

紫外固体レーザー用フッ化物単結晶

島村 清史, Sonia L. Baldochi, Zhenlin Liu*, 猿倉 信彦*, 福田 承生

東北大学 金属材料研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

*岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 (〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38)

Fluoride Single Crystals for UV Solid-State Laser Applications

Kiyoshi SHIMAMURA, Sonia L. BALDOCHI, Zhenlin LIU,*

Nobuhiko SARUKURA,* and Tsuguo FUKUDA

Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

**Institute for Molecular Science, Okazaki National Research Institute*

38 Nishigonaka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi 444-8585

(Received May 6, 1999)

A new, highly reproducible crystal growth technique for high quality fluorides has been developed. A series of Ce-doped fluorides free from cracks and inclusions, including LiCaAlF₆, LiSrAlF₆, LiYF₄, and LiLuF₄, have been grown for UV laser applications. The effective distribution coefficient of Ce in each crystal has been determined. 60-mJ pulses at 289-nm were generated using Ce:LiCaAlF₆ single crystals. Un-doped LiCaAlF₆ single crystal exhibited extended transmission to 112 nm.

Key Words: Fluoride, Crystal growth, Colquiriite, Scheelite, UV laser

1. はじめに

全固体紫外波長可変レーザーは高寿命、高信頼性、高い安全性などの優れた特徴をもつことから、医用、環境計測等、様々な応用分野で開発が期待されている。フッ化物単結晶材料は高い透過性を有するため、特に紫外領域でのレーザーホスト材料として期待される。ところが、フッ化物、特にCe³⁺を添加した高品質フッ化物単結晶の作製、及び光散乱体のない単結晶作製は困難であると認識されてきている。それは一つには、フッ化物の単結晶成長にあたり原料を危険なガスである乾燥HF中で純化・精製しなければならない、或いはHF中で結晶成長を行わねばならない、といった認識があるからである¹⁾。そのため、フッ化物単結晶はその優れた潜在的特性にもかかわらず、これまで比較的敬遠され続け、結果、フッ化物の結晶成長に関する詳細な報告はほとんどなく、結晶材料の入手自体も非常に困難な状態が続いている。一部入手可能などころがあっても、サイズや品質が十分でない、或いはロットにより特性が大きく異なる、などの問題が発生し続けている。すなわち、紫外波長可変固体レーザーの広い利得領域はチタンサファイアレーザーと同様に超短パルス光の増幅・発生への応用が期待されているにもかかわらず、高品位結晶の安定な供給が難しいため、偶然にできた数少ない小さな結晶を頼りに全ての実験を行わねばならないという状況の下、

基礎レーザー特性の評価以外はあまり進んでいないというのが現状ではないだろうか。

そこで我々は、安全、かつ安価な手法により高品質フッ化物単結晶成長の実現を図り、今後益々重要となる紫外全固体レーザー研究を、優れたフッ化物結晶の提供により加速的に進展させることができれば、と考えた。こうした単結晶成長法が実現されれば、紫外域のみでなく、フッ化物の特徴を利用できる赤外域での全固体化高効率レーザーの実現、或いはフッ化物単結晶を必要とするあらゆる分野にも貢献できる。検討の結果、HFガスを一切使用せず、かつ、市販品の高純度粉末原料を用い、引き上げ法により、再現性良く、高品質フッ化物単結晶成長を実現する方法を見だし、高品質フッ化物単結晶成長に成功した。

ここでは、我々が見いだしたフッ化物の結晶成長法による、紫外固体レーザー材料として期待されるColquiriite型フッ化物結晶LiCaAlF₆(LiCAF)、LiSrAlF₆(LiSAF)、及びScheelite型フッ化物結晶LiYF₄(YLF)、LiLuF₄(LLF)の結晶成長、並びに成長結晶から得られた優れた光学・レーザー特性について報告する。

2. Colquiriite型結晶

Colquiriite型として知られるLiCAF, LiSAFは、六方晶系に属する光学的一軸性結晶である。1988年にPayneらにより

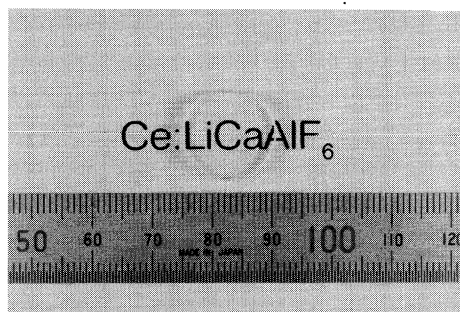
Cr³⁺ドープ結晶が開発され、赤外波長可変レーザー結晶として研究された^{2,3)}。その後1993年にDubinskiiらによりCe³⁺ドープ結晶が開発され、紫外レーザー発振に成功した^{4,5)}。これらCe:LiCAF, Ce:LiSAFは、Nd:YAGレーザーの第4高調波(266nm)で励起可能である最初のCeドープ紫外レーザー媒質である。しかしながら上記に示したように、高品位結晶の安定な供給がなく、紫外レーザー特性は十分な検討がなされていない。特に、Cr³⁺ドープではLiSAFが一部で量産されたが、Ce³⁺ドープ結晶はCr³⁺ドープよりも遥かに結晶成長が困難とされ、バルクサイズの結晶が得られたという報告はこれまでにほとんどない。また、かつてCr³⁺ドープで量産されたLiSAFに比べ、LiCAFはホスト結晶としての品質が悪く、得られている特性もLiSAFを下回るものであった。そこで我々は、結晶成長条件の解明、最適化を試み、クラック、インクルージョン等のない1インチサイズCe:LiCAF, Ce:LiSAFの結晶成長に成功し、従来にない大きな紫外レーザー出力の発生を得た。ここでは、このような潜在的に優れた特性を有すると期待されるCe:LiCAF, Ce:LiSAFの1インチサイズ単結晶成長、並びに得られた結晶を用いての結晶性評価、光学特性評価について報告する。

2.1 単結晶成長

単結晶作製は雰囲気制御型Czochralski装置、及び白金坩堝を用いて行った。引き上げ速度、結晶回転数はそれぞれ1mm/h, 15rpmに固定し、種結晶にはa軸に配向したCr:LiCAF, Cr:LiSAFを用い、a軸の方位にて引き上げを行った。原料には高純度(99.99%以上)のLiF, CaF₂, SrF₂, AlF₃各フッ化物粉末を用いた。添加物には同様の高純度CeF₃, NaF各フッ化物粉末を用い、融液中での濃度をそれぞれ1mol.%とした。ここでNaは電荷の中立を保つためCeと同じ比率で添加し



(a)



(b)

Fig.1 As-grown Ce-doped LiCaAlF₆ single crystal grown under Ar atmosphere (a) and as-grown wafer cut perpendicular to the growth axis (b).

た⁶⁾。相の同定には粉末X線回折法(XRD), 組成分析にはEPMA, 赤外域での透過スペクトル測定にはFT-IRを用いた。

まず高純度Ar(6N)雰囲気下での結晶成長を試みた。また、ガスの置換に先立ち、10⁻²torrに真空引きを行った。融液組成は化学量論組成とした。Fig.1 (a)に作製したCe:LiCAF結晶を示す。結晶の表面が多量の白濁物質で覆われていた。Ce:LiCAF結晶と同様、Ce:LiSAFにおいても成長結晶は多量の白濁物質で覆われていた。Fig.1 (b)に成長結晶に対し垂直に切り出し研磨したウェハーを示す。結晶表面を覆っている白濁物質はごく表面近傍にのみ存在し、内部は透明な単結晶であることがわかった。次に高品質化のため、これら白濁物質について調べてみた。Fig.2に白濁物質のSEM像を示す。成長結晶の表面に存在する白濁物質と、表面に近い単結晶の中に存在する球状物質の2種類が観察された。表面に存在する物質、および球状物質の双方をEPMA, XRDにより調べた結果、どちらもAl₄LiO₆F, CaF₂, AlF₃とLi₃AlF₆からなる物質であるとわかった。また、結晶成長中に融液からの多量の蒸発が観察され、チャンバーの内壁などに白濁物質が付着していた。それらも調べた結果、AlF₃とLi₃AlF₆が混合した物質であることが分かった。これらの結果より、白濁物質の発生原因として以下の二つが考えられる。一つはAlF₃とLi₃AlF₆の蒸気圧が高く⁷⁾、結晶成長中に融液から蒸発し、結晶表面に付着する。融液成分の一部が蒸発するため、融液組成が変化し、過剰となったCaF₂も白濁物質の一部として取り込まれる。他方、Al₄LiO₆Fは、炉内、原料中に存在する微量の水分が粉末原料と反応したものと考えられる。

上記白濁物質発生を抑制するため、以下のような成長条件の最適化を行った。蒸発の抑制のための緩やかな温度勾配の達成、並びに水分・酸素の発生源となる物質を一切炉内から排除する目的で、加熱源を高純度グラファイトを用いる抵抗加熱型とした。水分除去の効率化を図るためには、ロータリーポンプとディフュージョンポンプの2種類のポンプを使用し、10⁻⁵torr台まで真空度が達成できるようにした。更に、結晶成長雰囲気としては、高純度Arのかわ

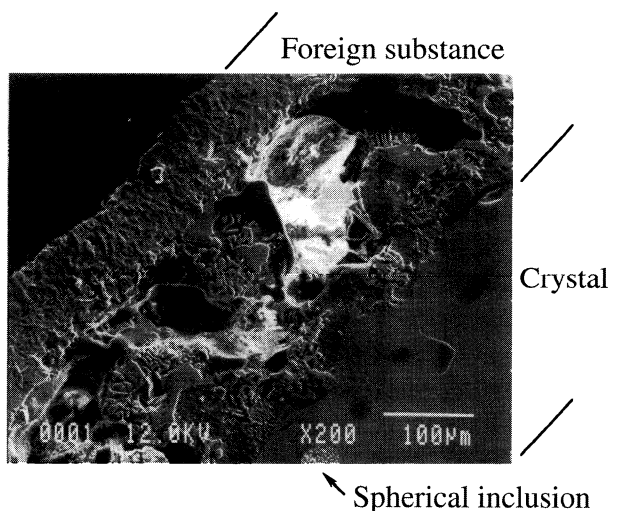


Fig.2 A SEM image of a cross-section of the as-grown crystal with foreign substances on the crystal surface.

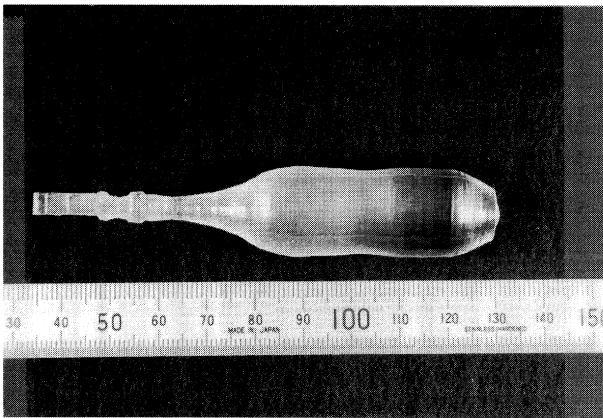


Fig.3 Crack and inclusion free as-grown LiCaAlF_6 single crystal doped with Ce and Na.

りに高純度 CF_4 ガス(6N)を用いることとした。融液組成には、蒸発成分を考慮する意味で、 AlF_3 、 LiF をそれぞれ化学量論組成に対し1mol.%-richの条件とした。以上の条件で作製した結晶をFig.3に示す。白濁物質の付着、クラック、インクルージョン等のない直径約18mm、長さ約80mmのCe,Na:LiCAF単結晶の作製に成功した。同様の条件で、Ce,Na:LiSAF単結晶を作製した結果、Fig.4に示す単結晶が得られた。

次に直径1インチサイズの結晶成長を試みた。1インチ

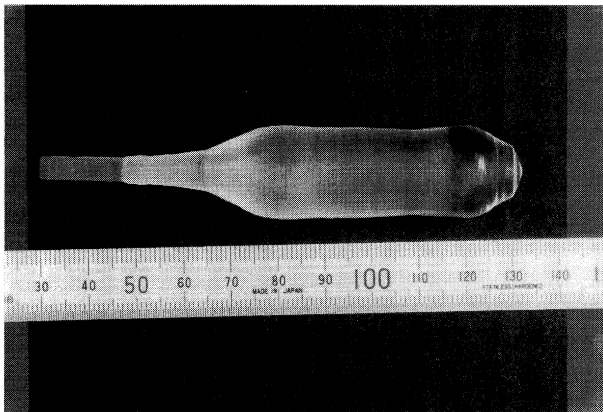


Fig.4 Crack and inclusion free as-grown LiSrAlF_6 single crystal doped with Ce and Na.

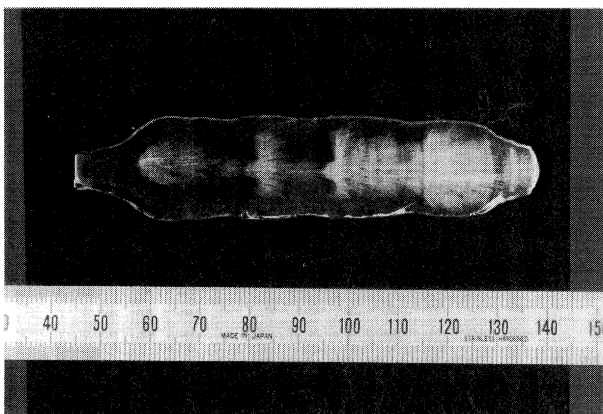


Fig.5 Ce,Na:LiCaAlF₆ wafer cut parallel to the growth axis of the crystal with inclusions.

サイズの単結晶化にあたり、次の二つの点が問題となった。一つはインクルージョンの発生である。Fig.5にインクルージョンの発生した結晶の成長軸方向に平行に切断、研磨したウェハーを示す。引き上げ速度、結晶回転数などの成長パラメーターを一定にした条件において直径18mmの時と比較すると、インクルージョンの発生が容易になる傾向が見られた。特に肩部での結晶径の増加が緩やかでない場合、或いは直胴部において結晶径が一定に保たれない場合、容易にインクルージョンが発生している様子がわかる。従って、インクルージョンの発生の抑制には、急激な直径変動をできるだけ抑制する必要があるとわかった。二つ目の問題は、結晶化率が増加し70%程度になると、融液組成の変化に起因する不純物相が発生してくることである。Fig.6に結晶底部に不純物相が発生した結晶写真を示すが、不純物相が発生すると、冷却時に結晶全体に底部よりクラックが発生してくることがわかる。そこでこのような不純物相の発生、これに伴うクラックの発生の抑制のためには融液組成の最適化が必要であるが、ここでは結晶化率が60%程度に達した時点で結晶成長を終了することでこの問題を回避することとした。Fig.7に作製した1インチサイズCe,Na:LiCAF単結晶を示す。結晶径の変動を抑え、適当な結晶化率で結晶成長を終了することで、クラック

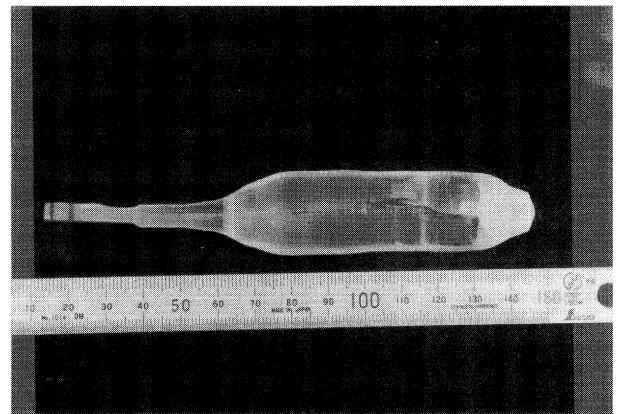


Fig.6 As-grown Ce,Na:LiCaAlF₆ crystal with impurity phase at the bottom of the crystal, and large crack parallel to the growth axis. Solidification fraction is 70%.

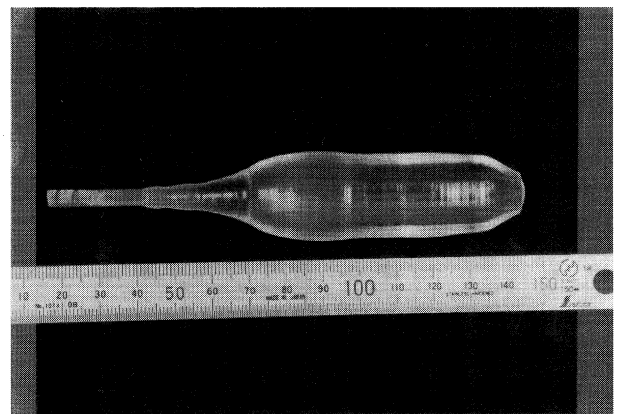


Fig.7 1-inch size as-grown Ce,Na:LiCaAlF₆ single crystal free from cracks and inclusions.

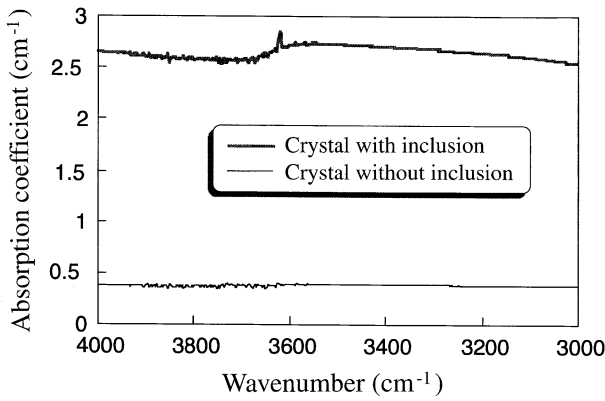


Fig.8 Absorption spectra of Ce,Na:LiCaAlF₆ single crystal in IR wavelength region.

ク、インクルージョン等のない、透明単結晶が得られた。なお、可視光レーザーなどを成長結晶に照射してみた結果、スキャタリングセンターなどの存在は一切観察されなかった。Ce,Na:LiCAF, Ce,Na:LiSAFにおけるCeの実効偏析係数はそれぞれ0.021, 0.013と求まり、CeはLiCAFの方により入りやすい傾向が見られた。

2.2 光学特性評価

フッ化物単結晶内におけるOH-基の存在は高品質化を妨げるのみでなく、レーザー特性の劣化をももたらす^{8,9)}。そこで作製結晶に対し赤外スペクトルを測定した。結晶内にOH-基が存在する場合、3620cm⁻¹近辺に吸収ピークが観察されるためである。Fig.8にFig.5の結晶に対し赤外スペクトルを測定した結果を示す。インクルージョン部分においては3620cm⁻¹近辺に明瞭な吸収ピークが観察され、OH-基に起因する物質が混入していることがわかるが、インクルージョンのない部分においては特別な吸収ピークが観察されず、異物質などが存在しないことがわかる。インクルージョンを含まない他の結晶についても同様に吸収ピークが観察されなかったことから、今回作製した結晶はOH-基に起因する異物質をほとんど含まない高品質結晶であると分かった。

Ce,Na:LiCAFとCe,Na:LiSAFに対し、紫外から可視領域における吸収スペクトルを測定した結果、両結晶ともNd:YAGレーザーの第4高調波(4 ω , 266nm)で直接励起可能であることを示すピークが観察された。そこでレーザー発

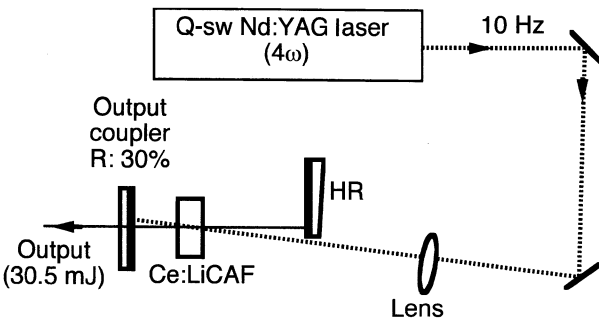


Fig.9 Experimental setup of the Ce,Na:LiCaAlF₆ laser oscillator pumped by the fourth harmonic of a Q-switched Nd:YAG laser.

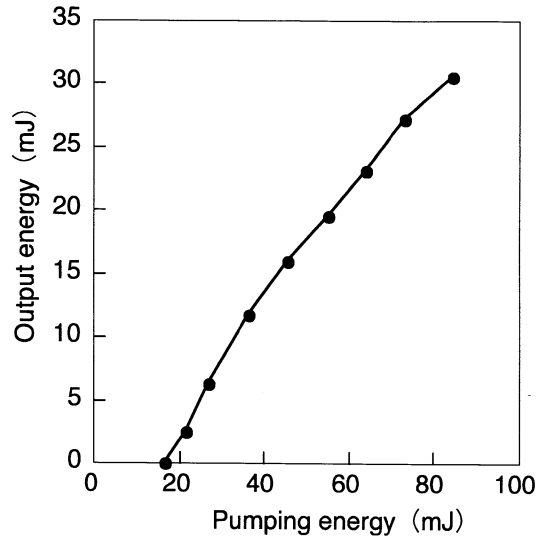


Fig.10 Laser output energy as a function of absorbed pump energy in a Ce,Na:LiCaAlF₆ sample.

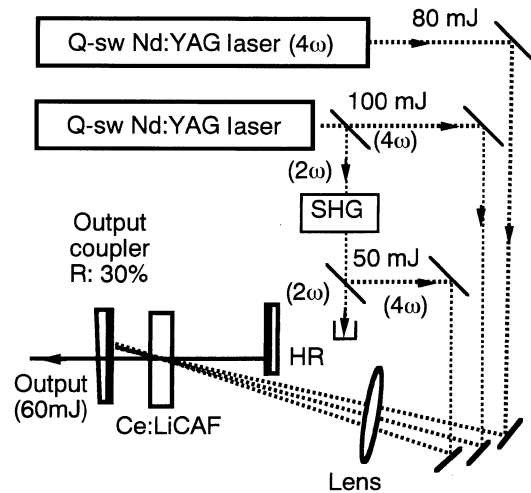


Fig.11 Experimental setup of a high-energy Ce,Na:LiCaAlF₆ laser.

振実験を試みた。Fig.9に共振器の模式図を示す。レーザー共振器は、290nmに対して30%の反射率と266nmに対して75%の透過率を持つ出力ミラーと高反射率平板ミラーを4cmの間隔で置くことで構成した。長さ10mm、共振器の光学軸に対し垂直な両端面がコーティングされていないCe,Na:LiCAF結晶を共振器の中に置いた。励起源としては繰り返し周波数10HzのQスイッチNd:YAGレーザーの4 ω とした。Fig.10に発振波長289nmにおけるレーザーの入出力特性を示す。スロープ効率39%, 最高出力30.5mJが得られ、これは著者の知りうる範囲では世界最高出力となる^{10,11)}。次により大出力を得るため、入力エネルギーの大出力化が可能となる配置を考えた。Fig.11に共振器構造の模式図を示す。2種類のQスイッチNd:YAGレーザーを用い、総入力エネルギーが230mJとなるような設計とした。このような条件下、最大出力で60mJのパルスエネルギーを、今回作製したCe,Na:LiCAF単結晶から得ることに成功した。今後はより大出力化、紫外域での超短パルスレーザーの実現を検討していきたい。

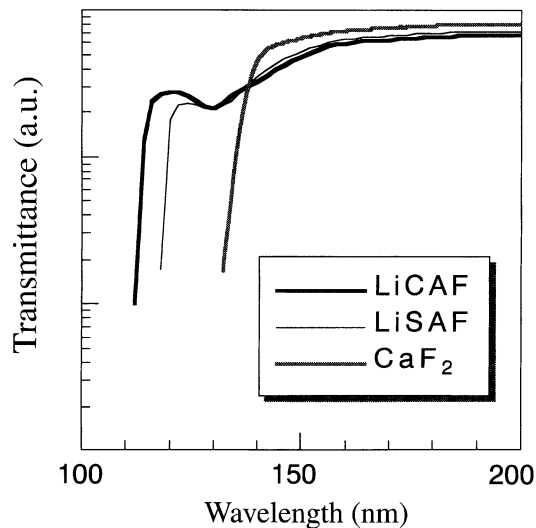


Fig.12 Absorption spectra of LiCaAlF₆ and LiSrAlF₆ single crystals in UV wavelength region, compared with that of CaF₂ single crystal.

Colquiriite型LiCAF, LiSAF単結晶においては, 前述したようにCrドープ結晶に関する報告は多いがCe添加結晶, 並びに無添加結晶の報告はほとんどない. そのため, 無添加結晶における光学的基礎物性である吸収端の報告もない. 今回, Ceドープ結晶と同じ条件にて無添加LiCAF, LiSAF結晶が得られたので, 無添加LiCAF, LiSAFに関して真空紫外域での吸収スペクトルを測定することで吸収端の測定を試みた. Fig.12に真空紫外域での吸収スペクトル測定結果を示す. LiCAF, LiSAFは従来紫外域での窓材として期待されるCaF₂よりも短い吸収端を示した. 特にLiCAFが最も短い吸収端, 112nmを示した. このことから, Colquiriite型結晶, 特にLiCAFは新しい窓材としても大きな期待が持てることがわかった.

3. Scheelite型結晶

LiYF₄ (YLF)に代表されるScheelite型結晶は, 正方晶系に属するレーザー用結晶として古くから検討されている¹²⁾. 紫外レーザー用材料としての検討は, 1980年頃にMoultonらにより報告されたエキシマレーザー励起のCe:YLFが最初である. 近年, Ce:YLFに比べソラリゼーションが軽減されたCe:LiLuF₄ (Ce:LLF)がDubinskiiらにより開発された¹³⁾. Scheelite型フッ化物単結晶はColquiriite型結晶と同様, 紫外波長可変固体レーザーとして期待されるが, 特にLLFなど, HFガスなどの危険なガスを使用しない条件下での結晶成長についてはほとんど報告されておらず, また現在においても結晶材料自体の入手が困難な状況となっている. そこで, Colquiriite型結晶で得られた条件を踏まえ, YLF, LLFのバルク単結晶成長を試みたので報告する.

3.1 単結晶成長

単結晶作製には抵抗加熱型Cz炉を用い, 高純度Ar (6N), 及びCF₄ (6N)の二種を雰囲気ガスとして比較検討した. 白金製の坩堝を用い, 出発原料には高純度(99.99%以上)の

LiF, YF₃, LuF₃, CeF₃各フッ化物粉末を使用した. 引き上げ速度, 結晶回転数はそれぞれ1mm/h, 15rpmに固定し, a軸に配向した種結晶を用い, a軸方向での結晶成長を行った. 相同定はXRD, OH-基の存在の有無はFT-IRにより調べた.

YLFは調和熔融組成をもたないため, LiF-richの組成で出発原料を準備する必要がある¹⁴⁾. そこで, モル比でYF₃:LiF = 0.49:0.51となるように原料を秤量した. 結晶成長に先立ち, 炉内を10⁻²torr程度の真空にし, その後高純度Arガス雰囲気下で原料を融解したところ, 融液表面に多量の異物質が発生した. このような条件で結晶成長を行ったところ, 結晶全域に渡り白濁し, 透明な部分の全く見られない結晶が得られた. そこでXRDにより, 構成物質の相同定を行った結果, 主にYLF相からなっているが, かなりYOF (CeOF)相が混入していることがわかった. また, 融液表面に浮遊していた物質も調べた結果, 同様の物質で構成されていることがわかった.

異物質であるREOF (RE = Y, Ce)相の生成原因として, 原料であるREF₃が炉内, あるいは原料中に含まれる微量の水分と反応したことが考えられる¹⁵⁾.



希土類フッ化物は水分と反応し, 容易に酸化フッ化物を形成する. そこで, 雰囲気中にCF₄ガスを用いることで, 以下の反応によりREOFの生成を防ぐことを試みた.



また, 原料融解前により高い真空度が達成できるようにし, 炉内, 原料内に存在する水分除去の効率化を図った. LiFの蒸発が見られたが, 融液組成がYF₃-rich側に変動すると結晶作製が困難となるので, LiFを少し多くした組成YF₃:LiF = 0.48:0.52で原料を調整した. このような条件下で, 結晶作製を試みた結果をFig.13に示す. クラック, インクルージョン等のない直径18mm, 長さ70mmの高品質透明単結晶が得られた. 不純物相や異物質の発生が見られず, 高品質結晶作製においてCF₄ガスの適用が有効であることがわかった. 同様の条件にて作製したCe:LLF結晶をFig.14に示す. CeのYLF, LLFそれぞれの単結晶内における実効偏析係数を調べたところ, 0.116, 0.054とそれぞれ求めた.

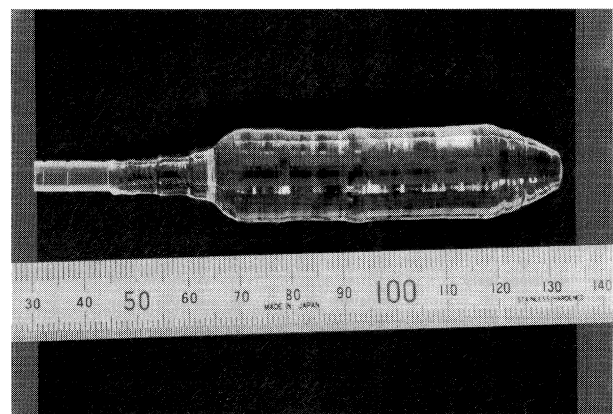


Fig.13 Crack and inclusion free as-grown LiYF₄ single crystal doped with Ce.

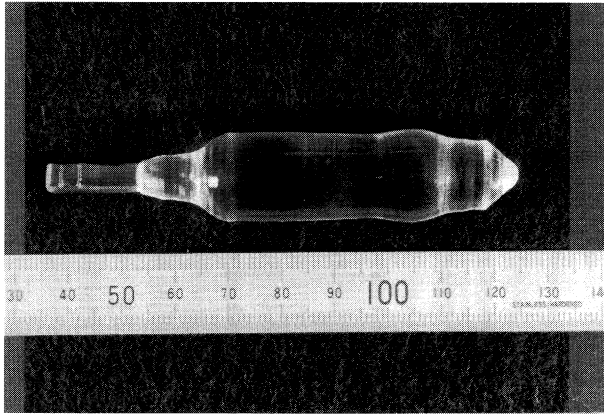


Fig.14 Crack and inclusion free as-grown LiLuF₄ single crystal doped with Ce.

実効偏析係数としては小さな値であるが、Colquiriite型結晶と比較するとほぼ1ケタ大きい値となっていた。

3.2 光学特性評価

作製結晶についてFT-IRによりレーザー特性を低下させる原因となるOH⁻基の存在を調べた結果をFig.15に示す。作製した結晶においては、3500から3600cm⁻¹の範囲で吸収が見られなかった。これに対し、市販品であるLitton Airtron社製のNd:YLFでは4000cm⁻¹近辺を中心に幅広く、かつ強い吸収が見られた。これは金属とOH⁻基の化合物に起因するものと考えられる。この結果より、今回我々が作製したScheelite型フッ化物結晶は高い品質を持つことがわかった。

紫外から可視領域における吸収スペクトルをCe:YLF, Ce:LLFに対し測定した。その結果、Nd:YAGレーザーの4 ω での直接励起は困難であるが、Nd:YAGレーザーの5 ω での直接励起が可能であることがわかった。全固体紫外レーザーとしての特性評価は現在進行中である。

4. まとめ

再現性良く高品質フッ化物単結晶を作製する手法を見だし、Ce,Na:LiCAF, Ce,Na:LiSAFの1インチサイズ単結晶、およびCe:YLF, Ce:LLFの単結晶成長に成功した。各結晶におけるCeの実効偏析係数はかなり小さく、Ceは取り込まれにくい元素であることがわかった。作製したCe,Na:LiCAFは289nmにおいて最大60mJという高出力のレーザーを発振した。またLiCAFは112nmという短波長において吸収端

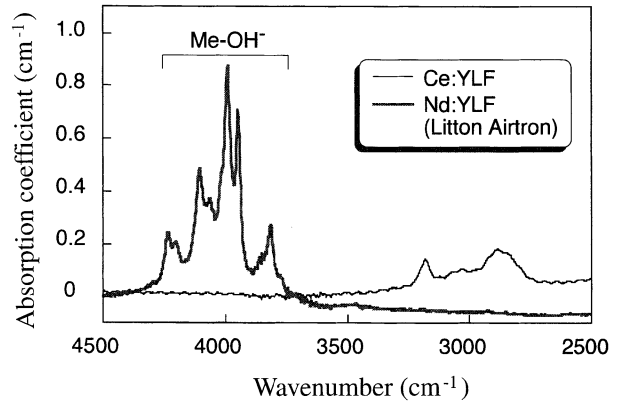


Fig.15 Absorption spectra of doped LiYF₄ single crystal in IR wavelength region.

を示した。LiCAFは今後全固体紫外レーザー材料、並びに紫外域での窓材として大きな期待を持てることがわかった。今後は、本研究にて得られた高品質フッ化物結晶成長技術により、様々な新しいフッ化物単結晶材料を作製し、新しい光技術の発展に貢献したい。

参考文献

- 1) R. F. Belt and R. Uhrin: J. Cryst. Growth **109** (1991) 340.
- 2) S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, and W. F. Krupke: IEEE J. Quantum Electron. **24** (1988) 2243.
- 3) S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and H. W. Newkirk: J. Appl. Phys. **66** (1989) 1051.
- 4) M. A. Dubinskii, V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, and S. L. Korableva: Laser Phys. **3** (1993) 216.
- 5) M. A. Dubinskii, V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, and S. L. Korableva: J. Mod. Opt. **40** (1993) 1.
- 6) V. K. Castillo and G. J. Quarles: J. Cryst. Growth **174** (1997) 337.
- 7) D. Klimm and P. Reiche: Cryst. Res. Technol. **33** (1998) 409.
- 8) I. M. Ranieri, S. L. Baldochi, A. M. E. Santo, L. Gomes, L. C. Courrol, L. V. G. Tarelho, W. de Rossi, J. R. Berretta, F. E. Costa, G. E. C. Nogueira, N. U. Wetter, D. M. Zzell, N. D. Vieira Jr., and S. P. Morato: J. Cryst. Growth **166** (1996) 423.
- 9) S. P. Morato, L. C. Courrol, L. Gomes, V. Kalinov, and A. Shadarevich: Phys. Stat. Sol. **163** (1991) K61.
- 10) Z. Liu, S. Izumida, H. Ohtake, N. Sarukura, K. Shimamura, Na Mujilatu, S. L. Baldochi, and T. Fukuda: Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L1318.
- 11) K. Shimamura, Na Mujilatu, K. Nakano, S. L. Baldochi, Z. Liu, H. Ohtake, N. Sarukura, and T. Fukuda: J. Cryst. Growth **197** (1999) 896.
- 12) R. E. Thoma, C. F. Weaver, H. A. Friedman, H. Insley, L. A. Harris, and H. A. Yakel, Jr.: J. Phys. Chem. **65** (1961) 1096.
- 13) M. A. Dubinskii: Laser Phys. **3** (1993) 216.
- 14) P. Rogin and J. Huliger: J. Cryst. Growth **179** (1997) 551.
- 15) R. Uhrin, R. F. Bert, and V. Rosati: J. Cryst. Growth **38** (1977) 38.

レーザーワード

紫外レーザー用フッ化物単結晶

(fluoride single crystals for UV laser)

潜在的波長可変領域が紫外域の275-340nmであるCe³⁺イオンをドーブしたフッ化物単結晶。1980年ごろに報告されたCe³⁺:YLiF₄(305-335nm), Ce³⁺:LaF₃(275-315nm)をはじめとし、近年ではCe³⁺:LuLiF₄(305-340nm), Ce³⁺:LiCaAlF₆(280-320nm), Ce³⁺:LiSrAlF₆(280-320nm)などが報告されて

いる。これらはKrFエキシマレーザー(248nm)やNd:YAGレーザーの第4高調波(266nm), 第5高調波(213nm)などで励起可能である。こうした結晶の開発により、全固体紫外波長可変レーザーへの道が開けつつある。全固体紫外波長可変レーザーの広い利得帯域は、超短パルス光の増幅・発生などへの応用が期待されている。(島村 清史)