Fortschrittliche Laserstrukturen

Laser werden für viele Anwendungen eingesetzt. In der Regel sind eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften gewünscht:

- Niedriger Schwellstrom (z. B. optische Nachrichtenübertragung)
- Sehr schmale Emissionslinien (Wellenlängenmultiplexing, kohärente Detektion/Heterodyn-Verfahren)
- Hohe Modulierbarkeit (z. B. optische Nachrichtentechnik)

Zunächst soll es um die ersten beiden Punkte gehen.

Doppelheterostruktur-Laser

- Es ist günstig die aktive Schicht p zu dotieren. Wegen der größeren Masse ist f^h sehr viel kleiner als f^e. Durch Dotierung kann die Löcherdichte erhöht werden und so bei geringerer Ladungsträgerinjektion die Laserbedingung erfüllt werden.

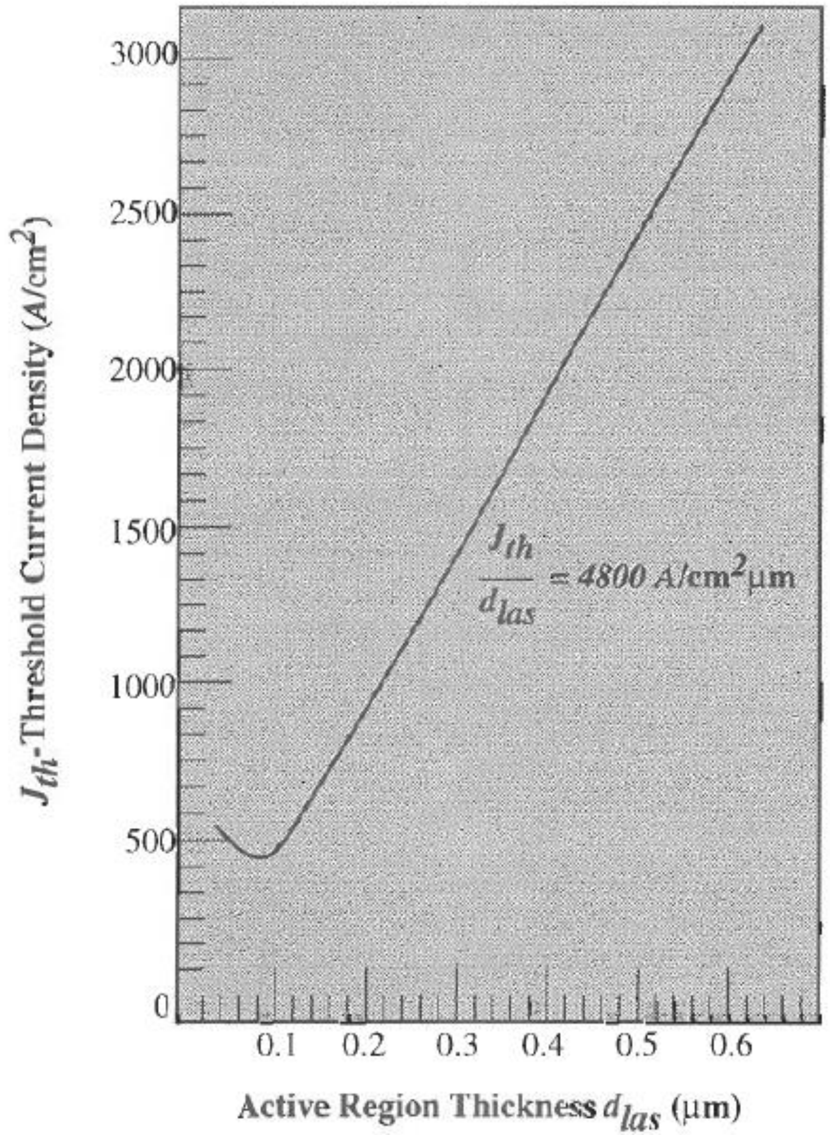
- Die ersten DHS-Laser hatten eine aktive Schicht von $d_{Laser} \geq 1\mu m$ Breite

- Für so große Breiten ist $\Gamma \sim 1 \Rightarrow n_{th,3D}$ ist unabhängig von d_{Laser}

- Für die Schwellstromdichte gilt: $$J_{th} = \frac{e n_{th,3D} d_{Laser}}{\tau_{th}} \sim d_{Laser}$$

- In τ_{th} (Rekombinationszeit an der Schwelle) stecken alle Rekombinationsprozesse drin

Doppelheterostruktur -Laser: J_{th} vs. d_{Laser}



- Je dünner die aktive Schicht, desto niedriger die Schwellstromdichte
- Bei etwa 150 nm bricht der lineare Zusammenhang ab
- Schwellstrom steigt für kleine Dicken (ab 50 nm) wieder an
- Ursache ist die starke Abnahme von Γ bei so kleinen Dicken, so dass der Cavity-Gain sehr klein wird

Fortschrittliche Laserstrukturen

Laser werden für viele Anwendungen eingesetzt. In der Regel sind eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften gewünscht:

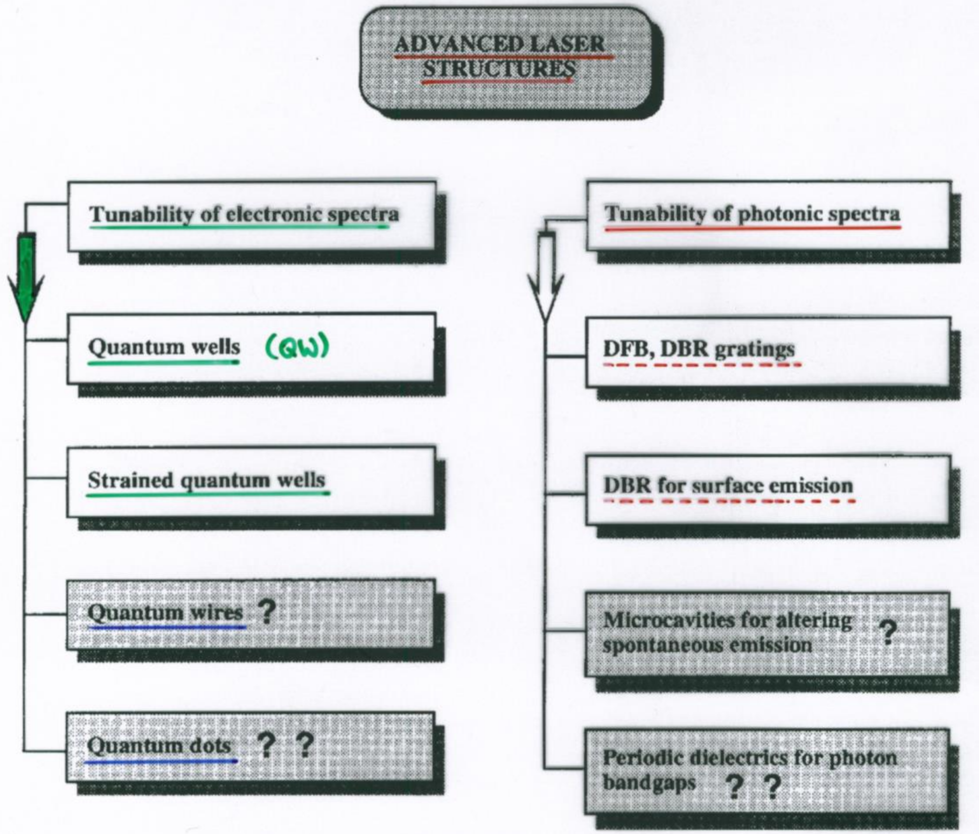


Figure 10.11: Approaches used to fabricate advanced semiconductor lasers. Question marks are placed after approaches where considerable technological challenges remain and whose merit is not yet established.

Einschub: Niedrigdimensionale Systeme

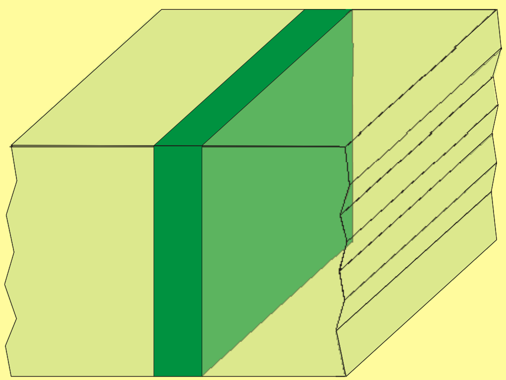
Wird die Bewegung der Ladungsträger in einer oder mehr Dimensionen auf der Skala der deBroglie-Wellenlänge eingeschränkt, so spielen Quantisierungseffekte eine Rolle:

- Das Spektrum der erlaubten Energien ändert sich
- Die Zustandsdichten hängen von der Dimensionalität ab
- Die Rekombinationsdynamik ändert sich
- Die Exzitonenbindungsenergie ändert sich u. U.

Man spricht von 3D-, 2D-, 1D-, 0D-Systemen!

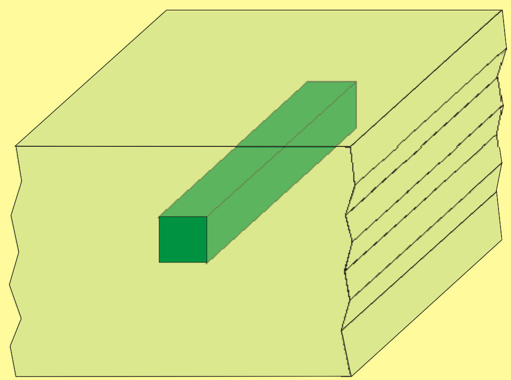
Einschub: Niedrigdimensionale Systeme

1D-Einschluss
(Quantenfilme,
2D-System)



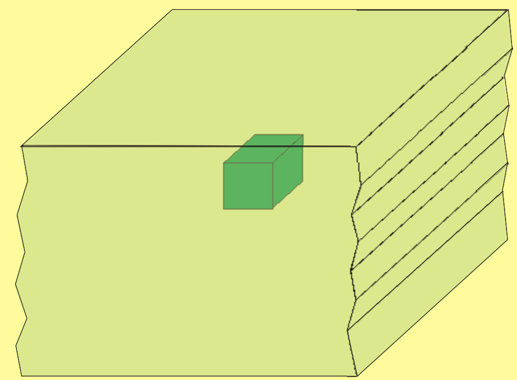
Schicht-
strukturen

2D-Einschluss
(Quantendrähte,
1D-System)



Selbstorganisiertes
Wachstum

3D-Einschluss
(Quantenpunkte,
0D-System)



Selbstorganisiertes
Wachstum

Niedrigdimensionale Systeme: Dispersionsrelationen

In parabolischer Näherung (isotrope effektive Masse) gelten folgende Dispersionsrelationen E(**k**):

3D-System: $D(E) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m^*}(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$

2D-System: $D(E) = E_{n,z} + \frac{\hbar^2}{2m^*}(k_x^2 + k_y^2) = E_{n,z} + \frac{\hbar^2}{2m^*} k^2 \quad ,$

Einschränkung in z-Richtung

1D-System: $D(E) = E_{n,z} + E_{m,y} + \frac{\hbar^2}{2m^*} k_x^2 = E_{n,m} + \frac{\hbar^2}{2m^*} k^2 \quad ,$

Einschränkung in z- und y-Richtung

0D-System: $D(E) = E_{n,z} + E_{m,y} + E_{o,x} = E_{n,m,o} \quad ,$

Einschränkung in z-, y- und x-Richtung

3D-Systeme: Zustandsdichte

In parabolischer Näherung (isotrope effektive Masse) lässt sich folgende Zustandsdichten für ein 3D-System herleiten:

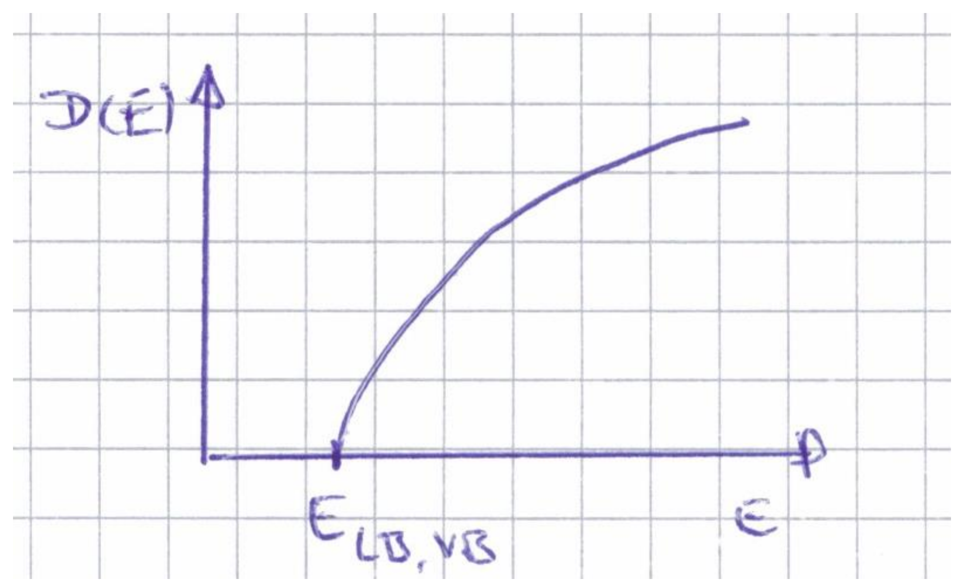
$$N(k) = \underbrace{2}_{\text{Spin}} \underbrace{\frac{4}{3}\pi k^3}_{\substack{\text{Kugel im}\\ \text{k-Raum}}} \underbrace{\left(\frac{L}{2\pi}\right)^3}_{\substack{\text{Platz pro}\\ \text{Zustand}}} = \text{Anzahl der Zustände im Bereich } q \leq k$$

$$\boxed{D(E) = \frac{1}{V}\frac{dN}{dE} = \frac{(2m^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3}\sqrt{E}}$$

Einheit: $\dfrac{1}{\text{eVm}^3}$

Beachte: Bandminimum bei $E = 0$,

auf das Volumen $V = L^3$ normiert



2D Systeme: Zustandsdichte

In parabolischer Näherung (isotrope effektive Masse) lässt sich folgende Zustandsdichten für ein 2D-System herleiten:

$$\mathrm{N(k)} = \underbrace{2}_{\textit{Spin}} \; \underbrace{\pi k^2}_{\substack{\text{Kreis in} \\ \text{k-Ebene}}} \; \underbrace{\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2}_{\substack{\text{Platz pro} \\ \text{Zustand}}} = \text{Anzahl der Zustände im Bereich } q \le k$$

Beachte: Dies gilt pro Subband, also pro n bzw. $E_{z,n}$

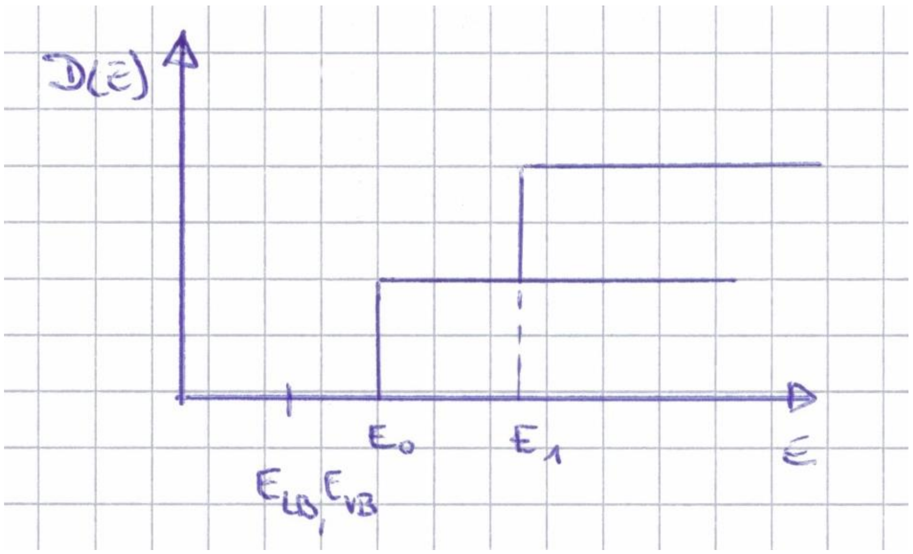
$$D(E) = \frac{1}{V}\frac{dN}{dE} = \frac{m^*}{\pi\hbar^2}\Theta(E - E_{z,n}) \qquad \text{Einheit: } \frac{1}{\mathrm{eVm}^2} \;,$$

"Volumen" in 2D ist eine Fläche $A = L^2$

Beachte: Die Zustandsdichte pro Subband ist konstant, insgesamt erhält man eine "Treppe"

$$\boxed{D(E) = \frac{m^*}{\pi\hbar^2}\sum_n \Theta(E - E_{z,n})}$$

mit Θ = Heaviside-Funktion



1D Systeme: Zustandsdichte

In parabolischer Näherung (isotrope effektive Masse) lässt sich folgende Zustandsdichten für ein 1D-System herleiten:

$$N(k) = \underbrace{2}_{\text{Spin}}\ \underbrace{2k}_{\text{Linie}}\ \underbrace{\frac{L}{2\pi}}_{\text{Platz pro Zustand}} = \text{Anzahl der Zustände im Bereich } q \le k$$

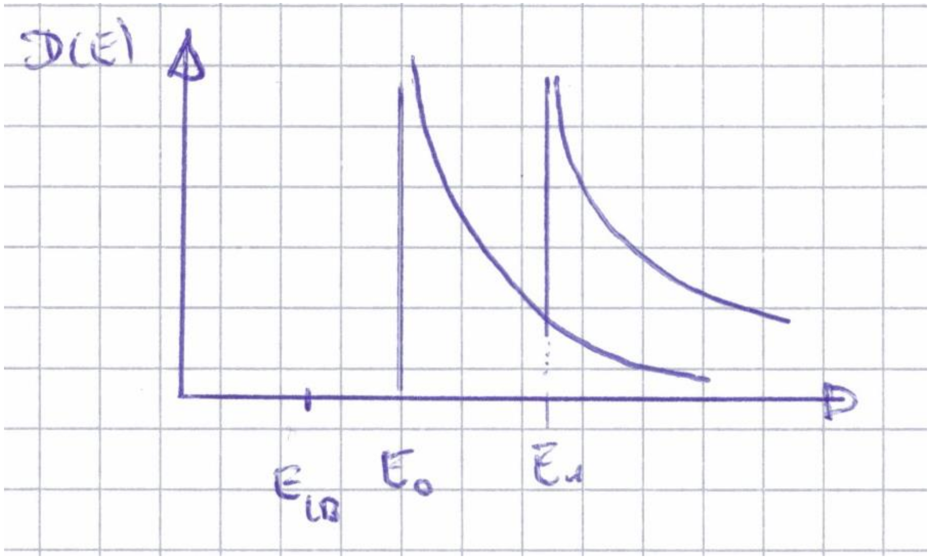
Beachte: Dies gilt pro Subband, also pro n, m bzw. $E_{z,y,n,m}$

$$D(E) = \frac{1}{V}\frac{dN}{dE} = \frac{\sqrt{2m^*}}{\pi\hbar}\frac{1}{\sqrt{E - E_{y,z,n,m}}} \qquad \text{Einheit: } \frac{1}{\text{eVm}} \ ,$$

"Volumen" in 1D ist eine Länge (L)

Beachte: Die Gesamtzustandsdichte ergibt sich durch Summation

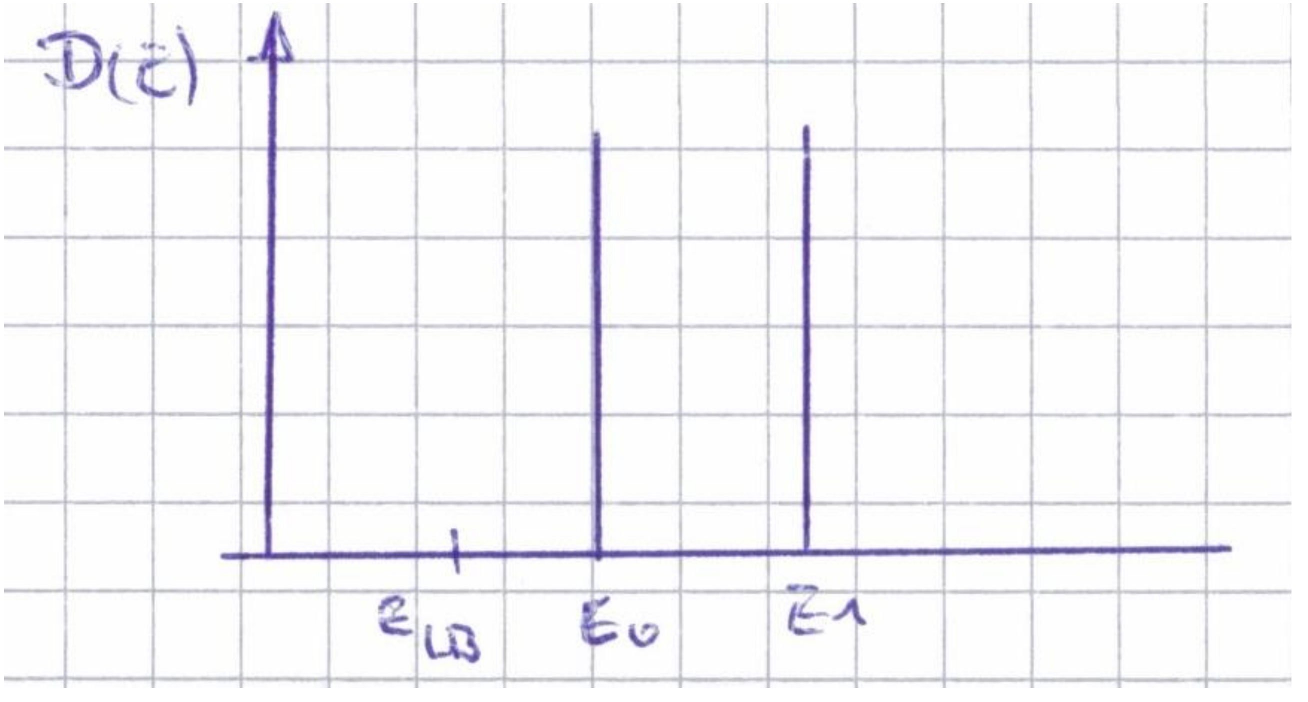
$$\boxed{D(E) = \frac{\sqrt{2m^*}}{\pi\hbar}\sum_{n,m}\frac{1}{\sqrt{E - E_{y,z.n,m}}}}$$



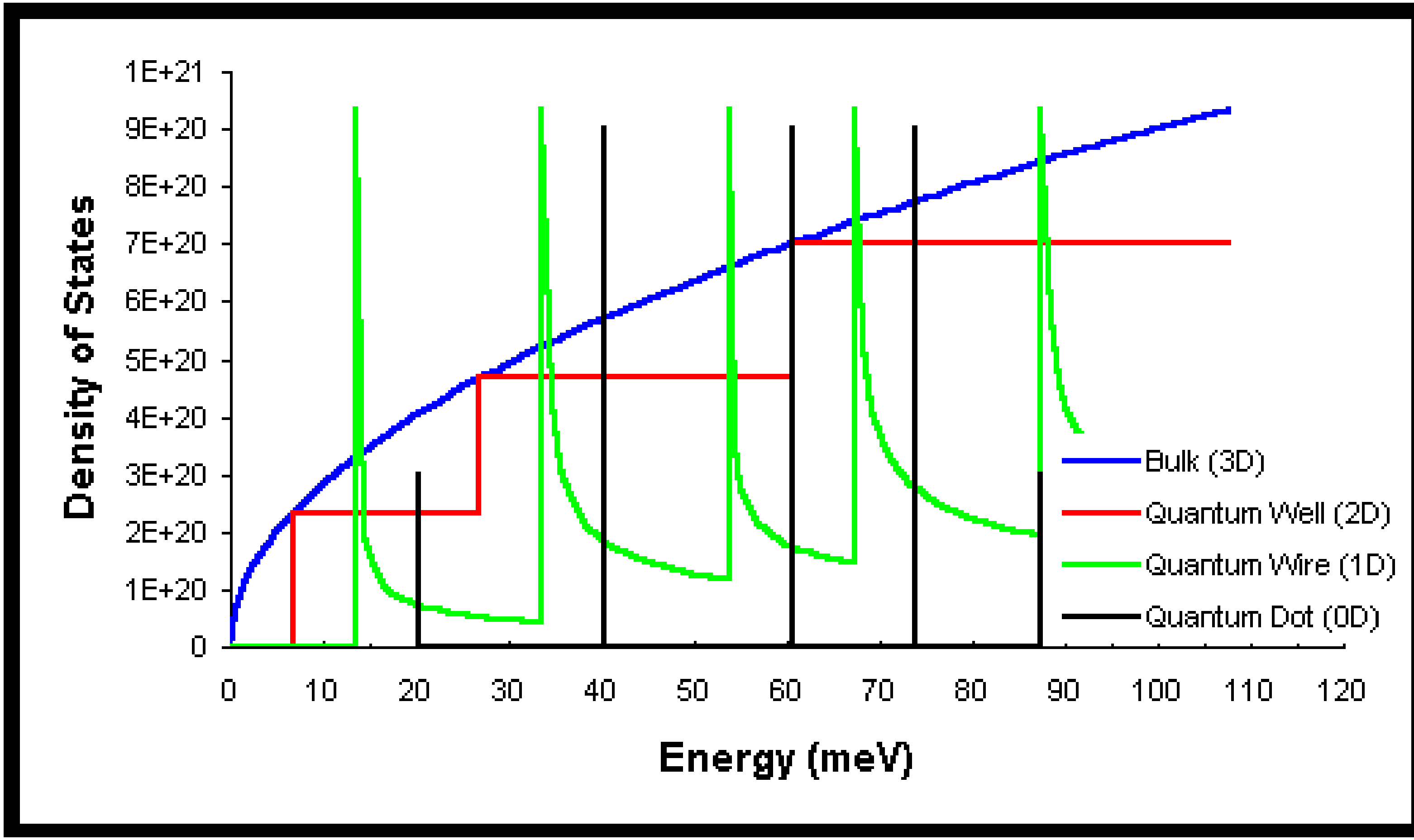
0D Systeme: Zustandsdichte

- Für einen Quantenpunkt ist die Zustandsdichte diskret, wie bei einem Atom
- Hängt nicht von irgendeiner Näherung ab!

$$\boxed{D(E) = \delta(E - E_{n,m,o})}$$



Niedrigdimensionale Systeme: Zustandsdichte



effektive Zustandsdichte

Die effektive Zustandsdichte verknüpft für einen nicht-entarteten HL die Ladungsträgerdichte und die Zustandsdichte wie folgt:

$$n = \int_{E_{c,bottom}}^{E_{c,top}} D(E) f(E) dE = N_C e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

Damit ergibt sich in 3D:

$$n = \int_{E_{C,bottom}}^{E_{C,top}} D_{3D}(E) f(E) dE = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}$$

$$N_C^{3D} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

effektive Zustandsdichte

Für die effektive Zustandsdichte (pro Subband!) in 2D gilt:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} D_{2D}(E) e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE = \int_{E_C}^{\infty} \frac{m^*}{\pi\hbar^2} e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE = N_C^{2D} e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}}$$

$$\boxed{N_C^{2D} = \frac{m^*}{\pi\hbar^2} kT}$$

Einheit: cm^{-2}

Für die effektive Zustandsdichte (pro Subband!) in 1D gilt:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} D_{1D}(E) e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE = \int_{E_C}^{\infty} \frac{1}{\pi\hbar} \sqrt{\frac{m^*}{E-E_C}} e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE = N_C^{1D} e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}}$$

$$\boxed{N_C^{1D} = \sqrt{\frac{m^* kT}{2\pi\hbar^2}}}$$

Einheit: cm^{-1}

effektive Zustandsdichte

- In 0D ist die Zustandsdichte und effektive Zustandsdichte konstant
- Zahl der Zustände bei $E_{m.n,o}$ hängt vom Entartungsgrad ab (mindestens 2 wegen Spin-Entartung)

- Bis auf 0D sind alle effektiven Zustandsdichten temperaturabhängig
- Je größer die Dimensionalität, desto stärker die Temperaturabhängigkeit

- Systeme reduzierter Dimension haben hohe Zustandsdichten an der Bandkante!
- Damit auch höhe Ladungsträgerkonzentration an der Bandkante

Niedrigdimensionale Systeme: Ladungsträgerdichte

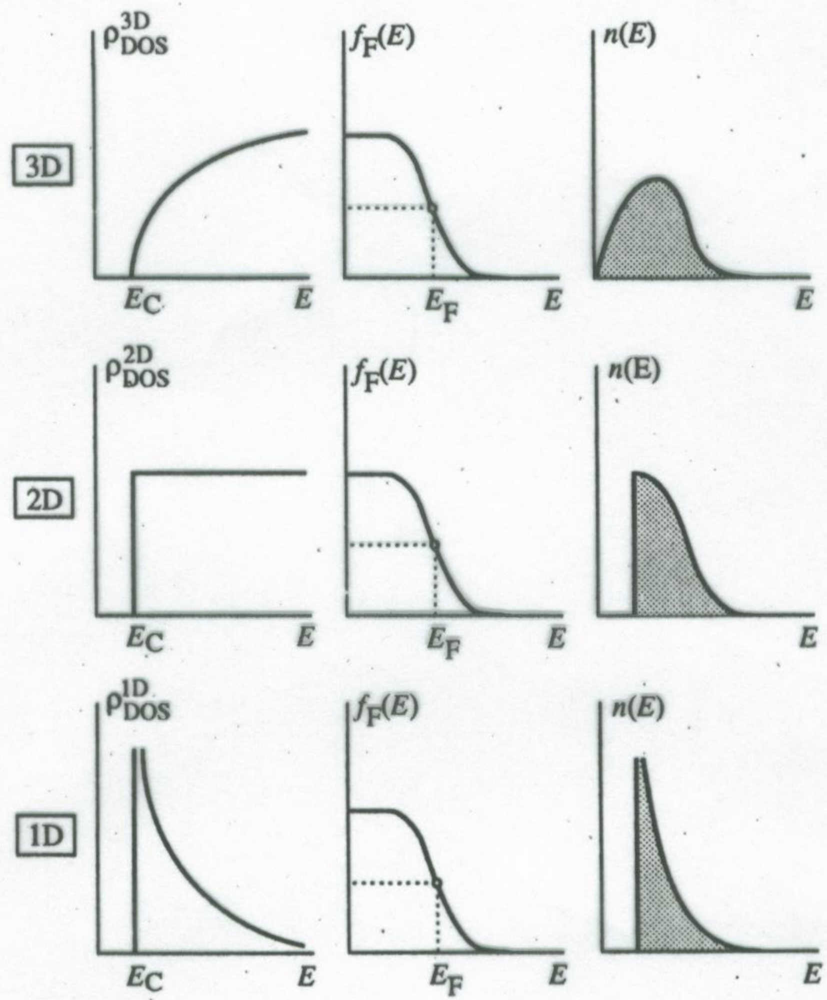
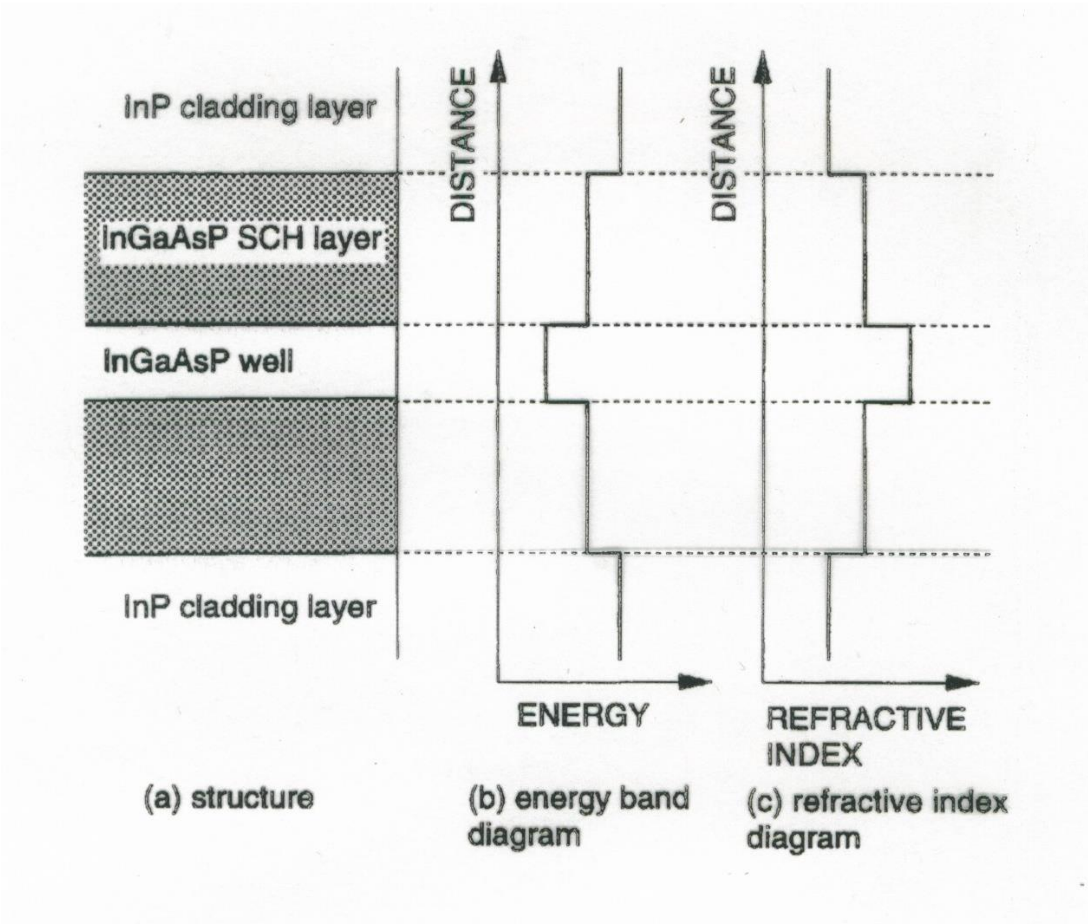


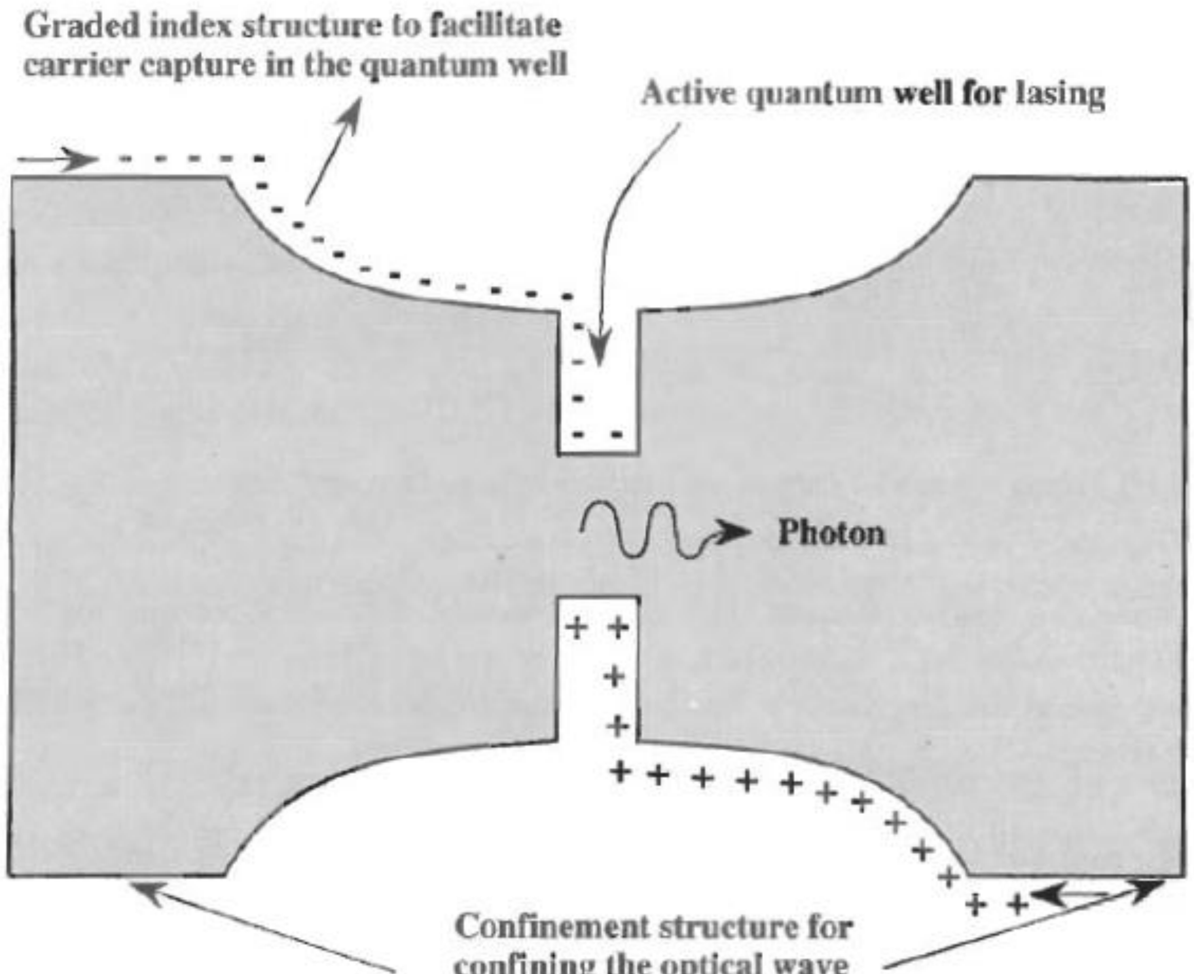
Fig. 3.12. Density of states (ρ_{DOS}), Fermi–Dirac distribution function (f_F) and carrier concentration (n) as a function of energy for a 3D, 2D, and 1D system. The shaded areas represent the total carrier concentration in the conduction band.

Quantum-Well-Laser



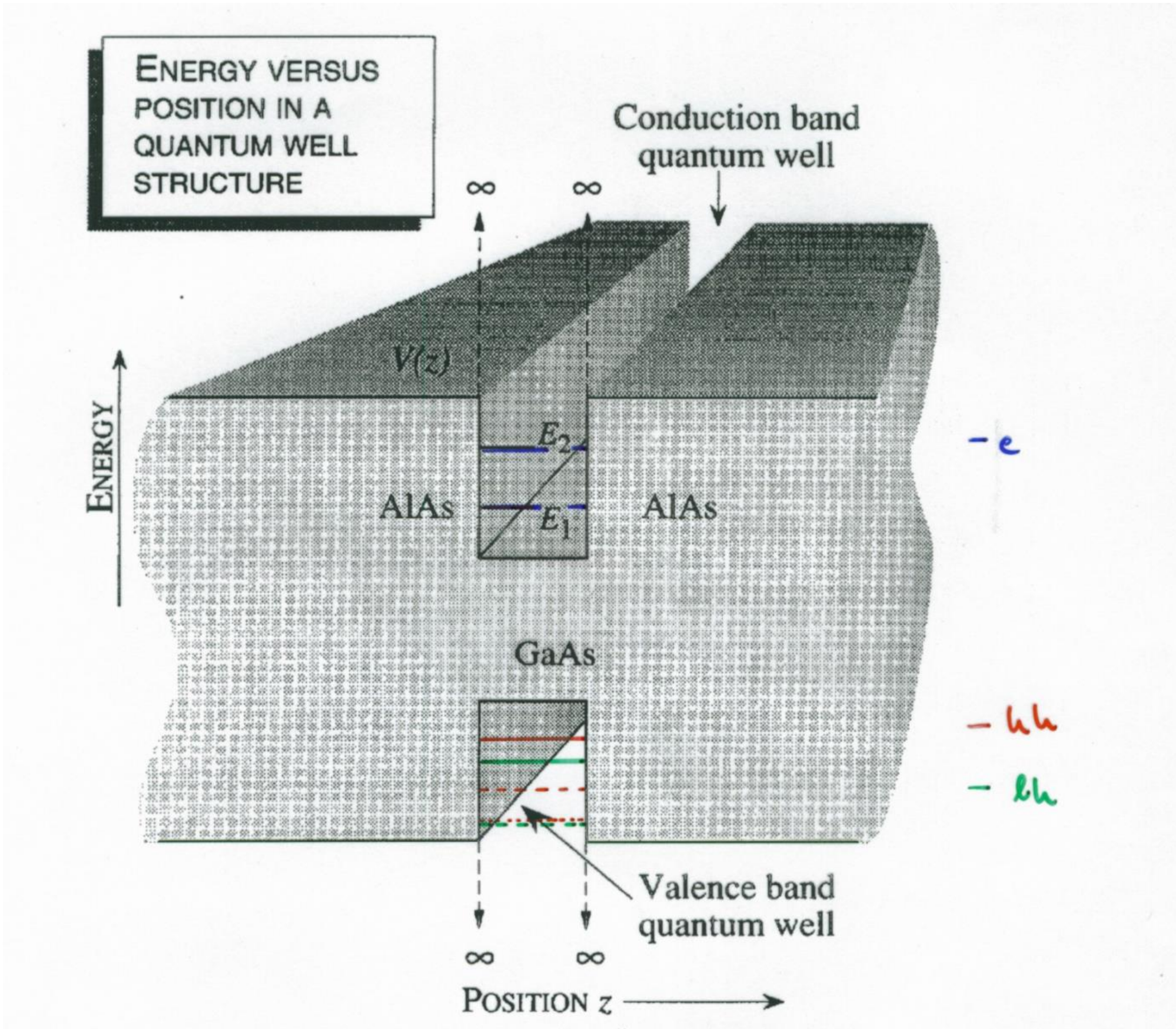
- Sehr dünne aktive Schicht (~10 nm)
- Ladungsträger-confinement und Lichtfeldführung getrennt

GRINSCH-Struktur

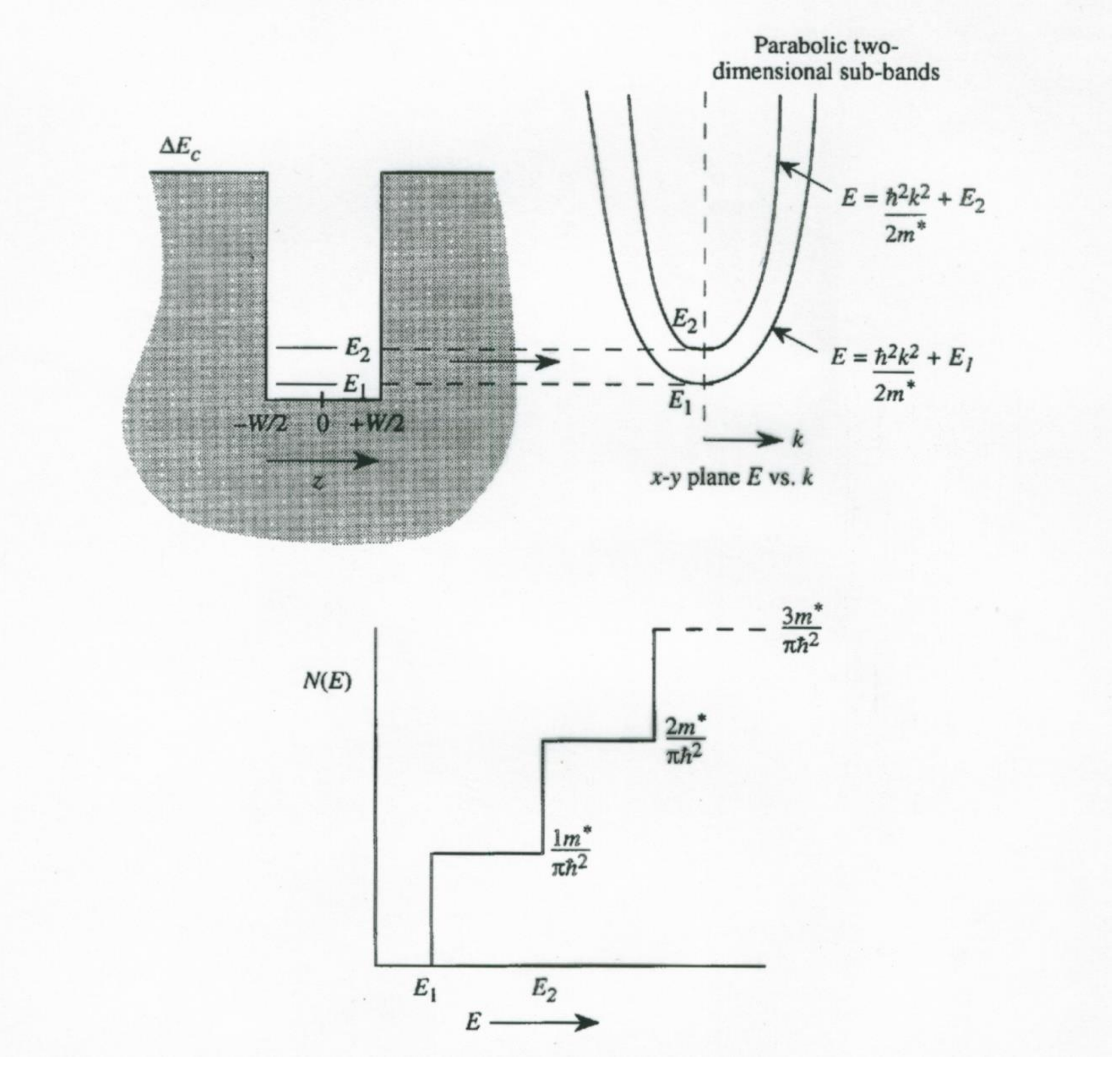


GRINSCH = **<u>gr</u>**aded **<u>i</u>**ndex **<u>s</u>**eparate **<u>c</u>**onfinement **<u>h</u>**eterostructure

Quantum Well



Quantum Well



Polarisation im QW Quantum Well

- Die Übergänge zwischen Leitungsband- und HH- bzw. LH-Zuständen hängen von der Polarisation ab. Es gilt:

TE-polarisiert:

$$\text{HH} \rightarrow \text{C-Band:}\ |p_{if}|^2 = \frac{1}{2}|<p_x|p_x|s>|^2 = \frac{m_0 E_p}{4}$$

$$\text{LH} \rightarrow \text{C-Band:}\ |p_{if}|^2 = \frac{1}{6}|<p_x|p_x|s>|^2 = \frac{m_0 E_p}{12}$$

TM-polarisiert:

$$\text{HH} \rightarrow \text{C-Band:}\ |p_{if}|^2 = 0$$

$$\text{LH} \rightarrow \text{C-Band:}\ |p_{if}|^2 = \frac{2}{3}|<p_x|p_x|s>|^2 = \frac{m_0 E_p}{3}$$

- Im Volumenhalbleiter TE- und TM ähnlich wahrscheinlich
- Im QW ist die Entartung zwischen LH und HH aufgehoben
- Unterschiedliche Besetzung führt zu bevorzugter TE-Polarisation (E-Feld in der Ebene des QW)

Material Gain im Quantum Well

- Die Verstärkung lässt sich für einen Übergang zwischen dem n-ten Leitungsband und dem m-ten Valenzband-Subband wie folgt schreiben:

$$g_{n,m}(\omega) = \frac{\pi e^2 \hbar}{n_r c m_0^2 W \varepsilon_0} \frac{1}{\hbar\omega} N_{n,m}(\omega) \, | \, p_{nm} \, |^2 \, (f_e(E^e) + f_h(E^h) - 1)$$

- Die Joint Density of States $N_{n,m}$ ist unabhängig von der Energie (in 3D ~$E^{0.5}$) aber hängt vom Überlapp der Einhüllenden g in z-Richtung ab:

$$\frac{N_{nm}^{2D}}{W} = \frac{m_r^*}{\pi \hbar^2 W} < g_C^n \, | \, g_V^m > \Theta(E_{nm} - \hbar\omega) \quad ; E_{nm} = E_{gap} + E_C^n + E_V^m$$

- Das Matrixelement p_{nm} ist wie folgt gegeben:

$$p_{nm} = \int g_C^{n^*}(z) g_V^m(z) dz \sum_\nu < s \, | \, p_a \, | \, u_\nu^m >$$

- Der Überlapp ist im Wesentlichen nur für n = m ungleich Null!!

Quantum-Well Laser

- Der Confinement Faktor ist für einen QW-Laser viel kleiner als für einen DH-Laser
- In QW-Laser ist der Cavity Gain nur im Bereich von 100 cm^{-1} (im Gegensatz zu DH-Lasern wo dieser Wert 10^4 cm^{-1} erreichen kann)
- Da die Cavity-Verluste aber sehr klein gemacht werden können (20 cm^{-1}) reicht der Gain aus

Der QW-Laser bietet einige Vorteile:

- **Niedrige Schwellströme**: Schon bei sehr geringen Strömen wird die Schwellendichte erreicht, wenn auch nur in einem kleinen Bereich
- Wellenlängentuning
- Polarisationkontrolle
- Heteroepitaxie von nicht gitterangepasstem Material (Strain-Tuning)

Quantum-Well Laser sind nicht immer besser

- Aufgrund des geringeren Confinement Faktors ist ein höherer Material-Gain erforderlich => n_{th} größer für einen QW-Laser als für eine DH-Struktur

- Für Materialien mit höherem Auger-Koeffizienten (Halbleiter kleiner Bandlücke) wird dies wichtig, denn es gilt

$$J_{th} = \frac{e n_{th} d_{Laser}}{\tau_{rad,th}} + e n_{th}^{3} d_{Laser}$$

- Es existiert also eventuell eine optimale Breite die oberhalb von 10-50 nm liegt, so dass kein QW mehr vorliegt

- Dies für z. B. für 1,5 µm Laser relevant

Wesentlichster Vorteil von Systemen reduzierter Dimension ist die Reduktion der Schwellstromdichte!

Schwellstromdichte: Entwicklung

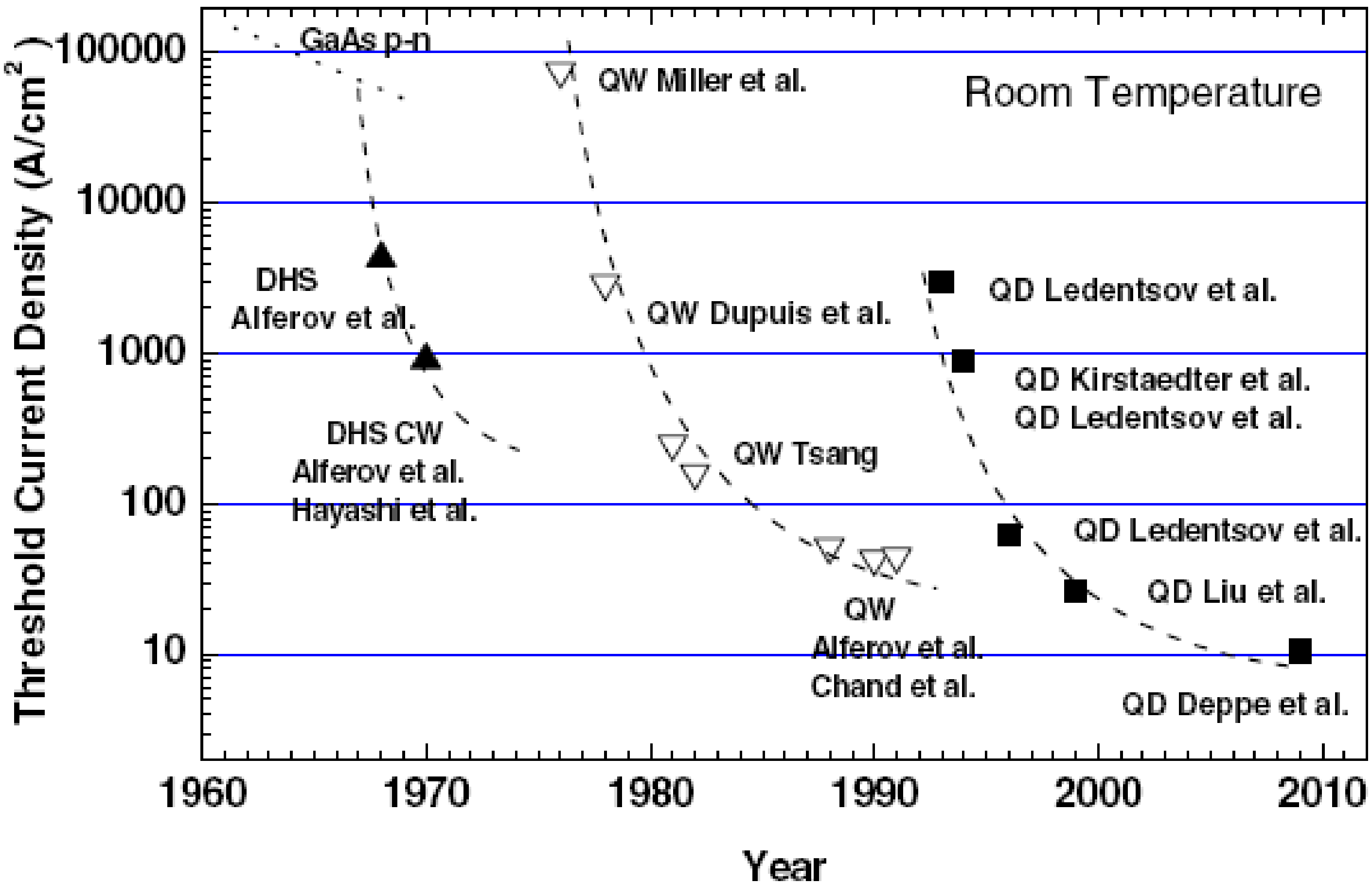


Figure 5. Historic trends in the reduction of the threshold current density in semiconductor lasers.