

Verbesserte Resonatoren: DFB-Struktur

- FB-Resonatoren (=Kantenemitter) sind einfach herzustellen
- Nachteil:
 - Es werden sehr viele longitudinale Moden unterstützt
 - **es gibt keine eingebaute Modenselektivität**
 - Abstand der Moden 0,4 bis 0,5 nm
 - bei flachem Gain-Spektrum (~ 25 meV) werden viele Moden angeregt
 - zum Glück werden die Seitenmoden oberhalb der Schwelle unterdrückt
 - auch unter günstigsten Bedingungen ist die Emission etwa 2 nm breit, auch wenn die einzelnen Moden sehr viel schärfer sind
- Kann man einen Resonator realisieren, der eine eingebaute Modenselektivität hat?
- Hier setzt die Distributed Feedback DFB-Struktur an (verteilte Rückkopplung)

Verbesserte Resonatoren: DFB-Struktur

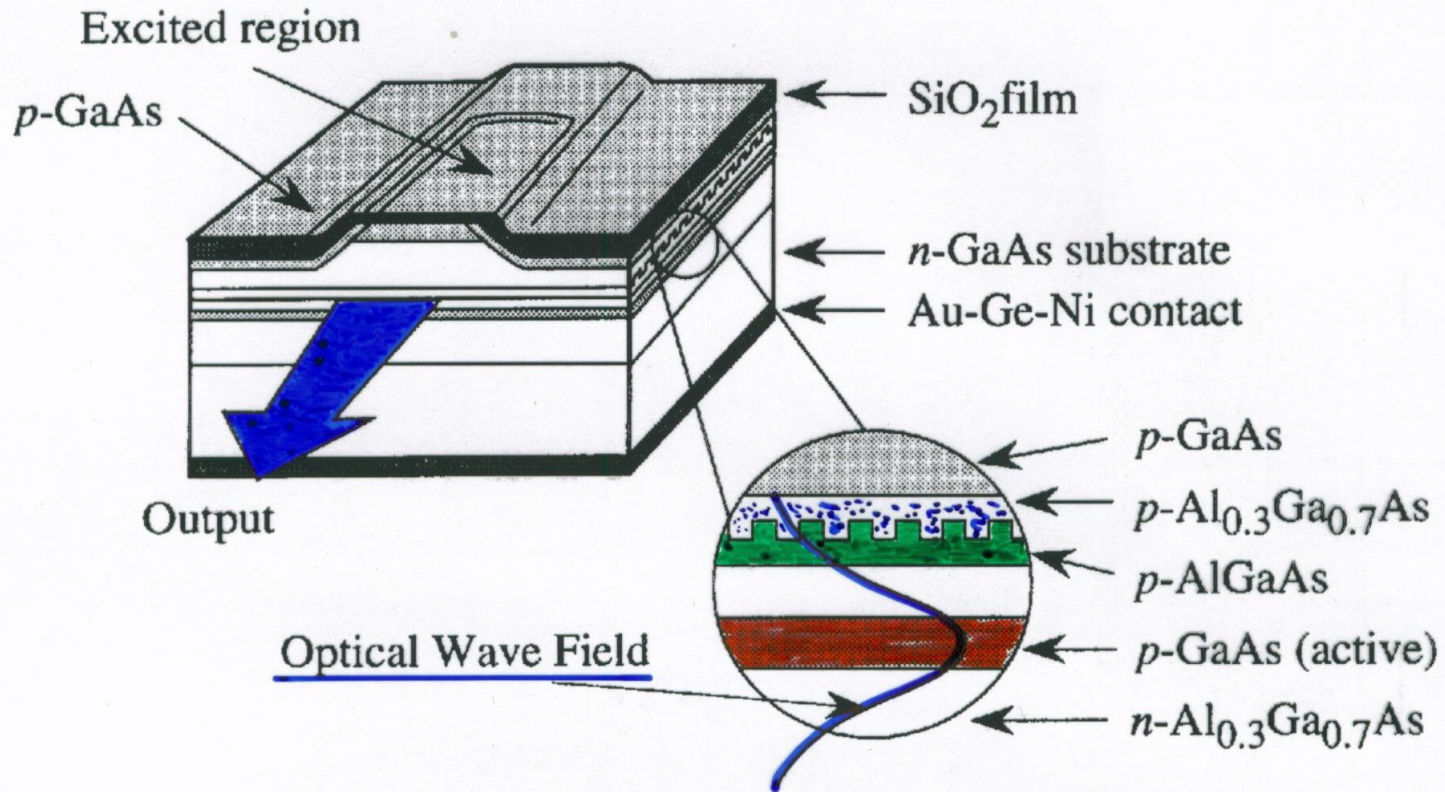


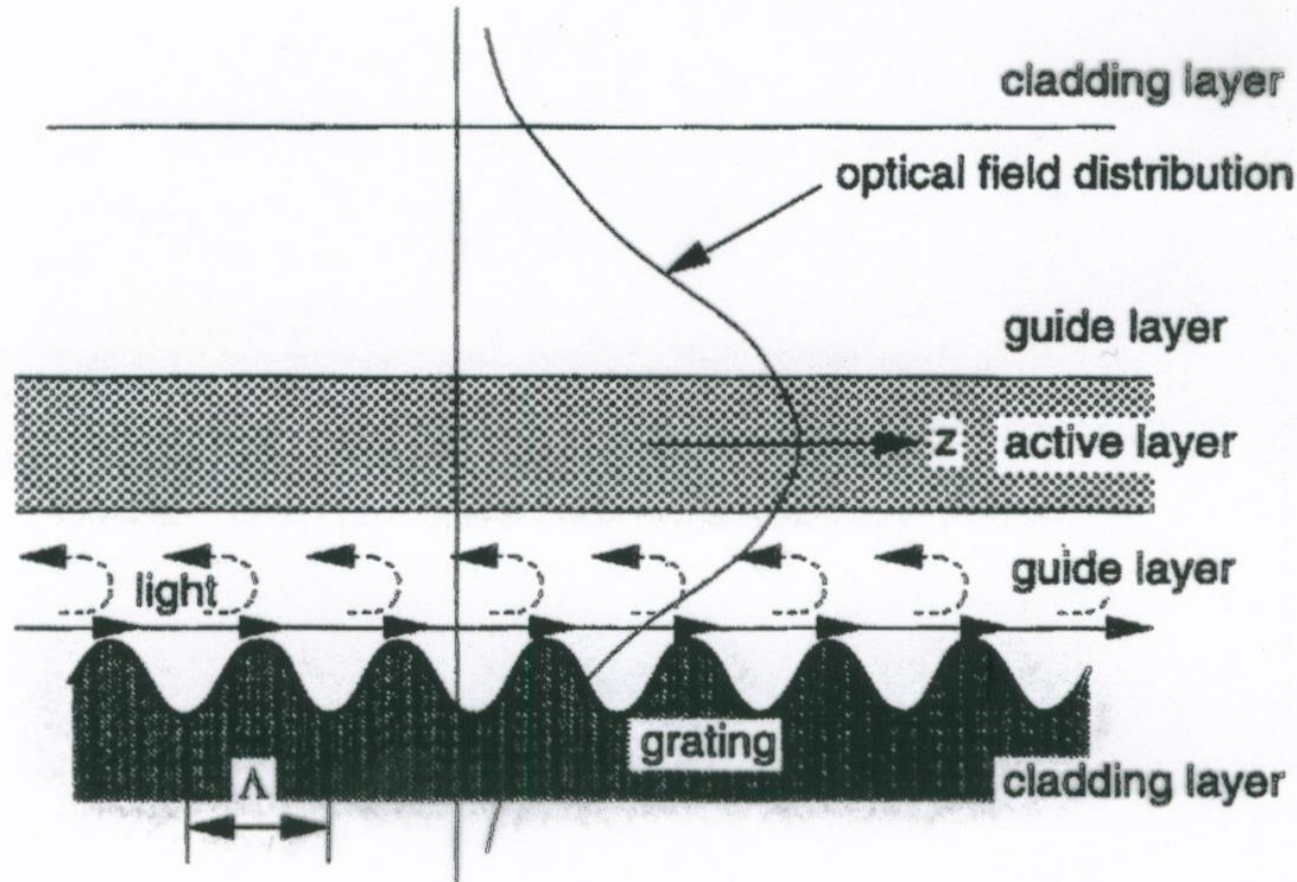
Figure 10.23: The distributed feedback structure incorporates a periodic grating in the laser structure. The confined optical wave senses the periodic grating as shown. (After K. Aiki, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-12, 601 (1976).)

- Periodisches Gitter in der Cladding Layer filtert eine einige optische Mode heraus, die durch die Gitterperiodizität bestimmt ist

DFB-Struktur: allgemeines

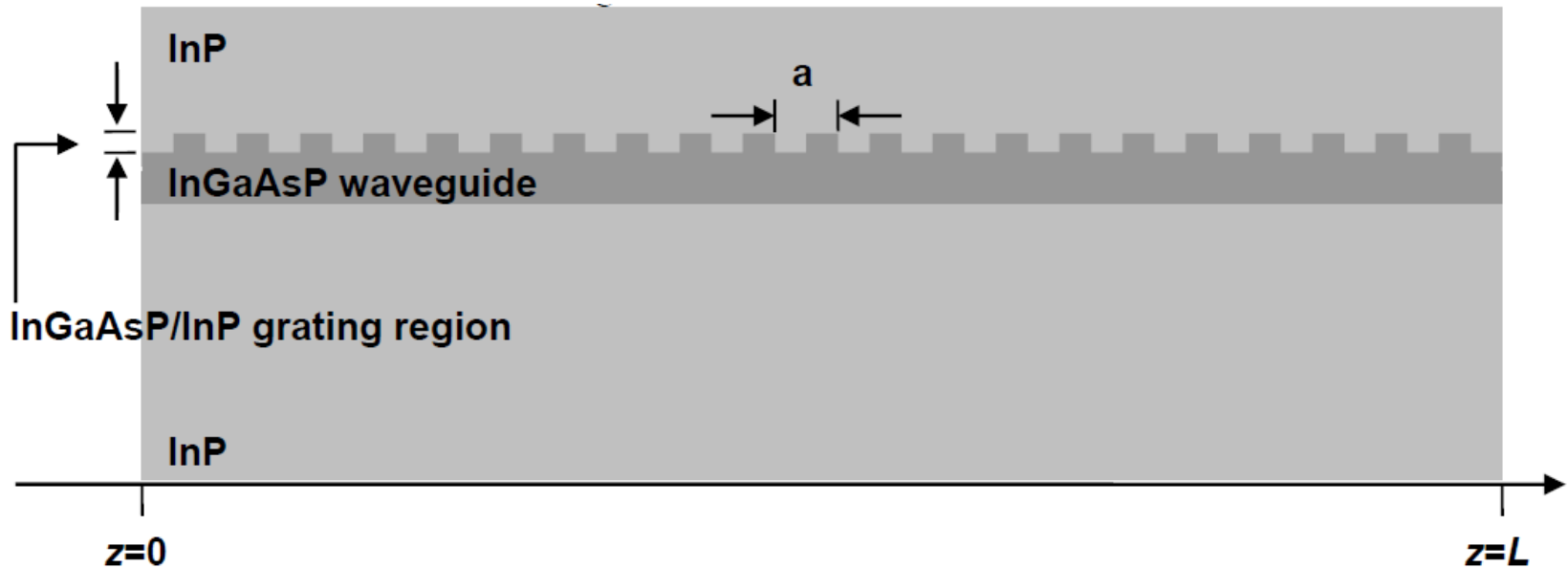
- Periode ist gegeben durch $\lambda_B/2n \Rightarrow$ Periodizität im Bereich weniger 100 nm
-
- Beispiel: $1,55 \mu\text{m}$, $3,5 \Rightarrow \sim 221 \text{ nm}$ Periodizität
- Für kurze Wellenlängen wird es noch deutlich aufwändiger
- Proben müssen überwacht werden und die Oberfläche ist im Bereich, in dem das Lichtfeld läuft
- Die Spaltflächen sind entspiegelt, um nicht noch einen zusätzlichen FB-Resonator zu haben
- Sehr aufwändige Herstellungstechnik macht das Bauelement teuer (DFB-Struktur $\sim 1000x$ teurer als einfache FB-Struktur)

DFB-Struktur: Modulation des Brechungsindex



- Modulation im Bereich der Grenze Cladding/Guiding-Layer, nicht in der aktiven Schicht
- Lichtfeld läuft aber im Bereich der Modulation

Wellenausbreitung in DFB-Wellenleiter

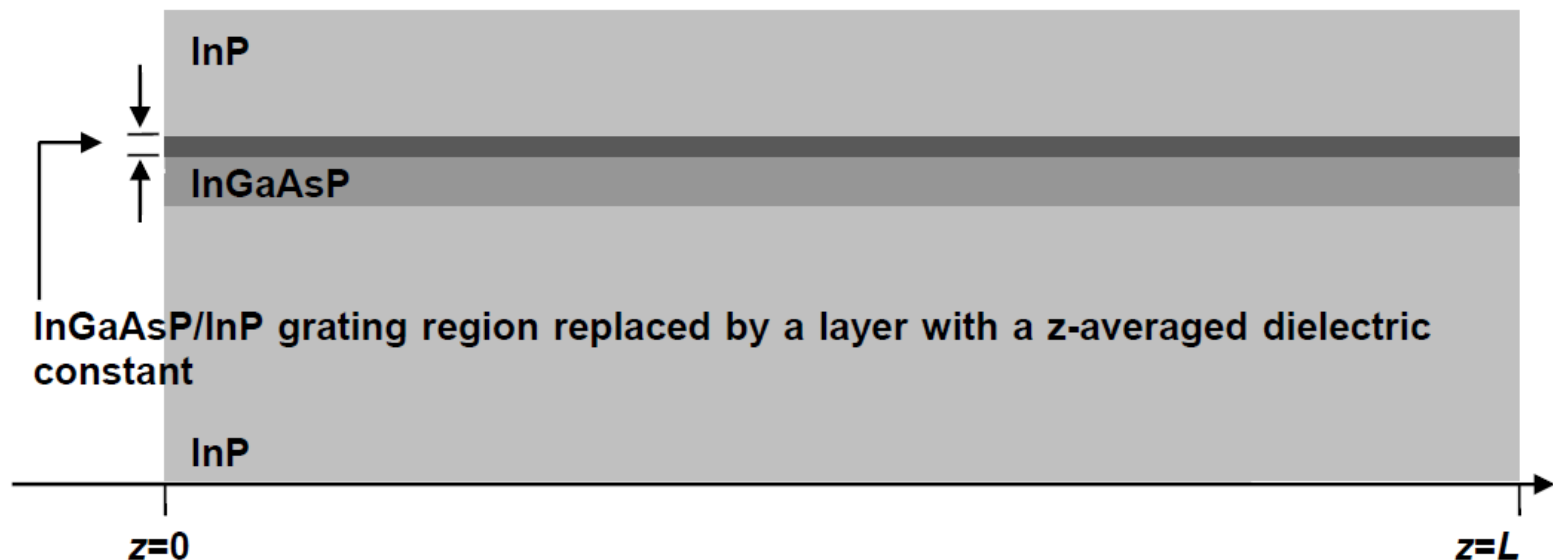


- Planarer Wellenleiter mit aufgeprägter Modulation in n

Wellenausbreitung in DFB-Wellenleiter

Wellenausbreitung in einer DFB/DBR-Struktur kann jetzt in zwei Schritten berechnet werden:

1. Berechnung der Eigenmoden mit dem gemittelten Brechungsindexprofil (siehe Skizze unten)
2. Behandlung der periodischen Modulation als Störung



Wellenausbreitung in DFB-Wellenleiter

Für eine Welle, die sich im nicht-modlierten Wellenleiter ausbreite gelte

$$E(z, t) = E_0 e^{i(\omega t - kz)}$$

Diese Welle kann an der periodischen Modulation

Bragg-reflektiert werden, wenn für den Wellenvektor k und die

Frequenz ω gilt

$$k - G = -k \Rightarrow k = \frac{G}{2} = \frac{\pi}{a}$$

$$\omega(k) = \omega(-k)$$

mit $G = \frac{2\pi}{a}$ 1D reziproker Gittervektor

Im Bereich des Wellenvektors $k_0 = \frac{\pi}{a}$ ($\lambda_0 = a2n_{eff}$)

wird sich die Modulation des Brechungsindex besonders bemerkbar machen.

Wellenausbreitung in DFB-Wellenleiter

- Entwicklung von $n(z)$ in eine Fourier-Reihe
- Nur Verwendung der Summanden die zu G gehören (1. Harmonische)
- Komplette Rechnung zeigt dann, dass der Wellenvektor und die Dispersionsfunktion für ω modifiziert wird

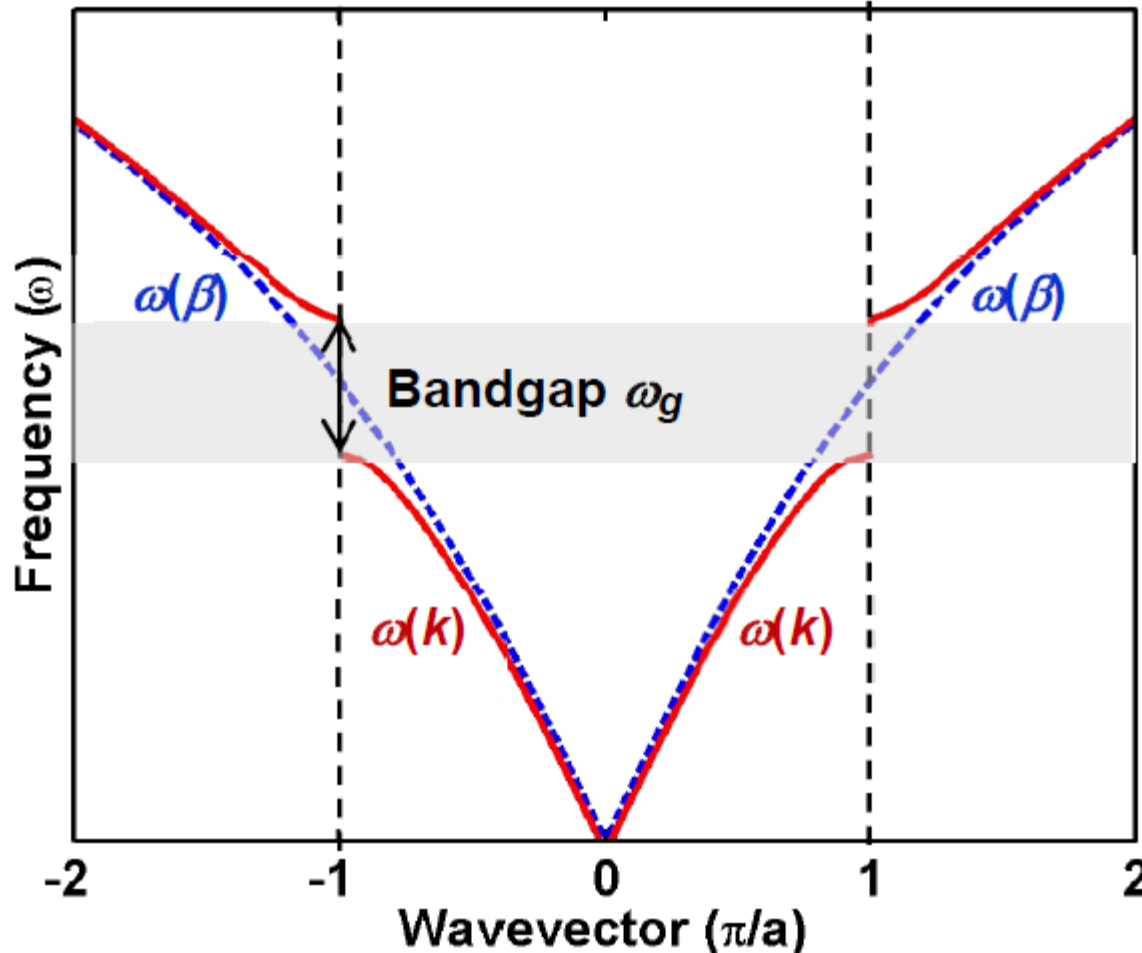
Für den Wellenvektor gilt

$$k_m = k_0 \pm \sqrt{(k - k_0)^2 - |K|^2}$$

Dabei ist K eine Kopplungskonstante, die angibt, wie stark sich die Modulation in n auswirkt.

- Für ω ergibt sich eine verbotene Zone, d. h. für keine k_m gibt es zu diesen Frequenzen eine erlaubte Lösung (analog zur Bandlücke)

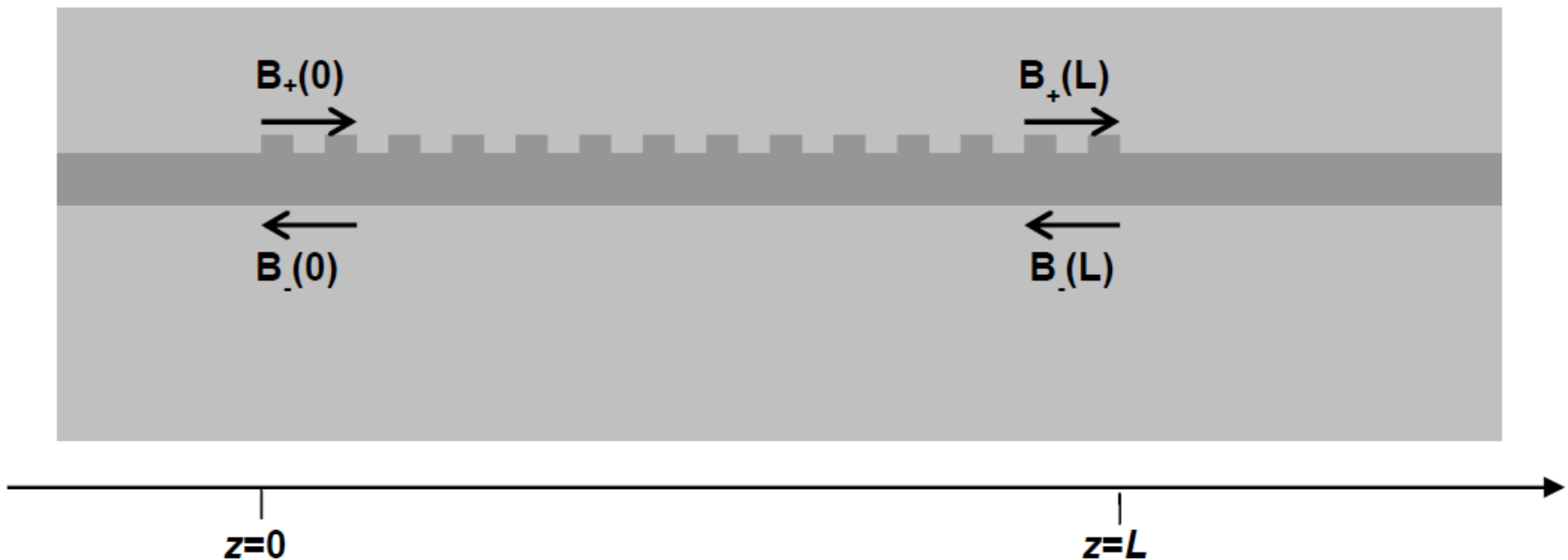
Wellenausbreitung in DFB-Wellenleiter: verbotener Bereich



- Verbotener Frequenzbereich analog zum Verbotenen Energiebereich (Bandlücke) im Halbleiter

In dieser Abbildung gilt: $\beta = k$ und $k = k_m$

Reflexion an einer DFB-Struktur

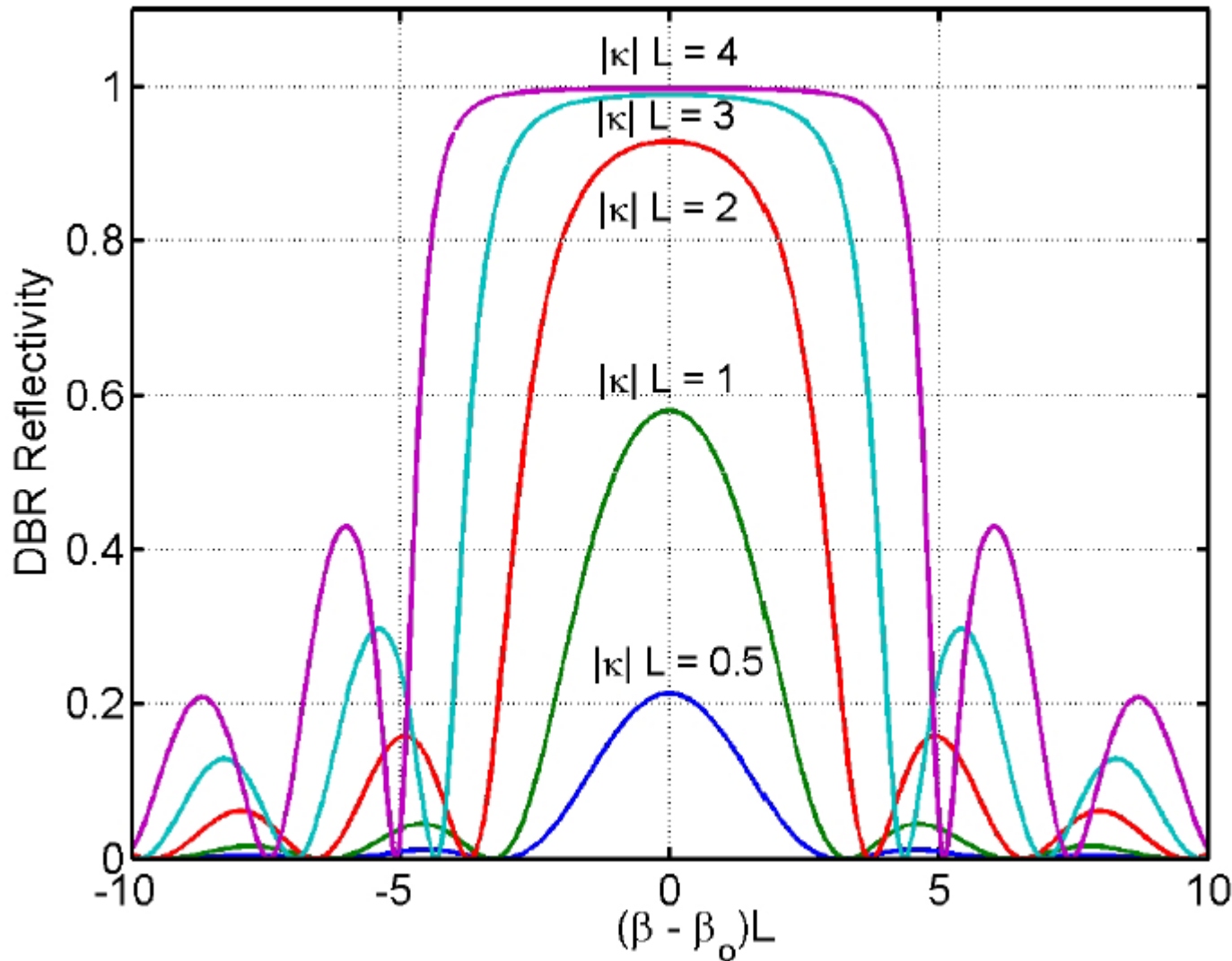


Welle läuft von links ein. Dann gilt für den Reflexionskoeffizienten

$$r = \frac{B_-(0)}{B_+(0)}$$

B = Amplitude des Feldes

Reflexion an einer DFB-Struktur

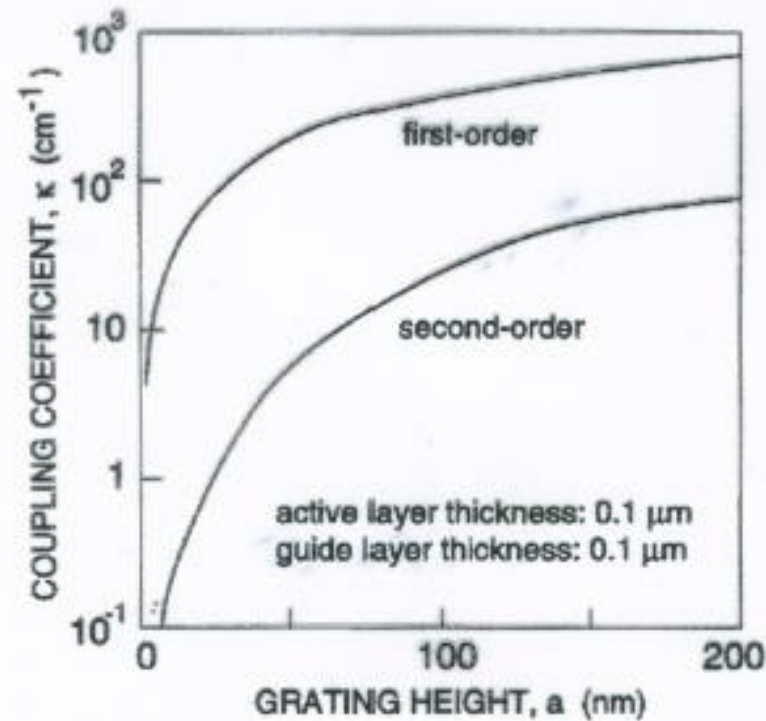
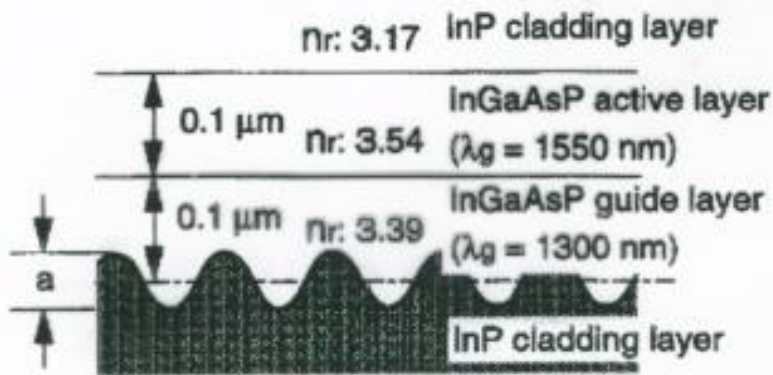


- Struktur wirkt wie ein Spiegel
- Kleines K erfordert großes L
- Hochreflektierenden Bereich bezeichnet man als Stopband
- Spiegel ist über eine Länge L verteilt (distributed) und beruht auf der Bragg-Reflexion
- DBR= **D**istributed **B**ragg **R**eflector

In dieser Abbildung gilt: $\beta = k$ und $\beta_0 = k_0$

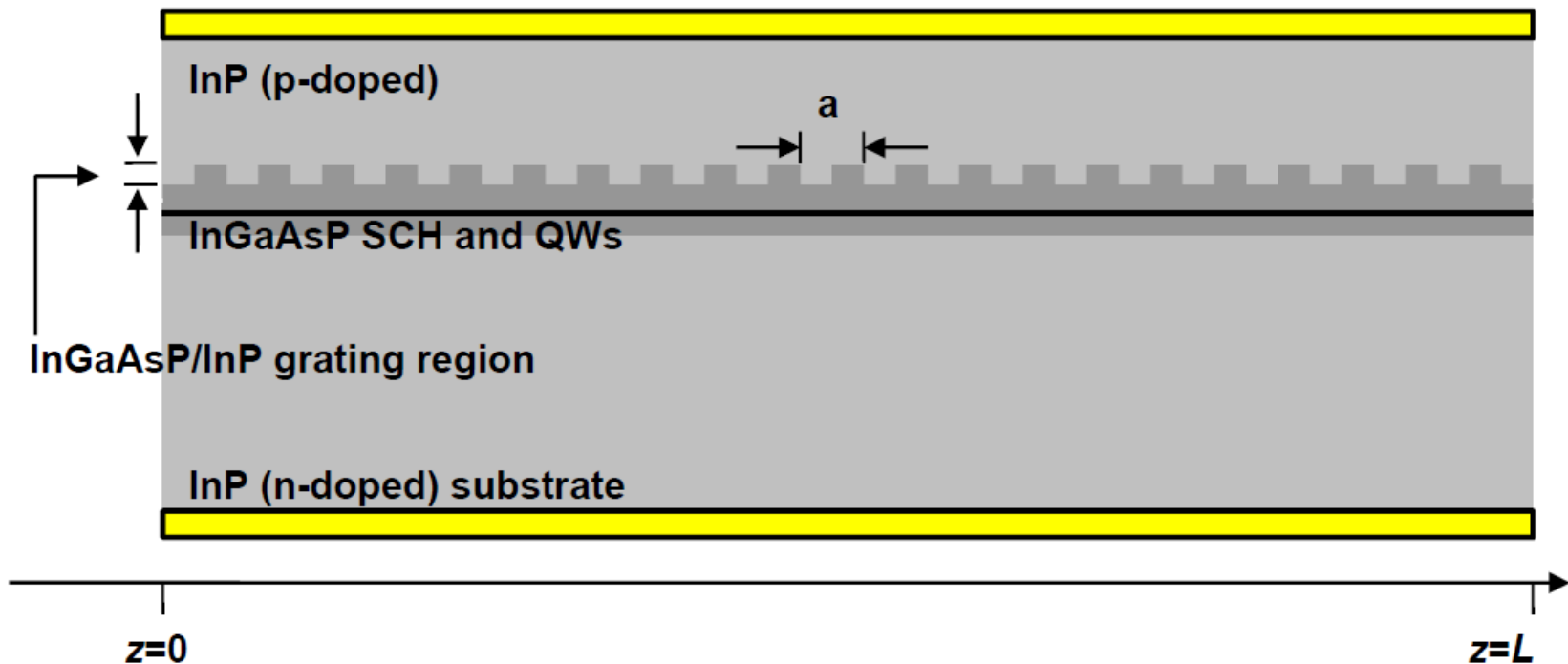
DFB-Struktur: Kopplungskonstante

- Kopplungskonstante K hängt vom Brechungsindexunterschied zwischen Cladding- und Guiding-Schicht ab. Je größer der Unterschied, desto größer die Kopplungskonstante
- Auch die geometrische Amplitude der Modulation ist relevant (nicht trivial zu berechnen)



- Relativ geringe Modulationshöhen (50 nm) oft ausreichend

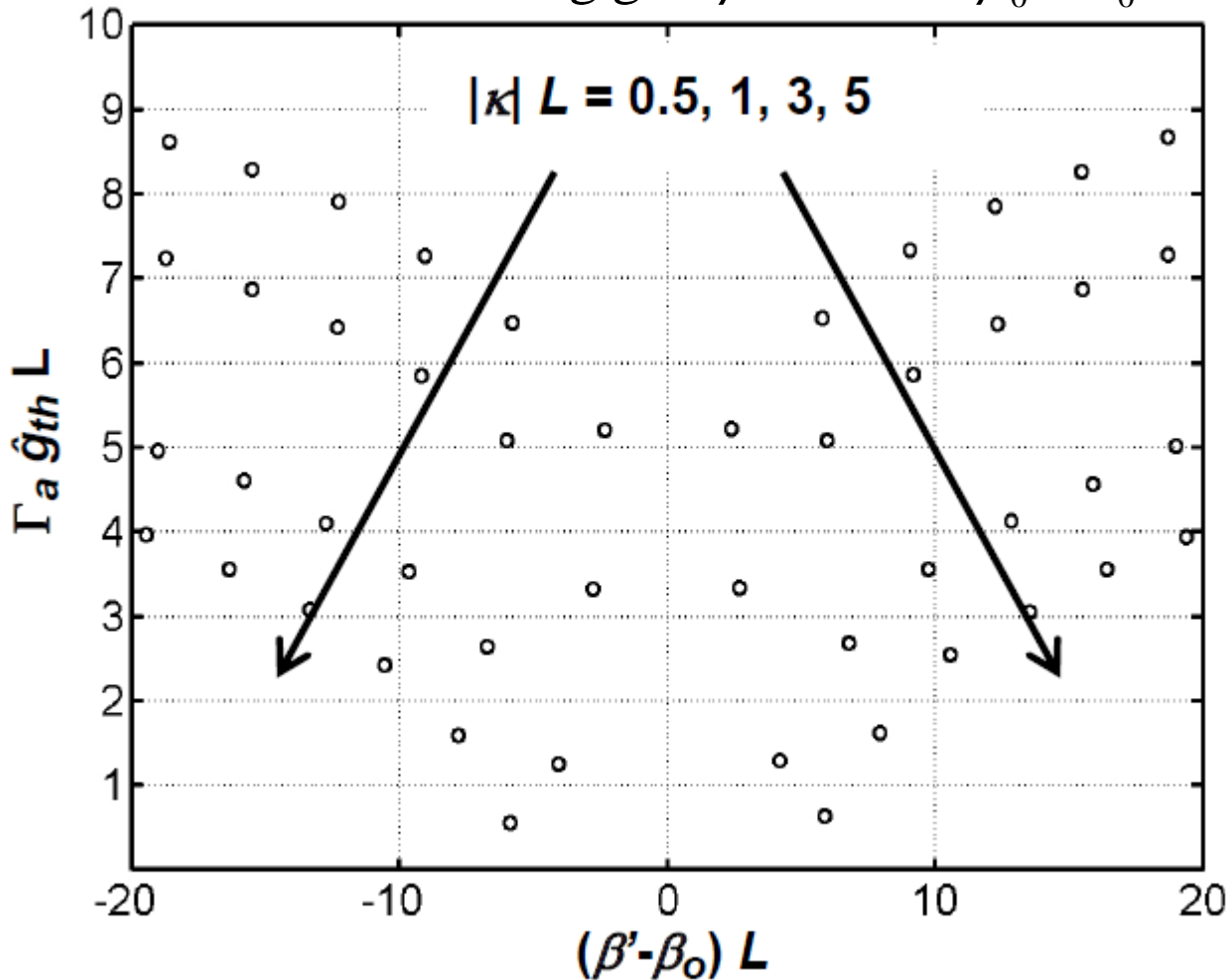
DFB-Laser



- Auch dieser Resonator unterstützt mehrere Moden
- Jeder dieser Moden hat eine andere Schwellverstärkung
- Keine Moden in der „Bandlücke“
- Mathematische Beschreibung umfangreich und nicht einfach. Man erhält als Lösungen Paare von g_{th} und k (bzw. ω).

DFB-Laser

In dieser Abbildung gilt: $\beta' = k$ und $\beta_0 = k_0$

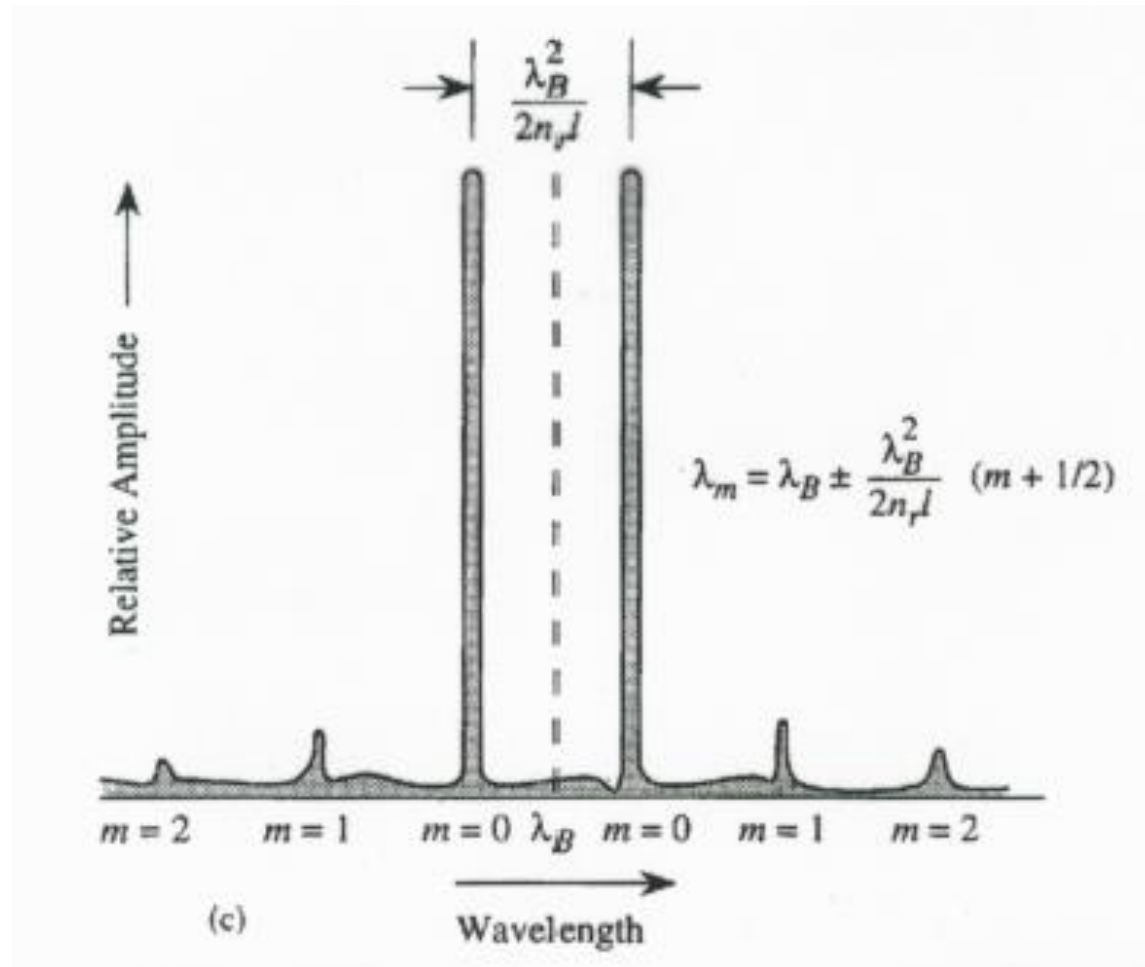


- Lösungen symmetrisch um k_0 verteilt
- Moden nahe an k_0 haben den niedrigsten Wert für g^{th}
- Diese beiden Moden sollten theoretisch lasen

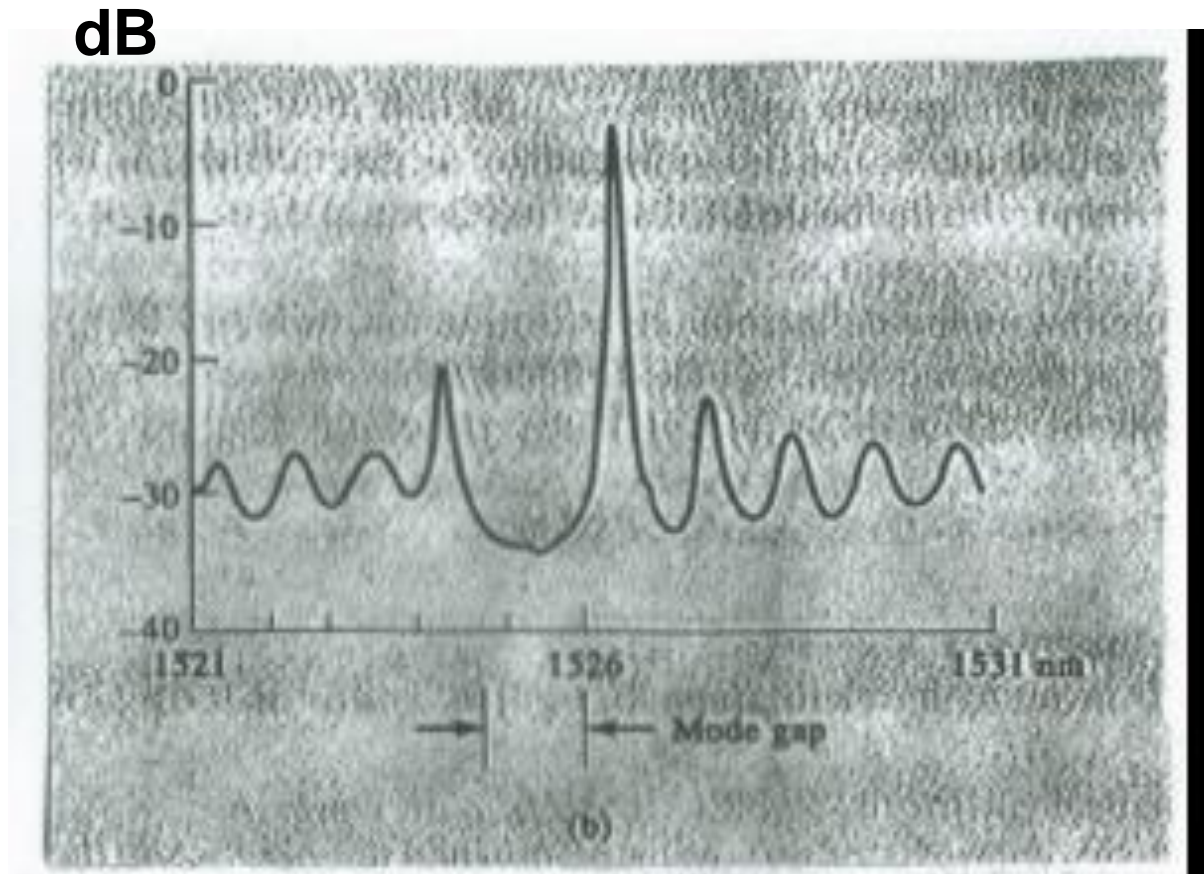
DFB-Laser

In dieser Abbildung gilt: $\beta' = k$ und $\beta_0 = k_0$

$l = L, \lambda_B = \lambda_0$



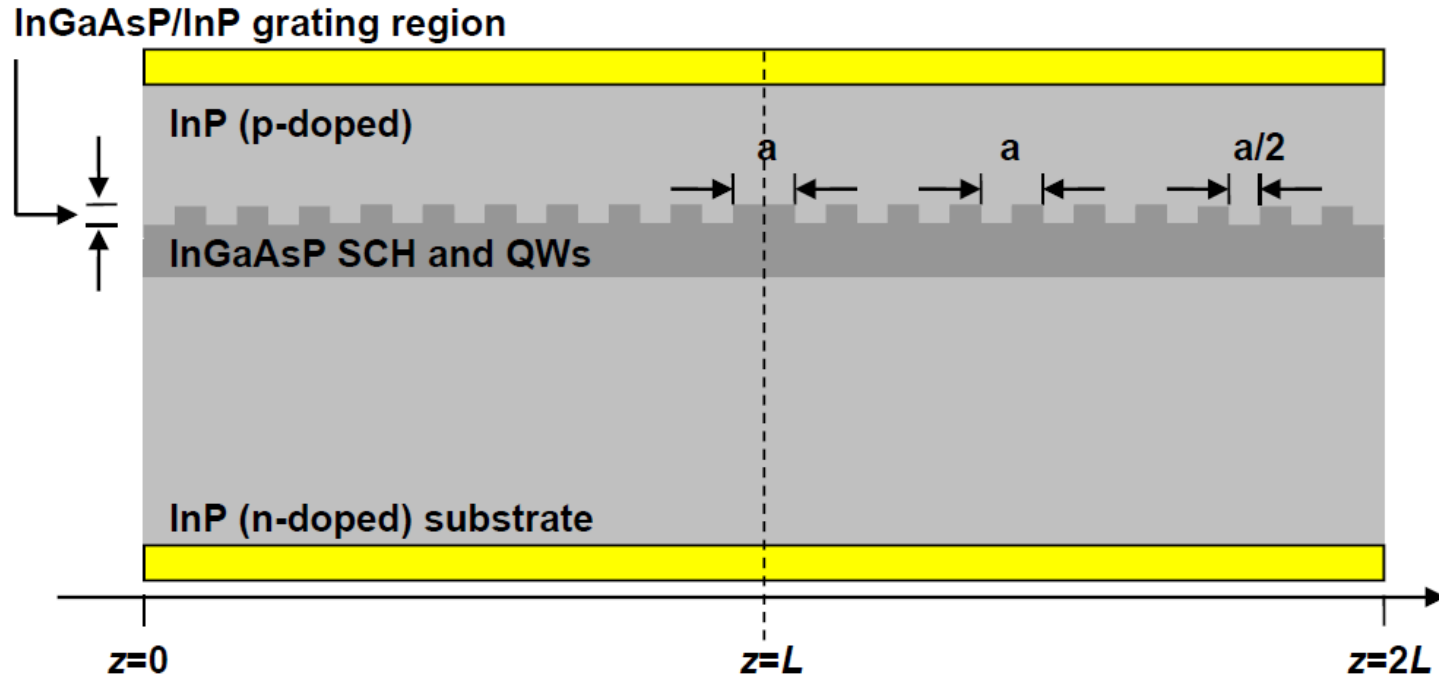
DFB-Laser



- In realen Strukturen last oft nur ein Mode
 - Imperfektionen in der Struktur
 - nicht ideale oder unsymmetrische AR-Beschichtungen

QWS-DFB-Laser

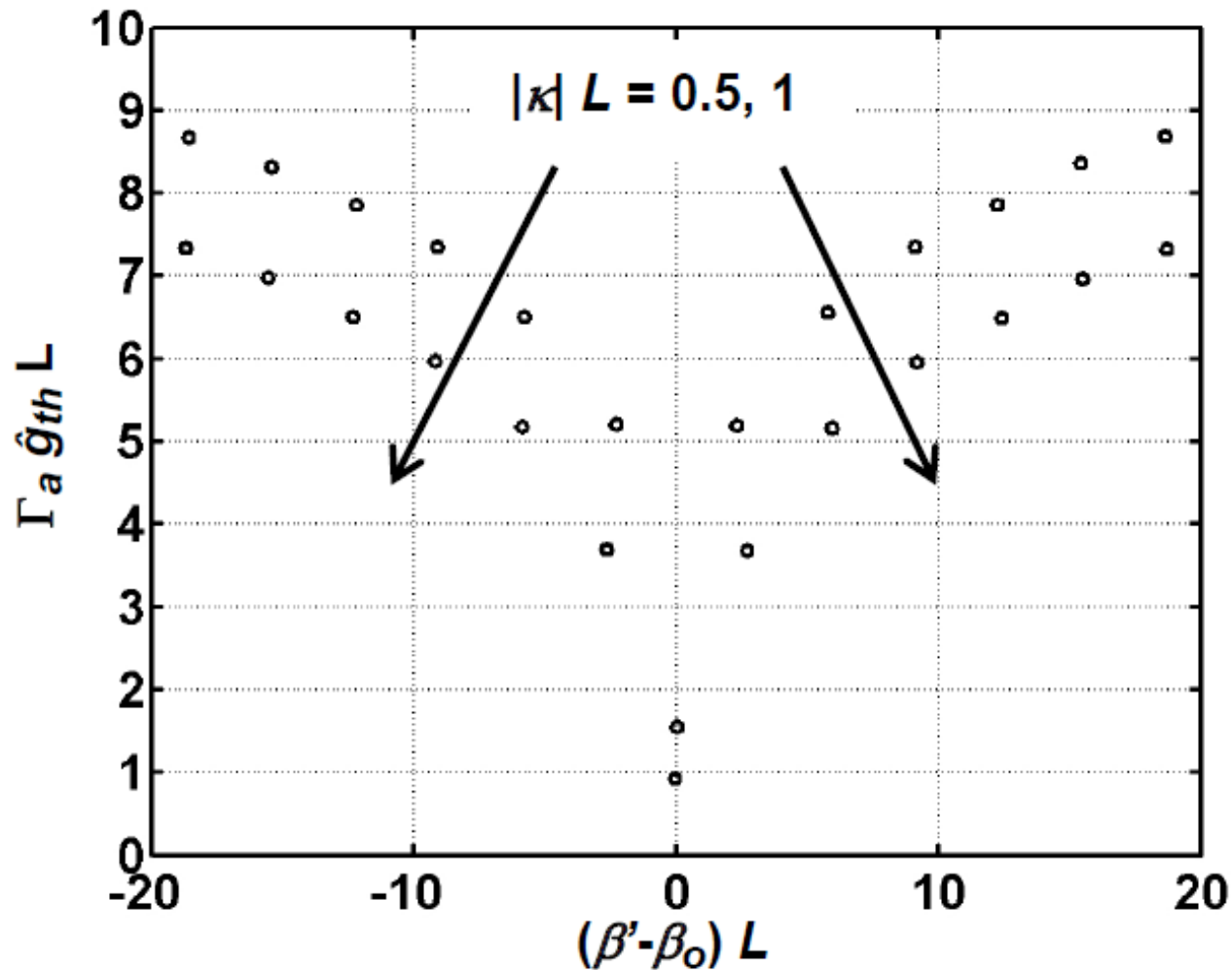
- QWS = **Q**uarter **W**ave **S**hifted
- Man verschiebt eine Hälfte der Struktur um $a/2$



- Analog zum Festkörper erzeugt solch ein Defekt Zustände in der Bandlücke

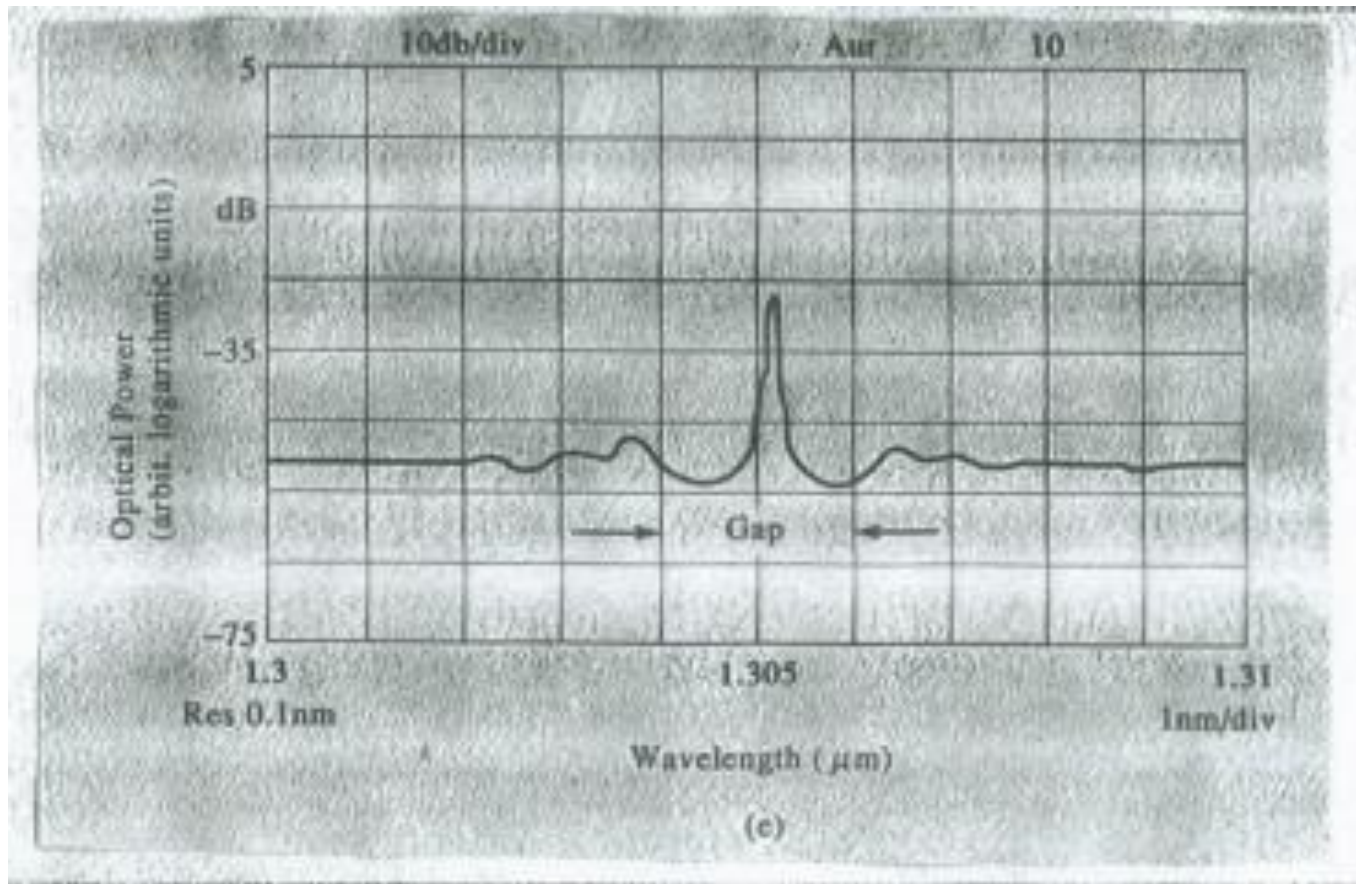
QWS-DFB-Laser

Für einen QWS-DFB-Laser gibt auch im idealen Fall nur eine Mode mit niedrigstem g_{th}



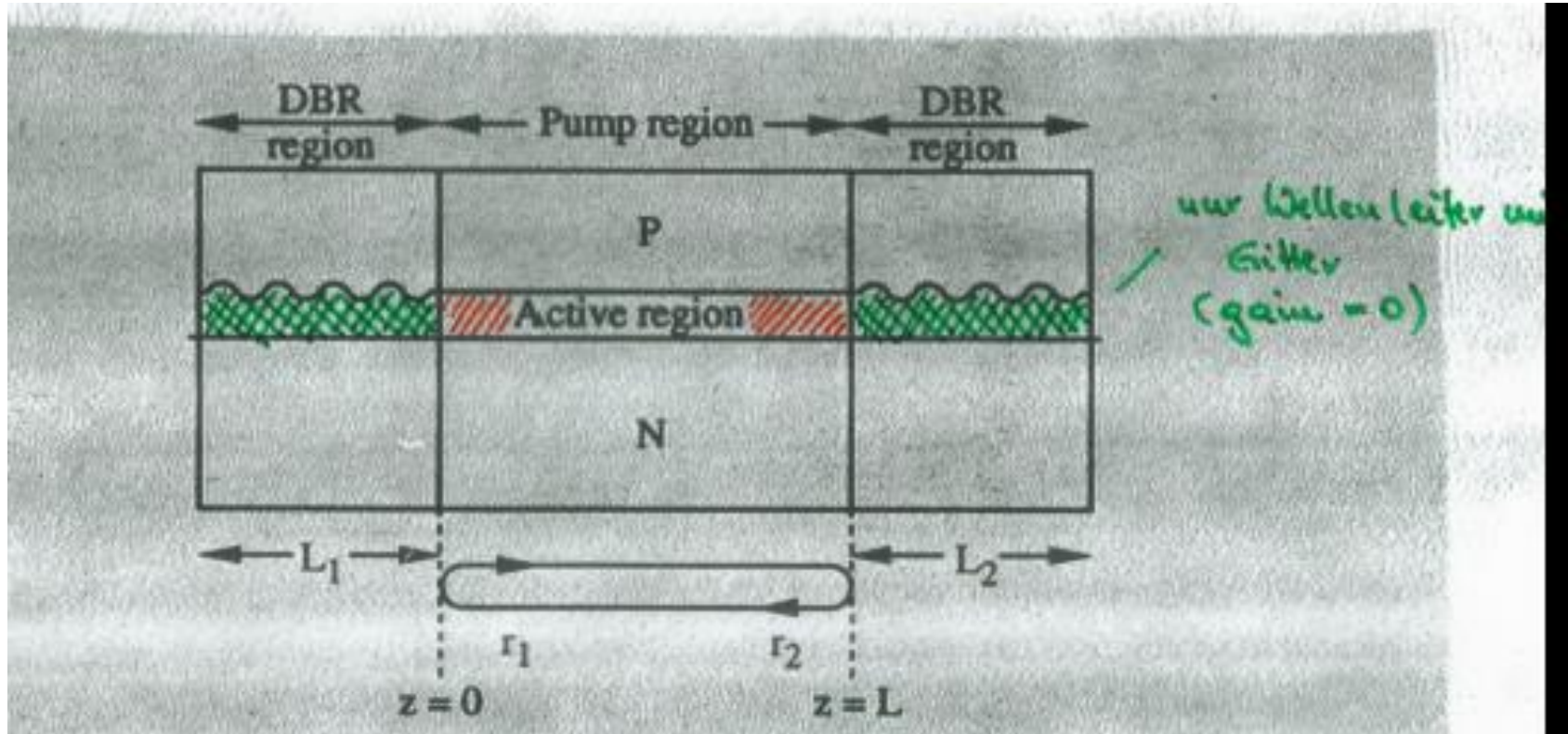
QWS-DFB-Laser

Für eine QWS-DFB-Laser gibt auch im idealen Fall nur eine Mode mit niedrigstem g_{th}



In-plane DBR-Laser

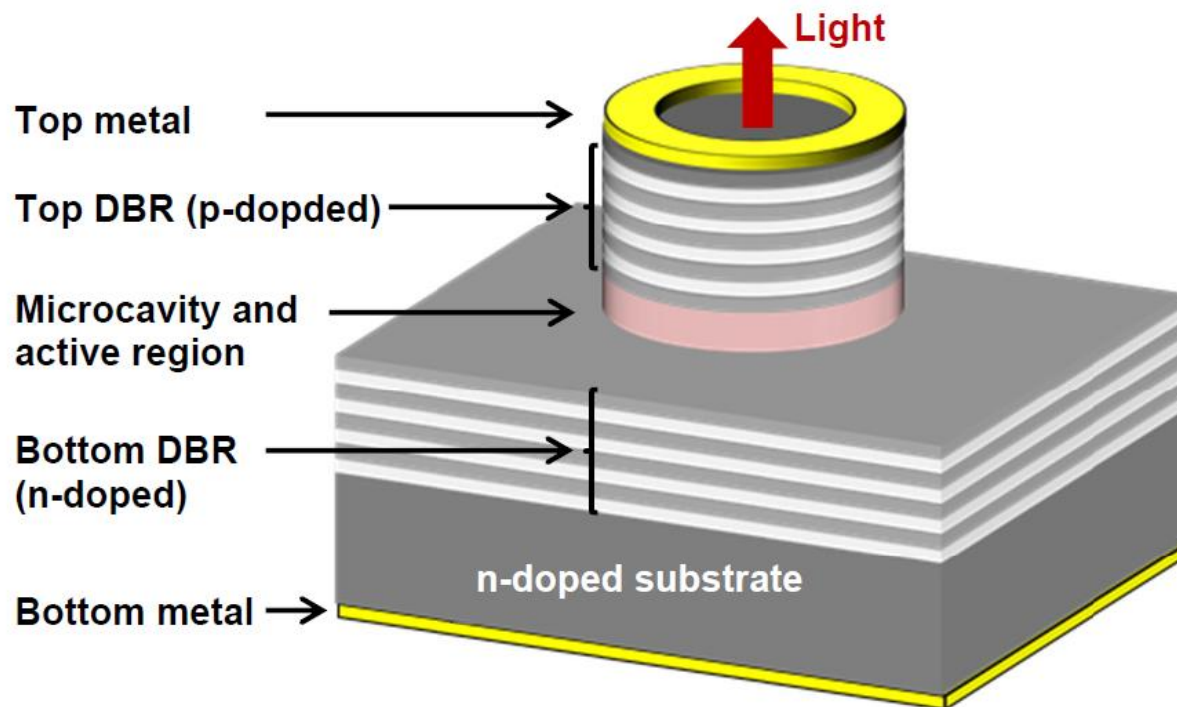
Man kann die Bereiche mit moduliertem n auch nur als Spiegel benutzen und die Cavity einbetten



- Kleines L sorgt für hohe Modenseparation
- Hohe Spiegelreflektivität durch DBR

Oberflächenemittierende Laser

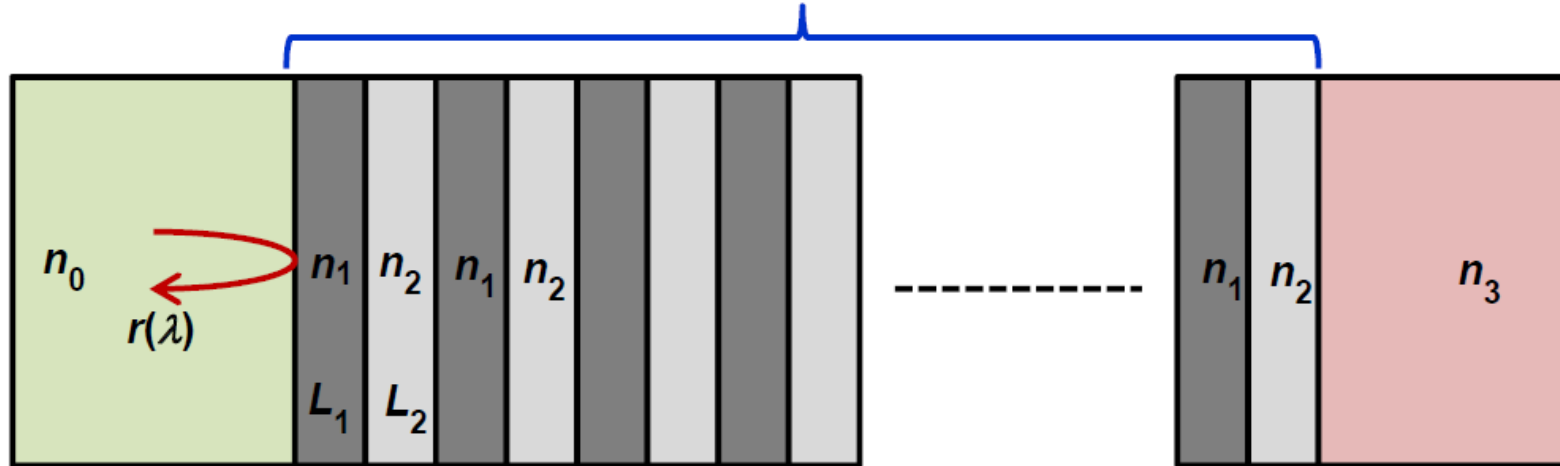
- Bisher kam das Licht an der Kante, also entlang der aktiven Zone aus dem Bauelement (Kantenemitter)
- Licht kann auch senkrecht zur aktiven Schicht abgestrahlt werden (also durch die „Oberfläche“)
- VCSEL = **V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**aser
- Hohe Strahlqualität und niedrige Schwellströme sind die größten Vorteile



DBR = Distributed Bragg Reflector

Stapel aus dielektrischen Paaren wird als Spiegel eingesetzt

m periods and *2m* layers



Um bei einer Zentralwellenlänge λ (im Vakuum) die maximale Reflektivität zu erhalten muss gelten: $k_1 L_1 + k_2 L_2 = \pi$

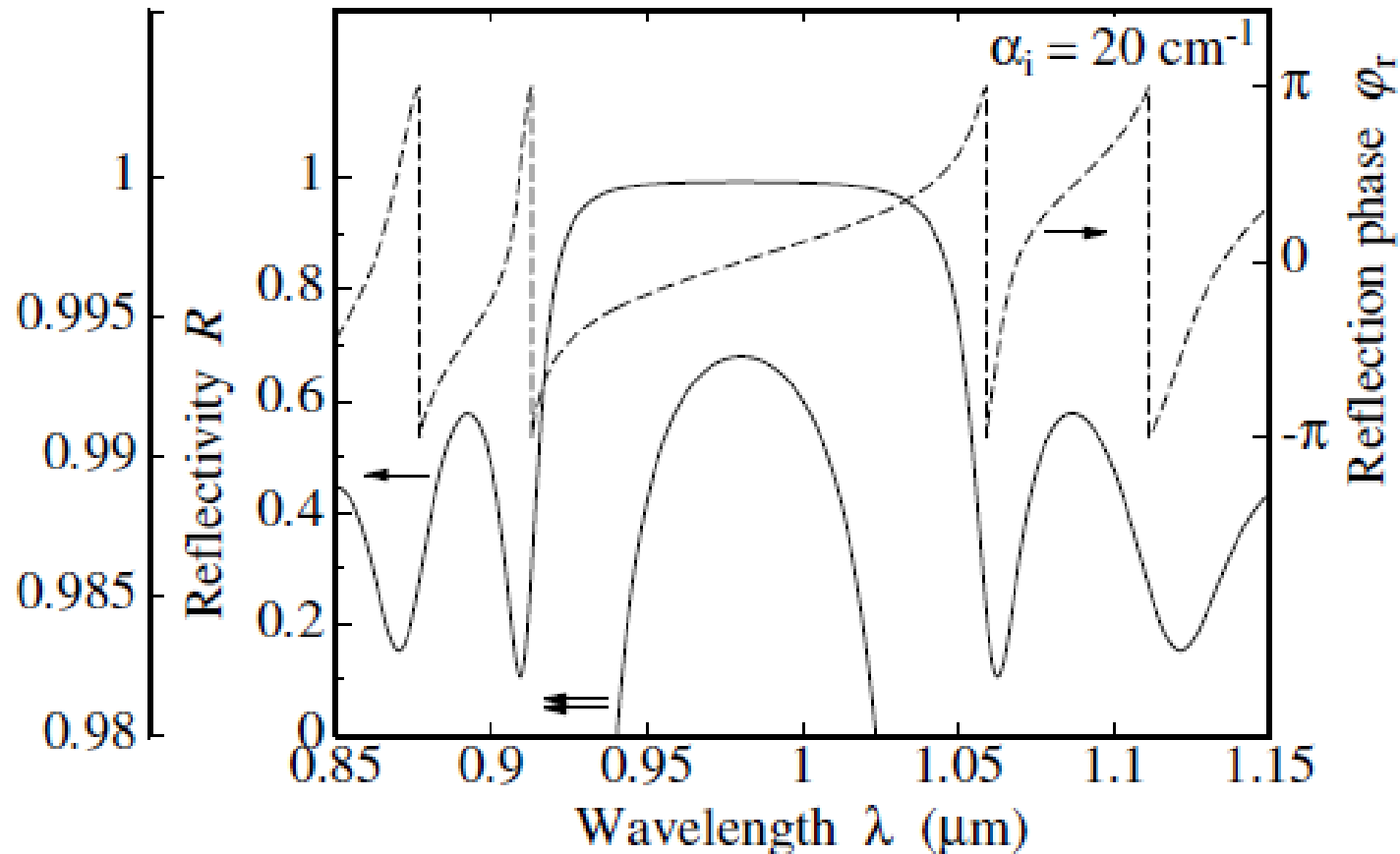
In der Regel werden die Schichtdicken so gewählt, das gilt

$$k_1 L_1 = \frac{\pi}{2} \quad \text{und} \quad k_2 L_2 = \frac{\pi}{2}$$

Damit ergibt sich für L_1 und L_2 :

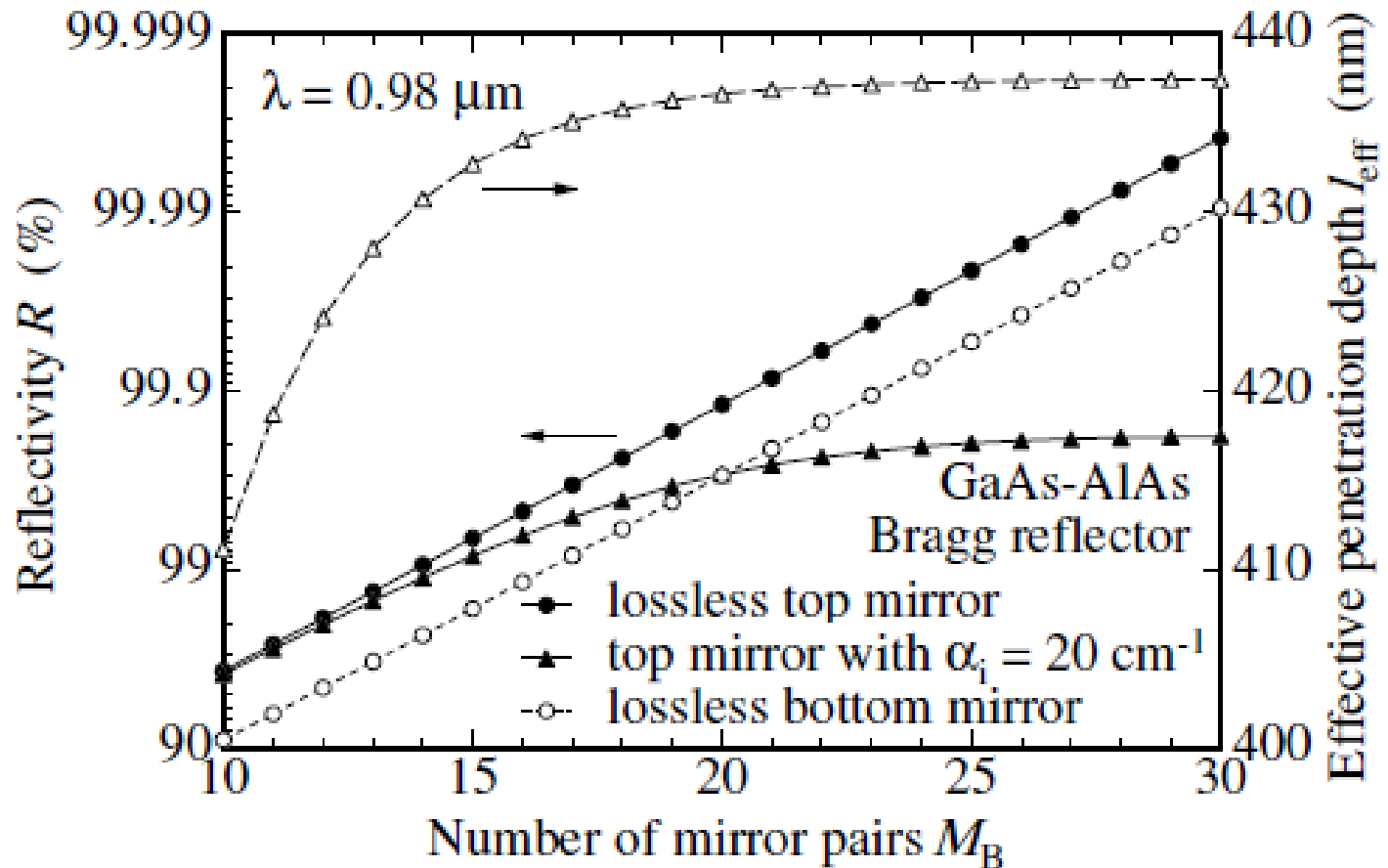
$$L_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \quad \text{und} \quad L_2 = \frac{\lambda}{4n_2}$$

DBR = Distributed Bragg Reflector



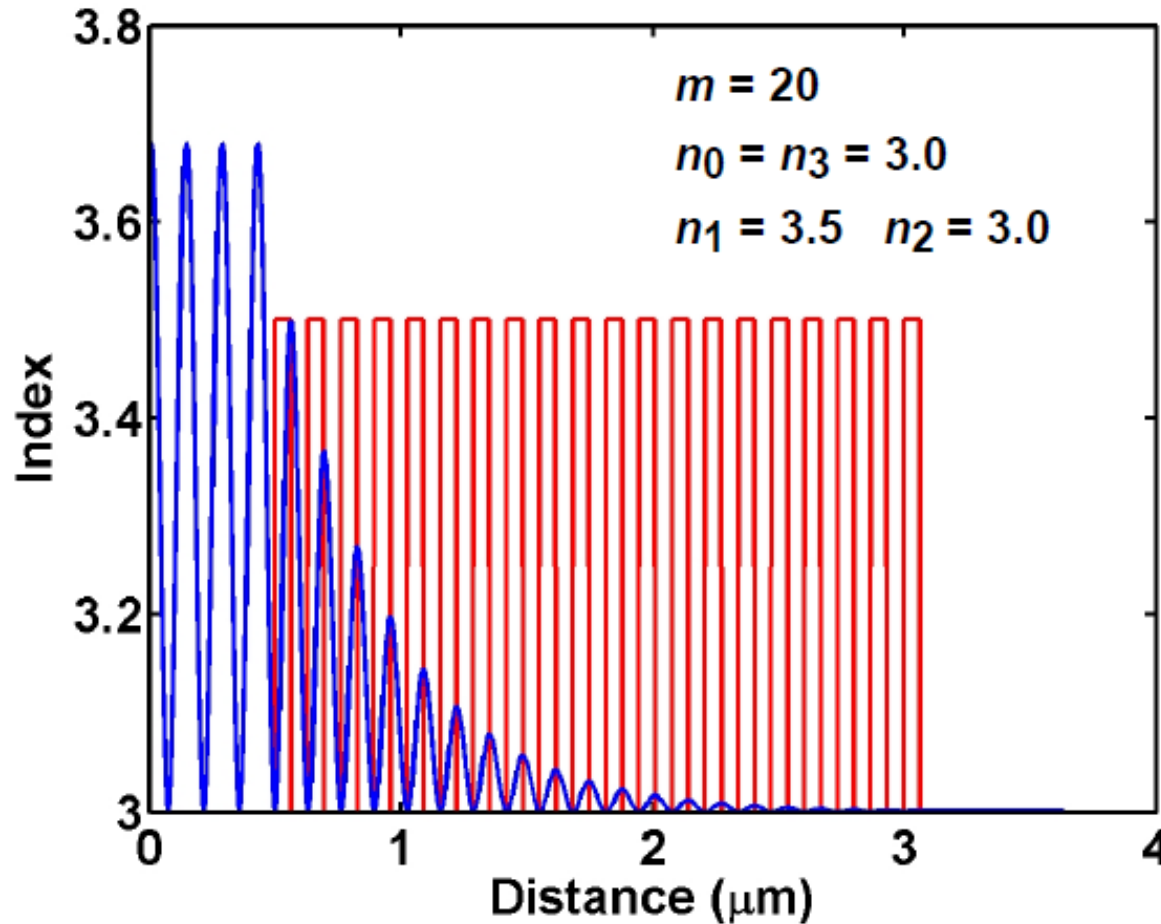
- Nicht nur die zentrale Wellenlänge wird gut reflektiert (Stoppband)
- Je größer der Brechungsindexkontrast desto besser
- Mehr Spiegelpaare helfen!!

DBR = Distributed Bragg Reflector



- Verluste im Spiegel sind ein Problem

DBR = Distributed Bragg Reflector

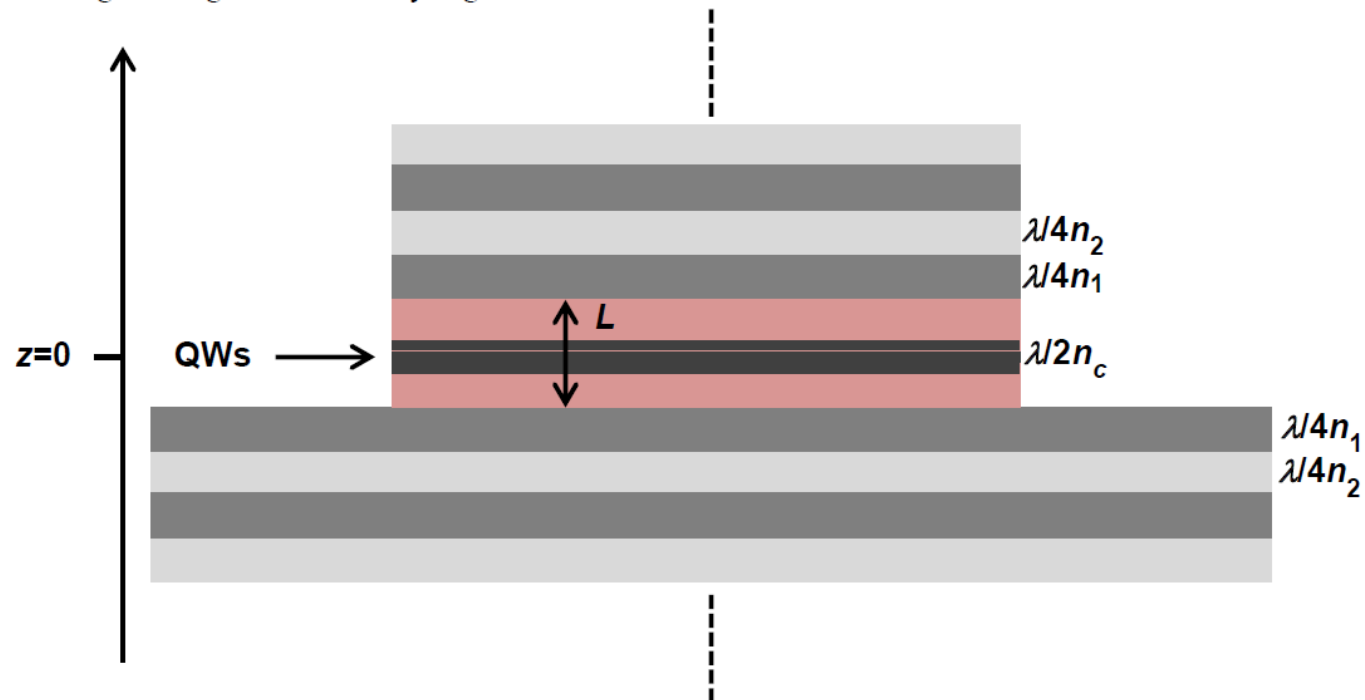


- Rechnungen für Zentralwellenlänge bei senkrechtem Einfall

- Intensität der Mode fällt exponentiell in den DBR ab
- Großteil der Mode im DBR => möglichst keine Absorption dort

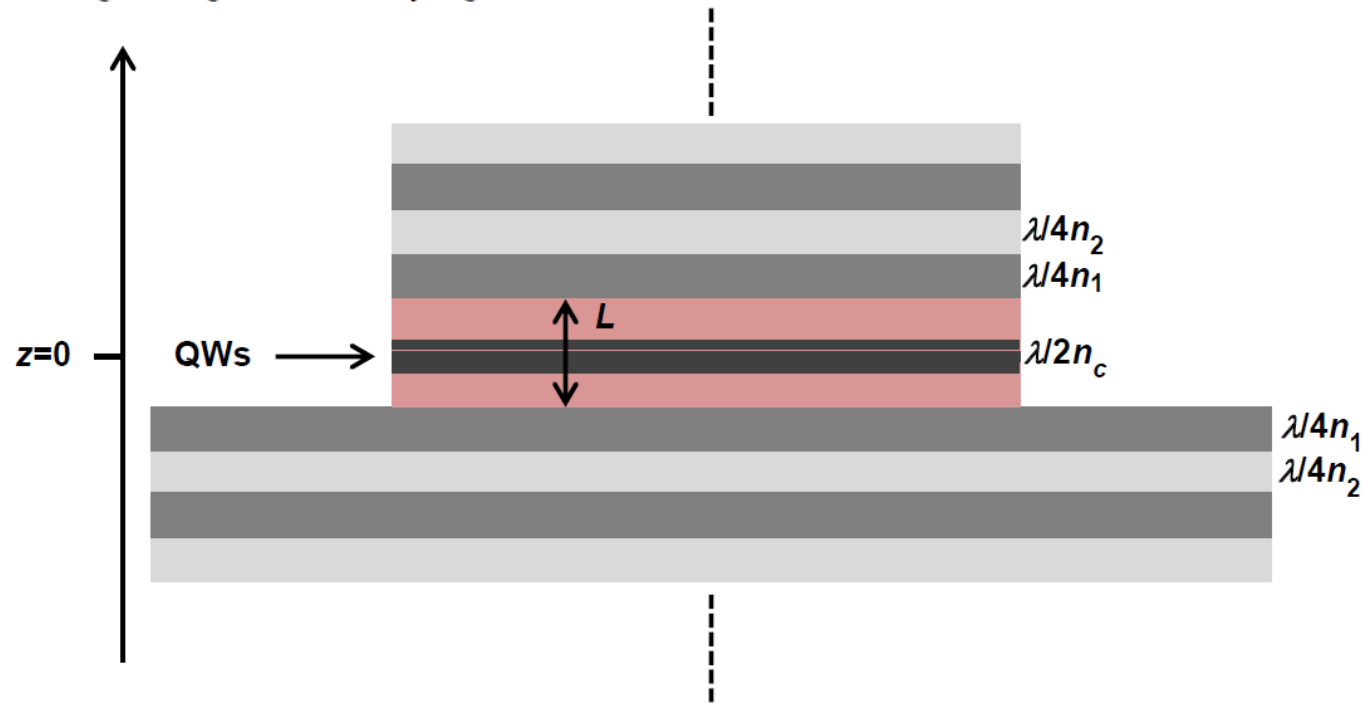
Oberflächenemittierende Laser

- VCSEL = Microcavity zwischen zwei DBR



- Randbedingung für longitudinale Moden: Feld muss an der Grenzfläche zu den DBR verschwinden
- Sin und cos-artige Moden
- Nur sin-artigen Moden liefern Feldmaximum im Zentrum der Cavity
- Üblicherweise wird eine sogenannte $\lambda/2$ -Cavity verwendet

Oberflächenemittierende Laser

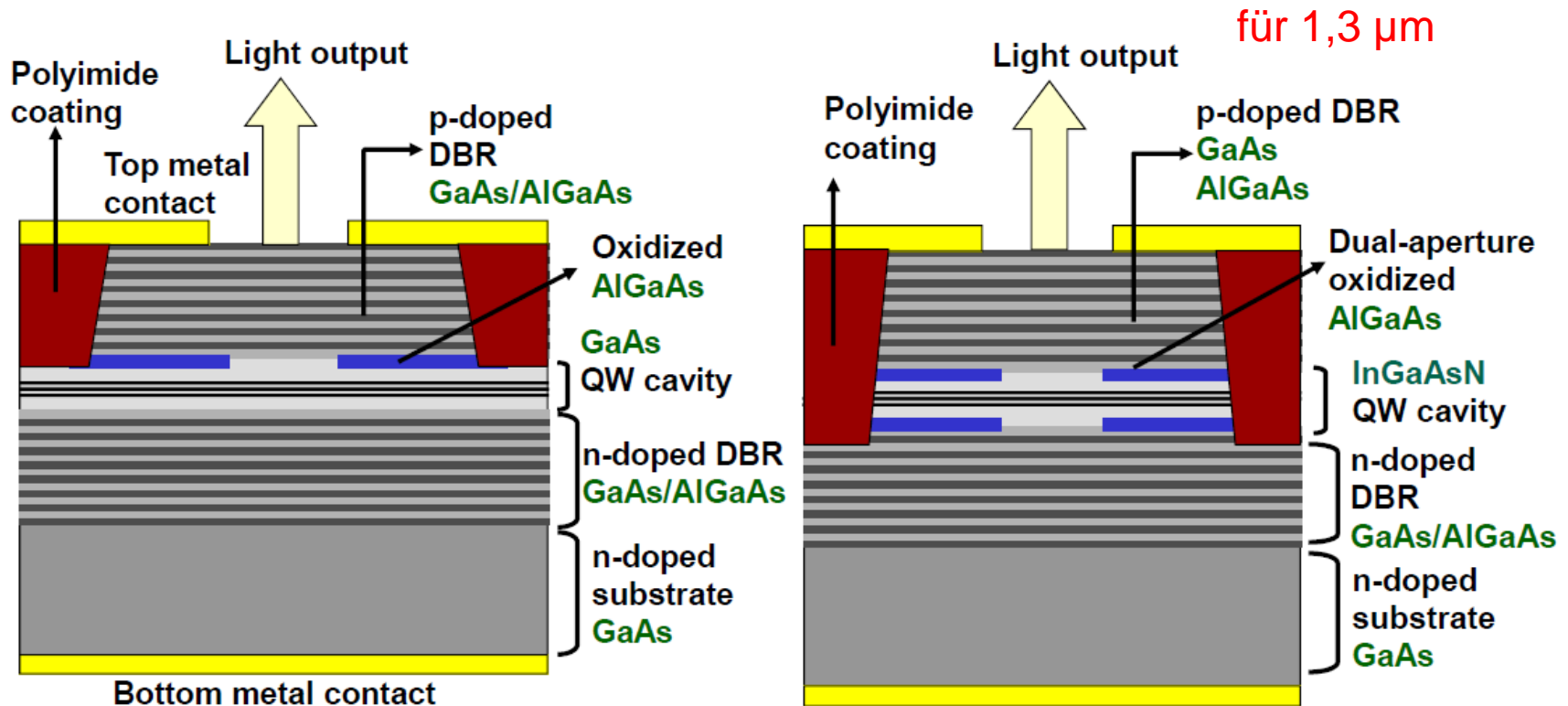


- In d. R. hat man nur einen longitudinalen Mode
- Transversale Moden werden durch laterale Ausdehnung bestimmt
- Bis etwa 4 μm Durchmesser nur ein transversaler Mode => Laser **monomodig**
- Form des VCSEL (kreisförmig, elliptisch) hat auch Einfluss auf das abgestrahlte Licht

Oberflächenemittierende Laser: Bemerkungen

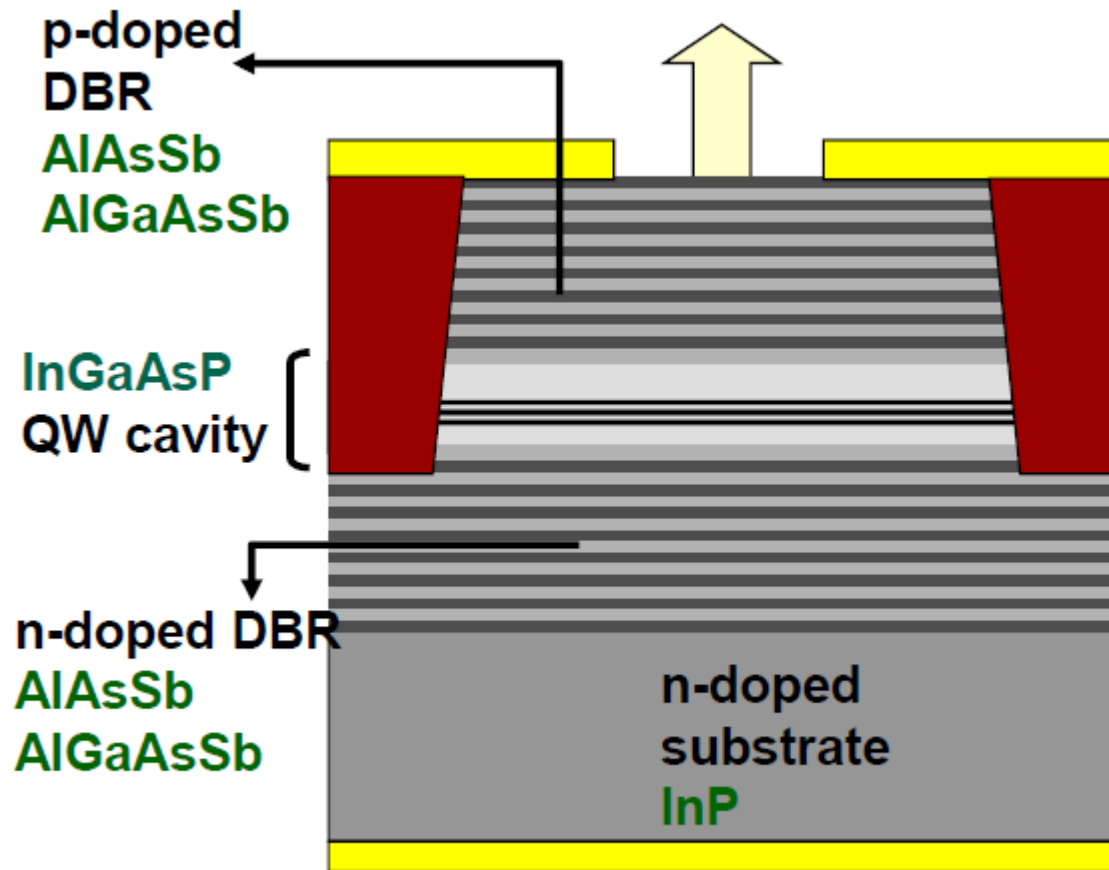
- Hohe Reflektivität der DBR nötig, da der Cavity gain klein ist (geringes aktives Volumen)
- Dotierung der DBR verändert den Brechungsindex => muss berücksichtigt werden
- Elektrisch gepumpte Struktur ist i. d. R. schwieriger zu realisieren als ein optisch gepumpter Laser
- Reflektivität des DBR sinkt, wenn die Schichtdicken nicht genau stimmen
- Folge eines Drifts der Wachstumsraten durch lange Wachstumszeiten (VCSEL sind dicke Strukturen mit $8 - 10 \mu\text{m} \sim 8 - 10 \text{ h}$ Wachstumszeit)
- Einige zusätzliche Spiegelpaare können das z. T. kompensieren
- VCSEL können on-wafer getestet werden (produktionstechnischer Vorteil)
- Kleines Bauelement => keine sehr hohen Leistungen

Oberflächenemittierende Laser: moderne Designs



- Stromapertur (in sehr vielen VCSELn eingesetzt) hat zwei Vorteile:
 - Beschränkung der Verstärkung auf einen kleineren Raumbereich => nur ein transversaler Mode
 - Reduktion des Schwellstroms

Oberflächenemittierende Laser: moderne Designs



- Für 1,55 μm gab es lange Zeit keine VCSEL
- AsSb schwierig zu wachsen