

## レーザーガラスの特徴と今後の展開

HOYA (株)材料研究所 虎溪 久良

## Laser glasses : features and applications

Hisayoshi Toratani  
HOYA Corporation

## 1. はじめに

固体(ガラス, 結晶)レーザーはエネルギーを光の形で吸収し(ポンピング), よりすぐれた特性(コヒーレンス, 指向性, 単色性)を持った光として放出する機能をもつ。レーザーガラスはその特性および用途の点で, レーザー結晶にくらべどのような独自性, 優位性がありうるかという観点から検討してゆくことが重要である。ここでは, レーザー発振特性, イオンの発光特性, レーザーガラスが結晶とどのような点で異なり, どのような特徴があるか, 研究の現状および今後の展開について紹介する。

## 2. レーザー発振特性

イオンが励起状態にあるとき, ある寿命でより低いエネルギー状態に遷移するが, その際, エネルギー差に等しい振動数の光を放出する(自然放出)。

$$\nu = (E_2 - E_1)/h$$

$h$ : プランクの定数

これはランダムな現象であるが, ここで外部からこれと同じ振動数の光を入射すると, その光電場に刺激されて光の放出(誘導放出)が生じる。こ

の確率を各々 $A_{21}$ ,  $B_{21}$ とすると, 系がエネルギー密度 $\rho(\nu)$ の光電場の中にあるとき, 放出されるエネルギーは次式で表わされる。

$$P = N_2 A_{21} + (N_2 - N_1) B_{21} \rho(\nu)$$

ここで,  $N_2$ ,  $N_1$ は励起状態, 基底状態のイオン数,  $B_{12}(=B_{21})$ は吸収確率である。

通常の熱平衡状態では $N_2 < N_1$ なので, 正味の光放出が生ずるためには, なんらかの方法で $N_2 > N_1$ の状態(イオン数の反転分布)を作り出すことが必要であり, 固体レーザーの場合, 外部から光エネルギーで励起すること(ポンピング)が行われている。例えば,  $\text{Er}^{3+}$ の $1.5\mu$ レーザー遷移(3準位)では終状態が基底状態であるため, 反転分布を形成するには前イオン数の半分以上を励起しなくてはならず, このため励起状態の寿命が長いことが要求される。一方,  $\text{Nd}^{3+}$ の $1.0\mu$ 遷移(4準位)では終状態は基底状態よりも室温での熱エネルギー分よりもずっと上にあり, そこでのイオンの分布はほとんどゼロとみなせる。従って, 反転分布が容易に達成されるという利点をもつ(Fig. 1)。

レーザー発振は反転分布が形成された媒質中でランダムに生じている自然放出光を共振器を用い

てフィードバックさせ、誘導放出を起こすことにより生じる。利得係数を  $g$ 、損失係数を  $\alpha$ 、ミラーの反射率を  $R_1, R_2$ 、共振器長を  $l$ 、活性イオン濃度を  $N_0$ 、蛍光寿命を  $\tau_f$ 、誘導放出断面積を  $\sigma$  とすると、反転分布を達成するためのポンピング強度は

$$W_p \sim L / N_0 \tau_f \sigma \quad (4 \text{ 単位})$$

$$W_p \sim (g_2 / g_1 \cdot N_0 \sigma + L) / \tau_f (N_0 \sigma - L) \quad (3 \text{ 単位})$$

但し、

$$L = \alpha - 1/2l \cdot 1n R_1 R_2$$

となる。従って、低しきい値で発振するレーザーとしては、いずれの場合も  $\sigma$  が大きく、 $\tau_f$  が長く、損失の小さい材料が望ましいことになる。

励起されたイオンの緩和過程には、光の放出を伴う輻射遷移と光以外の形でエネルギーを失う無輻射遷移があり、全遷移確率はそれらの和として表わされる。

$$W = 1/\tau_f = Ar + Wnr$$

ここで、 $\tau_f$ ：励起状態の寿命、 $Ar$ ：輻射遷移確率、 $Wnr$ ：無輻射遷移確率である。 $\tau_f$ の長いためには無輻射遷移確率の小さいことが要求される。一方、誘導放出断面積は

$$\sigma = \frac{\lambda^4}{8\pi n^2} \frac{A_{ij}'}{\Delta\lambda_{eff}}$$

で与えられ、発光のスペクトル幅  $\Delta\lambda_{eff}$  と輻射遷移確率で主に支配される。

### 3. レーザーガラスの特徴

ガラスが結晶と基本的に異なるのは構造に長距離の規則性(周期性)が欠如していることである。これは、レーザーガラスに二つの欠点をもたらす一方、長所ともなりうる。欠点の一つはスペクトル幅の広がり(Broadening)であり、もう一つは

熱伝導率の低下である。ガラスは結晶にくらべて、通常、一桁程度、発光のスペクトル幅が広いため、誘導放出断面積は一桁小さい。しかし、ブロードな吸収スペクトルはXeランプのような broad band なポンピング光源に対して、効率のよい吸収特性を示すため、反転分布が形成しやすく、誘導放出断面積と反転分布の積として表される利得は結晶にくらべて極端には見劣りしない。一方、熱伝導率の低いことは致命的であり、ガラスは熱負荷が大きい条件(高繰返し発振)では使用が制限される。他方、ガラスが長距離構造の規則性を持たないことは、例えば、結晶と異なり光学的性質と弾性的性質に相関がなく、一方の性質を保ったまま他の性質を変えられるという長所を持つ。この他に、ガラスは、大型で均質度の良いものが作れること、形状の自由度、組成の自由度、低損失、低コストなどの利点がある。

これらのガラスの長所、短所を理解した上で、ガラスがどのようなレーザーデバイス(Ndレーザー)で優位性があるかを見てみると次のようになる。

	結晶	ガラス
デスクレーザー(高ピーク出力)	×	◎
ファイババンドルレーザー(ランプ励起)	×	◎
ジグザグスラブレザー(高繰返し)	◎	○
” (低繰返し)	○	◎
ロッドレーザー(高平均出力)	◎	×
” (低平均出力)	○	◎
ミニチュアレーザー(LD励起)	◎	◎
マイクロチップレーザー(LD励起)	◎	○
ファイバレーザー(LD励起)	○	◎

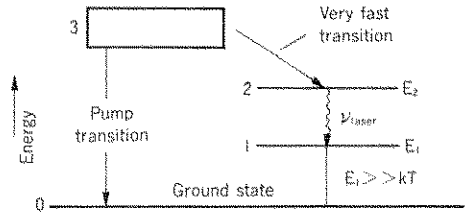
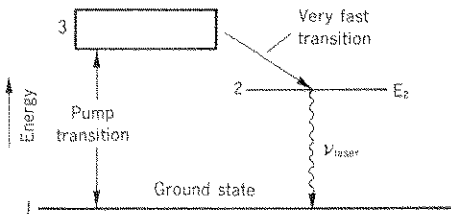


Fig. 1. Energy level diagrams of 3- and 4-level lasers

大形デスクレーザーは均質で、大きなサイズのものができるというガラスの特徴を最大限に生かしたものとレーザー核融合研究などに使われている。ガラスの低熱伝導率を克服する方法として、ファイバーバンドルあるいはジグザグスラブレーザーが考案されている。前者はすぐれた冷却効率をもつが、コヒーレント性の点で問題がある。後者は実用化になっているが、それでも数十pps以上の高繰返しはむずかしい。このジグザグスラブレーザーでは、レーザー光がスラブの上下面で全反射をくりかえしながら、ポンピングで生じた温度勾配を横切って進むため温度分布の影響がキャンセルされ、かつ、大きな冷却表面積を持つことから高励起入力が可能である(Fig. 2)。最大入力( $P$ )は熱負荷によって生じる応力( $\sigma_{max}$ )とガラスの熱破壊強度( $R_t$ )で決まる。

$$P/L = 12R(w/t)$$

$$R_t = \sigma_{max} \cdot k(1-\nu)/\alpha E$$

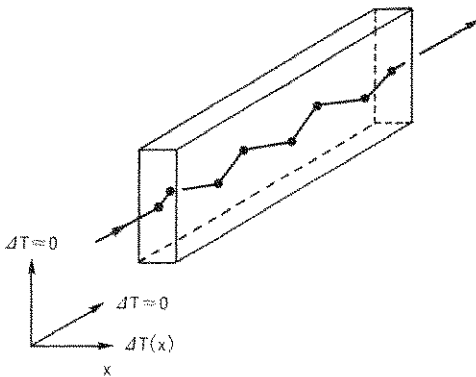


Fig. 2. Zig-zab slab laser

ここで、 $K$ は熱伝導率、 $\nu$ はポアソン比、 $\alpha$ は熱膨張係数、 $E$ はヤング率、 $L$ はスラブ長、 $w$ は幅、 $t$ は厚みである。従って、単位長当りの最大入力スラブの幅と厚みの比、および材料の破壊強度で決まる。ガラスと結晶で熱伝導率は約一桁違うから、その他のパラメーターでガラスの $R_t$ を上げねばならない。組成により最も変化し得るのは熱膨張係数 $\alpha$ であり、例えばシリカガラスでは結晶よりも一桁小さくなる。

近年、注目されているレーザーに、半導体レーザー励起の固体レーザー(ミニチュアレーザー)がある(Fig. 3)。これは、レーザー材料の吸収バンドに一致した発振波長を持つ半導体レーザーで励起するため、吸収効率が極めて高く、余分な熱の発生がないという特徴がある。Nd:YAGミニチュアレーザーの出力は半導体レーザーの高出力化に伴って急速に増大している。数年前までは $1.06\mu$ で数十mW、 $0.53\mu$ で数mWであったものが、現在では $1.06\mu$ で数W以上、 $0.53\mu$ で100mW以上のものが得られており、またガラスにおいても結晶に劣らない効率が報告されている。発振しきい値は

$$P_{th} = (\pi h \nu_p / 2 \sigma \eta p \tau_f) (W_i^2 + W_p^2) (L_e + L_i)$$

で与えられる。ここで、 $W_i$ 、 $W_p$ は各々レーザー、ポンピング光の最小ビーム径、 $L_e$ 、 $L_i$ は各々外部、内部損失である。誘導放出断面積が結晶に比べ、一桁小さいガラスで結晶と同程度の効率、しきい値が得られるのは、ガラスの損失が格段に小さいことによる。また、熱の発生が少ないことから、熱伝導率が低いというガラスの欠点が問題にならない。さらに、ガラスの場合、吸収バンドが

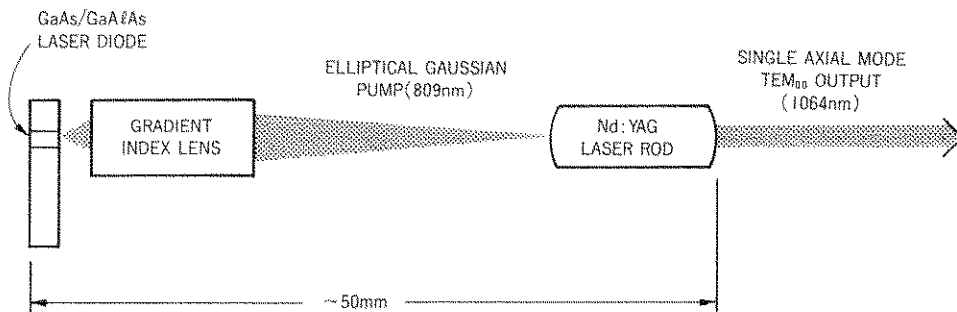


Fig. 3. Diode pumped Nd:YAG laser

幅広いため、半導体レーザーの波長のふらつきに対して吸収率が余り変化しない、また、ファイバー化することで発振効率が向上するなどの利点もある。

高出力半導体レーザーとして、現在利用できるのは800 nm付近のものに限られているため、一般には、これより短い波長でのレーザーを必要とする場合、非線形結晶を用いた倍波発生が行われる。しかしながら、励起光強度が高い場合、2フォトン吸収して、より高いエネルギーの励起状態にあがり、そこから発光するというupconversion過程がいくつかのイオンで観測されている。Er:YLFでは800 nmの励起により550 nm, 660 nm付近でレーザー発振が観測されている。ガラスではフッ化物ガラスにおいてErのupconversionが効率よく起こるが、組成がフッリン酸塩、酸化物と変化するに従いその効率が極端に減少することが見出されている。ガラスではシングルモードファイバーにすることで、ポンピング光およびレーザー光の密度が非常に高められ、効率の上昇がみこまれる。このプロセスは赤外光で励起し、可視光を発生させるという点で興味深いものである。

結晶においては、遷移金属イオンをドープした波長可変レーザーが開発されている。例えば、Cr:アレキサンドライト、Ti:サファイアなどがあり、それぞれ700-820 nm, 660-1000 nmの間で波長が可変である。これらはVibronic 遷移レーザーと呼ばれており、発光準位とフォノンが関与したブロードな終準位間の遷移にもとづくもので、ブロードな発光を与える。ガラスではこれらのイオンのレーザー発振はまだ成功していない。

#### 4. 今後の展開

レーザーガラスとして結晶にない、あるいは結晶よりも特性のすぐれたものを作るということが一つの目標である。ファイバーあるいは導波路形状に出来ること、組成の自由度があること、あるいは結晶にくらべ桁以上の損失低下が可能であることはガラスの優位点である。ファイバーレーザーの研究はこれまで、ほとんどが希土類含有シリカガラスファイバーであり、フッ化物ガラス、

リン酸塩ガラスファイバーの研究は二、三報告されているに過ぎない。しかし、後者は希土類イオンを高ドープできることから、発振、増幅特性にすぐれており、コヒーレント光源あるいは光通信用ファイバーのin-line amplifierなどの応用で今後ますます重要になってくると考えられる。一方、upconversionレーザーは赤外光から可視光を発生するという点で非常に興味ある研究テーマであり、今後追求すべきである。

レーザーガラスに期待される今後の展開は、新しいレーザー波長の実現、波長可変、光導波路素子との組合せと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 一ノ瀬昇, 平野真一共編, 光機能材料セラミックス, 第4章レーザー材料, オーム社(1988)
- 2) T. Y. Fan and R. L. Byer, "Diode Laser-Pumped Solid State Lasers", IEEE J. Quantum. Electron., vol. 24, 895-912(1988)

#### 〔筆者紹介〕



虎溪 久良 (とらたに ひさよし)  
昭49.3 京都大学大学院工学研究  
科修了  
同年、保谷硝子機技術研  
究所入社  
昭59.4 HOYA OPTICS, INC  
(USA)派遣  
昭64.2 HOYA (株)材料研究所レ  
ーザー材料研究室長

#### Abstract

Laser glasses have superior features against crystals in terms of low loss, homogeneity, flexibility of composition and form, and scalability of size. On the other hand, due to lack of structural orderness in longer range they have some shortcomings such as low thermal conductivity and wide spectral line width which leads to small emission cross section. In order to realize the advantages of laser glasses, several unique devices such as fiber laser, zig-zag slab laser and so on are being developed.