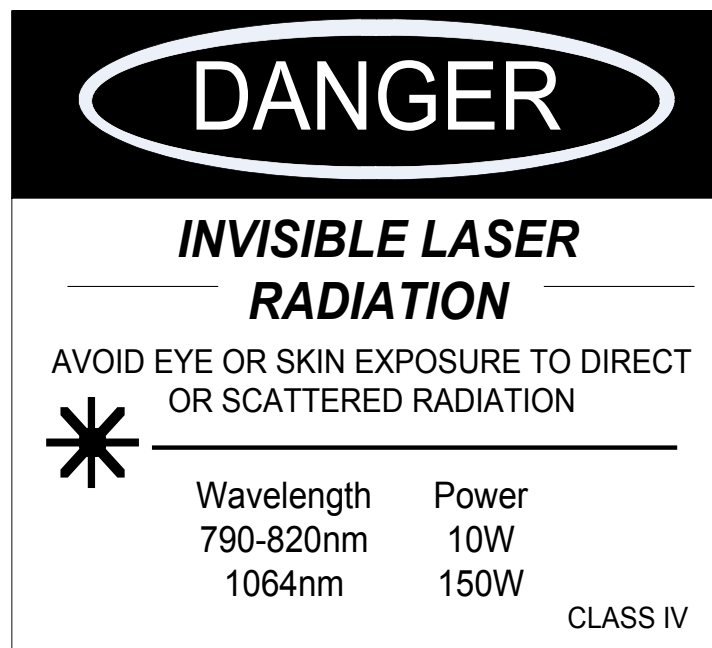


2007 年度 創造力開発光学実験プログラム

ETL (Elementary Teaching Laboratory)

No. 固体レーザー発振

Solid State Laser Oscillation



担当者 植田研究室 戸倉川 正樹

始めに

プログラムの主役は受講者です。受講者の方々が積極的に行動、質問することにより、より良いプログラムとなっていきます、ご協力を!!!

注意事項

レーザー光を直視しない ⇒ 保護眼鏡の着用。実験室で屈まないように！
感電しない ⇒ 電気系の危険な匂いがする所は触る前に聞いてください！

目的

レーザーは様々な分野で応用されており、今後レーザーに接する機会は少ない所と考えられる。しかしスイッチを入れれば出るというブラックボックスの状態では正しく使いこなす事は難しく、また安全上も危険である。

本プログラムではレーザーの基礎の基礎を知り、実際に固体レーザーを発振させて、レーザーのイメージを掴んでもらう事を目的としている。

内容

i レーザーの基礎を知る (15 分程度)

これからやる事を理解するためにレーザーの基礎を簡単に説明する。

ii レーザー発振 (45 分程度)

実際に共振器を組んで頂き、レーザー発振を起こす。

iii 単一偏光化 (15 分程度)

偏光について簡単な説明を行い、先レーザーの偏光を確認したのち、単一偏光化する。

iv 可視光を発生 (15 分程度)

非線形結晶の本当に簡単な説明をして、先レーザーから緑色光を発生させる。

v パルス発振 (15 分程度)

パルス発振の簡単な説明をした後に先共振器に改良しパルス発振を行なう

i レーザーの基礎

LASER とは “**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation” の略語である。直訳すると誘導放出による光増幅といった意味になる。

2 準位系を例にとり吸収と放出を、4 準位系を例に取りレーザーの原理を簡単な図に書くと以下になる。なお 4 準位とは Fig.2 にある様に利用しているエネルギー準位の数 が 4 つということである。

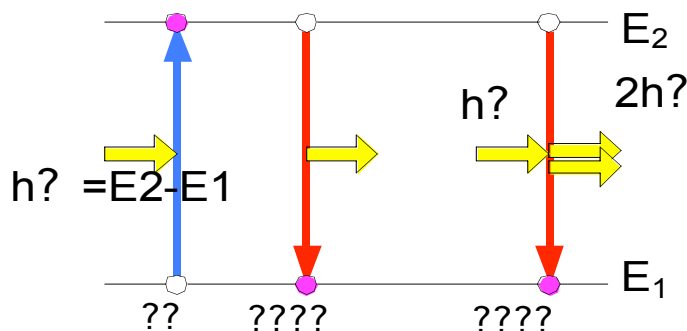


Fig.1 吸収と放出概念図

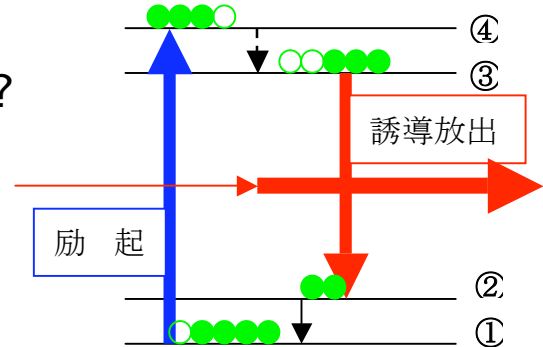


Fig.2 光増幅模式図

<反転分布>

反転分布状態とは上準位に存在する電子の数 N_u が下準位に存在する電子の数 N_g よりも多い状態を意味する。例えば Fig.2 にあるように励起光によって順位①にある電子を準位④に励起する。準位④に励起された電子は十分に短い時間内に非放射過程を経て準位③に落ちる。これによって準位③と準位②の間に反転分布状態が形成される。

反転分布状態で準位②と①のエネルギー差に等しい光が入射されると誘導放出が起こり、光が増幅される。反転分布状態でない場合には光は増幅されずに減少する。

レーザー光の特徴とは

- | | |
|--------------|------------------------|
| 1.単色性がある | ⇒ 単色でないレーザーはないの？ |
| 2.指向性を有する | ⇒ 太陽光だってまっすぐ飛ぶのでは？ |
| 3.可干渉性を有する | ⇒ レーザー光以外は干渉しない？ |
| 4.高輝度化が可能である | ⇒ 100W 電球と同じ力をレーザー出すと？ |

一言で表現するとコヒーレンスの良い光です。

ii レーザー発振

<共振器の原理>

例えば Fig.3 のようにミラーを配置すると、ミラーによって自然放出光の一部が結晶内に返されて、誘導放出を起こす。その光が再びミラーにより結晶内に返されて再び誘導放出を起こし、誘導放出が繰り返されることにより、高いコヒーレンスをもったレーザー光が発生する。

発振器をフィードバック回路と考えると Fig.4 のようにみなす事ができる。利得媒質が供給できる energy は励起光によって限界が決まり、光 I_{in} が増幅されていくほど利得 G が低下していき、最終的に利得と損失がつりあった定常状態に落ち着く。

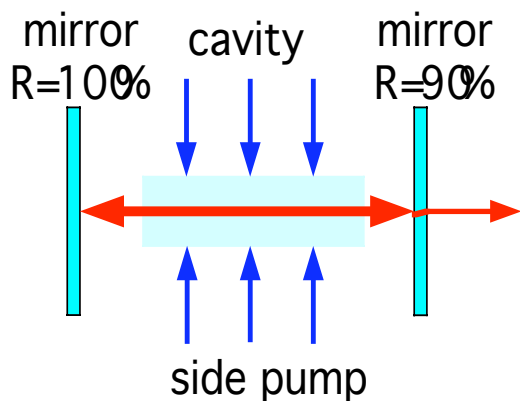


Fig.3 レーザー装置模式図

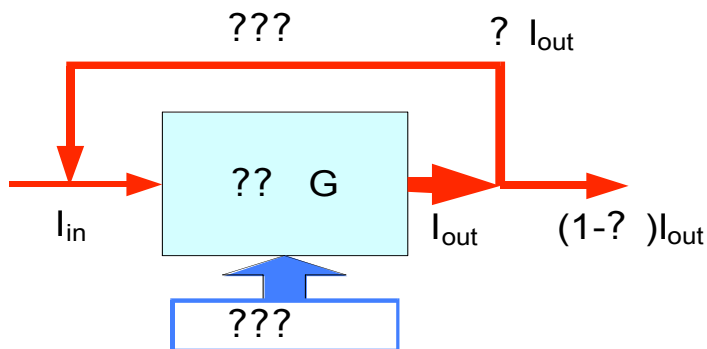


Fig.4 共振器原理

<実験>

実験には NORTHROP GRUMMAN 社の励起ユニットを用いる。結晶は $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ で励起方法は Fig.3 にあるような側面励起であり、発波長 808nm の LD を用いて振波長は 1064nm である。例起用の LD や結晶が冷却するために 3.8l/min の冷却水を流す。

波長 1064nm の光に対して >99% 反射で、曲率 300mm を有するミラーと 1064nm において反射率 90%、曲率 200mm を有するミラーを用いる。

- ① 冷却水のチラーとポンプのスイッチを入れて水が流れている事を確認する。
- ② 保護メガネを着用して LD のメインスイッチを入れた後、LD の電流を 14A までゆっくりと上げていく。（サージ電流で LD が壊れる恐れがあるので細かなスイッチの順番はどうしたらいいのでしょうか？）
- ③ 励起ユニット両端にミラーを置いて、ただひたすらに発振するようにがん

ばります。その間もう一人の人が発振しているかを確認し続ける

ii 単一偏光化

<偏光>

Maxwell's equations

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \Rightarrow \text{磁場の時間変化が電場を生む (Faraday の電磁誘導)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \Rightarrow \text{電場の時間変化と電流が磁場を生む (Ampere の法則)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \Rightarrow \text{電場の源は電荷}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \Rightarrow \text{磁場の源、磁荷は存在しない}$$

以上を解くと光は横波である事がわかる。その振動方向の状態を偏光と呼ぶ。
下図に直線偏光と楕円偏光の図を載せる。

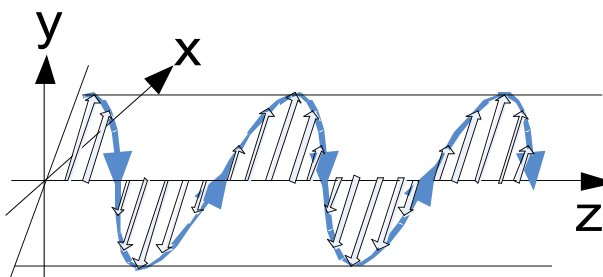


Fig.5 直線偏光

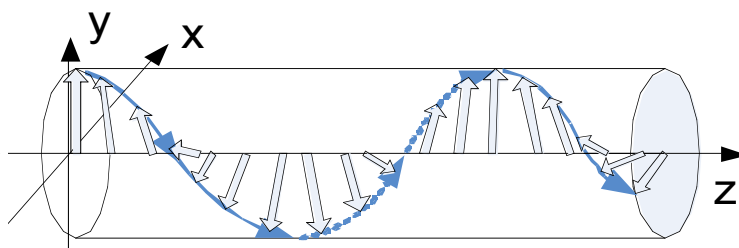


Fig.6 楕円偏光

<実験>

- ① 発振させたレーザーの偏光を偏光子を用いて調べる。
- ② 調べた後に装置を改良して単一偏光化し再び偏光を調べる。

どうすれば単一偏光になる？

iii 可視光の発生

<高調波発生>

Maxwell's equations を解いていくと

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$

ある物質に分極 $\mathbf{P}$ が存在するとき、分極は発生する電場 $\mathbf{E}$ に影響を与えることがわかる。分極 $\mathbf{P}$ は入射された電場 $\mathbf{E}$ に対して下記のように表される。

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\div^{(1)} \mathbf{E} + \underbrace{\div^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \div^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \cdots)}_{\text{非線形分極}})$$

この非線形分極部によって高調波が発生する。

<位相整合>

高調波を発生させる際には位相整合が取れていることが重要である。例えば第二高調波発生をとくときを例にとると、位相整合とは下図に示すように、非線形結晶中において角周波数 ω の光が作り出す 2 次の分極波と角周波数 2ω の光の位相が空間的にそろっている状態である。

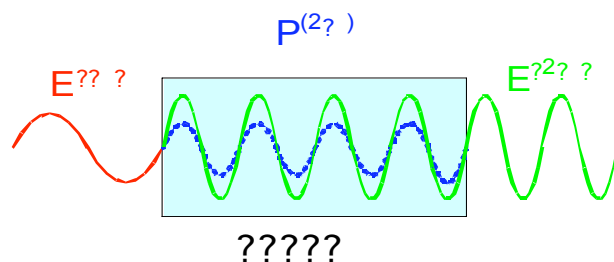


Fig.5 位相整合

<実験>

- ① 非線形結晶 (KTP 結晶) を用いて 1064nm の光から 532nm の光を発生させ確認する。
- ② より多くの 532nm の光を発生させたい、どうしたらよいか考えて実践する。

IVパルス発振

<Q スイッチ>

パルス発振の方法は幾つかあるが、今回は Q スイッチと呼ばれる方法によりパルス発振を行なう。

先に共振器の Q 値の定義を説明する。共振器に蓄えられた energy を W 、発光の角周波数を ω 、共振器内で単位時間内に失われる energy を W_{out} とすると

$$Q = \frac{W\omega}{W_{\text{out}}}$$

共振器の損失が大きければ大きいほど Q 値は小さくなっていく。この Q 値の逆数と、レーザーの定常発振における反転分布の上準位と下準位の電子数の差 $\Delta N_{\text{th}} = N_u - N_g$ は以下の関係にある

$$\frac{1}{Q} \propto \Delta N_{\text{th}}$$

式から Q 値が高い状態では定常状態の ΔN_{th} の値が大きくなることがわかる。共振器の Q 値が低い状態（損失を高い状態）を作り出し、その状態から瞬間的に Q 値を高くする（損失を減らす損失変調）ことにより、貯めた ΔN_{th} から瞬間的に高い energy を持つパルスを発生させる事ができる。

<実験>

ポッケルスセルと今まで実験に使った道具を組み合わせでパルス発振をさせるためにはどうしたらよいか考えて、パルス発振を起こす。

① パルス発振をした光を用いて可視光を発生させる。

<おまけの質問>

1. パルス発振させる事によりどんな利点があると思いますか？
2. どうしてレーザーはコヒーレンス良いの？
3. 鏡を使って太陽光をどんどん重ねていくとどこまで強くなる？
4. 現在世界中でもっとも短いパルスはどれくらいでしょうか？
5. 現在世界でレーザーを用いて達成できるもっとも高いエネルギー密度は？
6. レーザーで何ができるんですか？

<参考文献>

レーザー物理入門 霜田光一 岩波書店
量子光学 松岡正浩 裳華房