

氏名	平 等 拓 範
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 8 年 12 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最終学歴	昭和 60 年 3 月 福井大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了
学位論文題目	半導体レーザー励起小型固体レーザーに関する研究
論文審査委員	東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 内田 龍男

論文内容要旨

第 1 章 総 論

近年、半導体レーザー（LD）の高出力、長寿命化に伴い、これを励起源として利用する固体レーザーの研究開発に対する関心が高まっている。従来、固体レーザーは、優れた特性を持ちながらも、大型で低効率であったため、特殊な用途を除き実用化が進まなかった。LD 励起固体レーザーは、LD の特長である、小型、高効率、長寿命特性を引き継ぎ、さらに、エネルギーの蓄積性や周波数の安定性に優れているなど LD には無い特長も備えている。また、ランプ励起方式と比較すると、効率が高いだけでなくビーム品質も優れている。このため、高精度光干渉計や高分解能分光計測などの理化学分野からディスプレイや光通信などの工業分野までの幅広い応用が期待される。

本研究は、LD 励起小型固体レーザーの高効率化、単一縦モード化と非線形波長変換や Q スイッチ動作などの多機能化、さらには光注入同期による高輝度化を目指して、レーザー設計の基礎となる理論的モデルの確立及び実験的検証を行った LD 励起固体レーザーに関する基礎研究である。

第 2 章 半導体レーザー励起固体レーザーの基本特性

固体レーザーの励起源として、LD を用いた場合、レーザー媒質をスペクトル的、空間的に選択励起できるため高効率となる。図 2. 4 に LD 励起固体レーザーの基本構成を示す。ランプ励起とよく似た側面励起（横励起）方式と、レーザー光と同一方向に励起する端面励起（縦励起）方式がある。どちらもランプ励起に比べると集光が容易で高効率化が可能となる。特に端面励起の場合、レーザー発振と励起領域を一致できるため、高効率動作が可能となるだけでなく、励起光自身が空間的な利得フィルターの役割も兼ねることになる。このため TEM₀₀ の基本横モード発振が得られ易い。

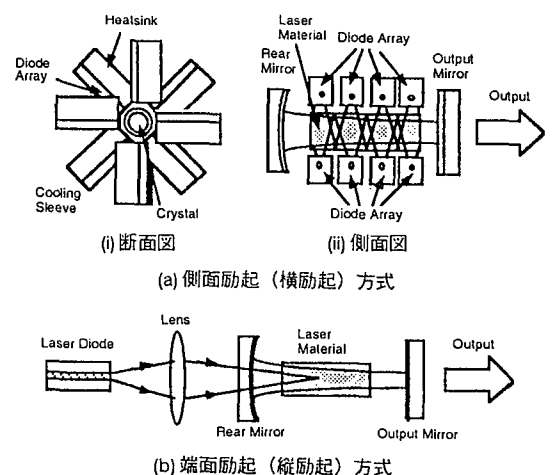


図 2. 4 LD 励起固体レーザーの基本的な構成

第 3 章 単一縦モード発振小型固体レーザー

一般的な定在波形の共振器では、レーザー媒質内の利得分布

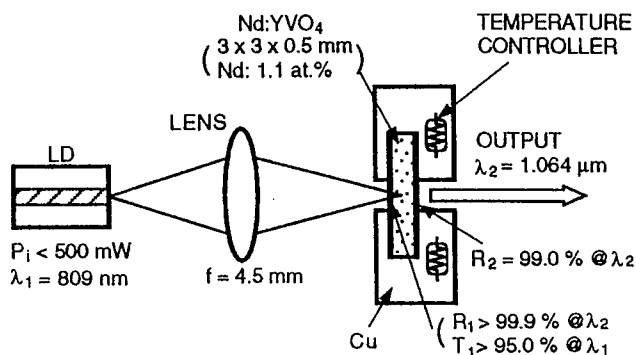


図 3.13 LD 励起 Nd : YVO₄ マイクロチップレーザーの構成

に粗密が生ずる空間的ホールバーニング効果のため縦多重モード発振により、発振周波数の振幅が不安定となる。しかしながら、多くの応用分野で縦モードを単一化し、線幅の狭窄化と低雑音化を図る必要がある。従来、固体や気体レーザーの単一縦モード発振法として、進行波型のリング共振器を用いる方法や電界分布に腹と節を持たない定在波であるツイストモード動作を利用する方法、さらに共振器内に回折格子やエタロンなどの同調素子を挿入する方法などがある。しかし、これらの方法は共振器構成を複雑かつ大型にするもので共振器損失や不安定要因が増大するなどの欠点を有していた。これに対し、レーザー媒質の利得幅内に縦モードが1~2本しか許容されないような短い共振器を用いるマイクロチップレーザーによっても単一縦モード発振が実現できる。Nd : YAG と Nd : YVO₄ の利得幅内に許容される縦モード数 m について比較する。結晶長 L を励起光の吸収係数逆数に選んだ場合、許容縦モード数は次式で表される。

$$m = \frac{\Delta\nu}{(c/2nL)} = \frac{2n\Delta\nu}{\alpha_p c} \quad (\text{D-1})$$

ここで、 $\Delta\nu$ は利得幅、 n は屈折率、 α_p は励起波長に対する吸収係数である。Nd : YAG の場合、 $m=3.0$ であるのに対し Nd : YVO₄ だと吸収係数が高いため $m=0.9\sim 1.2$ となり、単一縦モード動作のマイクロチップレーザー材料には Nd : YVO₄ が適している。図 3.13 に、LD 励起 Nd : YVO₄ マイクロチップレーザーの構成を示す。Nd 濃度 1.1 at% の YVO₄ 結晶の両端面にレーザー反射鏡を直接蒸着し、長さ 500 μm の短共振器を構成している。図 3.14 に入出力特性を示す。500mW の LD で励起した場合、単一モードで 103mW の出力が得られ、多重縦モード発振では最大出力 154 mW、スロープ効率 32.4%、最小発振閾値 5.3mW と低閾値、高効率、高出力特性が実現された。

マイクロチップレーザーのもう一つの特長として、結晶温度を制御することで結晶長と屈折率を変えて利得幅内で連続的にレーザー発振周波数が可変であることが挙げられる。図 3.18 に、Nd : YVO₄ マイクロチップレーザーの発振周波数及び利得中心の温度依存性特性を示す。結晶温度を常温より 67K 上昇させることにより、モードホップを起さずに発振周波数を 107GHz 低周波数側にシフトできた。

第 4 章 共振器内部 SHG および Qスイッチ複合動作小型固体レーザー

非線形光学に基づく波長変換法では、基本波レーザー光のコヒーレンス特性を損なわずに高効率で異なった波長の出力に変換できる特長を有している。ここでは、多機能化を目指し、小型固体レーザーの共振器内部に、非線形光学結晶である KTP を配置した共振器内部 SHG 型 Nd : YVO₄ レーザーを検討する。

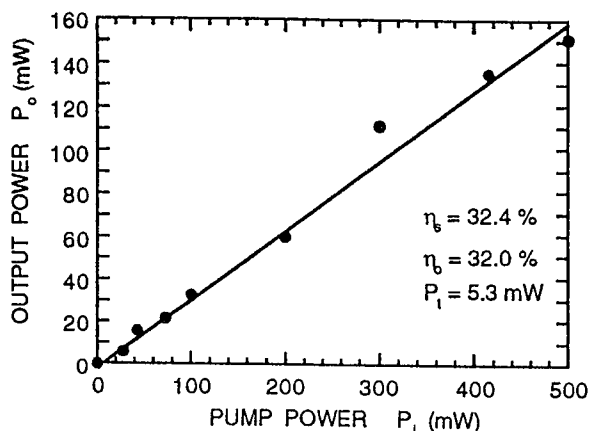


図 3.14 LD 励起 Nd : YVO₄ マイクロチップレーザーの入出力特性

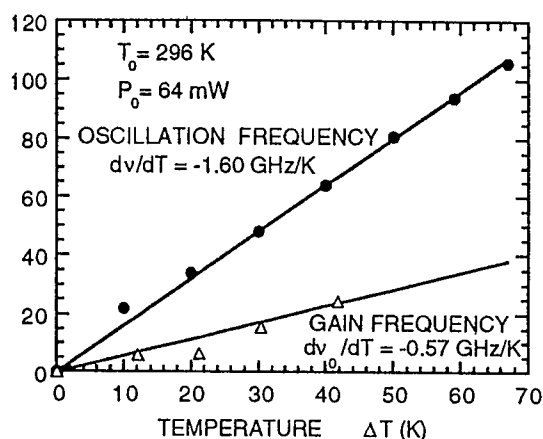


図 3.18 LD 励起 Nd : YVO₄ 利得中心及びマイクロチップレーザー発振周波数の温度依存特性

図4.12にQスイッチ・SHG複合動作の小型Nd:YVO₄レーザーの構成を示す。出力1WのLDをNd:YVO₄結晶(1mm厚, Nd濃度1.1at.%)に約50 μ mまで近接させ励起した。共振器内部には, KTP結晶(タイプII)を配置した。曲率50mmの外部鏡とYVO₄結晶により21mm長の共振器が形成される。この構成において, 1064nmの基本波は共振器内部に閉じ込められ, 532nmのSH波のみが外部に取り出される。Nd:YVO₄レーザーの基本特性を知るため, CW動作特性の測定を行った。図4.3に, SH波出力の励起電力依存特性を示す。SH波出力は励起電力に対して非線形的に増大することがわかる。9.6mmのKTP結晶を用いた場合, 最大励起780mW時にSH波出力140mW, 効率17.9%と小型の装置ながらも高出力, 高効率の緑色光が得られた。

しかし, SHG出力が100mW程度以上の領域では大きな出力変動が観測された。その理由としてKTPが, 温度不安定の場合, 共振器内の基本波偏光損失が不安定になるため, SHG出力も変動したと考えた。そこで, KTP結晶の温度変動を0.1 $^{\circ}$ C以下に制御したところ, 約1.5%程度の揺らぎに変動を抑えることができた。この効果を積極的に利用すればSHG位相整合を保ったままQスイッチが可能であるとの着想を得た。そこで, KTP結晶に電界を印加しない状態で結晶が基本波に対して $\lambda/4$ 板として働くように入射角と温度を制御した。Nd:YVO₄はc軸に直交方向の誘導放出断面積が小さいため, レーザー発振が抑圧される。次に, $\lambda/4$ 電圧をKTPに印加することによりレーザー発振に至る。KTPは, SHG位相整合も可能であり, Qスイッチとの複合動作が行われる。Qスイッチ型内部SHGレーザーのSH波出力電力とパルス幅の励起電力依存特性を図4.17に示す。パルス幅は, 励起を335mWから750mWに上げることにより15nsから5.6nsまで減少する。750mW励起時にパルス幅5.6ns, SH波尖頭出力1.52kWの出力が得られた。CW発振での出力103mWに対しSH波出力は約15000倍高まった。このときの出力エネルギーは8.5 μ Jであった。なお, Qスイッチ特性改善のため共振器内部に厚み500 μ mのアニコートエタロン(BK7)を挿入し, 縦モードを単一化した。

第5章 光シーディングによる高出力パルス固体レーザーの単一モード選択法

マイクロチップレーザーは小型高効率の高性能単一縦モード発振レーザーであるが, 高出力化には限界があり, 従って応用にも制限が生ずる。一方, 光注入同期法は低出力だが縦モードが単一のレーザーをマスターとして, 高出力ではあるが多モード発振のスレーブレーザーを, 単一モード化, 高安定化する有効な方法として研究が進められている。特に, 高尖頭出力の得られるQスイッチレーザーに対する注入同期は, インジェクションシーディングと呼ばれる。シーディング動作は, スレーブレーザー共振器内のある縦モードを選択的に早く成長させ, 利得を消費して, 他のモードの利得を発振閾値以下に抑制することにより単一縦モード発振が実現される。 η を量子効率を含めた励起効率, P_p を励

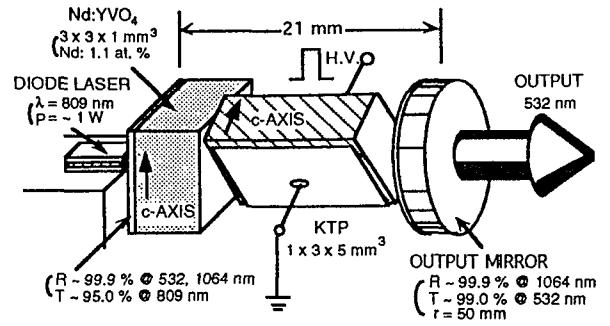


図4.12 共振器内部SHG型Qスイッチレーザーの装置構成

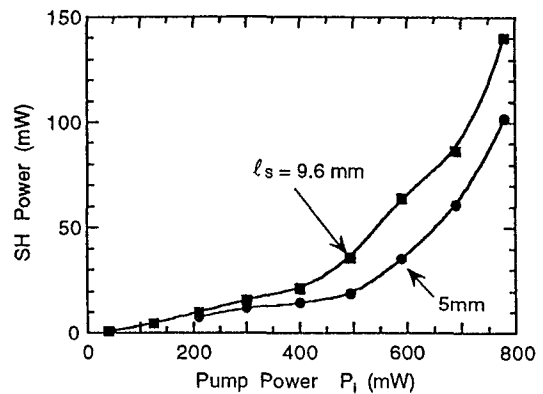


図4.3 共振器内部SHGレーザーの入出力特性

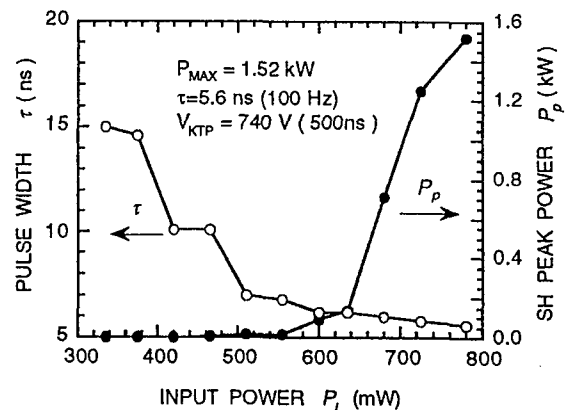


図4.17 SH波尖頭出力とパルス幅の励起電力依存特性

起電力とした場合、自然放出により発生する光子数は ηP_p として与えられる。これが、スレーブレザー共振器の各モードに $f=c\lambda^2/8\pi\Delta\nu V$ の割合で分配される。注入光電力は、この各モードに分配された自然放出光電力よりも大きい必要があるとの条件より、シーディングに必要な注入電力は次式で与えられる。

$$P_i \geq \frac{c\lambda^2\eta P_p}{8\pi\Delta\nu V} \quad (5-21)$$

図5.7にシーディング実験装置構成を示す。これより、最小必要注入光電力は $1\mu\text{W}$ 以下と非常に低電力の注入によるシーディングが期待される。実験でも $0.9\mu\text{W}$ の注入によりパルス幅 8ns 、出力 210mJ のランプ励起 Nd:YAG レーザーのシーディングを行うことができた。 532nm に波長変換したスレーブレザー出力を FP 干渉計 (FSR 3.0GHz 、フィネス 20) で観測した。図5.8にレーザーパルスを 30 ショット重ねた干渉縞を示す。同図(a)はシーディングを行っていない状態で、干渉縞は確認できていない。これに対し(b)図はシーディングを行った状態であり、発振スペクトルが単一で安定であるため干渉縞が確認できる。これより、輝度は $163\text{kW}/\text{str}\cdot\text{Hz}$ とマイクロチップ固体レーザーの輝度 $66.9\text{mW}/\text{str}\cdot\text{Hz}$ に比べ 2.4×10^6 倍高まった。

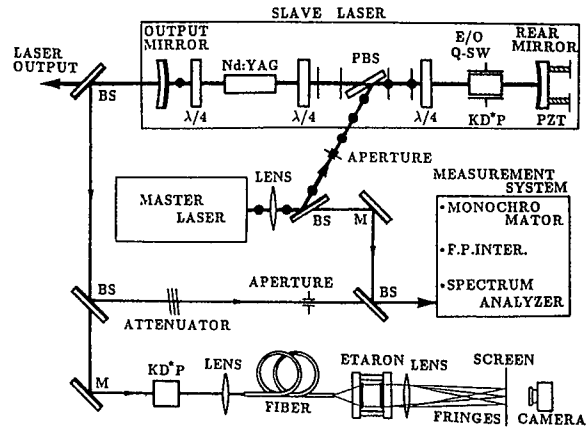


図5.7 インジェクションシーディング実験装置の構成

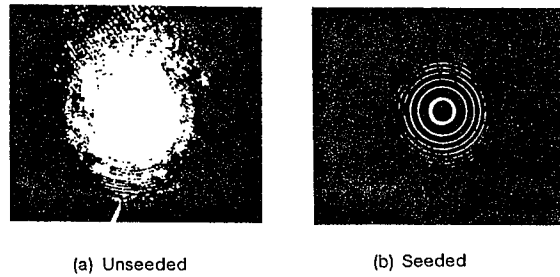


図5.8 スレーブレザー出力のFP干渉縞

第6章 結論

本論文は、レーザーの応用上重要な小型高コヒーレント光源の開発を目指し、LD 励起による小型固体レーザーを提案、試作し、高効率単一縦モード発振を実現した。特に、第2高調波発生とQスイッチを複合化した新構造を提案し、多機能化を進めた。さらに、光注入同期法について検討し、高輝度化を実現した。本論文は、LD 励起固体レーザーの新構造を提案すると共に、従来のレーザーを上回る優れた特性を実証し、検討した結果をまとめたものである。今後の研究課題としては、マイクロチップ固体レーザーのさらなる高性能化、多機能化の推進が挙げられる。これによりレーザーの新しい応用の可能性がさらに広まると期待される。

審査結果の要旨

近年の半導体レーザーの大出力化、長寿命化に伴い、これを励起源とした固体レーザーは、半導体レーザーの特長である小型、高効率、長寿命特性を持ちつつ、周波数の高安定性やエネルギーの蓄積性、出力ビームの高品質性などの優れた固体レーザーの特性を持つことから、活発な研究開発が進められている。著者は、当初からこの研究に取り組み、固体レーザーの高効率化、単一モード化や高輝度化について、新たな提案とその実現のための設計の理論モデルを確立し、その試作を行い、モデルの検証と優れた特性を有する小型固体レーザーを実現した。

本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全文6章より成る。

第1章は総論である。

第2章では、レーザー解析の基本モデルとして、半導体レーザー励起の動作解析に適した準位の吸収と、励起光および発振光の空間的分布を考慮したレート方程式を導出し、従来得られている結果と対応させ、その妥当性を確認している。

第3章では、高コヒーレント性を有する単一縦モード動作を、半導体レーザー励起 Nd:YVO₄ レーザーを用いて初めて実現した成果をまとめている。吸収係数の大きな Nd:YVO₄ 結晶の両端面を直接コーティングした、500 μm 厚のマイクロチップレーザーにおいて、容易に単一縦モード動作が得られることを明らかにし、500mW の半導体レーザー光励起に対して 103mW の単一縦モード出力を得ている。最小発振しきい値 5.3mW、スロープ効率 32.4% という、低しきい値、高効率、高出力動作を実現しており、これは実用上極めて重要な知見で、高く評価できる。

第4章では、小型固体レーザーの共振器内部に非線形光学結晶である KTP を配置した、第2高調波発生型 Nd:YVO₄ レーザーについて述べている。KTP 結晶の温度安定化とその偏光特性の電気制御により、Q スイッチ動作と高調波発生の変換効率の大幅な改善を単一素子で同時に実現した新たな方式である。750mW の励起入力に対して、パルス幅 5.6 ns、高調波のピーク出力 1.5kW、パルスあたりのエネルギー 8.2 μJ という高性能な動作を実現している。

第5章では、マイクロチップレーザーの持つ高コヒーレント性を維持しながら、高出力化を図ることのできる光シーディングについてまとめている。第3章で述べた単一縦モード発振マイクロチップレーザーをマスターレーザーとして用い、高出力ではあるが多モード発振でコヒーレント性に劣る Q スイッチパルスレーザーをスレーブレーザーとしてこれにシーディングを行い、スレーブレーザー共振器内の1本の縦モードを選択的に発振させるものである。実験では、1 μW の注入により、210mJ の単一縦モードの Q スイッチレーザー出力をスレーブレーザーより取り出している。これは有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、半導体レーザーを励起源とする小型高コヒーレント固体レーザーの考案、設計、製作、評価を行い、優れた特性を実現し、固体レーザーについての新しい知見を得たもので、量子電子工学およびレーザー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。