レーザー解説

アレキサンドライトレーザーの開発

今井 信一*・山岸 喜代志**

(1985年5月17日 受理)

Development of Alexandrite Lasers

Shinichi IMAI* and Kiyoshi YAMAGISHI**

(Received May 17, 1985)

1. はじめに

レーザーは、発明当初からその高いエネルギー密度、単色性、そして空間的制御性に対して多くの期待が寄せられてきた。たとえば、ある材料の特定原子、分子のみの励起による材料の合成、微細加工、または特定部位の情報の検出が可能になることが期待されていた。しかしその後発明され、開発されてきたレーザーの多くは決まった波長でしか発振しなかったもので、応用分野は、結局高いエネルギー密度と空間制御性を利用した処理技術がほとんどであった。

当初の期待に応え、新しいレーザー応用分野を開拓するためには、広範囲な波長域で発振可能な大出力波長可変レーザーの実用化が望まれる。従来、波長可変レーザーとしては、色素レーザーが知られており、色素を変えることにより紫外域から赤外域までの領域で大出力を得ることが可能であるとされている。そのためには、大出力の励起源、退色及び濃度変動しやすい色素の特性の保持のための機構が必要で、システ

ムが複雑かつ大がかりになり、メンテナンスも面倒となる。その他の波長可変レーザーとしては、色中心レーザー、電子ビーム励起エキシマレーザー、自由電子レーザーが知られているが、実用可能性については未知である。

このような状況の中で、構造が比較的単純で、発振器が小形である波長可変固体レーザーの開発が各国で始まった。

最初の波長可変レーザーは $\text{Ni}^{2+}:\text{MgF}_2$ レーザー¹⁾であろう。しかし低温で動作し、波長同調域が狭いことから固体レーザーといえども実用的なレーザーとは言えなかった。その後も、同型のレーザーの研究が続けられたが、画期的なものは現れなかった。

アレキサンドライトの研究は、赤色で発振するレーザーホスト、ルビーの代用品として行われた²⁾。ところが、波長可変レーザーとしてアレキサンドライトレーザーが報告されると³⁾、波長可変固体レーザーの研究が再び活発化しはじめた。現時点では、アレキサンドライトが最も実用性が高いと考えられている。その最大の理由

* (株)東芝生産技術研究所 (〒235 横浜市磯子区新杉田町8)

** 三井金属鉱業(株)電子材料研究所 (〒362 上尾市大字原市字七番耕地1333-2)

* Manufacturing Engineering Laboratory, TOSHIBA CORP. (8, Shinsugita Isogoku, Yokohama 235)

** Research Laboratory for Electronic Materials, MITSUMINING & SMELTING CO., LTD. (1333-2, Haraichi, Ageo 362)

はフラッシュランプ、またはアークランプにより励起できることにある。その他、最近 Cr^{3+} ドープのGGG, GSGG等のガーネット型レーザーが脚光を集めている。しかし、いまだフラッシュランプ励起により大出力を得た報告はない。これらの結晶は熱伝導性に劣るのでスラブレザーの研究がある程度完成するまで実用化を待たなければならないだろう。

アレキサンドライトは同じ Cr^{3+} を活性物質とするルビーと同様に純電子遷移によりR線で発振し (680.4および678.5nm), 振動電子遷移により, 700 nmから826nmまで (またはそれより広い波長域で) 発振する。 Cr^{3+} の振動電子遷移による発振は以前から示唆されていた⁴⁾。波長同調性は勿論最大の特徴であるが, その他, 可視光で大出力が得られること, 他の固体レーザーと異なり温度上昇により効率向上が得られること, 出力が直線偏光であること, 発振出力波形がspikyであることが主な特徴である。

本稿では, レーザー発振の物理の簡単な説明, 結晶育成技術, 発振技術の開発と応用展望について解説する。

2. レーザー発振の機構

アレキサンドライトレーザーの遷移モデルは, 上村・菅野・田辺理論⁵⁾ によるエネルギー準位図をもとにして提案された。Fig. 1にそれを示す⁶⁾。R線の遷移に関してはルビーと同様である。波長同調性にかかわる振動電子遷移に於て, 電子準位間の遷移は格子振動的な準位間の遷移と同時に, いわば重なりあっておこる。この遷移の上準位は 4T_2 と 2E の複合準位になっている。 4T_2 の寿命は短く (6.6 μs), 2E の寿命は長い (1.54 ms)。 2E は 4T_2 より800 cm^{-1} 低く, 温度上昇にともない 2E から 4T_2 へ分布が増加する。従って温度上昇によりレーザー遷移の始準位の分布が増加することになり, レーザー利得の上昇をもたらす。 2E はこのモデルではStorage準位となる。終準位は ${}^4A_2 + h\nu_{\text{phonon}}$ で表わされ, phononの緩和により基底準位 4A_2 へ遷移する。波長同調性

Fig.1 Simplified lasing model for alexandrite. Referred to (6).

は, 終準位が振動帯であることから説明できる。同調域が700 nmから826 nm⁷⁾ までしか報告されていないのは, 主にExcited State Absorptionの影響⁸⁾ による。

3. 結晶育成

3.1 アレキサンドライトの物性

「アレキサンドライト」は光源の違いで変色性を有するクリソベリル (BeAl_2O_4) の宝石名称の一つで, 帝政ロシア皇帝アレキサンドル二世にちなんだものであると言われている⁹⁾。

本稿では, BeAl_2O_4 のみの場合はクリソベリルまた Cr^{3+} のみを不純物として含んだものをアレキサンドライトと呼ぶことにする*。

クリソベリルは斜方晶系 (空間群: D_{2h}^{16}) に属しモース硬度8.5¹⁰⁾, また1870 $^{\circ}\text{C}$ 付近で調和溶解する。X線回折で決定されたクリソベリルの構造¹¹⁾ をFig. 2に示す。 Cr^{3+} はAlイオンと置換するが, AlサイトにはAl_I (M_1) とAl_{II} (M_2) の二種類あり双方に Cr^{3+} は置換が可能である。

*前記アライド社特許では, ベリリウム・アルミネートとなっている。

Fig.2 Refined chrysoberyl structure projected on 001 plane. The aluminum ions occupy site of two different symmetries (Al_I : inversion, Al_{II} : mirror). Referred to (11).

そこで育成結晶中で、ドーブした Cr^{3+} イオンがどのような比でそれぞれのサイトに入っているか電子常磁性共鳴吸収で調査されている³⁾。それによると Cr^{3+} の50~80%が Al_{II} (M_2) サイトを占めるとされているが、この比は育成条件により異なるとの報告もある¹²⁾、従って現状では Cr^{3+} の分析値から発光断面積を推定するのは難しい。

3.2 単結晶の育成及び評価

アレキサンドライトの結晶育成研究は人工宝石の製造から出発した。レーザー用途の場合長尺で且つレーザーロッド切り出しに有効な径が要求されるので、融液から種子結晶を用いて引上げるいわゆるチョクラルスキー (CZ) 法が適している。ここでは筆者らの研究を中心にCZ法による結晶育成と育成結晶の不均一性及びその評価 (対策を含む) を報告する。なお、現在まで報告されているアレキサンドライトの諸物性データを Table I に示した。

Table I Summary of physical and mechanical parameter of alexandrite.

Chemical composition	$Cr^{3+}:BeAl_2O_4$
Crystal structure	$D_{2h}^{16}-P_{nma}$
Density	3.7 g/cm ³
Melting point	1870°C
Moh's hardness	8.5
Refractive index	1.74, Ave at 750nm
Nonlinear index	$0.8 \times 10^{-1} m^3/J$
Thermal conductivity	23 W/m K ⁻¹

クリルベリルは、 BeO と Al_2O_3 の1対1化合物である。両者とも遷移金属不純物が少なく、純度が99.99%以上のものを用いている。このうち BeO は国内では特化則*で第一類物質且つ特別管理物質と指定されており、大気中での許容量が $2 \mu g/m^2$ と極めて厳しく規制されている。

特に水分がある場合は、 $BeO(s) + H_2O(g) \rightleftharpoons Be(OH)_2(g)$ に従いガスが生成し低温壁に付着するとの報告があり¹³⁾、十分脱水を行わないと育成炉あるいは焼成炉中での飛散の問題となり得る。そこで筆者らは原料処理に特別の注意を払い、粉体の秤量から原料の焼成までを排ガス処理設備を備えたグローブボックス中で行なっている。

2) CZ法による結晶育成

Table II に筆者らの代表的育成条件をあげた¹⁴⁾。 Cr^{3+} の実効分配係数が1より大きいため、るつば径と育成結晶径を選択しないと、結晶頭部と尾部で Cr^{3+} 濃度が大きく変化する。

また Fig. 3 に $\langle 001 \rangle$ (C軸) で育成した結

Table II Typical growth conditions for alexandrite.

Cr conc.	0.05~0.5at. %
growth direc.	[001]
crucible	Ir, 50~80mm dia.
pulling rate	0.3~5mm/hr.
rotation rate	8~40 r.p.m.

*特定化学物質等障害予防規則。第3条, 50条の2, 別表4の(5)に BeO に関する記述がある。

Fig. 3 Schematic illustration of cross section of [001] grown boule. The shaded area shows grown facets.

晶の横断面の模式図を示した。通常アレキサンドライト結晶は異方性のため丸くならない。

3) コア

結晶の持つ異方性を反映し成長界面で特異面（ファセット）が形成される場合がある。コアはファセット成長の育成方向への軌跡で、結晶内で屈折率の異常な部分が芯として生ずる。

Fig. 3 にアレキサンドライトで筆者が観察したファセットを図示した¹⁵⁾。

以下、 $\langle 001 \rangle^*$ 育成の結果を中心に報告する。 $\langle 001 \rangle$ 育成では、2種類のファセットが見られるがこの内 $(001)^*$ は育成方向が垂直な面のため周辺部にも観察できる時がある。

コア部は、 Cr^{3+} 濃度が異なり又コア周辺に大きな歪みを伴っている為通常コア部を避けて、レーザーロッドが切り出される。この為理想的には「切り出すロッド径の2倍＋ファセット領域の大きさ」の径の結晶を育成すれば良い。しかしアレキサンドライトの場合、育成方向と垂直な面がファセット面の為、育成時の固液界面（結晶と融液の界面、通常平坦でない事が多い）の形状によりファセット領域の大きさがかなり変化する。ところでCZ法では結晶を育成するにつれて融液面が低下し、又育成結晶部長さ・形状により結晶を媒体とする上方への熱輸送量が変化するという事情があるので、固液

界面形状は育成初期と後期では同一でないのが普通である。そこで歩留りよくレーザーロッドを切り出すためには固液界面形状を、育成時のパラメーター例えば（結晶回転数）を制御する事により一定にする必要がある。なおファセット面を含まない方位（例えば $\langle 001 \rangle$ から数度ないし十数度傾ける）で育成するという方法も考えられるが、確認していない。

Fig. 4 A longitudinal section of CZ grown alexandrite under polarizing sodium lamp showing nonperiodic striations(a), change of interface-shape(white portion), facet-off facet boundary. The arrow shows growth direction, [001].

Fig. 5 A longitudinal section P.L.T. photograph of the same sample in Fig. 4. White portion shows high Cr^{3+} concentration. Two types of striation (b): periodic one having $\sim 100 \mu\text{m}$ width, c: preodic one having $\sim 10 \mu\text{m}$ width exist. The arrow shows growth direction. Referred to (18).

* $\langle \rangle$ あるいは $[\]$ は方位、又 $()$ あるいは $\{ \}$ は面をあらわす。

4) ストライエーション

ストライエーションとは結晶育成時の固液界面の形状をそのまま結晶内にとり込んだ一種の筋状の縞の事であるが、アレキサンドライトでは、特徴の異なる3種類の Cr^{3+} 濃度の相対変化によるストライエーションを観察できる。このストライエーションは一種の屈折率変動でありレーザー特性に著しい影響を与える。その観察法にはルミネセンス光を利用するのが便利である。守矢が開発したフォトルミネセンストモグラフィ¹⁶⁾ (PLT) が有用である事が見い出された¹⁷⁾。Fig. 4に結晶の縦断面写真を示した¹⁰⁾。Fig. 4に見られるもの (a) は、周期不定でゆるやかな Cr^{3+} の濃度変動を有する。Fig. 5はFig. 4の一部を拡大したPLT写真で2種類のストライエーションが見られる。幅が $40\sim 60\mu\text{m}$ と周期的で、明瞭なクロム濃度のピークを作るもの (b) と、この間に周期的にゆるやかな濃度変動を持つもの (c) がある。(a) は育成条件の変動、(c) は炉の熱的中心と機械的中心 (結晶の回転軸) との不一致によるものと考えられる。(b) については結晶内で一部にしか存在せず、Irるつぼの底で測温した温度変動の周期と良い一致が見られることからるつぼ内に於ける融液の対流のゆらぎに起因しているものと考えられる。(c) のストライエーションは理論的には結晶回転数に一致するのでそれから換算すると (b) が発生する条件下では一桁を越える成長速度の変動 (負の成長、すなわち remelt も含む) が起きていることになる¹⁸⁾。

現在育成条件の改善により (b), (c) の双方のストライエーションをなくすことができた。

5) インクルージョン (包含物)

アレキサンドライトには、バブル (管状) とるつぼから混入するIrプレートの2種類のインクルージョンが顕微鏡で観察できる (Fig. 6)。

バブルは、育成条件の大きな変動や融液内の対流モードの変化 (インバージョン)¹⁹⁾ が起きた場所で発生しており、育成条件が安定になると発生しない。なお4) で述べた成長速度の変化する部分でも発生しやすい。

Fig. 6 Section of boule containing inclusions. Babbie inclusions (a), Iridium thin plates (b).

Fig. 7 Iridium thin plate (a) before, (b) after pulsed mode laser action.

Irの混入物は、Irるつぼを使う他のレーザー単結晶でも観察されており、育成炉の雰囲気为数パーセントの O_2 を含むものにすることで大幅に減少させることができる。

Irインクルージョンが混入したロッドを発振実験に用いると (融点: 2454°C) が融解し、周辺部のマトリックスを部分的に融かす (Fig. 7)。このためレーザー出力は急激に減少してしまう。以上、アレキサンドライト単結晶の均質性を乱す要因についてふれてきたが、現状で得られる最大結晶サイズは、インクルージョンがなく、(b) や (c) のストライエーションが存在しない場合に限ると、径 30mm ×長さ約 80mm である。

Fig.8 Schematic diagram of alexandrite laser oscillating apparatus.

4. 発振器の開発

固体レーザーの発振技術の研究は、最初に発振したルビーレーザー以来、続けられてきた。実用型レーザーの基本構成は、レーザー結晶、励起光源としてのランプ、励起光集光鏡、これらのハウジング、共振器ミラー、ランプの電源、ランプと結晶の冷却器からなる。以上の部品は全て市販されており、場合によっては組み立て調整し電源を投入するだけで発振確認することもできる。しかし、レーザーホストの性能を最大限に引き出す為には、発振技術の研究が重要である。本章では、発振器の構成、高効率化の検討、波長同調技術について解説する。

なおアレキサンドライトは、フラッシュランプによるパルス動作、アークランプによるCW動作、また他の光源による動作が可能である。ここでは、高出力が期待されるので、筆者らが最も力を入れたパルス動作について記述する。

4.1 発振器の構成

アレキサンドライト用発振装置の構成をFig. 8に示す。結晶温度が発振特性に与える影響を調べるために、この構成では、一般の固体レーザー発振器と異なり、ランプ冷却系と結晶温度制御系は独立している。結晶温度制御用の熱媒体を取り扱いが簡便な水にしたため、その媒体温度範囲は20℃から90℃までである。

レーザーロッドを更に高温に保つ方法は種々

考えられるが、今回は触れない。

ランプへの入力条件をパラメータとした、レーザー出力特性を調べるために、P. F. N. (Pulse Forming Network)の共振充電により充放電させる方式の電源を用いた。この方式では、ランプ点灯パルス波形をかなり自由に制御することができ、又出力電圧を高くすることができる。又外部トリガー、シマ動作と、クローバダイオードによる逆電流防止法を採用した。

4.2 高効率化、大出力化の検討

筆者らが最初にアレキサンドライトのレーザー発振を確認した時、結晶品質が不十分で発振しきい値が高く大入力が必要であった。その時使用した装置は、大容量の電源をもつYAGレーザー装置であった。勿論共振器ミラーは適正な反射特性を持つものに変更した。ある程度良質な結晶が得られるようになった時点で、入力条件を考慮して発振実験を行なった。この時の入出力特性をFig. 9に示す。比較のため同図に、既述のYAG用装置で同じレーザーロッドを発振させた際の入出力特性を示す。いたずらに大入力励起によって大出力を得ようとしても、装置が大形になるばかりであり、既述した様に固体レーザーは、小形の装置で大出力が得られることが最大の特徴であるので、これを損なうことになる。又この様な大入力化は結晶に熱歪みを与えレーザー出力の飽和を早める。高効率化を検討せずに大入力化をはかっても、実用化の検

Fig.9 Comparison of laser performance between (a) power supply #1 and (b) power supply #2. Power supply #1 has 6-LC element P.F.N. with 240 micro F total capacitance. lamp discharge duration is 180 micro second. Power supply #2 has single LC element P.F.N. with 6000 micro F capacitance. lamp discharge duration is 2000 micro second.

討には無意味である。高効率化は、結晶物性、分光学的特性を考慮した発振技術の検討により得られる。結晶温度を変えた時の出力特性、発振中心波長特性をFig.10, Fig.11に示す²⁰⁾ 温度上昇により発振効率が上昇し、発振中心波長が長波長側にシフトしている。これはアレキサンドライトの温度をパラメータとした、波長ゲイン特性の測定値²¹⁾と一致する*。

励起入力条件の検討に重要な吸収スペクトルの測定結果をFig.12に示す²²⁾。この図で、Eは

Fig.10 Temperature dependence of output energy. Input energy is held constant.

*: free running modeではゲインの高い波長域で発振する。

Fig.11 Temperature dependence of output wavelength at free running oscillation.

Fig.12 Absorption spectra of alexandrite in various polarizations: E//a, E//b, E//c.

電界ベクトル, a, b, cは結晶軸を示し、測定はE//a, E//b, E//cで行った。

吸収特性が異方性をもつこと、有効な吸収領域が400nm近傍から600nm近傍に渡って分布していることがわかる。効率向上には、励起光源の発光分布をこの吸収領域内で増大させ、励起光を損失なく一様にレーザーロッドに集光させることが必要である。

励起光源を最適化する立場から見ると検討要素は次の3つになる。

(a) レーザホストの物理的特性と励起光源の整合。

(b) ランプ自体の諸パラメータによる発光効率の向上

(c) ランプ点灯方式による発光効率の向上。

これらの事項はそれぞれ単独に検討できるものではなく、ある条件は相反し、あるいは相乗効果をもたらす。Nd³⁺:YAGでは、多くのこのような研究が行われたが、その成果²³⁾からアレキサンドライトに適用できる次の様な情報が得

られる。

- (a) ランプ内径は細いほどよい。
- (b) 封入ガス圧は高い方がよい。
- (c) ランプ点灯時間は $100\mu\text{s}$ 程度がよい。
- (d) Ce含有の石英パイプをランプ材とする。
- (e) シマモードにより点灯を行なう。
- (f) 高放電電流によりランプを点灯する。

勿論、全ての条件が実用化に適しているわけではなく、大入力時のランプ耐久性は考慮しなければならない。さて、吸収特性に異方性があることから励起光集光鏡内のロッドとランプの配置、結晶軸の向きの設定は重要な項目となる。

例えば、固体レーザーの集光鏡は楕円筒型のもがよく用いられており、この楕円の両焦点位置にロッドとランプをそれぞれ配置する。Fig.13にb軸の向きを変えて配置し、発振させた場合の出力特性を示す。楕円筒内ではb軸がランプ方向にある時が良いことがわかる。これはFig.12の吸収スペクトルの $E//a$, $E//c$ の強度が強いことから明らかである。しかし楕円筒型が最適な形状であるか否かは疑問で、実際、円筒型集光鏡で発振させた場合でも入出力特性に顕著な差異は認められなかった。この集光鏡の形状は、良質な(横モードのきれいな)出力光を得るためには重要な要素であり、最適な形状が存在する筈であるが、現在なお検討中であ

Fig.13 Laser output dependence on orientation of crystal axis.

る。集光鏡面の材質は、ランプ発光の励起に寄与する波長域に於いて十分な反射率をもつものでなければならない。金属では銀が最も適当で、アルミ、金がそれに続く。しかし銀、アルミの鏡面は経時的に急速に劣化し、一方金では出力特性により評価した集光効率が銀の2分の1程度である。銀を反射鏡面として用い、何らかの劣化防止策²⁴⁾を講じることが最良の手段であろう。蛍光寿命はレーザー発振を検討する際の重要な要素であり、又発振効率向上にも重要である。鉄族イオン Cr^{3+} の電子エネルギー準位構造をきめる大きな摂動が結晶場であることと、 Cr^{3+} のInversion-siteとMirror-siteの準位が接近していることなど、この Cr^{3+} の場合はYAGの発光中心である希土類 Nd^{3+} のエネルギー準位構造ほど単純でない。従ってアレキサンドライトの場合は、レーザー遷移以外で励起エネルギーが失われる確率が大きく、蛍光寿命より長過ぎる励起時間は、発振効率低下をもたらす。蛍光寿命は、温度上昇により短くなり、 20°C で $260\mu\text{s}$ 、 80°C で $160\mu\text{s}$ 、 250°C で $64\mu\text{s}$ 程度である。この程度の時間は先に記したランプ点灯とよく一致する。即ち、ランプへの入力は、蛍光寿命程度の時間幅にする為数 $100\mu\text{F}$ の小さい容量のコンデンサーをもつP. F. N.を用い、高放電電流を維持する為矩形波に整形した波形で行うべきである。しかし、高効率化を得ようとして、結晶温度を上げた場合、最適な時間幅は、短くなり、大入力励起には高電圧、高放電電流が必要となる。結局ランプ寿命を極端に短くしてしまうであろう。実用化の検討では、適当な結晶温度を決めなければならない。

以上を検討し最近の結晶により得た入出力特性の一例をFig.14に示す。繰り返し1Hzでは微分効率1.3%で出力1.4Jが得られた。10Hzの時は微分効率1.8%で、平均出力17.5Wが得られた。10Hz時では1Hz時よりも単発出力が高くなっていることがわかる。これは高繰り返しにより結晶温度が上昇し効率向上が得られたものと考えられる。しかし、発振条件と結晶温度の相関については、今後の興味深い研究課題で

Fig. 14 Performance of alexandrite laser operating at (a) 1 Hz and (b) 10 Hz. Output mirror transmission is 20%. Rod size is 5mm OD×67mm L. Water bath temperature is 80°C. Lamp current is rectangular with duration of 180 micro second.

ある。

4.3 波長同調

波長同調は、特定波長以外に損失をもつ波長

(a) Linewidth 93.9 cm⁻¹

Fig. 15 Wavelength tuning curves using (a) birefringent filter and (b) prism.

選択素子を共振器内に挿入するか、その波長だけに高い反射率をもつ共振器を使用して行なう。誘導放出断面積が 10^{-20} cm²程度と大きくないので、波長選択素子は挿入損失の小さい複屈折フィルターかプリズムが適当である。

プリズムと複屈折フィルターにより同調実験を行なった。結果をFig. 15に示す²⁵⁾。使用したARコートのないプリズムの挿入損失のため、プリズムによる同調域は715nmから772nmであった。複屈折フィルターによる同調域は、F. S. R. が50nmのフィルターを用いた為、730nmから780nmであった。同調域を広げるためには、F. S. R. の大きな複屈折フィルター（ただし製作困難）を用いるか、設計中心波長を変えた複数の複屈折フィルターを用いればよい。また、結晶温度を低くすれば短波長側、高くすれば長波長側に広げることができる。

この同調特性は、レーザーゲイン特性をそのまま示すものではなく、共振器の波長特性を反映している。Fig. 16に複屈折フィルターを用い

(b) Linewidth 2.0 cm⁻¹

Fig. 16 Emission spectra with and without birefringent filter. Resolution of spectrometer is 0.5cm. Center of oscillating wavelength is 752nm.

Fig.17 Tuned performance of alexandrite operating at 10 Hz with birefringent filter. As a comparison, free running performance is also shown.

て同調させた場合の発振スペクトルを free running 時と合わせて示す。複屈折フィルターにより free running 時の $\frac{1}{2}$ のスペクトル幅が得られた。この時の入出力特性を Fig.17 に示す。同調時の出力は、free running 時の 40% から 80% であった。

5. 期待される性能と応用展望

Allied Corp. のカタログ仕様によると、Qスイッチモードで 200mJ の出力が 10Hz の繰り返しで得られ、この時の発振時間幅は 110ns から 175ns、同調域は 730nm から 780nm である。

最近のニュース* によると、Los Alamos National Laboratory の同位体分離研究の一環で、平均出力 98W が繰り返し 240Hz で得られた。これは 2 台の、それぞれ交互に 120Hz で動作するヘッドにより達成された。発振は Q スwitchモードで、730nm から 780nm までスペクトル幅 0.1cm^{-1} で連続的に同調することが出来る。

2 倍高調波による紫外域の波長可変レーザーとしては、Barnes らの報告²⁶⁾ がある。非線形結晶としては RDP を使用し、変換効率 は 8.3% であった。共振器の改良により 20% の変換効率が得られるとしている。又、Passive Mode

Locking により 8 ps の超短パルス発生²⁷⁾ もある。アレキサンドライトレーザーを、金属の穴あけに使用した場合、ノーマル発振時の Spiky な出力波形と短い波長により YAG よりすぐれているという報告²⁸⁾ がある。

又、半導体のレーザープロセスに関しては、アレキサンドライトレーザーと、2 倍波に変換した Q スwitchモードの YAG レーザーと、CW-Ar⁺ レーザーを比較した報告がある²⁹⁾。アレキサンドライトレーザーは、最も経済的に、As や P を高濃度注入した Si 層をアニールすることができる。YAG のように 2 倍波に変換しなくとも基本波で比較的短波長が得られ、高出力が得られるためである。

第 12 回レーザーレーダー国際会議では、差分吸収レーザーレーダー (DIAL) による大気圧の測定に有望であるという報告がある³⁰⁾。

しかし、1 章で記した、新しいレーザー応用に関する具体的な報告はまだない。実用的なアレキサンドライトレーザーの開発により、どのような応用が展開するかは、筆者らを含めた研究者達の努力にかかっている。

6. おわりに

新しいタイプの固体レーザーの開発手順と現状について簡単に解説してきた。筆者らは、この研究過程で、育成結晶の質の追求と発振実験データとの関連に注目してきた。今後、新しい固体レーザーの開発には結晶評価技術の研究がますます重要になる。

現状では、筆者らの研究は性能の限界を見極めるまで進んでいない。この見極めには、このレーザーの適用対象がはっきりしていなければならない。この応用について各方面の専門家の方々の助言がいただけたら幸いである。

今回は紙面の都合上割愛したが、蛍光スペクトルを調べた時、振動電子遷移と R 線の遷移のそれぞれのスペクトルの間、695.6nm に新しいと思われるスペクトルを見つけた²²⁾。その後 Schepler は、これが Cr³⁺ の Inversion site の蛍光 (R 線) であることを主張した³¹⁾。このス

*: POST DEADLINE REPORT, LASER FOCUS, Feb. 1985.

ペクトルからも様々な情報が得られると思われる興味深い。

終りに、この研究開始の時点から御指導をいただいた分子科学研究所、武居教授に謝意を表わしたい。なお本研究の一部は昭和59年度科学技術振興調整員による「大出力波長可変レーザー及びレーザープロセッシング技術に関する研究」の一環として行ったものである。

参 考 文 献

- 1) L. F. Johnson, R. E. Dietz and H. J. Guggenheim : Phys. Rev. Lett. **11** (1963) 318.
- 2) Robert C. Morris and Carl F. Cline : USP-3, 997,853.
- 3) J. C. Walling, O. G. Peterson, H. P. Jenssen, R. C. Morris and E. W. O'dell : IEEE J. Quantum Electron. **QE-16** (1980) 1302.
- 4) D. E. Nelson and M. D. Sturge : Phys. Rev. **137** (1965) A1117.
- 5) 例えば上村, 菅野, 田辺 : 配位子場理論とその応用 (裳華房, 昭和57年第7版) .
- 6) S. Guch, Jr. and C. E. Jones : Opt. Lett. **7** (1982) 608.
- 7) J. Hecht : Laser and Applications, (Sept. 1984) 77.
- 8) M. L. Shand and J. C. Walling : IEEE J. Quantum Electron. **QE-18** (1982) 1152.
- 9) 例えば「原色宝石小事典」講談社.
- 10) C. F. Cline, R. C. Moss, M. Dutoit and P. J. Harget : J. Mat. Sci. **14** (1979) 941.
- 11) E. F. Farrell, J. H. Fang, and R. E. Newnham : Amer. Mineral. **48** (1963).
- 12) 砂川 : 宝石学会誌 **6** (1979) 12.
- 13) J. B. Conway : J. Nucl. Mat. **14** (1964) 425.
- 14) 山岸, 清水, 森, 武居 : 第27回人工鉱物討論会講演要旨集 (昭和57年) 71.
- 15) 清水, 山岸, 齊藤, 佐藤, 石川, 武居 : 第30回応用物理学関係連合講演会要旨集p647.
- 16) 守矢 : 光学, **14** (1985) 97.
- 17) 山岸, 清水, 守矢 : 第32回応用物理学関係連合講演会要旨集, 685.
- 18) K. Moriya, K. Yamagishi and H. Shimizu : J. Crystal Growth.
- 19) 例えば, 応用物理学会結晶工学分科会第84研究会「引き上げ法における対流の問題」: 応用物理学会発行.
- 20) 今井, 佐藤, 吉田, 石川, 山岸, 清水, 武居 : 第44回応用物理学会学術講演会 (昭和52年) 25pR6.
- 21) M. L. Shand and H. P. Jenssen : IEEE J. Quantum Electron. **QE-19** (1983) 480.
- 22) 今井, 石川, 清水, 山岸, 齊藤, 武居 : レーザー学会学術講演会第4回年次大会 (昭和60年) 30a II 7.
- 23) L. Nobel, C. Kretschmer, R. Maynard, H. Flentz and L. Reed : Optical Pumps for Lasers, Final Report (1973), ECOM-0239 F.
- 24) 例えば, 今井, 石川 : 実開, 昭60, 39267
- 25) 今井, 石川, 清水, 山岸, 齊藤, 武居 : 第32回応用物理学関係連合講演会 (昭和60年) 29p-zc-1.
- 26) N. P. Barnes, T. M. Johnson and D. J. Gettemy : IEEE J. Quantum Electron. **QE-19** (1983) 1437.
- 27) V. N. Lisitsy, V. N. Matrosov, V. P. Orekhova, E. V. Pestryakov, B. K. Sevastyanov, V. I. Trunov, V. N. Zenin and Yu L. Pemigallo : Sov. J. Quantum Electron. **12** (1982) 368.
- 28) J. T. Puglis and G. A. Gomba : Lasers and Applications (May 1983) 68.
- 29) T. J. Magee and T. K. McNab : Solid state technology / 日本版 (Sept. 1982) 40.
- 30) T. Kobayashi : The Review of Laser Engineering **11** (1984) 663.
- 31) K. L. Schepler : J. Appl. Phys. **56** (1984) 1314.