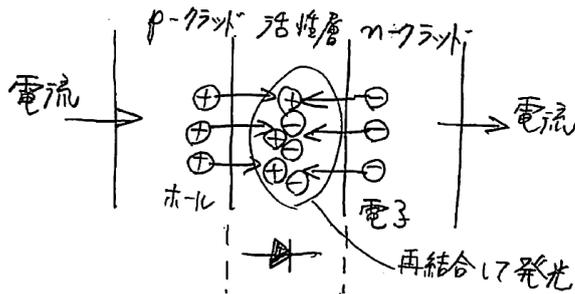
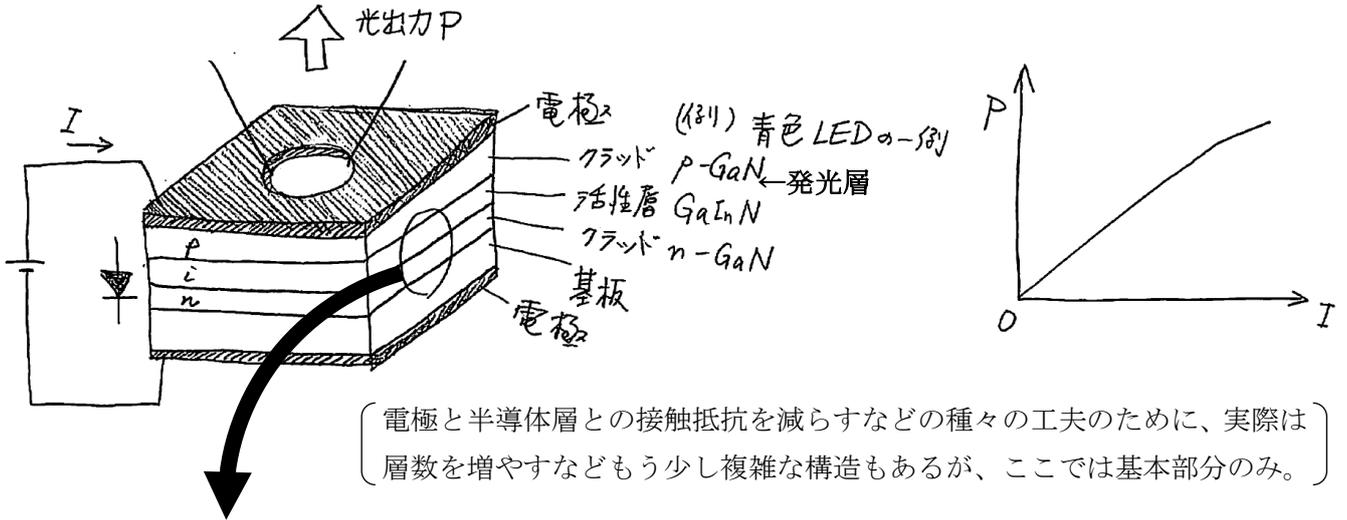


講義ノート 第 6 回

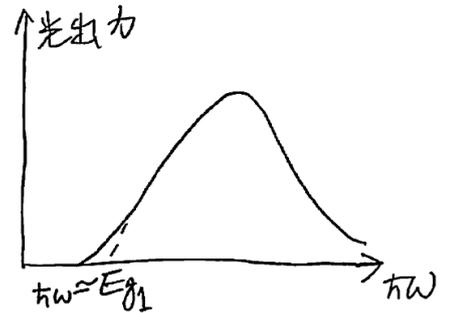
LEDと半導体レーザー

- ・LED (構造、原理、特性)
- ・半導体レーザー (構造、原理、特性、コヒーレンス、量子井戸レーザー)

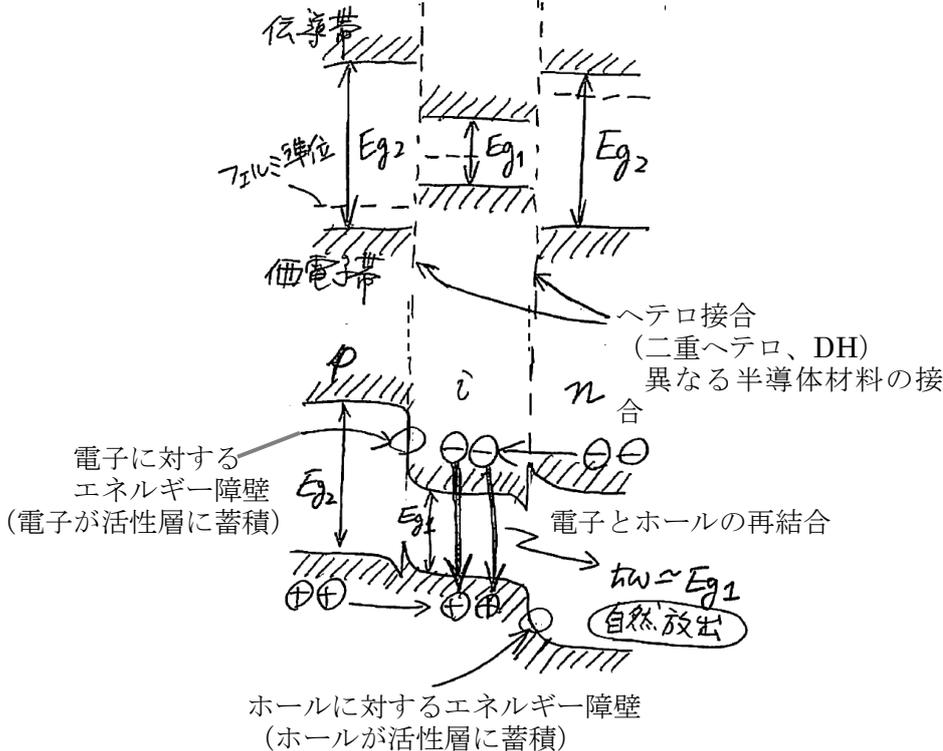
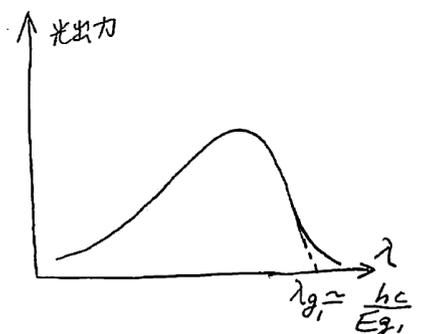
**LED** (Light Emitting Diode)



発光エネルギーの分布



発光波長の分布



活性層の材料について

以下の条件を満たす材料を選択する

- 発光させたい周波数に対して  $\hbar\omega = hf \approx E_g$

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{より、発光させたい波長は } \lambda \approx \frac{hc}{E_g}$$

波長 $\lambda$ の単位を[ $\mu\text{m}$ ]、エネルギーギャップ  $E_g$ の単位を[eV]で表したとき、これらの関係式は簡単になる（第3回目の資料の中の間を参照のこと）

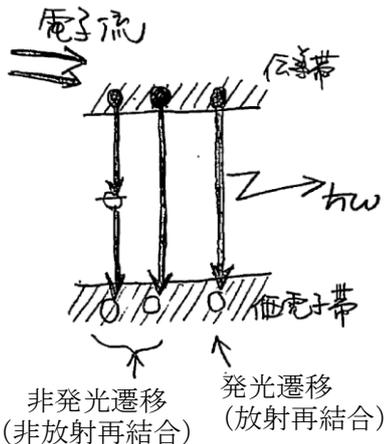
- 直接遷移半導体であること
- 適当なクラッド層の半導体材料も必要
  - 活性層よりもバンドギャップが大きい（電子とホールを閉じ込めるため）
  - 活性層よりも屈折率が小さい（光導波路形成のため。これは後述の半導体レーザーで必要）
  - 活性層と格子定数が近い

材料の例

混晶	材 料			波長 [ $\mu\text{m}$ ]			
	活 性	クラッド	基 板	0.5	1	5	10
III-V	GaInN	GaN	GaN				
	AlGaAs	AlGaAs	GaAs				
	GaInAsP	GaInP	GaAs				
	GaInAsP	AlGaInP	GaAs				
	AlGaInP	AlGaInP	GaAs				
	GaInAs	GaAs	GaAs				
	GaInNAs	GaAs	GaAs				
	AlGaInAs	InP	InP				
	GaInAsP	InP	InP				
	AlGaAsSb	AlGaAsSb	GaSb				
	InAsSbP	InAsSbP	InAs				
IV-VI	PbSnSeTe	PbSnSeTe	PbTe				
II-VI	ZnSSe		GaAs				

発光の量子効率

活性層の電子密度  $N$  の時間変化  $\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau_R} - \frac{N}{\tau_{NR}} = 0$  (定常状態)



電流注入  
( $V$ は活性層体積)

非発光遷移により電子密度が  
減る割合  
( $\tau_{NR}$ は非放射再結合寿命時間)

発光遷移により  
電子密度が減る割合  
( $\tau_R$ は放射再結合寿命時間)

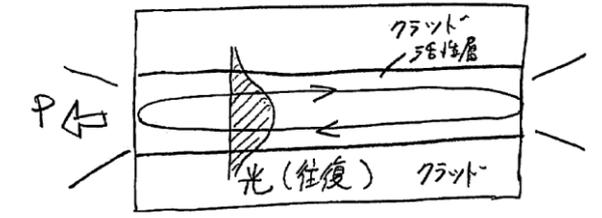
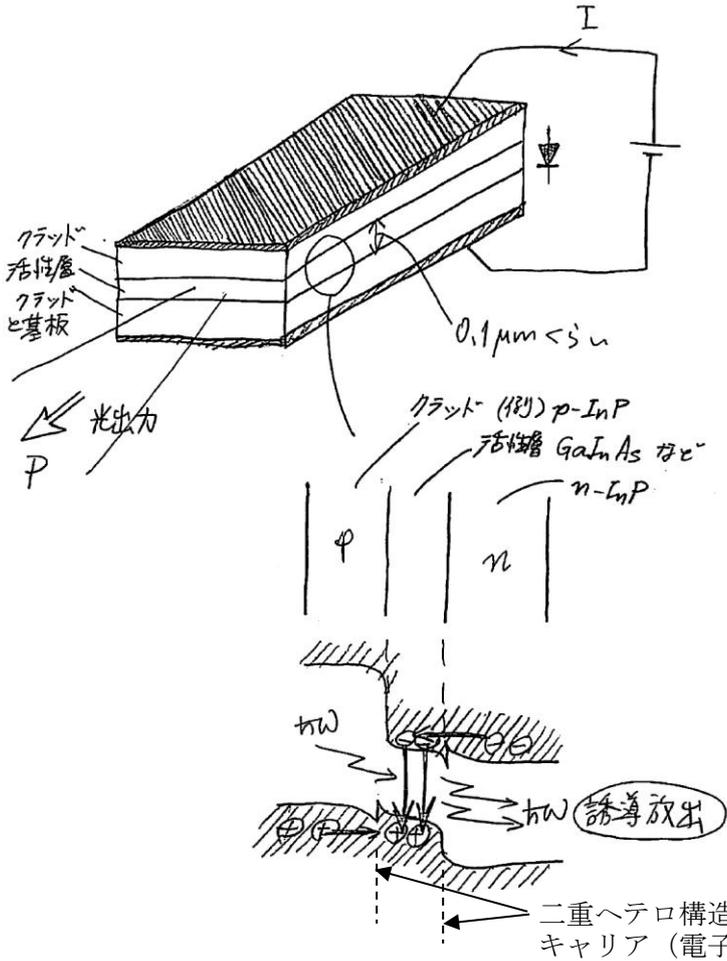
放射効率 (量子効率)

$$\eta = \frac{\text{放射に寄与する電子数}}{\text{注入電子数}} = \frac{N/\tau_R}{I/eV} = \frac{1/\tau_R}{1/\tau_R + 1/\tau_{NR}} = \frac{1}{1 + \tau_R/\tau_{NR}}$$

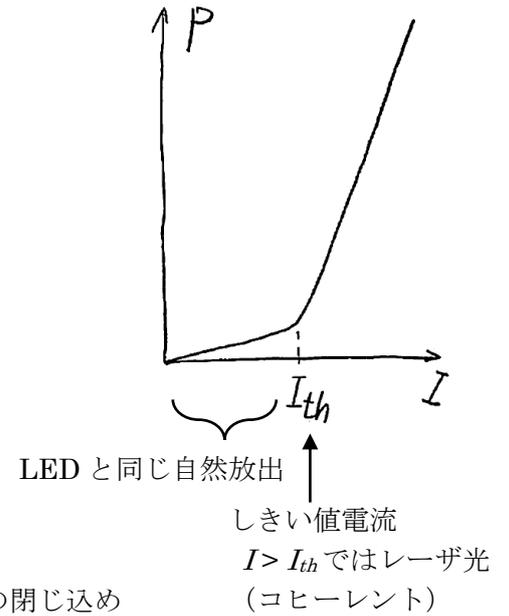
半導体レーザ LD (Laser Diode)、Semiconductor Laser

構造と特性

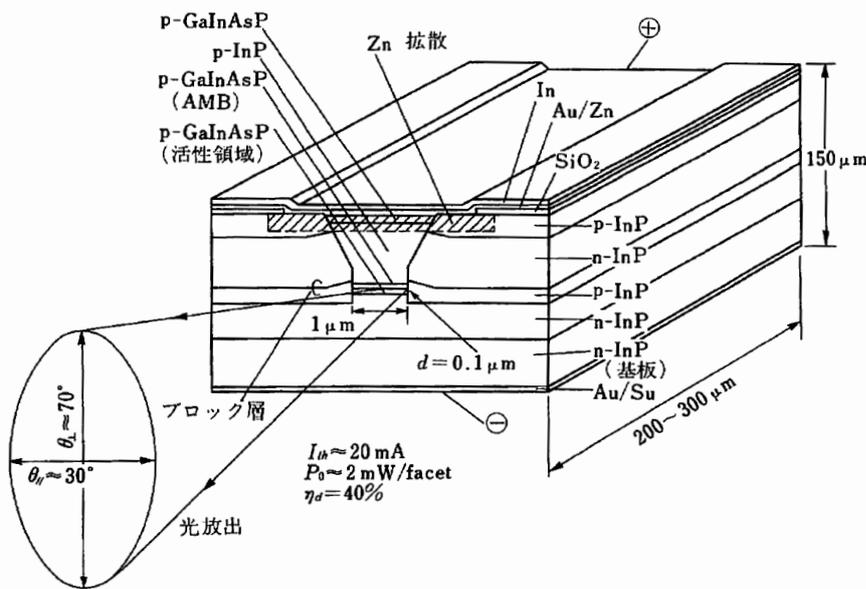
▶ 基本構造 (ブロードコンタクトタイプ)



二重ヘテロ構造により光導波路を形成 (光閉じ込め)



▶ 実際の構造 (一例)



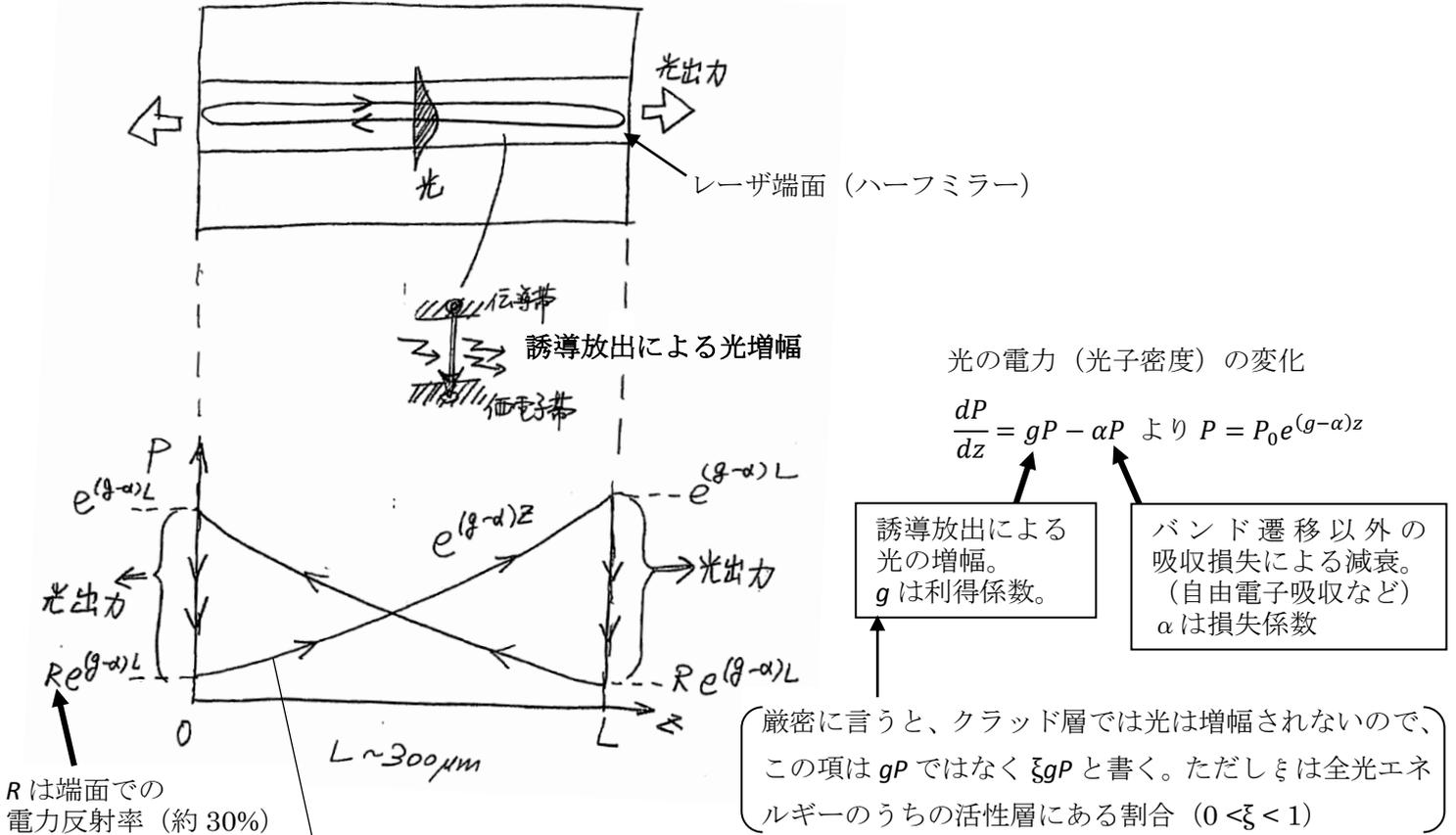
活性層の上下と左右は二重ヘテロ構造  
 (導波光が単一モードになるように活性層は周囲より高屈折率  
 活性層の左右の層は上下に npn 構造になっており、電流は流れない (電流は活性層に集中))

レーザー発振条件

電力条件と位相条件の2つがある。(アナログ電子回路などと同じである。)

電力条件

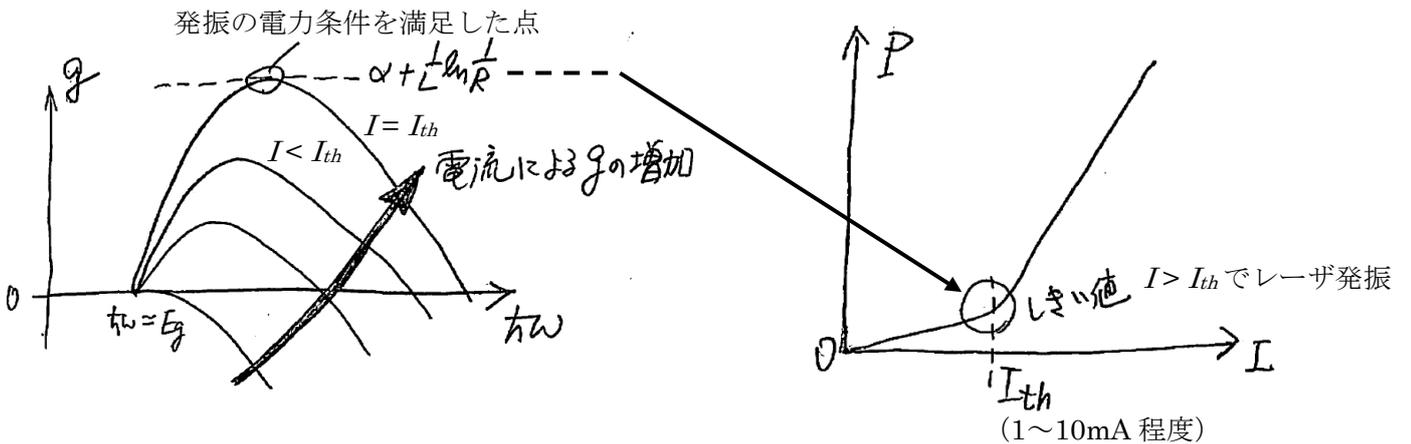
→ 両端面の間で光の往復が続くために必要な増幅利得の条件



最初  $P_0$  だった光電力は、一往復すると  $P = P_0 R^2 e^{2(g-\alpha)L}$  になる。

光の往復が続くためには  $P = P_0$  となる必要がある。この条件は  $R^2 e^{2(g-\alpha)L} = 1$

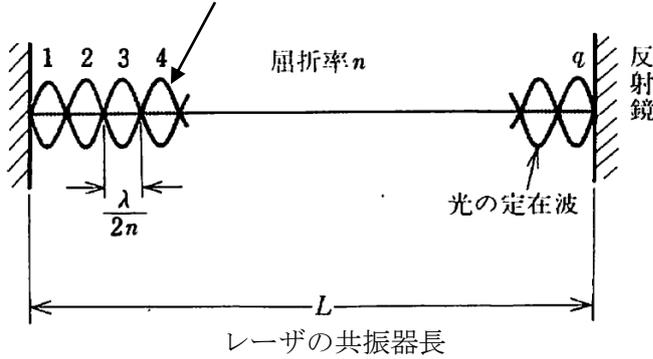
したがって、利得係数に必要な条件は  $g = \alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$  これが発振の電力条件



位相条件

→ 両端面の間で光の定在波ができる条件

光の定在波（端面は完全反射ではないので以下の式は近似的であるがほぼ成り立つ）

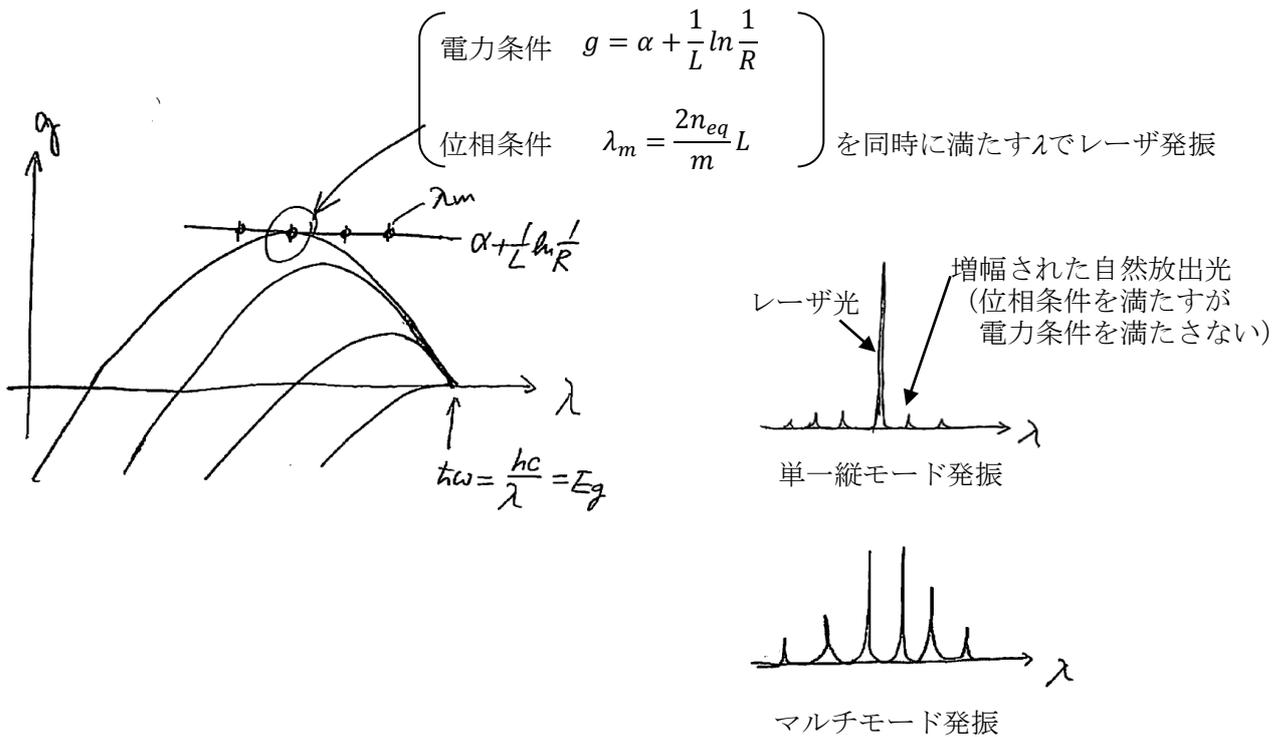


発振の位相条件

$$m \frac{\lambda_m}{2n_{eq}} = L \rightarrow \lambda_m = \frac{2n_{eq}L}{m} \quad (\text{縦モード})$$

整数 (m=1,2,...)      光導波路の等価屈折率 (第2回資料参照)

(問)  $L=0.3 \text{ mm}$ ,  $n_{eq}=3.5$  とすると、 $\lambda_m=0.6\mu\text{m}$  (赤色) のとき、 $m$  の値 (定在波の山の数) は？

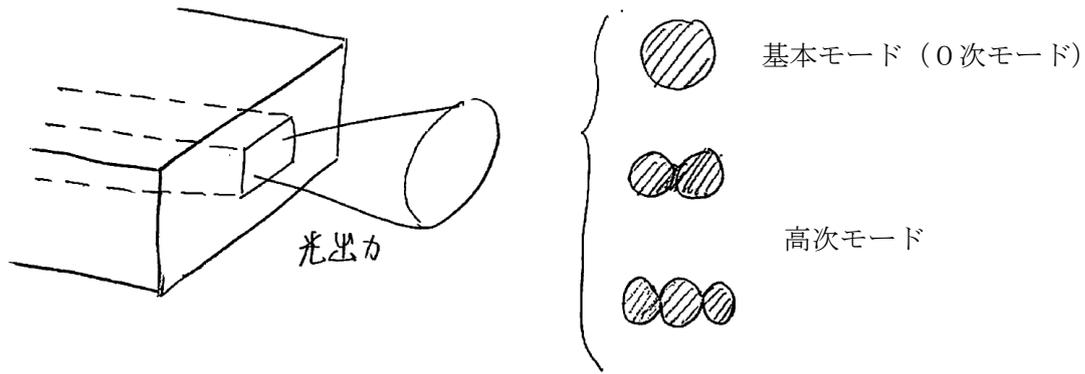


縦モード間隔 (隣り合うモードの間隔)

$$\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1} = 2n_{eq}L \left( \frac{1}{m} - \frac{1}{m+1} \right) = 2n_{eq}L \left( \frac{1}{m(m+1)} \right) \approx \frac{2n_{eq}L}{m^2} = \frac{\lambda_m^2}{2n_{eq}L}$$

$L$  が長いほど  $\Delta\lambda$  が小さい → 同時に 2 つ以上の縦モードが発振しやすい (電力条件を満たし易い)

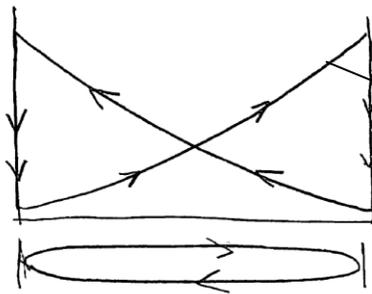
横モード (導波路としての伝搬モード)



多くのモードが伝搬する条件になっていると、それらが同時に発振して不安定になりやすいので、光導波路を横基本モードのみ伝搬する大きさにする。

コヒーレンス

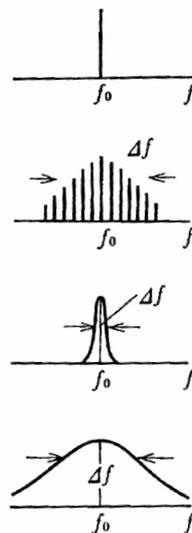
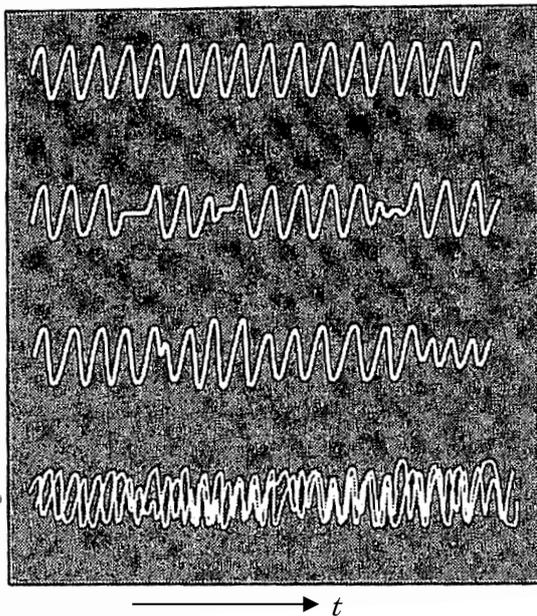
- { 誘導放出光は入射光と同じ位相 → コヒーレント
- { 自然放出光は位相がランダム → インコヒーレント



レーザ光はほとんどコヒーレントだが、自然放出光が混ざるので完全にコヒーレント光ではない。

コヒーレンスには時間コヒーレンスと空間コヒーレンスがある。

時間コヒーレンス



時間的に位相が途切れずに  
どれほど長く続くかの度合い

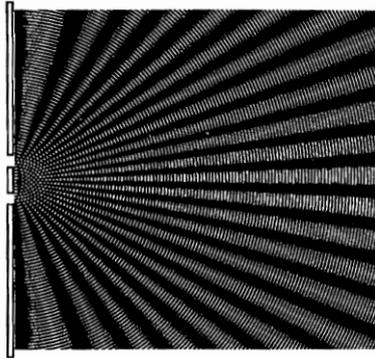
コヒーレンス時間  $\tau_c$   
コヒーレンス長  $l_c$   
線幅  $\Delta f$  } が目安

$$\Delta f \sim \frac{1}{\tau_c} \sim \frac{c}{l_c}$$

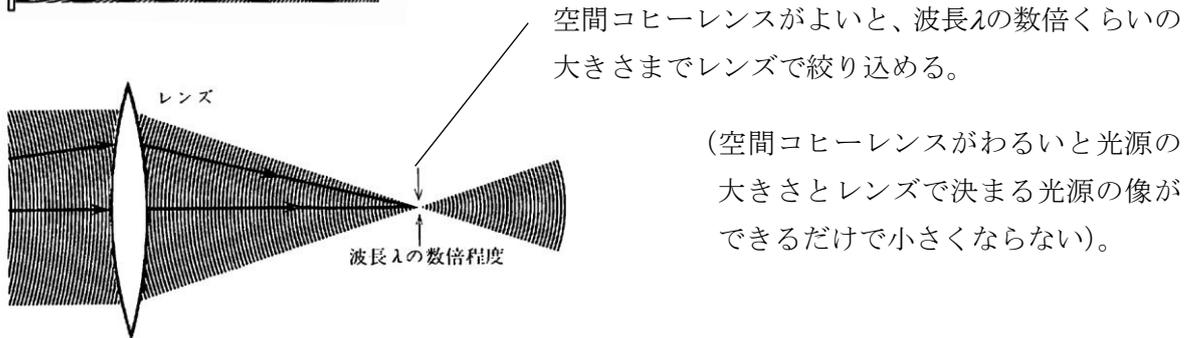
半導体レーザの  $\Delta f$  は代表的な  
もので 0.1~1GHz くらい  
共振器長を長くすると  $\Delta f$  は  
小さくなる。

1MHz 以下や kHz オーダーに  
したものもある。

## 空間コヒーレンス



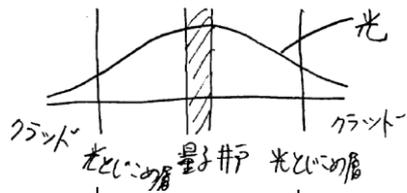
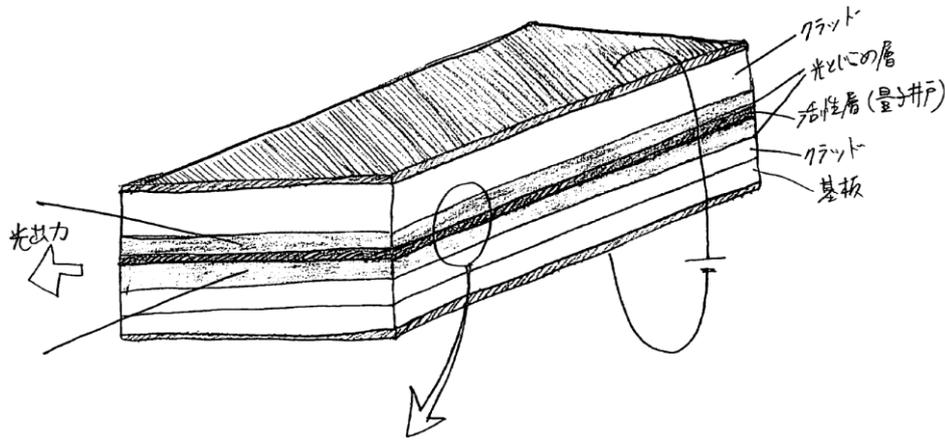
ひとつの光源から出た光が、離れた部分の間で  
 どれほど位相関係が保たれているかの度合い



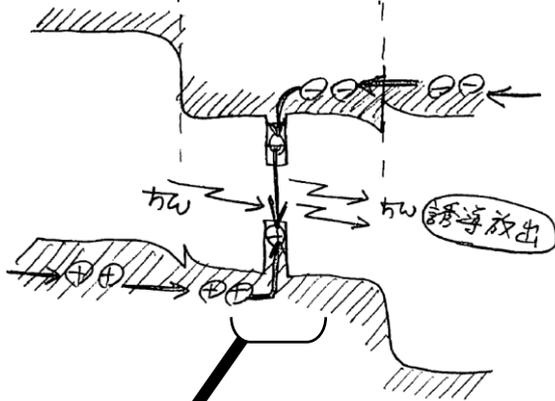
空間コヒーレンスがよいと、波長 $\lambda$ の数倍くらいの  
 大きさまでレンズで絞り込める。

(空間コヒーレンスがわるいと光源の  
 大きさとレンズで決まる光源の像が  
 できるだけ小さくならない)。

量子井戸レーザ (Quantum well laser)



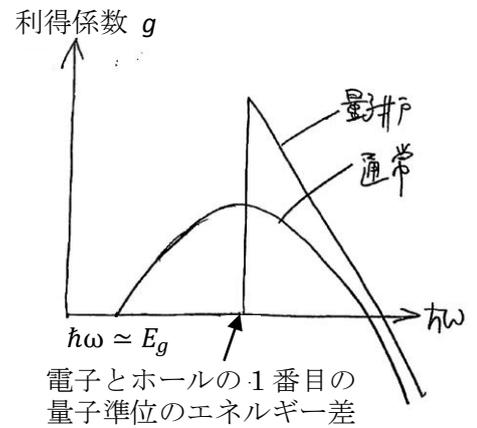
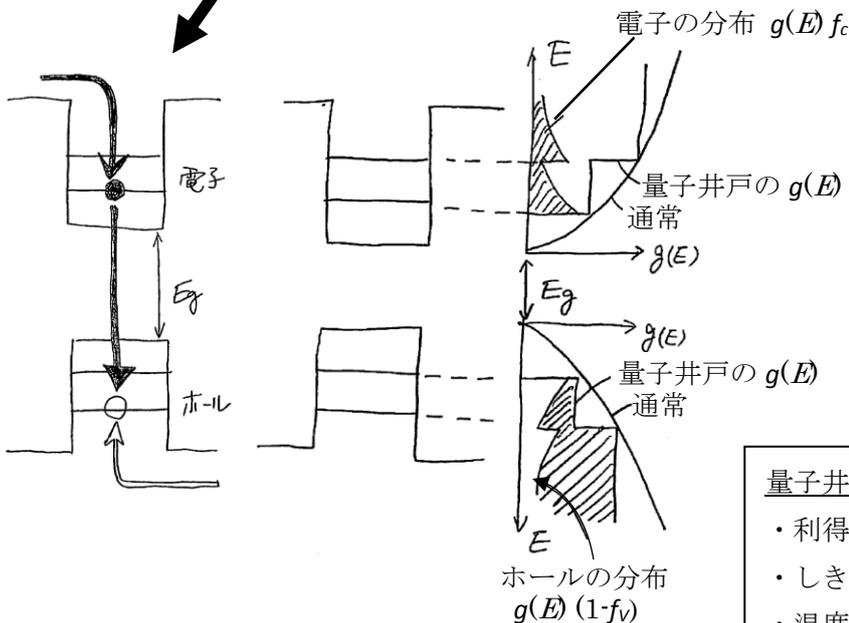
量子井戸層は光の波長に比べて非常に薄いので、光を十分に閉じ込めることができない。そこで、光閉じ込め層を両側に設けて、それをコアとして光を閉じ込める。



電子とホールは光閉じ込め層に溜まるのではなく、量子井戸層に落ち込む。量子井戸層で誘導放出が起こり、ここが光を増幅する層としてはたらく。

量子井戸

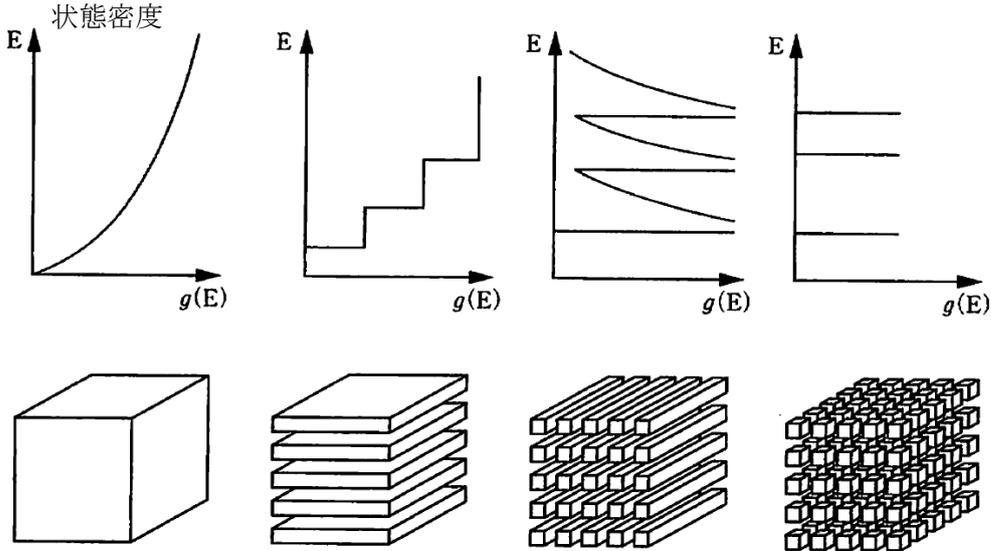
ヘテロ構造で井戸形ポテンシャルを形成している。井戸内のエネルギー準位はとびとび



量子井戸の特長

- ・利得係数のスペクトルが鋭い
- ・しきい値電流 (およびしきい値電流密度が小さい)
- ・温度によるしきい値電流の上昇が少ない

低次元量子井戸構造

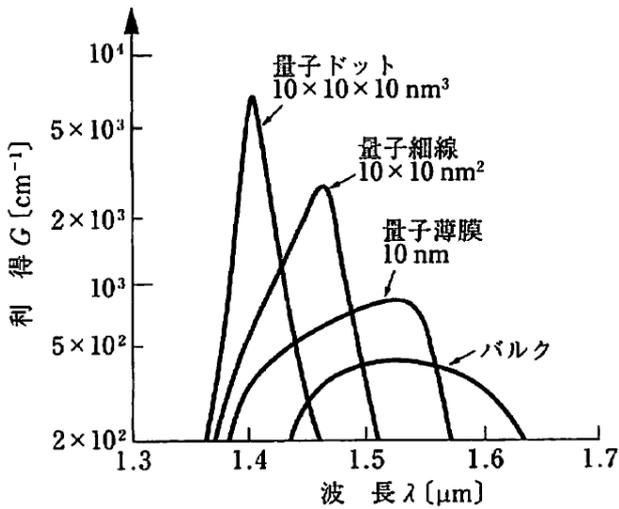


通常の半導体(バルク)  
(電子の自由度は3次元)

量子井戸 (量子薄膜)  
(2次元)

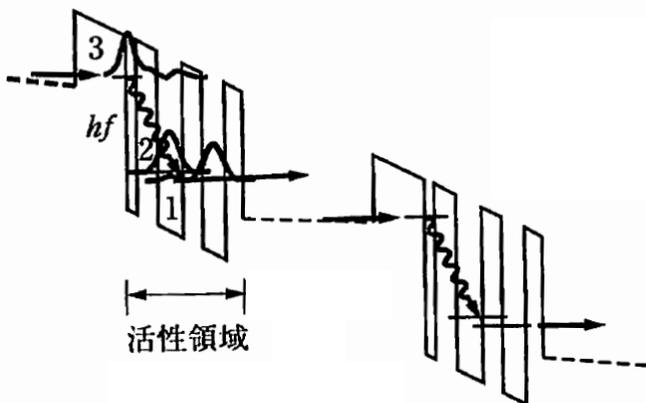
量子細線  
(1次元)

量子ドット  
(0次元)



**特長**  
 電子の自由度を減らしていくことによって、状態密度がより鋭くなっていき、上述の量子井戸の特長がより顕著になるようになる。

量子カスケードレーザ



**特長**

- ・伝導帯の井戸内で、ホールを使わずに電子の遷移だけで誘導放出を行う。
- ・遷移を多段に繰り返させる。
- ・バンドギャップによらずに発光波長を設計できる。自然界の材料では存在しないバンドギャップも可能。たとえば、中赤外～テラヘルツ (光子エネルギー約 0.1eV～0.01eV) (ただし、テラヘルツ帯は熱エネルギー  $k_B T = 25\text{meV}$  よりも光子エネルギーが小さいので、室温で反転分布を得るのは難しいようである。)