

レーザーガラス

浅原 慶之

Laser Glass

Yoshiyuki Asahara

1. まえがき

レーザーとは、コヒーレントな光（強度分布が均一でしかも指向性を持った単一波長光）を発生する光源のことであり、ここから発生する光（レーザー光）は、材料加工、光通信、情報処理、ディスプレイ、医療機器、軍用機器など、あらゆる分野で活躍している。この便利な光源は、特殊な条件を満たすエネルギー状態を有するイオン（活性イオン）のエネルギー準位間で起こる「誘導放出」という現象を利用した増幅機能によって実現する¹⁾。また、活性イオンを結晶やガラスなどのホスト材料にドーブしたものはレーザー材料と呼ばれ、チタンサファイア結晶やネオジウム YAG 結晶などが、市販のレーザー材料としてよく知られている。ガラスをホストとした材料は、賦形成を活かしたファイバー状材料が良く知られ、その高効率増幅機能は光通信分野では不可欠の存在になっており²⁾、本特集でも詳しく解説される事になっている。本稿では、ガラスファイバーのレーザー発振機能に焦点を絞り、レーザーの原理、材料

の種類と特徴、応用例、などを紹介することにする。

2. レーザーの原理

2.1 誘導放出と反転分布¹⁾

イオンに光を照射すると、図 1(a)に示すようにイオンは光の波長（または振動数 ν ）に対応するエネルギー（ $E_2 - E_1 = h\nu$ ）を吸収して、 E_1 なるエネルギーを有する基底状態から、 E_2 なるエネルギーを有する高エネルギー状態に励起される。このイオンは、後にエネルギーを放出して基底状態に遷移するが、その放出過程には、光としてエネルギーを放出する輻射遷移過程と、それ以外の方法でエネルギーを放出する非輻射遷移過程がある。輻射遷移過程は、ある寿命で徐々に光エネルギーを放出する自然放出過程と、二つのエネルギー状態の差に相当する波長を有する光に誘導されて瞬時に光としてエネルギー放出する誘導放出過程とがある。後者の場合、入射光と同じ波長を持った光が照射とほぼ同時に放出され、これが入射光に加えられるので、入射光は増幅されたことになる。さらにこの材料を共振器に入れて自然放出光を基に増幅作用を繰り返せば、コヒーレントなレーザー光を発振することが可能となる。

〒190-1214 東京都西多摩郡瑞穂町むさし野 2-43-35
TEL 042-553-7665
E-mail: asaharay@k 9.dion.ne.jp

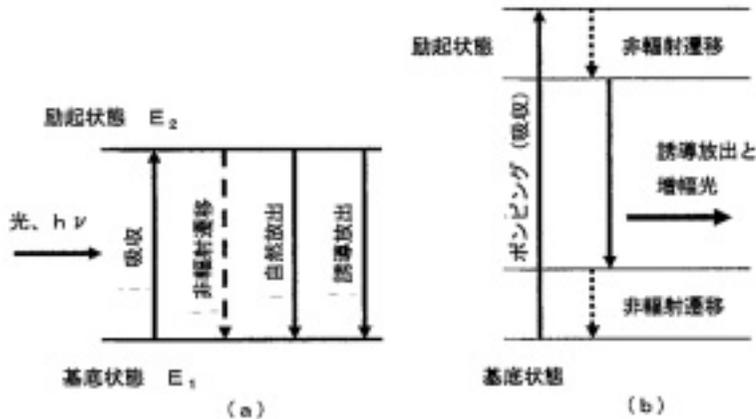


図1 レーザーの原理 (a)光吸収と光放出過程, (b)4 準位レーザー構成

材料に光を入射した場合、図 1(a)に示したような 2 準位系では、通常は高エネルギー状態にあるイオンよりも基底状態にあるイオンのほうが格段に多いので、光吸収が優先し誘導放出が起こることはまれである。そこで、例えば図 1 (b)に示すような 4 準位のエネルギー状態を有するイオンを利用して、別の短波長の光を照射してイオンを高いエネルギー状態に励起し（これをポンピングと言う）、さらに少し下の誘導放出の始準位に緩和させて、イオンの数を誘導放出の終状態にあるイオンの数より多くする（これを反転分布という）必要がある。従って、一般的にはポンピングに使用する光の波長よりも、レーザーの波長は長くなるが、本特集でも詳しく解説される「アップコンバージョン」過程を利用すれば、ポンピング波長よりも短い波長の光を発振することも可能である。

一方、非輻射遷移過程には、活性イオンを取り囲む周りのホスト材料の格子振動（フォノン）との相互作用の繰り返しによる緩和過程（多フォノン緩和）や、活性イオンの同じエネルギー差を有する他のエネルギー準位間との相互作用による緩和過程（交差緩和）などがあって、いずれも誘導放出の効率を低下させるので、極力これを抑える工夫も必要になる。

2.2 活性イオンとホスト材料³⁾⁴⁾

上で述べたような条件を満足する電子構造とエネルギー状態を有するイオンとしては、遷移金属イオンと希土類イオンがある。遷移金属イオンの場合は、外殻電子は 3d 電子で、これをシールドする外側の電子がない。レーザー遷移は、ホスト材料を構成する陰イオンとの間の相互作用に起因して発生するエネルギー準位間の遷移が基になる。遷移金属イオンをドープしたレーザー結晶材料としては、レーザーの発見に使われた最初の材料であるルビー ($\text{Cr: Al}_2\text{O}_3$) や、波長可変レーザー材料としてよく知られるチタンサファイア ($\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$) などがあるが、遷移金属イオンをドープしたガラスレーザー材料は、陰イオンの場が不均一なためか、筆者の知る限りでは残念ながら未だに実現していない。

一方、希土類イオンの場合は、4f 外殻電子の外側は 5s と 5p の混成軌道によって完全にシールドされているために、エネルギー状態は孤立イオンのエネルギー状態とほとんど変わらず、4f 軌道における電子配置とそれらの相互作用に基づくイオンのエネルギー状態間の遷移がレーザー遷移の基になる。ただ、エネルギー状態は細かに分裂しており、しかも遷移確率自体がホスト材料に著しく依存する上に、非輻射遷移過程もフォノンの大きさに左右されるので、レーザー特性は複雑にホスト材料に依存す

ることになる。

希土類イオンの代表格は、典型的な4準位のエネルギー状態を有するNdイオンであり、このイオンをドープしたYAG (Nd:Y₃Al₅O₁₂)結晶は、市販のレーザー材料の3/4を占めるといわれる。一方、ホスト材料としてガラスを使用した場合は、結晶と異なりファイバー成形が可能なことや、ドープする活性イオンとホスト材料を構成するイオンのサイズをほとんど考慮する必要がないため、広い組成範囲で活性イオンとホスト材料を選べるという特徴を有するので、変化に富んだレーザー材料を得ることが可能となる。

3. ファイバーレーザー

3.1 ファイバーレーザーの特徴

ファイバーレーザーの特徴は、ポンピング光を狭いコア領域に閉じ込めることにより、大きな反転分布と高効率の誘導放出が得られる点にある。また、表面積が大きいことから、非輻射過程で発生する熱の放出効率が高く、熱伝導率の低いガラスでの連続発振が可能となった。さらに、酸化物、フッ化物、カルコゲナイドなど、組成が自由に選べるというガラス材料の特徴を活かして、レーザー特性をコントロールできる利点もある。

ファイバーレーザー発振器の構造は、基本的には通常のレーザー発振器と同様で、活性イオンである希土類イオンをドープしたファイバーの端面に、蒸着などの手段を用いて反射ミラーを設置した共振器構造からなる⁵⁾。2000年頃までにファイバーレーザーとして連続発振が報告された希土類イオンのエネルギー準位とレーザー遷移を図2に、また、その発振波長範囲を図3に示す⁶⁾。波長範囲は0.38~3.95 μmとかなり広範囲であるが、応用面では高出力が得られる1~3 μmの赤外域が中心となる。このうち1 μm帯は、最近注目を集める微細加工分野のレーザー光源として期待されている。また、1.4~2.6 μm帯は、水、水蒸気、二酸化炭

素、メタンなど気体の固有吸収が存在するので、各種の環境計測センサー用の光源として、また、眼治療、外科手術などの光源として期待されている⁷⁾。

3.2 希土類イオンドープファイバー

ファイバーレーザーの活性イオンとして最もよく知られたイオンは、典型的な4準位系を構成するNdイオンである。0.8 μm前後のLD光を吸収して³H_{9,12}あるいは⁴F_{5,2}にポンプされたイオンは、通常は非輻射遷移で⁴F_{3,2}に緩和し、ここを始準位として⁴I_{13,2}、⁴I_{11,2}、及び基底準位の⁴I_{9,2}へと緩和する際にそれぞれ1.35 μm、1.06 μm、および、0.9 μmの光を放出する。このうち1.06 μmは遷移の比率が高く、また、多フォノン緩和も起こりにくいので高出力のレーザー発振が可能である。1.35 μmに関しては、シリカガラスでは始準位である⁴F_{3,2}から上位の⁴G_{7,2}への遷移エネルギーが同じなので、励起状態吸収 (ESA: Exsited State Absorption) が起こる⁸⁾。また、遷移比率の高い1.06 μmの自然放出とその増幅現象 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) もあるので、ガラス組成としてはフッ化物ガラスが最適と考えられる⁹⁾。

次によく知られたイオンはErイオンである。Erの場合は、LDを用いて基底準位から⁴I_{11,2} (980 nm)、あるいは、⁴I_{9,2} (807 nm) にポンプされたイオンが、準安定な⁴I_{13,2}準位へと緩和し、基底準位である⁴I_{15,2}との間の遷移で1.55 μmのレーザー光を発振する。誘導放出の準位間には他のエネルギー準位がないので、多フォノン緩和もほとんど起こらない。また、最近では、1.48 μmのLDを用いて⁴I_{13,2}へ直接ポンプする構成が普通になっている¹⁰⁾。

この他、Erでは⁴I_{11,2}から⁴I_{13,2}への遷移で2.75 μmの連続発振が確認されているが、この遷移は自己終端系と呼ばれ、終準位に比べて始準位の寿命が短く、したがって反転分布が出来にくい性質がある。このため連続発振を実現するに

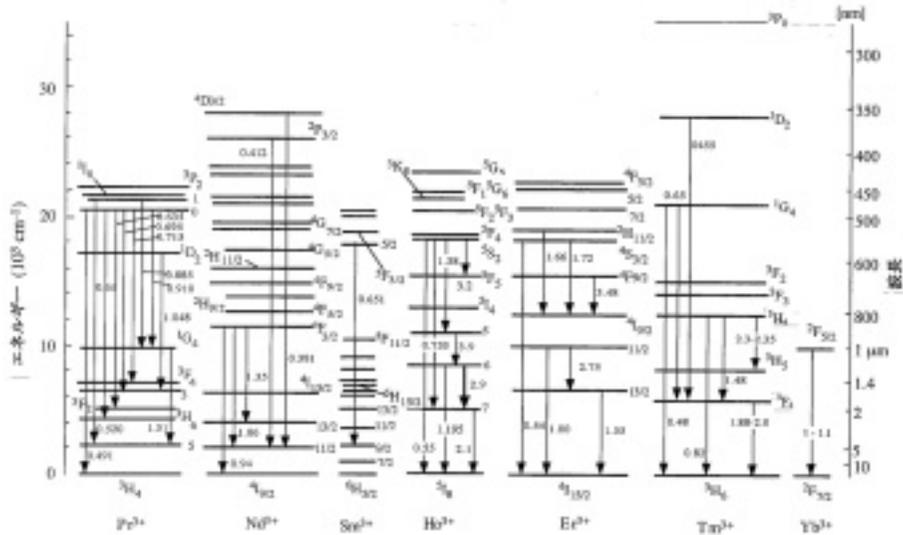


図2 ファ이버レーザーにドーピングされる希土類イオンのエネルギー準位⁶⁾

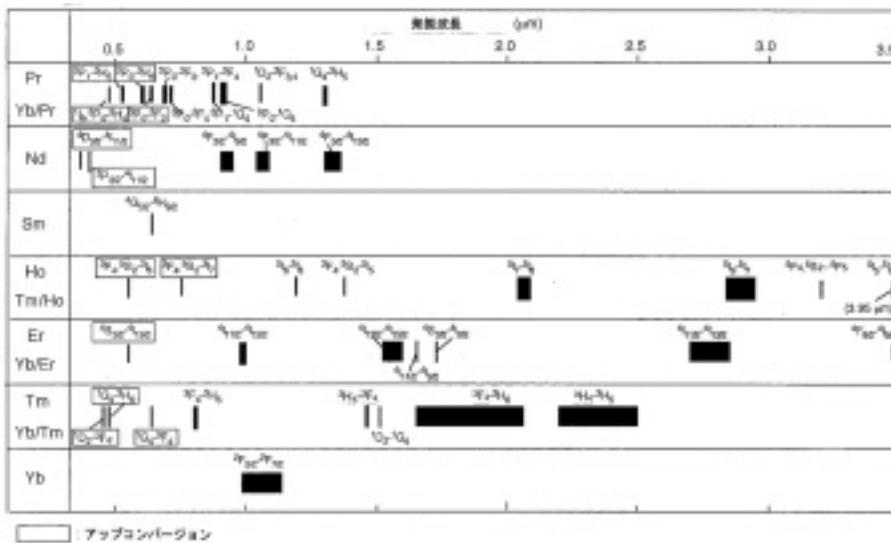


図3 希土類ドーピングファイバーレーザーの発振波長帯域⁶⁾

は、適当な波長の光を用いて ${}^4I_{13/2}$ から上位準位にイオンを励起して、終準位のイオン密度を減らすなどの工夫が必要となる¹¹⁾。Pr, Ho, あるいは、Tmも $1.5\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ の波長帯で発振するが、いずれの場合も、始準位と終準位との間でエネルギー準位が立て込んでいるために、多フォノン緩和、自己終端、ESAといった問題を解決するための方法とガラス組成の選択が必要となる。

最近特に注目されているイオンとしてYbイオンがある¹²⁾。このイオンは、3つの副準位に分裂した ${}^2F_{5/2}$ と、4つに副準位に分裂した基底状態の ${}^2F_{7/2}$ の間で準3準位系を構成し、 $0.9\ \mu\text{m}$ のLDによるポンピングと $1.0\ \mu\text{m}$ の発振を実現する。エネルギー状態の構成が単純なため、多フォノン緩和、ESA、ASE、あるいは、非輻射遷移による発熱などといった現象はほとんど起こらない。吸収スペクトルは $0.9\ \mu\text{m}$ を中

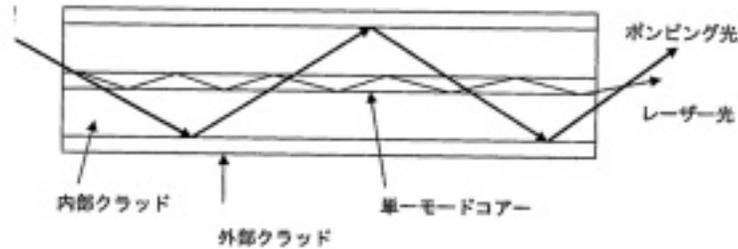


図4 ダブルクラッドファイバーレーザーの構造 (側面図)

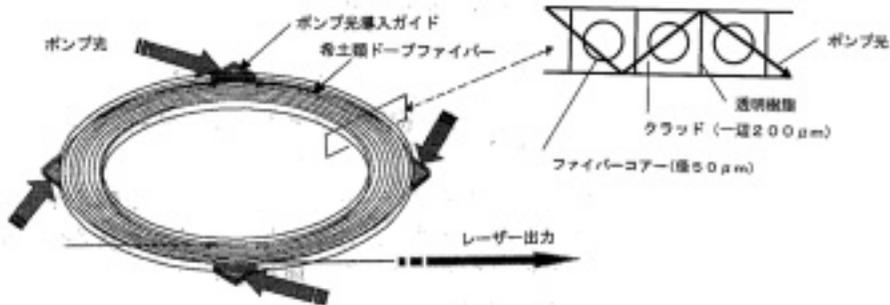


図5 リング状ディスクファイバーレーザーの構成図¹⁷⁾

心に広がっており、アレー型の高出力LDの幅広いスペクトルに対応できる利点がある。このため、Ndに替わる1.0 μm 帯の高出力ファイバーレーザーの活性イオンとして、材料加工分野で注目されている。

3.3 ダブルクラッドファイバーレーザー

ここ数年、NdやYbをドーブした高出力のファイバーレーザーが、材料の微細加工分野で注目されている。微細加工には、高出力でしかもビーム断面の強度分布(横モード)がシャープで、集光性に優れたレーザー光が必要になる。高出力発振にはLDアレーによる強力なポンピングが必要となるが、数ミクロンの狭い単一モードファイバーコアに入射するには不向きである。一方、コア径の大きい多モードファイバーに入射した場合は、入射効率が良いが加工に必要な良質の横モードを有するレーザー光を得ることが出来ない。この問題を解決する方法として、図4に示すような「ダブルクラッド」あるいは「クラッド励起」と呼ばれるファイバーレーザーが提案されている¹³⁾。

希土類イオンをドーブした5~10 μm 径の単一モードコアを、50~100 μm 前後の径を持つ大口径多モードコア(あるいは内側クラッド)で囲み、さらにその外側に通常のクラッド層を設けた構造からなる。外側のコアに効率よく入射されたポンプ光は、伝搬中に中心のコアを横切って、ドーブした希土類イオンに効率よく吸収され、最終的には中心のコアから良質な横モードを有するレーザー光を発振する。この構造を利用して、NdとYbをドーブしたファイバーで500W近い出力を連続発振するものまで現れている¹⁴⁾。さらに、HoやTmをドーブしたものでも5~14W前後の出力が報告されている¹⁵⁾¹⁶⁾。

このクラッド励起ファイバーの構造に加えて、側面からのポンプを行うことによって、マルチモードでさらに出力を増加させる試みもなされている¹⁷⁾。この装置は、基本的には図5に示すように、コア径が50 μm でクラッドが一辺200 μm 前後の短形断面を有するファイバーをリング状に巻き、全体をディスク状に一体化した構造を持つ。ガイドを通じて側面から

導入されたLDアレー光は、クラッドを伝搬しながらコア中の希土類イオンに吸収される仕組みになっている。ファイバーとしてNdをドープしたシリカファイバーを用いた結果では、 $1.06\ \mu\text{m}$ で350 Wの高出力が得られ、これらを何個か組み合わせることによって、集光ビーム径が $38\ \mu\text{m}$ 、全体ではほぼ1 kWの連続発振を達成している。

4. あとがき

希土類をドープしたレーザーガラスは、ここで述べたファイバーレーザー発振デバイスばかりでなく、紙面の都合上割愛したが、レーザーガラス表面に形成したチャンネル導波路を利用してコンパクトなレーザー発振デバイスを作る試みも報告されている⁶⁾。今後も、ガラスでしか出来ないガラスらしさを活かしたレーザー材料と、その実用面での更なる発展を期待したい。

参考文献

- 1) W. Koechner: "Solid State Laser Engineering" (Springer-Verlag, 1992) p 1
- 2) 清水誠: 応用物理, 73 (2004) 74
- 3) J. A. Caird and S. A. Payne: CRC Handbook of Laser Science and Technology, Supplement 1 "Laser" Ed. M. J. Weber (CRC Press, 1991) p 3
- 4) P. F. Moulton: Laser Handbook, Vol. 5, ed. M. Bass and M. L. Stith (Elsevier Science Publishers B. V., 1985) p 203
- 5) M. Simizu, H. Suda and M. Horiguchi: Electron. Lett. 23 (1987) 768
- 6) M. Yamane and Y. Asahara: "Glasses for Photonics" (Cambridge University Press, 2000) p 123-140
- 7) 土志田実, レーザー研究 25 (1997) 35
- 8) W. J. Miniscalco, L. J. Andrews, B. A. Tompson, R. Quimby, L. J. B. Vacha and M. G. Drexhage: Electron. Lett. 24 (1988) 28
- 9) T. Komukai, Y. Fukasaku, T. Sugawa and Y. Miyajima: Electron. Lett. 29 (1993) 755
- 10) 吉田実, レーザー研究 25 (1997) 114
- 11) M. C. Brierley and P. W. France: Electron. Lett. 24 (1988) 935。
- 12) 白川晃, 植田憲一: レーザー研究 33 (2005) 254
- 13) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli and B. C. McCollum: Proc. Optical Fiber Sensor, OSA Technical Digest Series, 2 (Optical Society of America, 1988) PD 5
- 14) J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer and A. Tünnermann: Electron. Lett. 39 (2003) 645
- 15) S. D. Jackson and S. Mossman: Appl. Phys. B 77 (2003) 489
- 16) R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner, J. Nilsson, A. B. Grudinin and D. C. Hanna: Electron. Lett. 36 (2000) 711
- 17) 関口宏, 伊東勝久, 田中彰美, 山浦均, 菅博文, 植田憲一: レーザー研究, 31 (2003) 525