

最近の技術から

ガーネット系固体レーザー

横山 武・石川 年明・藤井 義正

住友金属(株)電子材料研究所 〒198 青梅市末広町 1-6-1

1. ま え が き

固体レーザーは、1964年に Geusic らによって開発された Nd:YAG (Nd 添加イットリウム・アルミニウム・ガーネット, $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) を中心に、半導体の微細加工、医療における応用が定着した。最近では、金属材料の切断・溶接などを中心に一般加工分野での高出力化・高効率化の要求、また、波長可変固体レーザーの実用化の要求が強い。このようなニーズの広がりを背景に、活性イオンとレーザー媒質の新しい組合せと結晶作成技術を中心とした新しい固体レーザー材料の研究開発、非線形波長変換技術の応用研究、また LD (レーザーダイオード) 励起やスラブ(板)形レーザーなど新しい方式の固体レーザー発振技術について、再び研究開発が活発化している。なかでもガーネット結晶は、チョクラスキー (CZ) 法で高品質な大型結晶が比較的容易に得られ、酸素イオンで構成される大きさの異なる3種類のサイトを種々の金属イオンで置換することで材料設計が可能である等の特長を持っており¹⁾、高出力化や高効率化および波長可変の可能なレーザー材料として展開が目ざされている。ここでは、最近の話題である大型 Nd:YAG ロッドや大型 Nd:GGG ($\text{Nd}:\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) スラブを用いた高出力固体レーザー、 Cr^{3+} による励起の増感効果が顕著な各種 Nd:Cr:ガーネット (Nd, Cr 共添加ガーネット) 高効率レーザー、フォノン終単位を利用した Cr:ガーネット波長可変レーザーについて、最近の材料の進歩を紹介する。

2. 高出力レーザー用ガーネット

発振技術の向上とともに、結晶の大口径化技術の進歩に裏づけされて、大口径でかつ長尺の大型ロッドを用いた、Nd:YAG レーザーの高出力化が進んでいる。現在、国内では、直径 60 mm、長さ 200 mm 以上の大型で高品質の Nd:YAG 結晶から、Nd 濃度 1.1 at%、直径 10 mm、長さ 152 mm、消光比 \sim 40 dB、屈折率変動 \sim 10⁻⁶ の高品質レーザーロッドが製造されており、一般的な発振器構成を用い、パルス幅 4 ms、30 Hz で1本の

ロッドとしては最高の出力 565 W が 3.9% の高効率で達成された²⁾。また、直径 10 mm、長さ 150 mm の大型ロッドを組み込んだ発振器 3 台を直列に並べ、最大出力約 1.2 kW が効率 3.6% で達成された³⁾。

一方、ロッドのかわりに大型結晶スラブを用いる高出力化が精力的に進められている。ロッドの大型化による高出力化は、熱レンズ効果のために制限され、直径 10 mm 程度が実用上の限界とされている。これに対し、スラブ形レーザーは、全反射面によってジグザグ形の光路をとるため、厚さ方向の屈折率変動や複屈折効果を平均化することが可能であり、また大きな全反射面からの均一冷却が可能なため、大型結晶を用いた高出力化に適している。YAG に比べ高濃度の Nd を添加でき、平坦な育成界面で安定に成長できるため、コアのない結晶が得られ、直径 80 mm、長さ 200 mm の結晶の大部分がレーザー材料として利用できる Nd:GGG 結晶を用いて、Nd 濃度 2 at% で、幅 35 mm、長さ 177 mm、厚さ 9 mm の大型スラブレーザーが試みられ、パルス幅 3 ms、10 Hz で最大平均出力 232 W がスロープ効率 2.4% で得られた。スラブの厚さ方向の広がり角は約 5 mrad と小さく、熱レンズ効果等による出力の飽和も見られていない。すなわち、Nd:YAG に比べ、熱伝導率が約 30% 小さく、屈折率の温度係数が約 2 倍大きい Nd:GGG の熱特性上の問題は軽減されていると考えられる。図 1 に実験に用いた共振器構成を示した。さらに高出力化が可能と考えられ、出力 1 kW を目標に開発が進められている⁴⁾。また、大型レーザースラブ用に適したコア・フリーの Nd:YAG 結晶の成長法も、盛んに試みられている⁵⁾。

3. 波長可変レーザー用ガーネット

表 1 にフォノン終単位を利用したおもな波長可変レーザー材料を示した。ガーネット結晶は、酸素イオンで構成される大きさの異なる3種類のサイトをもっている。なかでも八面体サイトを Ga が占める種々の Cr^{3+} 添加ガリウム・ガーネットでは、12 面体サイトをイオン半径の異なる種々の希土類イオンで構成することにより、

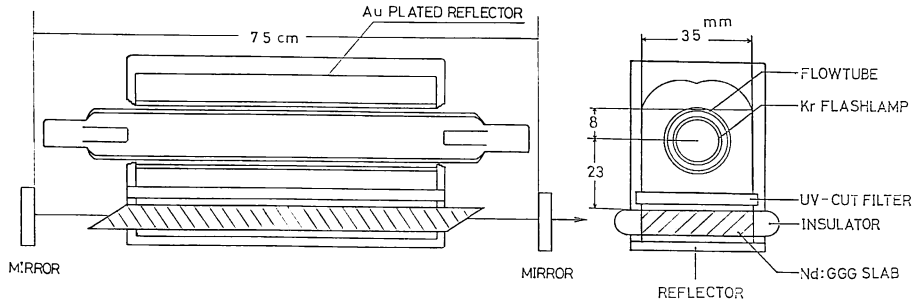


図 1 Nd:GGG スラブレザーの共振器構成

表 1 おもなフォノン終準形波長可変レーザー

イオン	母材	発振波長 (nm)	励起源	発モード	備考
Ti ³⁺	Al ₂ O ₃	700-900 770	レーザー Arレーザー	パルス CW	6X6X18mm ³
Cr ³⁺	BeAl ₂ O ₄ (アレキサンドライト)	700-815 790-793	ランプ ランプ	CW パルス	6φX101mm
Cr ³⁺	Be ₃ Al ₂ Si ₆ O ₁₂ (エシライト)	751-759	ランプ	パルス	4φX19mm
Cr ³⁺	KZnF ₃	785-865	CW-レーザー	パルス/CW	
Cr ³⁺	Gd ₃ Sc ₂ Al ₃ O ₁₂ (GSAG)	765-801 750-800	レーザー ランプ	CW パルス	5φX51mm
Cr ³⁺	Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂ (GSGG)	745-820 790	レーザー ランプ	CW パルス	5φX76mm
Co ²⁺	MgF ₂	1630-2080	レーザー	CW	200K
Co ²⁺	KZnF ₃	1650-2070	レーザー	CW	80-200K

八面体サイトを占める Cr³⁺ イオンの周りの結晶場を変えることができ、約 200 nm の幅をもつ波長可変域がレーザー励起で確認されている。最近では、実用的大きさのロッドを用いたフラッシュランプ励起による発振例が多く報告されている。しかし Cr:GSGG では 100 J のフラッシュランプ励起で、Cr イオンの幅広い吸収や可視光域に誘起される ESA (excited state absorption, 励起準位からの吸収) が原因で Nd:YAG の約 7 倍強い熱レンズ効果が発生し、出力が飽和する。したがって、400 nm 以下の励起光中の UV 光をブロックする必要があるとの問題点が指摘されている⁶⁾。この点、アルミニウム・ガーネットの Cr³⁺:GSAG 結晶は、GSGG 結晶と異なって化学量論組成で CZ 成長が可能のため、色中心の生成が非常に少なく、ESA の小さな、ランプ励起を用いた高効率な波長可変レーザーが可能な、注目すべき結晶である。

4. 高効率レーザー用ガーネット

増感効果を利用したロッド型 Nd:Cr:GSGG では、

YAG との比較で約 3 倍の発振効率を得られ⁷⁾、高効率スラブレザー用材料として、直径 80 mm のコア・フリー大型結晶も育成されている。また Nd:Cr:GSAG は、色中心の生成が少ないため、ランプ励起を用いた高効率な高出力レーザーが期待できる。国内でも CZ 法で直径 40 mm、長さ 140 mm の結晶が 1~5 mm/h の大きな速度で育成されており、蛍光寿命は室温で 280 μs と YAG より長い⁸⁾ため、Q スイッチ動作に適すると考えられている⁸⁾。

一方、W 級出力が実現している最近の LD 技術の進展に伴って、LD 励起固体レーザー開発の動きが活発化している。LD 励起では、数十% の高い効率が期待でき、また、熱に変換され熱レンズ効果など発振効率を低下させる原因となる余分な吸収も小さい。したがって、熱的に不利な物性をもつ新しいレーザー結晶群の利用範囲を拡大することが可能となり、小出力ではあるがビーム品質のよい高効率固体レーザーの多彩な実用化が期待されている。

文 献

- 1) 藤井義正：“固体レーザー材料”，セラミックス，**21**，1 (1986) 26.
- 2) 前田一夫，ほか：信学技報，**86** (1986) 59.
- 3) 吉田史郎，ほか：第 33 回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1986) p. 217.
- 4) 早川博彦，ほか：第 34 回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1987) p. 663.
- 5) A. M. Brown, R. C. Morris and J. E. Marion: "Progress in the growth of large-diameter flat interface YAG: Nd," *CLEO '87* (1987) p. 36.
- 6) P. Fuhrberg, G. Litfin, W. Luhs and B. Stuve: "Garnets and Perovskites as medium power and single-mode lasers," *CLEO '86 Tech. Dig.* (1986) p. 240.
- 7) J. Y. Liu, K. C. Liu and M. G. Cohen: *CLEO '86 Tech. Dig.* (1986) p. 108.
- 8) 前田一夫，ほか：第 33 回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1986) p. 220.

(1987年8月20日受理)