

Übersicht

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

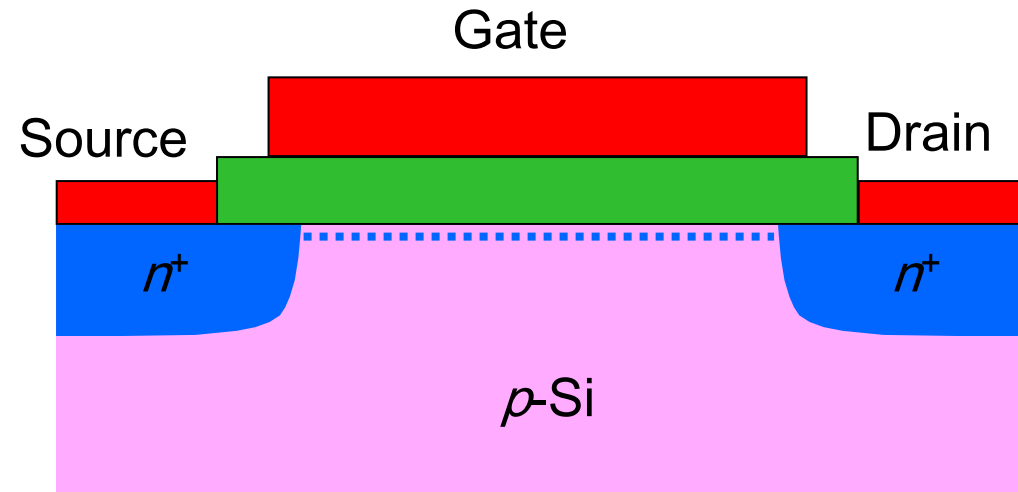
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Metal-Oxide-Silicon (MOS)

Räumliche Trennung der bindenden Ladung (pos.) vom Elektronenfilm verbessert Beweglichkeit



$$\frac{Q}{A} = eN_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}} (V_g - V_t) = \epsilon_0 \epsilon_{ox} F_{ox}$$

$$F_{ox} \leq 10^9 \frac{V}{m}$$

$$N_s \leq 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$$

Schwellenspannung V_t

$$\Delta\phi; N_{depl} = N_A w_{depl}; N_{ox}; N_{it}$$

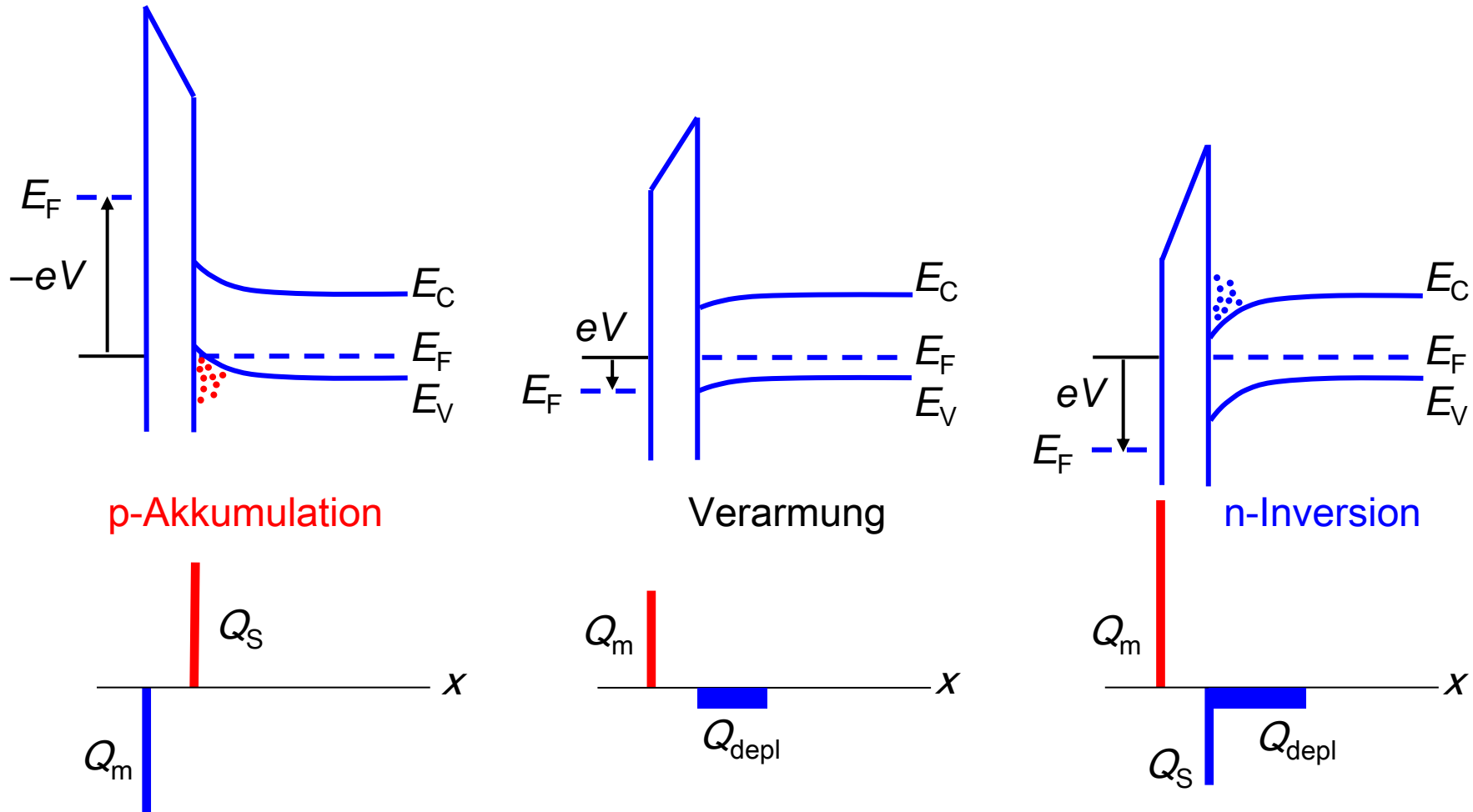
S.M. Sze: "Physics of Semiconductor Devices". Wiley, New York 1981

S.M. Sze: "Semiconductor Devices: Physics and Technology". Wiley, New York 2001

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Metal-Oxide-Silicon (MOS): Funktionsweise der MOS-Struktur:



3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Metal-Oxide-Silicon (MOS)

Beweglichkeit bei tiefen Temperaturen ist abhängig von N_S :

Potentialfluktuationen, Lokalisierung:

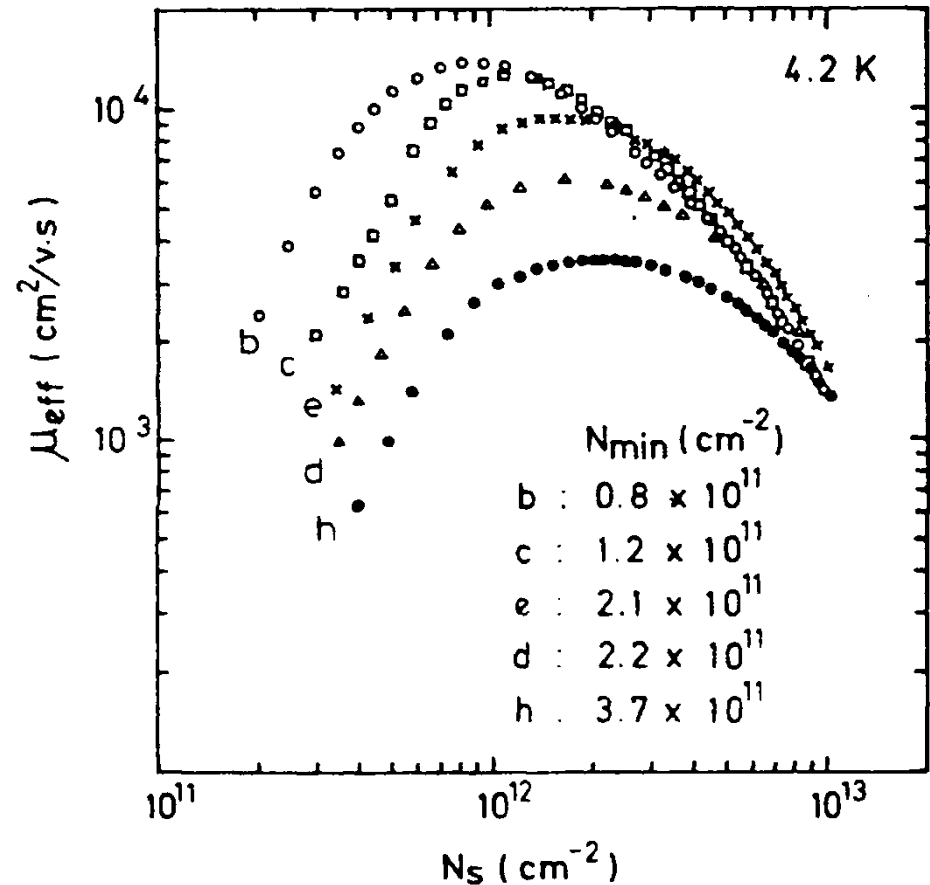
$$N_S < 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

Coulomb-Zentren durch $N_{ox}; N_{it}$

$$N_S \approx 10^{11} \dots 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

Si/SiO₂-Grenzflächenrauigkeit, diffuse Streuung:

$$N_S > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$



A. Yagi, M. Nakai, Surf. Sci. **98**, 174-180 (1980)
 T. Ando, A.B. Fowler, F. Stern, Review of Modern Physics **54**, 437 (1982)

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Metal-Oxide-Silicon (MOS)

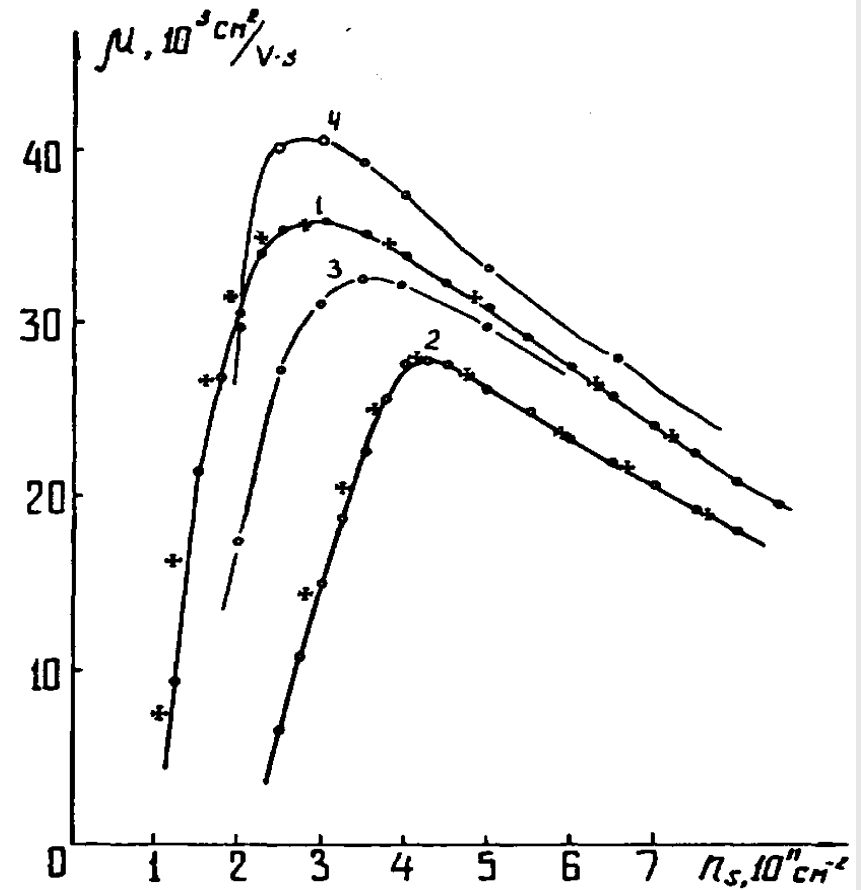
Beweglichkeit ist abhängig von N_S :

Potentialflukt., Lokalisierung: $N_S < 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

Coulomb-Zentren: $N_S \approx 10^{10} \dots 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Si/SiO₂-Grenzfl., diffuse Streuung: $N_S > 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Bestwert bei $T = 1 \text{ K}$: $\mu \approx 40.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$



I. V. Kukushkin, V. B. Timofeev, Springer Series in Solid-State Physics 71, Springer, Berlin 1987, pp. 136-145

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Dotierung

Dünne Dotierschicht: δ -Dotierung

$$\frac{Q}{A} = e \frac{N_D}{A} = eN_S$$

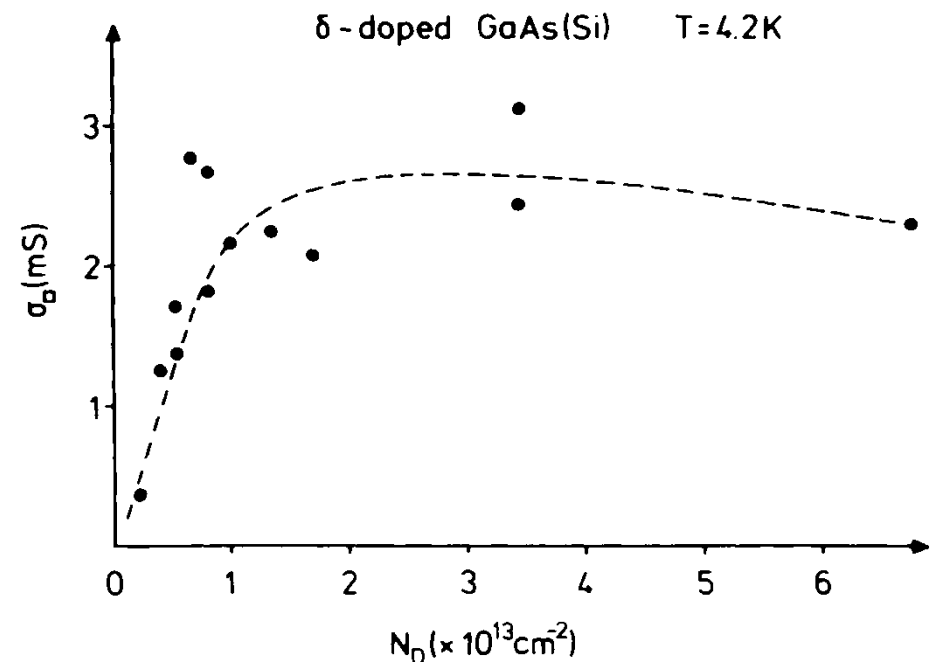
real: Schichtdicke 1–2 nm

$$N_S < 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

Nachteil: Starke Coulomb-Streuung,

$$\sigma = eN_S\mu$$

$$\mu \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$



A. Zrenner, F. Koch, K. Ploog, Surface Science **196**, 671 (1988)

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Heteroschichten

Ersatz des amorphen Isolators durch kristallinen HL mit großer E_g

Gleiche Gitterkonstante (epitaktisch)

Potentialsprung im betreffenden Band

Bandverlauf durch Komposition und Dotierung



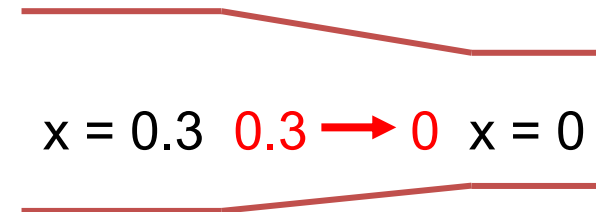
abrupt:



$x = 0.3$

$x = 0$

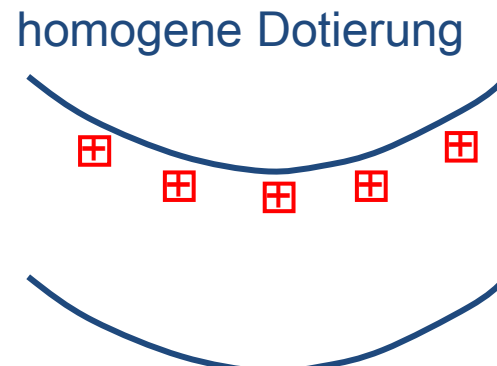
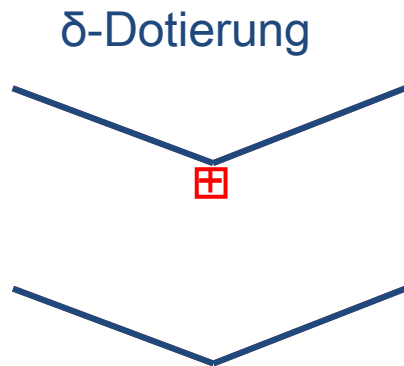
graduell:



$x = 0.3$

$0.3 \rightarrow 0$

$x = 0$



J.H. Davies, The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge University, Cambridge 1998

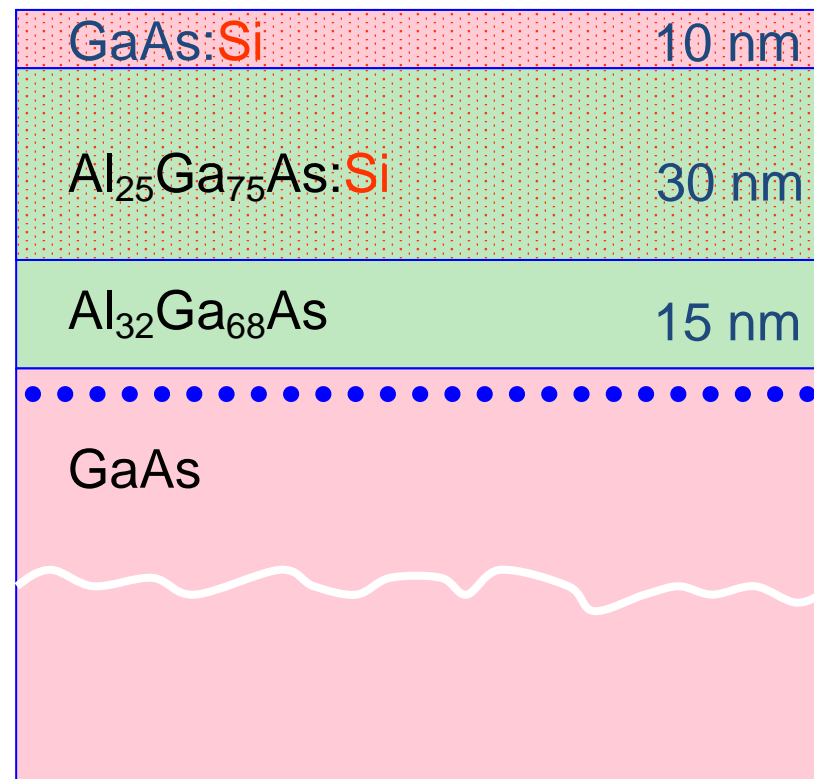
3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Heteroschichten

Schichtaufbau definiert
Grenzflächenbarrieren

Ladungsträger im
Quantenfilm durch
Modulationsdotierung
räumlich getrennt von
den Donatorrümpfen



3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Heteroschichten

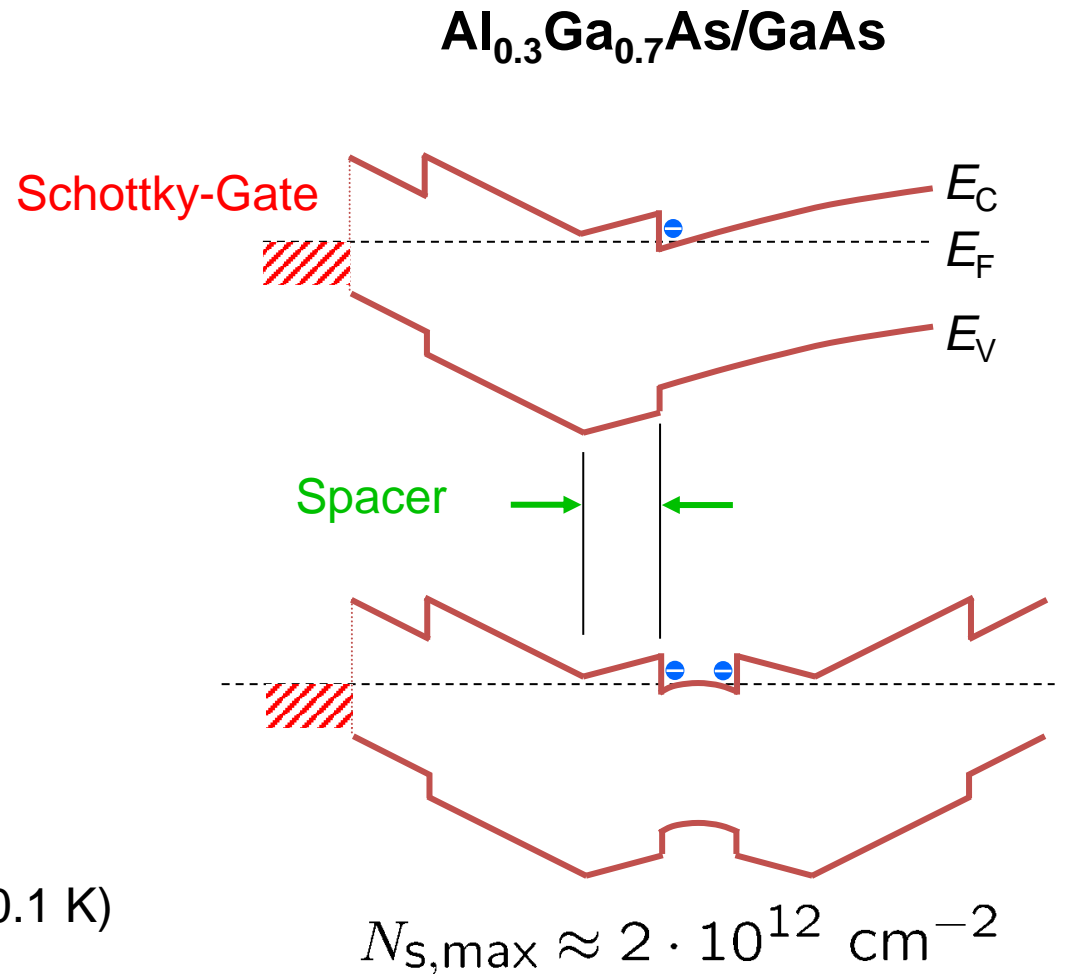
Feldeffektstruktur durch Modulationsdotierung

Grenze der Dotierung durch Parallelleitung

$$N_{s,max} \approx 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$



$$\mu_{max} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad (T < 0.1 \text{ K})$$



Eisenstein *et al.* Phys. Rev. Lett. **88**, 076801 (2002)

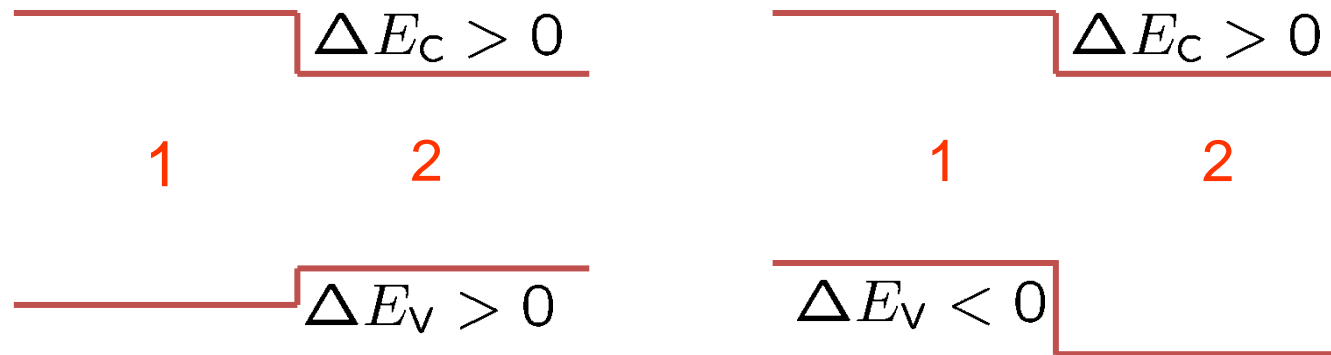
3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bandoffset

Materialparameter: $E_g; E_C; E_V$ $\Delta E_g = \Delta E_C + \Delta E_V$

Vorzeichen beachten: $\Delta E_C = E_C^{(1)} - E_C^{(2)}$ $\Delta E_V = E_V^{(2)} - E_V^{(1)}$



Weitere Eigenschaften:

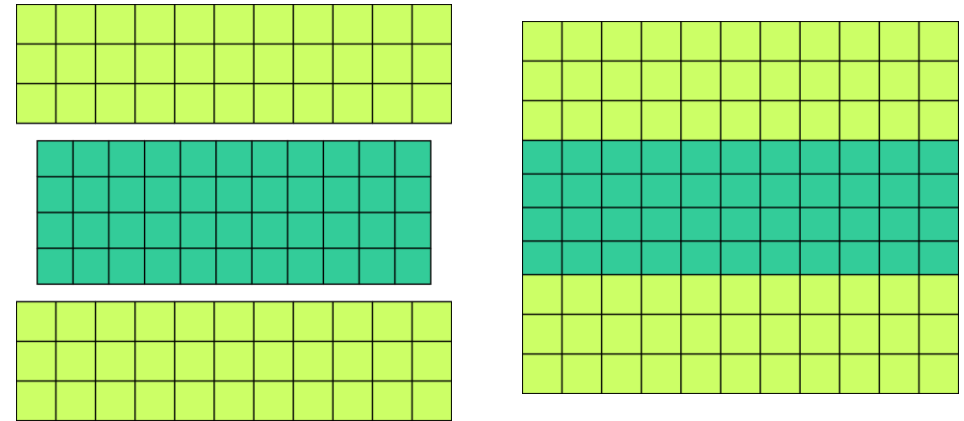
$E(\mathbf{k}); m^*; \epsilon_S; \chi_S; N_A - N_D; a$ (Gitterkonstante)

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

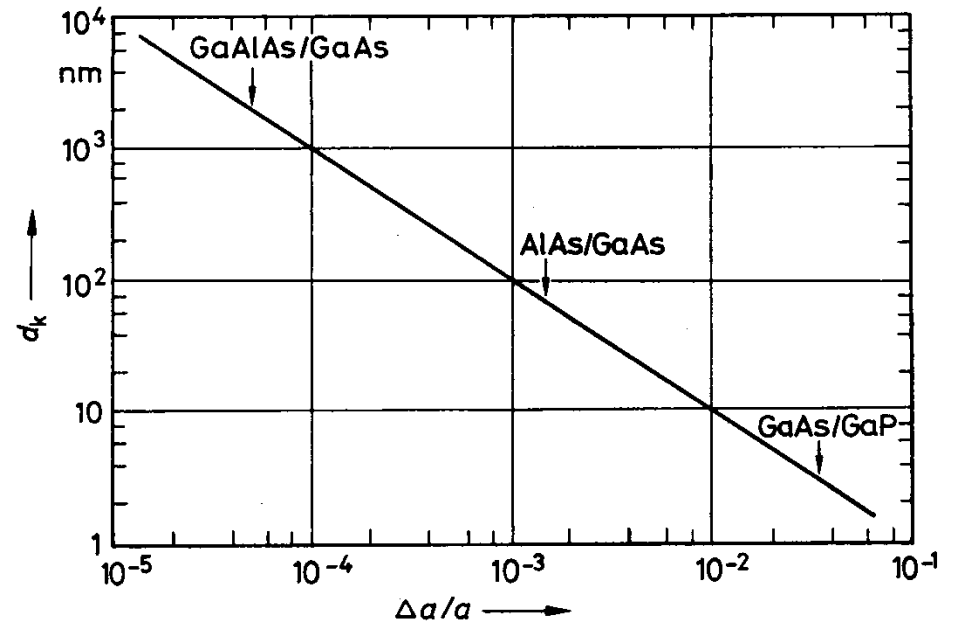
Gitteranpassung

... ist wichtig für Schichten hoher Qualität. Gitterfehlanpassung führt zu **verspannten Schichten**. Dickere Schichten relaxieren und bauen Versetzungen ein.



Elastisch verspannte Schichten geringer Fehlanpassung bilden **pseudomorphe Systeme**.

Kritische Schichtdicke als Funktion der Fehlanpassung $\Delta a/a$:



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

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

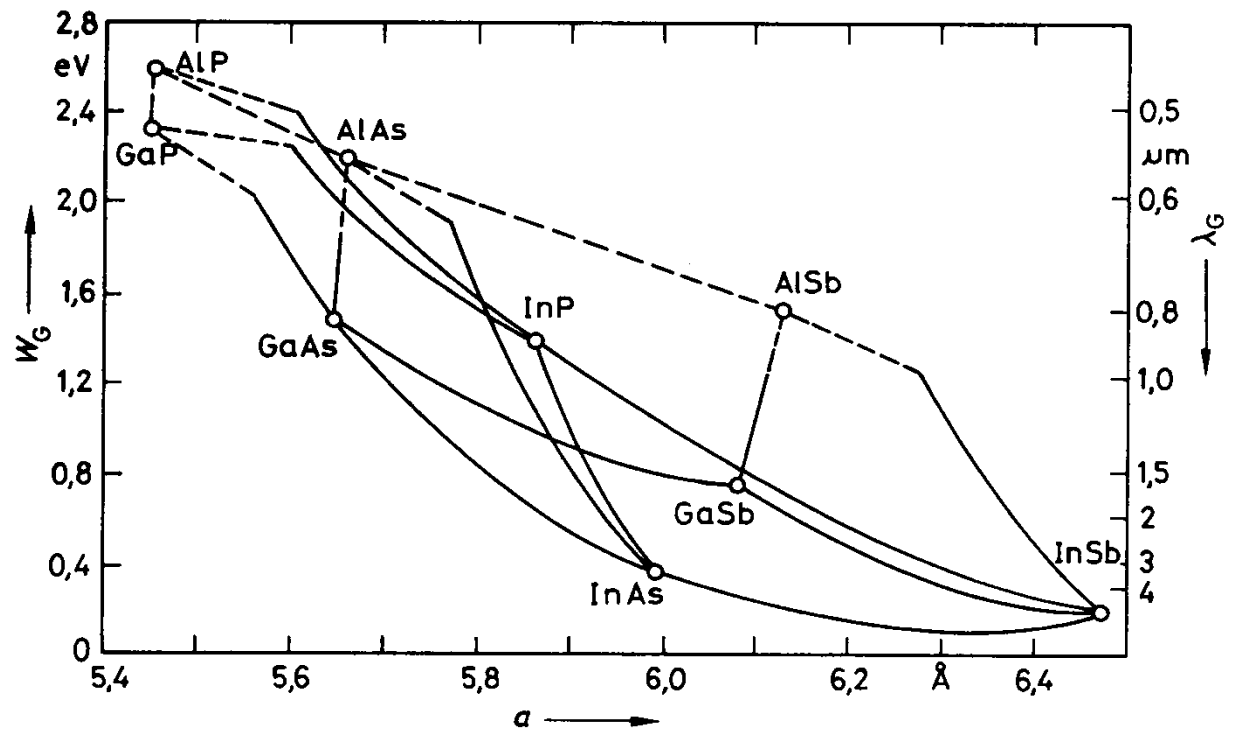
3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Gitteranpassung

Bei Gitterfehlpassung $\Delta a/a > 1\%$ ist die kritische Dicke zu gering oder es bilden sich **Cluster** statt homogener Filme (Ge/Si, InAs/GaAs).

Die Epitaxie gelingt durch einfügen eines Gradientenpuffers (virtual or graded buffer): metamorphe Systeme.

"III-V-Landkarte":



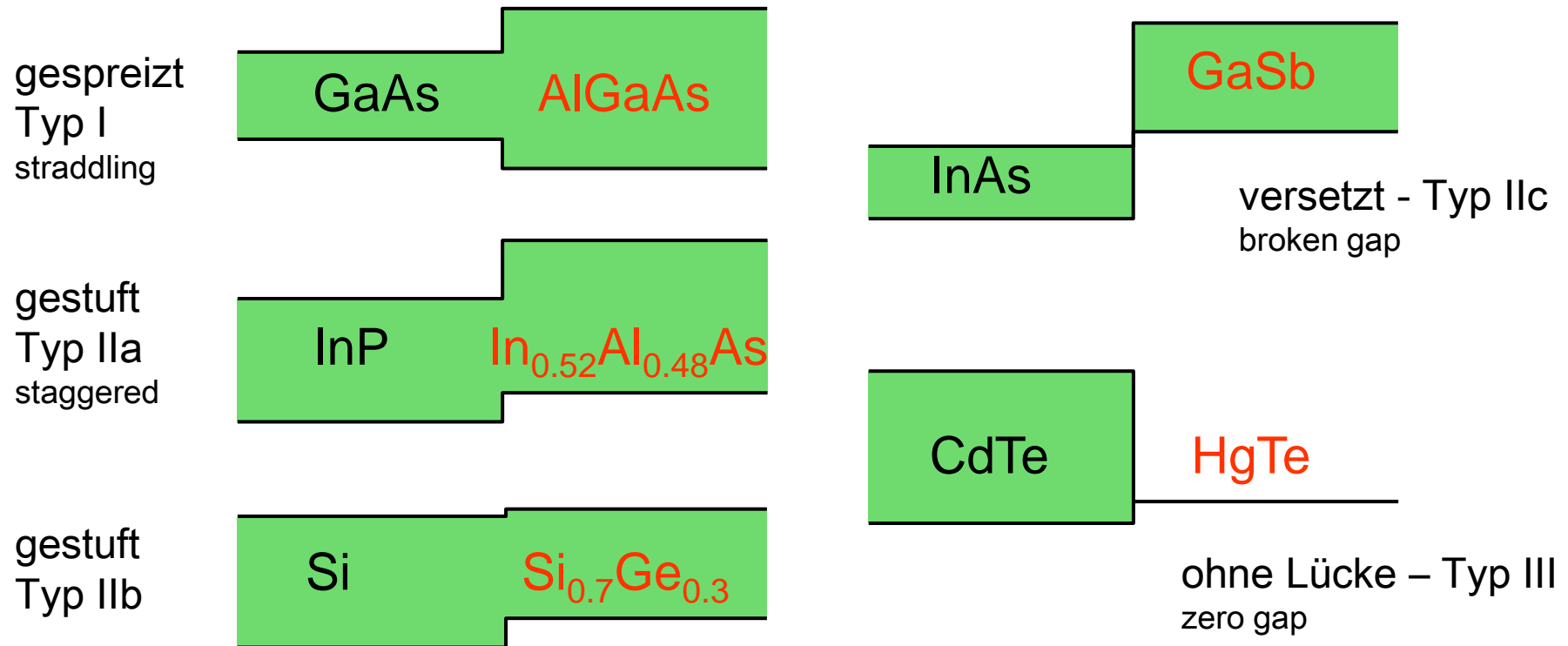
J.H. Davies, The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge University, Cambridge 1998

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Klassifizierung

... der Heterokontakte nach der relativen Lage der Bandlücke (Substrat/Schicht):



L. Esaki; IEEE J. Quantum Electronic **22**, 1611 (1986); E.T. Yu, J.O. McCaldin, T.C. McGill, In "Solid State Physics", Vol. 46, Academic, New York 1992, pp. 1-146

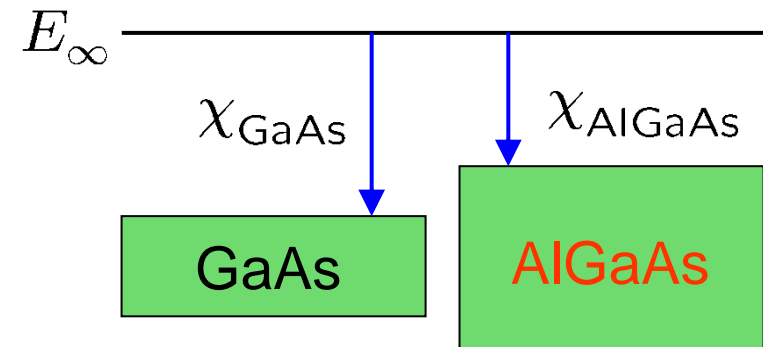
3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Bandoffsets aus dem Anderson-Modell:

$$E_{\infty} - E_C = \chi_s \quad \rightarrow \quad \Delta E_C = \Delta \chi_s$$



Korrektur: Grenzflächen-Dipol (Differenz der Elektronegativitäten)

Randbedingungen für Verschiebungsdichte:

allgemein: $\epsilon_1 F_1 = \epsilon_2 F_2 \quad \rightarrow \quad \epsilon_1 \frac{\partial E_C^{(1)}}{\partial z} = \epsilon_2 \frac{\partial E_C^{(2)}}{\partial z}$

δ -Dotierung: $D_1 - D_2 = \pm e N_{\delta} \quad \left(\begin{array}{l} \text{Donator} \\ \text{Akzeptor} \end{array} \right)$

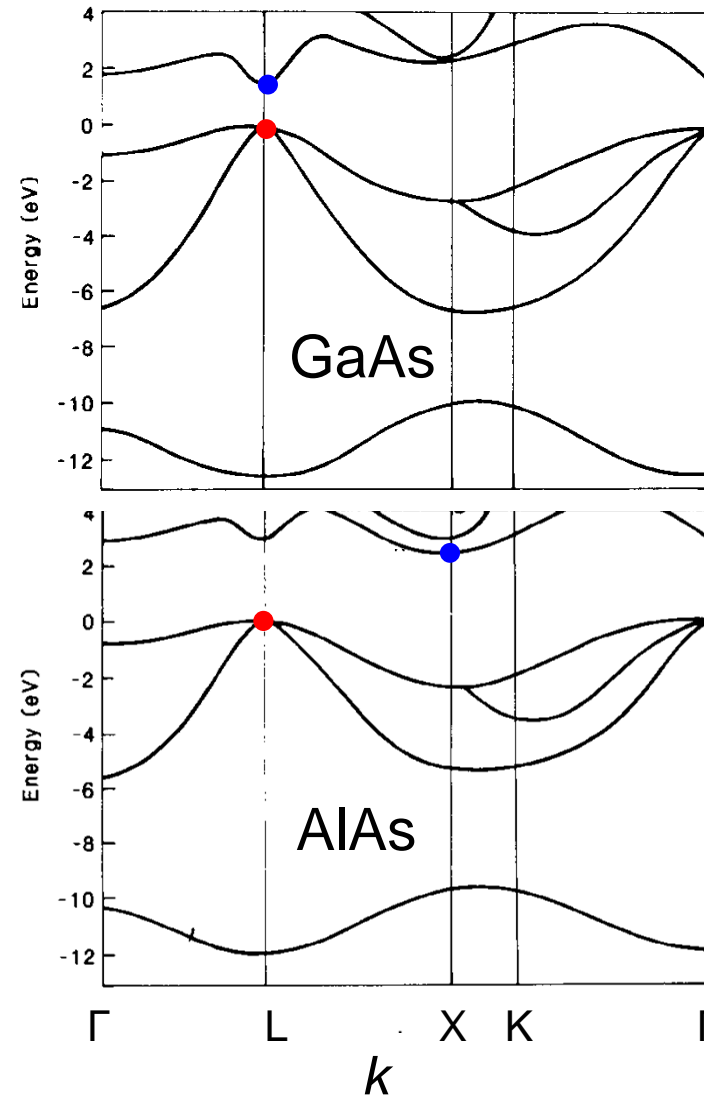
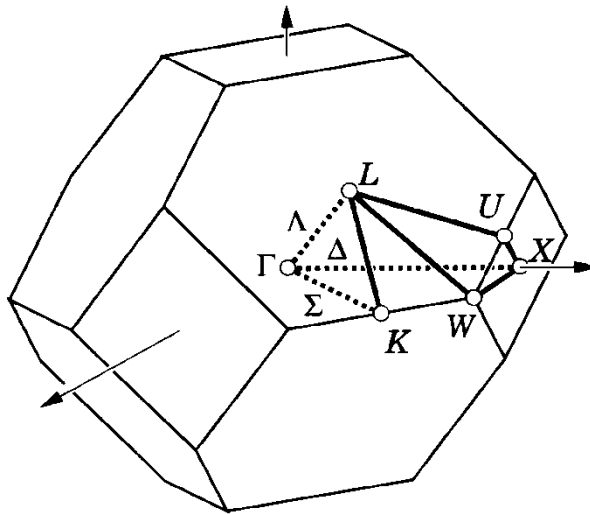
J.H. Davies, The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge University, Cambridge 1998

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Übergang von direkter zu indirekter Bandstruktur:
GaAs und AlAs



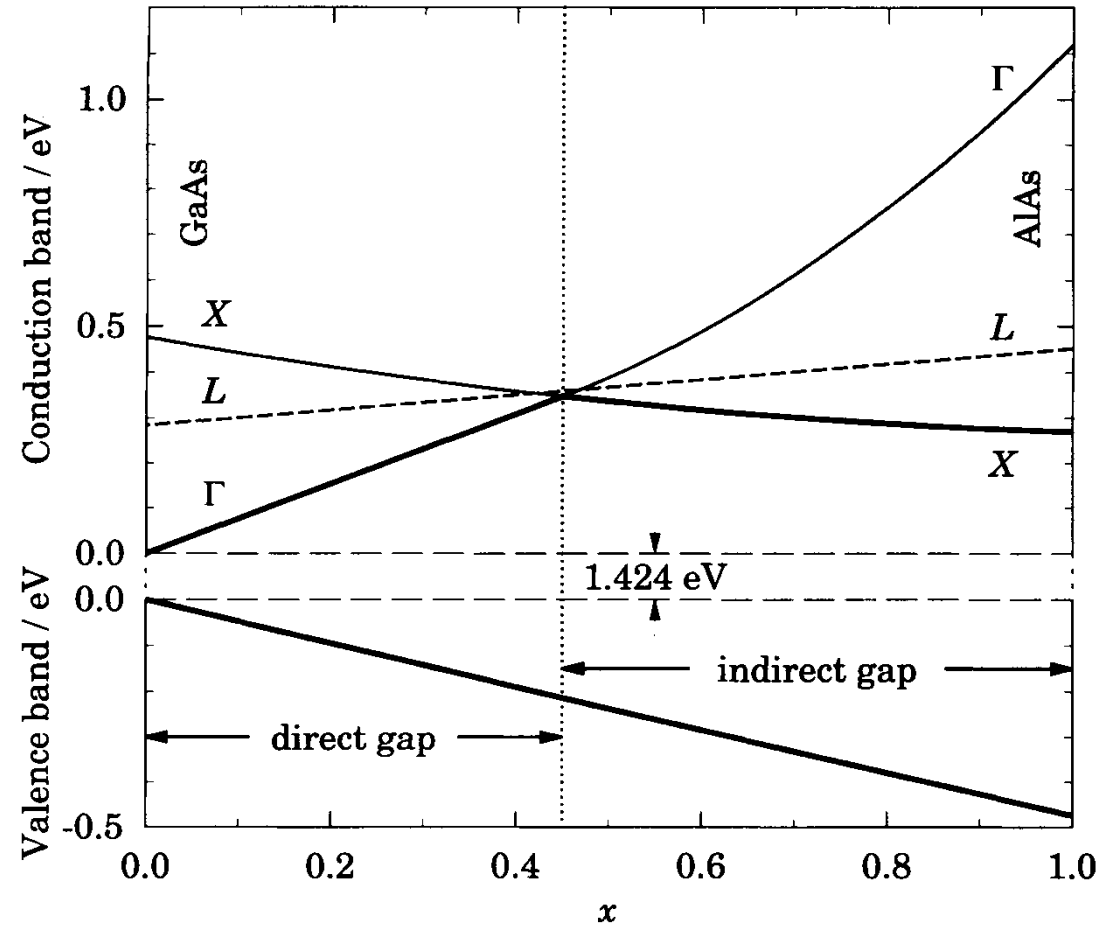
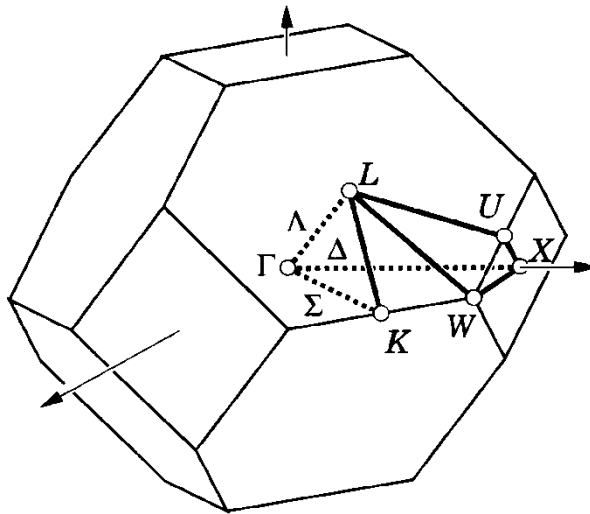
J.H. Davies, The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge University, Cambridge 1998

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Übergang von direkter zu indirekter Bandstruktur:
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ bei $x \approx 0.4$

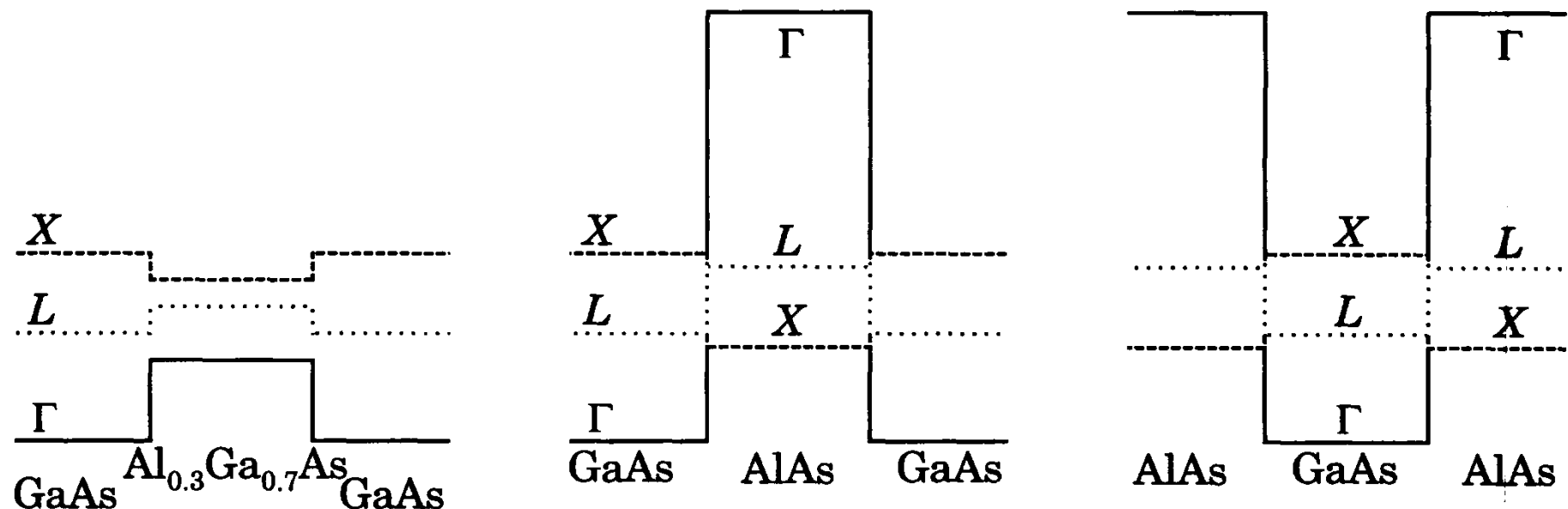


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Typ der Heterostruktur hängt bei $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ von der (in)direkten Leitungsbandkante ab:

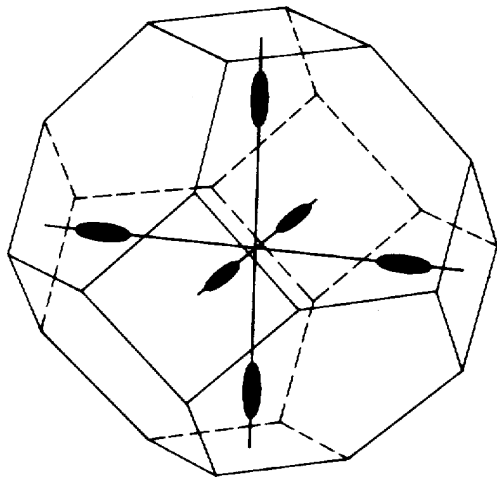


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

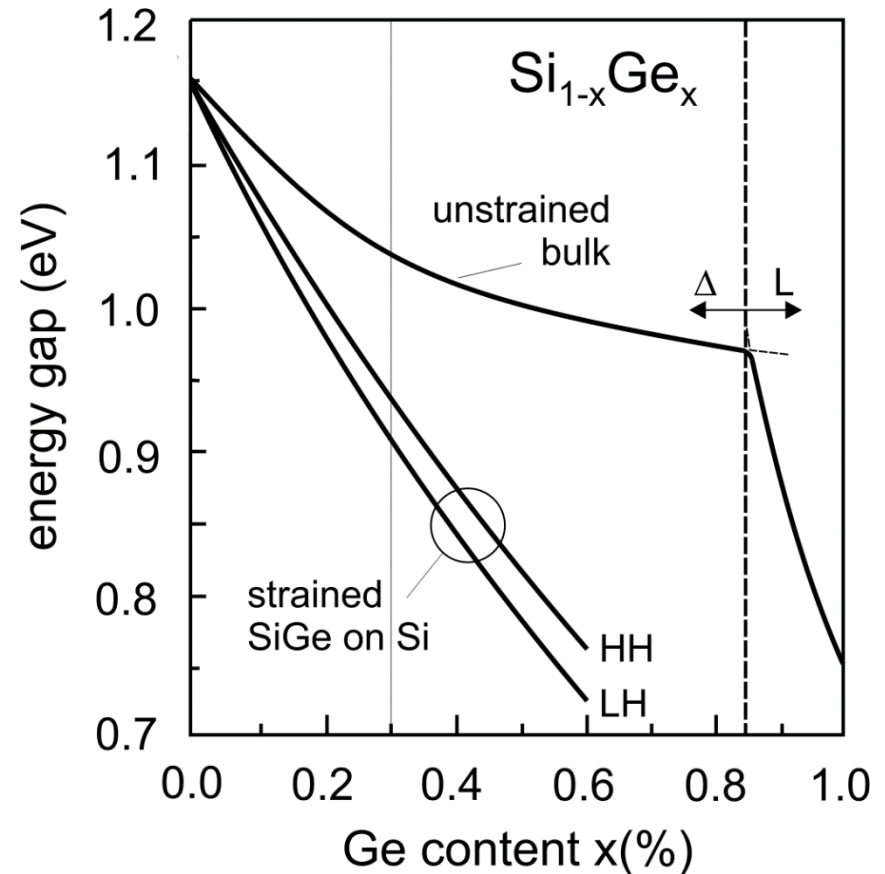
3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Einfluss der Zusammensetzung auf die Bandlücke in Si/SiGe



Volumenbandstruktur für $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, $x < 0.85$



F. Schäffler, Semicond. Sci. Technol. 12, 1515 (1997)

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

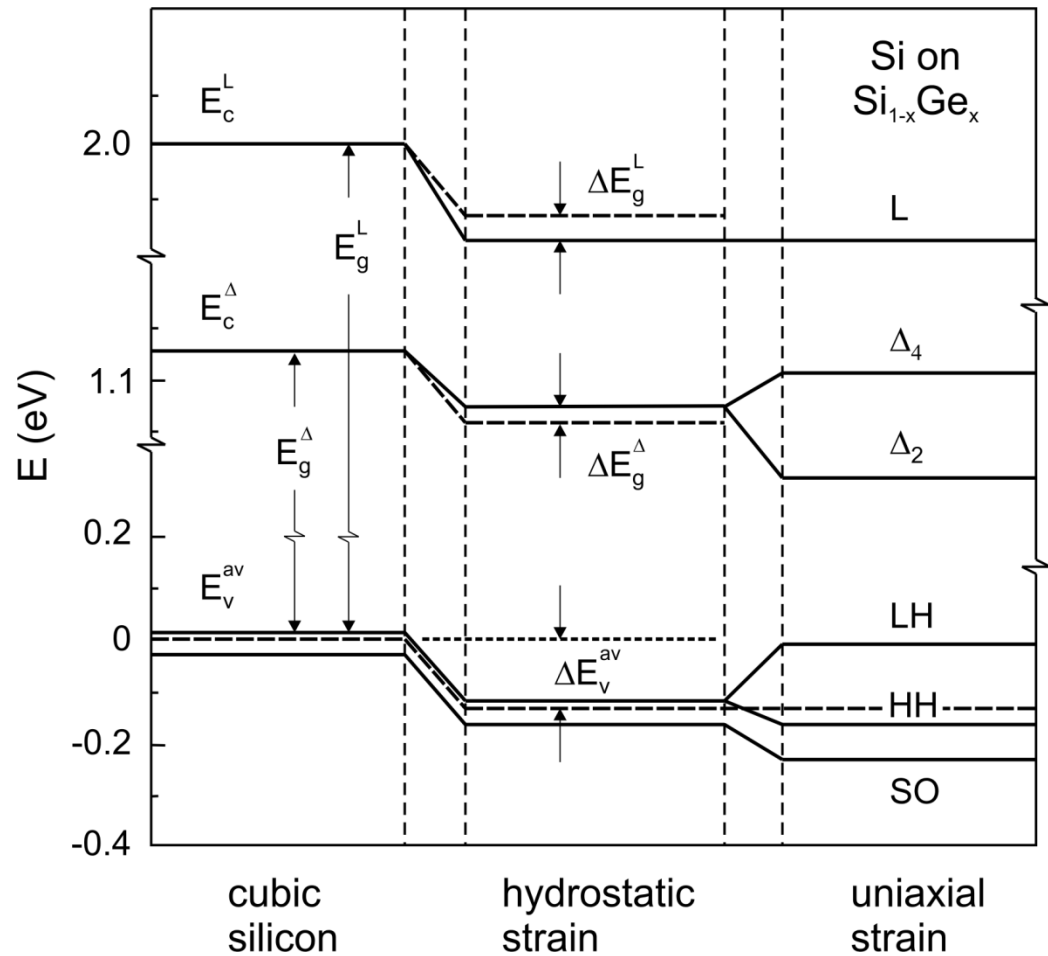
Bändermodell

Einfluss der Verspannung auf die Lage der Bandkanten in Si/SiGe

Si auf metamorphem $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ -Puffer

Hydrostatische Komponente:
 $\Delta V/V \approx +1.6\%$

Scherkomponente:
 $\Delta a_{\parallel}/a \approx +1.3\%$
 $\Delta a_{\perp}/a \approx -1.0\%$



3. Grundelemente für Quantenstrukturen

3.1 Quantenfilme – 2D-Systeme

Bändermodell

Leitungsbandkante für einen Si/SiGe-HeteroFET auf metamorphem $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ -Puffer

Typische Werte ($T = 1\text{ K}$)

14 nm dicker Spacer:

$$N_S \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

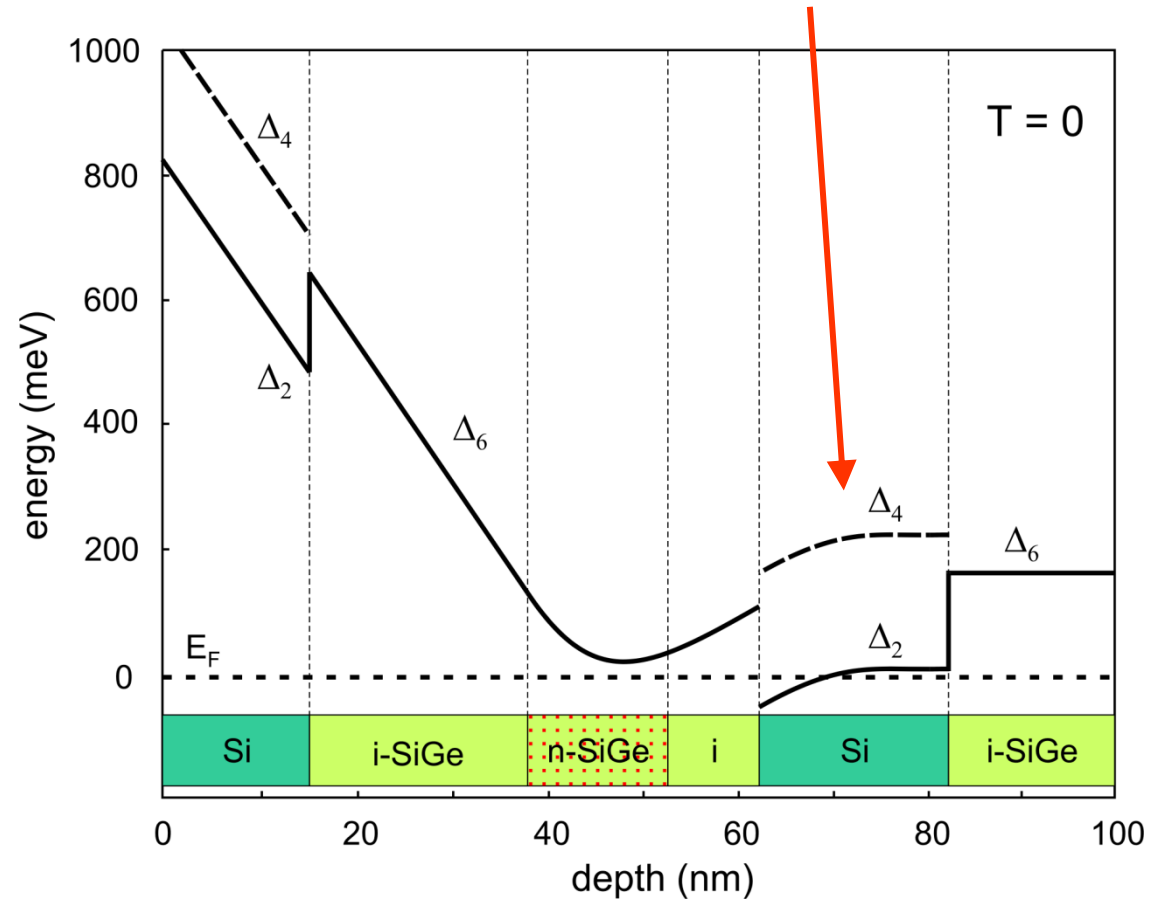
$$\mu \approx 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

3.5 nm dicker Spacer:

$$N_S \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$\mu \approx 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Energieaufspaltung durch Verspannung (und Quantisierung)

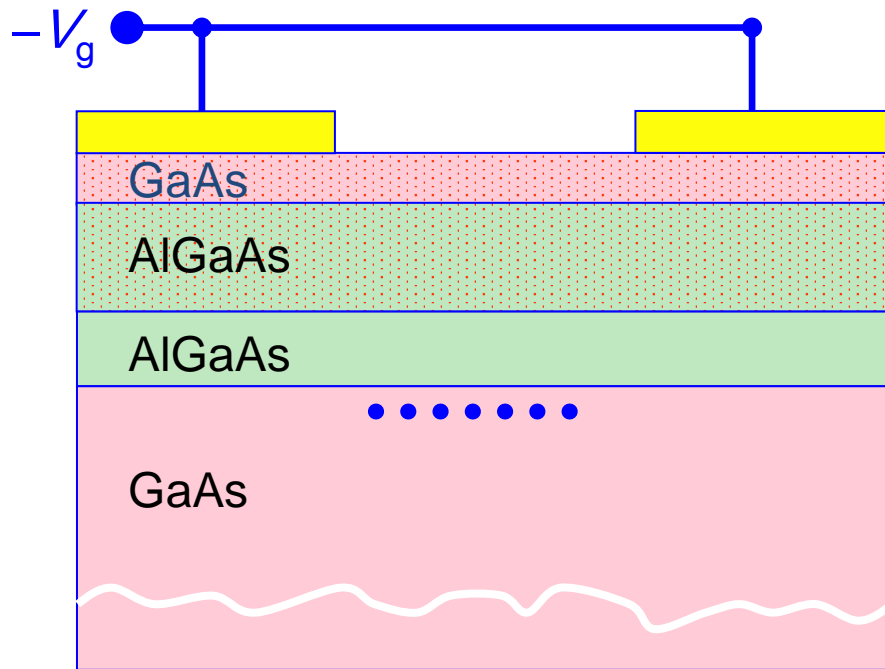


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

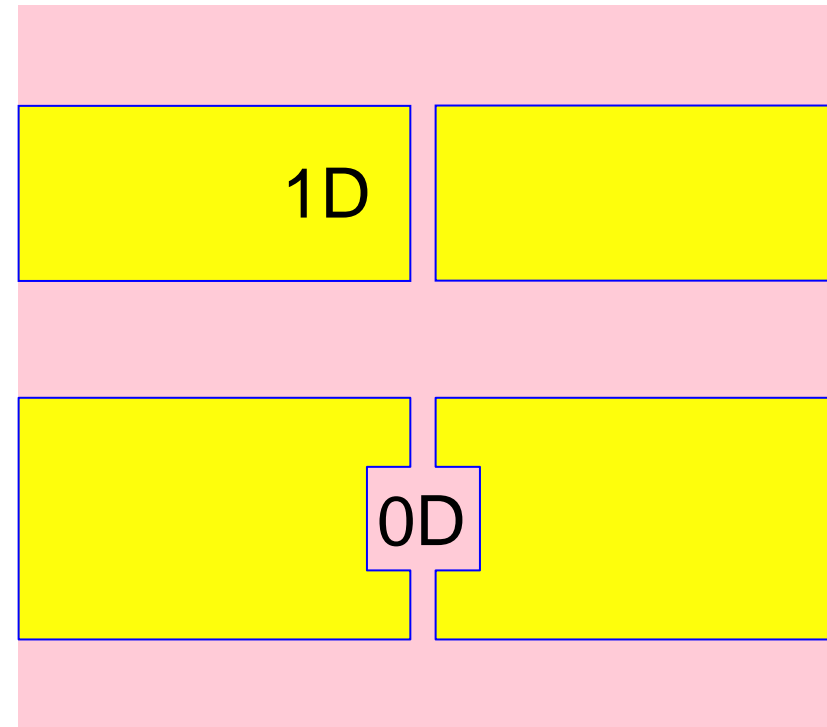
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Verarmung der Umgebung durch Split-Gate Elektroden



Aufsicht: Formgebung eines Quantendrahts (1D), eines Quantenpunkts (0D)



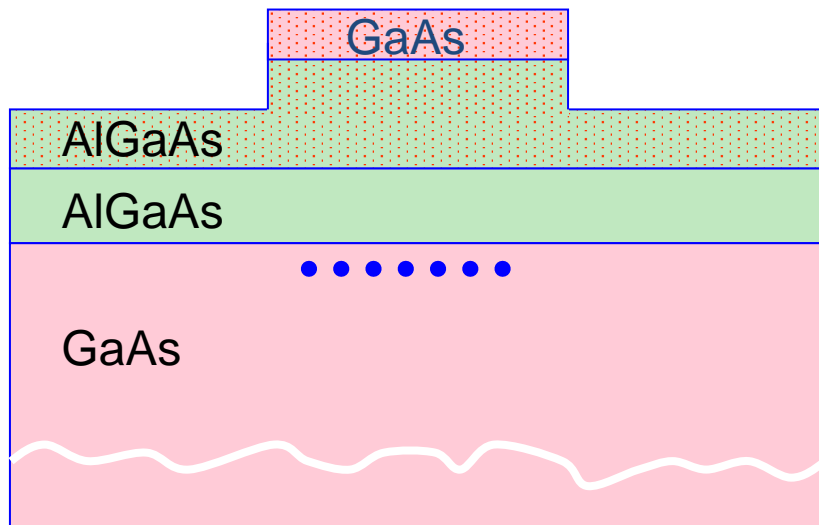
J.H. Davies, The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge University, Cambridge 1998

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

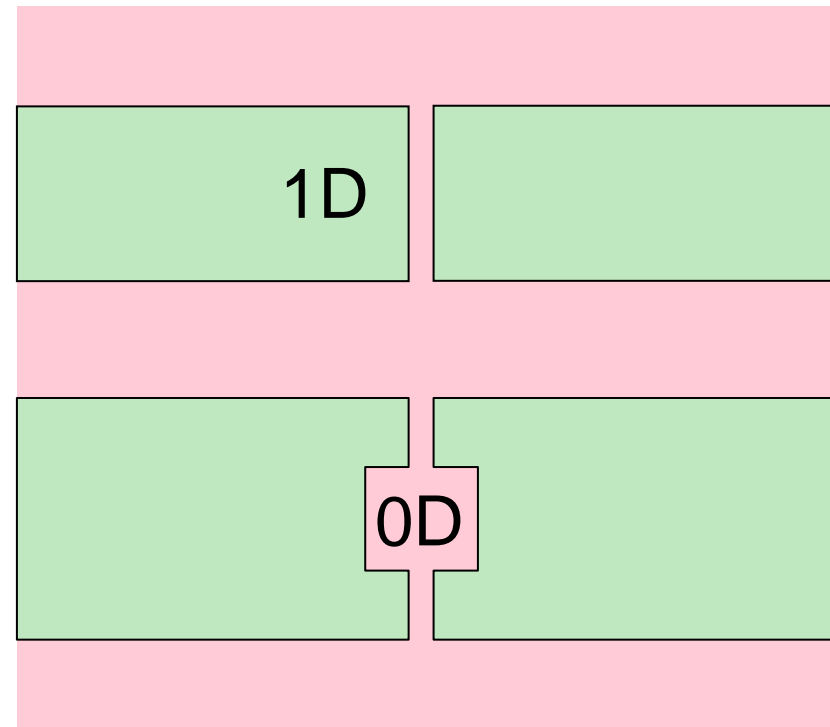
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Verarmung der Umgebung durch flache Mesa-Ätzung



Aufsicht: Formgebung eines Quantendrahts (1D), eines Quantenpunkts (0D)

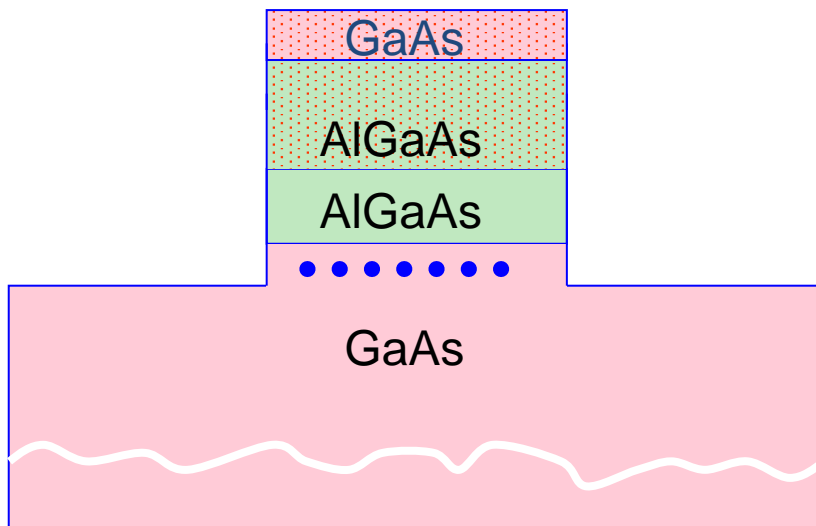


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

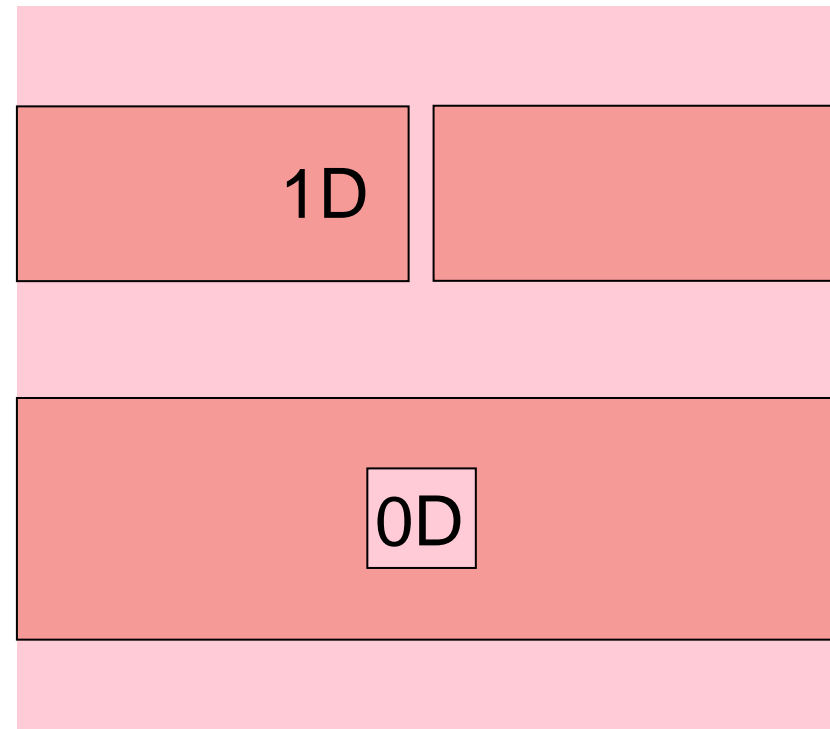
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Verarmung der Umgebung durch tiefe Mesa-Ätzung



Aufsicht: Formgebung eines Quantendrahts (1D), eines Quantenpunkts (0D)

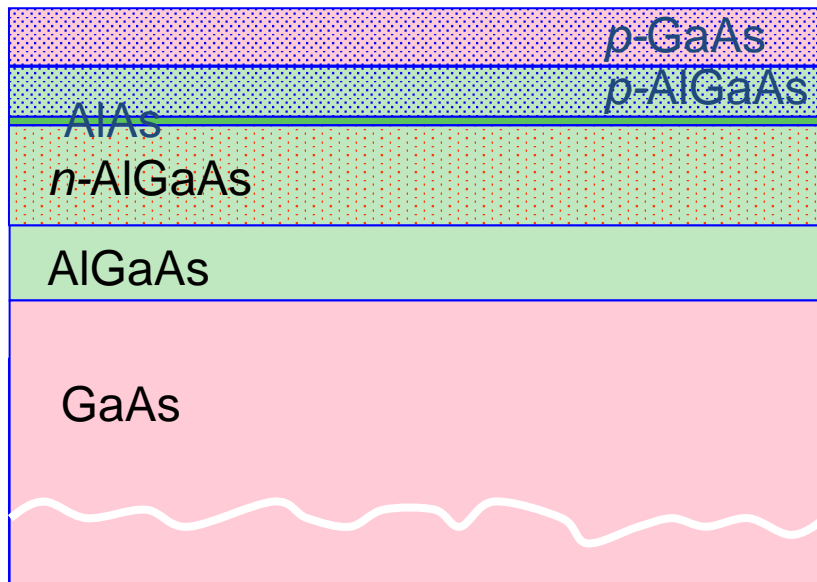


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

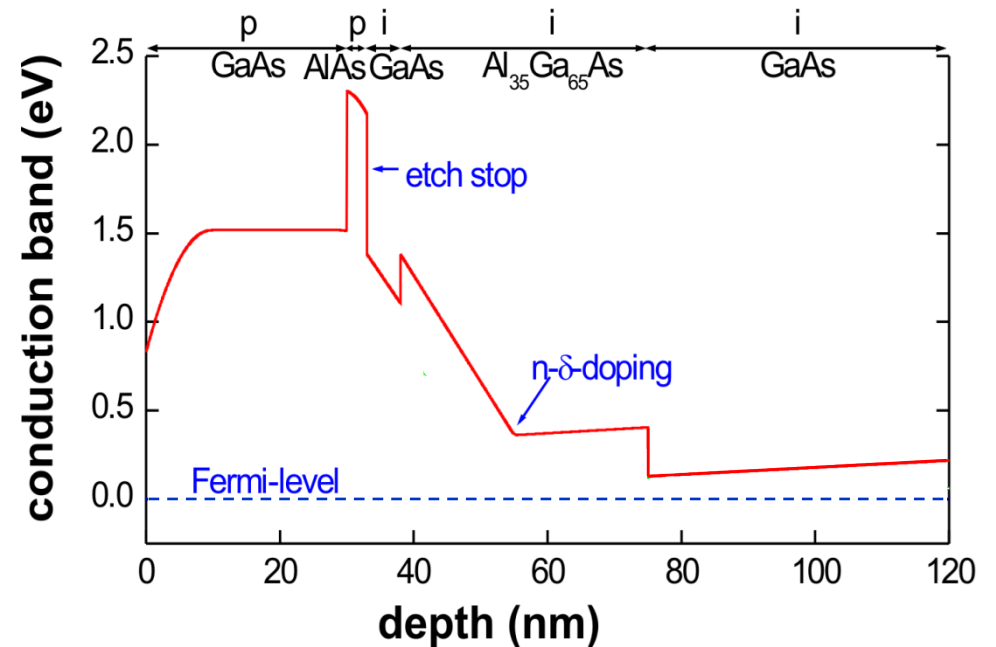
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Anreicherung durch Abätzen einer Kompensationsschicht



Bandverlauf:
komplette Schichtfolge



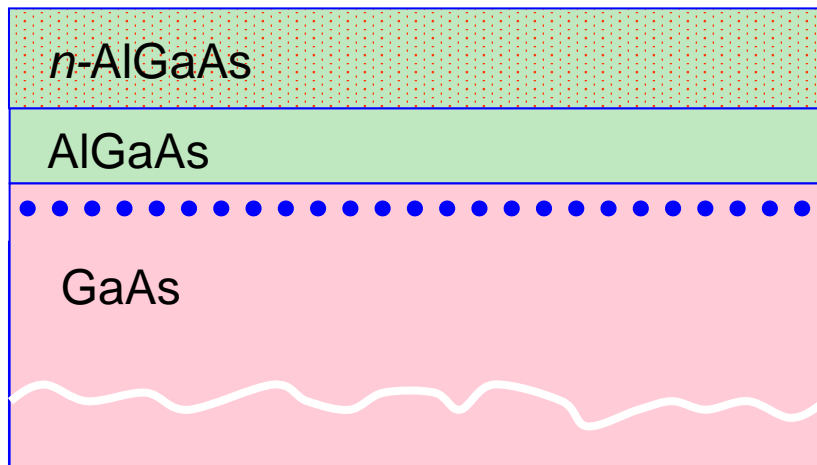
D. Kähler: Quantentransport in nanoskaligen schichtkompensierten GaAs/AlGaAs Feldeffektstrukturen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 2003

3. Grundelemente für Quantenstrukturen

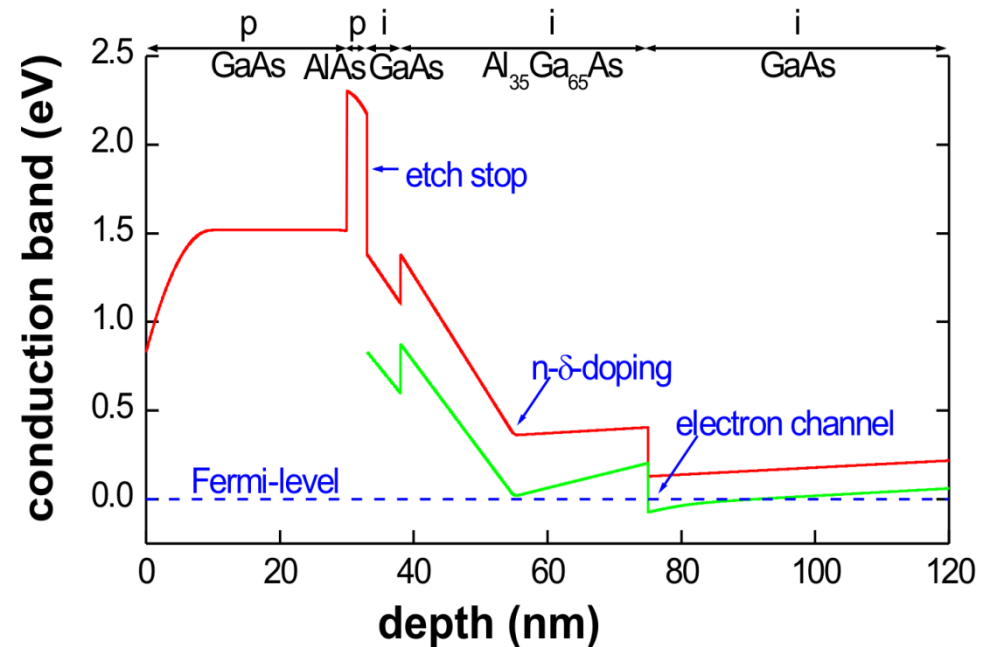
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Anreicherung durch Abätzen einer Kompensationsschicht



Bandverlauf:
 komplette Schichtfolge
 Deckschichten abgeätzt

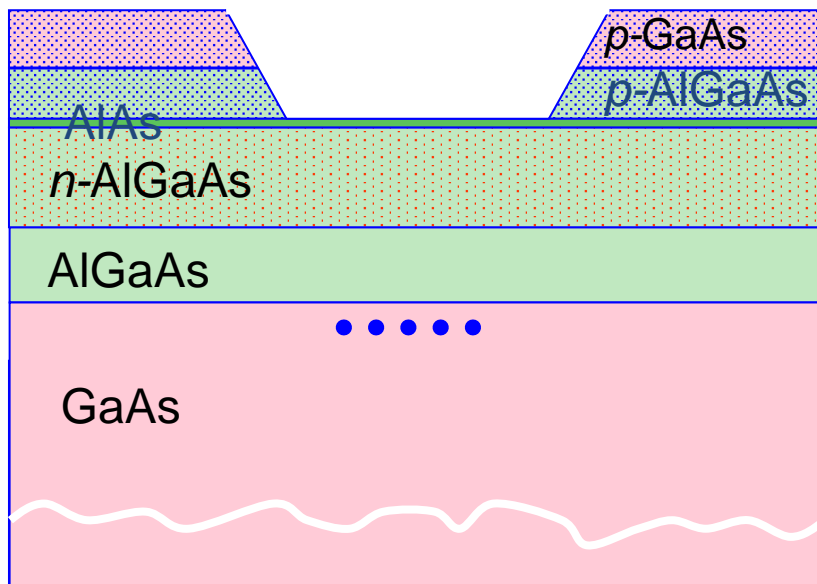


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

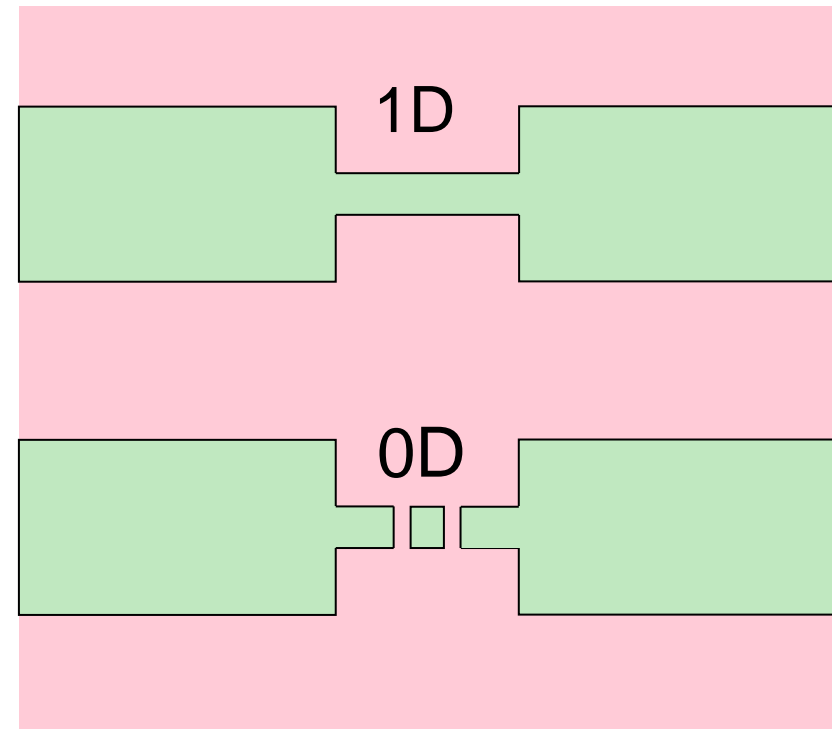
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Laterale Potentialmodulation

Lokale Anreicherung durch Abätzen einer Kompensationsschicht



Aufsicht: Formgebung eines Quantendrahts (1D), eines Quantenpunkts (0D)

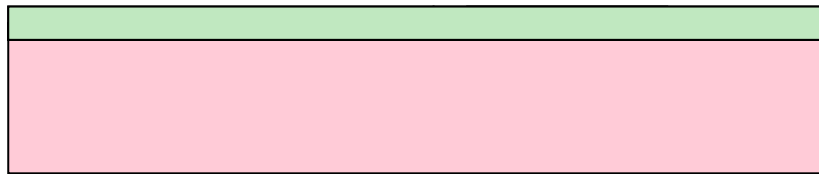


3. Grundelemente für Quantenstrukturen

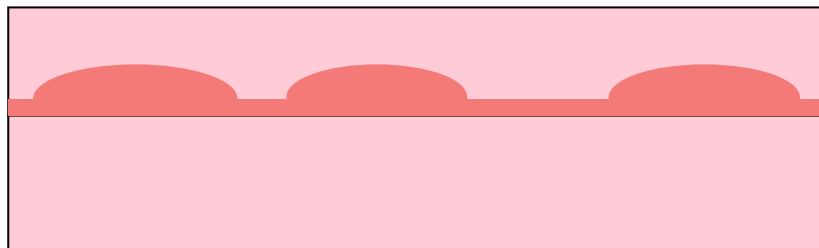
3.2 Quantendrähte, Quantenpunkte – 1D- und 0D-Systeme

Selbstordnende Quantenpunkte

Mechanismus: Wachstumsmodus

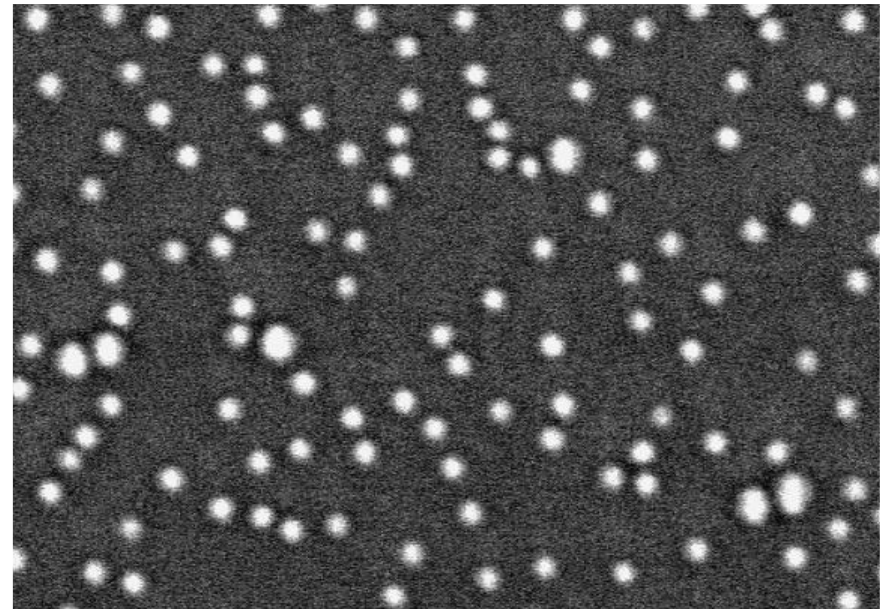


Frank-van der Merwe: AlGaAs/GaAs
Wachstum **Lage für Lage**



Stranski-Krastanow: InAs/GaAs
Wachstum **verspannter Cluster**, max.
Größe ohne Versetzung je nach $\Delta a/a$,
Einbetten durch Überwachsen

Ensemble von Quantenpunkten (0D)



REM-Abbildung von InAs-Quantenpunkten auf GaAs
 $d \approx 25 \text{ nm}$, $h \approx 4 \text{ nm}$ (eingebettet)

R. Nötzel, *Semicond. Sci. Technol.* **11**, 1365-79 (1996); D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov: *Quantum dot heterostructures*. Wiley, New York 1999