

# 5 Optik der Halbleiter – Wechselwirkung Licht und Halbleiter

---

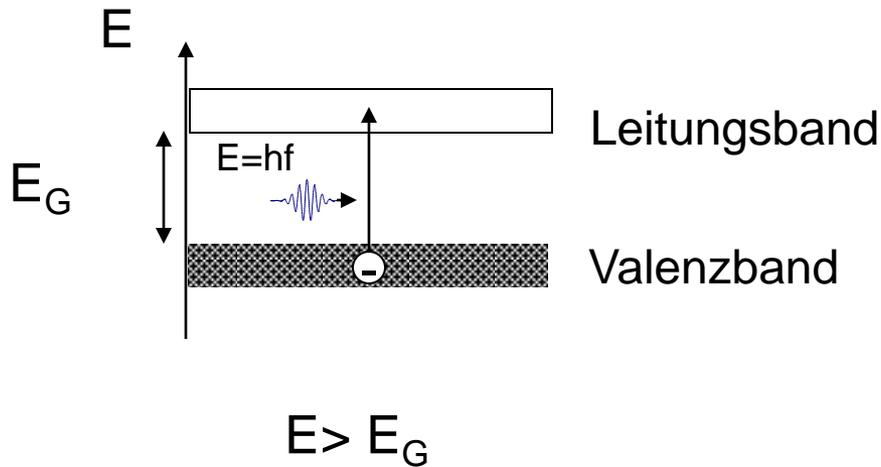
# Einführung

---

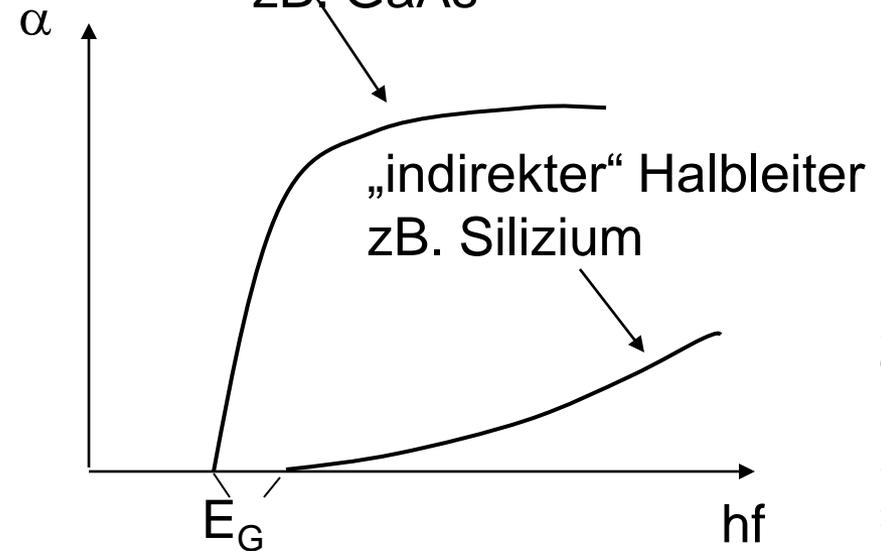
- Prinzip sehr vieler optoelektronischer Bauelemente beruht auf Erzeugung oder Rekombination von Elektron-Loch-Paaren
- Absorption: Bestrahlung des Halbleiters mit Licht und Erzeugung eines e-h-Paares (Paarbildung)
- Rekombination: inverser Prozess.
  - strahlend: Vernichtung des e-h-Paares unter Aussendung von Strahlung
  - Nichtstrahlend: Vernichtung unter Abgabe der Energie z.B. an Phononen (Gitterschwingungen, Wärme)
- Strahlend → Lumineszenz

# Absorption von Licht

„Fundamental-Absorption“



„direkter“ Halbleiter  
zB. GaAs

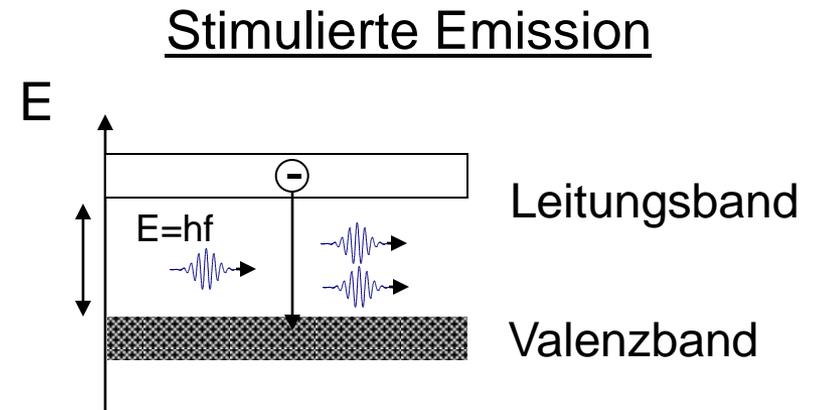
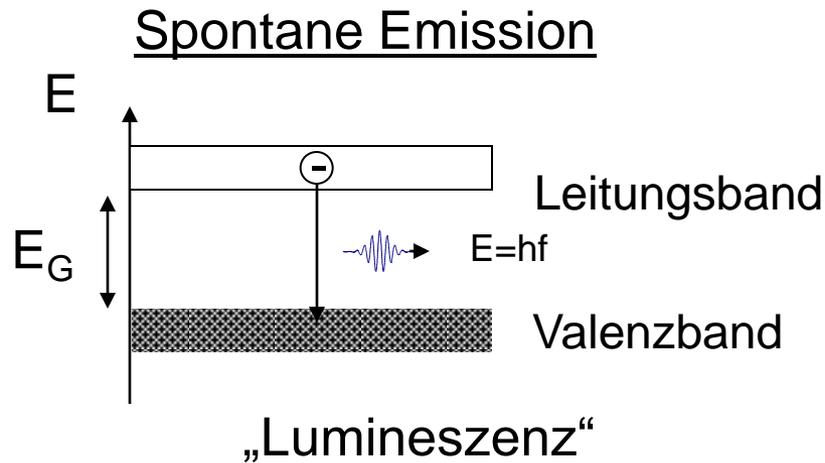


$E_G$ : Bandlückenenergie

$$\frac{d\Phi}{dx} = -\alpha\Phi, \quad \alpha : \text{Absorptionskoeffizient}$$

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x}$$

# Emission von Licht



## Anregungsprozess

kurzwellige Strahlung

Elektronenstrahlen

Elektrischer Strom

Wärmestrahlung

Chemische Reaktion

Mechanischer Druck/Zug

## Bezeichnung

Photolumineszenz

Kathodolumineszenz

Elektrolumineszenz

Thermolumineszenz

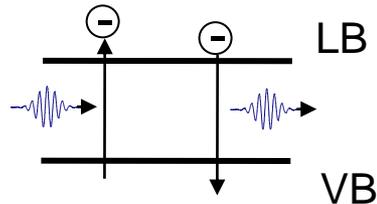
Chemolumineszenz

Tribolumineszenz

Stimulierte Emission  
wichtig für Lasertätigkeit

# Klassifizierung der Übergänge

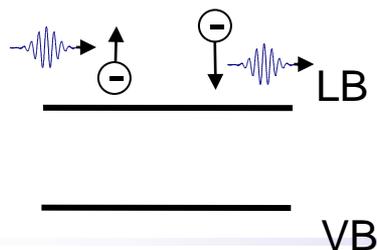
## Band-Band-Übergang



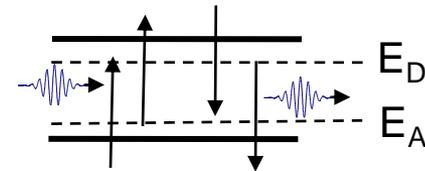
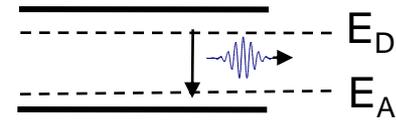
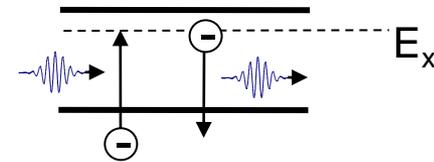
## Akzeptor-Donator-Übergang

## Band-Akzeptor/Donator-Übergang

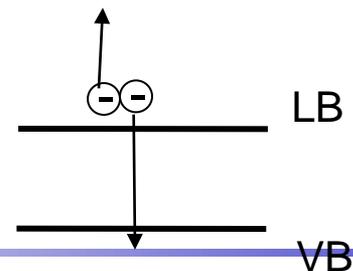
## Intraband-Übergang



## Excitonen-Übergang



## Auger-Prozess



# Elektron-Loch-Paar Rekombination und Erzeugung

Rekombinationsrate

im Thermischen Gleichgewicht

Rekombinationsrate=Erzeugungsrate

$$R \equiv rnp$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

$$R = G$$

$r$  [cm<sup>3</sup>/s]:

Rekombinations-  
koeffizient

Rekombinationsrate klein, da

- undotierter Halbleiter  $n_i$  klein

- dotierter Halbleiter nur  $p$  oder  $n$  groß

$$R_0 \equiv rn_0 p_0$$

Erhöhung der Rekombinationsrate im Nichtgleichgewichtszustand

-- > Injektion von Ladungsträgern zB. durch elektrischen Strom

$$R = R_0 + R_{in} = rnp > R_0$$

$$R = r(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p)$$

am pn Übergang:

$$\Delta E_F = E_{F,n} - E_{F,p} = eU$$

$$np = n_i^2 e^{\frac{\Delta E_F}{k_B T}} \gg n_i^2$$

# Lebensdauer der Ladungsträger

Rate der spontanen Rekombination

$$\Delta n = \Delta p$$

$$R_{sp} \equiv rnp$$

$$R_{sp} = r(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p)$$

Rate der spontanen Rekombination  
der Überschuss-Ladungsträger

$$R_{sp}^{ex} \equiv \frac{\Delta n}{\tau_r}$$

$$R_{sp} = R_{sp}^0 + R_{sp}^{ex}$$

$$R_{sp}^0 = rn_0p_0$$

$$R_{sp} = r(n_0p_0 + \Delta n(n_0 + p_0) + (\Delta n)^2)$$

$$R_{sp}^{ex} = r\Delta n(n_0 + p_0 + \Delta n)$$

$$\tau_r = \frac{1}{r(n_0 + p_0 + \Delta n)}$$

$\tau_r$  : Lebensdauer; weil:

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = 0 = G - \Delta n(t)/\tau_r \quad \Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-(t/\tau)}$$

im Laserbetrieb

$$\Delta n \gg p_0, n_0$$

$$\tau_r \cong \frac{1}{r\Delta n}$$

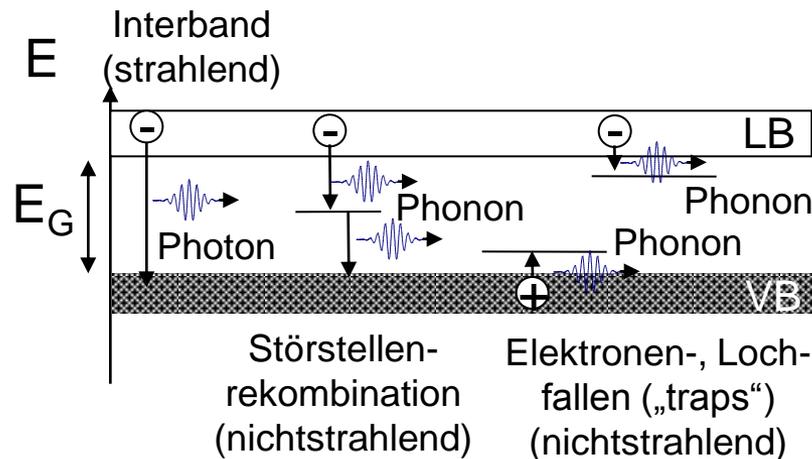
niedrige Injektion

$$\Delta n < p_0, n_0$$

$$\tau_r \cong \frac{1}{r(n_0 + p_0)} = \frac{1}{2rn_i}$$

# Interner Quantenwirkungsgrad

Verhältnis der strahlenden Rekombinationsprozesse zur Gesamtzahl der Rekombinationsprozesse



Lebensdauer

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{ns}}$$

Rekombinationsrate

$$R_{total} = R_s + R_{ns} = G \quad G: \text{Injektions-Rate}$$

interner Wirkungsgrad

$$\eta \equiv \frac{R_s}{R_s + R_{ns}} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{\tau_s}{\tau_{ns}}} \quad \text{mit} \quad \tau_s = \frac{\Delta n}{R_s}; \quad \tau_{ns} = \frac{\Delta n}{R_{ns}}$$

Beispiele:

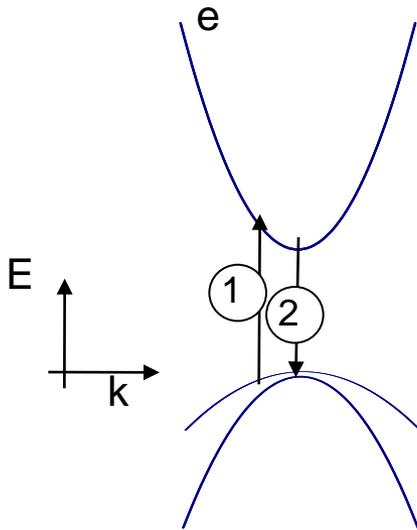
|      | $\tau_s$ | $\tau_{ns}$ | $\tau$ | $\eta$    |
|------|----------|-------------|--------|-----------|
| Si   | 10ms     | 100ns       | 100ns  | $10^{-5}$ |
| GaAs | 100ns    | 100ns       | 50ns   | 0,5       |

Si: indirekter Halbleiter

# Band-Band-Übergang

## Direkte Halbleiter

### Bandstruktur



### Beispiele

- 1 direkte Absorption
- 2 direkte Emission

### Voraussetzungen (Erhaltungssätze)

1. Energieerhaltung

$$\Delta E = E_e - E_h = hf$$

2. Impulserhaltung

$$\Delta p_e = p_e - p_h = p_{\text{photon}}$$

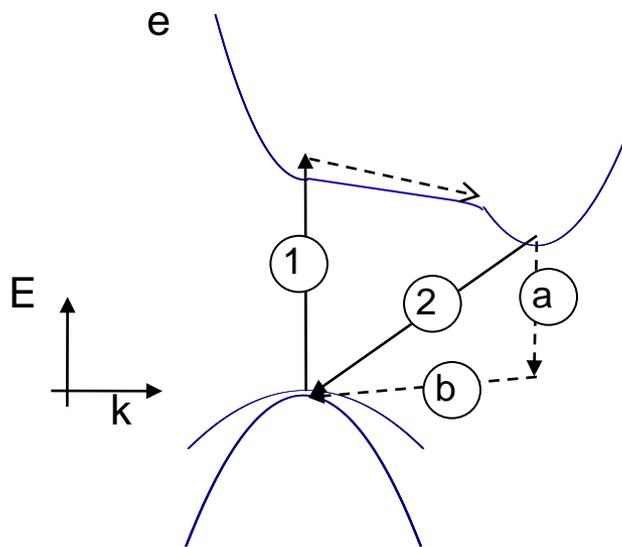
$$p_e = \hbar k_e; \quad p_{\text{photon}} = \hbar k_{\text{photon}}$$

$$k_e \approx 1000 k_{\text{photon}}$$

$$\Rightarrow \Delta k_e = 0$$

k-Auswahlregel  
für direkte Übergänge

# Band-Band-Übergang Indirekte Halbleiter



## Voraussetzungen (Erhaltungssätze)

1. Energieerhaltung

$$\Delta E = E_e - E_h = hf + E_{\text{phonon}}$$

2. Impulserhaltung

$$\Delta p_e = p_e - p_h = p_{\text{photon}} + p_{\text{phonon}}$$

1 direkter Übergang (Absorption)

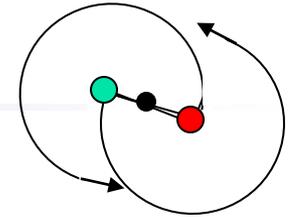
2 indirekter Übergang (Rekombination) unter Beteiligung

a) Photon

b) Phonon

→ Indirekter Rekombinationsübergang unwahrscheinlicher 3-Teilchenprozess  
Absorption direkter Übergang und anschließende Relaxation

# Exzitonen



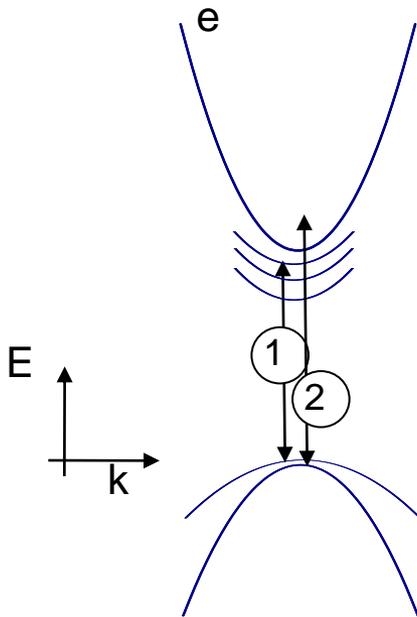
Exziton:

- Quasiteilchen aus gebundenem Zustand von Elektron und Loch
- wasserstoff-ähnlich
- wasserstoffähnliches Spektrum

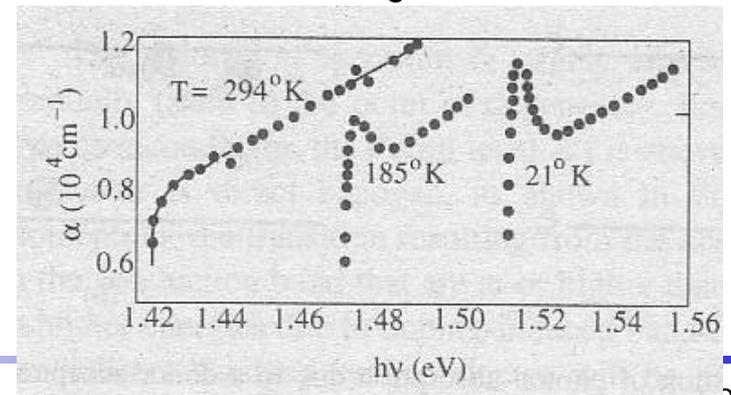
1 exzitonische Übergänge bei  $E < E_g$

$$E_{\text{ex},\ell} = \frac{\hbar^2 k_{\text{ex}}^2}{2(m_e^* + m_h^*)} - \frac{13,6\text{eV}}{\ell^2} \frac{m_r^*}{m_0} \left( \frac{1}{\epsilon_r} \right); \quad \ell = 1, 2, 3, \dots$$

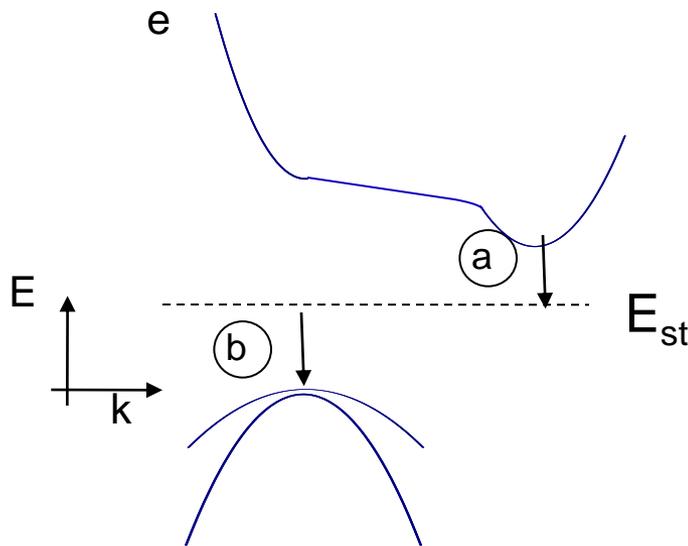
2 Band-Band-Übergänge bei  $E > E_g$



Beispiel:  
GaAs-Absorption  
für verschiedene  
Temperaturen



# Übergänge mit Störstellenbeteiligung



Störstellen (Energie  $E_{st}$ )

- Dotieratome ( $E_{st}$  nahe Bandkanten)
- Verunreinigungen
- Kristallfehler

„tiefe Störstellen“:

Fremdatome, Kristallfehler →

Energien „tief“ in der verbotenen Zone

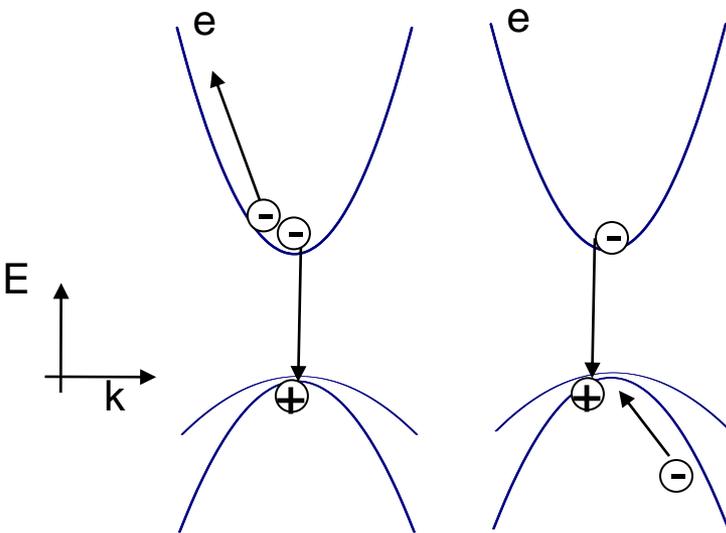
a), b) Rekombinationsübergänge mit sehr langwelliger, niederenergetischer Strahlung

!! → Lumineszenz im indirektem Halbleiter möglich

Besonderheit: An isoelektrische Störstellen gebundene Exzitonen

# Auger-Prozesse

## Beispiele



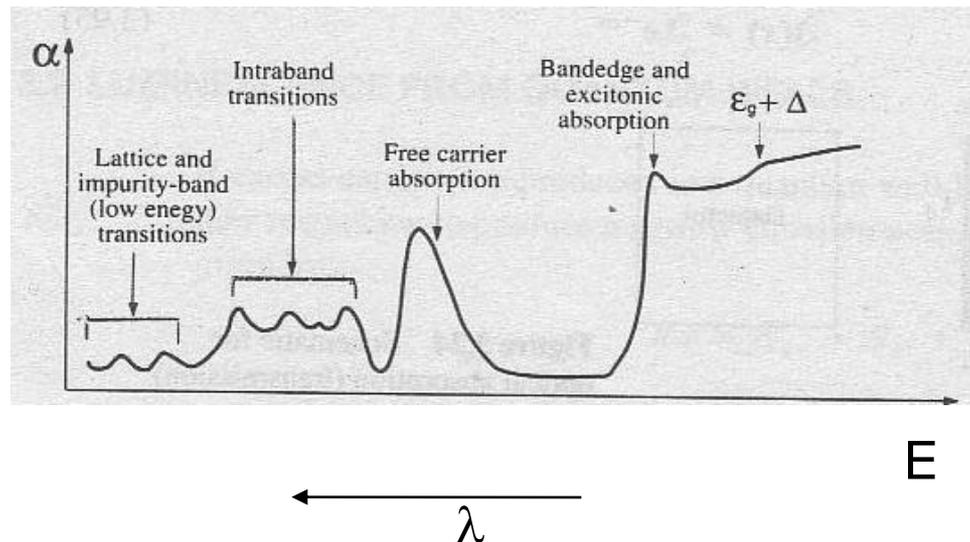
- nichtstrahlend
  - drei-Teilchenprozess
  - unwahrscheinlich
  - Stoß zwischen Elektron/ Elektron
- 
- wahrscheinlich bei hohen Ladungsträgerkonzentrationen

# Verlauf der Absorption

Absorptionskoeffizient

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{Gitter / Störstellen}} + \alpha_{\text{intraband}} + \alpha_{\text{Freie LT}} + \alpha_{\text{ex}} + \alpha_{\text{band}}$$

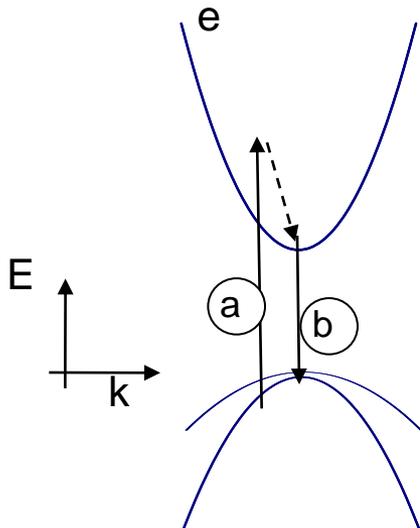
$$\alpha_{\text{band}} \propto \sqrt{hf - E_g} \quad (\text{für direkte Halbleiter, parabolische Band-Näherung})$$



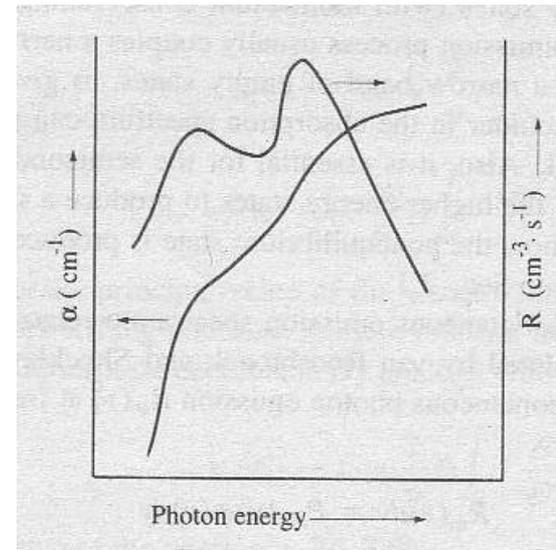
# Absorption und Emission

Emission ist inverser Prozess zur Absorption  
Allgemein: breites Absorptionsspektrum,  
schmales Emissionsspektrum

Warum ?  
(Band-Band-Übergang)



- a: Absorption in breitem Energieband
- b: Emission in schmalem Energieband (nahe der Grundzustände)



# Absorption und Emission

## Direkter Halbleiter

Band-Band-Übergänge  
(ohne Störstellen)

$$\alpha_{\text{band}}(h\nu) = \underbrace{w_{\text{eh}}}_{\text{Vorfaktor}} \underbrace{g_{\text{eh}}(E_e - E_h)}_{\text{Zustandsdichte}} \underbrace{(1 - f_e(E_e - E_c))(1 - f_h(E_h - E_v))}_{\text{Wahrscheinlichkeiten, dass Zustände unbesetzt}}$$

$$\alpha_{\text{band}}(h\nu) \propto g_{\text{eh}}(h\nu) \propto \sqrt{h\nu - E_g} \quad \text{Absorption}$$

$$I_{\text{sp}}(h\nu) \propto g_{\text{eh}}(h\nu) f_e(E_e - E_c) f_h(E_h - E_v) \quad \text{Emission}$$

$$I_{\text{sp}}(h\nu) \propto \sqrt{h\nu - E_g} \cdot e^{\left(\frac{h\nu - E_g}{k_B T}\right)}$$

# Systeme der III-V-Halbleiterverbindungen

Besondere Eigenschaft: Herstellung von binären, ternären und quaternären Verbindungen möglich

Wichtige Eigenschaften des Halbleiters beeinflussbar:

1. Bandabstand  $E_g$
2. Gitterkonstante
3. Halbleitertyp nach E/k- Diagramm (direkte / indirekte Bandlücke)
4. thermischer Ausdehnungskoeffizient  
(Änderung der Gitterkonstanten mit der Temperatur  $\alpha = \frac{1}{a_0} \frac{\partial a}{\partial T}$  )

Nomenklatur:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $x, y = 0..1$

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$   $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{As}$

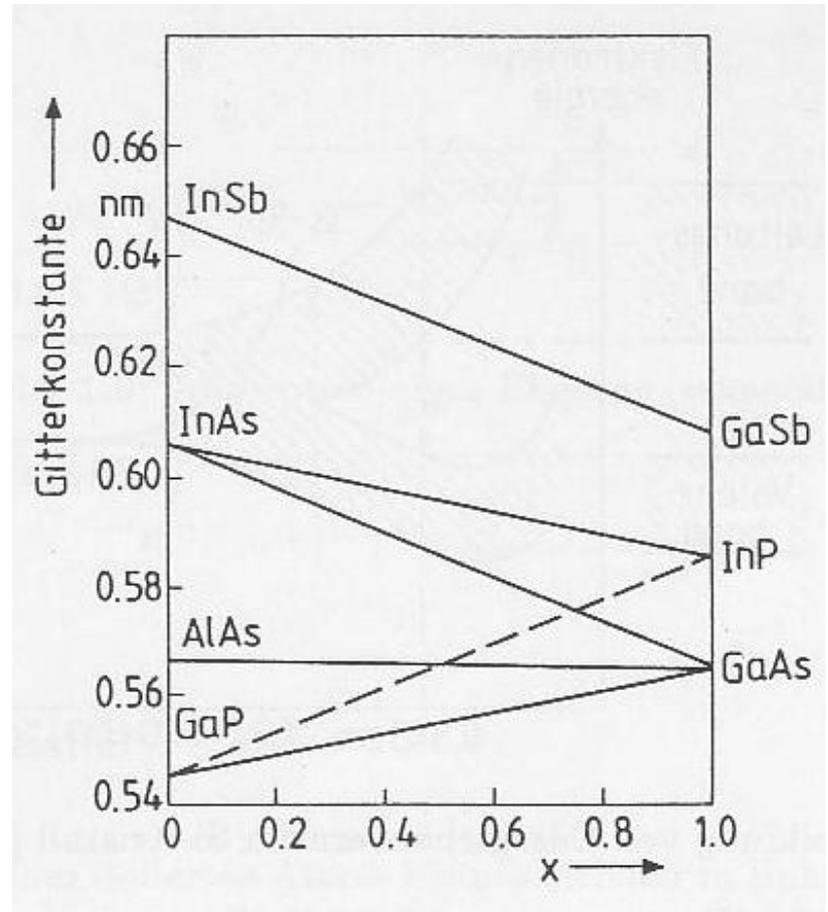
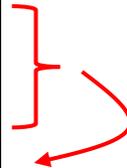
# Mischkristallsysteme aus den Elementen Al, Ga, In, As, P, Sb

|           | Kristallsystem   | kationische Partner der III. Hauptgruppe | anionische Partner der V. Hauptgruppe |
|-----------|--|--|---------------------------------------|
| ternär    | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$                  | Al, Ga                                   | As                                    |
| quaternär | $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  | In, Ga                                   | As, P                                 |
|           | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  | Al, Ga                                   | As, P                                 |
|           | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ | Al, Ga                                   | As, Sb                                |
|           | $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ | Al, In                                   | As, Sb                                |
|           | $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_z\text{Sb}^*$         | Al, Ga, In                               | Sb                                    |

\* mit  $x+y+z=1$

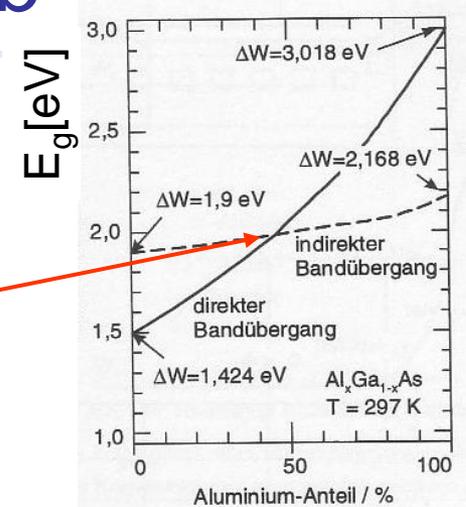
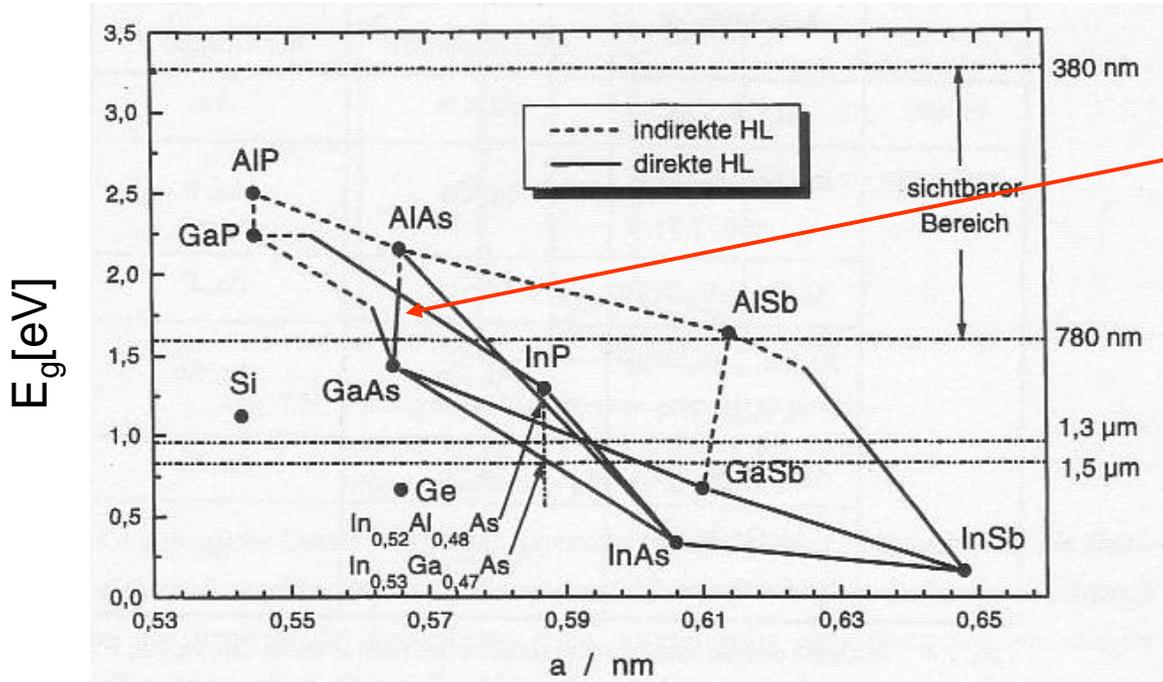
# Gitterkonstante und Ausdehnungskoeffizient

| Material | $\alpha [10^6 \text{ K}^{-1}]$ |
|----------|--------------------------------|
| Si       | 2,5                            |
| Ge       | 5,2                            |
| GaP      | 5,8                            |
| GaAs     | 5,7                            |
| AlAs     | 5,2                            |
| AlGaAs   | 5,73-0,53x                     |

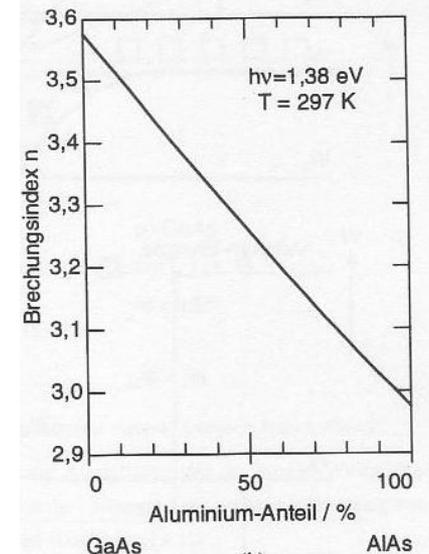


# Binäre und Ternäre Mischsysteme

## Beispiel: AlGaAs, AlGaSb, InSb

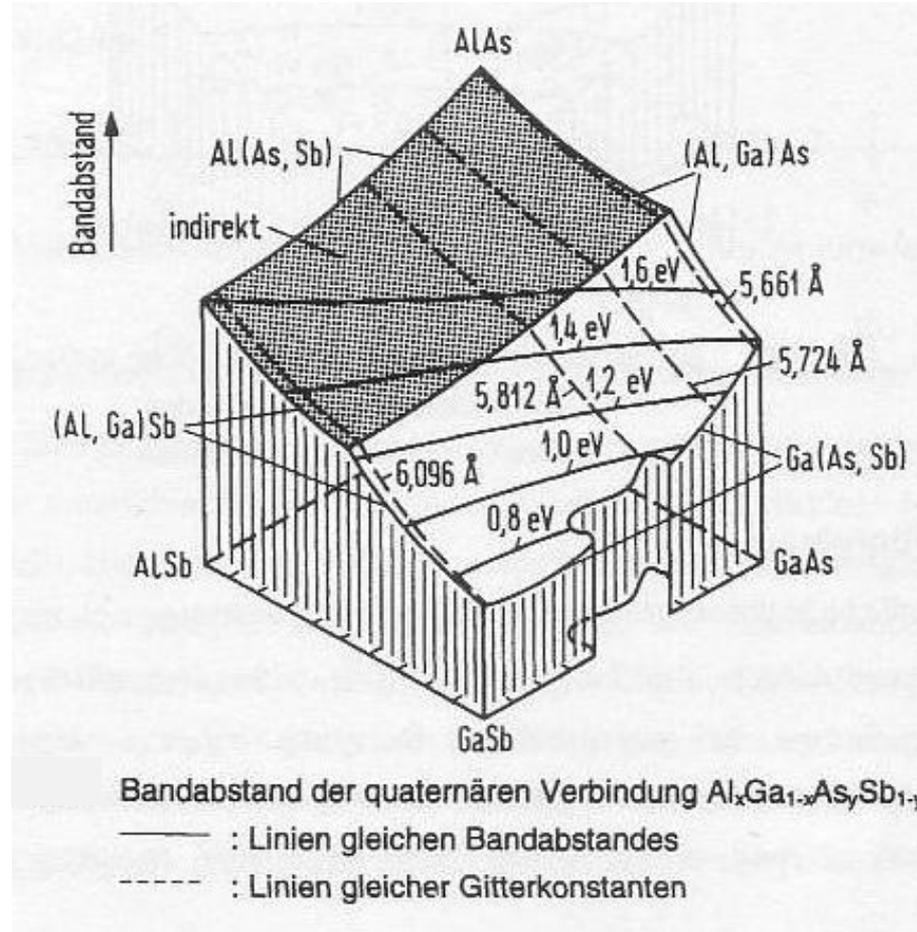


Brechungsindex



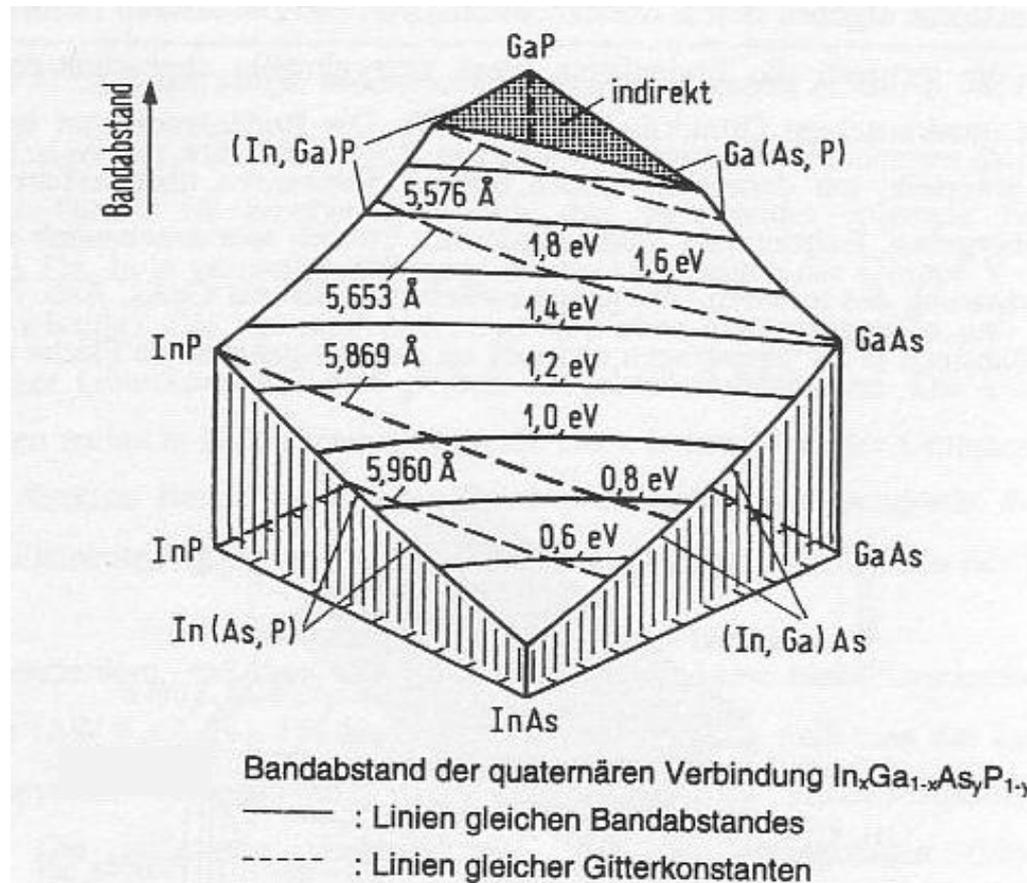
# Quaternäre Mischsysteme

## Beispiel: AlGaAsSb



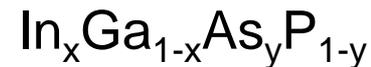
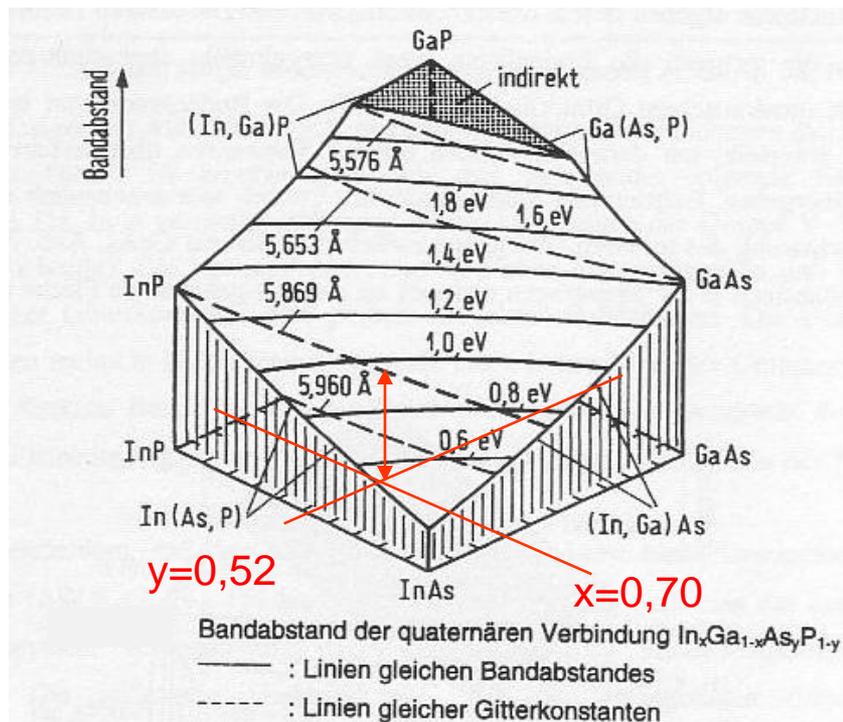
# Quaternäre Mischsysteme

## Beispiel: InGaAsP

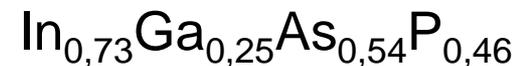


# Beispiel InGaAsP

quaternäre Kristallstruktur auf InP-Substrat ( $a_0=0,587$  nm) mit  $E_g=0,955$  eV;  $\lambda=1,3\mu\text{m} \rightarrow$  2. „Optisches Fenster“ der Glasfaser



Literatur:



# Mischkristallsysteme mit hexagonalem Gitter

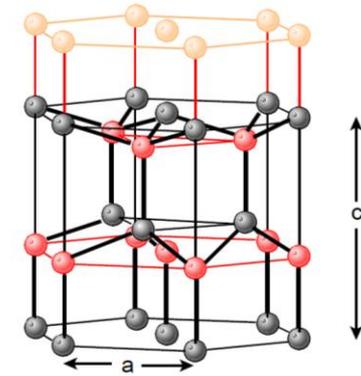
Indirekter Halbleiter:

SiC ( $a=0,308$  nm,  $c= 1,511$  nm ;  $E_g=2,8..3,2$  eV)

AlN ( $a=0,331$ ,  $c=0,498$ ;  $E_g=3,5$ eV)

Direkter Halbleiter:

GaN ( $a=0,319$  nm,  $c=0,518$  nm;  $E_g=3,5$  eV)



Zur Herstellung von BLAUEN LEDs und Lasern geeignet.  
Nicht zu verbinden mit den III-V Zinkblende Mischkristallen.

# Lernziele Kapitel 5

---

- Lichtabsorption in Halbleitern
- Lichtemission durch Halbleiter
- Klassifizierung der Elektronenübergänge
- Lebensdauern und interner Quantenwirkungsgrad
- Absorption und Emission in direkten und indirekten Halbleitern
  - Warum leuchtet Si nicht?
  - Energie und Impulserhaltung bei Absorption und Emission
- Materialeigenschaften der Mischungshalbleiter