

氏 名	王 一 民
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	磁気光学結晶 $Gd_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ の育成と 評価に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 川上彰二郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 脇山 徳雄 東北大学教授 宮城 光信

論 文 内 容 要 旨

1. はじめに

光通信における高速通信やコヒーレント通信, あるいは光センシングにおいては, 光ファイバケーブルやコネクタからの戻り光が光源の半導体レーザに戻ると半導体レーザの発振が不安定になり, 高品質の伝送が困難になる。この戻り光を阻止し, 半導体レーザの発振を安定にするためには, 通例光アイソレータが必要である。従来の光アイソレータに使用されていたファラデー回転素子はファラデー回転係数 (或はベルデ定数) が小さいため, 光路長が長く, 素子が大きくなるなどの欠点があった。ビスマス置換希土類鉄ガーネットは大きなファラデー回転係数 (以下 θ_F と略す) をもつと同時に吸収係数が小さいことが報告されて以来, この種の結晶について様々の育成法が提案された。現在主流となっているのは LPE 法 (液相エピタキシャル成長法) である。この方法の特長は生産性であるが, Pb をフラックスとするため, 膜に Pb の混入が避けられない。光の吸収損失は Pb の量に比例して増加するため, この方法では極低損失なガーネット結晶を育成することは困難という欠点が残されたまま今日に至っている。本研究ではより低損失で大型の Bi 置換ガドリニウム鉄ガーネット ($Gd_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$: GBIG) を育成するため酸化ビスマスを主成分としたフラックスを用い, Top-seed solution growth 法 (TSSG 法) を加えた育成方法を提案した。本研究の目的を達成するためつぎの項目

(1) 融液の均一化

(2) Biの置換量の増加

について検討した。融液を均一にするため攪拌を兼ねた TSSG 法を提案した。Bi の置換量を増やすため自然核発生を抑制し、成長温度を低減することによって実現した。

2. TSSG 法による $Gd_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ の育成

2. 1 攪拌板による融液の均一化

種子結晶による自然核発生の防止は融液が均一であることを前提としている。通常の TSSG 法では融液の均一化として種子結晶を回転させるか、あるいはるつぼを回転させる方法が取られるが、GBIG 結晶育成用のフラックスは成分の問題で濃度差が生じやすい性質をもっている。結晶の回転あるいはるつぼの回転だけで融液を均一にすることは困難である。そこでわれわれは図 1 に示すように白金板を結晶の回転軸と同軸で回転させて融液の攪拌を行うことによって均一化を果たした。組成の均一化は確認できないが温度分布の均一化は確認できた。その結果を図 2 に示す。攪拌しないときと攪拌するときの温度分布を比較して攪拌することによって融液内の温度分布が均一になったことがわかった。但し、攪拌速度は 43rpm であった。

2. 2 飽和温度の測定

飽和温度の測定は通常微小の結晶粒を融液に投入して結晶粒の溶ける時間から推定する方法が取られる。しかし、結晶粒の大きさ（あるいは重さ）がまちまちなので結晶粒の溶解時間もそれぞれ違ってくる。この方法で測定した飽和温度に広い範囲のばらつきがある。また、飽和温度に近い温度で Seeding を行うとしばしば溶けそとなった結晶粒が自然核発生のもとになる。この問題を解決するため、種子結晶として用いた寸法の統一した NGG (Neodymium Gallium Garnet) 結晶を飽和温度の測定に利用した。この方法でかなり正確に飽和温度を測定することができた。

2. 3 空冷の条件

GBIG 結晶の性能指数を向上させるため成長温度を低減する必要がある。そこで種子結晶の冷却より自然核発生を防止した。過冷却による多結晶成長を考慮して成長初期の冷却空気の流量を 2 ~ 6 l/min. の範囲に定めた。その後の流量を最大 23 l/min. まで増やした。成長温度の低減によってファラデー回転係数 (θ_F) が大幅に増加した。その結果を図 3 に示す。

3. 育成結果

図 4 に 1 つの結晶例を示す。この結晶の赤外観察結果を図 5 に示す。上の写真は無偏波光で観察したもので下の写真は両偏光子の間に入れて観察した磁区である。明らかのように全面にわたって Inclusion, クラックおよび成長縞が観察されなく良質な結晶であることがわかった。

表 1 に光学特性の測定結果を示す。比較のため他社のデータも示した。尚、精度よく測定するため 2 CH の光パワーメータ (Anritsu ML910B) を用いた。同表からわかるように本研究で得られた吸収損失は攪拌摺り上げフラックス法と同程度であるものの、LPE 法より 1 ケタ低い値を示した。特に波長 $\lambda = 1.50 \mu\text{m}$ ではいちばん低い損失が得られた。同時に消光比も一番高い。波長 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$ の損失はフレネル反射損失を差し引いて求めた。計算よりフレネル反射損失が 1.5dB である。45° 回転の損失は 1.9dB まで低減することができた。今後さらに Bi 置換量を増やせば ~ 1 dB

のファラデー回転子が期待できる。

3. ま と め

本研究では高性能の光アイソレータを実現するため、TSSG法によるファラデー回転素子：GBIG結晶の育成と評価を行った。その目的はGBIG結晶の大型化・良質化である。

育成に当たって(1)融液の均一化(2)成長温度の低減化などの問題点を解決したことによって長波長ではBi置換鉄ガーネットとして最も低損失の結晶が得られた。短波長ではLPE法のものと同程度かあるいはそれより低い損失が得られた。

LPE法では損失の低減はほぼ限界であるのに対して本研究ではさらに低損失のGBIG結晶が期待できる。

今後、本研究をさらに発展させるためBi置換量をさらに増やして波長 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$ での吸収損失を1dBまでに低減する予定である。

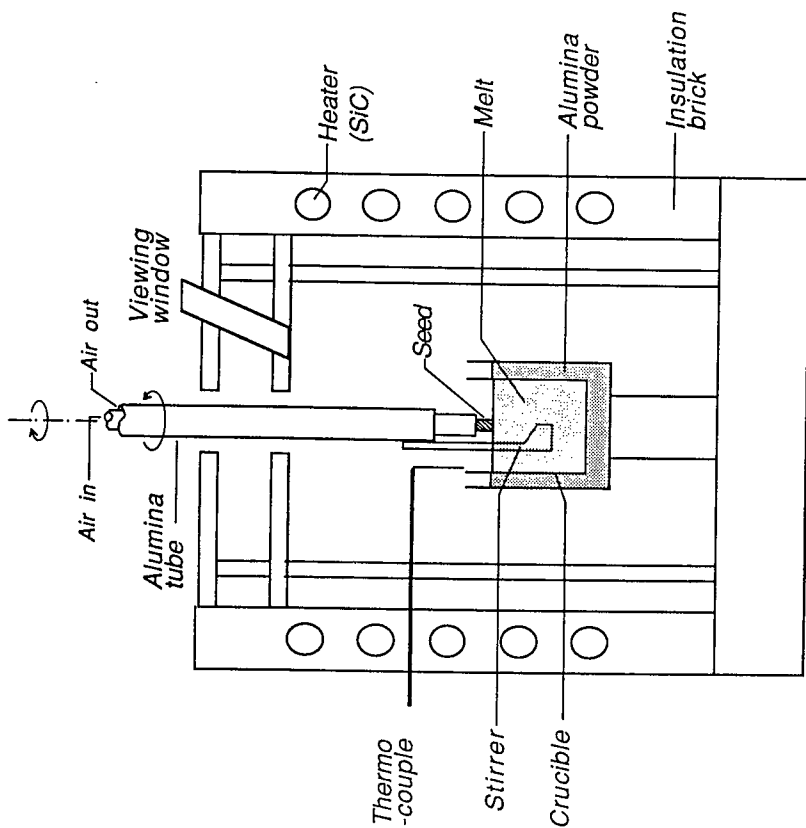


図1 電気炉の断面図

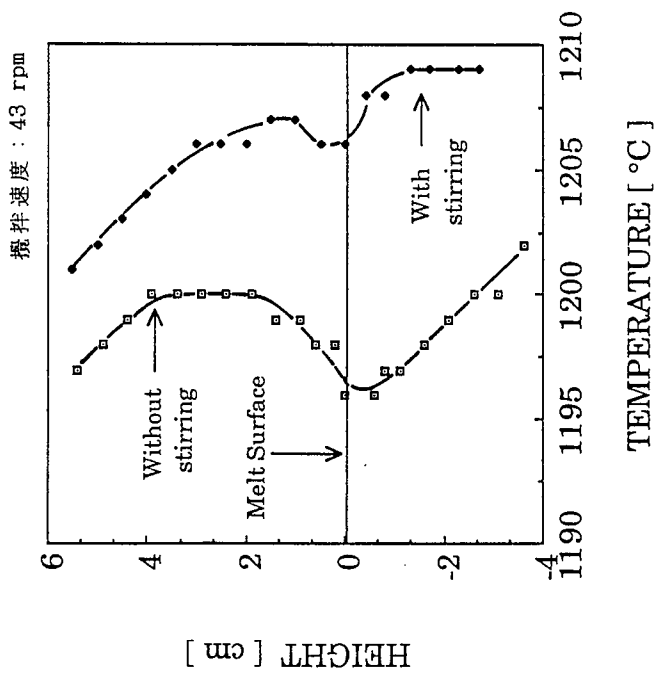


図2 融液の温度分布

表 1 Bi 置換希土類鉄ガーネット結晶の光学特性

育成法	波長 (μm)	吸収損失 ($\text{dB}/45^\circ$)	消光比 ($\text{dB}/45^\circ$)
LPE法	1.3	0.17	37
	1.55	0.3	40
	0.8	2.0	37
飛拌拘い上げ フラックス法	1.32	0.017	37
	1.55	0.04	37
	0.78	1.0	31
TSSG法	1.28	0.018	40
	1.50	0.018	41
	0.78	1.9	33

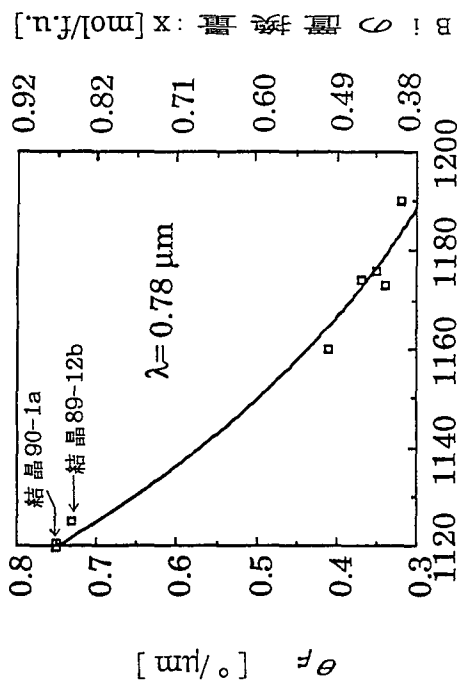


図 3 成長終了温度と θ_F の関係

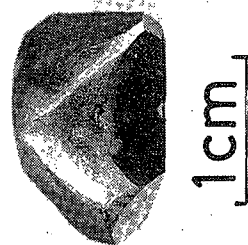


図 4 結晶の外観



図 5 赤外観察

審査結果の要旨

光エレクトロニクス技術は情報伝送・記録に広く用いられ、その技術的要求は高度化しつつある。半導体レーザ光源からの光が反射により光源に戻るとレーザ動作が不安定になるという問題があり、これを防止する光アイソレータが各応用分野で要求されている。本論文は、光アイソレータに用いられる磁気光学結晶である $Gd_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ （以下 GBIG という）の新しい育成技術と結晶の光学的評価に関するもので、全文5章からなる。

第1章は序論である。従来行われている液相エピタキシャル成長法（LPE法）と攪拌掬い上げフラックス法について、LPE法は生産性・均一性にすぐれ、攪拌掬い上げフラックス法は制御性の低い方法であるが光学的に高品質の結晶も得られていることを述べ、両者の長所を併せもつ結晶育成法が必要とされることを明らかにしている。

第2章では、従来の攪拌掬い上げフラックス法に従い GBIG の育成を行った結果を述べ、その育成法の問題点を明らかにしている。即ちフラックスの混入、微小クラックの存在、磁区の不均一等の巨視的な不完全性の存在を指摘した。育成中の結晶が液体・気体の界面に浮遊していて、結晶育成の制御が困難なことに不完全性の発生原因があると推定している。

第3章では、結晶の巨視的不完全性の原因であると第2章で推定した要素の除去と、光学的に良質な GBIG を育成する条件探求について述べている。新たに攪拌板上結晶成長法を考案して、GBIG に要求される結晶育成の基本的な条件を見出し、本論文の主眼である Top-Seeded Solution Growth 法（TSSG法）に到る基礎としている。

第4章では、種子結晶上に過飽和融液から結晶を析出させつつ引き上げる TSSG 法を用い、実験した結果を述べている。結晶サイズ、均質性、および性能指数（ 45° のファラデー回転を示す結晶における光吸収）において優れた結晶を育成するため、次の工夫を行っている。(1) LPE法と異なり、鉛を含まない融液を用いて低損失な結晶を育成する。(2) 80°C 以上の大きい過飽和度で安定に結晶成長を行えるような育成条件を見出し、大きいファラデー回転を示す結晶を得た。その結果、光通信で重要な $1.55\ \mu\text{m}$ 付近では従来報告されている最小損失の約 $1/2$ である $0.018\text{dB}/45^\circ$ を得、光メモリ・計測用に重要な $0.78\ \mu\text{m}$ 付近では LPE法を上まわる $1.9\text{dB}/45^\circ$ の値を得た。以上は重要な知見である。

第5章は結言である。

以上要するに本論文は、磁気光学結晶 GBIG の新しい育成方法を樹立し、磁気光学的に優れた性能を有する結晶を得たもので、光デバイス工学、光材料工学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。