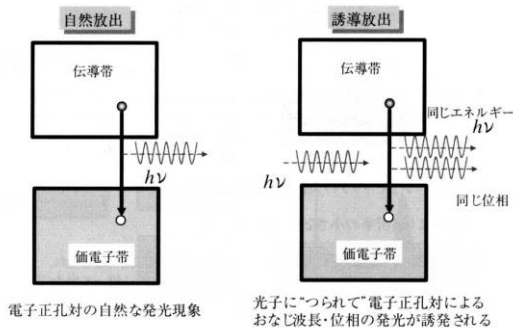


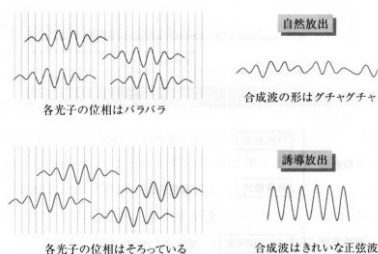
【自然放出と誘導放出】



発光デバイス 半導体レーザ

半導体の発光素子・発光ダイオード（LED）の発光強度を高める工夫に、ヘテロ構造の採用があります。これは、注入した電子とホールとの閉じ込めと、発生した光の閉じ込めを同時に実現するものです。

高い発光強度を積極的に利用したものが、半導体レ



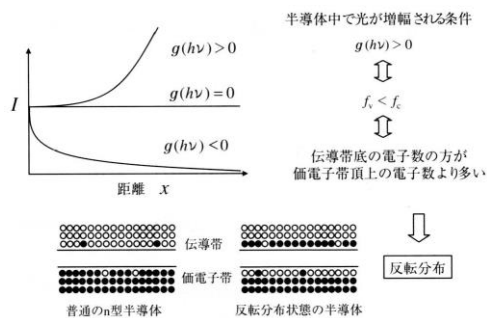
自然放出と誘導放出 コヒーレント光

ーザです。レーザとは、光増幅装置です。LASER (Light

Amplification by Stimulated Emission of Radiation)。

自分が発生する光で、次々と電子・正孔対を発生して、増幅

された光、しかも位相がそろった光を放出する現象です。



電子の反転分布（負の温度）

自分で発生した光で、さらに光を発生する仕組みなの

で、これを誘導放出 (Stimulated Emission) とい

います。それに対して、蛍光灯や電球あるいは発光ダイ

オードからの光は自然放出と言います。光誘導放出が

生じるためには、高いエネルギー状態にいる

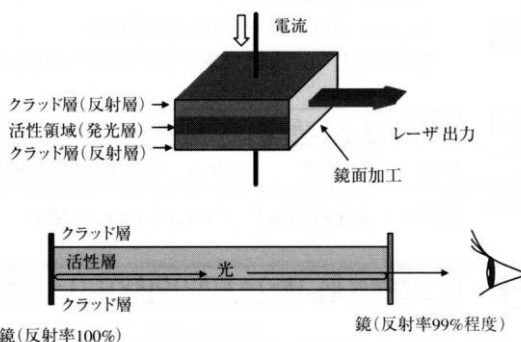
電子が、低いエネルギー状態にいる電子より

たくさん存在する必要があります。通常は、

エネルギーが低い状態にたくさんの電子が存

在しています。これが自然の状態ですが、不

レーザダイオードと端面発光LEDは構造的にはほとんど同じ



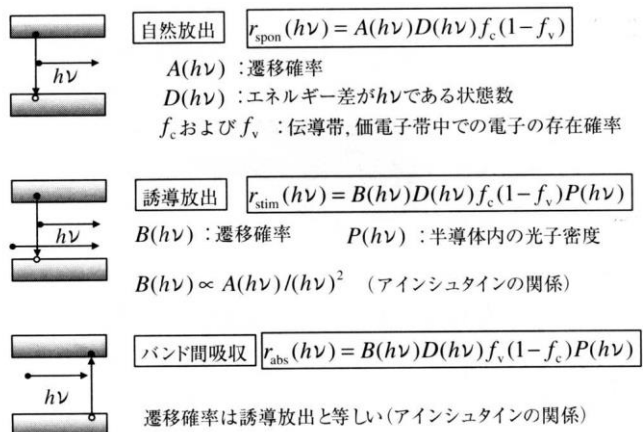
半導体レーザの構造=LEDとほとんど同じ

自然な電子の分布状態を**反転分布**といいます。または、電子の確率分布を表す**フェルミ・ディラック分布**において、温度項が負である状態に対応するので、**負の温度分布**

とも言われます。これは半導体レーザに限らず、ガスレーザや固体レーザなどでも同様です。この反転分布を実現するために、半導体レーザではキャリアの注入現象を用います。ちなみに、ガスレーザではプラズマ放電を用います。固体レーザでは、強い光を照射して実現します。位相がそろった波の性質を**コヒーレント**といいます。レーザ光はこの位相がそろった光・コヒーレント光であるので、干渉性を示します。これを用いると色々な応用が可能となり、例えば光の干渉を使って二次元あるいは三次元の情報を蓄積するホログラフィーや、レーザ光の干渉を使ったドップラー効果によるオングストロームオーダーの精度を持つ測長機、あるいは距離計などが実用されています。このレーザ干渉計は、実際ごく微細な半導体のパターンを作る装置にも使われています。一方、発光ダイオードなどから出てくる光は位相がそろっていません。これを自然放出光といいます。スポンテニアス光といいます。これは電球や蛍光灯から出ている光と同じです。

【半導体レーザの構造】半導体レーザのデバイス構造は、基本的には発光ダイオードと変わりません。低い密度のキャリア注入状態では、p型領域からホールが、そしてn型領域から電子がそれぞれ注入され、再結合して光を自然放出・スポンテニアス放出します。発光ダイオードです。半導体レーザでは、より多数のキャリアを注入していきます。そして、これは発光ダイオードと半導体レーザの構造上の違いですが、半導体レーザでは、**光の共振器**が作られています。最も簡単な共振器は、半導体の表面、実際には「へきかい」によって切断された結晶の断面を用います。結晶は屈折率

が空気より高いので、結晶の断面と空気の間では光の反射が起きます。半導体の中で発生した光は、結晶の二つの断面の間で波長の整数倍に一致した波が反射を繰り返し、増幅されます。これがレーザ発振です。通常、半導体レーザの共振器の長さは大体 $250\mu\text{m}$ 程度です。一方、光の波長は 0.8 ミクロン程度ですから、共振器の長さに比べて非常に小さい。ですから、波長の整数倍で丁度合う波長が共振器の中で増幅されていくことが可能になります。共振器構造は色々な種類があります。半導体の外にミラー鏡で共振器を作る、外部共振器構造もあります。断面ではなく、表面に共振器を作る表面共振器構造もあります。



光学遷移確率

光子に対する粒子数保存の式

$$\underbrace{\frac{\partial P}{\partial t}}_{\text{光子のわき出し (cは半導体中の光速)}} = - \underbrace{\frac{d}{dx}[cP]}_{\text{誘導放出 レート}} = \underbrace{r_{\text{stim}}}_{\text{誘導放出 レート}} - \underbrace{r_{\text{abs}}}_{\text{バンド間吸収 レート}}$$

定常状態で左辺はゼロ

$$P \propto I$$

$$I(h\nu, x) = I(h\nu, 0) \exp\left[\frac{r_{\text{stim}} - r_{\text{abs}}}{c} x\right]$$

$$g(h\nu) = B(h\nu)D(h\nu)(f_c - f_v)/c$$

光（増幅）利得 g

【誘導放出と自然放出】

半導体の中を通過するエネルギー $h\nu$ の光はエネルギーの差が $E_2 - E_1 = h\nu_{12}$ である二つの準位 E_1 と E_2 の間の遷移を励起することが出来ます。この遷移は、初めの状態に電子があつて、相手の状態に正孔があれば1から2、そして2から1へのどちらの過程も起きます。1から2への遷移は、光の吸収または電子—正孔対の生成過程であつて、2から1への遷移は、再結合過程です。通過する光によって再結合が起きるとき、これを“誘導再結合”

といいます。それに対して、特に光を当てないなどの刺激を受けたくても起きる再結合を“自然再結合”といいます。温度が T の物質での光の密度はプランクの分布で表すことが出来ます。プランクの黒体放射です。

$$\rho(h\nu) = \frac{8\pi^3\nu^2}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad \text{ここで } n \text{ は屈折率です。 } c \text{ は光速です。}$$

一個の電子—正孔対が、誘導再結合するのと自然再結合する割合は、

$$\frac{P_{sp}}{P_{st}} = \exp\left(\frac{h\nu_{12}}{kT}\right) - 1 \quad \text{で示されます。つまり温度が低いほど、誘導再結合の割合が大きくなります。}$$

誘導再結合では、再結合を誘起する光と同じ周波数、伝播方向、位相をも光が発生します。一方、自然再結合では、周波数は同じになりますが、伝播方向、位相は勝手な値を取ります。PN 接合などの系が熱平衡状態からはずれ、つまり順バイアス電圧で電子や正孔の注入が生じると、高いエネルギー状態にある電子の密度と低いエネルギー状態にある正孔の密度が増加してきます。そして再結合の割合は増加し、光の密度も増加することになります。このようにして、誘導放出の割合は光の強さとともに多くなりますが、同時に電子—正孔対の生成、つまり光吸収も増加しますから、光の減少も起きます。再結合の割合を吸収の割合よりも大きくする方法は、絶対零度では可能です。なぜなら、縮退した半導体では、放出される光のエネルギーが吸収に必要なエネルギーよりも小さいからです。このようなときには、電子の分布は高いエネルギー状態のほうが高くなります。これを反転分布といいます。熱平衡状態の電子分布は、有限の温度ではエネルギーが低いほうに電子の分布が多いです。これはフェルミ・ディラック分布関数 $f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$ に電子が従うからです。反転分布は、いわ

ばこの分布関数で、温度が負の場合に相当する・エネルギーが高い電子の分布のほうが、エネルギーが低い電子の分布より多くなる状態が実現されます。反転分布は負の温度での電子の分布を表していることになります。

再結合によってレーザ作用が起きるには、二つの条件が実現される必要があります。つまり、光放射が可干渉性を持つこと、そして利得が損失（吸収）を上回ることです。

可干渉性は、共振器の中に放射源をおいて、ひとつの周波数とひとつの位相を選択的に成長・増大させることによって実現されます。このような選択的な増幅は、共振器の中に定在波をつくる電磁波の正帰還の結果です。距離 l を隔てたお互いに平行な平面でそれぞれ反射率が R_1 と R_2 の二枚の鏡があります。反射面1の方向に強度 L_0 の光を放出している共振器の中心の1点を考えます。放射の一部分 R_1 は反射面1で2の方向に反射されて、また反射面2でそのうちの R_2 だけが元の点に放射されます。そのような系は、単位長さ当たりの利得 g と損失 α で表されます。つまり、距離 $2l$ だけ通過した後の元の点での光強度は $L = L_0 R_1 R_2 \exp(2gl - 2\alpha l)$ で与えられます。レーザでは、少なくとも利得と損失は等しいです。利得が全損失の和に等しくなるとき、共振器の中心での光放射の強度は $2l$ 光が進んだ後も等しくなります。従って、 $L = L_0$ と

なりますので、 $1 = R_1 R_2 \exp(2gl - 2\alpha l)$ とな

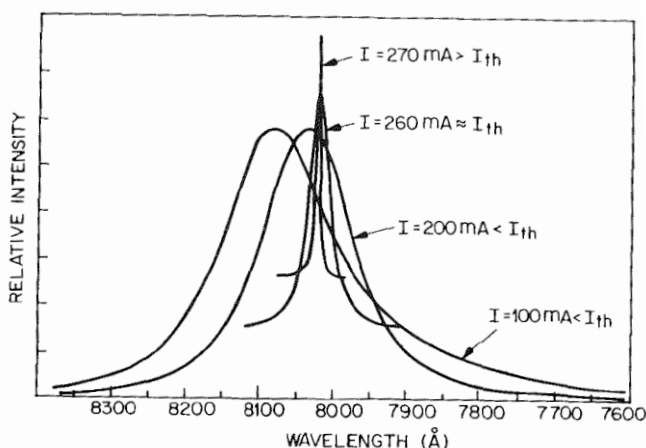
ります。

この自然対数をとると、

$gl - \alpha l - \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} = 0$ ですが、第一項は利得、

第二項は損失で、第三項は共振器端面で

の損失です。 g の利得は $g = \frac{c^2 j \eta}{8 \pi q n^2 v^2 \Delta v d}$



で表されます。 j は励起の割合で、pn 接合の場合は電流密度になります。 η は放射再結合の割合です。 $\Delta\nu$ は自然放出スペクトルの周波数幅（広がり）です。 d は光が伝播する方向と垂直な共振器の幅です。これから、利得を大きくするためには、光の周波数が小さい・つまりエネルギーが小さいか禁制帯幅が小さな半導体のほうが利得が高くできてレーザ発振しやすい。発光が鋭いほど利得が高くなります。

半導体レーザの光出力の例を示します。半導体レーザは基本的に発光ダイオードと同じです。バイアス電流を流していくと、発光強度が小さいうちは、LED と同じように、広い波長範囲で光を放出します。これは自然放出光です。そして、電流が高

くなり、ある電流値より高くなると、レーザ

発振が生じま

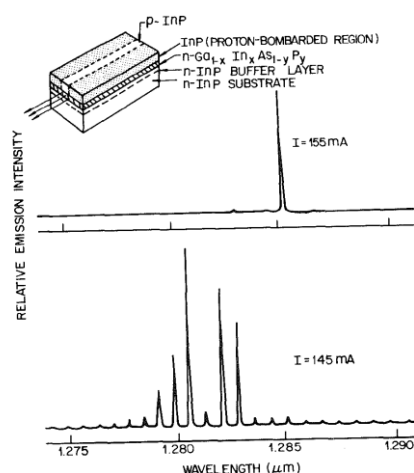
す。この電流値

を「**閾値電流**

I_{th} 」といいます。

レーザ発振

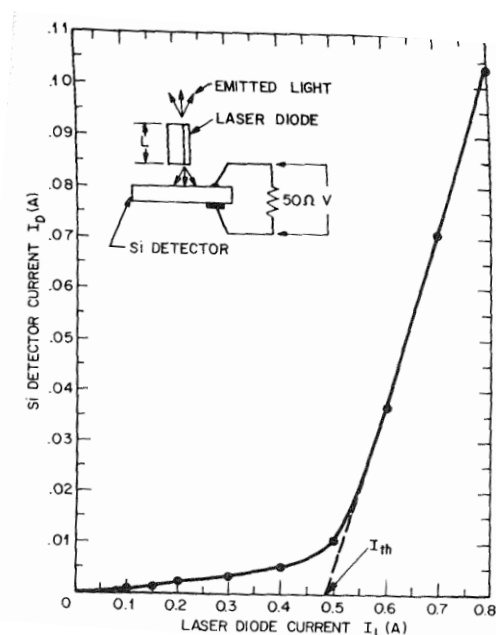
が生じると発



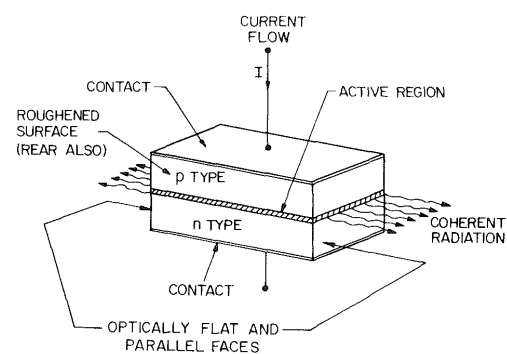
半導体レーザの光スペクトラム

生する光の波長範囲がとて狭くなります。こ

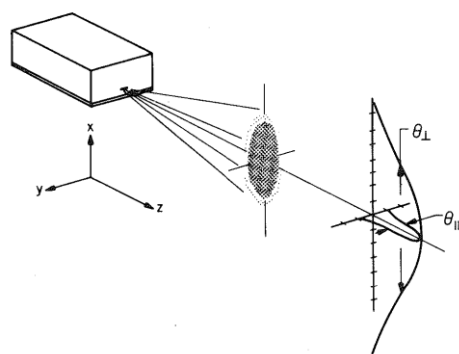
れは光の共振が起こり、選択された特定の波長の光だけが増幅されるからです。



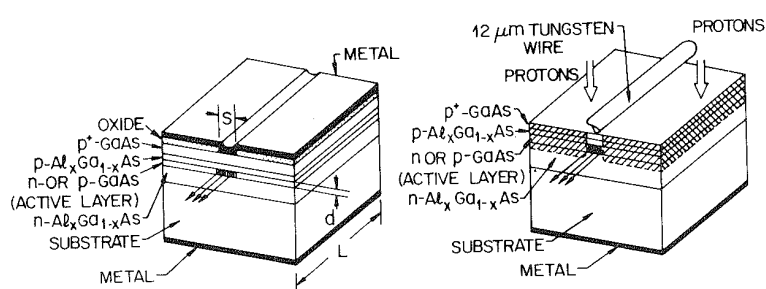
電流－光出力特性（しきい値電流）



Basic structure of a junction laser in the form of a Fabry-Perot cavity.



半導体レーザのビームプロファイル



ストライプ構造のレーザ

半導体レーザの光共振器は、いわば二枚の平行は鏡と同じです。従って、少しでも平行からずれた光は、何度も共振器の間を通過するうちには、戻ってこなくなります

から増幅されなくなります。つまり、極めて平行度が高い光だけが半導体レーザーから放射されることになります。

半導体レーザーの具体的な構造の一例を示します。これは、半導体ヘテロ接合で縦方向の光・電流閉じ込めを行うと同時に、横方向にも電流閉じ込めを行い、高効率に、低い閾値電流でレーザー発振を行う構造です。ストライプレーザーといいます。