

STRAINED QUANTUM WELLS

QW-Laser mit verspannten QWs

Adjusting bandgap to reach a certain emission wavelength

Up to 150 meV variation in bandgap can be achieved

Reduction in hole masses to achieve lower threshold current lasing

Hole mass can be reduced by up to a factor of 3 by using strain

Strain can allow laser emission to have tailored polarization

By using appropriate strain, one can have TE, TM, or unpolarized light

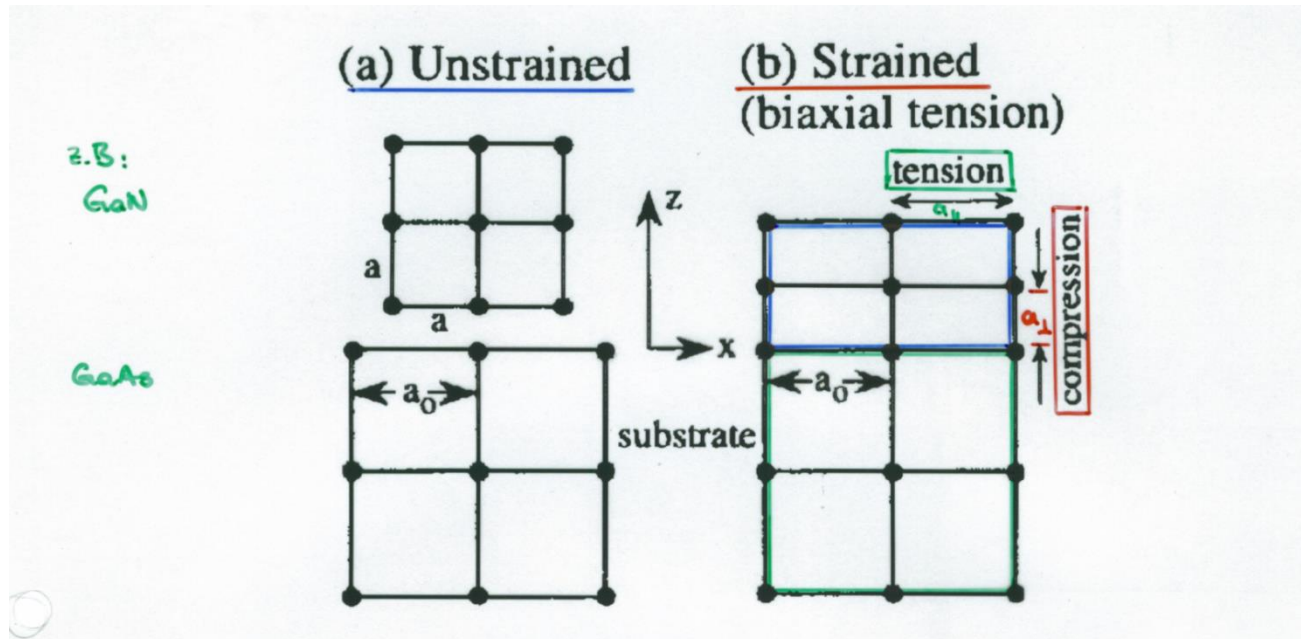
Reduction in Auger rates

Reduced hole masses can result in lower Auger rates

Improved laser reliability

Built-in strain may suppress defect migration into the active region

Verspannte Schichten



z.B:
GaN

GaAs

Figure 4.7. A layer material with a lattice constant a to be grown on a substrate with a lattice constant a_0 : (a) unstrained; (b) strained.

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_0 - a}{a} = \frac{a_{\text{substrat}} - a_{\text{layer}}}{a_{\text{layer}}}$$

$$\epsilon_{zz} = -\frac{2C_{12}}{C_{11}}\epsilon_{xx}$$

$\epsilon \dots$ strain
 $C_{ii} \dots$ force constants

- Druckverspannung: $\epsilon < 0$
- Zugverspannung: $\epsilon > 0$

Folgen der Verspannung: Bandlücke

- Leichte und schwere Löcher spalten durch Verspannung (Strain) auf
- Für die „Bandlücken“ ergibt sich:

$$\text{C-Band} \rightarrow \text{HH: } E_g = E_{g0} + \underbrace{2a \frac{C_{11} - C_{21}}{C_{11}} \varepsilon}_{\text{hydrostatisch, Pikus-Bir}} + \underbrace{b \frac{C_{11} - 2C_{21}}{C_{11}} \varepsilon}_{\text{Schubanteil}}$$

$$\text{C-Band} \rightarrow \text{LH: } E_g = E_{g0} + \underbrace{2a \frac{C_{11} - C_{21}}{C_{11}} \varepsilon}_{\text{hydrostatisch, Pikus-Bir}} - \underbrace{b \frac{C_{11} - 2C_{21}}{C_{11}} \varepsilon}_{\text{Schubanteil}}$$

- Je nach Verspannung wird die Bandlücke größer oder kleiner
- Je nach Verspannung hat das leichte oder das schwere Loch die kleinere Energie

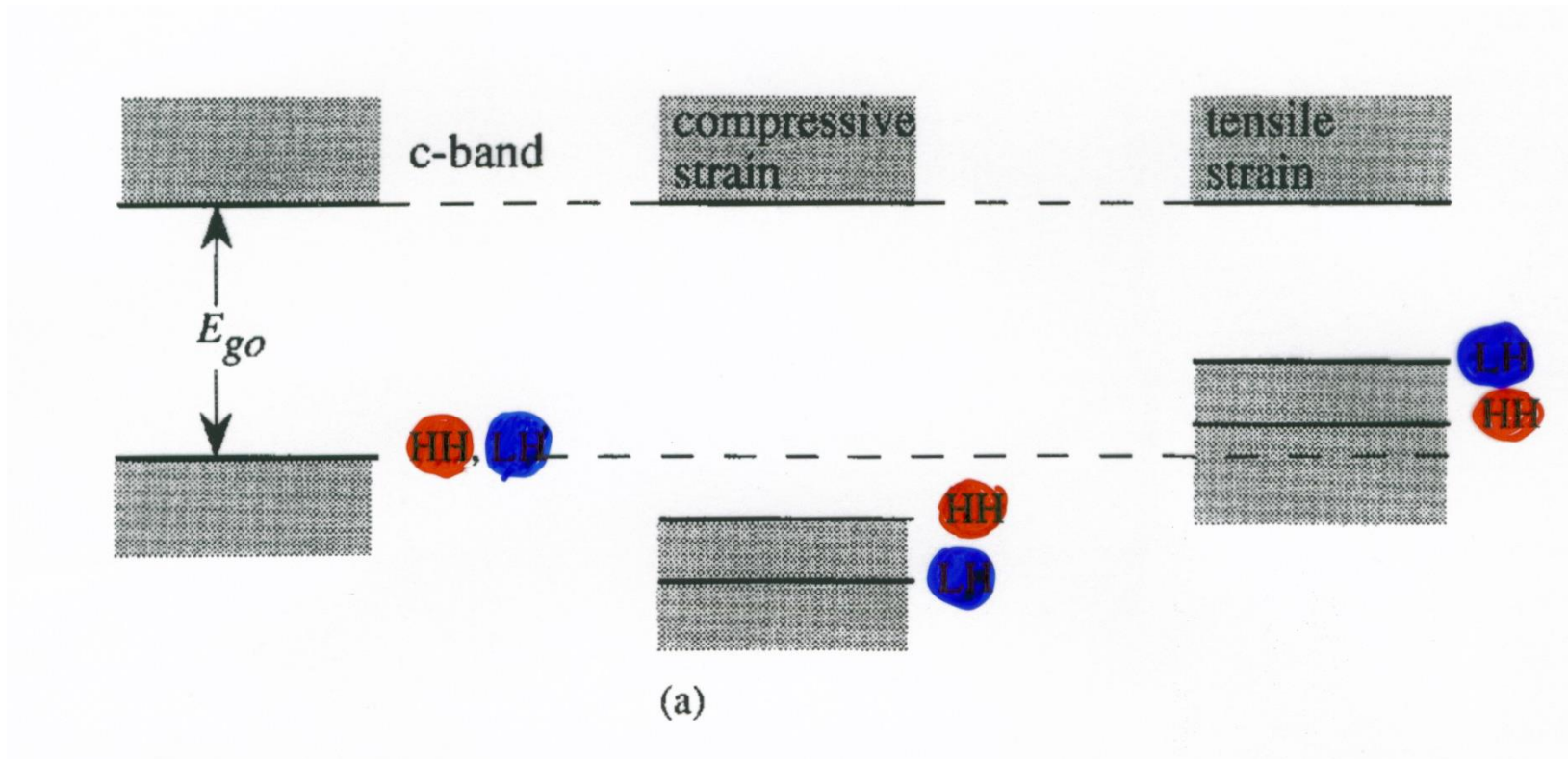
Verspannung: Materialparameter

Table 4.1. Material Parameters

Parameters	GaAs	InAs	InP
a_0 (Å) ... <i>lattice const.</i>	5.6533	6.0584	5.8688
E_g (eV) <i>energy gap</i>	1.424	0.36	1.344
γ_1 } <i>Kohn-Luttinger</i>	6.85	20.4	4.95
γ_2 } <i>parameters</i>	2.1	8.3	1.65
γ_3	2.9	9.1	2.35
C_{11} (10^{11} dyn/cm ²)	11.879	8.329	10.11
C_{12} (10^{11} dyn/cm ²)	5.376	4.526	5.61
$a = a_c - a_v$ (eV)	-9.77	-6.0	-8.6
b (eV)	-1.7	-1.8	-2.0
m_e^*/m_0	0.067	0.025	0.077

$\left. \begin{matrix} a \\ b \end{matrix} \right\}$ - Deformation potentials \leftarrow *hydrostatic*

Strain: Bandlücke



- Zug- und Druckspannung haben entgegengesetzte Wirkung auf die Bandlücke und die energetische Abfolge von LH- und HH-Band

Beispiel Strain

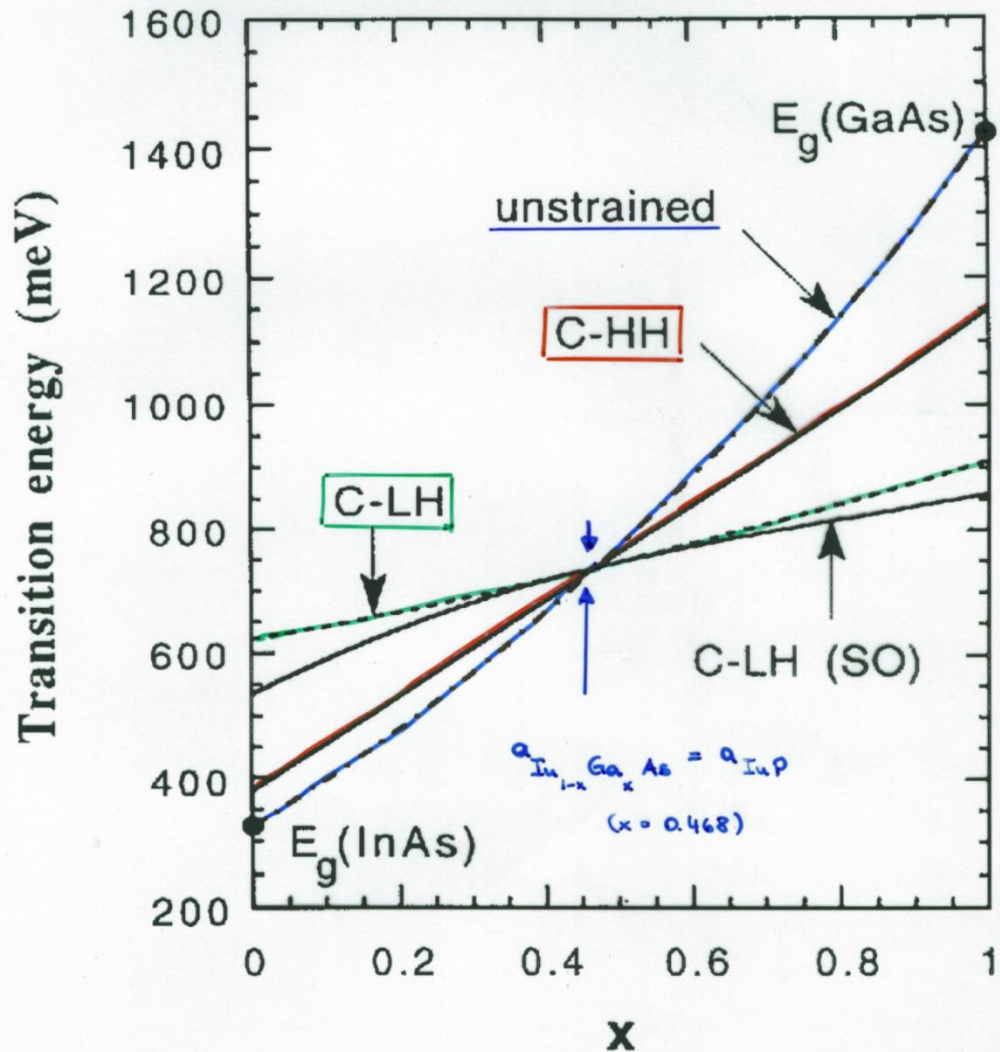
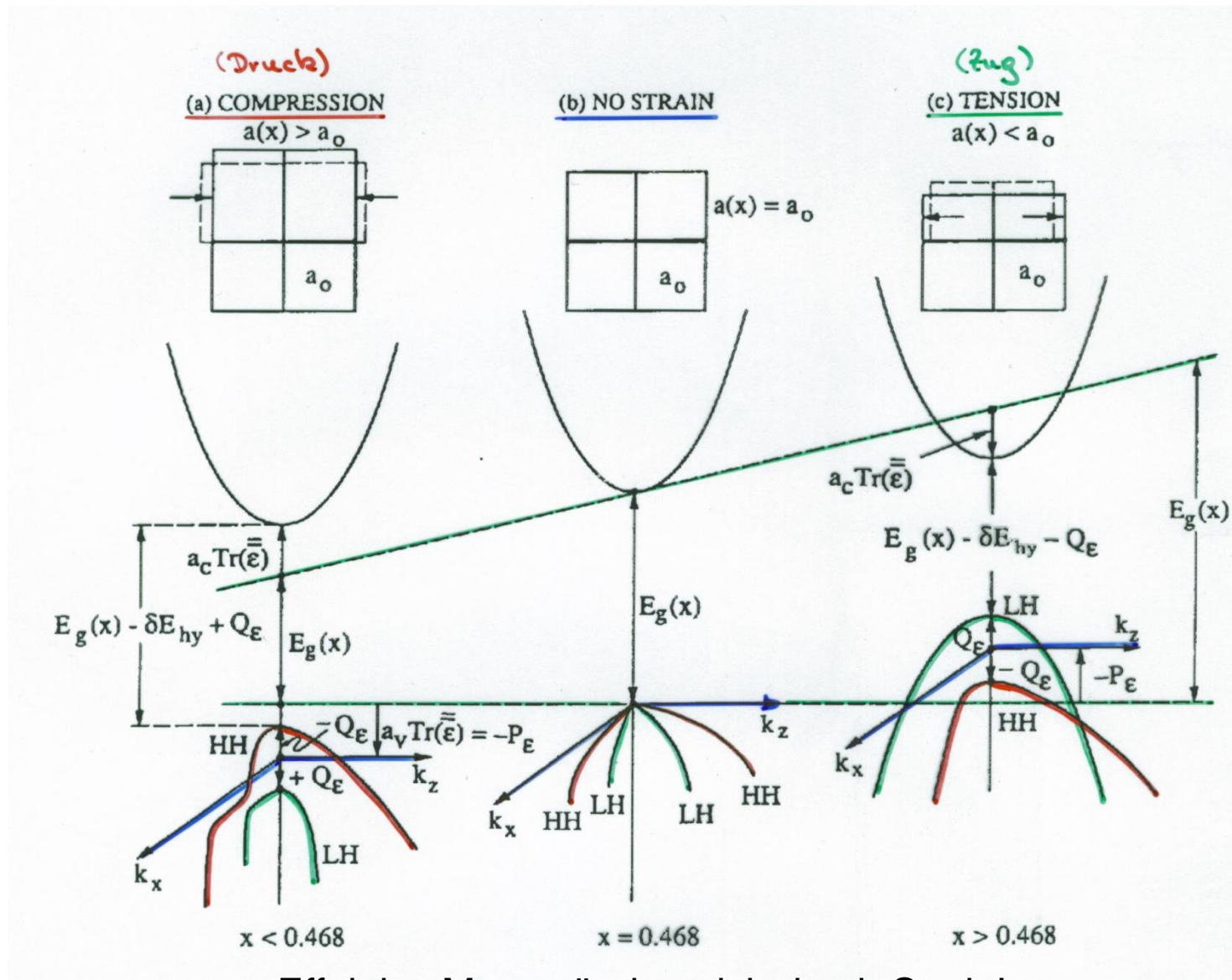


Figure 4.9. The energy band gap of a bulk $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ vs. the Ga mole fraction x : ---, unstrained $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$; —, transition energies from the conduction band (C) to the heavy-hole (HH) and light-hole (LH) bands for a bulk $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ pseudomorphically grown on InP ; ---, the conduction to light-hole transition energy calculated without the spin-orbit (SO) split-off band coupling. (After Ref. 38.)

- $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ pseudomorph auf InP
- Bandlücke ändert sich aufgrund der Kompositionsänderung
- Berücksichtigung des Strains modifiziert die Ergebnisse deutlich:
 - Aufspaltung LH/HH
 - andere Bandlücke
- Für Zugverspannung liegt das HH energetisch tiefer, für Druckverspannung das LH
- Das ist nur gerechnet!!

Strain: Zusammenfassung Bandstruktur



Effektive Masse ändert sich durch Strain!

Strain: Polarisationskontrolle

- Emission aus QW-Lasern ist oft polarisiert, da LH- und HH-Übergänge unterschiedlich an TE- und TM-Moden koppeln
- Die Verspannung wirkt auf die Besetzung der LH- und HH-Zustände, indem eine Aufspaltung erzeugt wird.
- Durch geeignete Wahl der Verspannung lässt sich so die Polarisation einstellen.
- Oft hat man in unverspannten QW TE-polarisierte Emission, da das HH-Subband energetisch günstiger liegt und daher stärker besetzt ist. Durch Zugverspannung kann das kompensiert werden, so dass man unpolarisierte Emission erhält

Strain: Auger-Effekt und Laserzuverlässigkeit

- Verspannung ändert die Bandstruktur (effektive Masse, Aufspaltung LH-HH, Änderung der Spin-Bahn-Aufspaltung)
- Dies beeinflusst den Parameter, die für Auger-Rate wichtig sind: Die minimale Energie die für einen Auger-Prozess nötig ist.
- Durch Verspannung kann (!) u. U. die Auger-Rate reduziert werden.
- Anfänglich gab es Vermutungen, dass Heterostrukturen mit verspannten Schichten nicht so zuverlässige Bauelement liefern. Das hat sich nicht bewahrheitet. Es scheint sogar eher positiv zu sein (Unterdrückung von Defektwanderung).

Laser-Emission: Modenverteilung

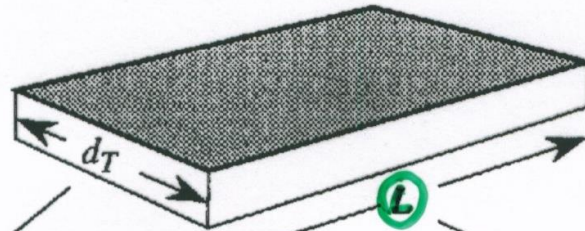
- Ein Resonator unterstützt in der Regel mehrere (z. T. viele!) Moden
- Welche durch stimulierte Emission gefüttert werden, wird durch das Gain-Spektrum bestimmt.
- Seiten-Moden-Unterdrückungsverhältnis (side-mode suppression, mode suppression ratio MSR)

$$\boxed{MSR = \frac{P_0}{P_1}} \quad , \quad \text{mit } P_0 = \text{Leistung im Zentralmode,}$$

$$P_1 = \text{Leistung in Nachbarmode}$$

- Gut ist ein MSR von 20 (entspricht 13 dB)
- FP Resonatoren haben keine besonders gutes MSR

Moden im FB-Resonator



Height and cavity structure:

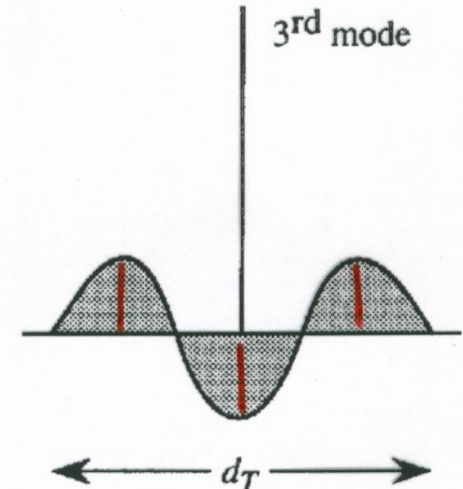
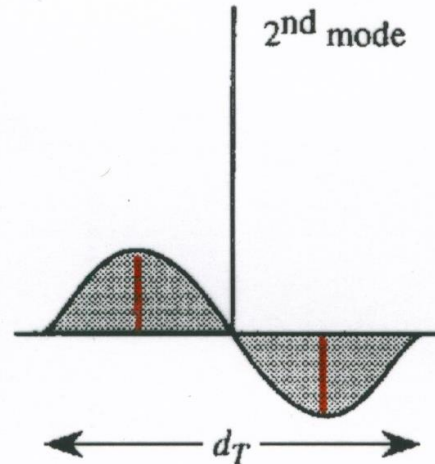
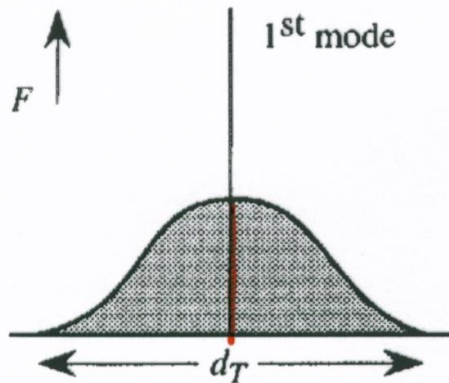
- Determine optical confinement factor Γ
- Usually only the ground state mode is excited !

Höhe $\sim 1 \mu\text{m}$

Transverse confinement:
Determines the transverse modes that are produced in the output

Cavity length:
Determines modal spacing

(longitudinale Moden $\sim \frac{L}{\lambda} \approx 500 - 1000$)



Moden im FB-Resonator

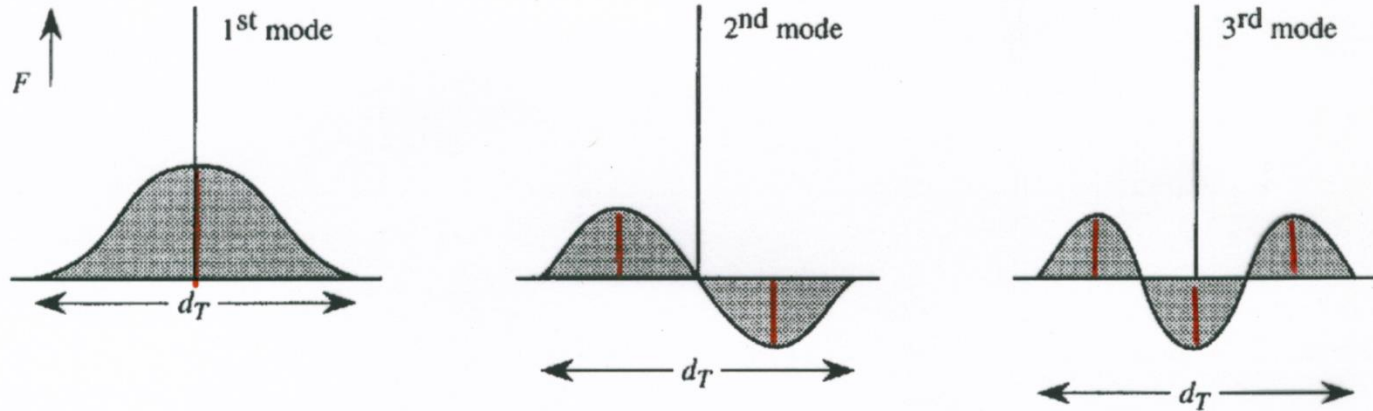
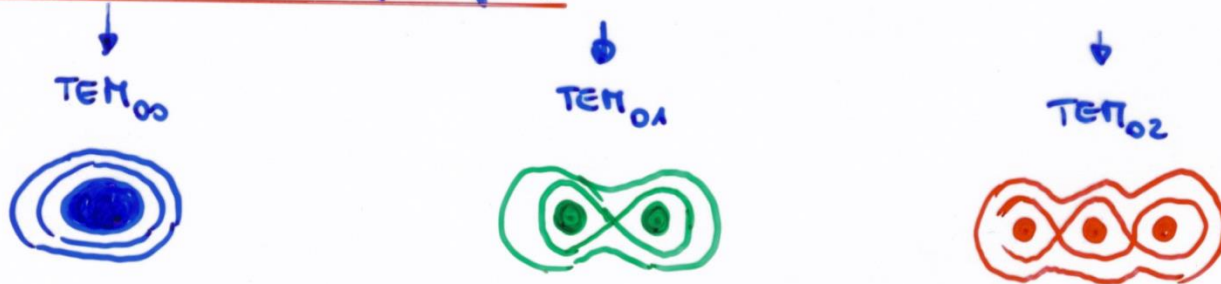


Figure 10.19: The various geometric parameters of a Fabry-Perot laser and their importance for the laser emission. A schematic of the various lateral modes are also shown.

Abstrahlcharakteristik (Nahfeld)



$$\Delta \nu = \frac{c}{2n_r \cdot L}$$

mit $L \gg d_T$

$$\Rightarrow \Delta \nu_L \ll \Delta \nu_{d_T}$$

Moden im FB-Resonator: Beispiel

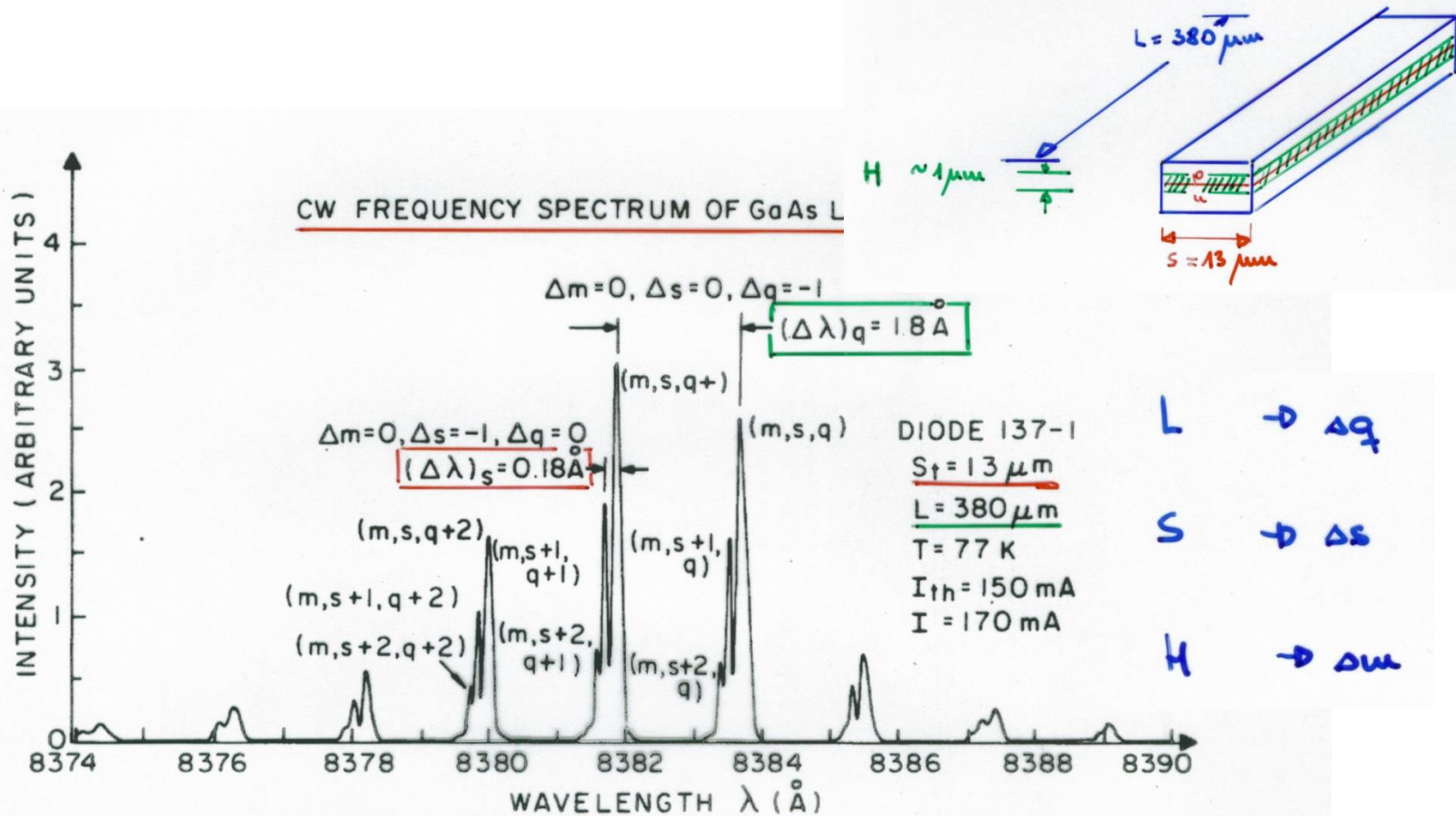
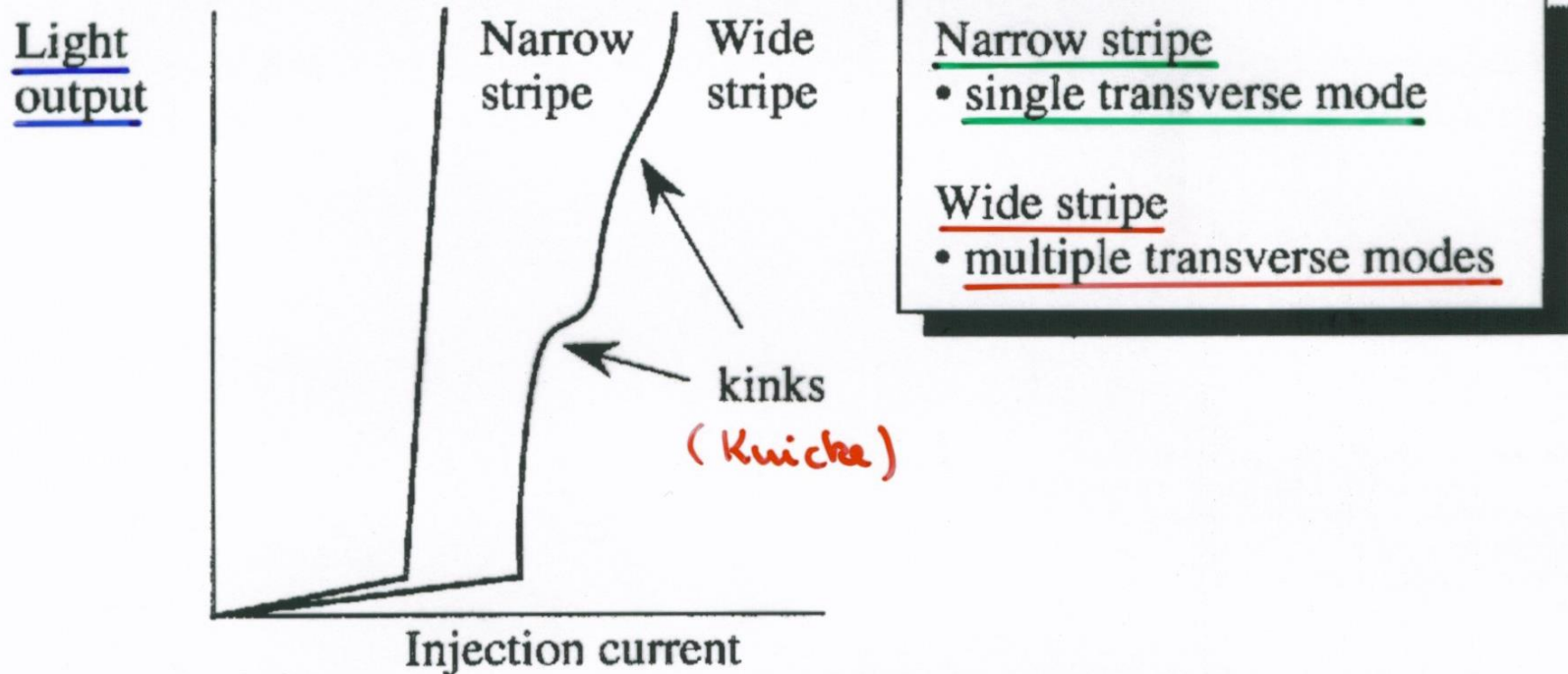


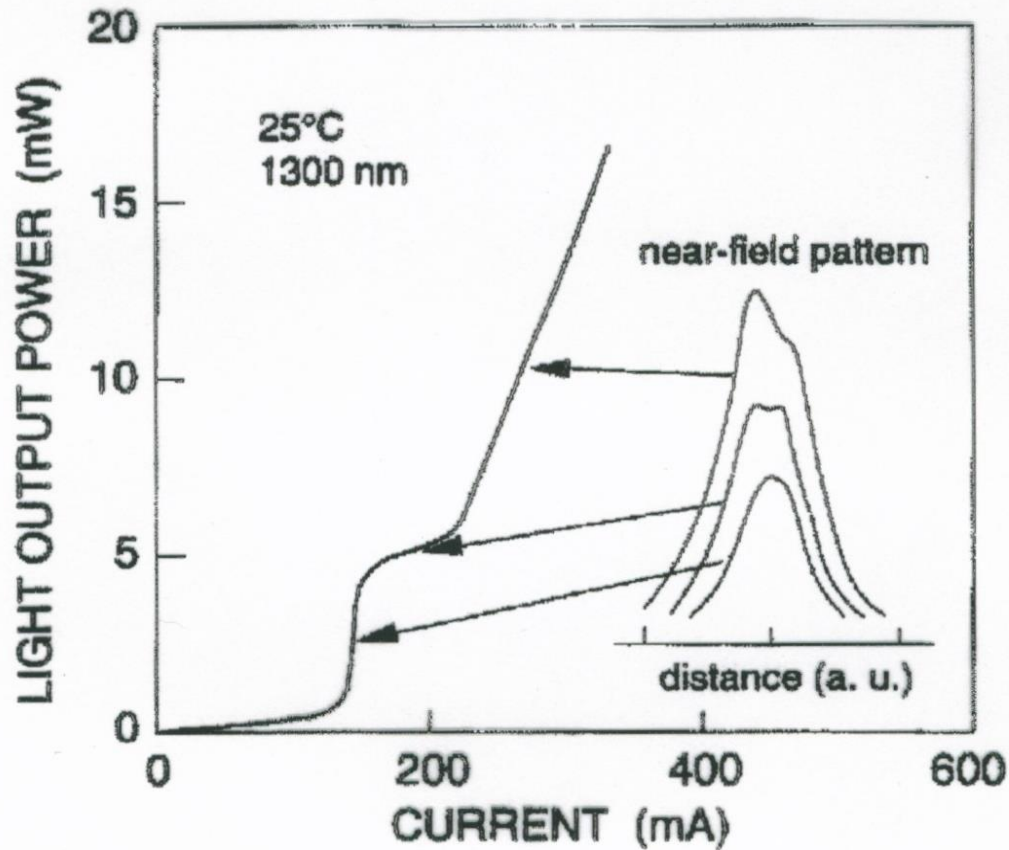
FIG. 5.7.2 Spectrum from homojunction CW stripe-geometry laser diode, formed with oxide isolation, operating at 77 K. The structure due to the longitudinal mode groups (q) is clearly seen with associated structure due to the lateral modes (s). The stripe width of the laser is $13 \mu\text{m}$, and it is operating in the fundamental ($m = 1$) transverse mode [26].

Moden im FB-Resonator: Modensprünge



- Für den breiten Streifen fängt für höhere Ströme ein weiterer transversaler Mode an zu lasen

Moden im FB-Resonator: Modensprünge

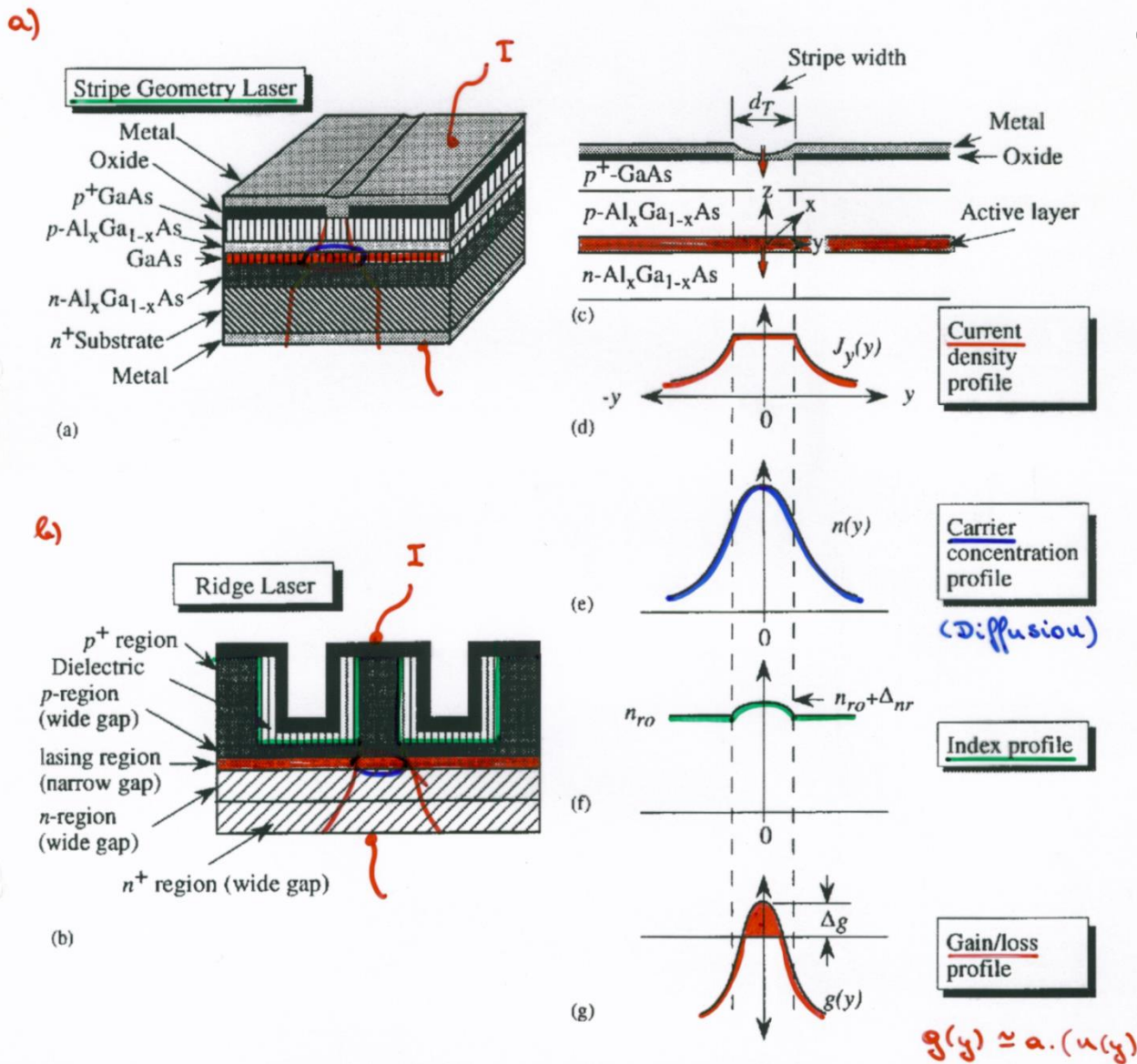


Im Nahfeldmuster ist deutlich die unterschiedliche Modenverteilung zu erkennen!

FB-Resonator: Beschränkung transversaler Moden

- In Richtung des pn-Übergang hat man kein Problem, da die Schicht so dünn ist, dass nur ein Mode ($m = 1$) unterstützt wird
- Senkrecht dazu ist schwieriger den Streifen einzuschränken, so dass nur ein Mode unterstützt wird
- Zwei mögliche Wege:
 - **Gain-geführte Strukturen**
 - **Index-geführte Strukturen**
- Gain-geführt => nur auf einem Teil der Breite des Resonators gibt es Verstärkung
- Erreicht man durch geschickte Stromführung

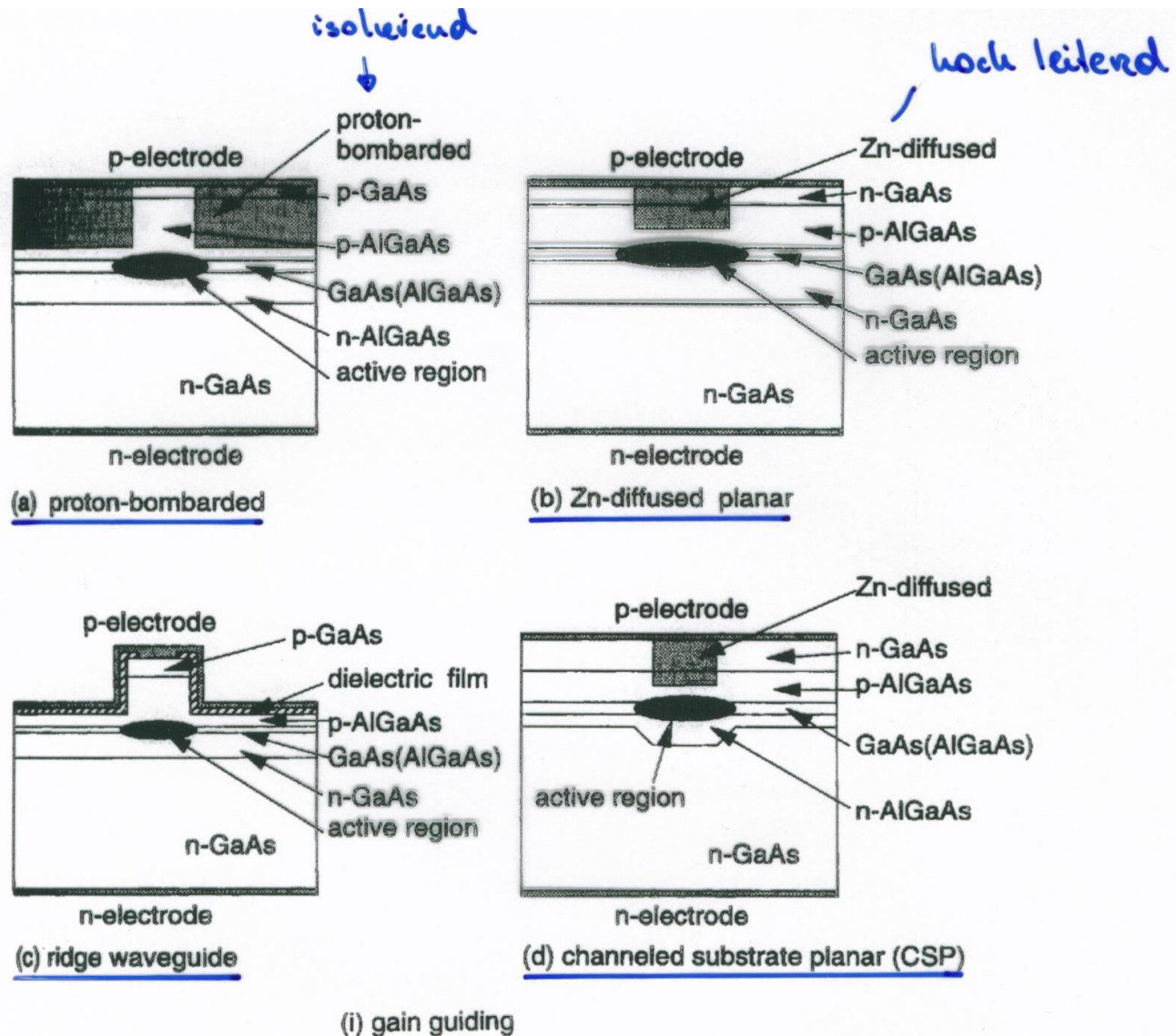
Gain-geführte Bauelemente



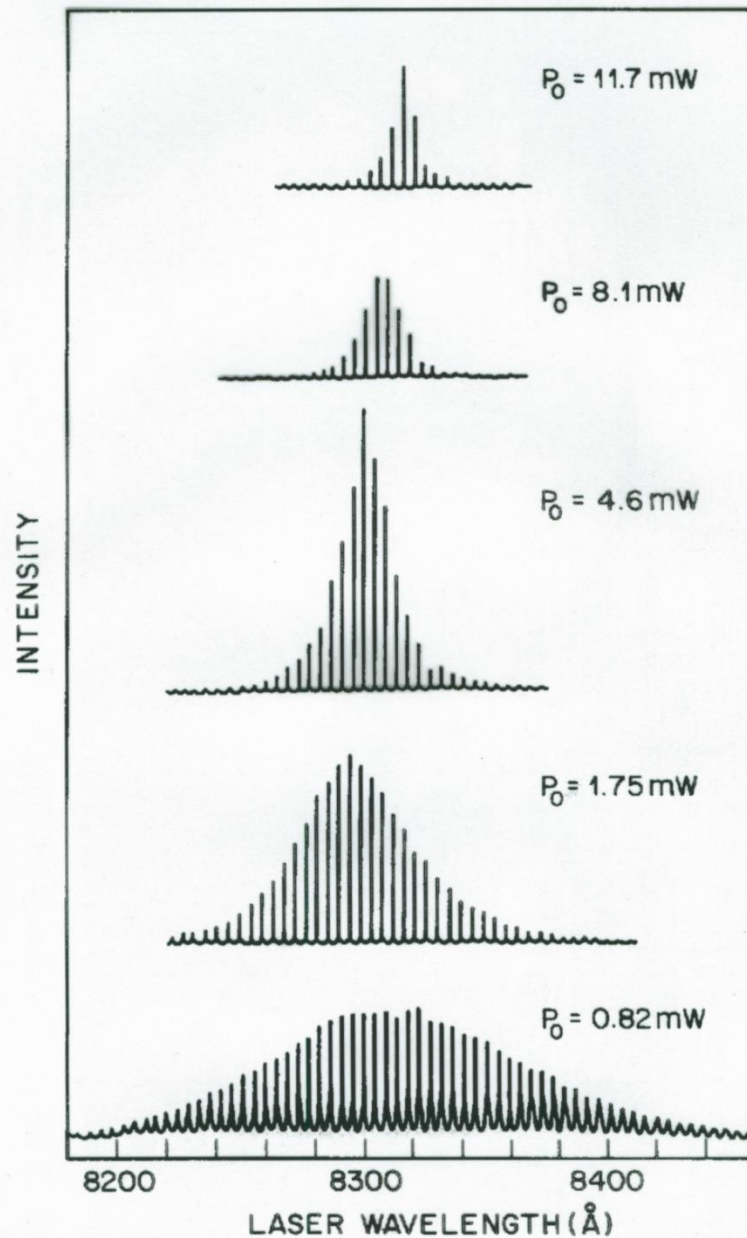
- Der Brechungsindex ist von der Ladungsträgerdichte abhängig
- Führt zu „Anti-Führung“
- Starke Inhomogenität im Gain führt aber doch zu einer starken Führung des Lichtfeldes

Figure 10.21: (a) The stripe geometry laser, (b) the ridge laser, (c) the current injection into the laser, (d) the current density profile, (e) the electron (hole) density profile in the active region, (f) The refractive index profile, and (g) the gain and loss profile.

Gain-geführte Bauelemente: Beispiele

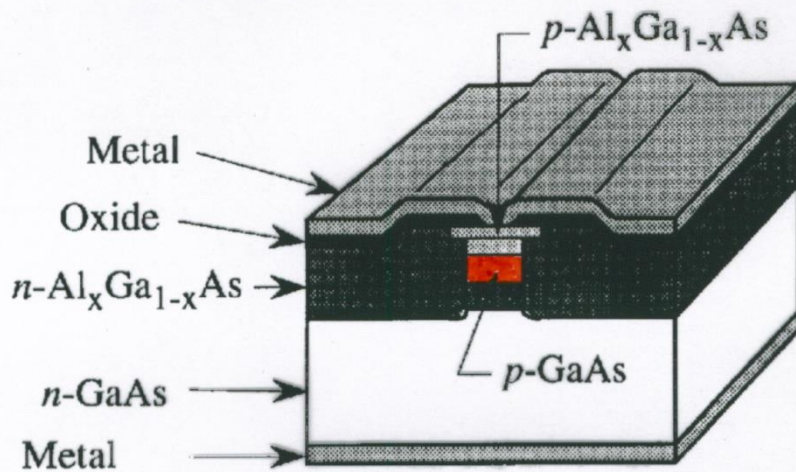


Gain-geführte Bauelemente: Spektrum

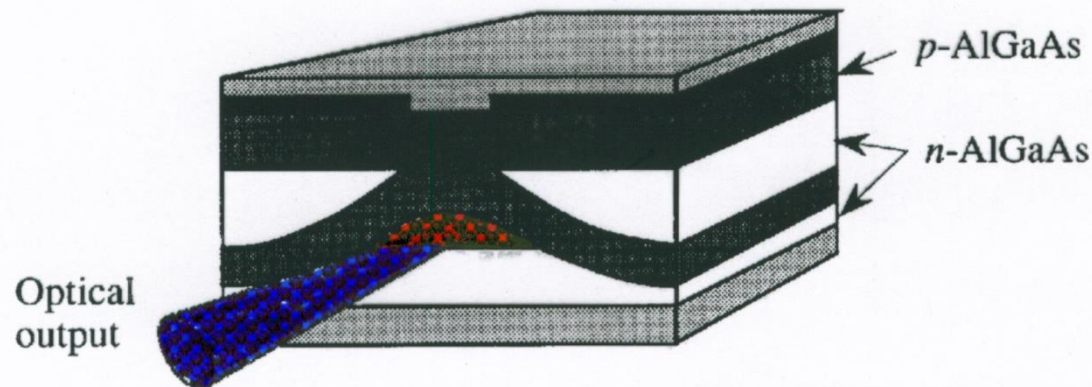


- Man sieht nur longitudinale Moden

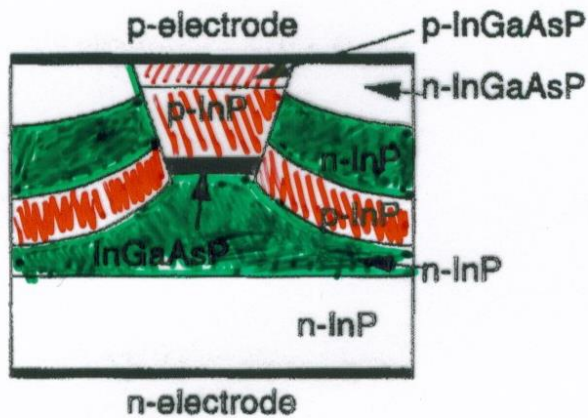
Index-geführte Bauelemente



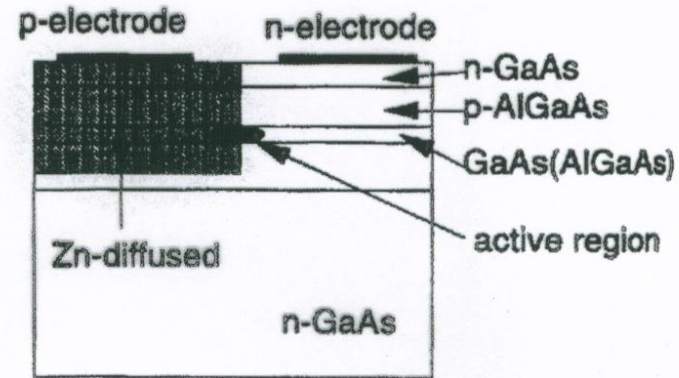
- Bei Index-geführten Strukturen wird in lateraler Richtung ein Profil im Brechungsindex aufgeprägt
- Die Strukturen sind in den Moden rein, aber technologisch schwerer herzustellen (teuer)
- Niedrige Schwellströme, da keine Stromverbreiterung



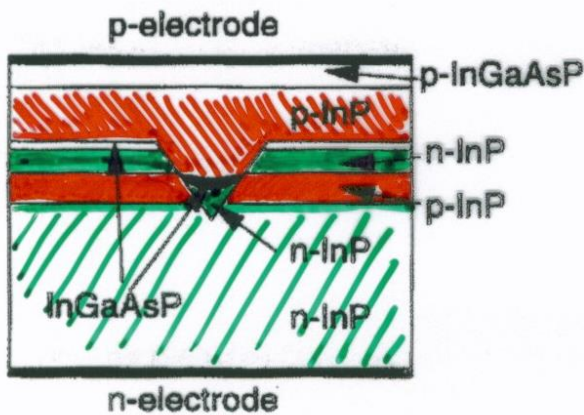
Index-geführte Bauelemente: Beispiele



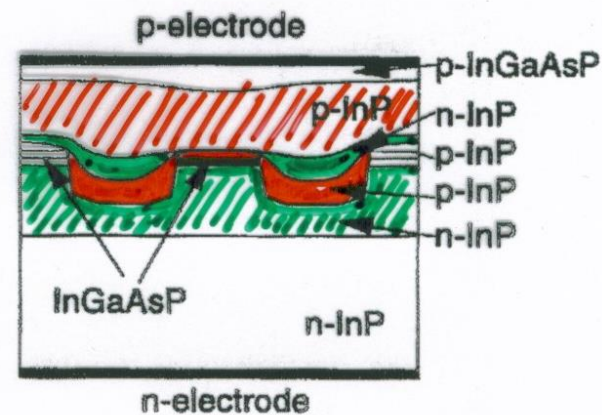
(e) buried heterostructure (BH)



(f) transverse junction stripe (TJS)



(g) v-grooved substrate BH (VSB)



(h) double-channel planar BH (DC-PBH)

Index-geführte Bauelemente: Spektrum

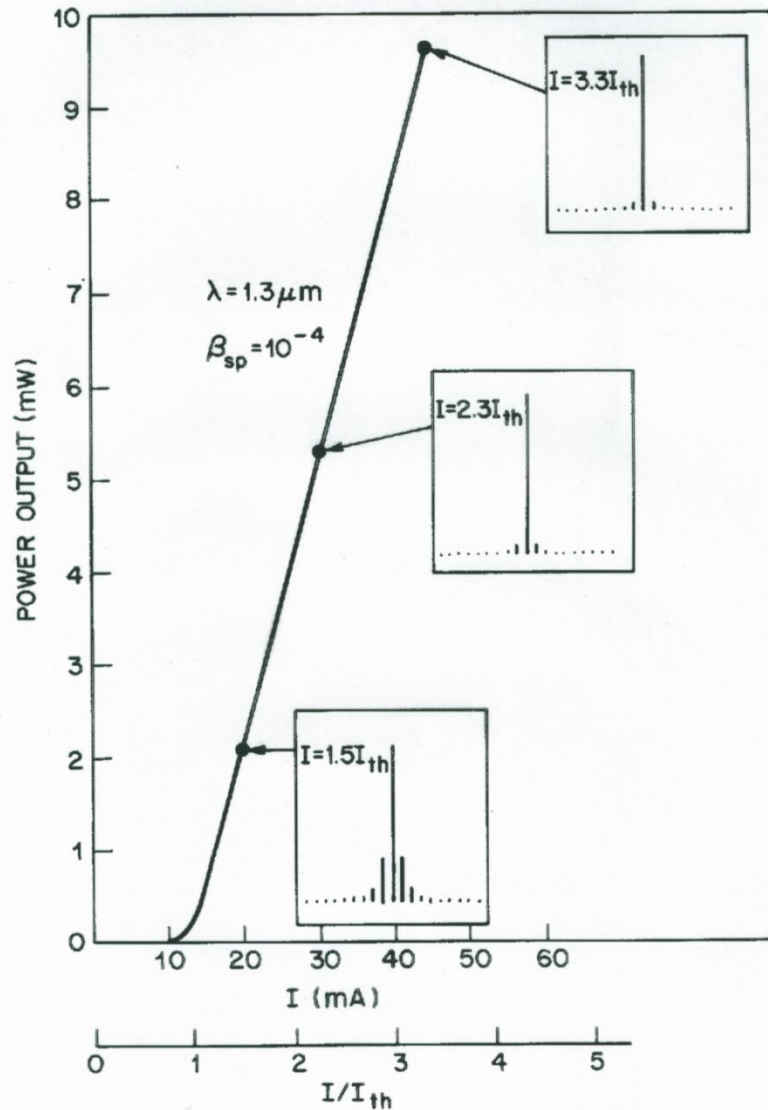


Fig. 6.5 Calculated L-I curve for the total output power of an index-guided laser. Insets show the longitudinal-mode spectra at three drive current levels. (After Ref. 34 © 1982 IEEE)

- Je höher die Stromdichte, desto mehr dominiert ein Mode
- Nur longitudinale Moden zu sehen