

7. レーザーのパルス動作

半導体レーザーでは、直接変調で十分に高速が得られる。これは、デバイスの電気的特性が高速であるばかりでなく、非常に大きな増幅率のために共振器長を極端に短くできることに加え反射率の少ない端面を使うことができるので光子の寿命が短いこと、またキャリアの減衰時間も短いことなどによる。しかし、励起状態の寿命が比較的長いレーザーや、共振器内の光子寿命が長いレーザーでも、いろいろな手法で非常に短いパルス光を発生できる。Q スイッチ、モードロックがその基本的な方法であるが、分散媒質の特性や非線形光学特性を使ったり、時間領域の特性を空間領域の特性になおしてパルス整形を行ったりする方法もある。この章では、Q スイッチ、モードロックについて学ぶ。

Qスイッチでは、まず、励起を行う間は共振器のQを小さく（従って光子の寿命を短く）することにより、大きな反転分布を作っても発振に至らないようにする。反転分布が最大になったときにすばやくQを大きくし、反転分布として蓄えられたエネルギーを突然にレーザー発振の形で放出させてパルス光をつくる。

問1 . 前章のレート方程式において適切な条件を選び、時刻 $t=0$ で十分な励起がありかつレーザー発振の光子密度がほとんどないと仮定し、その後定常状態に至るまでの様子を観察せよ。（最初に大きな発振のピークが存在するなら、それがQスイッチによるパルス動作に対応する。）パルス幅は、典型的な状態では、何によって決まるかを論じよ。

注意：半導体レーザーでQスイッチを用いたものは、実用になっていない(半導体レーザー開発の初期には、自然におきたQスイッチと見られパルス発振が報告されている。これは半導体内部の不純物などが可飽和吸収体として働きQスイッチ動作をしたものである。可飽和吸収体とは、光が弱い間は吸収体として作用するが、光が強くなると(それ以上吸収できなくなる=吸収の飽和)透明になってしまうものである。)Qスイッチの手法は、むしろ物質の励起状態が比較的長寿命の固体レーザーや気体レーザーのに用いられるのが通例である。

モードロックは、多モード発振の位相制御を用いる方法である。レーザー媒質が不均一幅で広がり、その中に（縦モードで決まる）周波数が等間隔 ω の発振が多数ある場合、モードの重ねあわせとしての出力は

$$E(t) = \sum_n E_n e^{i[(\omega_0 + n\omega)t + \phi_n]} \quad \dots(7.1)$$

となる。各モードの相対位相 ϕ_n は、放置すればランダムに変化するだろうが、 ϕ_n を人為的に

一定に押さえ込む(モードをロックする)なら、たとえば

$$E(t) = \sum_{n=-(N-1/2)}^{(N-1/2)} e^{i(\omega_0+n\omega)t} = e^{i\omega_0 t} \frac{\sin(N\omega t)}{\sin(\omega t/2)} \quad \dots(7.2)$$

のように時間変調された波形となる。これはパルス列を表すが「高次のうなり」とでも言うべきものである。このパルス列を共振器中のある位置で観測するなら、時間的にパルス列となっている。従って、このパルス列だけを透過するタイミングで、共振器中に設けたゲートを開けるような工夫をすれば、逆にこのパルス列が実現する「モード間の位相関係」で発振する。

問2 . (7.1)において、パルス間の間隔は何で決まるか。(7.2)において、 $N=5$ と $N=10$ の場合を比較し、パルス幅が何によって決まるかを論じよ。その結果を(7.1)に戻って一般化せよ。

問3 アルゴンイオンレーザーのモードロック* : 514.5nmで連続(CW)発振するAr⁺レーザーがある。共振器長は 1.5mである。利得のスペクトル幅は 4.5GHzの広がりを示す。このひろがりをいっぱいに使ったときのモードロックパルスの幅とパルス列の繰り返し周期を求めよ。このCWモードロックレーザーの出力を測定したところ、平均 10Wであった。ひとつのパルスのピーク出力はどのていどか。

* このレーザーはガラスあるいはセラミックのチューブにアルゴンガスを封入して放電(電子衝撃励起)により Ar のイオンの励起状態を作る。十分な増幅率を得るために放電管は長く、共振器をほぼ満たす形になっている。514.5nm(緑)、488.0nm(青)の発振線を含め、10本程度の発振が認められる。連続 10W 程度の強力な発振をするが、エネルギー変換効率は悪く、数十キロワットの電力を必要とし、冷却水を毎分 100 リットル程度流す。このレーザーに内部変調器を導入してモードロックパルスを発生させる技術が古くから実用化されている。

モードロックを実現するには、過飽和吸収体などを使った受動的な方法と、共振器内で欲するパルス列だけが増幅されるような強制的変調を行う能動的なものがある。次の問は後者の例である。

問4 レーザー共振器内に AO(Acousto-Optic:音響光学効果を用いた)変調器をおき、音波をたてると屈折率が周期的に変調されて光ビームが周期的に偏向する。AO 結晶内の音速が 2km/s だとして。モードロック周期の半分に等しい RF 電気信号を加えるとき、この固体の内部の音波の波長はどれだけか。アルゴンレーザーの場合、5145Åの波長の光はこの音波による Bragg 反射でどの程度偏向するか。(モードロックとは無関係だが) この AO 変調器にレーザー光を通してビームを偏向し、10m先のスクリーンで輝点を 0.1m移動するには、RF の周波数をどれほど動かす必要があるか。