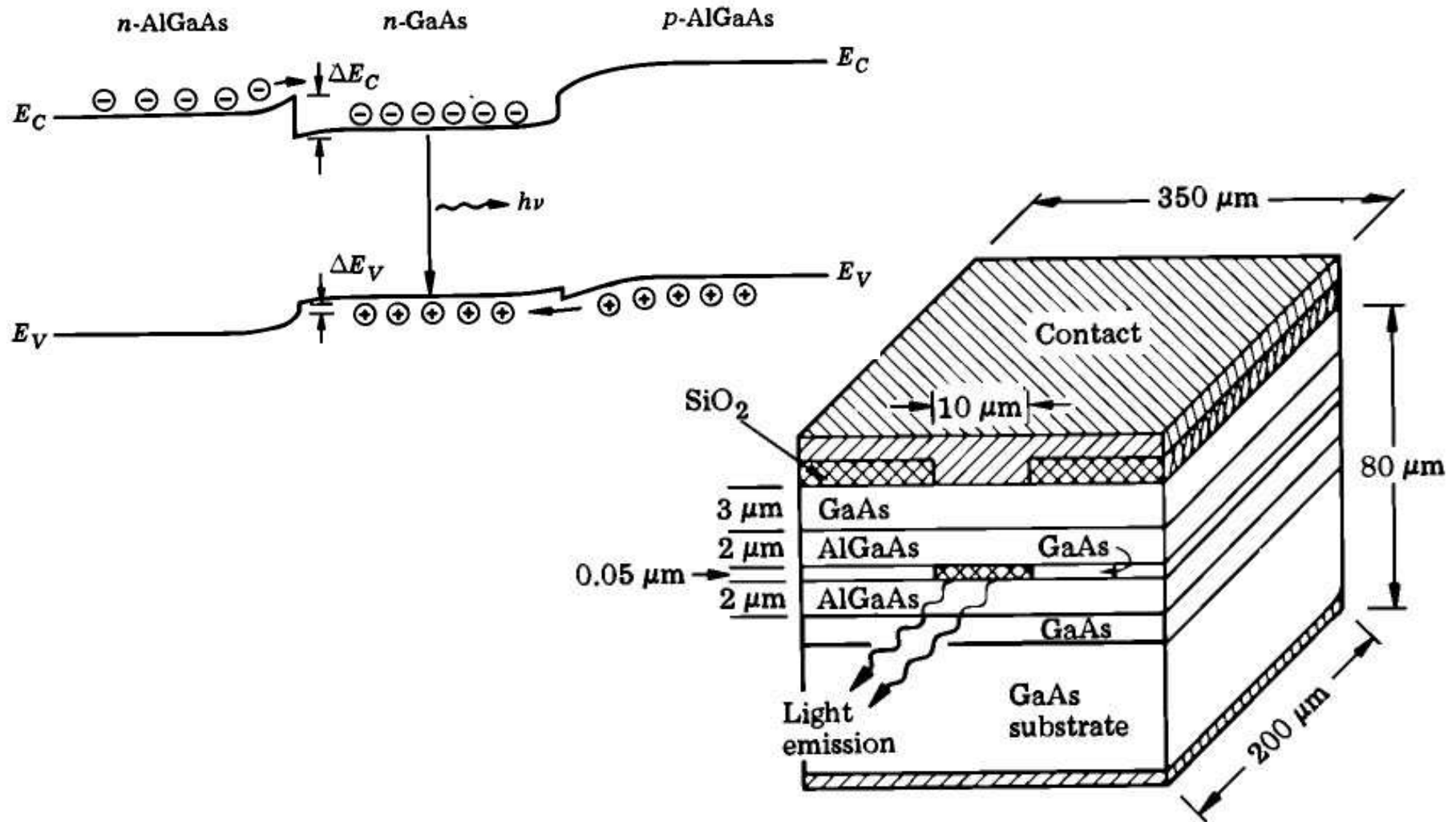
- Elektronenbeweglichkeit in GaAs ist höher als in Si
- Fast perfekte Heterostruktur durch sehr ähnliche Gitterstrukturen und Gitterkonstanten in AlGaAs und GaAs
- Streuung der Elektronen durch ionisierte Verunreinigungen ist im undotierten GaAs minimiert.



4. Heterostrukturen – Bauelementbeispiele

Beispiel:

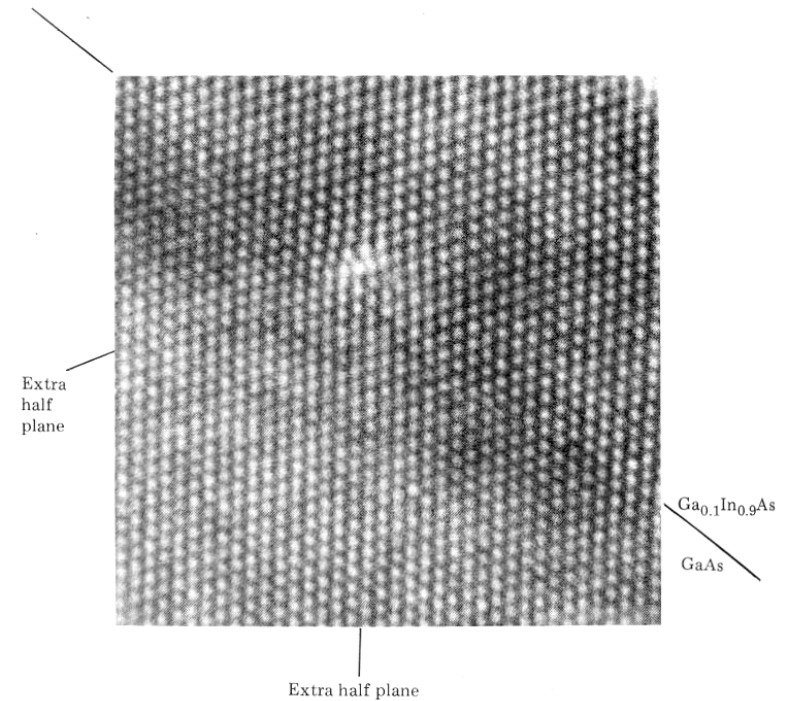
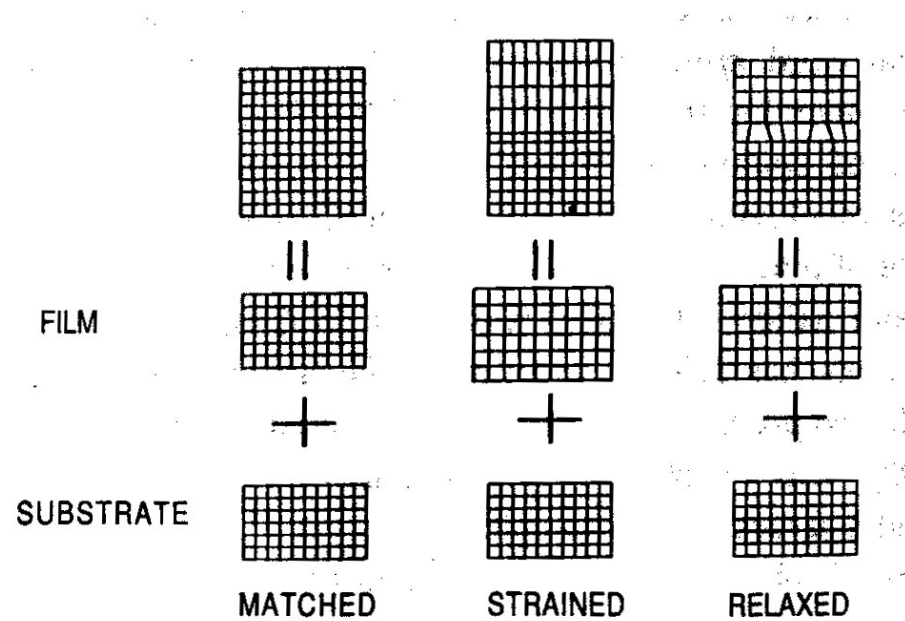
Doppelheterojunctionlaser



4. Halbleiterheterostrukturen – Materialsysteme



- Gitter der Halbleiter einer Heterojunction müssen aufeinanderpassen, da sonst Versetzungen eingebaut werden.



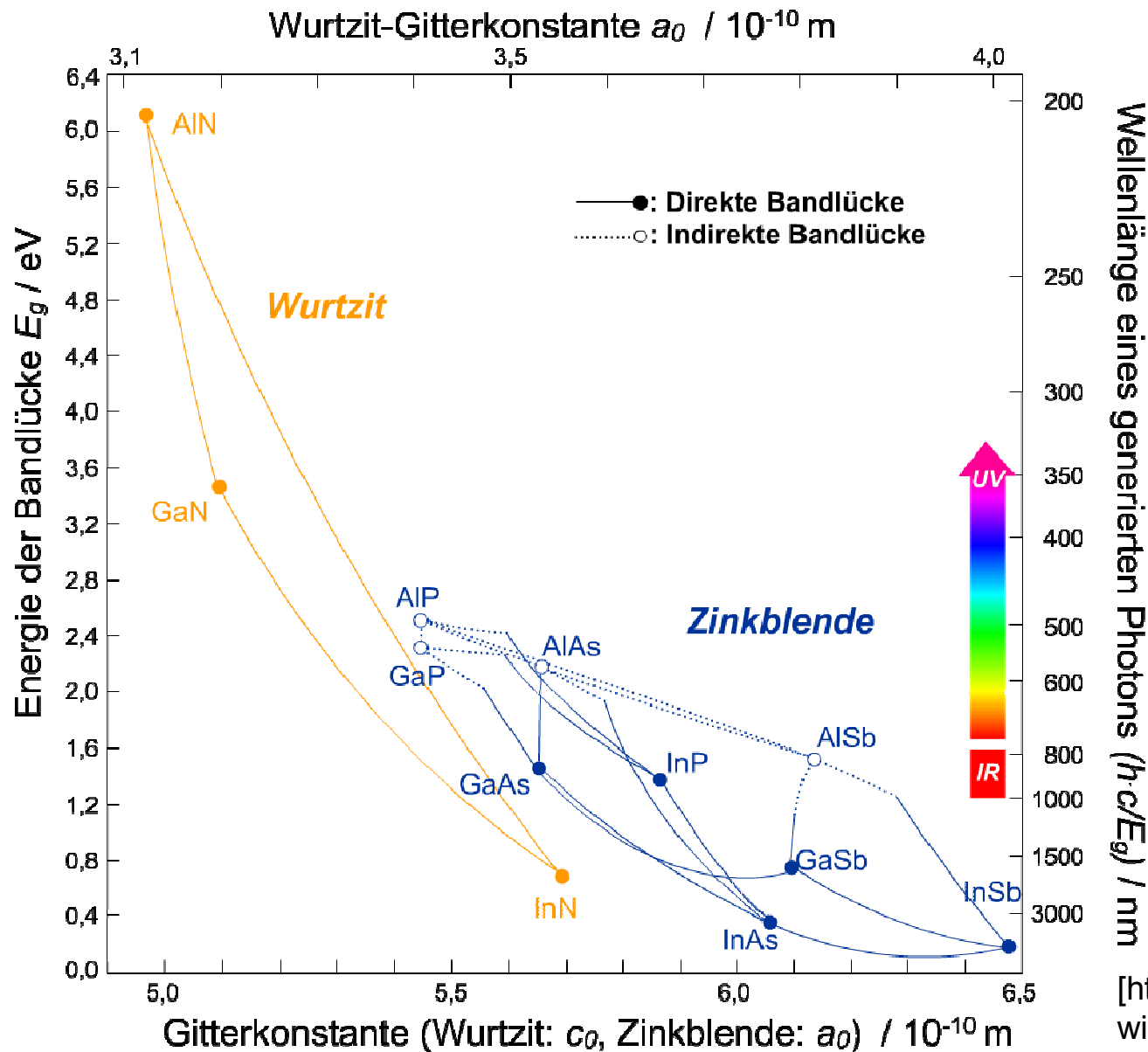
4. Halbleiterheterostrukturen – Materialsysteme

Verbindungshalbleiter

- Verbindungen aus Gruppen III und V: z.B. GaAs, AlN
- Verbindungen aus Gruppen II-VI: z.B. ZnSe

	IIIA	IVA	VA	VIA
	BORON B	CARBON C	NITROGEN N	OXYGEN O
IIB	ALUMINUM Al	SILICON Si	PHOSPHORUS P	SULFUR S
ZINC Zn	GALLIUM Ga	GERMANIUM Ge	ARSENIC As	SELENIUM Se
CADMIUM Cd	INDIUM In	TIN Sn	ANTIMONY Sb	TELLURIUM Te
MERCURY Hg	THALLIUM Tl	LEAD Pb	BISMUTH Bi	POLONIUM Po

4. Halbleiterheterostrukturen – Materialsysteme



[<http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:III-V-Halbleiter.png>]



1. Einführung

2. Halbleiter

3. Fermigas in niederen Dimensionen

4. Halbleiterheterostrukturen

5. Heteroepitaxie

- **Flüssigphasenepitaxie (LPE)**
- **Gasphasenepitaxie (CVD)**
- **Molekularstrahlepitaxie (MBE)**

6. Halbleiterquantenpunkte

7. Anwendungen

5. Heteroepitaxie



Heteroepitaxie:

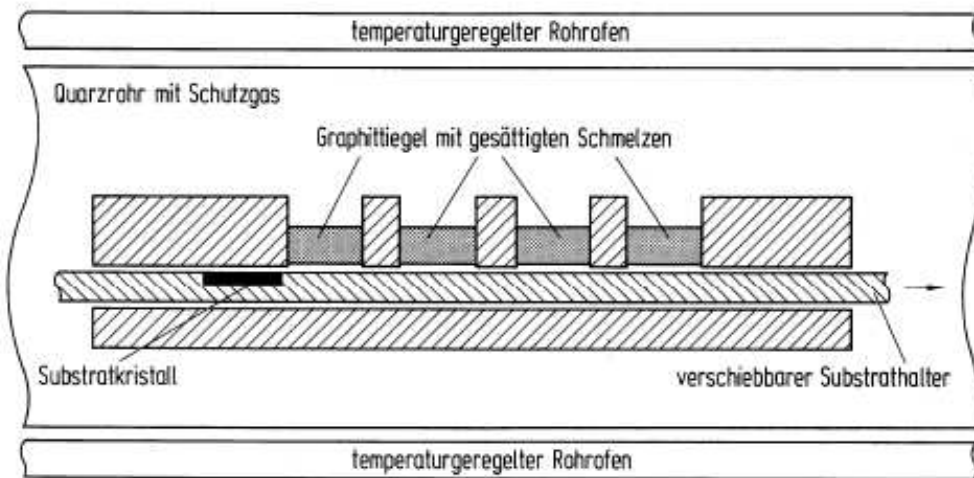
Epitaktische Abscheidung dünner Schichten mit unterschiedlicher Zusammensetzung

Anbieter der Materialien als:

- Flüssige Phase: Flüssigphasenepitaxie (Liquid Phase Epitaxy – LPE)
 - Einfach
 - Nur für dicke Schichten
- Gasförmige Phase: Gasphasenepitaxie (Chemical Vapour Deposition – CVD)
 - Gase: Silan (SiH_4), Arsin, organische Metallverbindungen (MOCVD bzw. MOVPE)
 - Reproduzierbar
 - Unflexibel
 - Sehr giftig und daher höchst gefährlich
- Molekularstrahlen: Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam Epitaxy – MBE)
 - Si, As₄, Ga
 - N₂, O₂ als Gase
 - Flexibel
 - Geringer Durchsatz

5. Heteroepitaxie – Flüssigphasenepitaxie (LPE)

- Nutzt Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit in Metall- oder Salzschnmelzen.
- Substratkristall in Kontakt mit Metallschmelze (z.B. Ga), die mit Aufwachsmaterial (z.B. GaAs) gesättigt ist.
- Beim Abkühlen wächst das überschüssige Material epitaktisch auf dem Substrat.



Graphitbootverfahren

[Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 6, Festkörper (1992)]

[Tek-Vac Industries Inc. LPE-3750 / 4750]



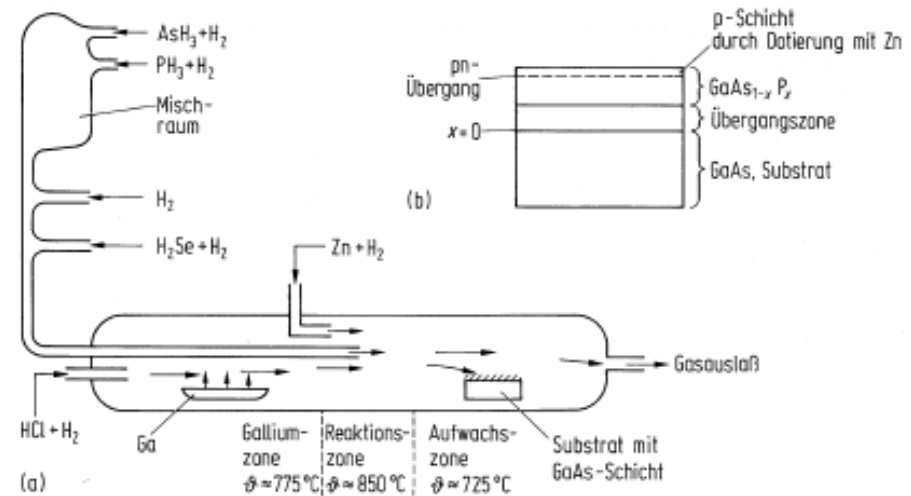
5. Heteroepitaxie – Gasphasenepitaxie (CVD)



CVD

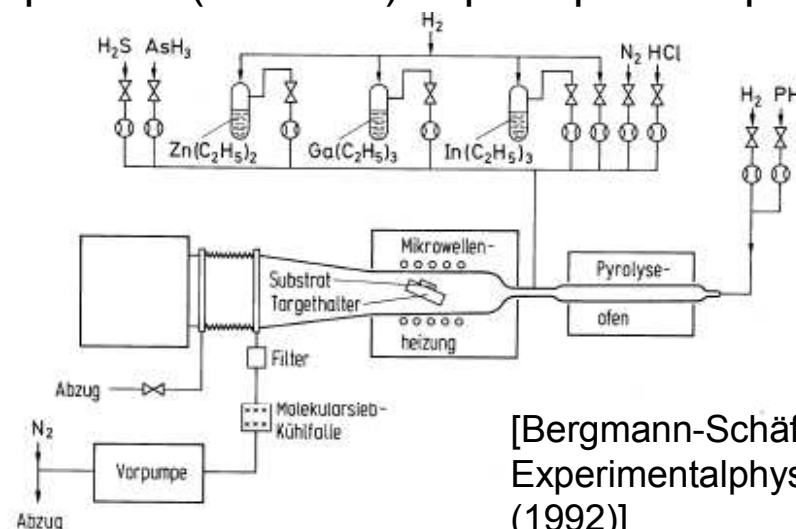
- Komponenten und Dotierungen werden als Gase in einem Reaktionsraum zusammengeführt.
- Abscheidung auf Substrat.

[Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 6, Festkörper (1992)]



Metal organic chemical vapour deposition(MOCVD)/vapour phase epitaxy(MOVPE)

- Metalle in Form von leicht zersetzlichen Methyl- oder Ethylverbindungen.
- Genauere Kontrolle der Zusammensetzung

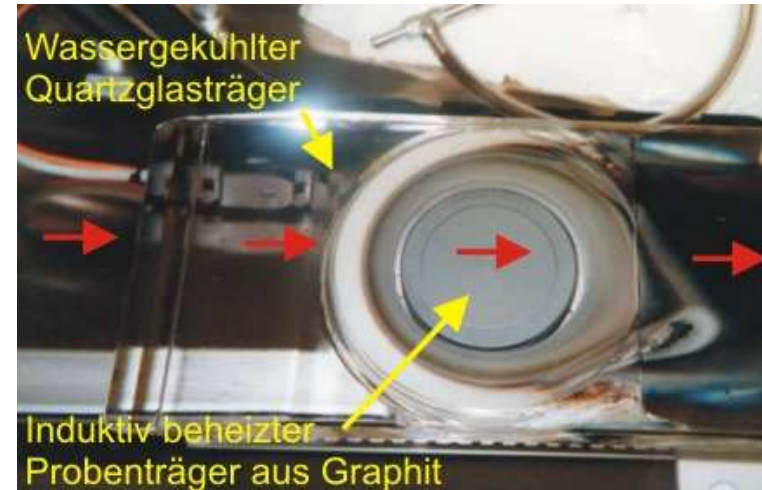
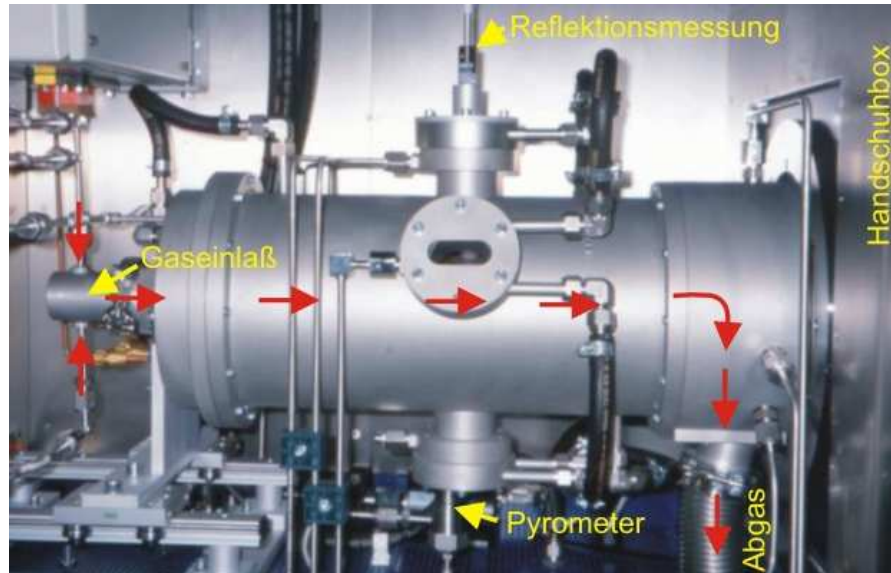


[Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 6, Festkörper (1992)]

5. Heteroepitaxie – Gasphasenepitaxie (CVD)



- Horizontaler Reaktor für Forschung und Entwicklung



[Arbeitsgruppe A. Krost, Universität Magdeburg]

- Planetary-Reactor Produktionssystem



[Aixtron]

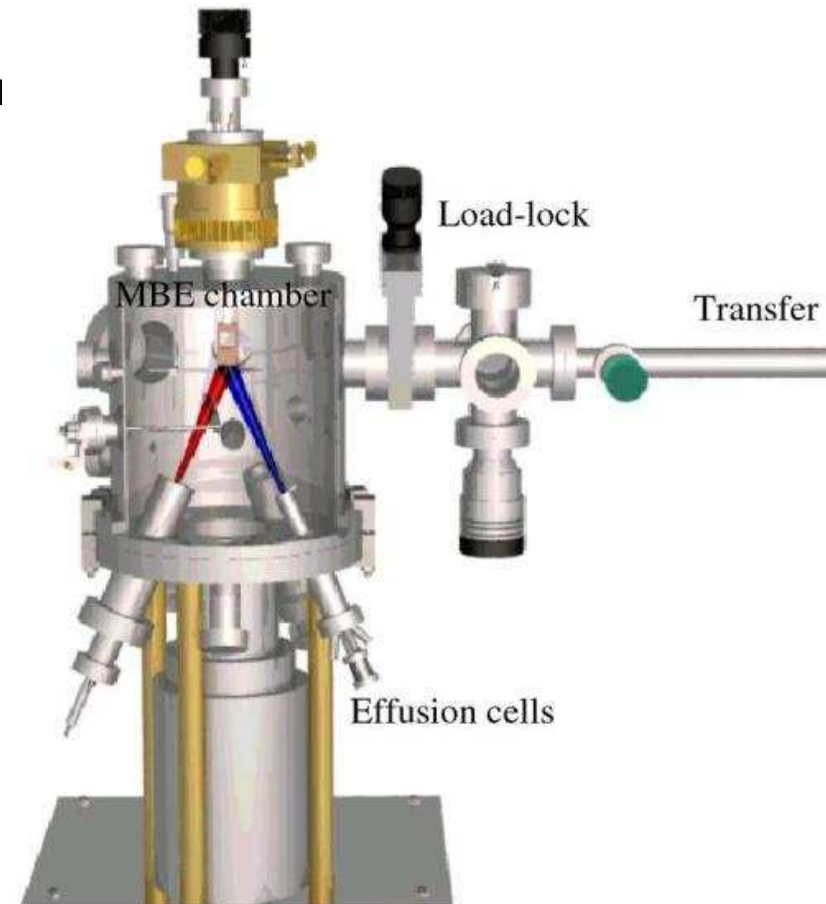
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

Geschichte

- Erfunden in den späten 1960er Jahren in den Bell Labs durch J. R. Arthur and A. Y. Cho
- Erste epitaktische Abscheidung einer einkristallinen GaAs-Schicht im Jahre 1968 [Davey and Pankey, *J. Appl. Phys.* **39**, 1941 (1968)]
- Seit 1975 kommerzielle Anlagen
- Seit 1985 Massenproduktion von Halbleiter-Laserdioden

MBE-Typen

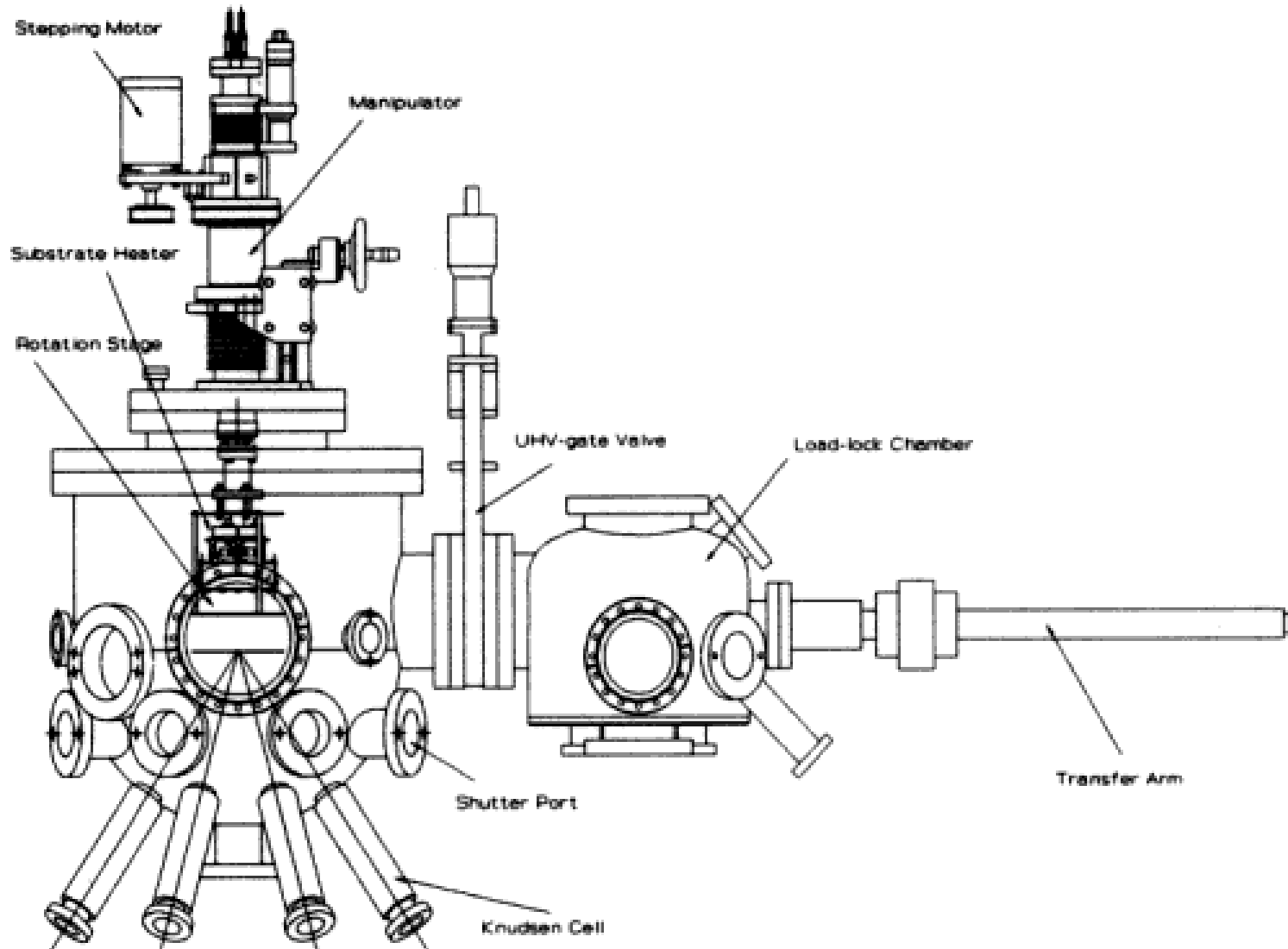
- Solid-Source MBE (SS-MBE)
Alle Materialien als Molekularstrahlen
- Gas-Source MBE (GS-MBE)
Einige Elemente werden gasförmig angeboten, z.B. als AsH_3 or NH_3 oder N_2
- Metalorganic MBE (MO-MBE)
Metallische Materialien als metallorganische Verbindungen, z.B. TEGa and TMIn



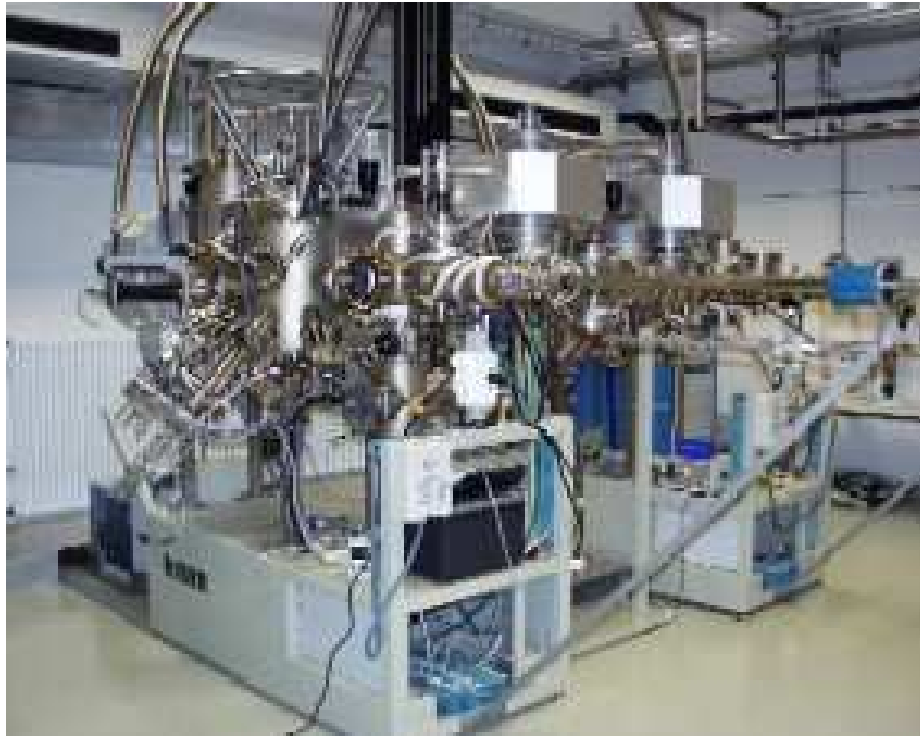
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



Technologie

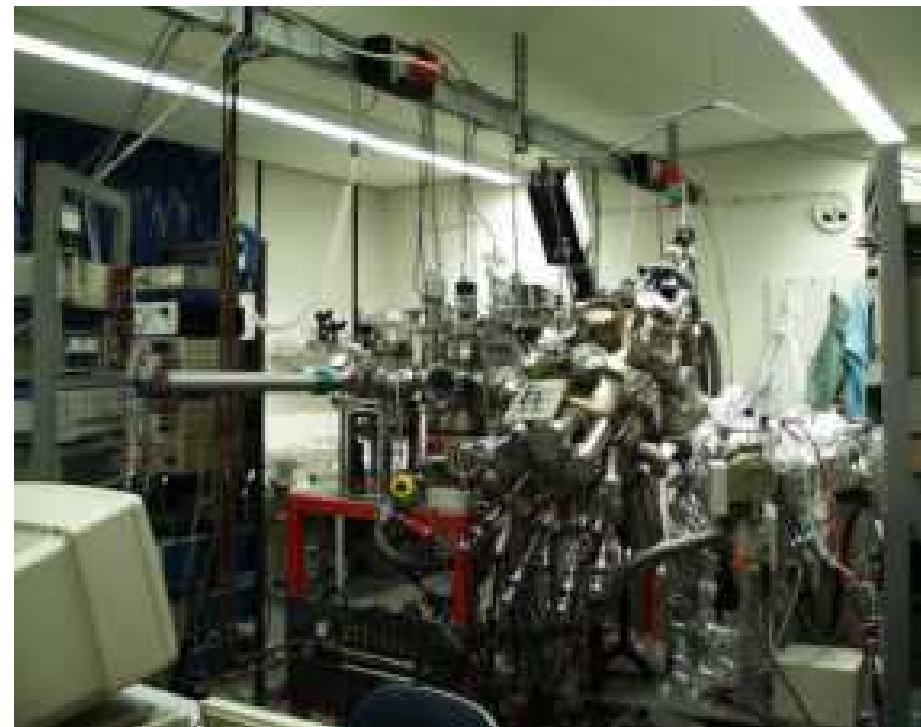


5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



- Anlage zum Wachstum von III-V Verbindungen, wie z.B. GaInAs, GaN
 - Probe liegt waagrecht
 - Zellenports sind von unten zentral angeordnet

- Anlage zum Wachstum von IIb-VI Verbindungen, wie z.B. ZnMnSSe
 - Probe liegt schräg
 - Zellenports sind diagonal angeordnet



5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



MBE-Produktionsanlage



[Veeco]

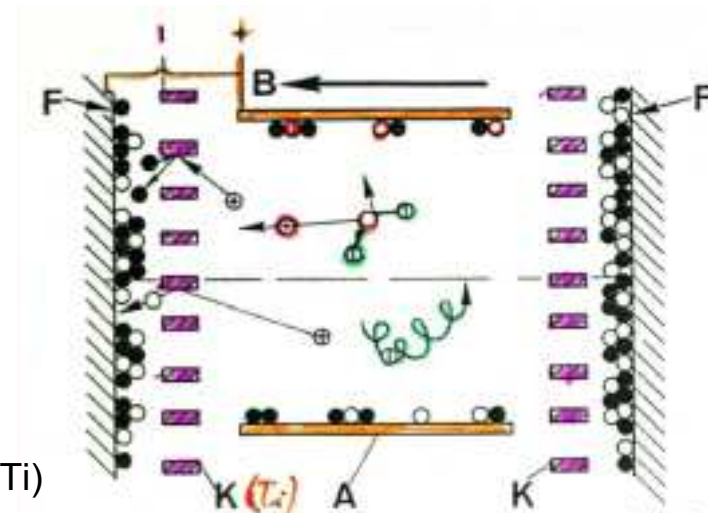
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

Vakuum

- Mittlere freie Weglänge der Atome muß viel größer als Abstand Quelle-Substrat sein, $\lambda = 6 \times 10^{-3} \text{ cm mbar/p}$ (für Luft bei $T = 293 \text{ K}$)
→ Hochvakuum mit $p < 10^{-5} \text{ mbar}$
- Möglichst wenig Verunreinigungen im Restgas
Rate der Verunreinigungen pro Fläche und Zeit \ll Wachstumsrate
→ Ultrahochvakuum mit $p < 10^{-10} \text{ mbar}$
- Verwendete Pumpen:
 - Turbomolekularpumpe
 - Ionengetterpumpe
 - Kryopumpe
 - LN2-Shroud (Kondensation der Gase bei $T = 77 \text{ K}$)



A: Anodenzylinder
K: Kathodengitter (Ti)
F: Auffänger
B: Magnetfeld



Ionengetterpumpe

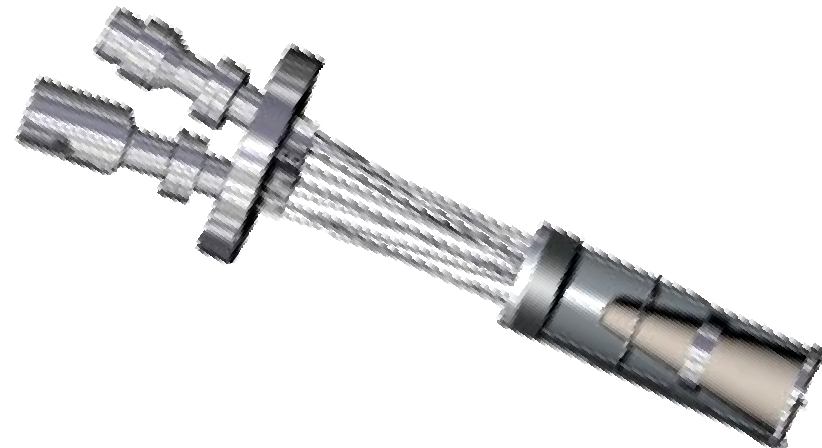
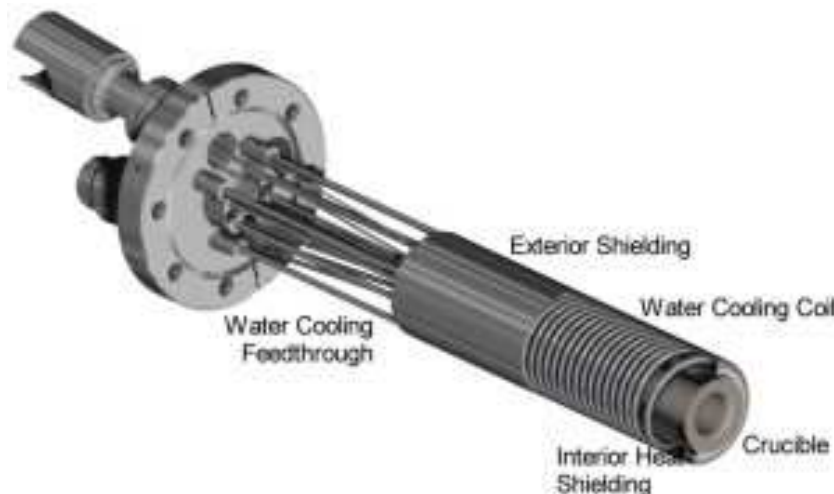
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

Substratheizung

- Geregelt Temperatur zur thermischen Aktivierung von Diffusion, Einbau und Desorption der Atome

Effusionszellen

- Thermisches Verdampfen der Materialien bei geregelter Temperatur
- Kontrollierter Materialfluß aus Effusionszellen mit $R \sim \exp(-Q_D/kT)$ (QD: Verdampfungswärme), $R \sim 5 \times 10^{14}$ Atome/(cm²s), d.h. ~ 1 Monolage/s
- Mechanische Blende als Shutter für Flussesequenzen \rightarrow Heterostrukturen



5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



Tiegel

- Ta, Mo, and pyrolytic boron nitride (PBN)
- Zerfallen nicht und geben keine Verunreinigungsgase ab bis ca 1400 °C.
- Typische Tiegelformen:

Zylindrisch



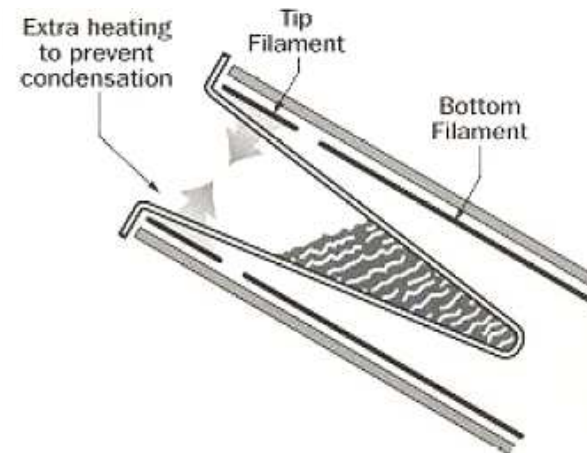
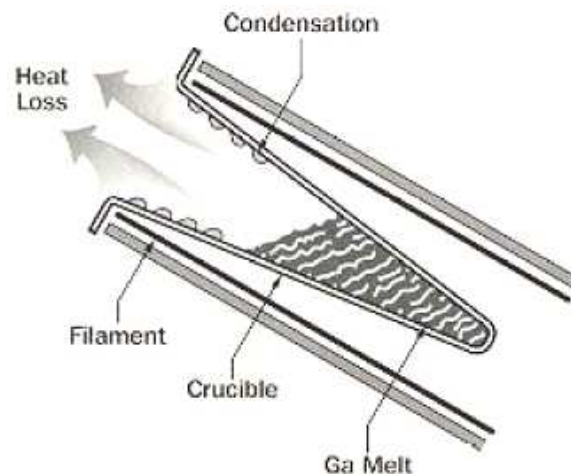
- Viel Material
- Gleichmäßigkeit am Substrat wird kleiner bei Materialabnahme

Konisch



- Weniger Material
- Höhere Gleichmäßigkeit am Substrat
- Keine langzeitige Flußstabilität

- Dual-Filament-Zellen:



5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



Epitaktisches Wachstum

γ_S : Oberflächenenergie des Substrates

γ_F : Oberflächenenergie des Films

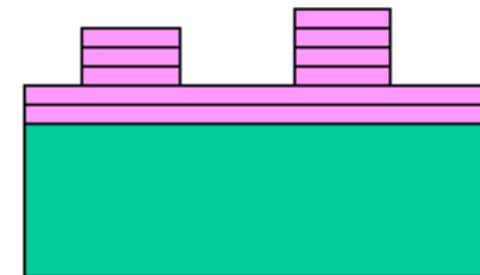
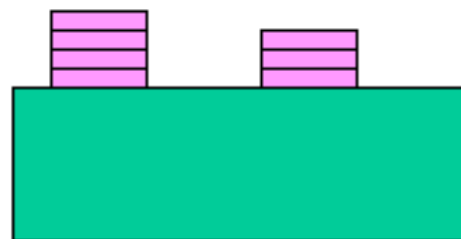
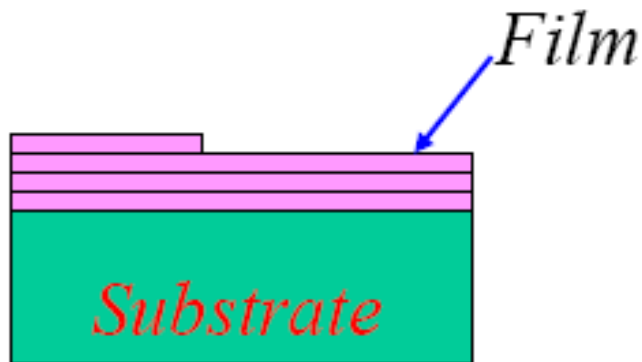
γ_{SF} : Substrat-Film Grenzflächenenergie

$\gamma_S > \gamma_F + \gamma_{SF}$

$\gamma_S < \gamma_F + \gamma_{SF}$

zuerst: $\gamma_S > \gamma_F + \gamma_{SF}$

danach: $\gamma_S < \gamma_F + \gamma_{SF}$

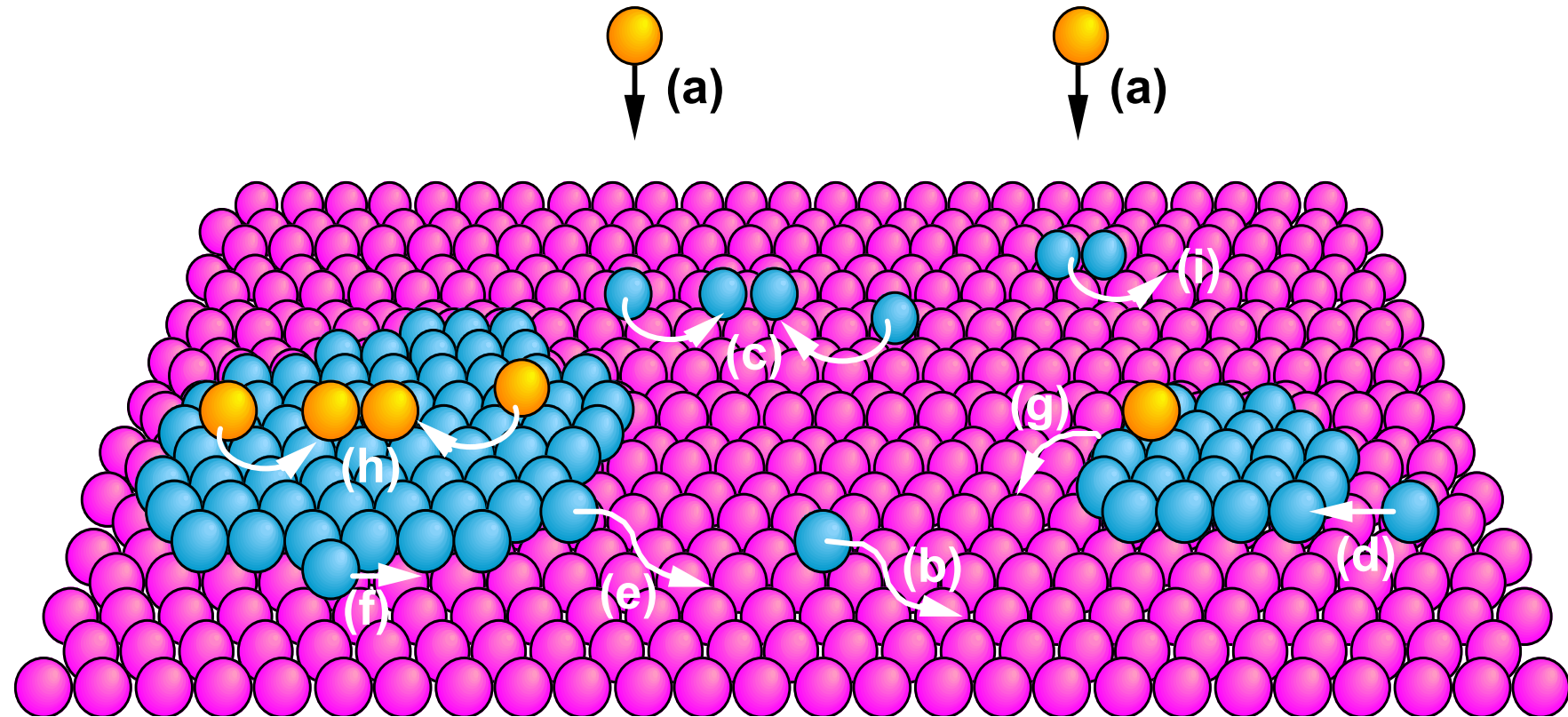


Lagenwachstum
(Frank-Van der Merwe)

3D Inselbildung
(Volmer-Weber)

Benetzungsschicht +
3D Inselbildung
(Stranski-Krastanov)

5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



(a) Deposition

(d) Attachment

(g) Diffusion

über Stufenkante

(b) Diffusion

(e) Detachment

(h) Nukleation auf Insel

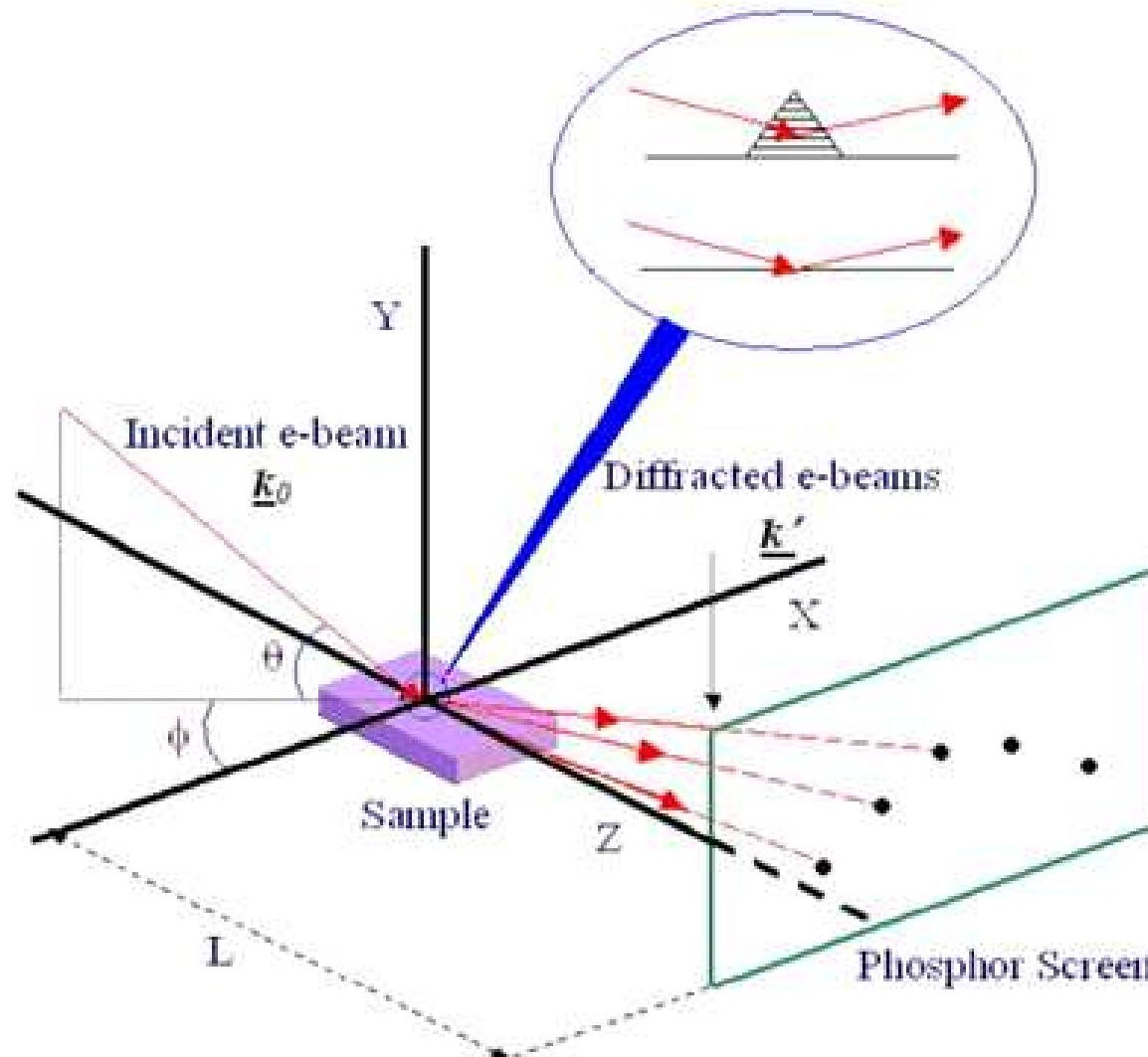
(c) Nukleation

(f) Randdiffusion

(i) Dimerdiffusion

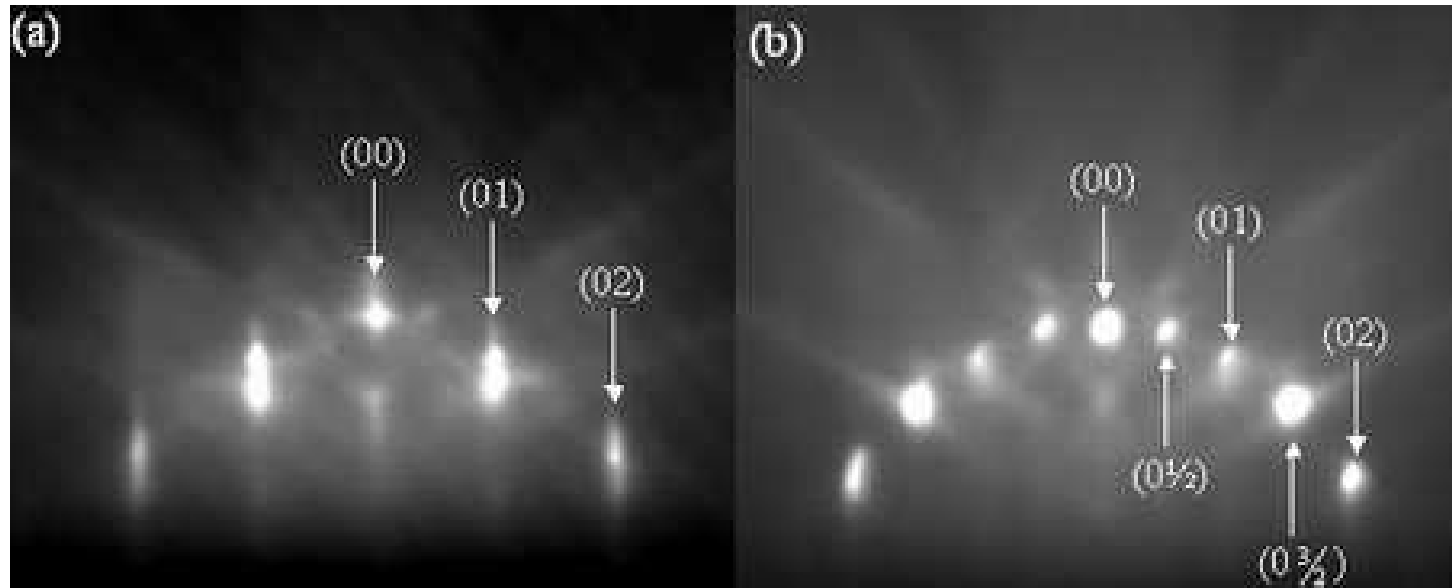
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

In-situ Kontrolle durch Reflection-High-Energy-Electron-Diffraction (RHEED)



5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

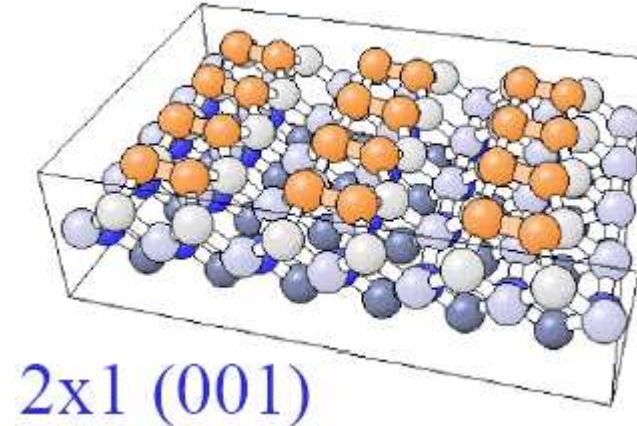
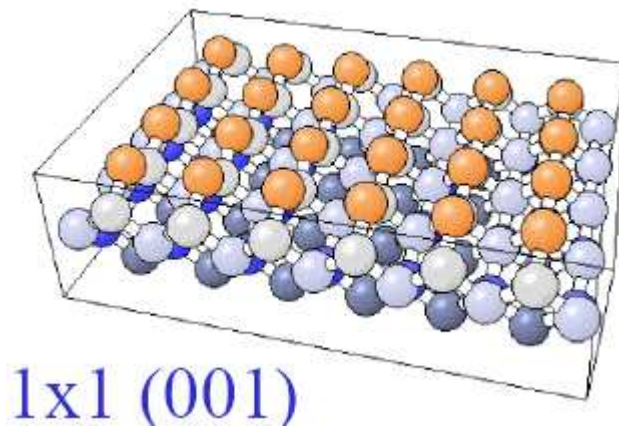
- RHEED ist sensitiv auf Oberflächenstrukturen und –rekonstruktionen.



Elektronenstrahl
Trifft auf (110)
mit 8.6 keV

a) GaAs(100) - 1x1

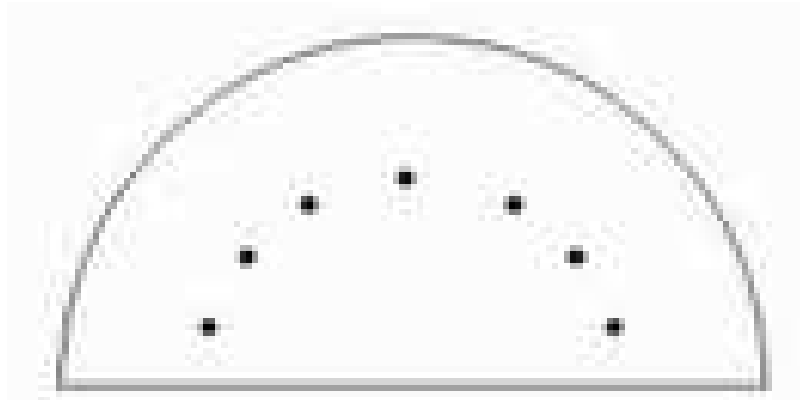
b) GaAs(100) - 2x1



5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



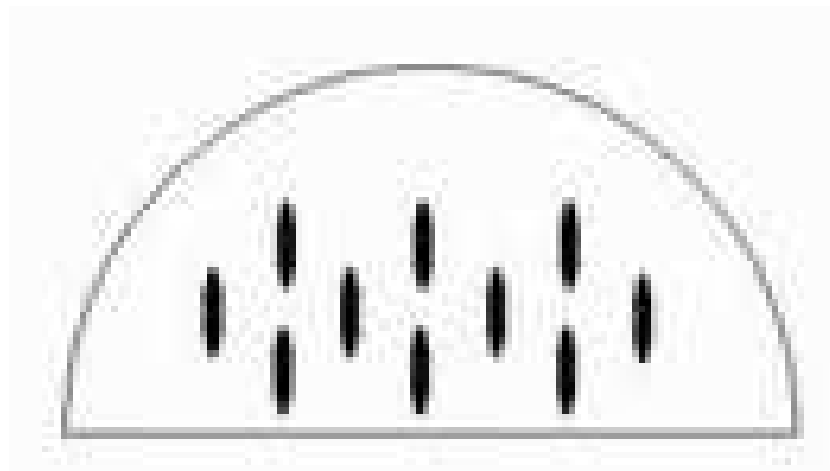
- RHEED ist sensitiv auf Oberflächenmorphologie



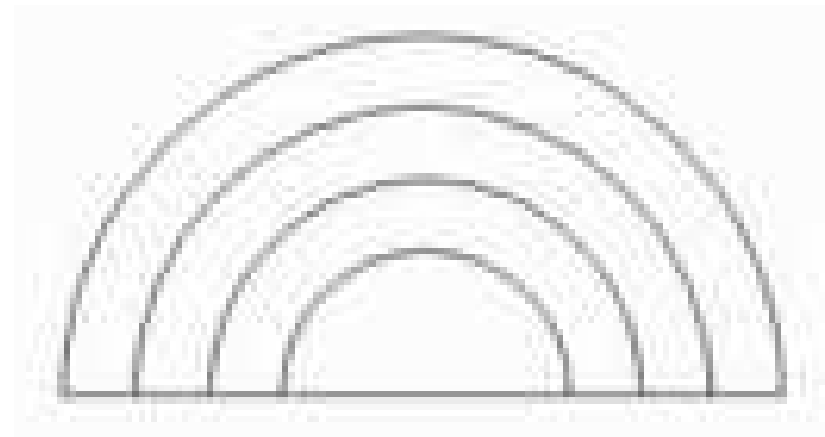
RHEED-Bild einer idealen, glatten Oberfläche



RHEED-Bild einer wahren, glatten Oberfläche



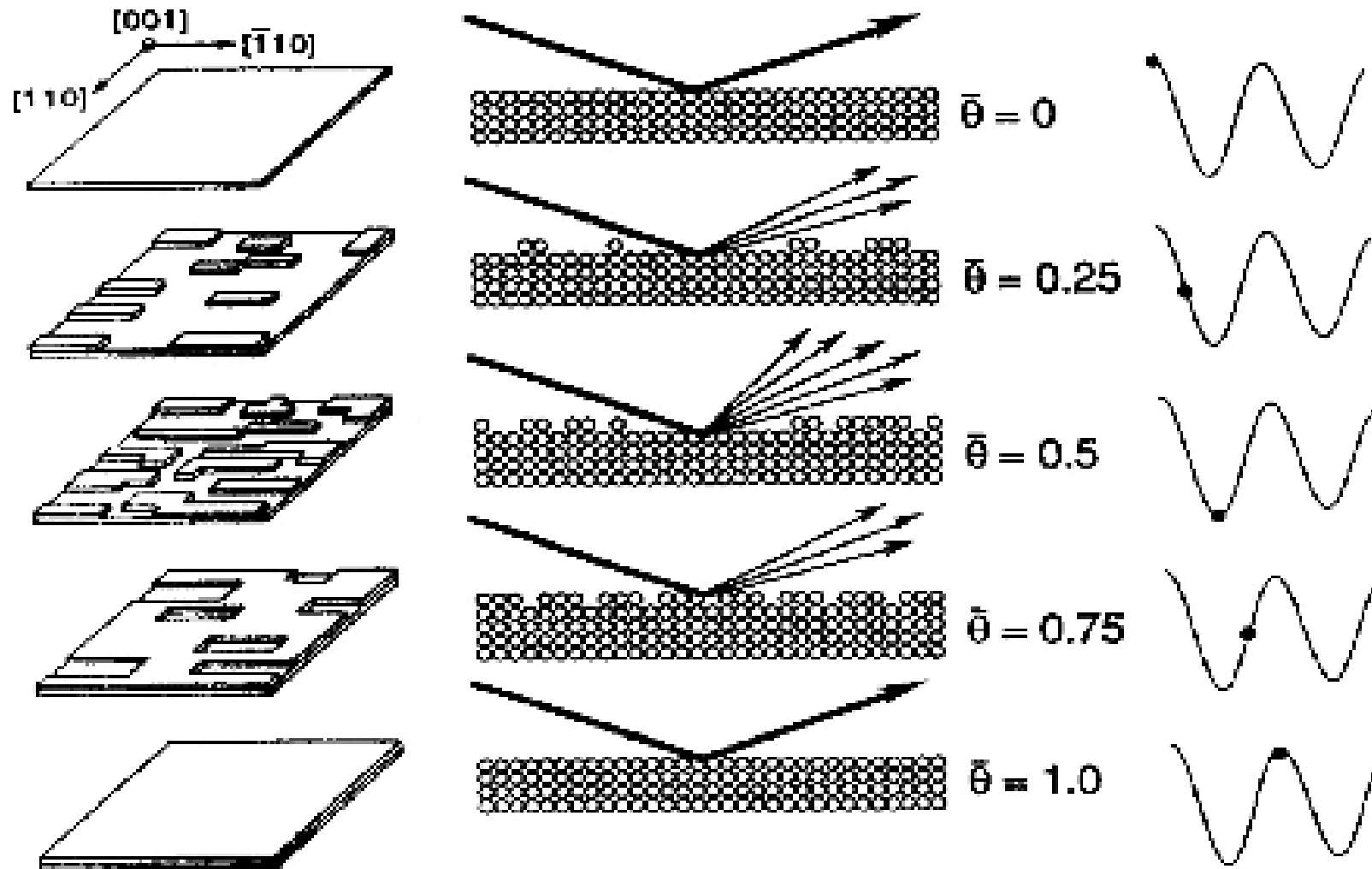
RHEED-Bild einer rauhen Oberfläche



RHEED-Bild von texturiertem oder polykristallinem Material

5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)

- RHEED-Intensitätsoszillationen können genutzt werden, um die Wachstumsrate monolagengenau zu bestimmen.

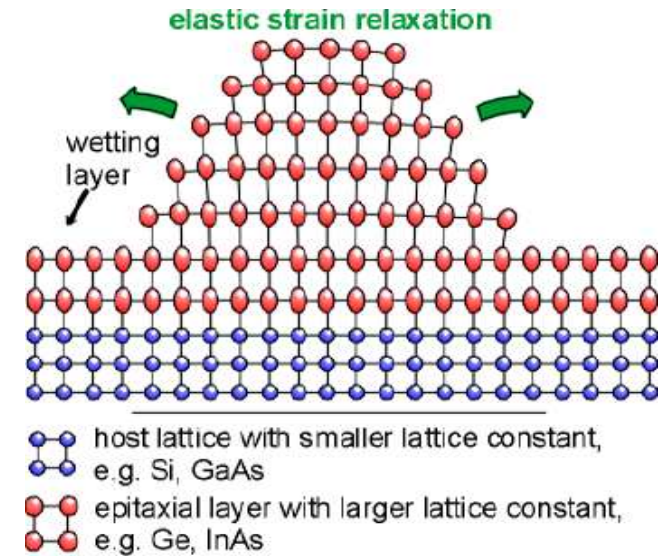
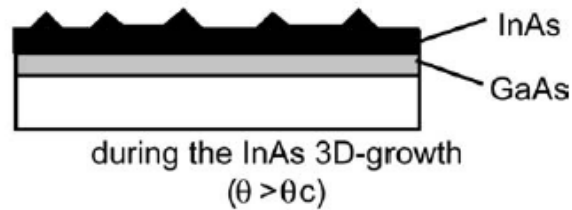
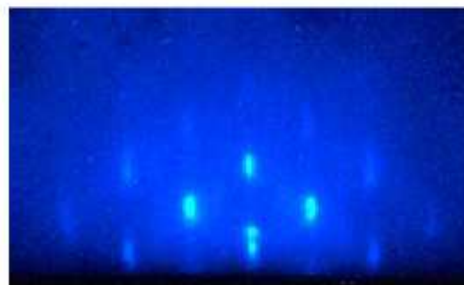
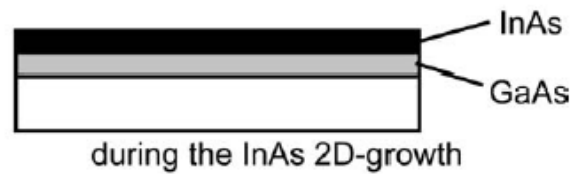
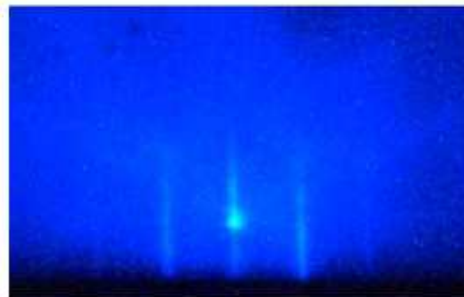
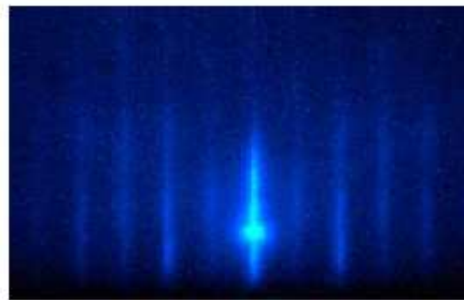




1. Einführung
2. Halbleiter
3. Fermigas in niederen Dimensionen
4. Halbleiterheterostrukturen
5. Heteroepitaxie
- 6. Halbleiterquantenpunkte**
 - **InAs Quantenpunkte**
 - **GaN Quantenpunkte**
7. Anwendungen

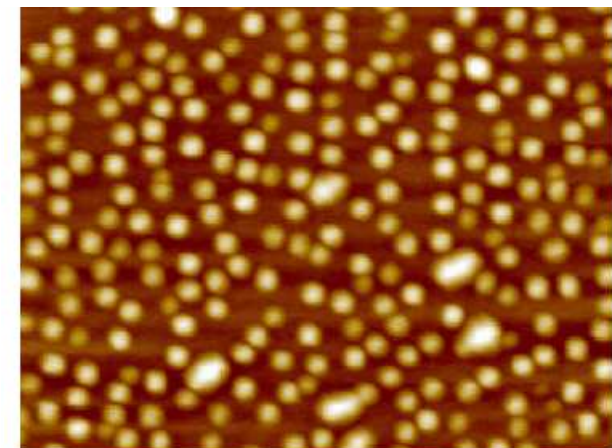
6. Halbleiterquantenpunkte – InAs Quantenpunkte

Wachstum



RHEED

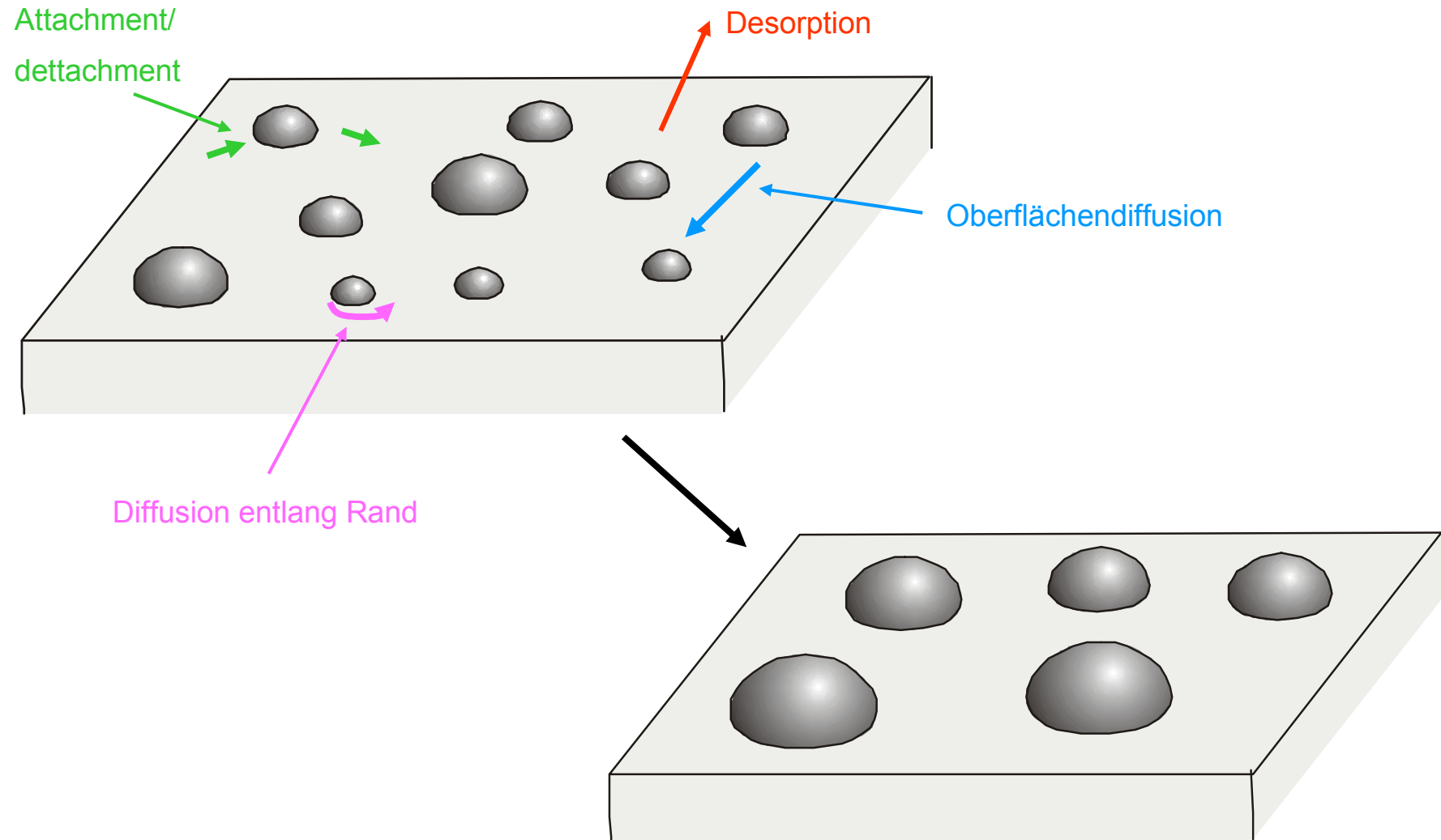
Rasterkraftmikroskopieaufnahme von InAs Quantenpunkten



6. Halbleiterquantenpunkte – InAs Quantenpunkte



- In-situ Reifung von Quantenpunkten

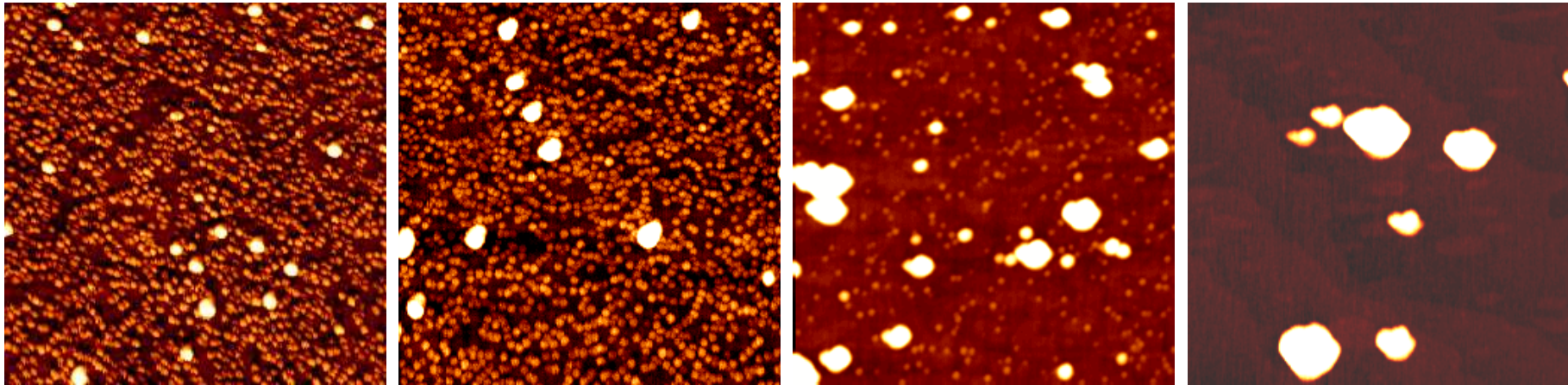


6. Halbleiterquantenpunkte – InAs Quantenpunkte



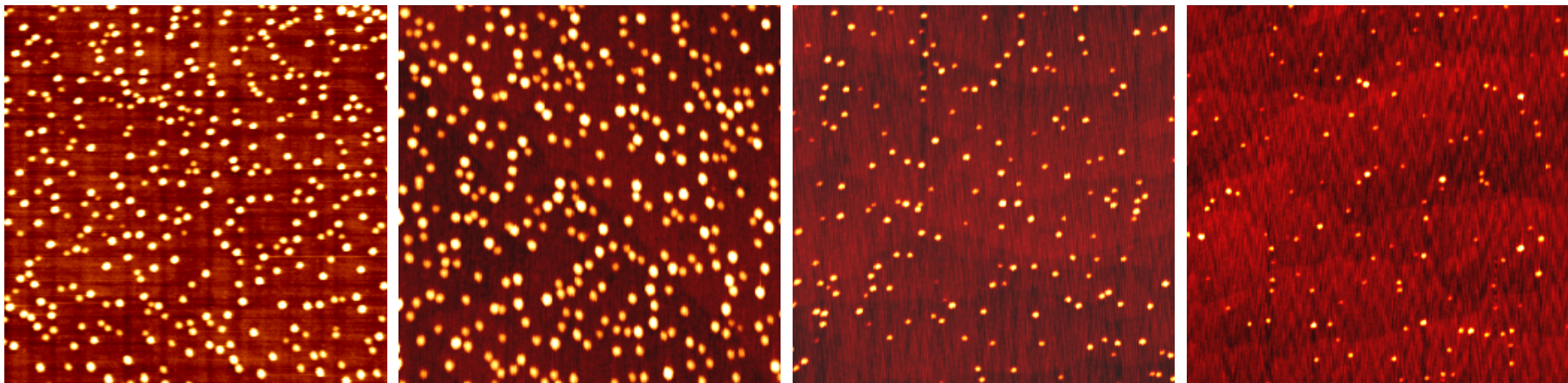
- Morphologie angelassener Quantenpunkte

T = 470 °C



T = 500 °C

AFM scan area:
2x2µm²



As grown

1 min annealed

5 min

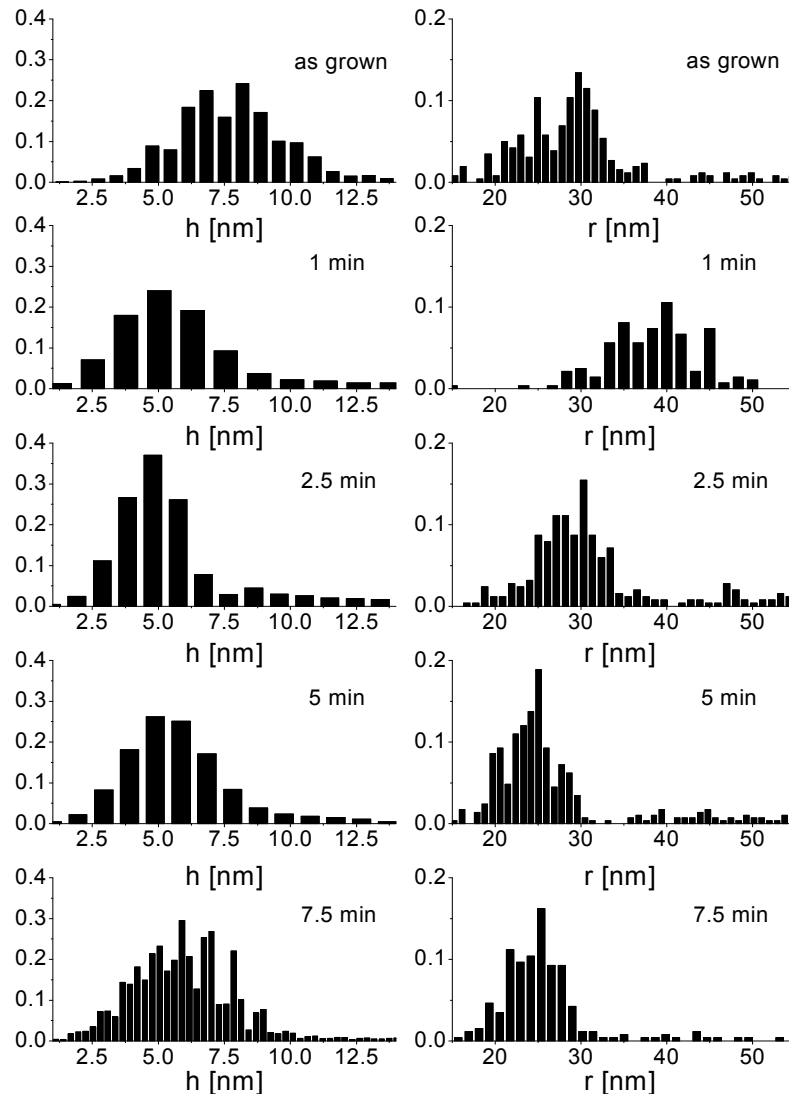
7.5 min

6. Halbleiterquantenpunkte – InAs Quantenpunkte

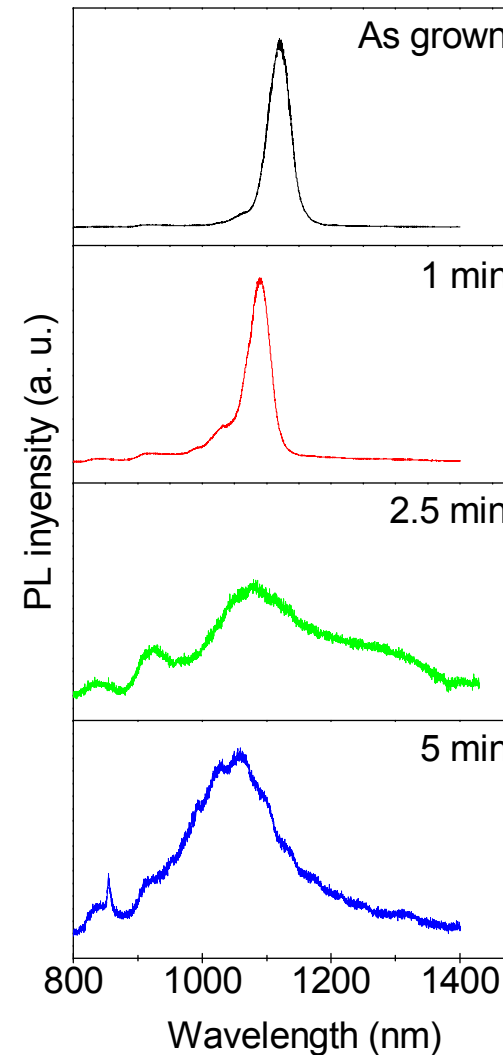


- Kontrolle über Größenverteilung und Emissionswellenlänge

Histogramme der Dorthöhe und des Dotradius



Photolumineszenzspektren

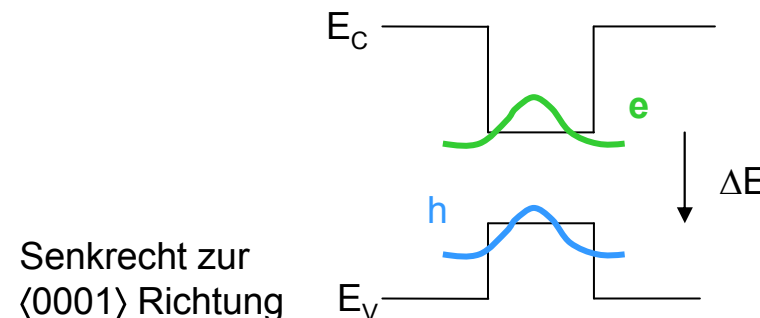
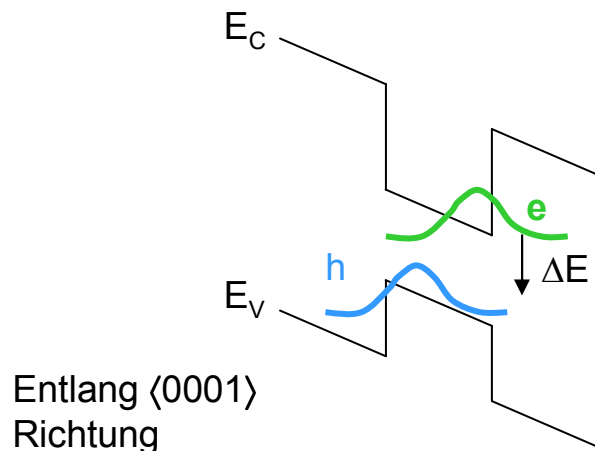
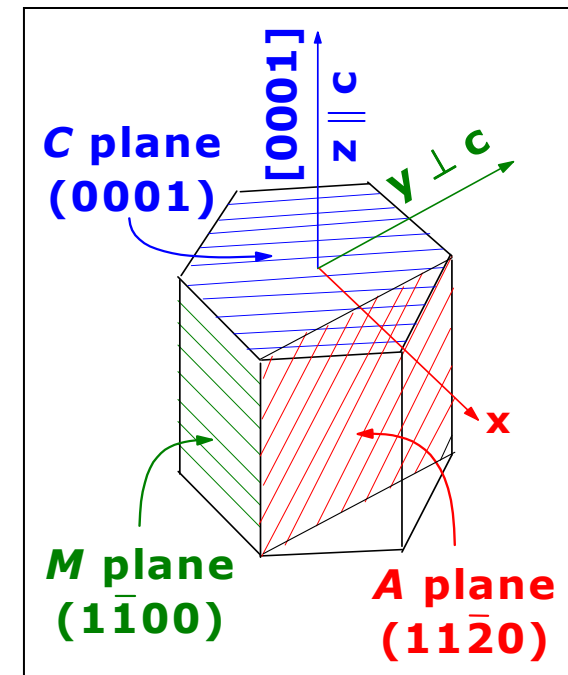


6. Halbleiterquantenpunkte – GaN Quantenpunkte



Wachstum von GaN Quantenpunkten auf polaren und nichtpolaren Substraten

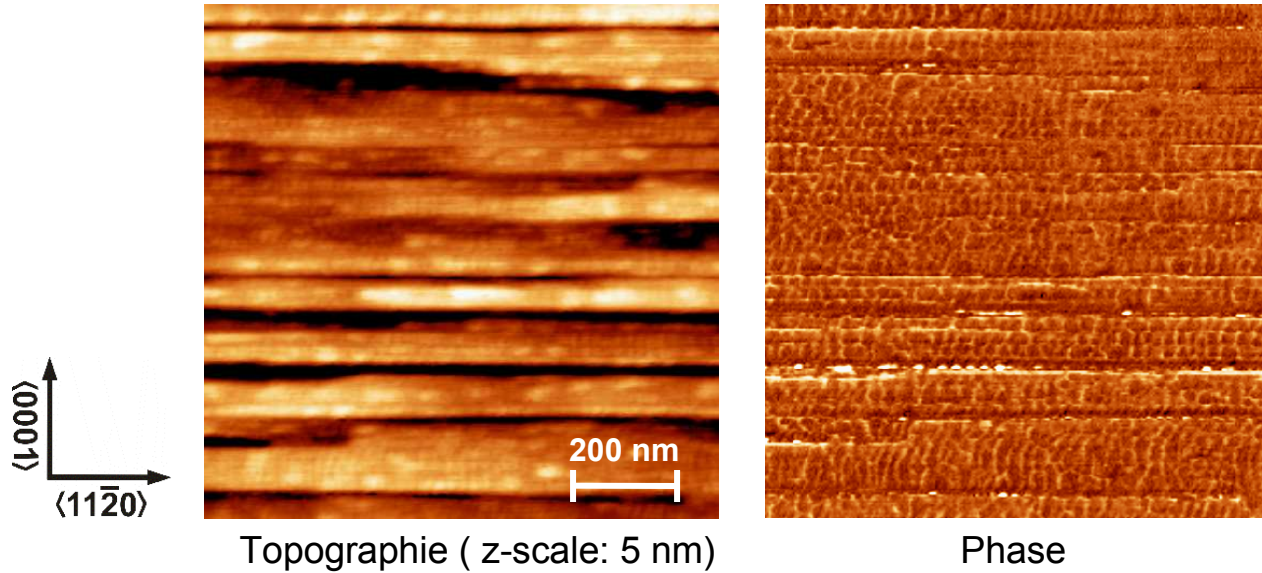
- Epitaktische Gruppe-III Nitridschichten mit einer nichtpolaren Oberfläche, wie z.B. der *M*-Fläche oder der *A*-Fläche sind attraktiv, da die durch spontane und piezoelektrische Polarisation hervorgerufen eingebauten elektrischen Felder nicht mit der Wachstumsrichtung übereinstimmen.
- Starker quantum confined Stark-Effekt für Wachstum entlang $\langle 0001 \rangle$ Richtung:
 - Erniedrigt die Energie des strahlenden Übergangs
 - Reduziert die Oszillatorstärke durch räumliche Trennung von Elektronen und Löchern.



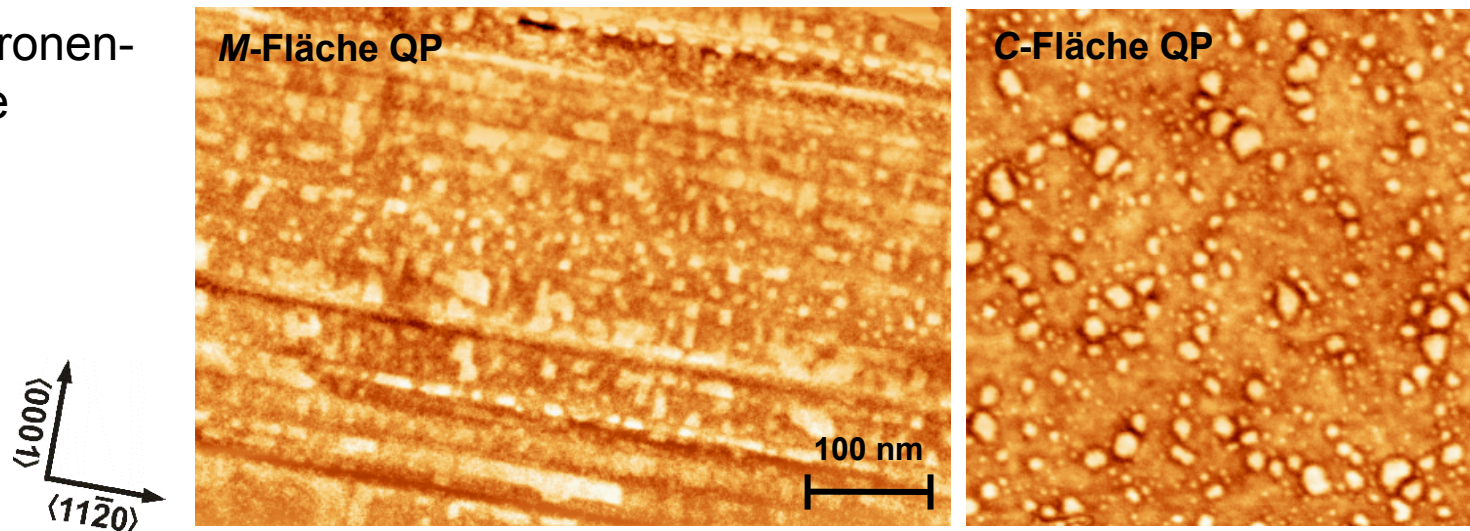
6. Halbleiterquantenpunkte – GaN Quantenpunkte



- Rasterkraftmikroskopiebild von on *M*-Fläche Quantenpunkten

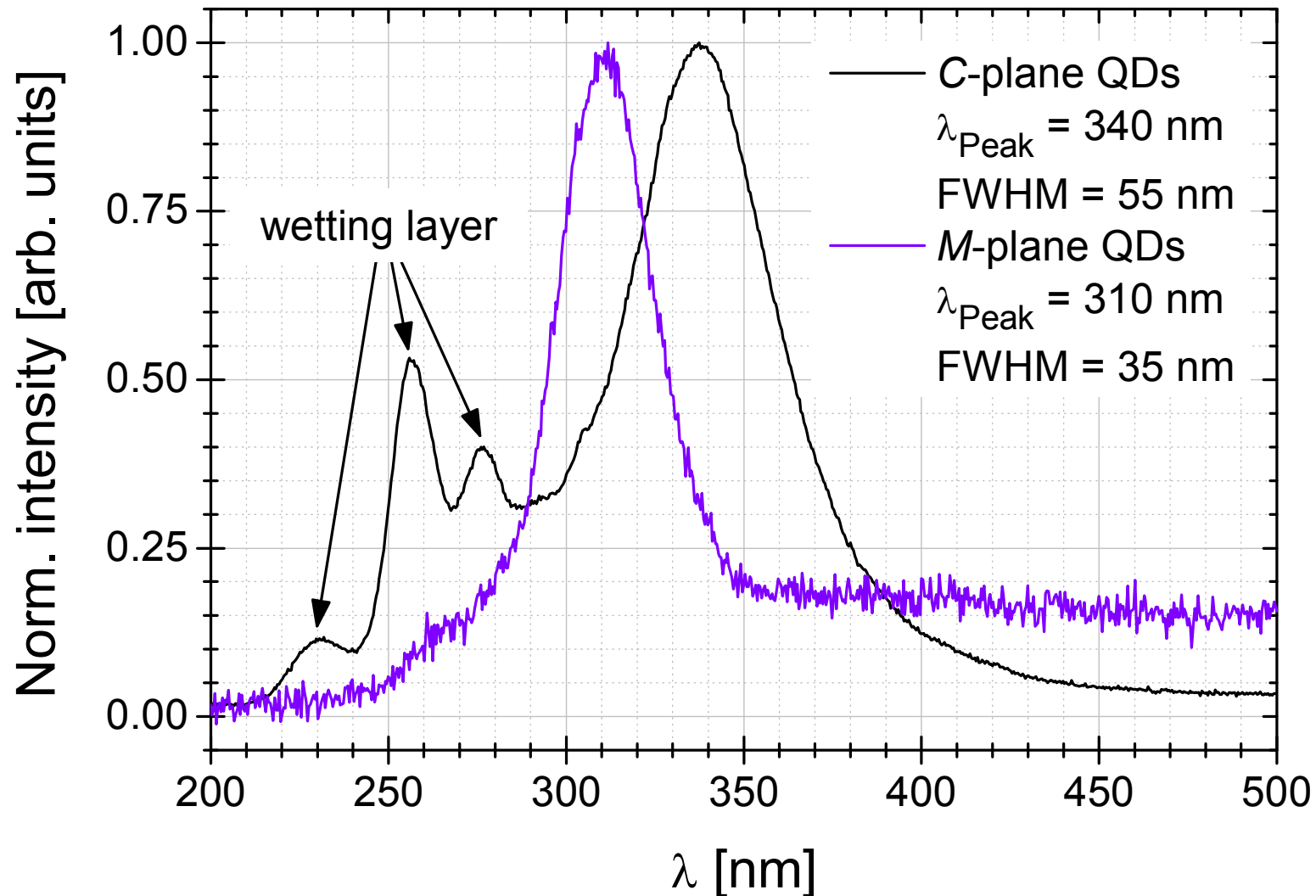


- Rasterelektronenmikroskopie



6. Halbleiterquantenpunkte – GaN Quantenpunkte

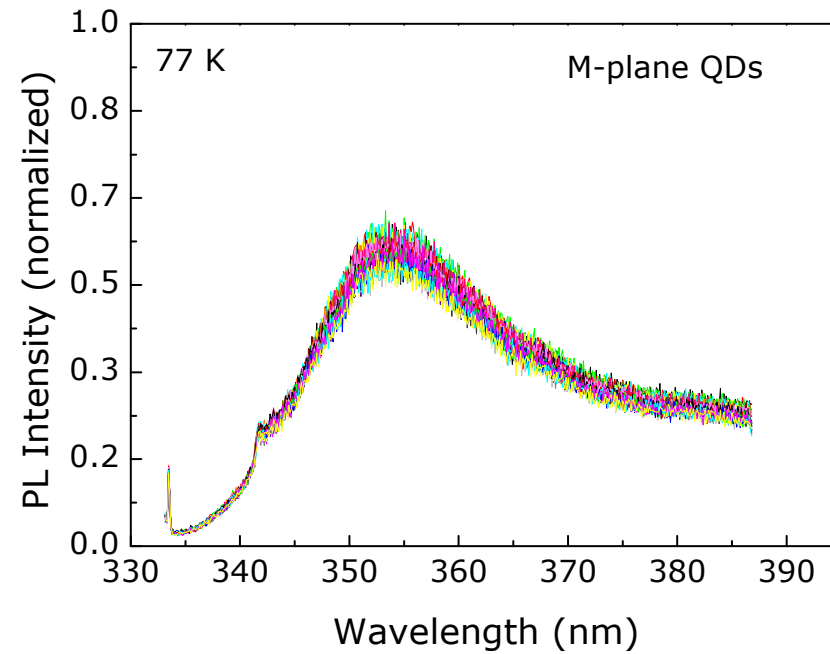
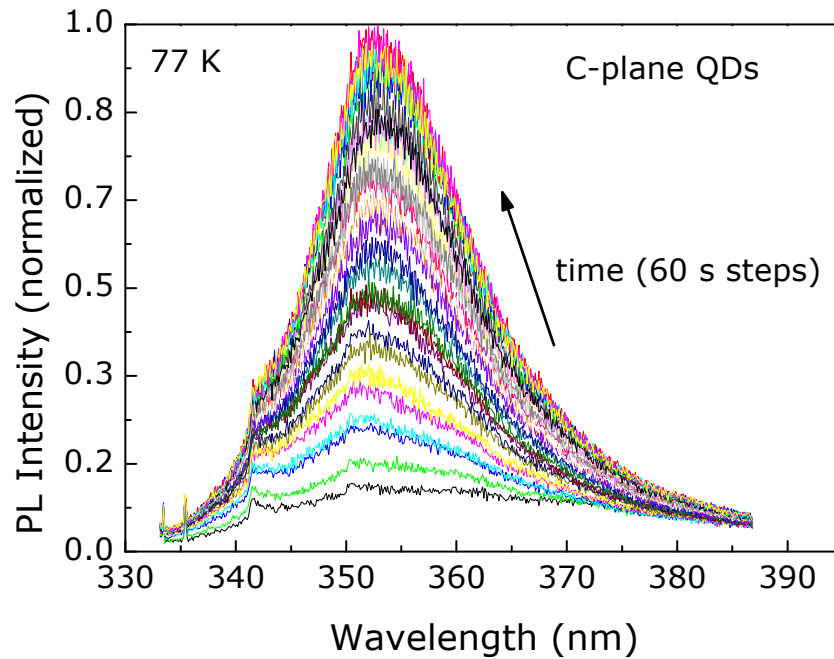
- Lumineszenzspektren



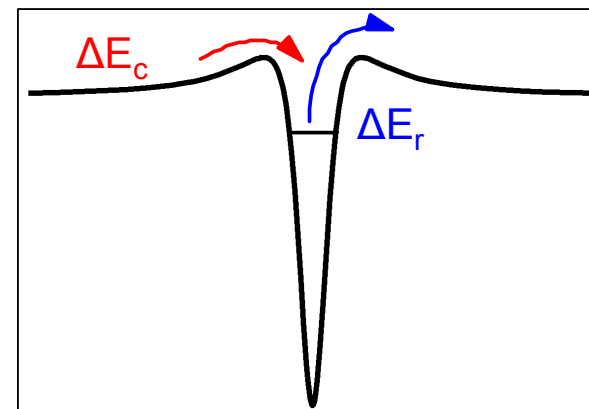
5. Heteroepitaxie – Molekularstrahlepitaxie (MBE)



- Zeitliche Veränderung der Quantenpunktemission



- Kontinuierlicher Anstieg der Intensität bei C-plane Quantenpunkten:
 - Langsame Traps die Ladung auffangen
 - Diese Traps existieren nicht in M-plane Quantenpunkten
 - Wahrscheinliche Ursache für Traps: Versetzungen





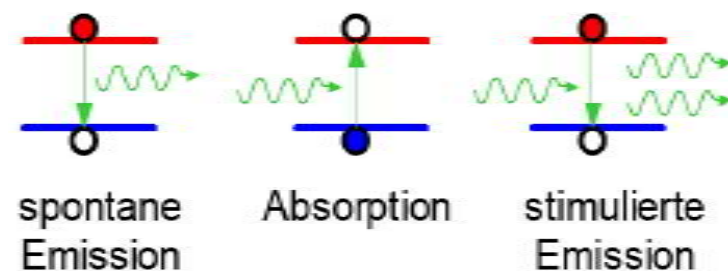
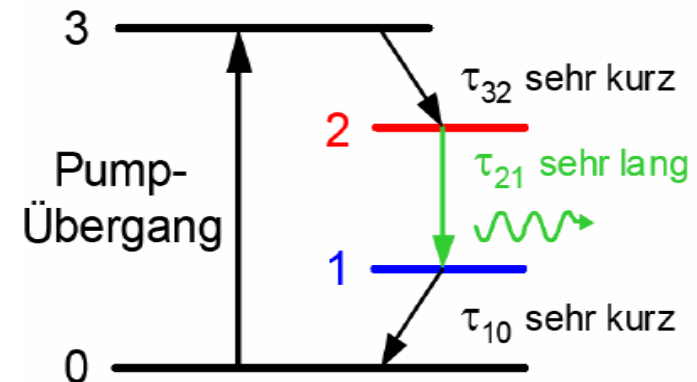
1. Einführung
2. Halbleiter
3. Fermigas in niederen Dimensionen
4. Halbleiterheterostrukturen
5. Heteroepitaxie
6. Anwendungen
 - **Quantenpunktlaser**
 - **Spintronik**
 - **Solarzellen**

6. Anwendungen – Quantenpunktlaser



Grundprinzip des Lasers

- System mit mehreren Niveaus
- Durch Zuführen von Energie gelangen Ladungsträger auf ein höheres Niveau (Pumpvorgang).
- Besetzungsinversion: Niveau 2 ist stärker besetzt als Niveau 1.
- Durch Benutzung eines optischen Resonators kommt es zur stimulierten Emission.
- Das Medium, in dem stimulierte Emission stattfindet, nennt man aktives Medium.

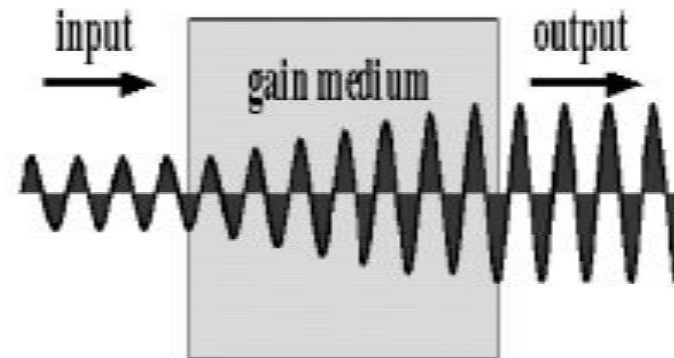
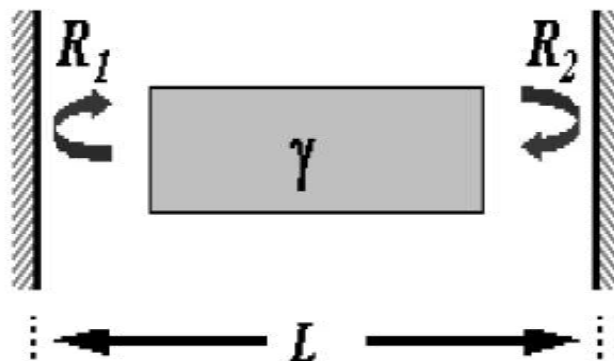


6. Anwendungen – Quantenpunktlaser



Optischer Resonator

- Das aktive Medium wird von zwei Spiegeln eingeschlossen.
- Emittierte Strahlung wird durch Spiegel reflektiert → stehende Wellen (Moden).
- Ein Spiegel ist halbdurchlässig → Laserstrahl kann austreten.
- Zwei Prozesse im aktiven Medium:
 1. Strahlung wird absorbiert/abgeschwächt
 2. Strahlung wird durch stimulierte Emission verstärkt.
- Überwiegt Verstärkung gegenüber Verlusten → Nettoverstärkung (Gain)
- Minimale Energiezufuhr nötig, um Laserbetrieb zu ermöglichen: Schwellwertbedingung (Schwellstrom)

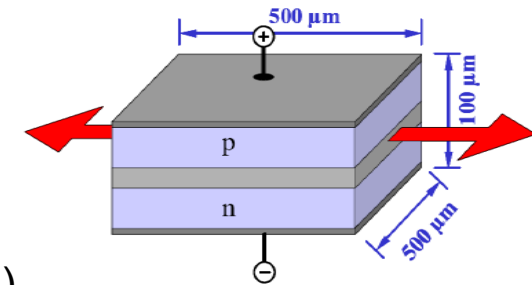
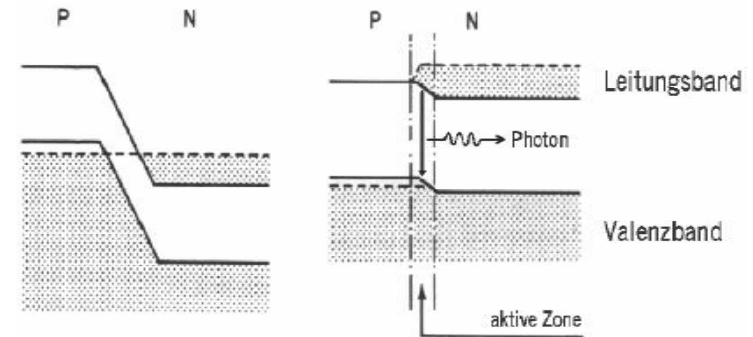


6. Anwendungen – Quantenpunktlaser



Halbleiterlaser [Hall et al., *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366 (1962)]

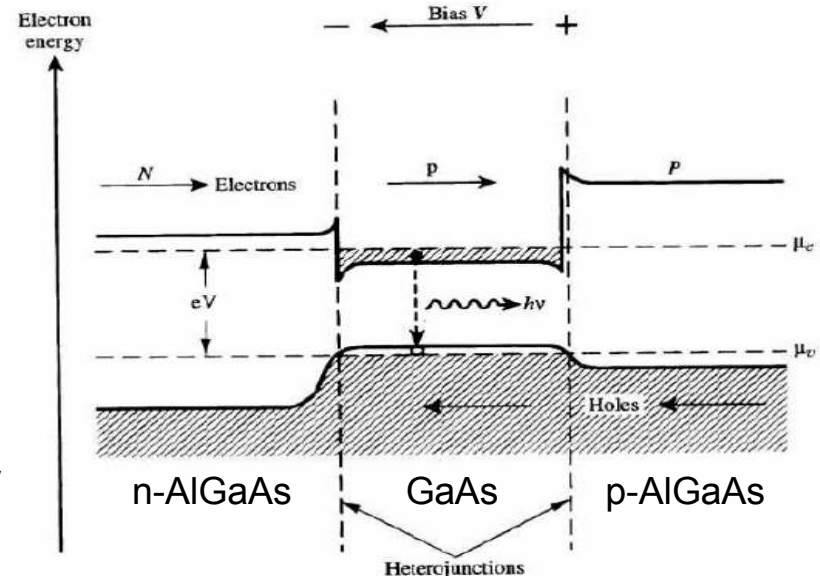
- pn-Übergang eines direkten Halbleiter (GaAs)
- In Durchlassrichtung gepolt.
- Strahlende Rekombination am Übergang.
- Resonator: geschliffene Kanten des Kristalls
- Nachteile:
 - Optisch aktiver Bereich sehr klein.
 - Wenig Elektronen tragen zur stimulierten Emission bei.
 - Hohe Verluste durch Dotierungen (Absorption an Störstellen).
 - Betrieb nur bei tiefen Temperaturen.



Halbleiterlaser mit Heterostrukturen

[Alferov et al., *Sov. Phys. Semicond.* **2**, 1289 (1969)]

- Löst Probleme des HL Lasers durch pin-Doppelheterostruktur pin Struktur
- Höhere Ladungsträgerkonzentration in aktiver Zone → stimulierte Emission wahrscheinlicher
- Laserbetrieb bei Raumtemperatur möglich.



6. Anwendungen – Quantenpunktlaser



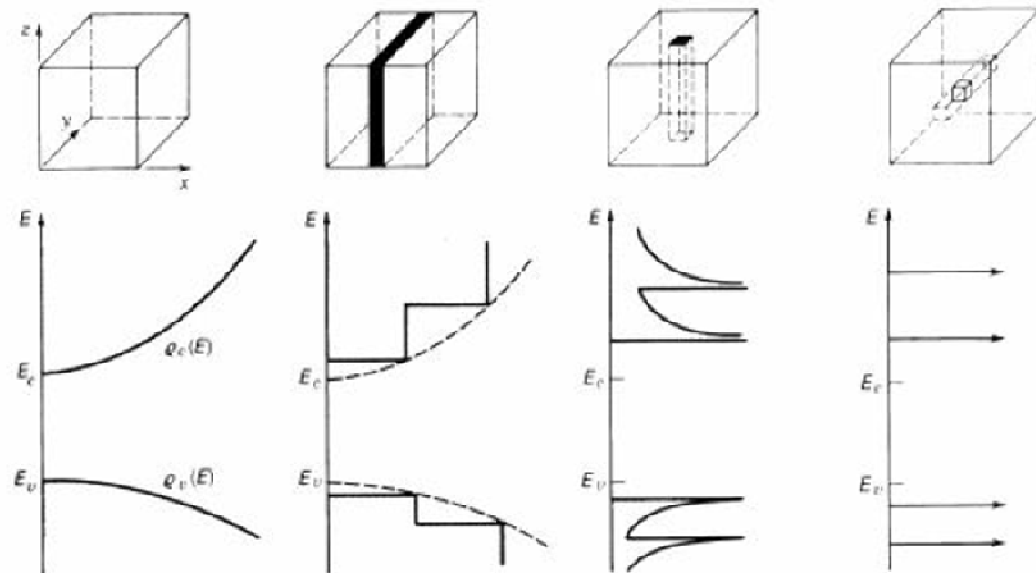
- Nachteile des Heterostrukturlasers:

- Emittierte Frequenz entspricht der Bandlücke des Halbleitermaterials. Diese kann nur durch Variation des Materials geändert werden.
- Immer noch hohe Absorption durch große Ausdehnung der aktiven Zone.
- Geringe Lokalisierung der Ladungsträger → geringe Emission.
- Hohe Temperaturabhängigkeit

Lösung: Quantenpunktlaser: Reduktion der Dimensionen der aktiven Zone

[Kirstaedter et al., *Electron. Lett.* **30**, 1416 (1994)]

- Weniger Absorption
- Durch Variation der Größe der Quantenpunkte kann die Emissionsfrequenz leicht getunt werden.
- Sehr hohe Lokalisierung der Ladungsträger
- Höhere Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission
- Geringere Temperaturabhängigkeit



6. Anwendungen – Spintronik



- Wachsendes Interesse an der Realisierung von solid-state *quantum* computing.
- Qubit b kann durch Elektronenspin ausgedrückt werden:

Kohärente quantenmechanische Superposition von Spinzuständen:

$$'1' \rightarrow |\uparrow\rangle \quad \text{and} \quad '0' \rightarrow |\downarrow\rangle \quad \Rightarrow \quad |b\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle$$

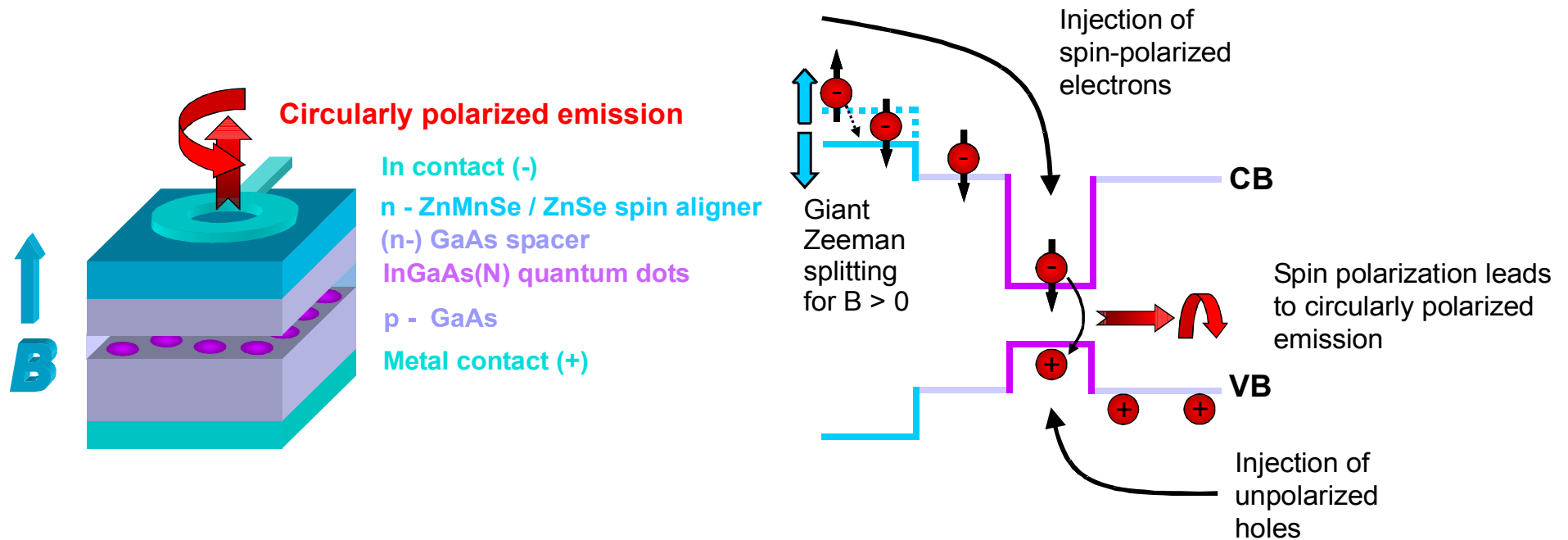
- Elektronenspins sind robust:
 - Lange Spinkohärenzzeiten (~ 100 ps für Exzitonen in InAs-Quantenpunkten)
 - Spin-erhaltender Transport über μm -Bereich möglich in GaAs

Probleme, die gelöst werden müssen:

- Erzeugung von spin-polarisierten Elektronen
 - Halbmagnetischer Spinaligner (z.B. $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$)
- Speicherung
 - Quantenpunkte
- Manipulation
- Auslesen (z.B. optisch)

6. Anwendungen – Spintronik

Spin-LED [Arbeitsgruppen Hetterich und Kalt]

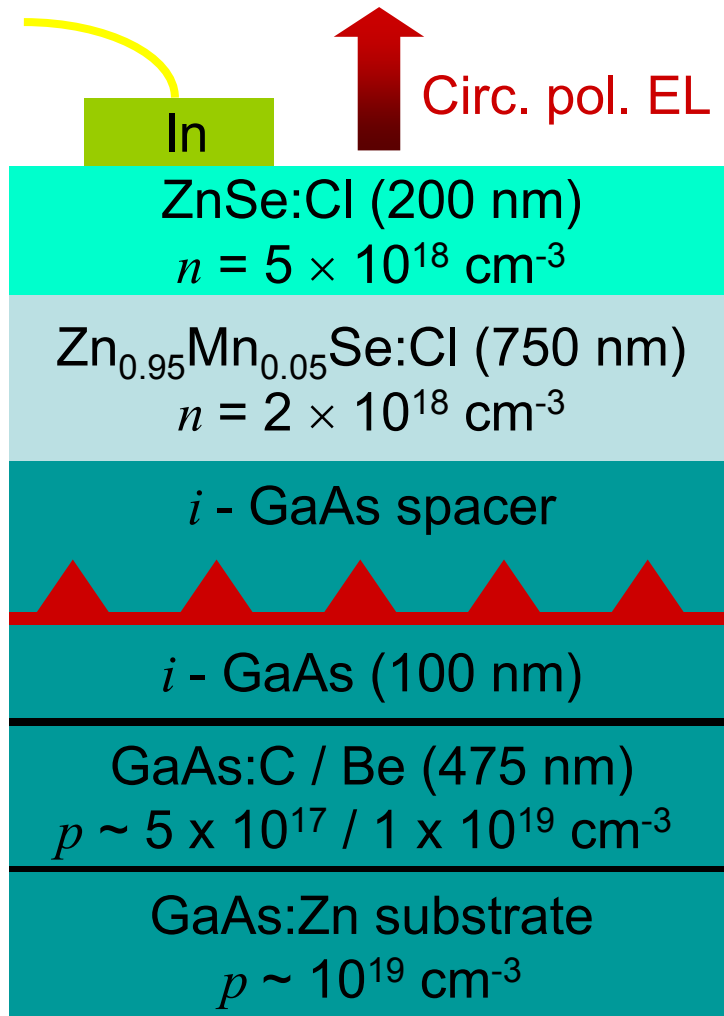


- Strom durch halbmagnetischen ZnMnSe Spinaligner in angelegtem Magnetfeld.
- Injektion und Speicherung von Spin-polarisierten Elektronen in InGaAs(N)/GaAs Quantenpunkten.
- Emission zirkular-polarisierten Lichtes aus Quantenpunkten zeigt Elektronenspin-Ausrichtung.

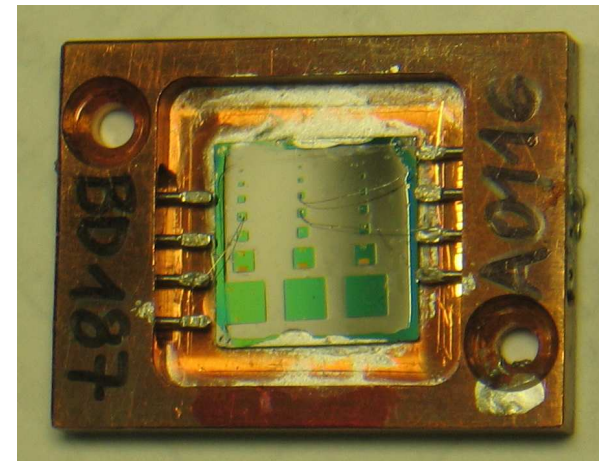
6. Anwendungen – Spintronik



InGaAs Quantenpunkt Spin-LED: Struktur



Fertig prozessierte Spin-LED

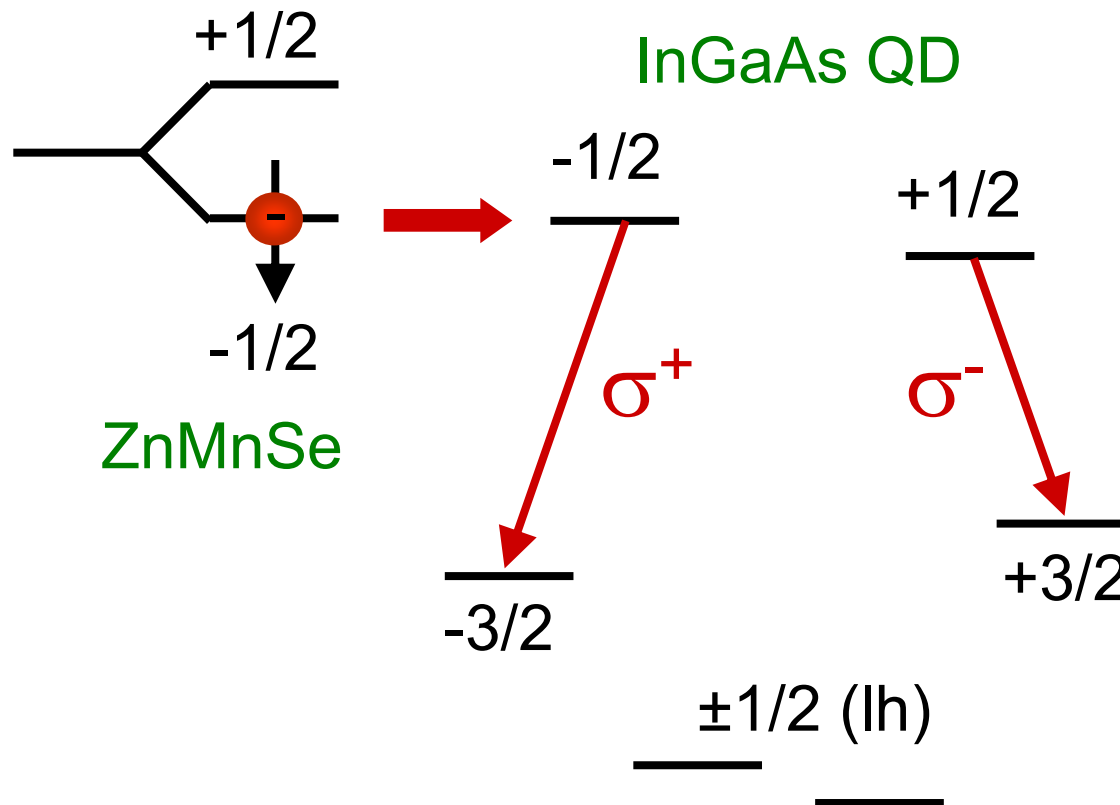


Typical mesa size: 300-500 μm

6. Anwendungen – Spintronik



Zeeman-Level in InGaAs Quantenpunkt Spin-LEDs



- Niedrigster Elektron-/Exzitonübergang σ -polarisiert.
- Injektion in *oberen* Elektron-Zeeman Level (σ^+ emission)
- Starkes hh-lh Splitting wegen Verspannungen und Quantisierung
 \Rightarrow Nur $\pm 3/2$ hh Übergänge

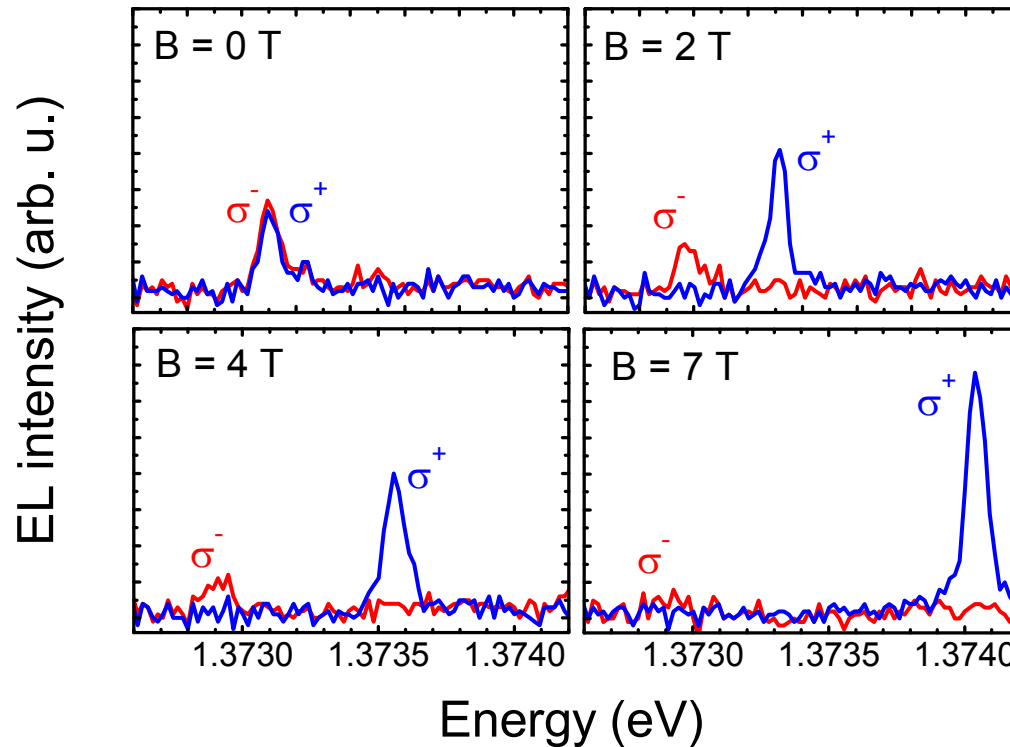
\Rightarrow CPD = $\frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}}$ Direktes Maß für Elektronenspinpolarisation in Quantenpunkten

6. Anwendungen – Spintronik



- Injektion in einzelne Quantenpunkte

Elektrolumineszenz (4 mA, 2.1 V) at T = 5 K

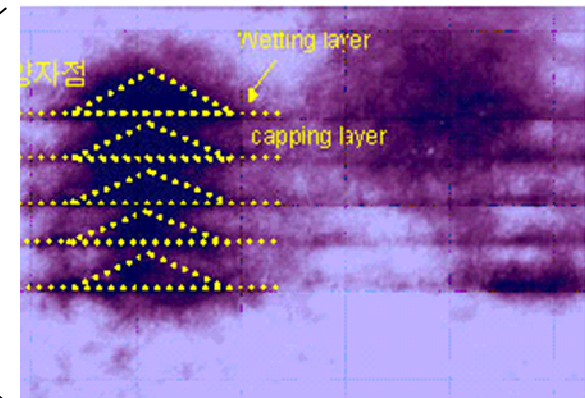
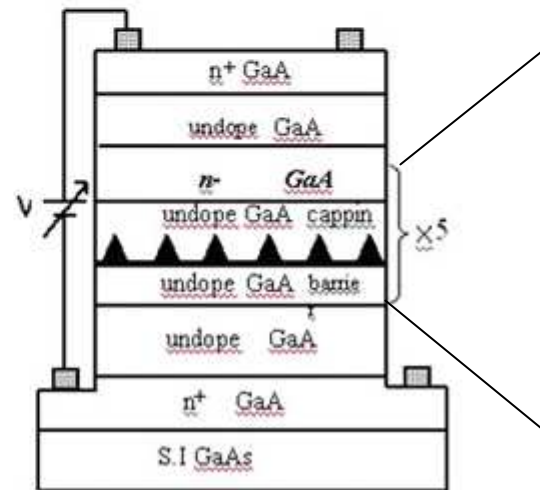
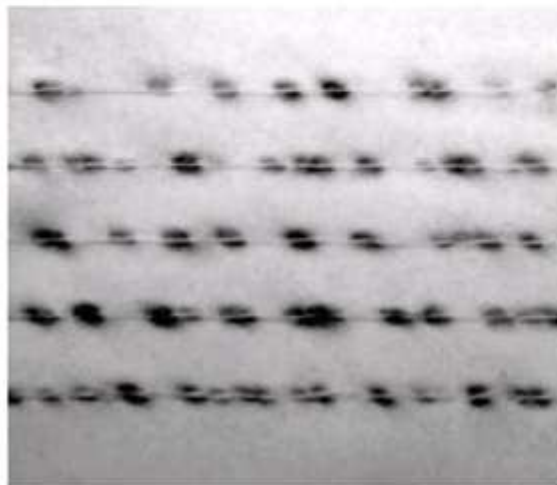
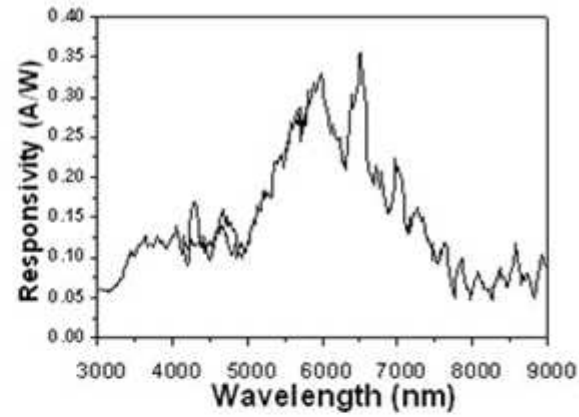
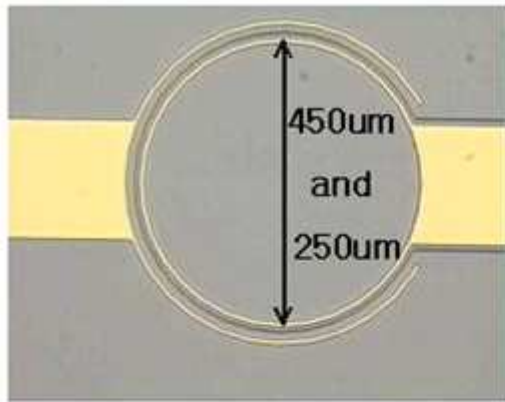


Erhöhung des Magnetfeldes:

- Vergrößerung des Zeeman-Splittings
- Erhöhung von CPD
- CPD ~ 100% bei 7 T

- Injektion eines einzelnen Spins in einen einzelnen Quantenpunkt
- Einzelner Spin kann angesprochen werden

6. Anwendungen – Infrarotdetektoren

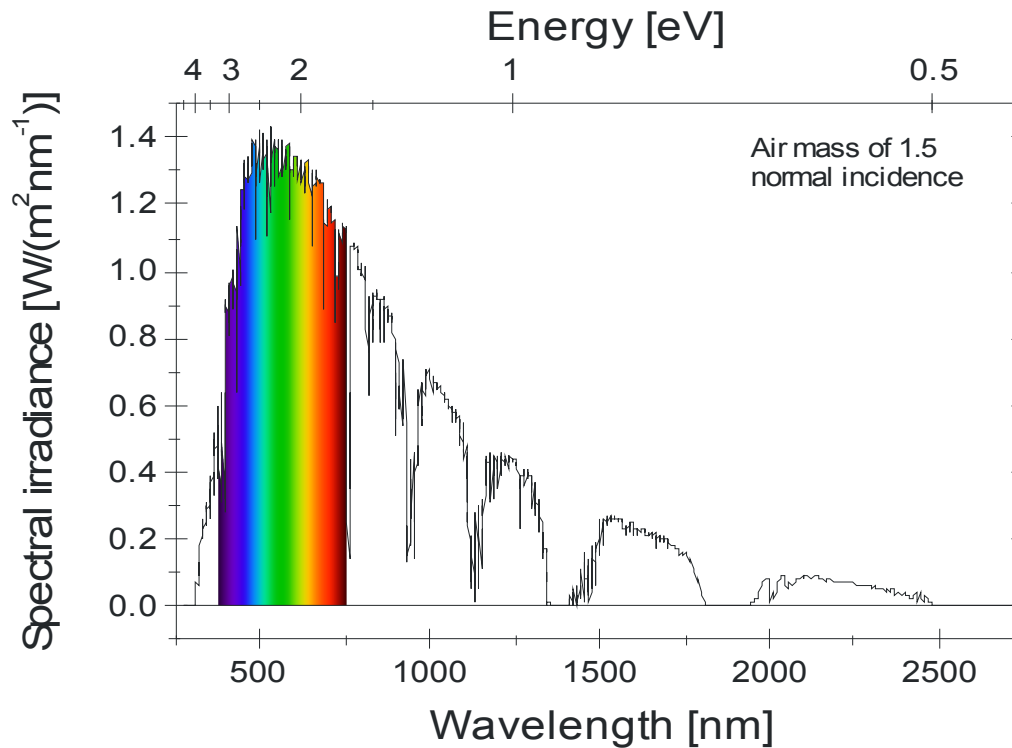


[Songcheol Hong's group at KAIST, Korea]

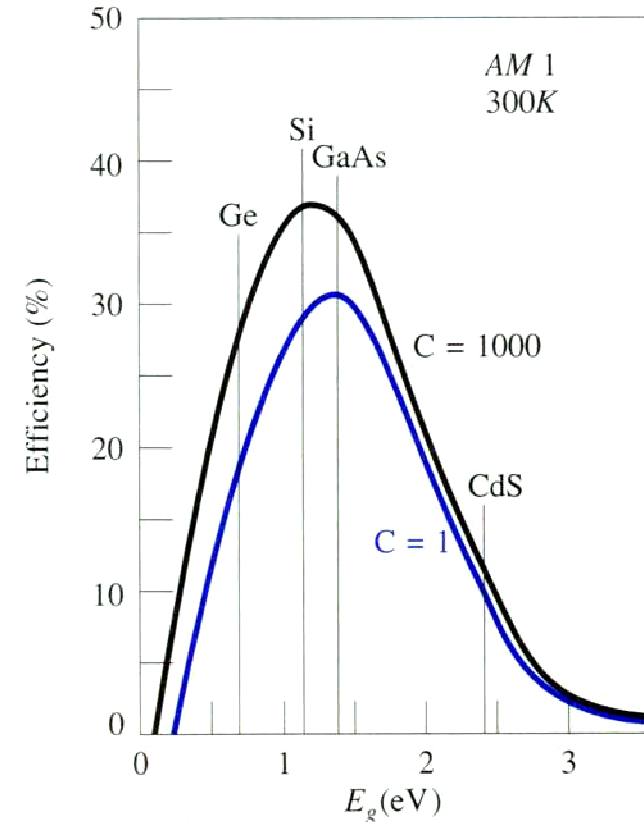
6. Anwendungen – Solarzellen



Spektrum der Sonne nach Durchgang durch Atmosphäre



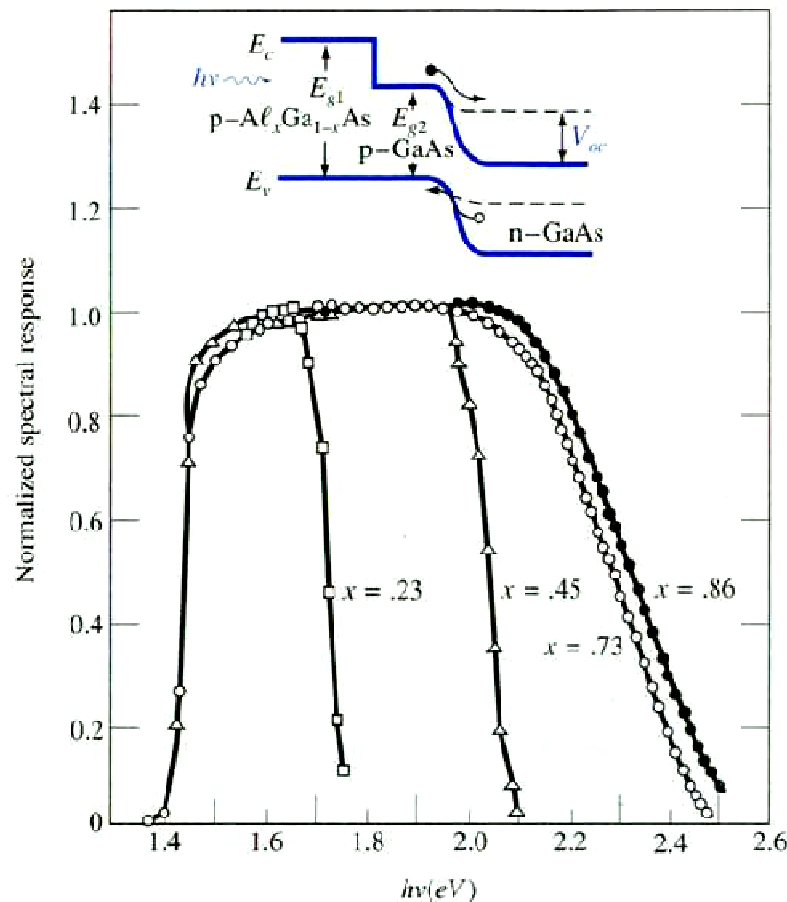
Theoretische maximale Effizienz einfacher pn-Solarzellen



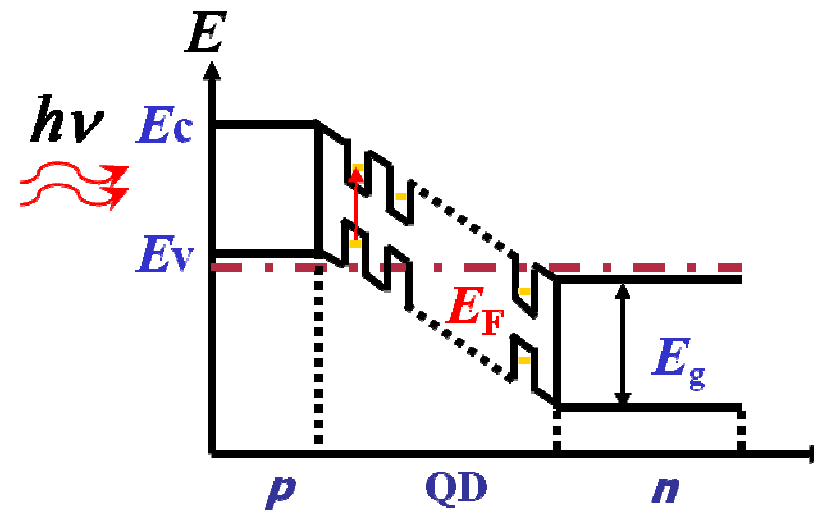
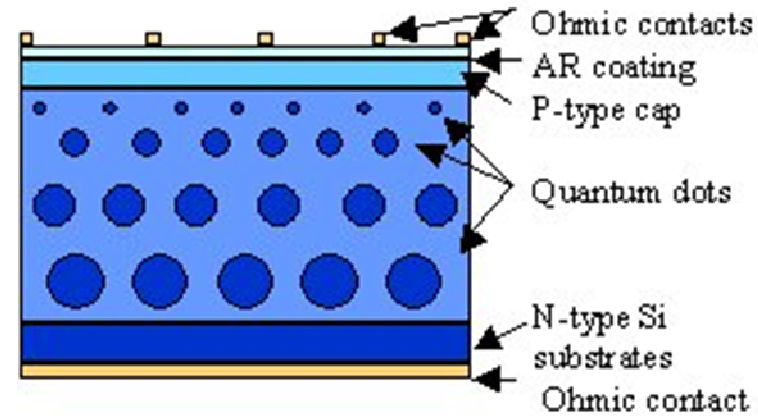
6. Anwendungen – Solarzellen



Heterojunction Solarzelle



Quantenpunktsolarzelle



Banddiagramm einer pin Quantenpunktsolarzelle

Ende!

Den Vorlesungsskript gibt es auf:

<http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~bc128/index.php?goto=lehre&lan=de>

Benutzername: GNT1

Passwort: Halbleiternanostrukturen