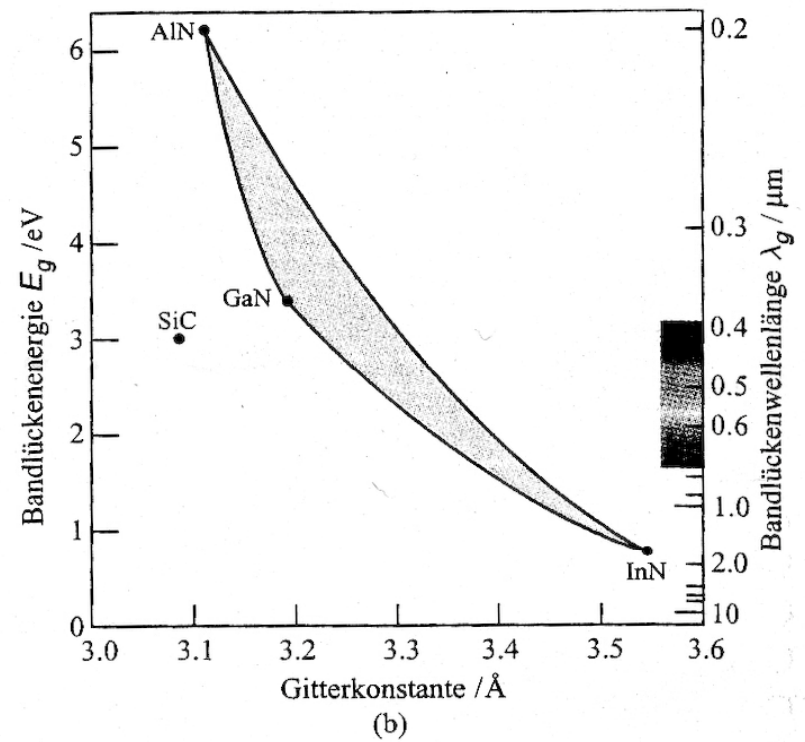
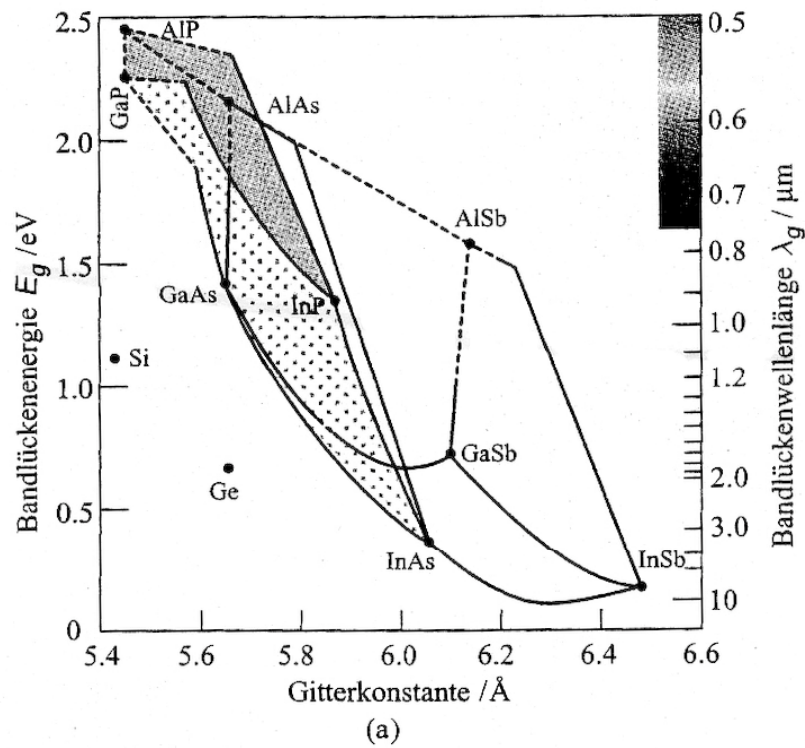
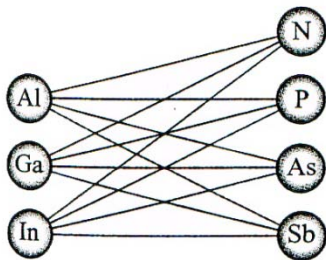


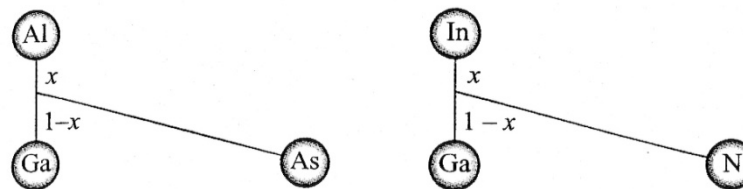
Verbindungshalbleiter



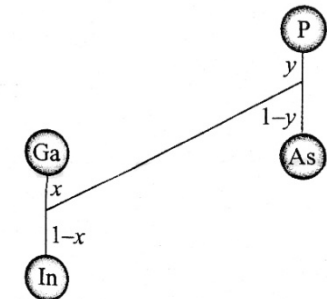
Kombinationen für die Bildung von binären Halbleiter



Quaternäre III-V-Halbleiter



Ternäre III-V-Halbleiter



Verbindungshalbleiter

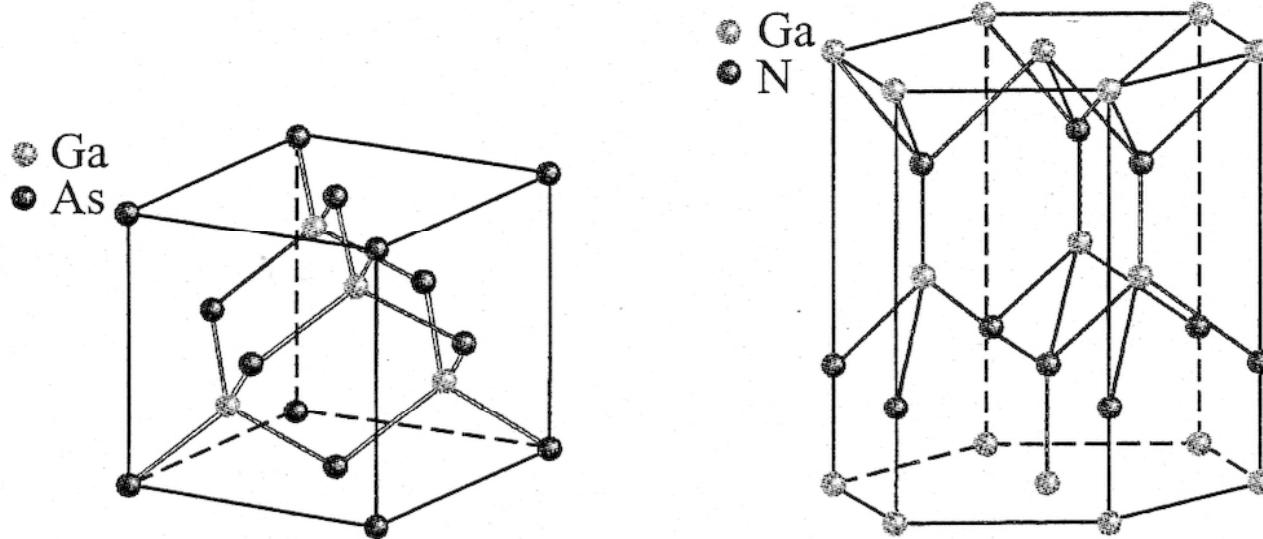


Abbildung 16.11 Die Zinkblendestruktur (links) besteht aus zwei einander durchdringenden kubisch flächenzentrierten Gittern, einem für jedes Element, die gegeneinander um $\frac{1}{4}$ der Raumdiagonale versetzt sind. Das Diamantgitter ist mit dem Zinkblendegitter identisch, nur dass alle Atome identisch sind. Die Brillouinzone für diese Struktura-

ren ist in Abb. 7.28 dargestellt. Die Wurtzitstruktur (rechts) besteht aus zwei hexagonal dicht gepackten Gittern, einem für jedes Element, die gegeneinander um $\frac{3}{8}c$ entlang der dreizähligen c -Achse versetzt sind. Alle Atome sind tetraedrisch mit ihren Nachbarn verbunden.

Organische Halbleiter

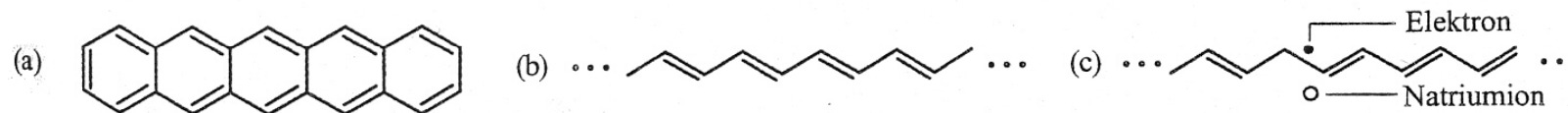


Abbildung 16.13 Die beiden Varianten von organischen Halbleitern: (a) kleine organische Moleküle wie Pentacen und (b) konjugierte Polymerketten wie Polyacetylen. (c) Dotierung von Polyacetylen mit Natrium als Donor ergibt einen n-Halbleiter, während

Dotierung mit Iod als Akzeptor einen p-Halbleiter liefert. Jede Linie bezeichnet eine Bindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen; doppelte Linien bezeichnen Doppelbindungen. Bindungen zu Wasserstoffatomen sind der Einfachheit halber weggelassen.

Energieniveaus und Zustandsdichte

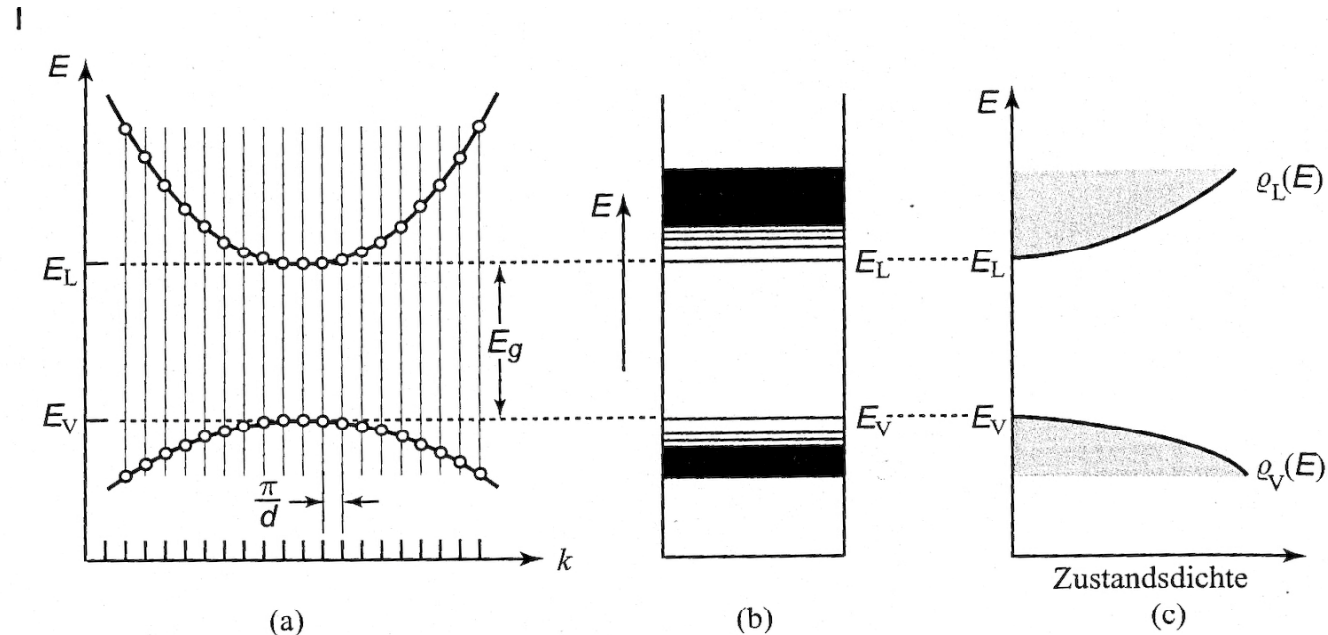


Abbildung 16.14 (a) Schnitt durch das E - k -Diagramm (z. B. in Richtung der Komponente k_1 mit konstantem k_2 und k_3). (b) Erlaubte Energieniveaus (für alle k). (c) Zustandsdichte in der Nähe der Leitungs- und Valenz-

bandkante. Die Größe $g_L(E) dE$ ist die Zahl der Quantenzustände im Leitungsband mit einer Energie zwischen E und $E + dE$ pro Volumeneinheit. Die Größe $g_V(E)$ ist für das Valenzband analog zu interpretieren.

Fermifunktion

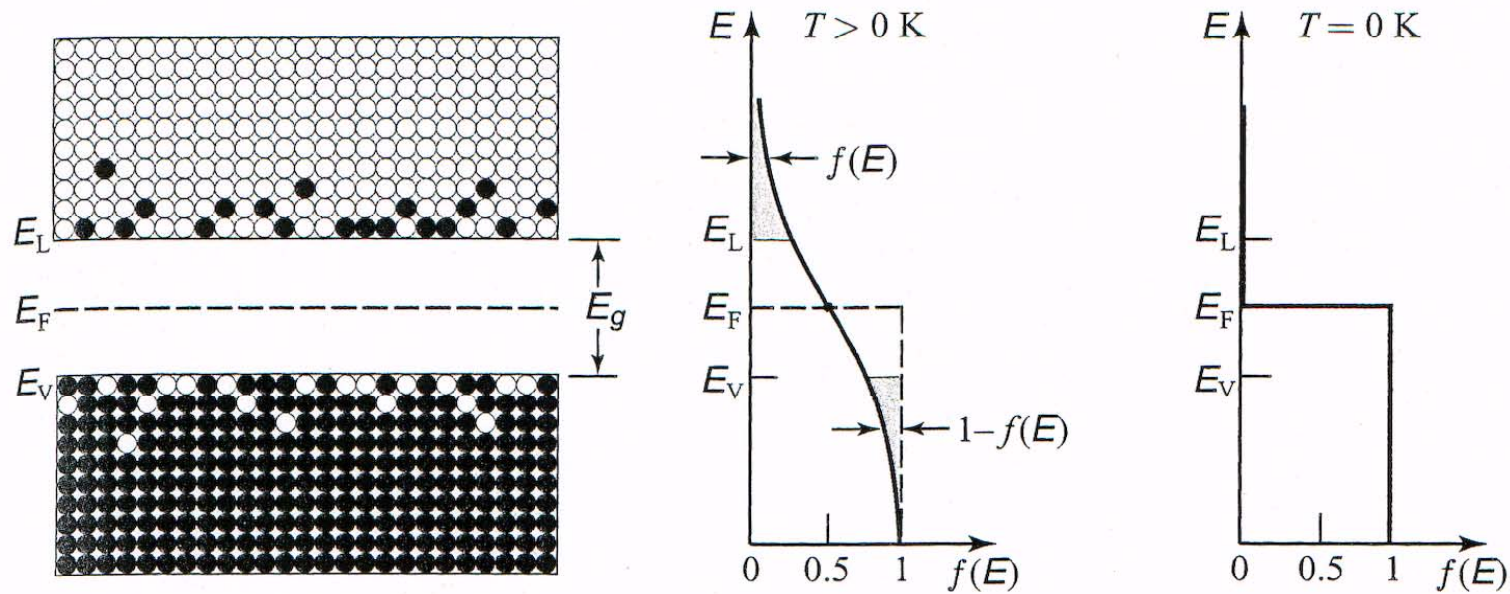
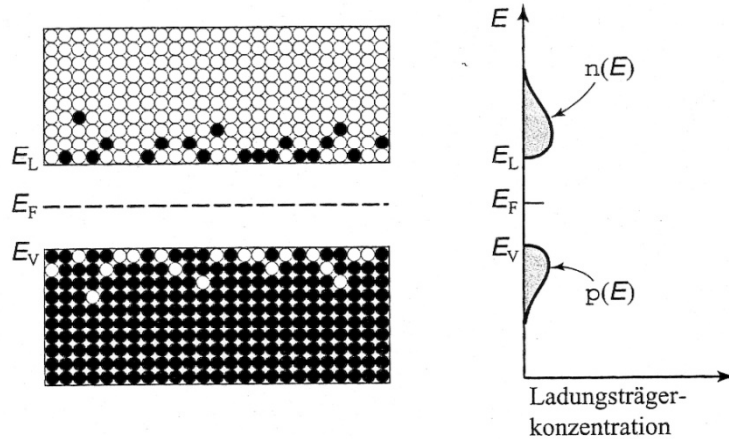


Abbildung 16.15 Die Fermifunktion $f(E)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Energieniveau E mit einem Elektron gefüllt wird; $1 - f(E)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass es leer bleibt. Im Valenzband ist $1 - f(E)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das Energieniveau

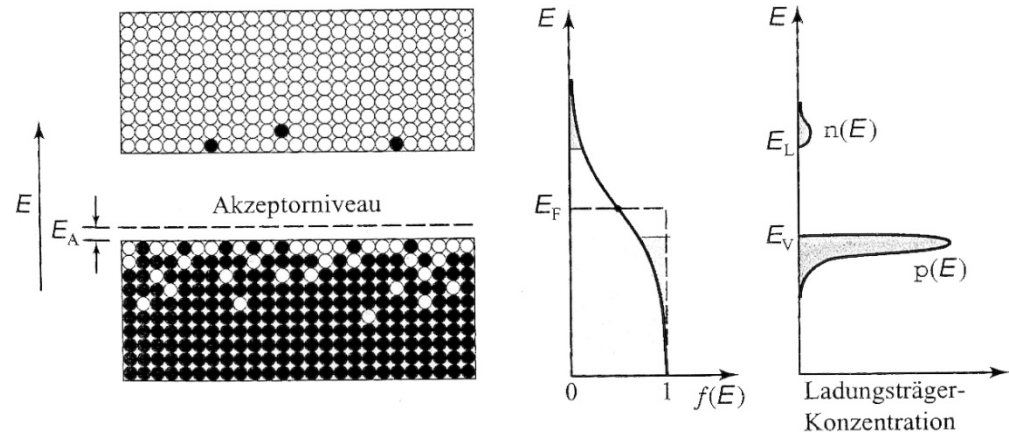
E von einem Loch besetzt wird. Bei $T = 0 \text{ K}$ ist $f(E) = 1$ für $E \leq E_F$, und $f(E) = 0$ für $E > E_F$; es gibt dann keine Elektronen im Leitungsband und keine Löcher im Valenzband.

Ladungsträgerkonzentration

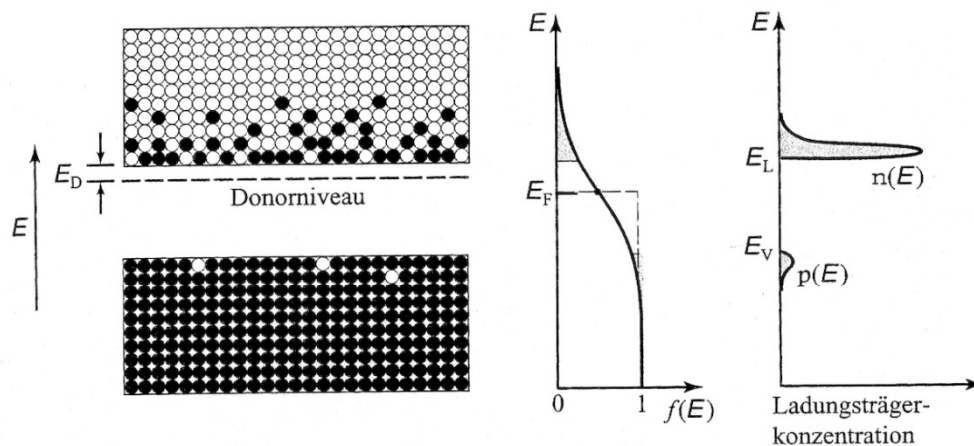
Intrinsicher Halbleiter



p-Halbleiter



n-Halbleiter



Ladungsträgerkonzentration

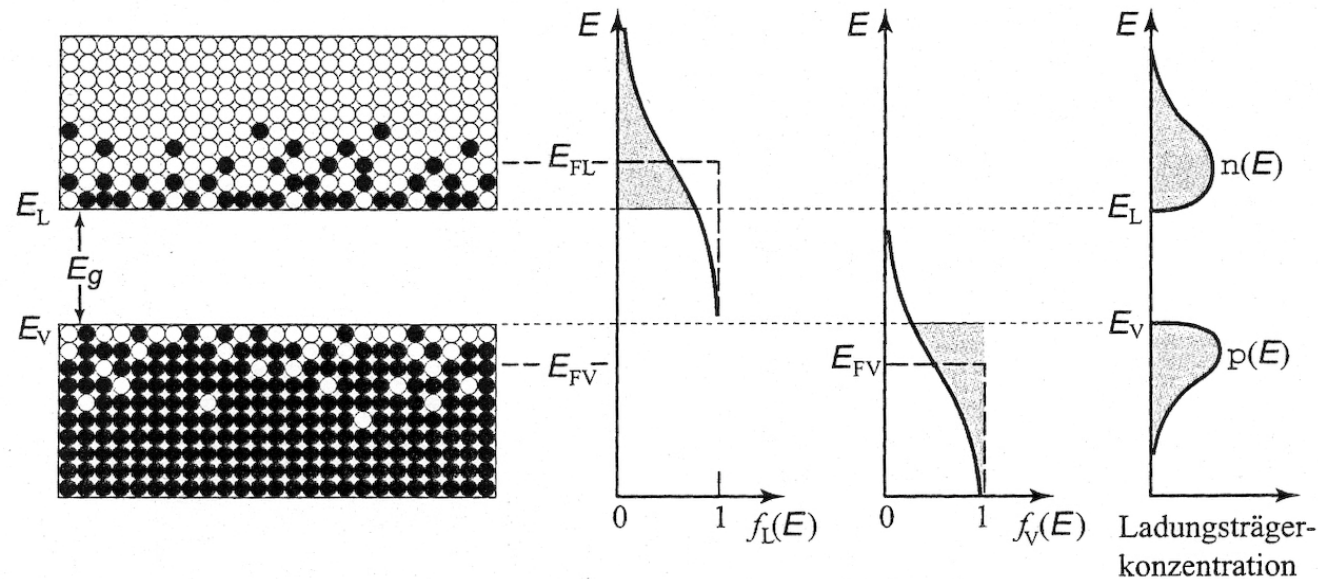


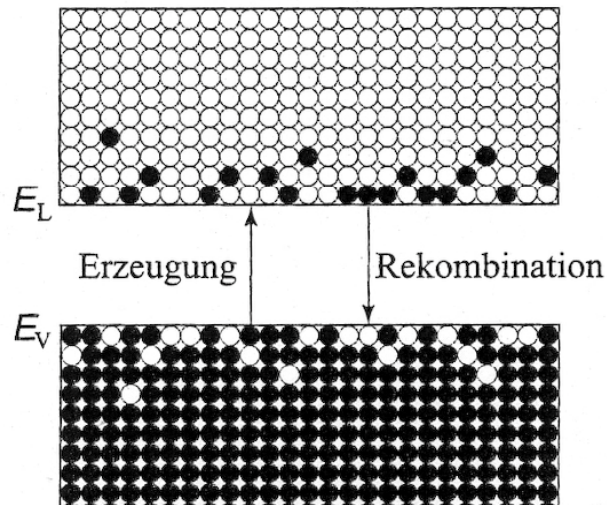
Tabelle 16.3 Intrinsische Ladungsträgerkonzentrationen bei $T = 300 \text{ K}$.^a

Material	n_i / cm^{-3}
Si	1.5×10^{10}
GaAs	1.8×10^6
GaN	1.9×10^{-10}

^aEinsetzen der in Tabelle 16.1 angegebenen Werte von m_L und m_V und der in Tabelle 16.2 angegebenen Werte für E_g in Gl. (16.16) ergibt *nicht* die hier aufgeführten Werte von n_i , da die Gleichung empfindlich von den genauen Werten der Parameter abhängt.

Erzeugung und Rekombination von Ladungsträgern

Elektron-Loch-Erzeugung und -Rekombination



Elektron-Loch-Rekombination an einer Haftstelle

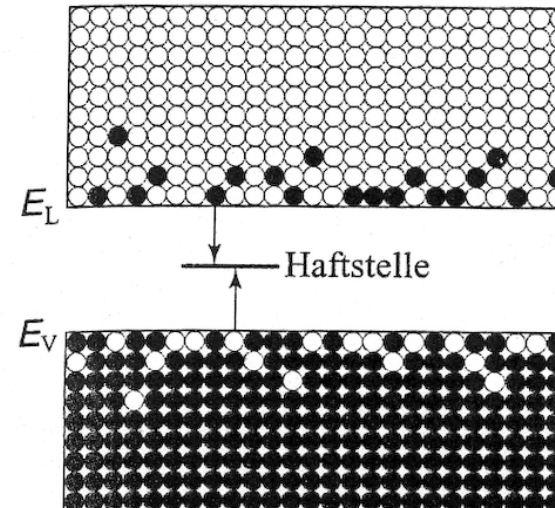


Tabelle 16.4 Typische Werte der Koeffizienten r_s der strahlenden Rekombination, der Rekombinationslebensdauer und der inneren Quantenausbeute η_i für ausgewählte Halbleiter.^a

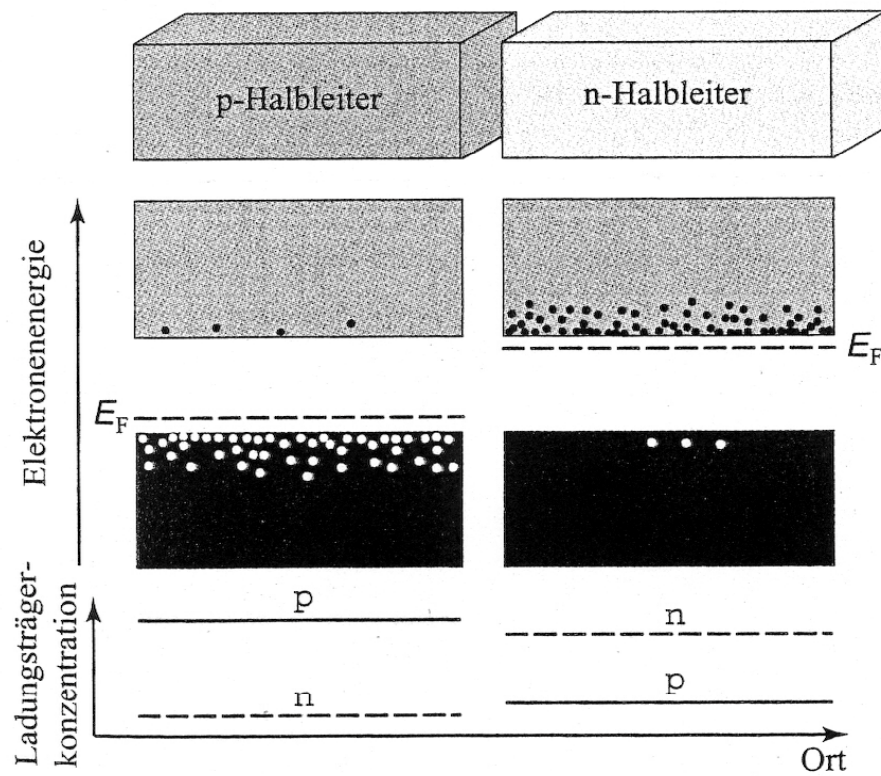
Material	$r_s / (\text{cm}^3 / \text{s})$	τ_s	τ_{ns}	τ	η_i
Si	10^{-15}	10 ms	100 ns	100 ns	10^{-5}
GaAs	10^{-10}	100 ns	100 ns	50 ns	0.5
GaN ^b	10^{-8}	20 ns	0.1 ns	0.1 ns	0.005

^aFür n-Halbleiter mit einer Ladungsträgerkonzentration $n_0 = 10^{17} / \text{cm}^3$ und einer Konzentration der Defektzentren von $10^{15} / \text{cm}^3$ bei 300 K.

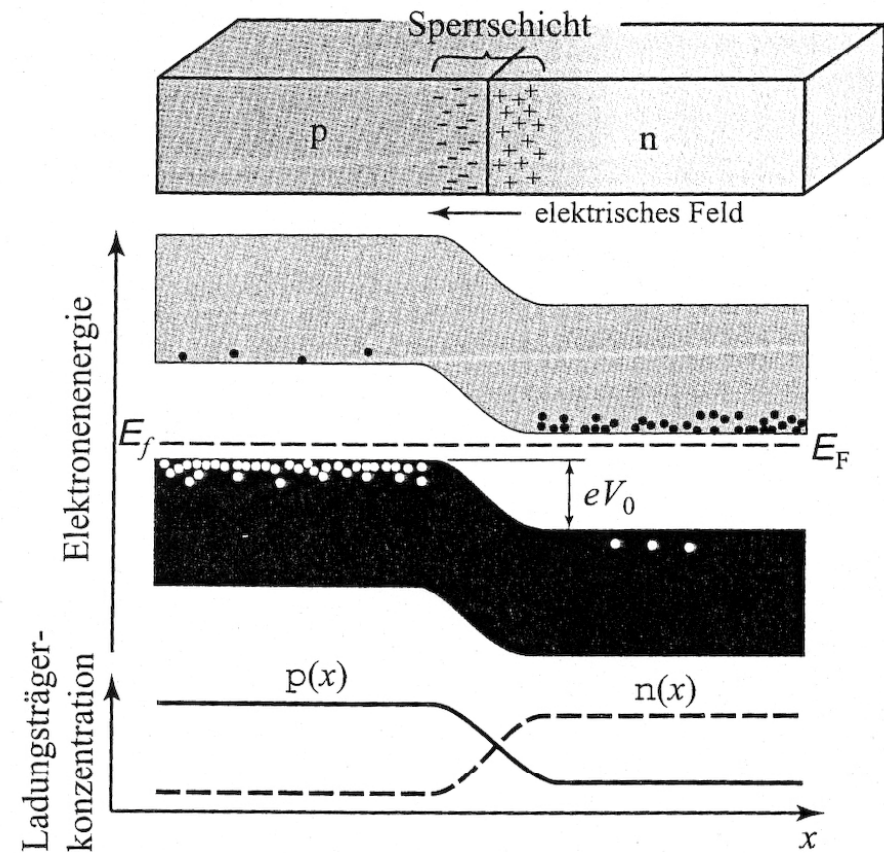
^bAus praktischen Gründen wurde InGaN verwendet; das vergrößert die innere Quantenausbeute auf $\eta_i \approx 0.3$.

Der pn-Übergang

Vor dem Kontakt



Im Kontakt (thermischen Gleichgewicht)



Photonenwechselwirkung in Volumenhalbleiter

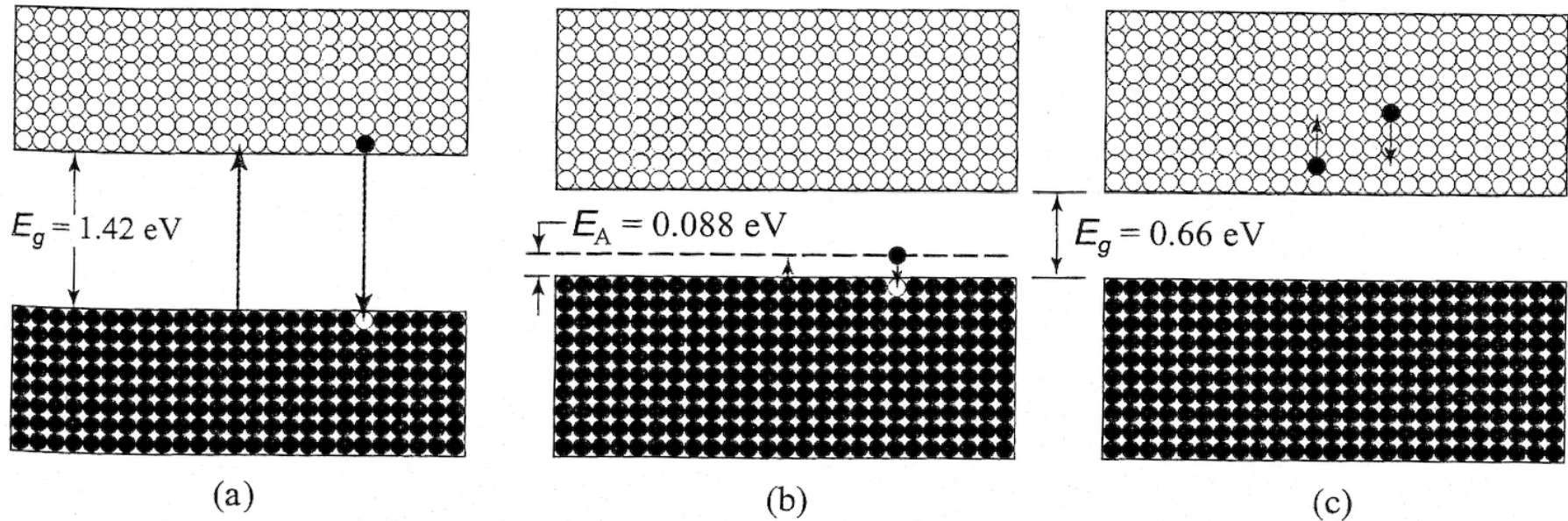


Abbildung 16.34 Beispiele für Absorption und Emission von Photonen in Volumenhalbleitern. (a) Übergänge von Band zu Band in GaAs können zur Absorption oder Emission von Photonen der Wellenlänge $\lambda_0 < \lambda_g = hc_0/E_g = 0.87 \mu\text{m}$ führen.

(b) Die Absorption eines Photons der Wellenlänge $\lambda_A = hc_0/E_A = 14 \mu\text{m}$ bewirkt einen Übergang aus dem Valenzband in ein Akzeptorniveau in Hg-dotiertem Ge (Ge:Hg). (c) Übergänge freier Ladungsträger innerhalb des Leitungsbands von Ge.

Photonen-Absorption und -Emission

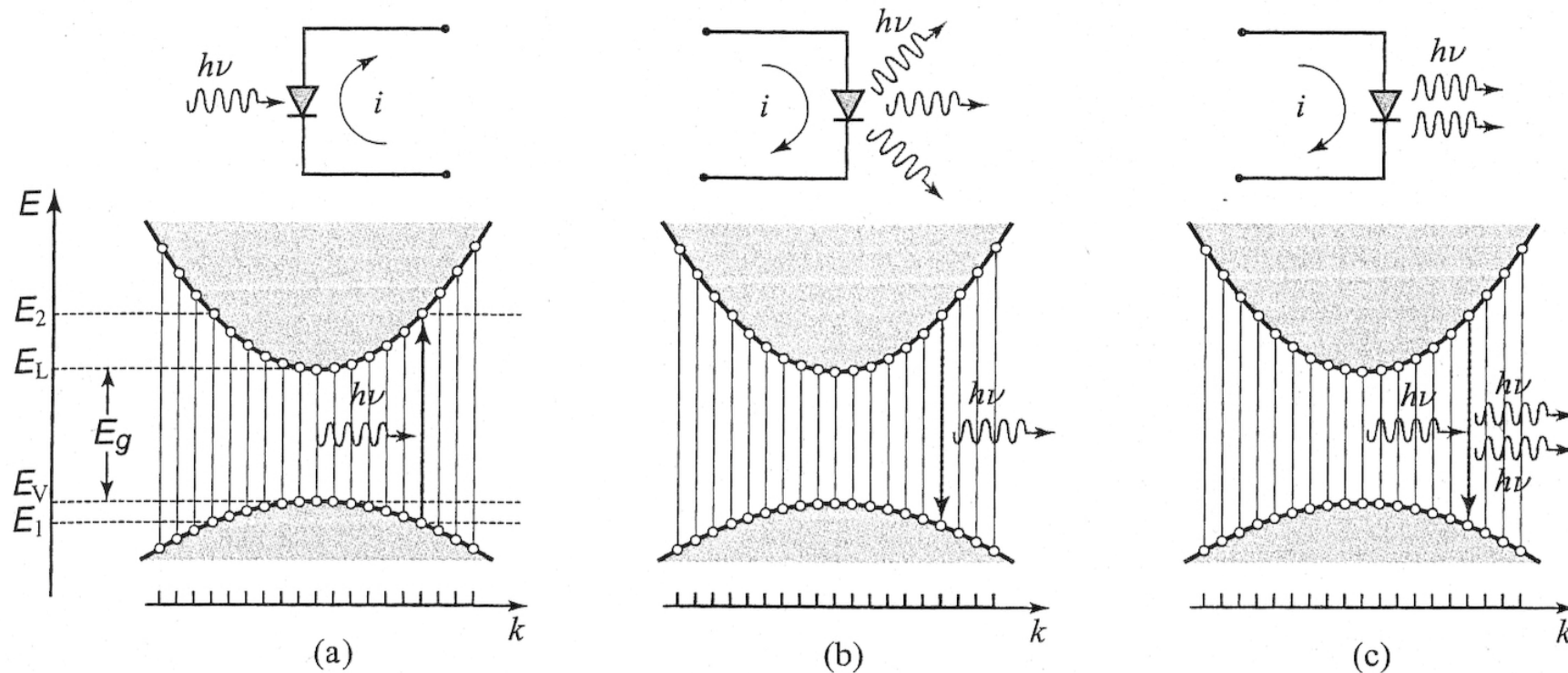


Abbildung 16.38 (a) Die Absorption eines Photons führt zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paars. Dieser Prozess wird bei der Photodetektion von Licht verwendet. (b) Die Rekombination eines Elektron-Loch-Paars führt zur spontanen Emission eines Photons. Auf

dieser Grundlage arbeiten LED. (c) Elektron-Loch-Rekombination kann durch ein Photon induziert werden. Das Ergebnis ist die induzierte Emission eines identischen Photons. Nach diesem Prinzip arbeiten Halbleiterlaserdioden.

Photonen-Emission

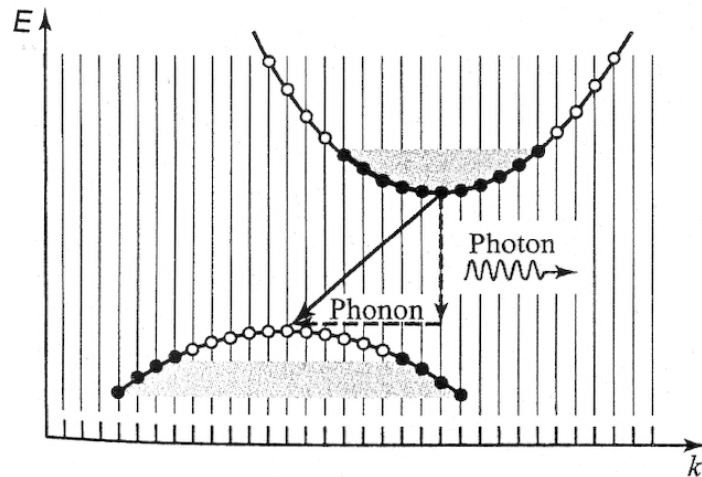


Abbildung 16.40 Photonenemission in einem Halbleiter mit indirekter Bandlücke. Die Rekombination eines Elektrons in der Nähe des Minimums des Leitungsbands mit einem Loch in der Nähe des Maximums des Valenzbands erfordert den Austausch von Energie *und* Impuls. Die Energie kann durch ein Photon abgeführt werden, aber für die Impulserhaltung sind ein oder mehrere Phononen erforderlich. Diese Art von Mehrteilchenwechselwirkung ist daher unwahrscheinlich.

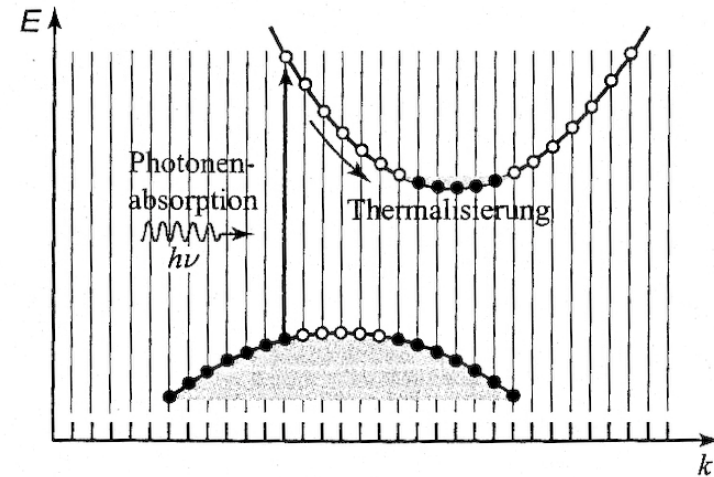


Abbildung 16.41 Photonenabsorption in einem Halbleiter mit indirekter Bandlücke über einen vertikalen (k -erhaltenden) Übergang. Das Photon erzeugt ein angeregtes Elektron im Leitungsband, wobei ein Loch im Valenzband zurückbleibt. Elektron und Loch vollziehen dann schnelle Übergänge in die tiefsten bzw. höchsten Niveaus des Leitungs- bzw. Valenzbands und geben ihre Energie dabei an Phononen ab. Da der Prozess sequentiell ist, ist er nicht unwahrscheinlich.

Photonen-Absorption

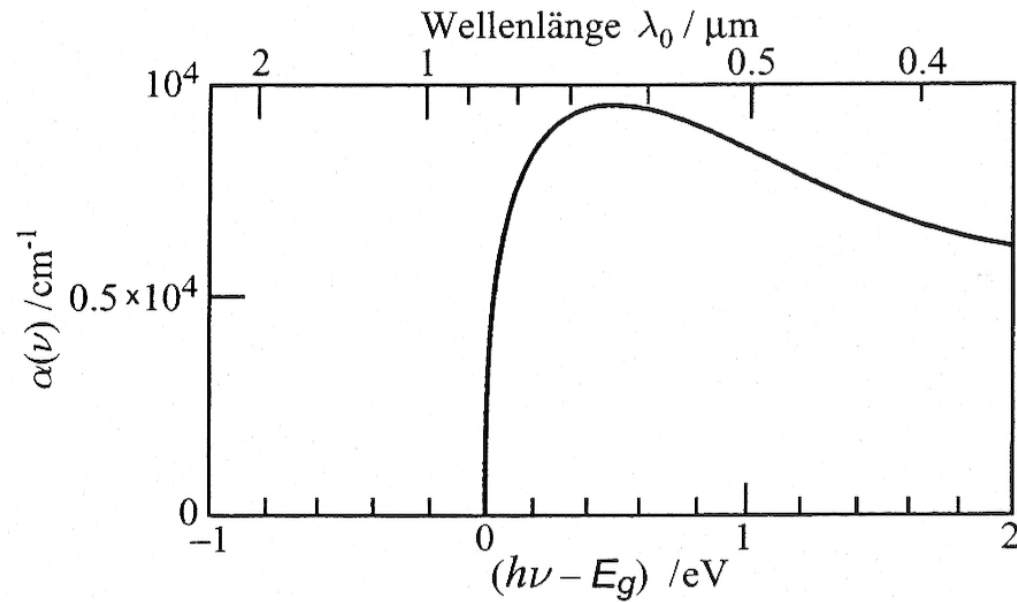


Abbildung 16.43 Berechneter Absorptionskoeffizient $\alpha(\nu)$ (cm^{-1}) aufgrund von direkten Interbandübergängen als Funktion der Photonenenergie $h\nu$ (eV) und der Wellenlänge λ_0 (μm) für GaAs. Diese Kurve sollte mit der in Abb. 16.36 gezeigten experimentellen Kurve verglichen werden, die alle Absorptionsmechanismen berücksichtigt.

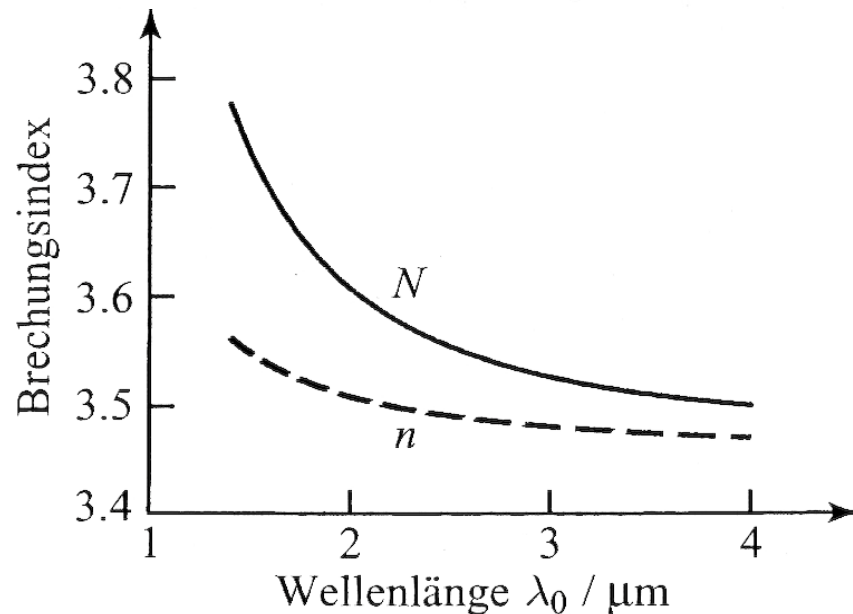


Abbildung 16.45 Brechungsindex n und Gruppenindex N für GaAs als Funktion der Wellenlänge λ_0 . Die Zahlenwerte wurden mithilfe der Sellmeiergleichung aus Tabelle 5.1 berechnet.

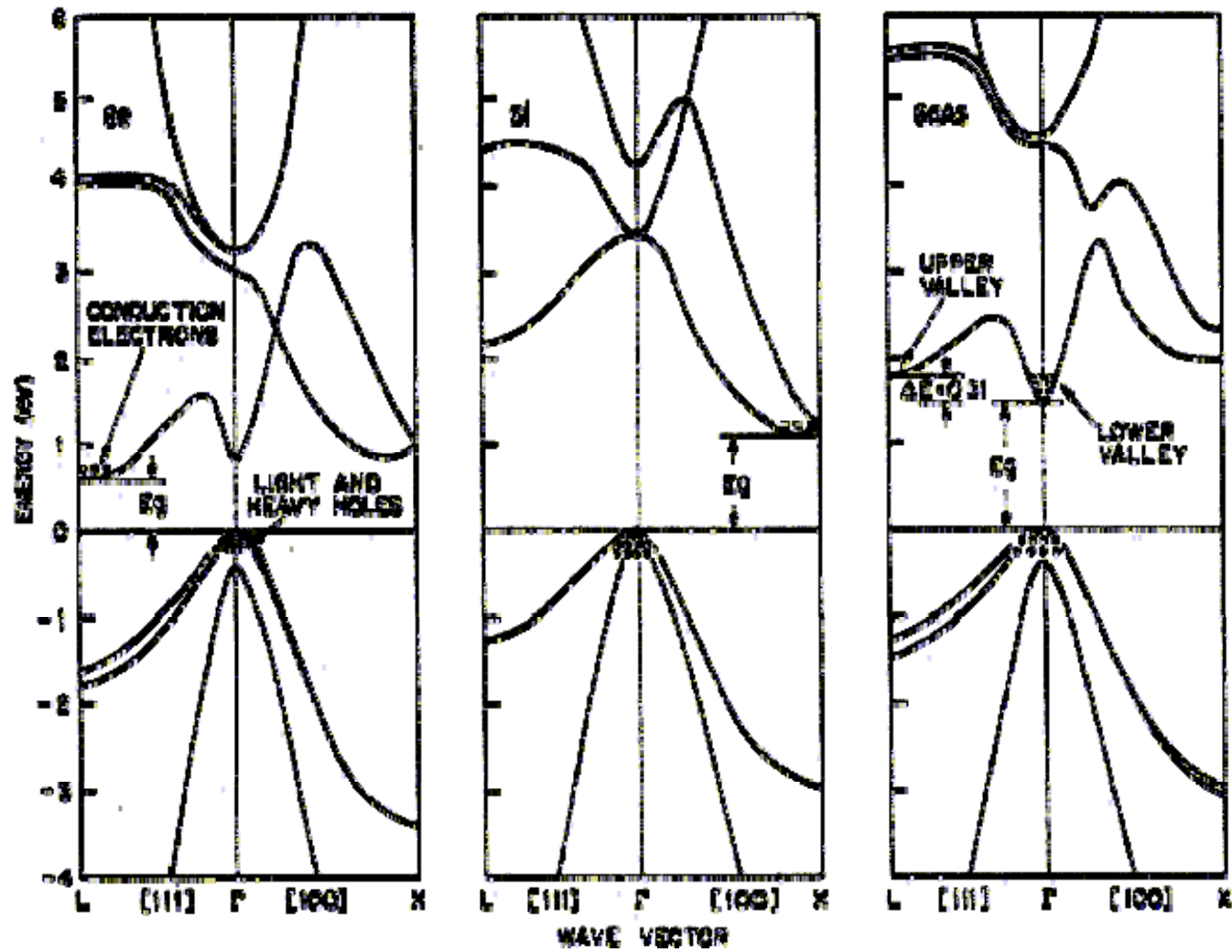
Photonen-Absorption

Tabelle 16.5 Brechungsindizes von ausgewählten Halbleitermaterialien.^a

Material	Brechungsindex
Elementhalbleiter	
Ge	4.0
Si	3.5
Binäre III-V-Halbleiter	
AlN	2.2
AlP	3.0
AlAs	3.2
AlSb	3.8
GaN	2.5
GaP	3.3
GaAs	3.6
GaSb	4.0
InN	3.0
InP	3.5
InAs	3.8
InSb	4.2

^aDaten für Photonenenergien in der Nähe der Bandlücke ($h\nu \approx E_g$) bei 300 K. Die Brechungsindizes ternärer und quaternärer Halbleiter können näherungsweise durch lineare Interpolation zwischen den Brechungsindizes ihrer Komponenten berechnet werden.

Halbleiter-Bandstruktur: Beispiele



Ge

Si

GaAs

Halbleiter-Bandstruktur und Zustandsdichte

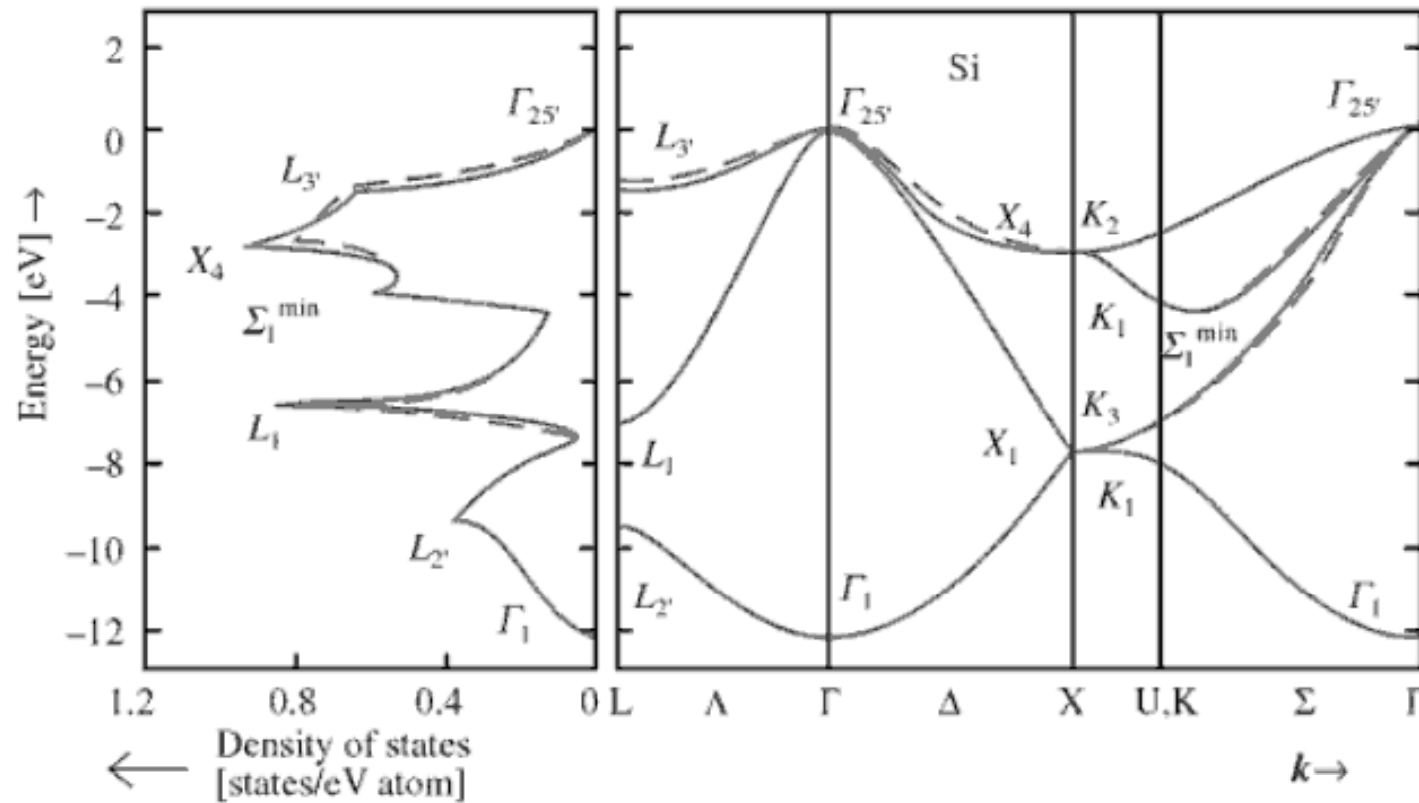
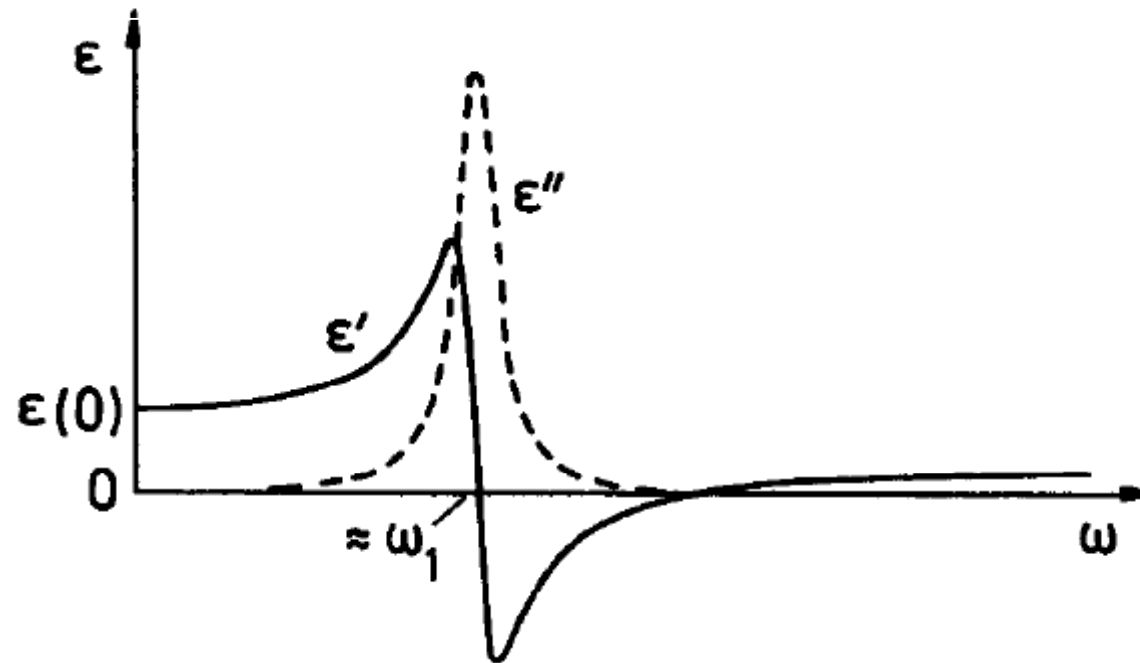


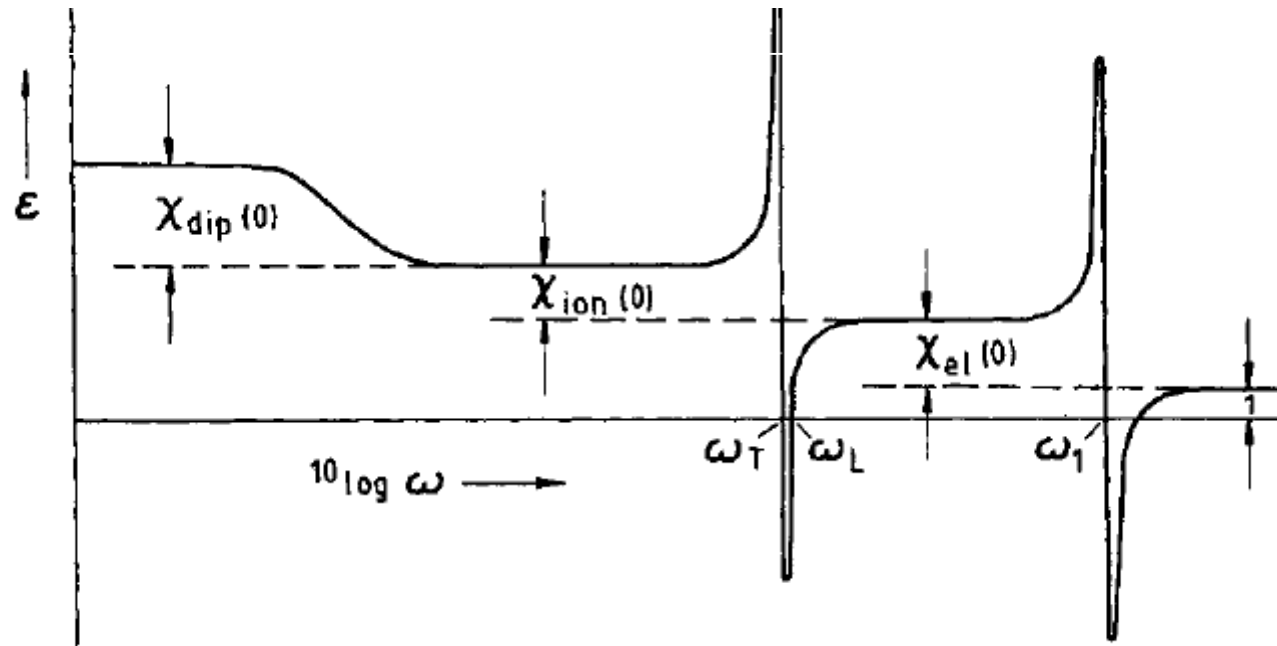
Fig. 2.24. The valence band structure and density of states (see Sect. 4.3.1 for definition) of Si calculated by the tight-binding method (*broken curves*) and by the empirical pseudopotential method (*solid lines*) [2.25]

Dielektrische Funktion



Verlauf des Realteils ϵ' und des Imaginärteils ϵ'' der dielektrischen Funktion in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω eines zeitlich periodischen elektrischen Feldes nach dem Oszillatormodell. Bei schwacher Dämpfung liegt die erste Nullstelle von ϵ' ungefähr bei der Resonanzfrequenz ω_1 . $\epsilon(0)$ ist die statische Dielektrizitätskonstante.

Dielektrische Funktion



Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante eines piezoelektrischen Ionenkristalls, schematisch. ω_T und ω_L transversale bzw. longitudinale optische Eigenfrequenz, ω_1 Resonanzfrequenz bei der elektronischen Polarisation. $\chi_{el}(0)$, $\chi_{ion}(0)$ und $\chi_{dip}(0)$ sind die Beiträge der elektronischen, ionischen und Orientierungspolarisation zum statischen Wert der Dielektrizitätskonstante.

Dielektrische Funktion von Silizium

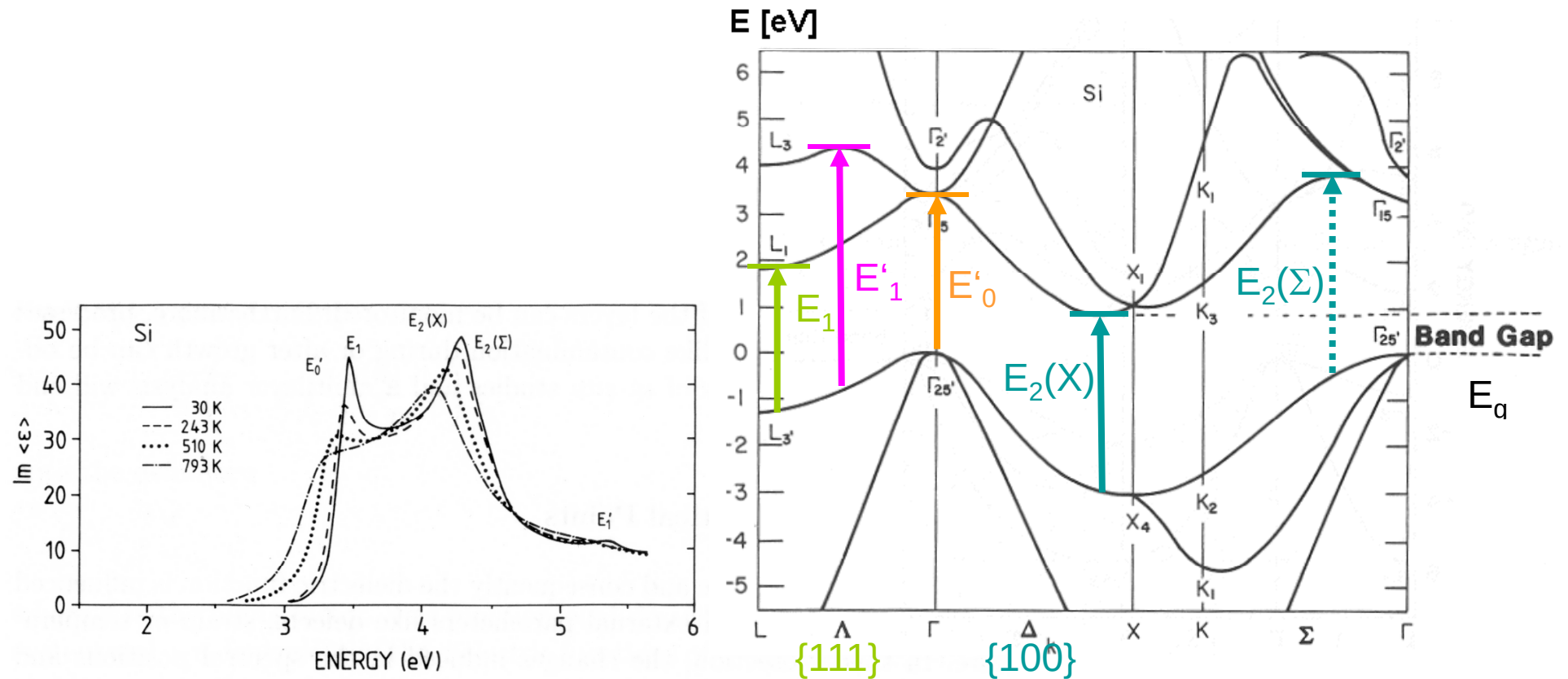


Fig. 3.13. The dielectric function of Si for various temperatures. Lowering the temperatures results in sharper features in the dielectric function and consequently, the values of the imaginary part of the dielectric function are strongly increasing

Absorption in Halbleitern

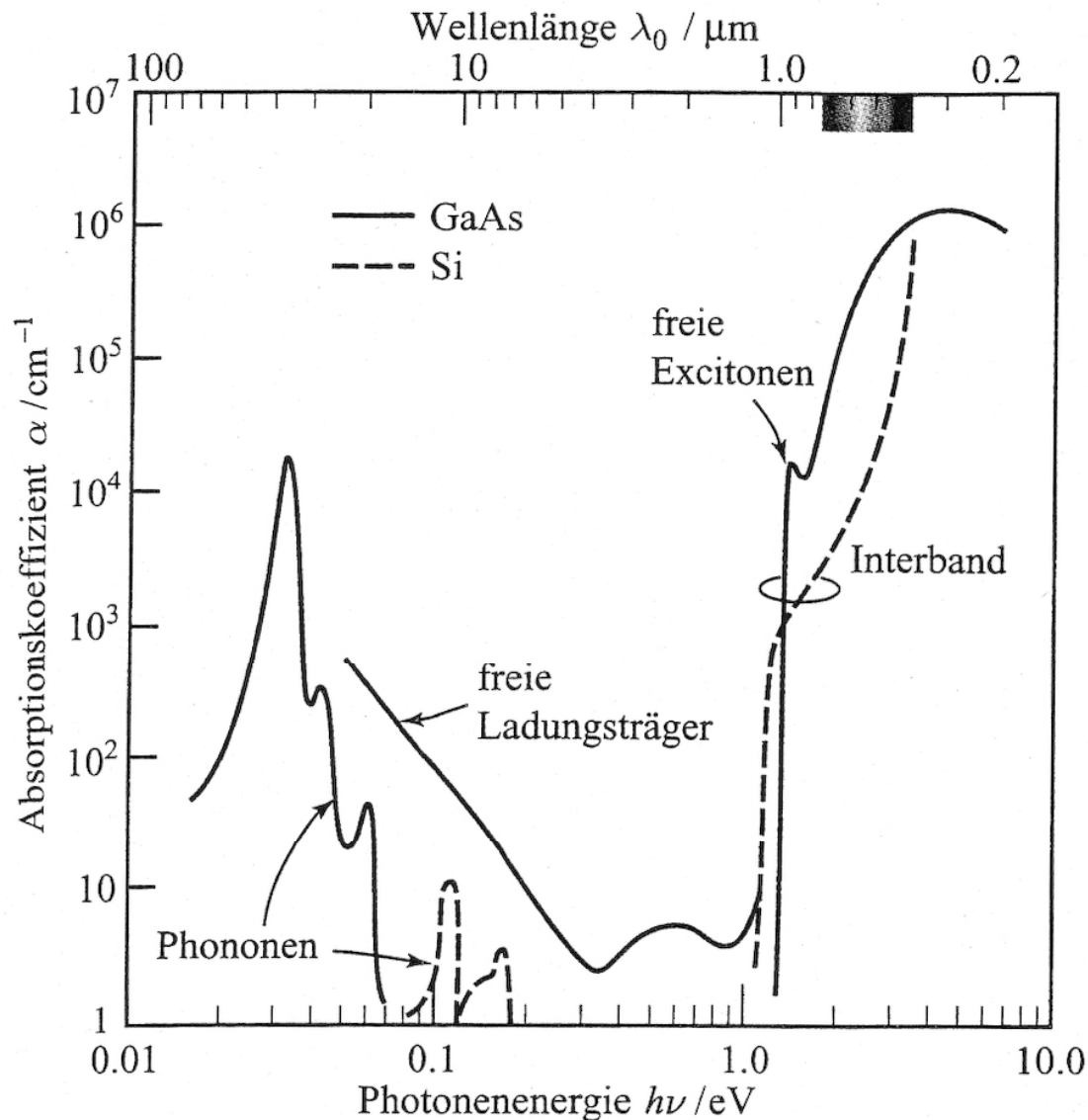
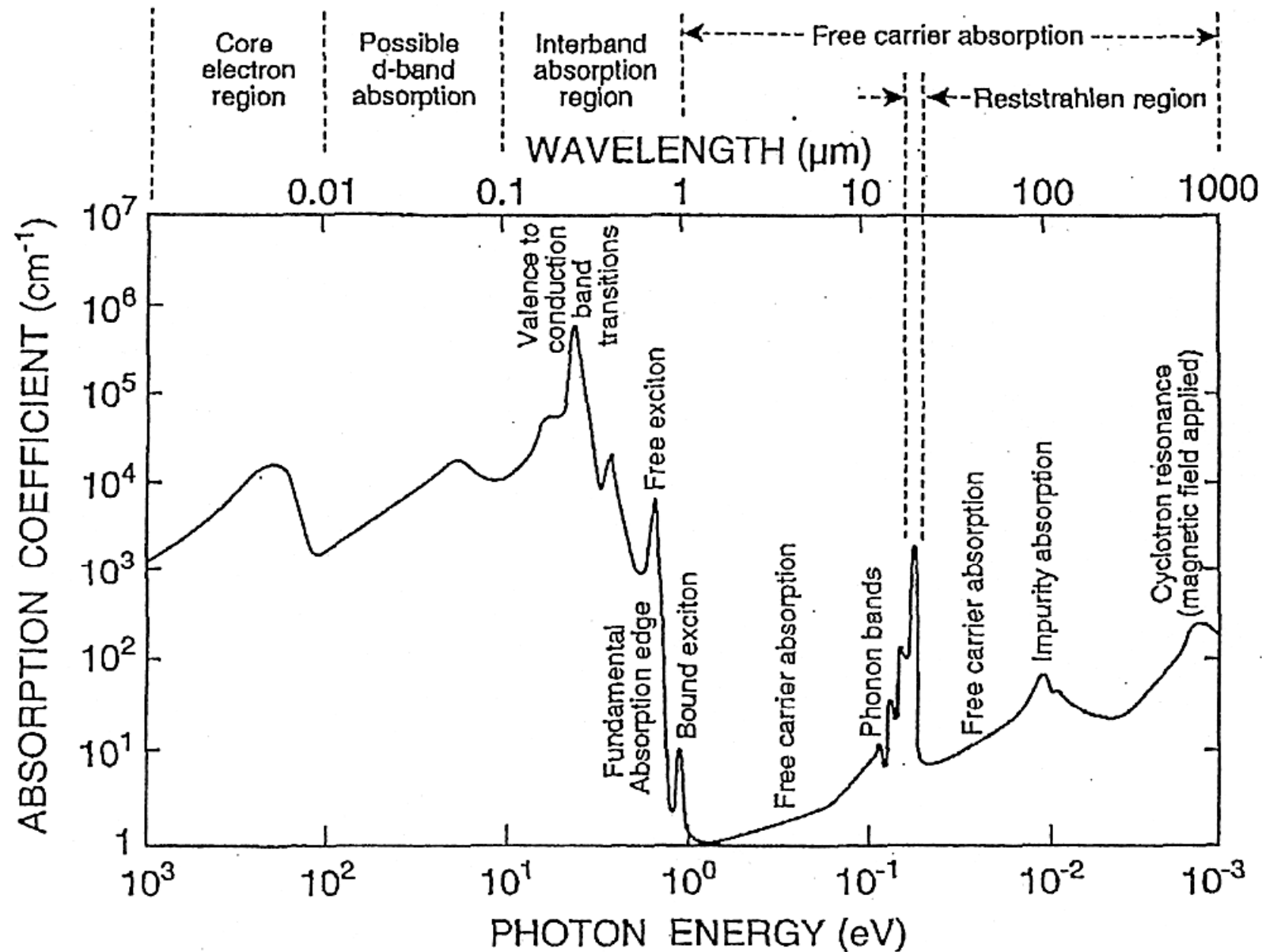


Abbildung 16.35 Beobachteter optischer Absorptionskoeffizient α als Funktion der Photonenenergie und -wellenlänge für Si und GaAs im thermischen Gleichgewicht bei $T = 300$ K. Die Bandlücke E_g ist 1.12 eV für Si und 1.42 eV für GaAs. Silicium ist im Bereich $\lambda_0 \approx 1.1$ bis $12 \mu\text{m}$, intrinsisches GaAs im Bereich $\lambda_0 \approx 0.87$ bis $12 \mu\text{m}$ relativ transparent (siehe Abb. 5.14).

Absorption in Halbleitern



Absorption in Halbleitern

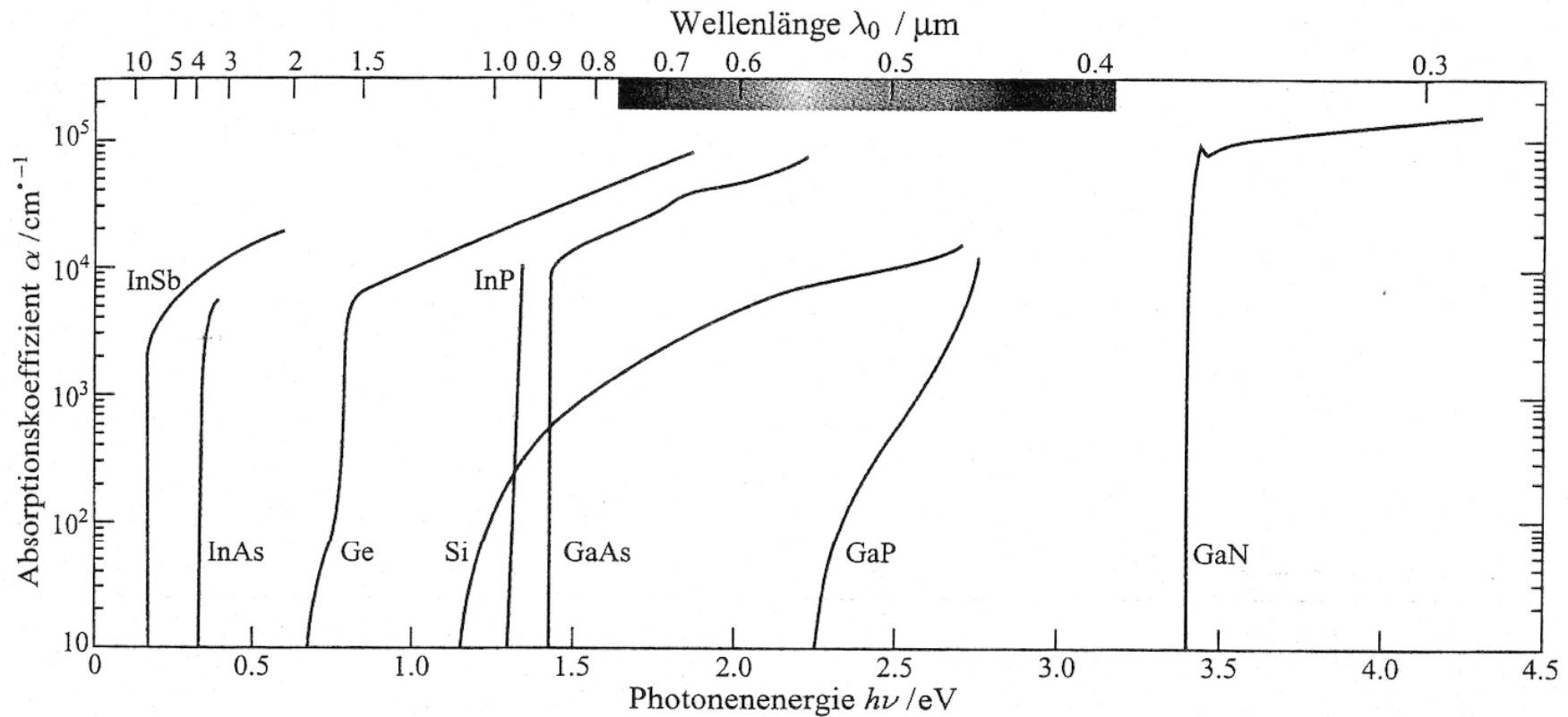


Abbildung 16.36 Absorptionskoeffizient als Funktion der Photonenenergie und -wellenlänge für Ge, Si, GaAs, GaN und einige andere binäre III–V-Halbleiter bei $T = 300 \text{ K}$ (vergrößerte Skala).

Bandlücke von einigen Halbleitern

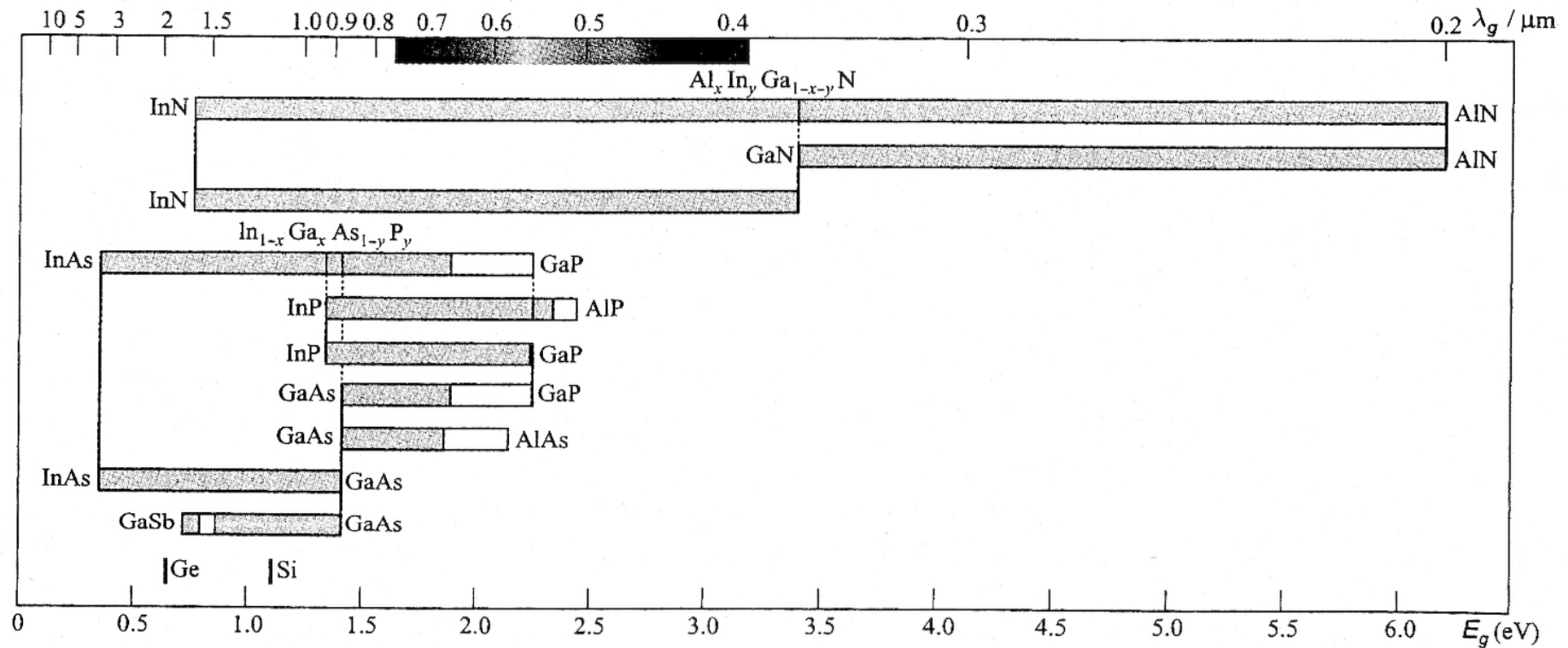
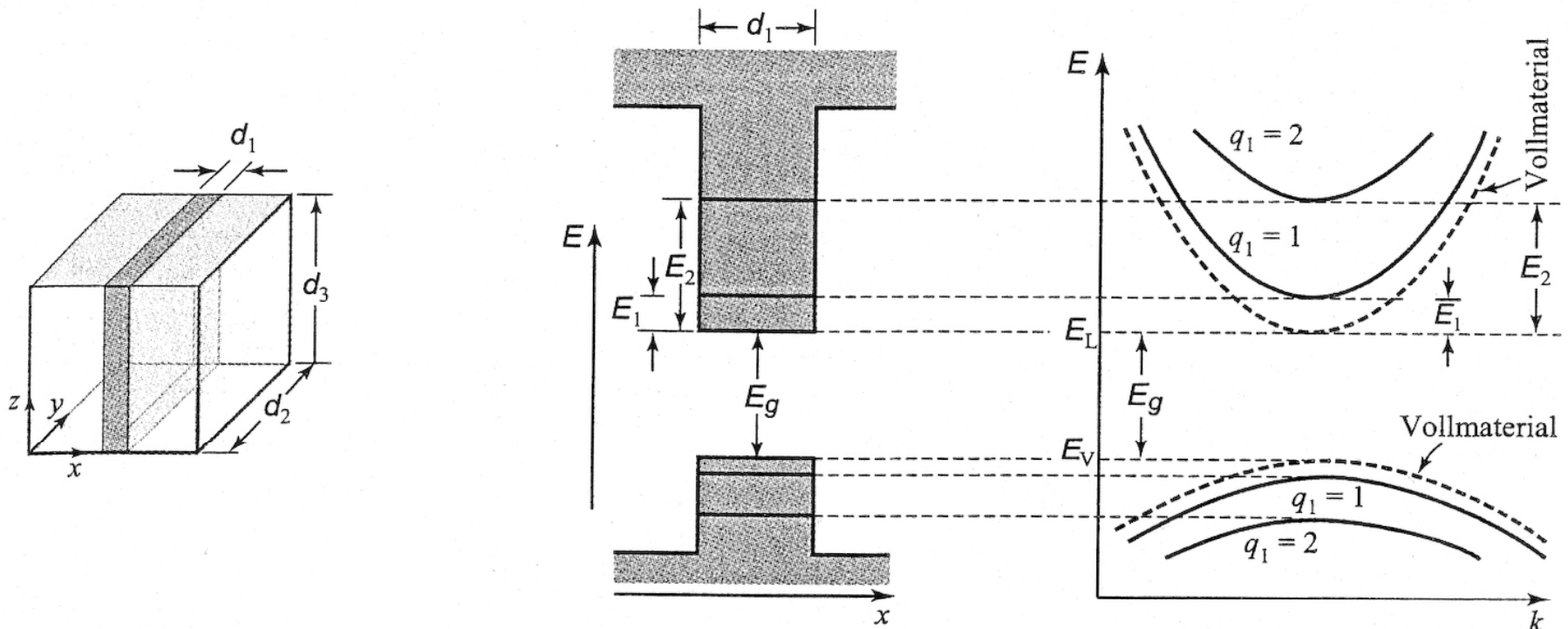


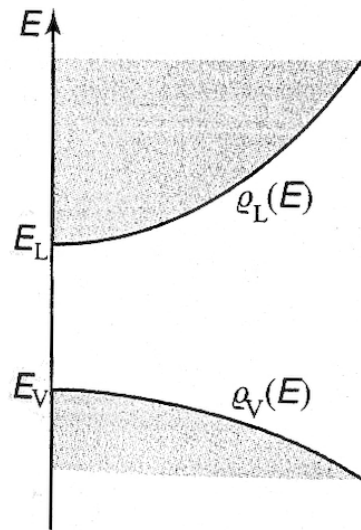
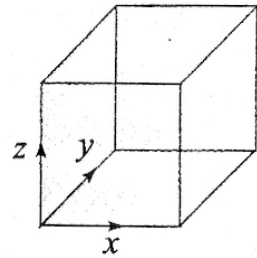
Abbildung 16.37 Wellenlängen λ_g und Energien E_g der Bandlücke für ausgewählte Element- und binäre, ternäre und quaternäre III–V-Halbleiternmaterialien. Die schattierten

Gebiete zeigen Zusammensetzungen, für die die Materialien eine direkte Bandlücke besitzen.

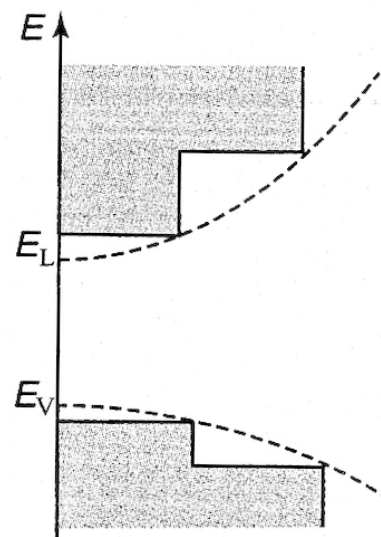
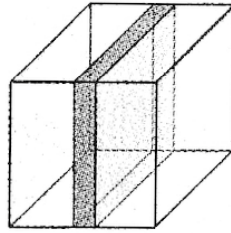
Energieniveaudiagramm für Elektronen und Löcher in einer Quantenschicht



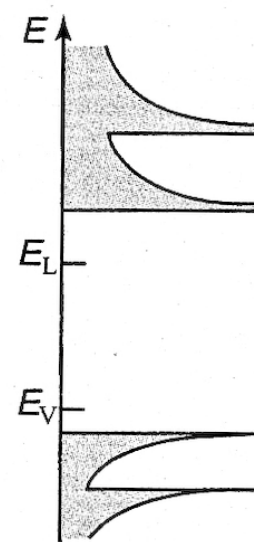
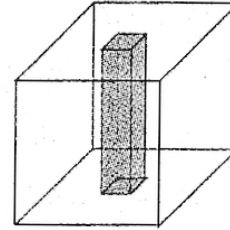
Zustandsdichte in quantenbeschränkten Systemen



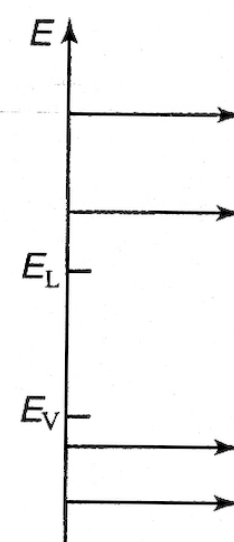
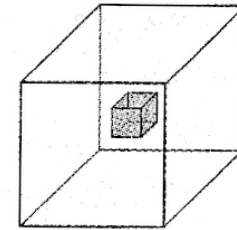
Vollmaterial



Quantenschicht

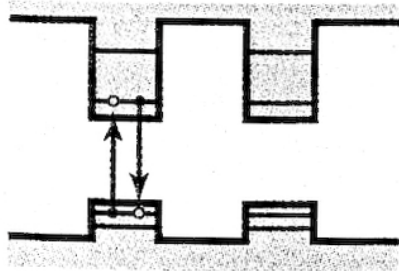


Quantendraht

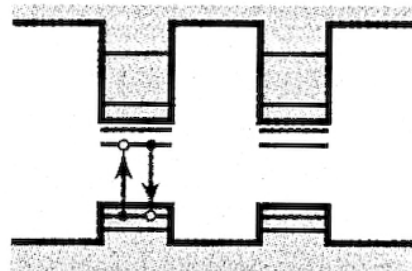


Quantenpunkt

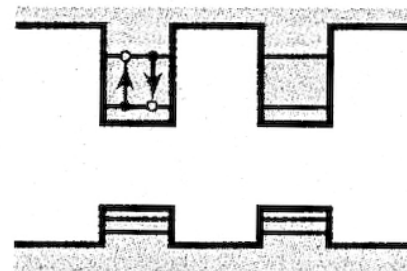
Absorption und Emission von Photonen in Mehrfachquantenschichten



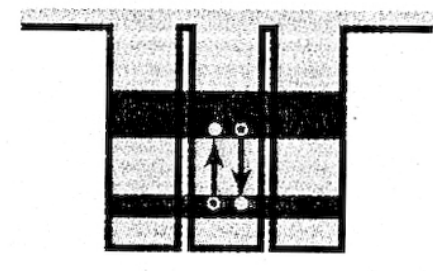
Interband-
Übergänge



Exzitonische
Übergänge



Übergänge
zwischen
Unterbändern



Miniband
Übergänge in
einer
Übergitter