

氏 名 佐 藤 庸 一

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第632号

学位授与の日付 平成14年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 機能分子科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 希土類添加固体レーザーの新励起方式に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 岡本 裕巳  
教授 木下 一彦  
教授 薬師 久彌  
助教授 平等 拓範  
教授 伊藤 良一（明治大学）

## 論文内容の要旨

フォトンエネルギーを空間的・時間的・波長的に制御できる固体レーザーは、分子分光やリモートセンシング、高精度干渉計などの理科学研究分野から、超微細加工、光通信や光記憶デバイスなどの光情報処理、さらにはレーザーポインタやディスプレイなど産業分野までの幅広い応用が期待できる。本論文は半導体レーザー励起固体レーザーの小型化、高効率化、多機能化を目指して行われた基礎的研究である。その内容は、マイクロチップ固体レーザーの高効率化のための理論的モデルの確立と、それを実現するための新レーザー媒質の開発から基礎となる分光特性の評価、及び実験的検証である。以下に本論文において得られた知見をまとめる。

第2章においては、マイクロチップレーザーのスロープ効率と発振しきい値について考察を加え、レーザーの光-光変換効率を向上させるための新しい励起指針を提案した。従来の励起方式は励起光吸収効率のみ、もしくは原子量子効率のみ改善するものであるのに対し、本論文で提案した方式では、励起光吸収効率、励起量子効率、原子量子効率の積が最大となるよう励起条件を最適化する。

本方式の適用には、それぞれ互いに従属な関係であるレーザー出力結合効率、原子量子効率、励起量子効率、モードマッチング効率、励起光吸収効率レーザー発振しきい値の厳密な評価法が必要となるため、以下本章においてはこれらの量子効率の評価を行うための物理的モデルの構築を行っている。

まず、励起光吸収効率を高くするために活性イオン添加濃度を高くした場合の濃度消光による蛍光量子効率の低下を理論的に検討した。蛍光量子効率はレーザー発振しきい値に直結する量であり、正確な定量的見積りはレーザーの高効率化に不可欠である。

次に、励起光吸収効率を高くするために励起光に対する吸収断面積の高いレーザー媒質を使用した場合には、吸収飽和が起こることにより励起光吸収効率がランバート・ベール則では計算できないことを明らかにして、各種のレーザーモデルにおける吸収係数の実効値を提案した。この実効的な吸収係数を用いて励起光吸収効率を求めることにより、励起光吸収効率と励起量子効率の関係式が導かれた。この関係式から励起量子効率が測定できること、および励起量子効率の評価における誤差を定量的に示した。

第3章では、レーザーの新機能発現を目指して厳密にレーザーの基礎パラメータを評価している。以下、媒質ごとに特徴を述べる。

Nd:YAGセラミックスの評価により、希土類の添加濃度増大のための新技術の実証がなされた。吸収ピークのサテライト観察により、 $\text{Nd}^{3+}$ - $\text{Nd}^{3+}$ 相互作用の添加濃度依存性が明らかになった。

Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はYAGよりも熱伝導率が高く有望なレーザー材料だが、結晶成長が困難であった。透光性Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックスを作製し、レーザーの基礎パラメータを評価するとともに、透光性向上のための焼成助剤を検討した。

Nd:BSOは偏析係数が高いために $\text{Nd}^{3+}$ の高濃度添加が可能である。レーザー材料としての特性を調べるために熱伝導率とレーザーの基礎パラメータを評価し、さらに高濃度添加時における $\text{Nd}^{3+}$ の結晶場変化についても考察した。

GdYCOBにレーザー活性イオンを添加することで直接SHG、THGなどの高調波を自己発生さ

せることが可能となる。また、非線形性を利用したパルス整形などの応用が望める。本論文では特に Nd<sup>3+</sup>と Yb<sup>3+</sup>を添加した Re<sup>3+</sup>:GdYCOB のレーザーの基礎パラメータを評価した。

Nd:YVO<sub>4</sub>は代表的なマイクロチップレーザー材料である。今まで議論が分かれてきた吸収係数などレーザーの基礎パラメータを厳密に再評価した。

第4章においては、固体レーザーの高効率化を目的として、第2章で提案した新励起方式を用いて高濃度 Nd<sup>3+</sup>添加 YAG セラミックスと Nd:YVO<sub>4</sub> 単結晶を用いてマイクロチップレーザーを構成し、光-光変換効率の評価を行った。

まず、YAG セラミックスに Nd<sup>3+</sup>を高濃度に添加することで励起光吸収効率を向上させ、レーザーの光-光変換効率が改善されることを示した。ここで、蛍光量子効率を検討することにより、Nd-Nd 相互作用による非輻射遷移を記述するために導入された、デキスター理論にサイト依存性を織り込んだ新しいモデルの妥当性を証明した。さらに、レーザー発振における励起光からの光-光変換効率を高くするためには Nd<sup>3+</sup>添加濃度の最適値があることを示した。このことから、レーザー共振器製作のガイドラインとして、従来からあった性能指数  $\sigma_{em}\tau_f$  以外に、最適な添加イオン濃度を示す性能指数  $C_{Nd}\eta_q$  を新しく提案した。

次に、Nd:YVO<sub>4</sub> 単結晶に新励起方式を適用した。性能指数の評価から Nd:YVO<sub>4</sub> のレーザー発振において直接励起法が利用できることに着目し、励起光吸収に対するレーザー出力パワーのスロープ効率で 80.3%、励起光吸収量に対するレーザー発振パワーの光-光変換効率で 77.5%、励起入力パワーとレーザー光の光-光変換効率で 76.8%を得ることに成功した。これが実用的であることは、励起光源を半導体レーザーとした際にスロープ効率 75%が得られたことから明らかである。ここで得られた 80%以上というスロープ効率は、従来の量子限界を 5%凌駕しており、新しい方式の量子限界に対しても 97%という極限的な値である。

第5章は本論文の総括である。固体レーザーの小型化・高効率化・多機能化を目指してマイクロチップレーザーの高効率化のための手法を提案・実証した経緯を簡潔にまとめている。さらに、新しく提案された種々の量子効率の評価法は、今後の固体レーザー研究開発に対して新しい指針を示すであろうことにも言及している。

今後も、より理想的な固体レーザーの実現を目指して新しい媒質の開発、設計・モデルの最適化を進めることにより、さらなる小型化・高効率化・多機能化が図れるものであり、これによりレーザーの新しい応用も大きく進展するものと期待される。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は和文で書かれた約 100 ページのもので5章からなる。第1章は研究のバックグラウンドの説明、第2章は希土類添加固体レーザーのモデル化、第3章は新しく開発されたレーザー媒質の分光学的な評価を行い基礎パラメータを求め、第4章では見いだした新励起方式を実験的に検証している。各章に関連した計 12 件の論文がすでに一流の国際誌に印刷されたかまたは印刷中であり、さらに1件が投稿中とのことである。これらの成果が、国際的にも高い評価を得ていると判断できる。

第1章は固体レーザーとそれを高性能化する方法としての半導体レーザー励起固体レーザー(DPSSL)についての説明がなされている。特に、本研究でとりあげるマイクロチップレーザーのもつ意義を、DPSSL の色々な機能・性質との関連において記述しており、本人の研究の位置づけを十分把握して検討を進めていることが読み取れる。また本研究で希土類添加固体レーザーの新材料探索と、その特色を十分生かしたレーザー研究を展開したいという意図が理解できる。

第2章では、レーザーの高効率化に必要な技術課題を明らかにするため、レーザー過程に関わる全ての量子効率について定量的な評価を行っている。レーザー過程の新しい物理モデルを提案するとともに、レーザー上準位直接励起の手法を提案している。

第3章では、前章で提示された課題にしたがって新しく開発されたレーザー媒質の分光学的な評価を行っている。驚くべきことに、広く一般的な固体レーザー材料として用いられている Nd:YAG においてさえも、レーザー設計に必要な不可欠な誘導放出断面積の値が定まっていなかった。また、最近可能になった高濃度添加材料において Nd-Nd 相互作用によるエネルギーの伝搬過程の評価についてもデータが乏しかった。ここでは、基礎的なパラメータの評価に必要な手法を確立し、新たな材料の評価を進めた。結果、レーザー発振特性を大幅に改善できる直接励起(第4章)の方法に対して、高濃度 Nd:YAG および Nd:YVO<sub>4</sub> が適していることを見いだしている。

第4章では、第3章での分光学的な評価結果より、優位性を見いだした新規レーザー媒質である Nd:YAG セラミックスおよび高性能性を再発見した Nd:YVO<sub>4</sub> においてレーザー発振を試み、直接励起によるレーザー発振の高効率特性を実証している。ここで得られた、量子限界近くの 80% スロープ効率は、世界記録であり、今後のレーザー開発現場にも大きな影響を与えることが期待される。基礎的な分光評価、モデル構築がレーザー装置構成にまで影響を与える事を実証した意義は大きく、それ程ユニークでオリジナルな成果といえる。

最後に第5章では、以上の各章で得られた主要な結果をまとめて、本研究の成果を総括している。

このように本論文は、レベルの高さ、オリジナリティ、量のいずれ観点から見ても学位論文レベルは十分超えていることで審査員全員の意見が一致した。

口述試験は約1時間の発表、約1時間半の質疑応答として実施した。

申請者は学位論文の内容を1時間でわかりやすく説明した。質疑応答では、マイクロチップ、セラミックス材料とは何を指しているのか、それを研究する意義はどこにあるのか、といった質問や、直接励起によって極めて高い効率を得ることに成功した学術的・応用的意義はどのようなものか、といった質問に的確に答えた。本人のオリジナリティがどこにあるのかを、客観的に適切に理解し、また本人の研究成果が世界のレーザー開発研究の中でどのような位置づけを占めているものであるかを、よく考えて研究をすすめていることがわかった。また研究者としての基礎学力としても十分であること

が認められた。論文の要旨は英語で記されており、また既に本人が筆頭著者の英語論文が数報国際誌に掲載されていること、海外での学会発表の経験もあることから、語学力は十分と判断した。従って、口述試験は合格という事で委員全員の意見が一致した。公開發表では規定の時間で論文内容を的確に説明し、質問に対して正しく応答した。