

レーザーガラス

HOYA株式会社 材料研究所 岡田恵子

透明。

ガラスは6000年もの間この単調な役目だけを勤めてきました。

そして突然ガラスは進化した。

ガラスがつくる新しい光。

その未来は不思議な力を秘めている。

ガラスは今、光の新世紀へ。

レーザーガラス。

昔から透明であることを特徴としてきたガラスと光とのかかわりは深く、レンズ、プリズム、フィルター、ファイバなどの光学製品が多くつくられてきた。このような従来の光学ガラスはいわば受動素子材料であり、光の屈折、反射、吸収等、光路を制御するために用いられてきた。これに対してここ数十年の間、光エレクトロニクスの分野において、発振、増幅などの機能を備えた能動素子としてのガラスが開発され新しい用途が開かれている。レーザーガラスはまさしくこの様な機能を持ったニューガラスで、これ自体でレーザー光を発振したり増幅したり出来るので、光通信、核融合、加工等のシステムで重要な役割を果たしている。しかし研究機関に限られており、ニューガラス関係者でもレーザーガラスのことをよく知らないのが現状であろう。この様な背景をふまえ昨年8月26日、ガラスはよく知っているけれどもレーザーをよく知らない方達を対象に“やさしいニューガラス講座”でガラスレーザーを紹介した。ここではその講演の主旨に従い、レーザー発振と増幅の方法について説明する。実用面での開発ポイント——望ましい特性、工場での製造技術、応用等については他を参照されたい。

LASERとはfull name——Light Amplification

by Stimulated Emission of Radiation——の示す通り誘導放出による光の増幅である。しかし実際にはレーザーガラスを作ってこの動作を行うためにはいろいろな条件をクリアしなければならない。

1. レーザーガラスとエネルギー変換

エネルギー保存の法則というのがあって、外からエネルギーが供給されない限り新たにエネルギーが生じることも増加することもない。従ってレーザーガラスロッドがただ置いてあるだけでは光の発振も増幅も起こらない。通常のガラスレーザーシステムでは、ガラスロッドのまわりにフラッシュランプを置き、いっせいにロッドを光照射することによりエネルギーを供給する。

次にそのエネルギーをレーザー光に変換するのであるが、そのためにはフラッシュランプの光を吸収してレーザー光に変えて放出する物質、即ちレーザー活性物質が必要である。ガラスレーザーではレーザー活性物質として例えば Nd^{3+} イオンがドーピングされている。ロッドに供給されたエネルギーは全てレーザー光に変換される訳ではなく、大部分熱やレーザー以外の光になる。これは望ましくないことであるが避けられないことで、レーザー光への変換効率は2%位しかない。この値を向上させるため、さまざまな改良、開発が試みられている。

2. 光の吸収と放出

高いエネルギー状態（励起状態）にあるイオン又は原子や分子は低いエネルギー状態に変わる（失活する）時発光する。このとき

(高いエネルギー) - (低いエネルギー) = 光のエネルギー

逆に、この関係を満たすエネルギー（波長）の光をイオンに照射すると光は吸収されイオンは低いエネルギー状態から高いエネルギー状態に変わる（励起される）。光の放出と吸収には以下の機構がある。

- ①自然放出——人が老衰して死ぬのと同じで、励起イオンも自然に失活する。その際光を放出する。
- ②誘導放出——光に誘導されて起こる。放出された光は種光と同じ波長、位相及び方向を持つ。
- ③誘導吸収——低いエネルギー状態から高いエネルギー状態への遷移は光を必要とする誘導吸収だけである。

もし高い準位にあるイオンの方が多ければ、光吸収より発光が多くなり光の増幅が起こる。逆の場合には光は減衰する。普通、熱平衡状態ではイオンはボルツマン分布に従っているので大部分低い状態にある。例えば7 cmφ-40cmのレーザーガラスロッド中にNd³⁺は大体1モル(6×10²³個)入っているが、常温ではほとんど基底状態(0 eVまたは0 cm⁻¹)にあり、レーザー発振の高エネルギー状態、つまり始状態(1.4 eV又は11000 cm⁻¹)にあるNd³⁺は0.2~0.3個程度である。この様に熱平衡状態では大部分のイオンは基底状態にあるので光を照射するとまず基底状態からの励起が起こる。日常経験している様に、普通の物に光を照射しても増幅は起こらず吸収が見られるだけである。光の増幅を行うためにはまず多くのイオンを高エネルギー状態に励起しておかなければならない。

3. 反転分布

前述した様に光の増幅を行うためには、レーザー発振の始状態のイオンの数を低エネルギー状態つまり終状態のイオンの数より多くしなければならない。即ち反転分布を作らなければならない。このために外部からエネルギーを供給しイオンを励起するがこれをポンピングと呼ぶ。例えばレーザーガラスロッドに強い光を照射すると多くのNd³⁺が光を吸収し一度に高いエネルギー状態に励起される。Nd³⁺はいろいろな高いエネルギー状態になりうるが、レーザー発振に関与する始状態は一つだけなのでここに直接励起されるのが望ましい。しかしNdガラスレーザーの励起に使われるフラッ

シユランプは近赤外から可視、近紫外領域に渡って波長の連続した光を放出するので、その領域に相当するいろいろな高エネルギー状態にNd³⁺を励起してしまう。又、Nd³⁺に吸収されない波長の光はロッドを透過してしまう。この様にフラッシュランプ光は全て始状態のポンピングに使われるわけではない。この無駄が一つの原因となり、1で述べた様にレーザーへの変換効率が低下する。

レーザー発振の終状態が基底状態の場合、前例のロッドでは1/2×6×10²³個以上のNd³⁺を始状態にポンピングしなければ反転分布にならない。この様なレーザーを三準位レーザーと言う。しかしもし終状態がほかの準安定状態であれば反転分布はずっと容易に達成出来る。このようなレーザーを四準位レーザーと言う。例えばNd³⁺ガラスレーザーの終状態は2000 cm⁻¹の準安定状態でありボルツマン分布によればこの状態のNd³⁺は4×10¹⁹個である。従って4×10¹⁹個以上のNd³⁺を基底状態からポンピングすれば良く、これは三準位レーザーの場合の1/10000に相当する。又、反転分布はイオンが励起状態にとどまる時間が長い程成立しやすい。

4. 寿命

イオンが励起状態にとどまる時間を、①の自然放出の場合は自然寿命と呼ぶ。自然寿命は失活の前後の状態間の関係で決まるので量子力学の理論を用いて遷移確立を計算し、その値から求めることが出来る。又は吸収スペクトルで実測される光吸収の強度から算出することが出来る。光吸収の強度が大きいということは、イオンが基底状態から励起されやすいということであるが、逆の失活も又、全く同じ確立で起こる。即ち、低エネルギー状態⇌高エネルギー状態間の遷移確立が大きいということである。従って吸収強度の大きい遷移は失活しやすく、自然寿命は短い。②の誘導放出の場合は、励起状態のイオンが種光に刺激されて、いわば事故に合って失活するのであるから計算から求めることは出来ない。実際に寿命測定を行うと①と②の両方の効果が合わさったものが得られるので自然寿命より若干短い値が得られる。

レーザー活性物質は、レーザー発振の始状態の

寿命が、反転分布を達成するのに必要なだけ永いものである。例えばNd³⁺の励起寿命は数ミリ秒～数百ナノ秒程度である。

5. レーザー発振

励起されたイオンは熱平衡を保つためにまもなく失活するが、イオンはいろいろな準安定状態になりうるので一度に基底状態まで落ちるとは限らない。即ち、イオン毎にいろいろな経路で失活しそのつどいろいろなエネルギーを放出する。従ってレーザーガラス中のNd³⁺が光を吸収し、励起されたとしても、熱やいろいろの波長の光をばらばらに放出して失活するだけである。レーザーは誘導放出を利用するものであるが、ばらばらの光が種光となり誘導放出を起こしてもそのつどばらばらの誘導放出光が発生するだけで、単一波長（単色性）、単一方向（指向性）、同位相を特徴とするレーザー光は得られない。目的の波長の光をレーザー発振させるには最初の1個の種光を選択的に増幅しなければならない（これ以外の放出光は1で述べたレーザー以外の無駄な光となる）。この目的でレーザー発振器にはミラーが使われている。

反転分布したガラスロッドの両端にミラーをつけると放出光のうちミラーに垂直な（ロッドに平行な）ものはミラーの間を往復することになる。その他の方向の放出光はロッドの曲面や端面を通して出て行ってしまう。又、ミラーを、得たい波長の光だけ反射し他は透過するものにとすると得たい波長の光だけをロッド内に閉じ込めることが出来る。ロッド内を往復する種光はまだ失活してない励起イオンを刺激し誘導放出させる。その誘導放出光が種光となり又他の励起イオンを刺激する。これがくりかえされるので最初の種光と同一波長、同一位相、同一方向の光がどんどん増幅される。片方のミラーを、増幅した光の一

部を透過させる様にしておくとレーザー光としてとり出すことが出来る。この様に、適当なミラーを両端につけたロッドを励起すればレーザーを発振させることが出来る。

6. レーザーの増幅

増幅は発振より簡単である。又、ミラーは必要ない。3の方法で反転分布させたロッドにレーザー光を通すと、誘導放出が起こりレーザー光が増幅される。

以上、Ndガラスレーザーの発振および増幅についてまとめると下図のようになる。

著者紹介



岡田 恵子（おかだ けいこ）
昭和53年3月 神戸大学大学院
修士課程終了
昭和57年3月 東京工業大学大
学院博士課程終
了、理学博士
昭和59年10月 HOYA株式会
社入社
現在にいたる

