

氏 名	お 大 つか 塚 けん 建 じゆ 樹
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和51年10月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和43年3月 東北大学工学部通信工学科卒業
学 位 論 文 題 目	Nd-YAGレーザーによる超高速光パルスの発生に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 柴田 幸男 東北大学教授 御子柴宣夫

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

1964年, Geusicらによって見出された⁽¹⁾ Nd-YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) 固体レーザーは, 容易に数ワット以上の発振出力を常温で得ることができ, 発振帯域が10 GHz あるいはそれ以上に及び, また発振波長が光ガラスファイバの低損失伝搬帯にあることから, 光伝送用の光源として注目されている。特に, モードロッキングにより, 超高速光パルスを発生させることができ, 広帯域大容量符号伝送用発振器として期待されている。

本論文はNd-YAG レーザの優れた性質に着目して, このレーザーの動作特性を明らかにし, モードロッキングにより安定な超高速パルス発振器を実現することを目標にして行った研究結果をまとめたものである。第2章では, Nd-YAG結晶の物理的・分光学的特性を他の固体レーザーと比較しながら概説すると共に, Nd-YAGレーザーの発振パラメータを実験的に明らかにし, 本研

究で使用したNd-YAGレーザ装置の設計法および試作例について述べる。第3～4章では、Nd-YAGレーザのモードロッキング動作に直接関係し、モード同期光パルスの不安定性の原因となっている。ポンピング光に基づく結晶の熱効果、緩和発振および低周波における共振現象について、実験的ならびに理論的に検討し、Nd-YAGレーザ発振器の安定化法を明らかにしている。第5章では、Nd-YAGレーザのモードロッキングの際に問題になる発振スペクトル特性を詳細に測定し、その結果と空間的ホールバーニングに基づく発振モデルによる理論的解析結果から、自由発振帯域ならびに中心周波数のふらつきの原因を明らかにすると共に、発振横モード間の競合現象および半周波共振現象について述べている。第6章は、Nd-YAGレーザのモードロッキングに関する検討結果を述べるもので、利得曲線のモードロッキング動作におよぼす影響および安定なロッキングを行うための条件を明らかにすると共に、倍数ビット周波数の位相変調モードロッキングにより、初めてGbit/s領域の繰返しの安定な超高速光パルス発振器を実現した。第7章は結論である。

第2章 Nd-YAGレーザの基本的特性

本章では、第3章以降の本論文に入る前に、Nd-YAG結晶のレーザ材料としての特長および固体レーザ材料の中でその占める位置を把握するために、その物理的性質および分光学的性質について他の固体レーザと比較しながら述べた。また、レーザ発振器を設計する際に重要な、レーザ遷移断面積、結晶の損失係数、飽和パラメータの3つの定数をNd-YAG結晶について実験的に求めた。さらに、レーザの発振効率を向上させるための条件について検討すると共に、本研究で使用したNd-YAGレーザ装置の設計法および試作例について述べた。図1に、試作した一重楕円筒形ならびに球形集光器により、構成されたNd-YAGレーザ装置の入出力特性を示す。

第3章 Nd-YAGレーザの熱効果

本章においては、光ポンピングによってレーザロッド内に発生する熱によって内部に誘起される温度分布、複屈折効果、レンズ効果を表わす一般的な関係を導くと共に、Nd-YAGロッドの熱効果を詳細に測定し、理論値と良く一致することを確かめた。

ロッドの軸が〔111〕であるようなNd-YAGロッドでは、複屈折に対応する屈折率楕円の主軸が径方向および正接方向に一致し、複屈折の大きさはロッドの中心軸から径方向に距離の2乗に比例して増加することが明らかにされた。

また、Nd-YAGロッド中に誘起されるレンズ効果は結晶長に比例して増加し、複屈折効果のためにロッドの径方向および正接方向の偏光に対して異った焦点距離を持つ。このことは、実際にはレンズ収差となって現われる。

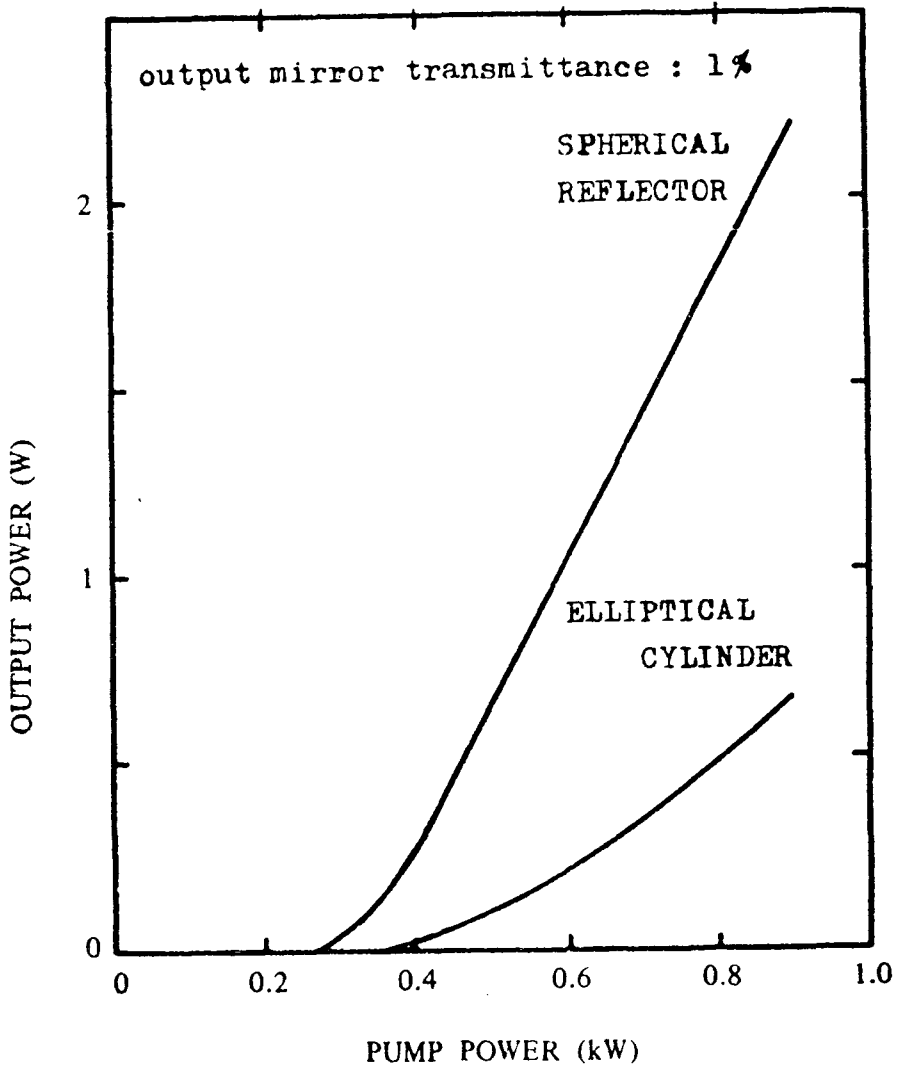


図1. 試作した集光器を用いたYAGレーザの入出力特性

レンズ効果のために、基本発振モード体積が減少するが、図2に示すように共振器の外部鏡の曲率を適当に選ぶことによりモード体積を増加させ、発振の高出力化ならびに安定化を図ることができる。このことよりレンズ状媒質を含むレーザ発振器の基本発振モードの安定性を光線マトリックスおよびGパラメータを使って検討し、安定な発振を得るための共振器の構成法を図3に示す stability diagram により与えた。図3におけるbは、複屈折率効果を考慮したレンズ状媒質の集束係数を表わす。

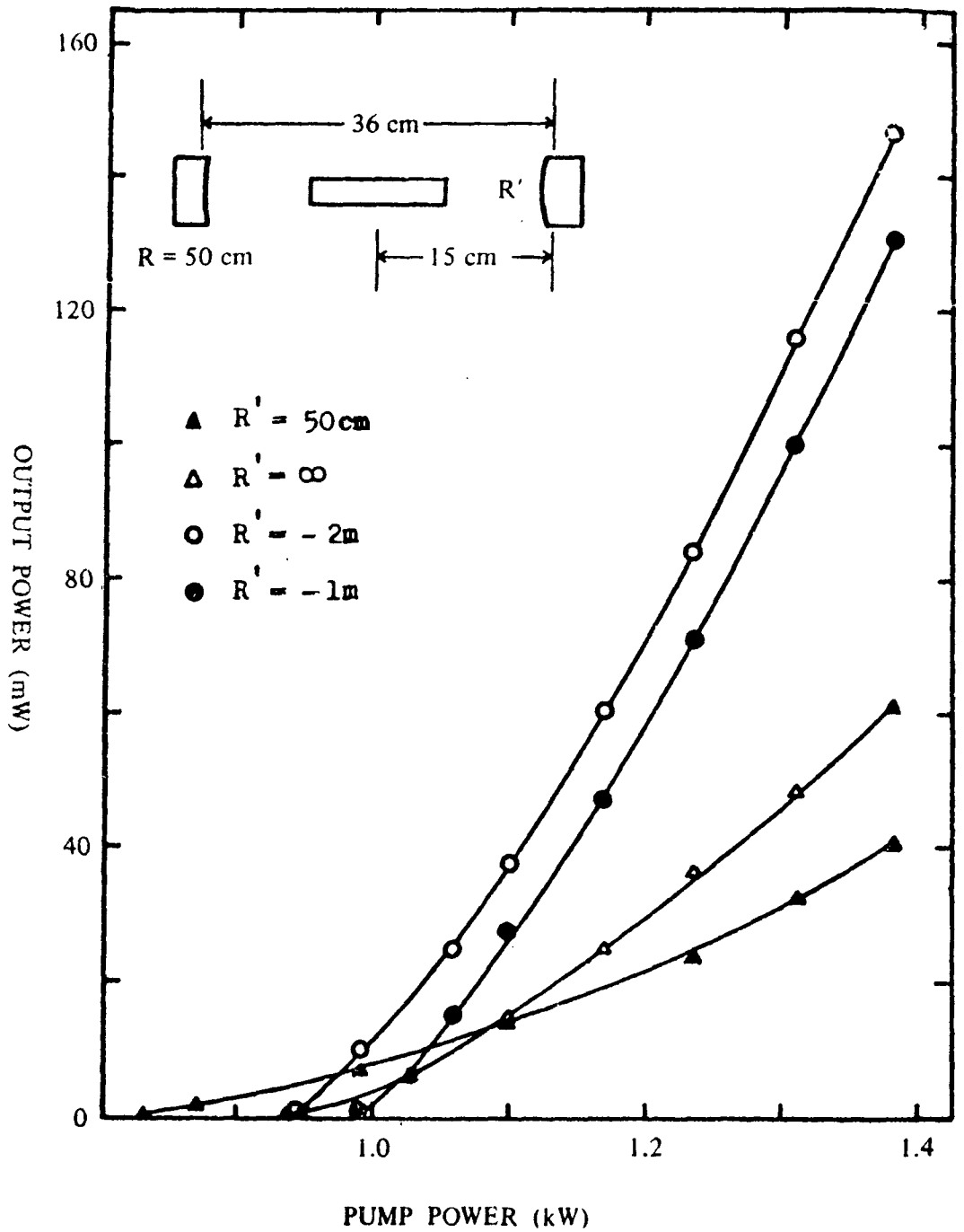


図2. Nd-YAGレーザの入出力特性の反射鏡曲率に対する変化(レンズ効果の補償),
Nd-YAGロッド: $3 \text{ mm } \phi \times 75 \text{ mm}$

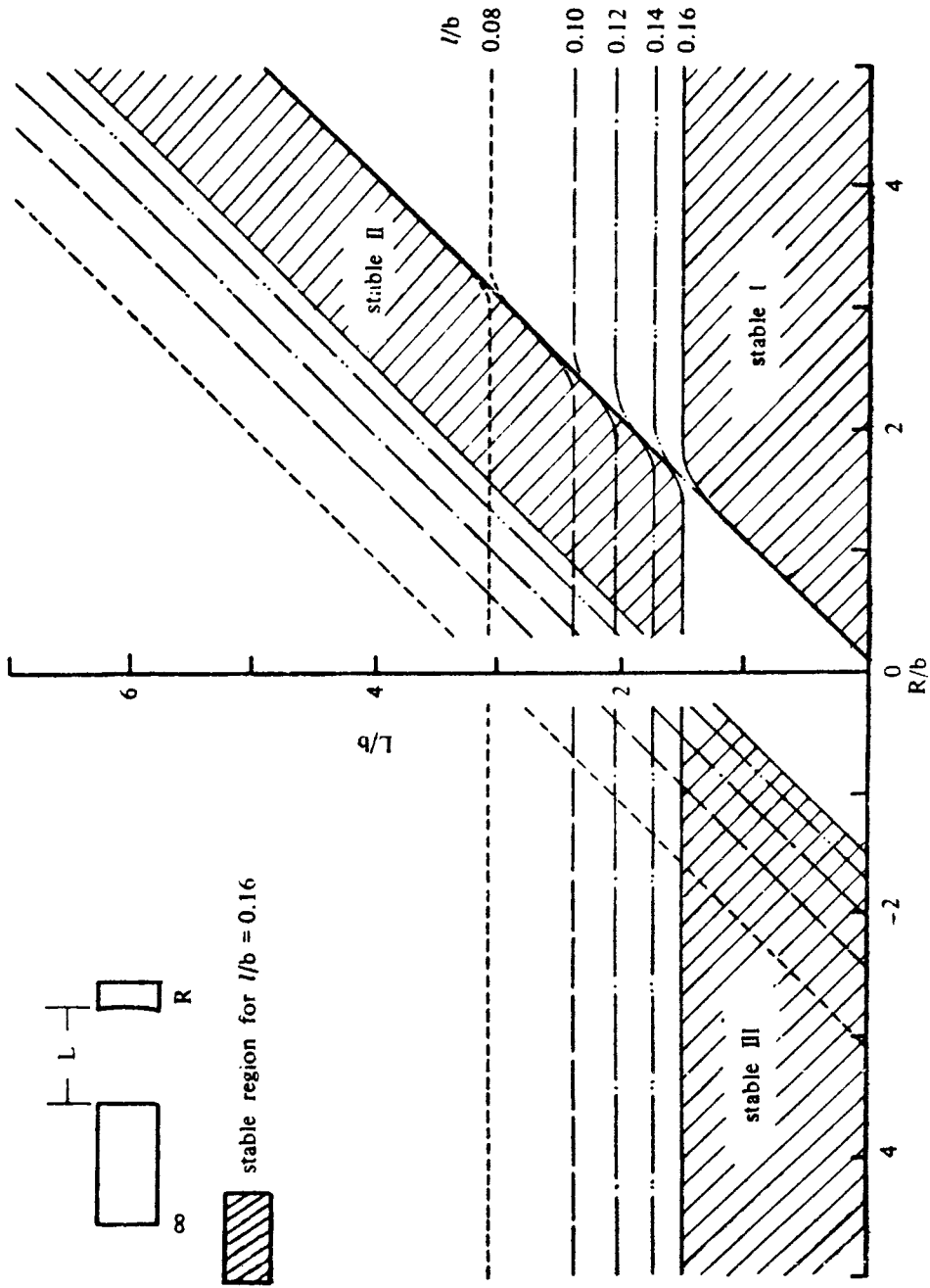


図 3. レンズ状媒質を含むレーザ共振器の安定発振領域の分布

第4章 Nd-YAGレーザーの共振現象

Nd-YAGレーザーの発振強度のふらつきを非線形レート方程式の数値解析により検討し、実験との対応から出力の不安定性の原因となっている緩和振動現象を明らかにした。

レーザー共振器に正弦的な外部変調を加えると、出力が緩和振動の周波数で正弦的に振幅変調をうけ(共振AMモード)、その周波数はポンピングパワーおよび共振器損失に依存して変化することを実験的ならびに理論的に示した。

また、変調周波数を蛍光寿命の逆数の周波数およびその2倍の周波数に選ぶと、Qスイッチに類似したパルス状の変調出力(スパイクモード)が観測された。この共振周波数はポンピングパワーおよび共振器損失には依存せず、蛍光寿命のみに関係することを理論的に裏付けた。

共振AMモードおよびスパイクモードの実測波形と数値解析により計算した波形を、それぞれ図4、図5に示す。

緩和発振はレーザーロッドへの水圧などによる微小な歪み、共振器の振動などを除去し、レーザー共振器への擾乱をなくすることにより充分抑圧することができる。しかし、そのようにして緩和振動を抑圧しても、本章で論じた2種類の共振現象は第6章で述べるモードロッキングの際、ロッキング周波数の離調によって誘発され、モード周期光パルスの振幅変動をもたらすことになる。

第5章 Nd-YAGレーザーの空間的ホールバーニング効果

本章では、まずNd-YAGレーザーの発振スペクトル特性を詳細に測定し、その測定結果と空間的ホールバーニング効果に基づく発振モデルによる理論的解析結果から、4準位固体レーザーにおけるポンピングパワーおよび縦モード周波数間隔と自由発振帯域の関係を示す一般式が得られた。図6はNd-YAGレーザーにおけるポンピングパワーと発振縦モード数の関係を縦モード周波数間隔をパラメータにして示したものである。

次に、Nd-YAGレーザーの最も強い 1.064μ の発振線における発振周波数のふらつきは、利得曲線の非対称性に基づいて発生する2つの発振可能な縦モードグループ(upper mode および lower mode)に対応する反転分布の結晶中での空間的交叉飽和効果により説明できることを実験的ならびに理論的に明らかにした。また、2つのモードグループ間のパワー結合係数を適当に選ぶことにより、発振周波数のふらつきのない安定な発振(双峰性発振)が得られることを示した。理論的解析より求められた発振可能な2つのモードグループおよび実験的に観測された双峰性発振を図7に示す。

次に、発振横モード間の競合に基づく発振スポットの不安定性と半周波共振現象を空間的ホールバーニング効果により説明した。また、高次の横モードの周波数を基本モードのそれと縮退さ

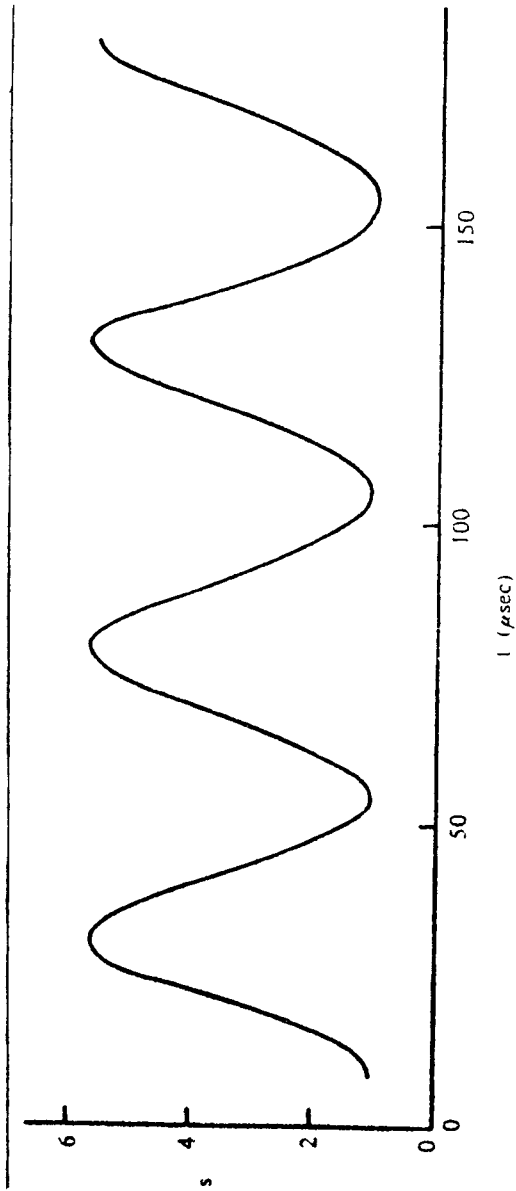
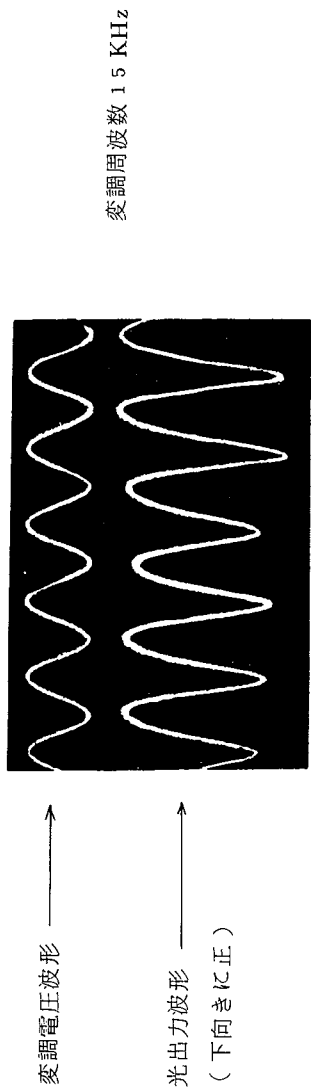
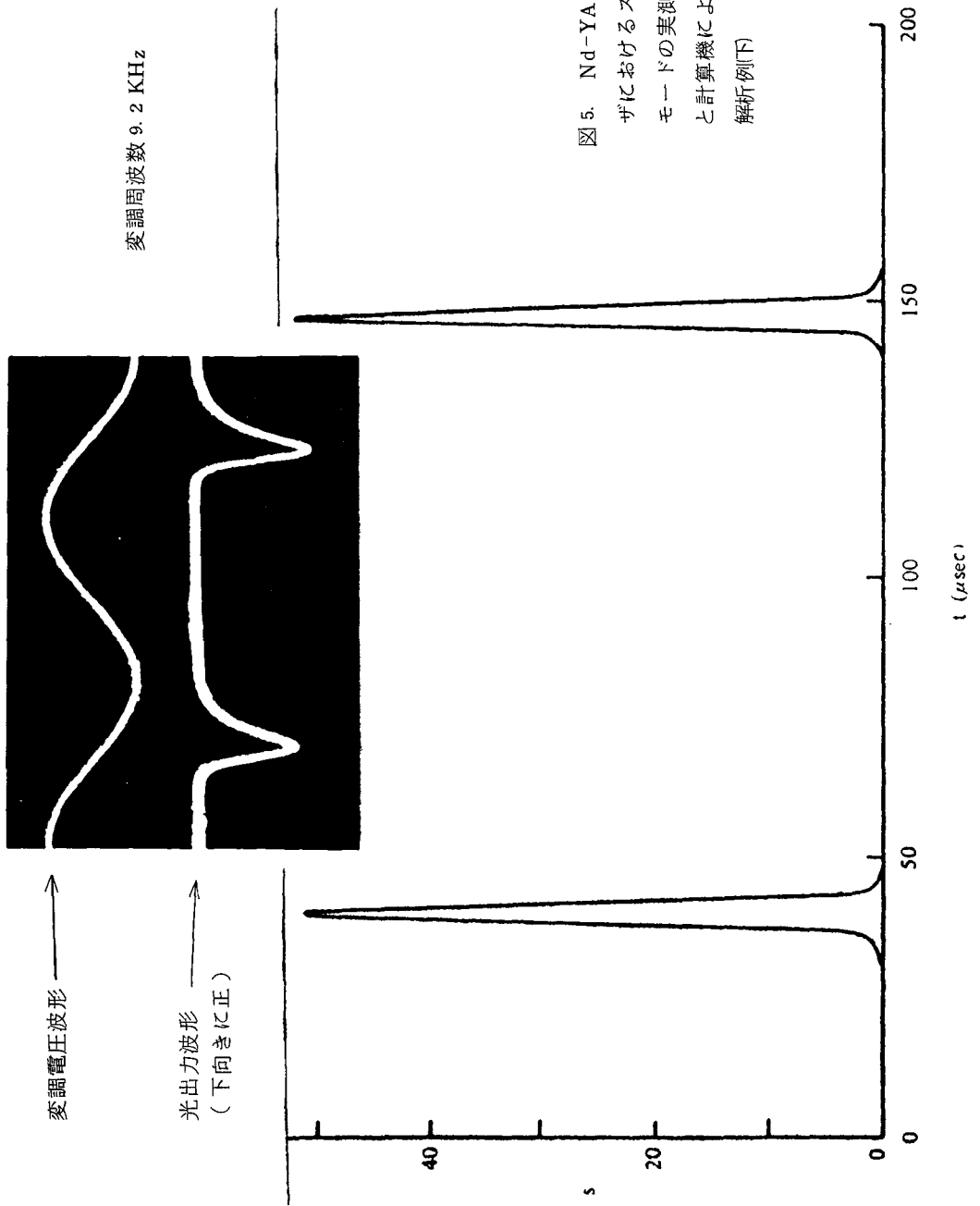


図 4. Nd-YAG レーザにおける共振 AM モードの実測波形 (上)
と計算機による数値解析例 (下)



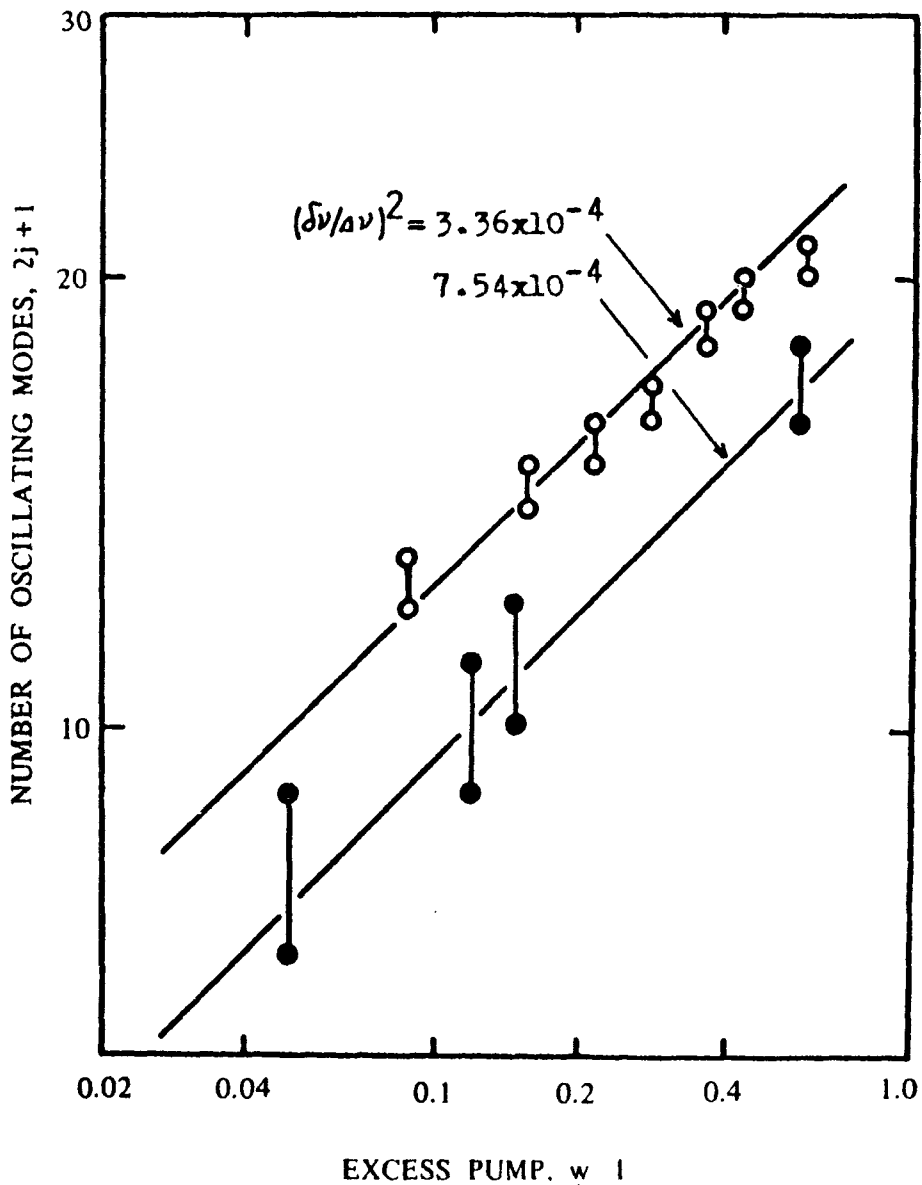


図6. Nd-YAGレーザーにおけるポンピングパワーと発振モード数の関係

せることにより、空間的ホールバーニングを介して、TEM₀₀基本モードで安定に発振させることができることを実験的ならびに理論的に示した。さらに、Nd-YAG結晶を共振器中で光軸に沿って動かすことにより、実験的に観測されている緩和振動と単一縦モード発振の現象が、利得変調効果によって説明できることを理論的に裏付けた。

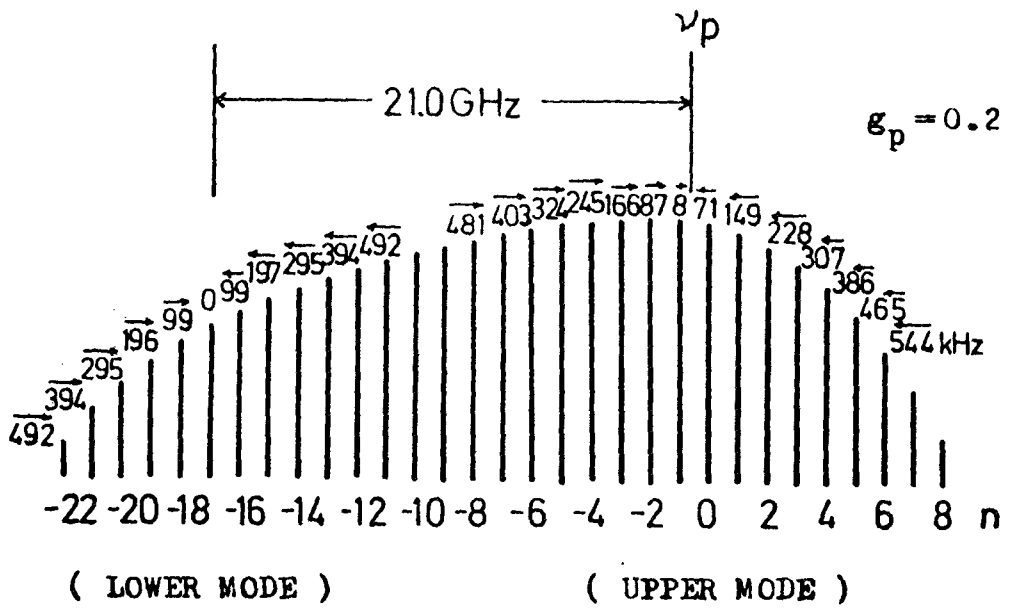
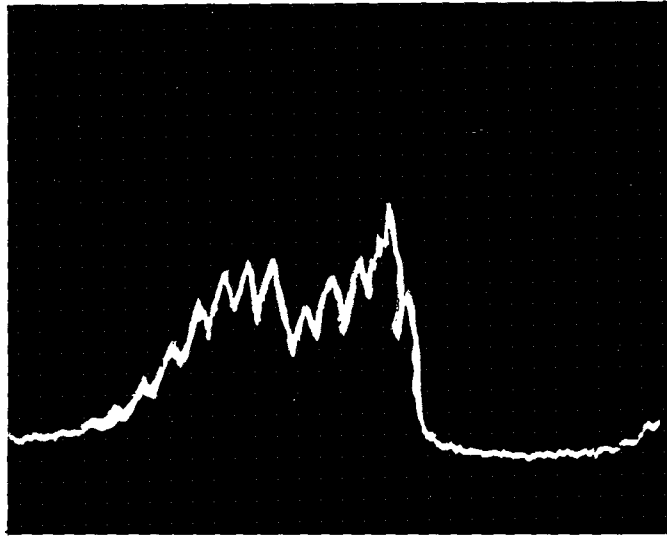


図 7. Nd-YAG レーザにおける双峰性発振のモードスペクトル(上)と周波数プリング(下), 矢印はプリングの方向を示す。

第 6 章 Nd-YAG レーザによる超高速光パルスの発生

第 5 章までの検討結果をふまえて、Nd-YAG レーザのモードロッキングを行い、位相変調による倍数ビット周波数モードロッキングにより、 Gb/s 領域の繰返しの安定なモード同期光パルスを得ることができた。

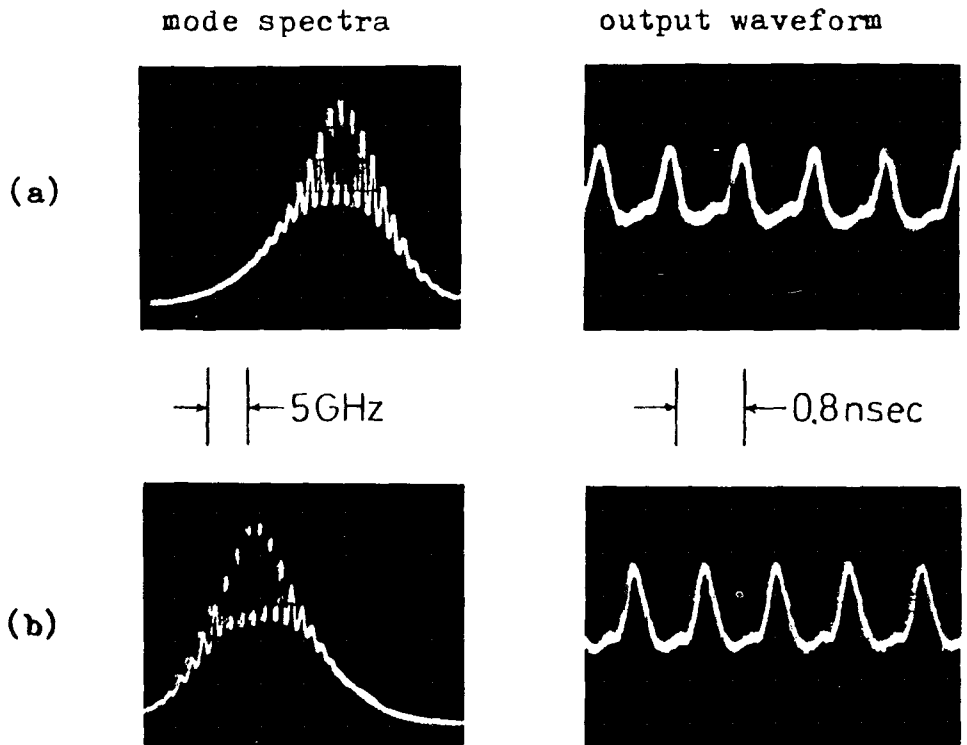
本章ではまず、Nd-YAG レーザにおいては、利得曲線の非対称性によりロッキング可能な 2 つの縦モードグループが存在し、これらのモードグループが第 5 章で述べた upper mode ならびに lower mode に対応すること、および位相変調に特有な光パルス位相の 180° スwitchングを抑制することができることを実証した。互いに独立にモード同期された 2 つのパルスモードの光パルス波形および発振スペクトルを図 8 に示す。

また、変調周波数の最適ロッキング周波数からの離調に伴うパルス位相の変化を実験的に明らかにすると共に、光パルスのキャリア周波数の変化および 2 つのパルスモード間のモードスイッチングを示す周波数離調曲線を得た。図 9 には、離調曲線および実験で確かめたキャリア周波数の変化の様子を定性的に示した。

次に、変調周波数の離調により、第 4 章で述べた低周波共振現象が誘発され、モード同期光パルスが、低周波で振幅変調されて、光パルスの振幅が著るしく不安定になることを実験的に示した。この実験より、安定なモードロッキングを行うためには、クロック信号の発振器としては、 10^{-6} 以下の周波数の安定度が要求されることが明らかになった。

モード同期 Nd-YAG レーザの発振帯域と光パルス幅を測定し、ポンピングパワー w との関係求めた。その結果、これらの値はそれぞれ $(w-1)^{1/3}$ に比例あるいは逆比例することが明らかになった。このことは第 5 章の空間的ホールバーニング効果を導入した理論と良く一致している。

さらに、モード同期 Nd-YAG レーザの共振器中にエタロン板を挿入し、微小回転を行うと、光パルスのキャリア周波数を 100 GHz 程度チューニングすることができることを実験的に示した。この結果は、Nd-YAG レーザを使用して、キャリア周波数の異なる数個の周波数分割多重用のパルス発振器を構成することが可能であることを示すものである。図 10 に $500 \mu\text{m}$ 厚みの BK-7 ガラス製エタロン板による周波数チューニング特性および周波数チューニングされたモード同期パルスと対応するモードスペクトルを示す。



(a) UPPER MODE $f_{du} = 1234.260\text{MHz}$

(b) LOWER MODE $f_{dl} = 1233.840\text{MHz}$

$w = 1.10, \delta_c = 0.05\text{radian.}$

図8. Nd-YAGレーザ発振の2パルス、モードに対する
発振モードスペクトルとモード同期光パルス

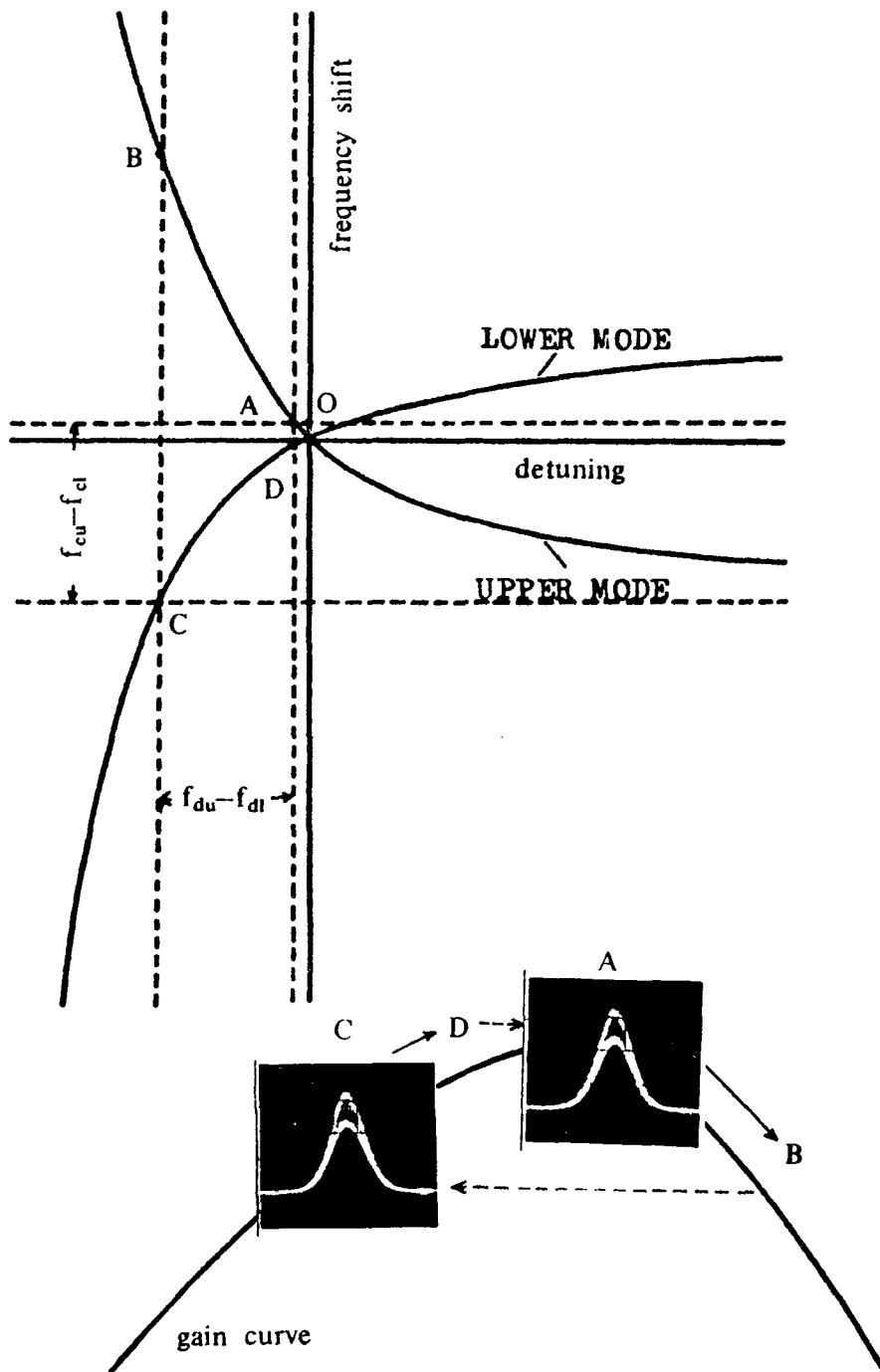


図9. Nd-YAG レーザにおける変調周波数離調曲線(上)とキャリア周波数のジャンピング(下)

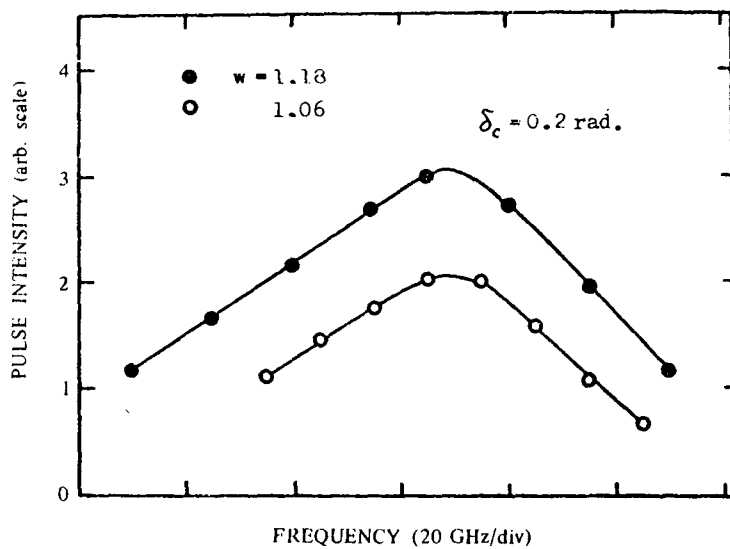


図 10. (a) モード同期Nd-YAGレーザのキャリア周波数
 チューニング特性

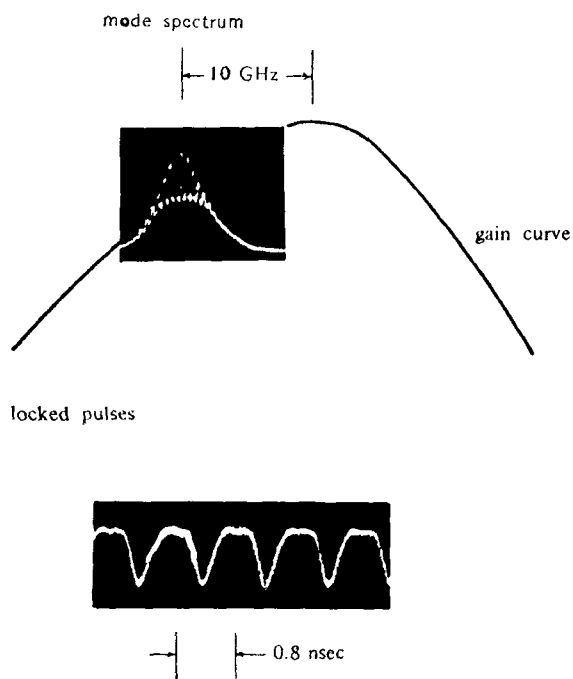


図 10. (b) キャリア周波数の制御されたモード同期Nd-YAG
 レーザのモードスペクトル(上)と光パルス波形(下)

第7章 結 論

本論文は光伝送用のホスト形固体レーザとして有望なNd-YAGレーザの動作特性を解明し、モードロッキングにより安定な超高速光パルス発振器を実現することを目標にして行った研究結果をまとめたものである。まず固体レーザのモードロッキング動作に直接関係する基本的問題を扱った。すなわち、レーザ共振器の不安定性をもたらす熱効果、発振強度の不安定性の原因となっている緩和発振および低周波共振現象、発振スペクトルの不安定性および発振モード特性を決定する空間的ホールバーニング効果を取上げ、理論的ならびに実験的検討を行い、固体レーザの動作特性について統一的な知見を得た。次に以上の検討結果をふまえてNd-YAGレーザのモードロッキングの実験を行い、倍数ビット周波数の位相変調モードロッキングにより初めてGbit/s領域の繰返しの安定な超高速光パルス発振器を実現すると共に、レーザの利得曲線の形がモードロッキング動作と密接な関係にあることを指摘した。

文 献

- (1) J. E. Geusic, H. M. Marcos, and L. G. Van Uitert, "Laser Oscillations in Nd-Doped Yttrium Aluminum, Yttrium Gallium and Gadolinium Garnets," *Apple. Phys. Letters*, vol. 4, p. 182, May 1964.

審査結果の要旨

大容量通信回線に対する需要は、情報化社会の発展と共に急速に増大し、そのためレーザを用いた光通信の実用化が広く期待されている。しかし、大容量光伝送システムに適合した広帯域で、安定かつ長寿命の固体レーザ発振器の動作特性の解明は未だ不十分で、設計法も殆んど確立されていない。

著者はこのような観点から、3価のNdイオンを含むイットリウム・アルミニウム・ガーネット(YAG)の結晶を用いる固体レーザに注目し、その発振波長が光ファイバーの最低損失伝搬帯にあり、しかも高出力という長所をふまえて、広帯域大容量符号伝送用発振器を実現するための超高速光パルスの発生法と動作諸特性を詳細に研究してきた。本論文はその研究成果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、Nd-YAG結晶の材料的、分光的特性を究明して、レーザ用材料として極めて優れていることを明らかにすると共に、本結晶を用いるレーザ装置の基本的設計法を論じている。

第3章では、Nd-YAGレーザで発生するモード同期光パルスの不安定性の原因となっている、ポンピング光の熱作用によって結晶内に生じるレンズ効果と複屈折効果について実験的ならびに理論的に詳細に検討している。これらの現象は従来定量的に解明されていなかったもので、その結果にもとづいて発振出力の低下を補償して、安定な共振器を実現するための最適設計法を明らかにしたことは、高く評価される。

第4章は、外部からの機械的、熱的な摂動によって誘起される固体レーザの緩和発振にともなう不安定性とその抑止方法を述べたものである。そのため、Nd-YAGレーザの発振強度と位相のふらつきを非線形レート方程式を用いて数値的に解析し、実験結果との対応から出力の不安定性の原因を分類し、その対策を提示している。

第5章では、Nd-YAGレーザの発振スペクトル特性を精密に測定し、モード同期光パルスの帯域幅、発振モード数、発振出力間の関係および発振モードの不安定性は空間的ホールバーニングの効果を考慮した発振モデルによって十分説明できることを解明している。この結果は縦モード間の電力結合係数を調整することによって安定なパルス発振を得る新しい設計法を導くもので、有用な知見である。

第6章では、前章までの結果にもとづいて行ったNd-YAGレーザのモード同期発振の実験結果を詳細に記述している。利得曲線のモード同期発振に及ぼす影響および安定な動作を行うため

の条件を総合的に明らかにして、Gビット領域の繰返しの安定な超高速光パルス発振器を実現したことは、すぐれた成果といえる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、大容量光伝送用の超高速光パルス発振器として実用上注目されているNd-YAGレーザの設計、試作に必要な豊富な資料を提供すると共に、発振出力の不安定性の要因を実験的、理論的に追究し、その発生機構を定量的に解明して、いくつかの重要な知見を加えたものであって、電子工学ならびに光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。