

JAERI-Tech
99-060



JP9950534



レーザー結晶の特性評価技術の開発
(共同研究)

1999年8月

田村浩司・有沢 孝

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

レーザー結晶の特性評価技術の開発

(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所物質科学部

田村 浩司・有沢 孝⁺

(1999年7月13日受理)

良質のレーザー用結晶の引き上げ育成を行うために、チタンサファイア結晶の光学的特性を測定してその評価法を確立した。引き上げ条件を変えて育成された3種類のチタンサファイア結晶について、吸収スペクトル、励起光吸収波長と発振波長での線吸収係数、蛍光スペクトル、発振特性、增幅特性、レーザーによる結晶の損傷などについて測定を行い、育成結晶のレーザー媒質としての特性を総合的に評価した。

本報告は、原研と東ソー株との共同研究の成果である。

東海研究所：319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

⁺ 関西研究所光量子科学部研究センター

Measurements of Laser Crystal Properties (Joint Research)

Koji TAMURA and Takashi ARISAWA⁺

Department of Materials Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 13, 1999)

In order to grow a laser crystal with good optical properties, experimental techniques to measure optical properties of Ti:sapphire crystal were developed. For three crystals grown at different conditions, optical properties such as absorption spectra, linear absorption coefficient at pump wavelength and oscillation wavelength, fluorescence spectra, oscillation properties, amplification gain and damage threshold by laser irradiation were measured. Based on these measurements, methods to estimate optical properties of a laser crystal were developed.

Keywords: Ti:sapphire, Absorption Spectra, Linear Absorption Coefficient,
Fluorescence Spectra, Crystal Damage

This research is a result of joint study between JAERI and Toso Co. Ltd.

⁺ Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

目次

1.はじめに	1
2.結晶育成条件	1
3.第1回成長結晶	1
3.1 吸収特性	1
3.2 蛍光スペクトル	2
3.3 傷、気泡の観察	3
4.第2回成長結晶	3
4.1 吸収特性	3
4.2 発振特性	3
4.3 増幅特性	4
4.4 励起光による損傷	4
5.第3回成長結晶	5
5.1 吸収特性	5
5.2 発振特性	6
5.3 増幅特性	6
5.4 励起光による損傷	6
6.まとめ	7
謝辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Crystal Growth Condition	1
3. Crystal No.1	1
3.1 Absorption Properties	1
3.2 Fluorescence Spectrum	2
3.3 Observation of Defects and Bubbles	3
4. Crystal No.2	3
4.1 Absorption Properties	3
4.2 Oscillation Properties	3
4.3 Amplification Properties	4
4.4 Damage by Pump Laser	4
5. Crystal No.3	5
5.1 Absorption Properties	5
5.2 Oscillation Properties	6
5.3 Amplification Properties	6
5.4 Damage by Pump Laser	6
6. Conclusion	7
Acknowledgement	7
References	7

1. はじめに

チタンサファイア結晶は利得領域の広いレーザー用結晶であり、高分解能分光、レーザー同位体分離¹⁾、短パルスレーザー、X線レーザー発生用光源等に用いられている。しかし、チタンサファイア結晶は国内では良質なものが育成できず輸入品に依存している。チタンサファイアレーザーの将来の広範囲な利用を考えると、その国産化が望ましい。このようなレーザー用結晶を育成した場合、そのレーザーとしての特性を評価する必要がある。そのため、レーザー光の吸収特性、発振特性、增幅時の利得、光学的損傷しきい値などさまざまな項目を測定し、その物性を総合的に判断できる技術を開発する必要がある。

本報告では、レーザー用結晶評価法の確立を目指し、チタンサファイア結晶を育成し、そのレーザー媒質としての特性を測定した。測定は吸収スペクトル、励起光と発振光の波長における線吸収係数、蛍光スペクトル、表面と内部の観察、発振特性、増幅特性、レーザー光照射による損傷などについて行った。

なお、本報告は東ソー(株)との共同研究「チタンサファイアロッドの分光特性に関する研究」として行った成果をまとめたものである。

2. 結晶育成条件

チタンサファイア結晶はアルミナ (Al_2O_3) 単結晶中に Ti^{3+} イオンをドープしたものである。アルミナはコランダム構造であり、アルミニウム原子は 3 層、酸素原子は 2 層をそれぞれ周期として c 軸方向に交互に存在している。 Ti^{3+} イオンは Al^{3+} イオンと置換し、3 回対称サイトを占める。

育成された結晶はいずれも東ソー(株)によって、チョクラルスキーフ法により引上げられたものである。るっぽはイリジウム製 (50 mm φ × 50 mm) で引上げ速度は 0.4~1.0 mm/hr、回転速度は 4~60 rpm であり、アルゴンと水素の混合ガス雰囲気下で育成された。

3. 第1回成長結晶

第1回成長結晶(結晶1)は、チタンイオン濃度 0.05 wt %、結晶サイズは 4 mm 角 × 17.7 mm でありブリュースターカットはされていない。

3. 1 吸収特性

引き上げ結晶の励起光の吸収や発振領域の吸収を評価するためには吸収特性を測定する必要がある。吸光光度計（島津㈱製 UV-2100）を用いて結晶の吸収スペクトルを測定した。結晶前面にアパチャードを配置し、結晶中のみ測定光が通過するようにした。偏光板を光路に取り付けることにより、入射光の偏光面がアルミナ結晶のc軸と平行な場合（ π 偏光（図1(a)））と垂直な場合（ σ 偏光（図1(b)））での吸収スペクトルを測定した。 π 、 σ 偏光とも最大吸収波長は約490 nmであり文献値²⁾とほぼ一致した。

次に励起光の吸収波長（532 nm）と発振波長（800 nm）における線吸収係数を測定した。実験配置を図2に示す。532 nmでの測定はヤグレーザーの第2高調波を用い、800 nmでの測定はダイオードレーザーを用いて行った。パワーメーターにより入射光、透過光、反射光の各強度を測定した。透過光と入射光の強度比は今回の入射光強度範囲（7~250 μ J）では、 π 偏光、 σ 偏光ともほぼ一定であった。レーザー光の反射については、反射光と入射光の強度比を測定してその反射率を求めた。垂直方向での反射率は σ 、 π 偏光ともに0.08であった。これは、空気（n=1）とチタンサファイア結晶（n=1.76）の屈折率から計算で求めた反射率（8%）と一致した。このレーザー光の反射を入射面、出射面で考慮して正味の線吸収係数を求めた。 π と σ 偏光での線吸収係数はそれぞれ532 nmで0.91 cm⁻¹と0.40 cm⁻¹であり、800 nmで0.11 cm⁻¹と0.19 cm⁻¹であった。レーザー結晶の特性の指標となるfigure of merit (FOM)は532 nmの線吸収係数と800 nmの線吸収係数の比で定義されるが、これは8.6と小さかった。

比較のため市販結晶（ユニオンカーバイト社製）でも π 偏光での線吸収係数の測定を行った。同じ方法で得られた線吸収係数は532 nmで2.7 cm⁻¹、800 nmで0.035 cm⁻¹でありFOMは77となった。これはこの結晶のデータシートの値（80）とほぼ一致しており、本測定の妥当性を示している。

結晶1の800 nmでの吸収は市販結晶よりも大きく、残留赤外吸収がかなり残っていることを示す。また、532 nmの吸収は小さいため発振したとしても高い利得は望めないことがわかる。

3. 2 蛍光スペクトル

ヤグレーザーの第2高調波で結晶を励起し、分光器でその蛍光スペクトルを測定した。実験配置を図3に示す。検出には光電子増倍管（浜松フォトニクス社製 700K）を用い、出力をボックスカーリング積分器により平均化しレコーダーで記録した。蛍光に関しても π 偏光と σ 偏光について測定を行なった。光軸や入射光強度を変えないため、入射光の偏光は結晶を回転することにより変えた。分光器のスリット幅は500 μ mとした。出力に対して光電子増倍管の波長による感度補正を行った。得られた π 偏光、 σ 偏光での蛍光スペクトルを図4(a), (b)に示す。蛍光のピークは730 nmにあり文献値³⁾と一致している。

3.3 傷、気泡の観察

光学顕微鏡により結晶表面の観察を行なったところ約 $100\mu\text{m}$ 程度の表面の傷が見られた。また、ヤグレーザー光を結晶に入射し、側面からカメラにより観察したところ、気泡によるレーザー光の散乱が無数に観察された。気泡数の定量的評価は難しいが、この散乱はレーザー発振を行なう場合には大きな損失になると考えられる。

このように結晶 1 の FOM は低く散乱による損失も大きいため発振は不可能であった。気泡を減らすことにより散乱を減らし、532 nm の吸収を増し、800nm の残留赤外吸収を減少させることが必要であるとわかった。

4. 第 2 回成長結晶

第 2 回の引き上げ結晶（結晶 2）では、結晶 1 において顕著であった残留赤外吸収を減らす為に、還元雰囲気下でポストアニール処理を施した。また、気泡の混入を減らすために引上げ速度は結晶 1 に比べ遅くしてある。結晶サイズは 4.4 角 \times 25 mm、チタンイオン濃度は 0.05wt% であり、ブリュースターカットはされていない。

4.1 吸収特性

結晶 1 と同様に、 π と σ 偏光の吸収スペクトルを測定した（図 5 (a), (b)）。最大吸収波長は約 490nm であり、結晶 1 と同様のスペクトル形状であった。

同様に、532nm と 800 nm での線吸収係数を測定した。 π と σ 偏光で 532 nm では 0.702 cm^{-1} と 0.32 cm^{-1} 、800 nm では 0.033 cm^{-1} と 0.034 cm^{-1} であった。結晶 2 ではポンプ光の散乱は、ほとんど見られなかった。レーザー発振域である近赤外域での吸収は発振を困難にするが、結晶 2 では結晶 1 と比べ大きく減少した。FOM は 21 と前回の値よりも増加しており発振が可能であった。しかし、可視領域での吸収も結晶 1 に比べ小さくなっている、大きな利得は望めない。

4.2 発振特性

結晶 2 をレーザー媒質とし、分散素子のない二枚の平面鏡間での発振特性を測定した。実験配置を図 6 に示す。共振器長は 14.3 cm で全反射鏡、部分反射鏡ともに平面鏡である。ポンプ光は焦点距離 1 m のレンズで集光したのち共振器内に導入した。部分反射鏡は中心波長 750 nm での反射率が 98%、95%、90%、80%、70%、50% のものを用いた。結晶への入射ビーム径はバーンパターンから 0.0275 cm^2 であった。ヤグレーザーの偏光は結晶 c 軸と平

行にした。励起光の入力エネルギーは全反射鏡通過後の正味の値を用いた。出力光強度はパワーメーターにより測定した。

部分反射鏡の反射率 80%で得られた発振パルス波形を図7に示す。ヤグレーザーから54nsec 遅れて発振パルスが観測された。半値幅は 14nsec、パルスのジッターは約 8nsec であった。発振レーザー光のビーム径は 0.0192 cm^2 であった。各反射率での入出力特性を図8に示す。この結果から、発振しきい値とスロープ効率を表1にまとめる。近赤外の吸収が少ないため発振しきい値は小さかった。波長分散素子のない発振状態でのレーザースペクトルを分光器により測定したところ、結晶の利得の最も大きい 780 nm を中心に 50 nm 程度のスペクトル幅となっていることがわかった。

高分解能分光や同位体分離用光源などでは、スペクトル幅の狭い発振光が必要とされるため、共振器内損失の大きい斜入射型共振器を用いる場合も考えられる。このような発振が可能か調べるため、斜入射型共振器を用いて発振を試みた。実験配置を図9に示す。共振器は、回折格子（1800 l/mm）、チューニングミラー、全反射鏡から構成される。励起光入力 1.6 J/cm^2 (ビーム径 0.04 cm^2) で励起光から 40 nsec 遅れたレーザーパルスが観測された。反射などの損失が大きく発振効率が低いため、励起光入力 2.1 J/cm^2 (65 mJ) での出力は 0.12 mJ と少なかった。

4.3 増幅特性

発振レーザー光は励起したチタンサファイア結晶により増幅することができる。この増幅特性は結晶の利得を測定することにより評価できる。図10の実験配置で結晶2の小信号利得を測定した。斜入射型チタンサファイア共振器からのレーザー光出力を π 偏光でプローブ光として結晶2に入射させ、ポンプ光により縦励起することにより増幅させ、出力光を測定した。結晶入射前のプローブ光強度 (I_0) 及び増幅されたレーザー光強度 (I) をそれぞれ測定した。利得 G は、

$$I = I_0 \exp(-\alpha L) \exp(GL)$$

に従い求めた。ここで α は発振波長でのレーザー光の線吸収係数 (cm^{-1})、 L は結晶長 (cm) である。正味のレーザー出力を 0 に外挿して求めた利得を小信号利得 g_0 として求めた。その結果、ポンプ光密度 2.3 J/cm^2 の小信号利得は 0.37 となった。

比較のため、市販結晶(ユニオンカーバイド社製、チタンイオン濃度 0.15 %、532 nm と 800 nm の線吸収係数はそれぞれ 1.9 cm^{-1} と 0.05 cm^{-1}) についても同条件で小信号利得を測定したところ 0.58 であった。結晶2は市販結晶と比べ、チタン濃度が低いため利得が小さくなっている。

4.4 励起光による損傷

励起レーザー光の焦点に結晶を近づけてその損傷しきい値を調べた。励起光の密度が約 6 J/cm^2 程度から損傷が観察された。高い增幅特性を得るには励起光の密度を高める必要があるため、より高い損傷しきい値が望まれる。

損傷の様子を走査型電子顕微鏡（日本電子株製 Superprobe733）により観察した。加速電圧は 19 kV で観察を行なった。図 1 1 (a) は約 8 J/cm^2 のポンプ光により生じた損傷の様子である。中心部はポンプ光の熱により溶融し、粒状になっていることがわかる。同条件でさらに長時間照射すると結晶表面が剥離した (図 1 1 (b))。

5. 第 3 回成長結晶

結晶 2 は加熱処理により近赤外域の吸収が減り結晶特性が向上した。一方、可視域の吸収も減ったため、高い利得が得られない点や、損傷しきい値が低い点などの問題も残っていた。第 3 回成長結晶（結晶 3）のチタン濃度は結晶 1 や 2 よりも増した (0.15 wt%)。結晶サイズは 3.6 mm 角 \times 15 mm であり端面はブリュースターカットされている。レーザー光を照射すると、表面でのレーザー光の散乱がまだ見られている。この散乱は輸入結晶ではほとんど見られない。これは育成結晶表面の研磨状態が輸入結晶に比べ劣っていることに起因する。また、結晶内部にはまだ気泡が存在しているため、レーザー光を照射すると気泡による散乱が見られる。これは結晶 2 よりも顕著になっていた。

5.1 吸収特性

図 3 と同様の実験配置で、励起光波長 (532nm) と発振波長 (780nm) での線吸収係数の測定を行なった。結晶 1 と 2 では、偏光を変えた測定 (σ 、 π 偏光) を行なったが、結晶 3 では端面がブリュースターカットされているため、 π 偏光でのみ測定した。結晶表面でのレーザー光の反射は、ブリュースターの条件により極めて小さいため (1%以下) 無視した。

532 nmにおいて、入力光強度が数 $10 \mu\text{J}$ から数 $100 \mu\text{J}$ の範囲での入力光と出力光の強度比はほぼ一定の 0.042 であった。これから 532 nm における線吸収係数は 2.1 cm^{-1} と得られた。結晶 2 (0.70 cm^{-1}) と比べ、チタン濃度の増加に伴い線吸収係数が増加していることがわかる。

発振波長 (780nm) での線吸収係数の測定も入力レーザー光強度約 50 mW で行なった。レーザー光の結晶表面での反射は、ブリュースターの条件によりこの場合もほとんど見られず無視できた。この結果から、出力光と入力光の強度比は 0.84、吸収係数は 0.12 cm^{-1} と得られた。前回よりチタン濃度が上昇したことに伴い、赤外域の吸収も増加している。FOM は 18 であった。

5.2 発振特性

図6のように、結晶3を2枚の平面鏡間に配置してレーザー発振を試み、その発振特性を測定した。部分反射鏡の反射率が98%、95%、90%、80%、70%、50%の6種類で試みた。共振器長は88 mmである。励起はヤグレーザーの第2高調波を用い、縦励起で行なった。励起光はアパチャードで絞り、焦点距離1000 mmのレンズで集光して結晶に入射させた。結晶表面での励起光のビーム径は0.022 cm²である。結晶3はブリュースターカットされているため、結晶2に比べ同じ投入エネルギーでの結晶表面のレーザー光密度は低い。

発振特性を図12に示す。今回の励起光入力条件では、98%から80%の部分反射鏡では発振が可能であったが、70%と50%では発振しなかった。結晶手前の全反射鏡に損傷を生じるため、これ以上の励起光入力は不可能であった。各部分反射鏡での発振しきい値とスロープ効率を表2にまとめる。98%は最も発振しきい値が低く、80%が最もスロープ効率が高い。結晶2に比べ、FOMの低下や結晶中の気泡などにより発振しきい値は高く、スロープ効率は低くなっている。

図9に示す斜入射型共振器で発振特性を調べた。ポンプ光入力約45 mJからレーザー発振が観察された。この共振器での励起光入力とレーザー出力との関係を図13に示す。励起光入力に対してほぼ直線的に共振器出力が得られている。この場合の発振しきい値は約1.7 J/cm²であった。

5.3 増幅特性

図10に示す配置で結晶3の増幅利得を測定し、同じチタン濃度(0.15%)の市販結晶(ユニオンカーバイト社製)と比較した。図14に得られた小信号利得のポンプ光密度依存性を示す。この結果から結晶3は同じチタン密度の市販結晶よりも高い利得を持っていることがわかる。同じ励起光入力条件(2.3 J/cm²)で比べると、市販結晶の0.58、結晶2の0.37に対して、結晶3は1.5と結晶2に比べ大幅に利得が増加していることがわかった。

5.4 励起光による損傷

ヤグレーザーの焦点に結晶3を近づけていくことにより、ダメージしきい値を評価した。ヤグレーザーのパルスエネルギーは48 mJで、焦点距離350 mmのレンズで集光したもの結晶表面に垂直に入射させた。約8 J/cm²から結晶が損傷し始めた。このことから、損傷しきい値は結晶2よりも向上していると考えられる。

6. まとめ

3種類の異なった条件で引き上げられたチタンサファイア結晶について、吸収特性、蛍光スペクトル、発振特性、増幅特性、励起光による損傷等の測定を行った。結晶1では光学的特性が悪くレーザー発振はできなかったが、結晶2では光学的特性の向上に対応してレーザー発振が可能となった。結晶3では結晶1、2に比べチタン濃度を増加させたために励起光の吸収や增幅利得が大幅に増加し、斜入射型共振器でも発振が可能となった。

これら測定により、育成された固体レーザー用結晶のレーザー媒質として必要とされる特性を評価する技術を確立することができた。

謝辞

本実験にあたり、清水徳氏に御協力いただきました。ここに心から感謝いたします。

参考文献

- 1) Tamura K., Ohba M. and Shibata T.: Appl. Opt., 32, 987 (1993).
- 2) Wall K.F., Aggarwal R.L., Faley R.B. and Traus A.J.S.: IEEE J. Quantum Electron., 24, 1016 (1988).
- 3) Moulton P.F.: J.Opt.Soc.Am.B3, 125 (1986).

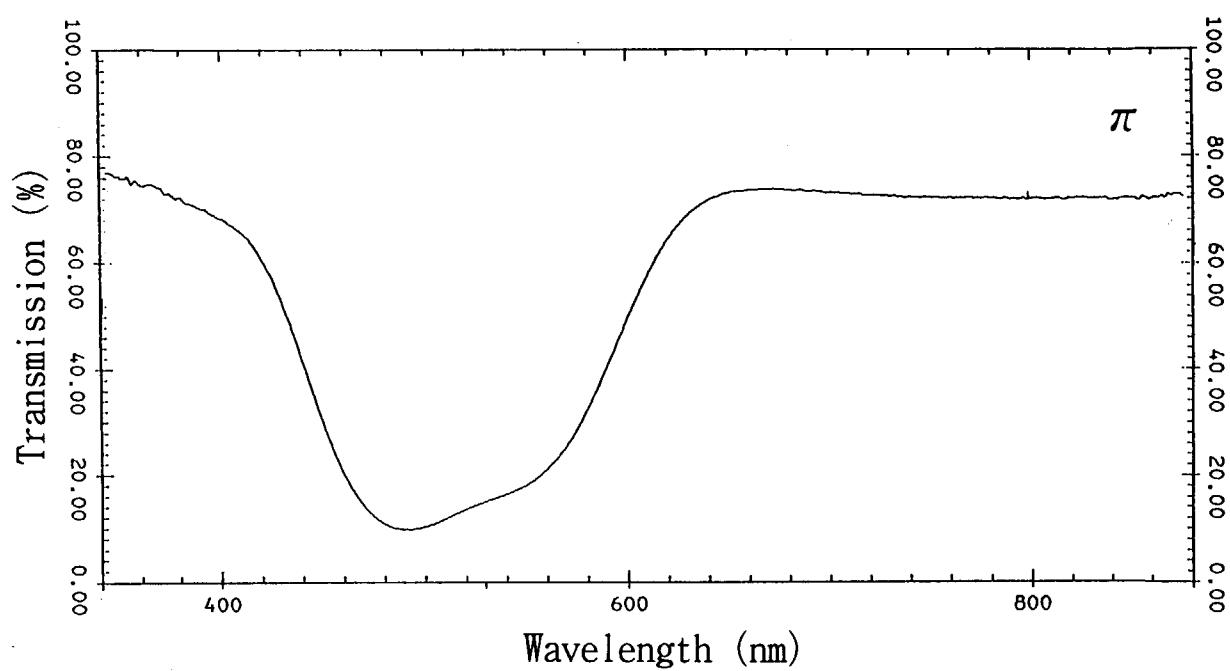
表1 結晶2の発振しきい値とスロープ効率

Reflection	Pth (J/cm ²)	Slope efficiency
98	0.163	0.056
95	0.29	0.172
90	0.349	0.383
80	0.353	0.314
70	0.391	0.339
50	0.574	0.223

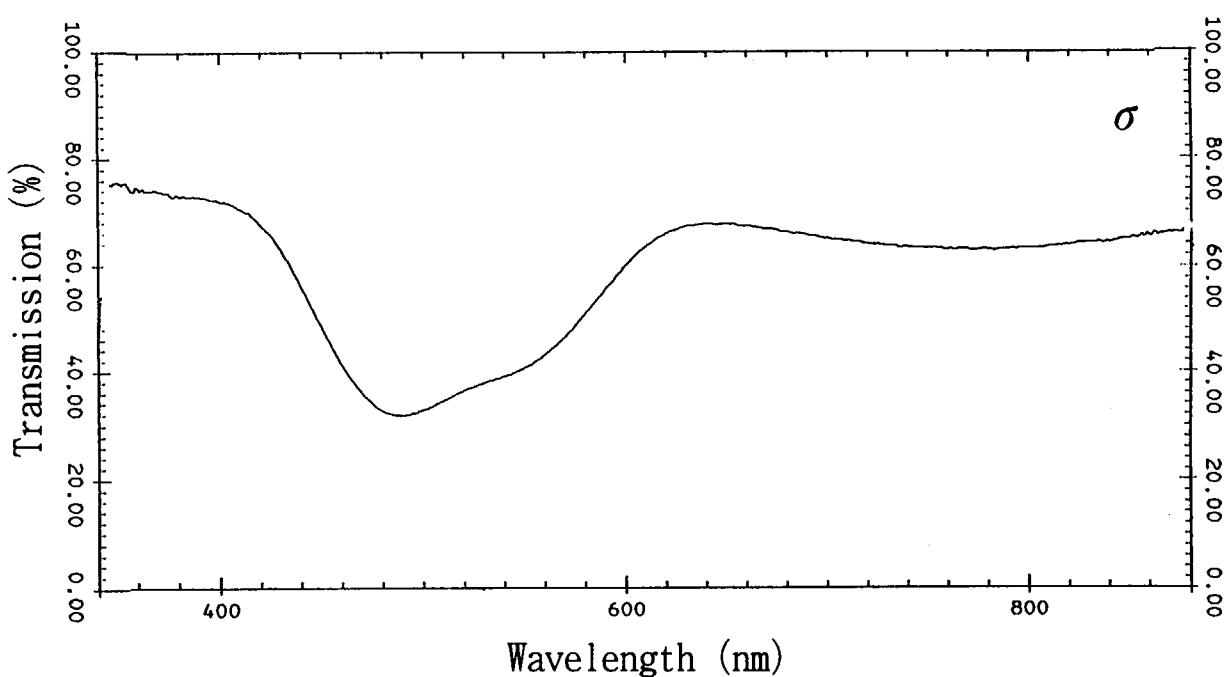
表2 結晶3の発振しきい値とスロープ効率

Reflection	Pth (J/cm ²)	Slope efficiency
98	0.48	0.024
95	0.52	0.076
90	0.56	0.124
80	0.87	0.205

(a)



(b)

図1 結晶1の π 偏光(a)と σ 偏光(b)における吸収スペクトル。

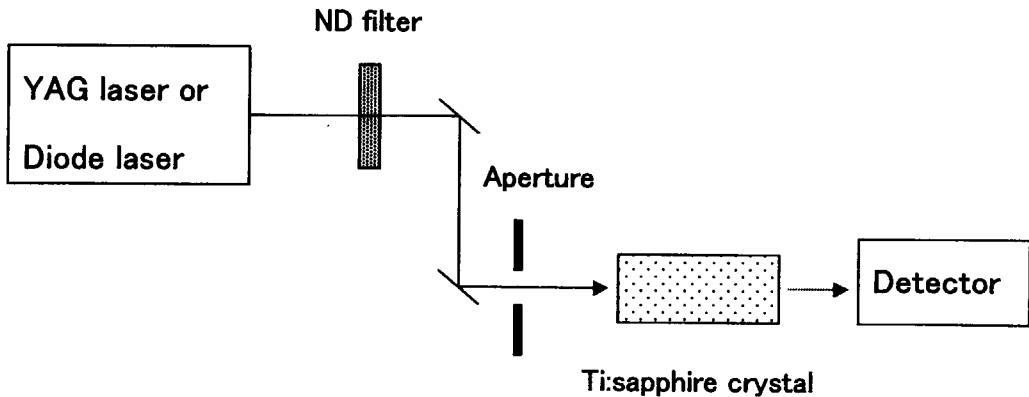


図2 線吸収係数測定の実験配置。

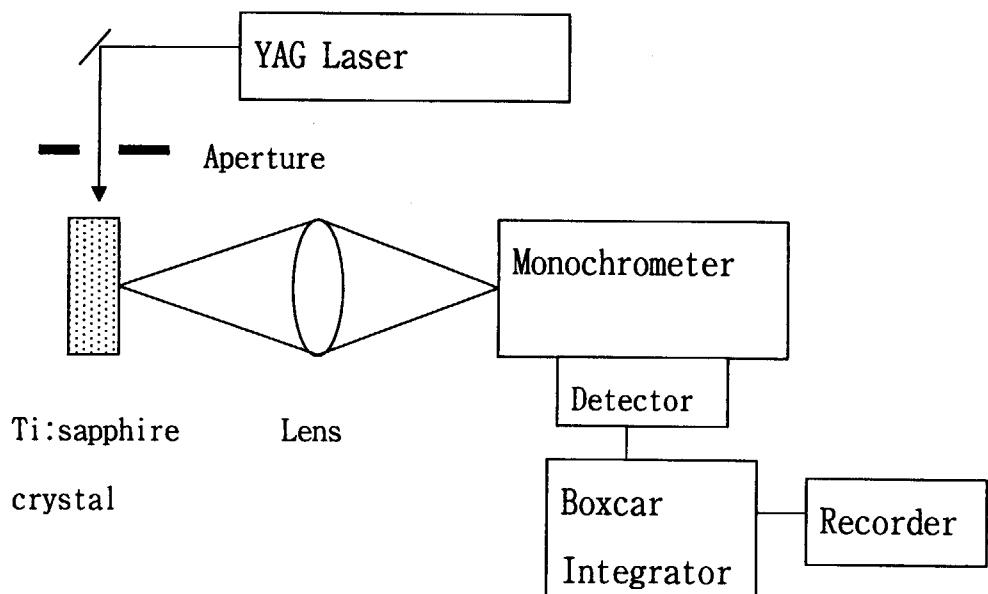
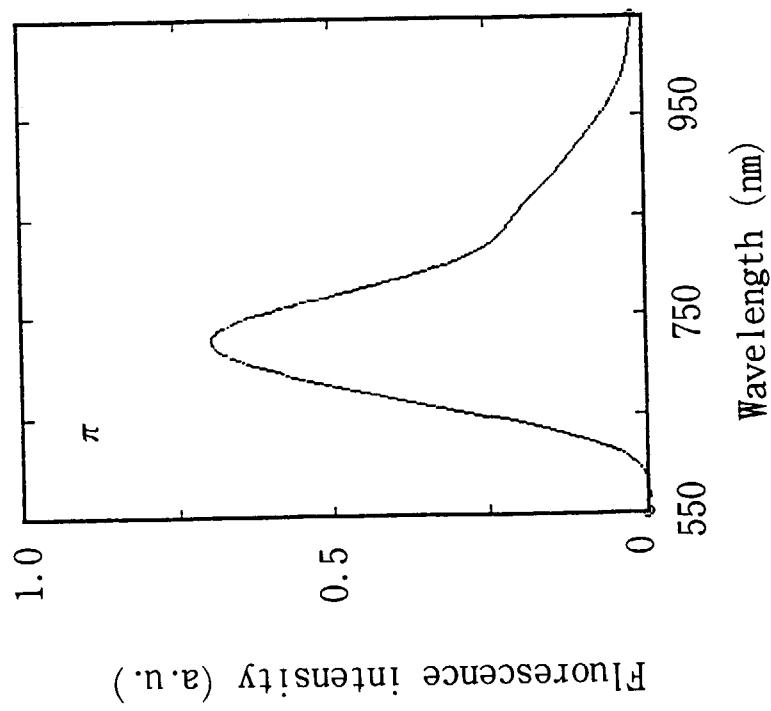


図3 蛍光スペクトル測定の実験配置。

(a)



(b)

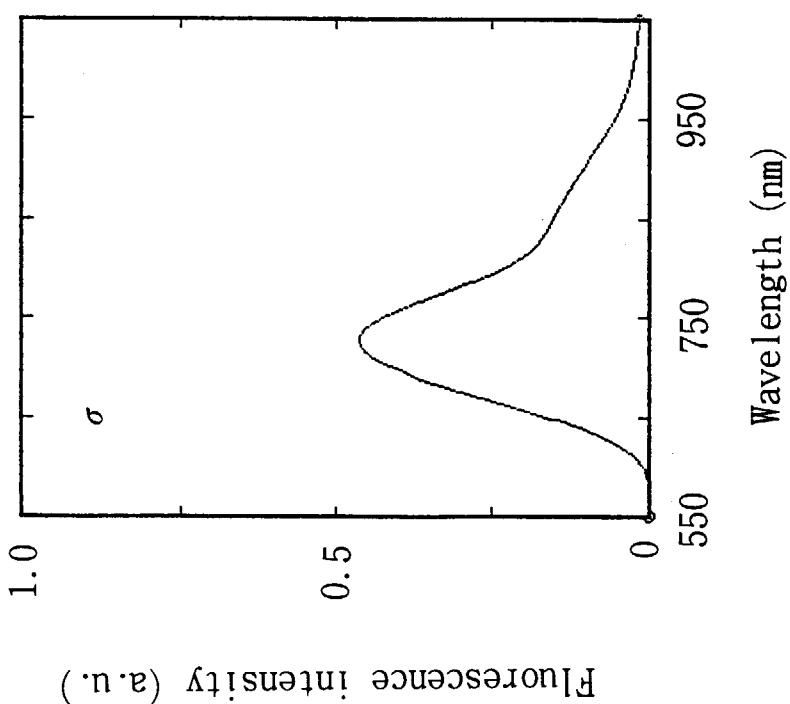
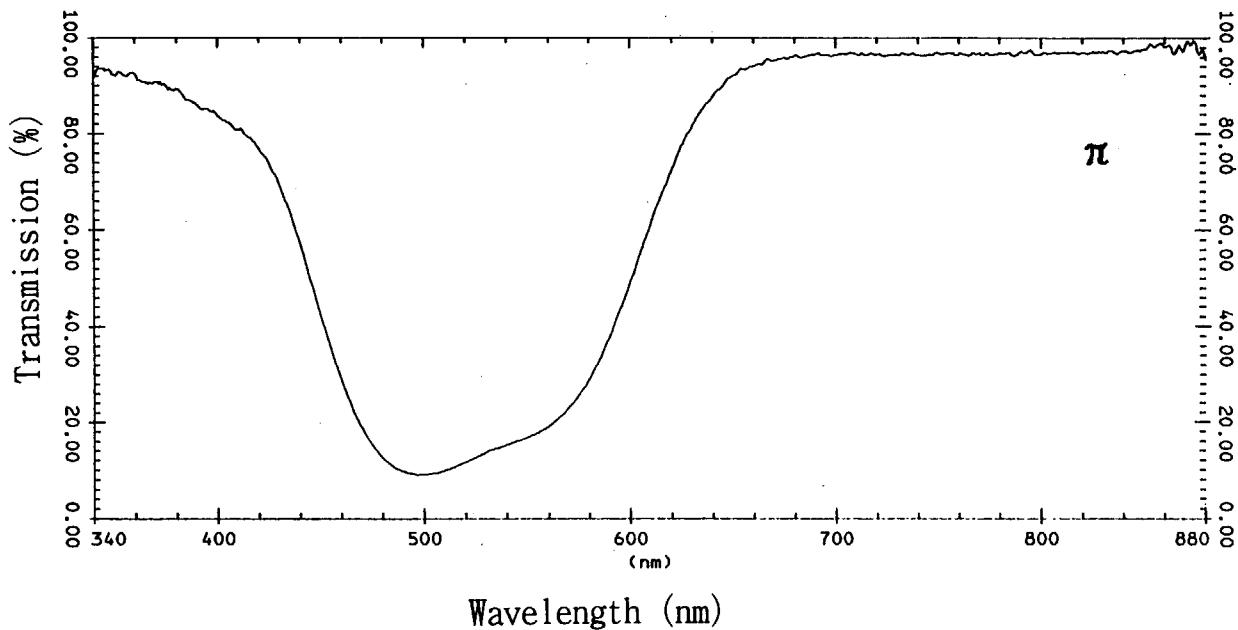
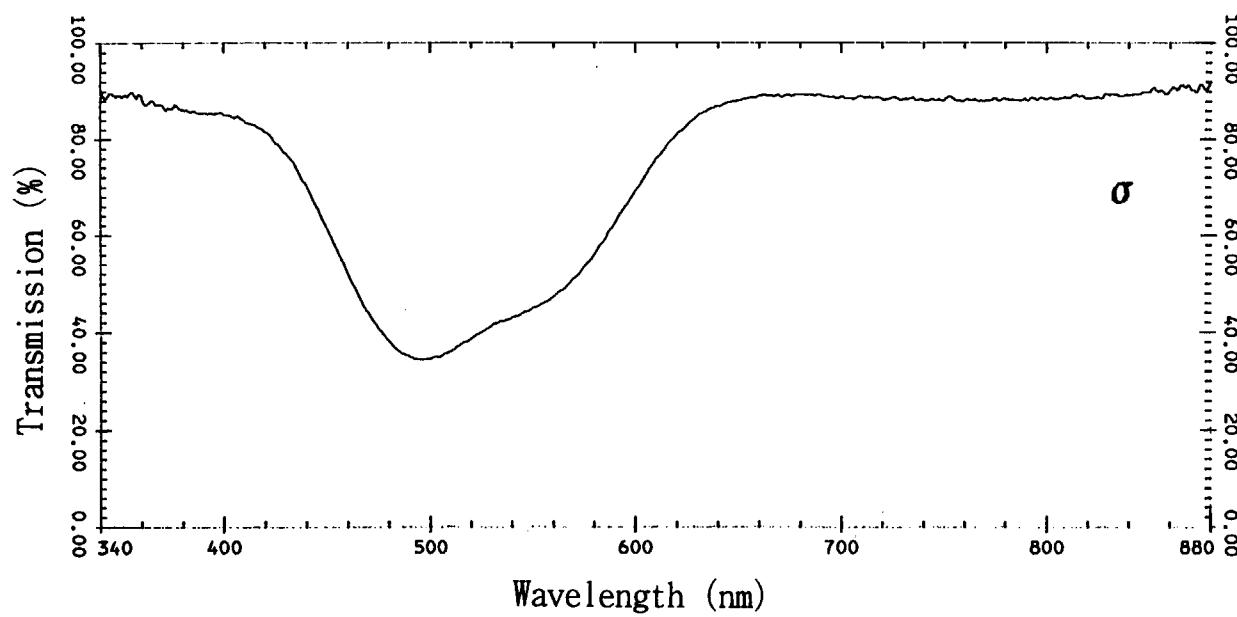


図4 結晶1の π 偏光(a)と σ 偏光(b)励起における蛍光スペクトル。

(a)



(b)

図5 結晶2の π 偏光(a)と σ 偏光(b)における吸収スペクトル。

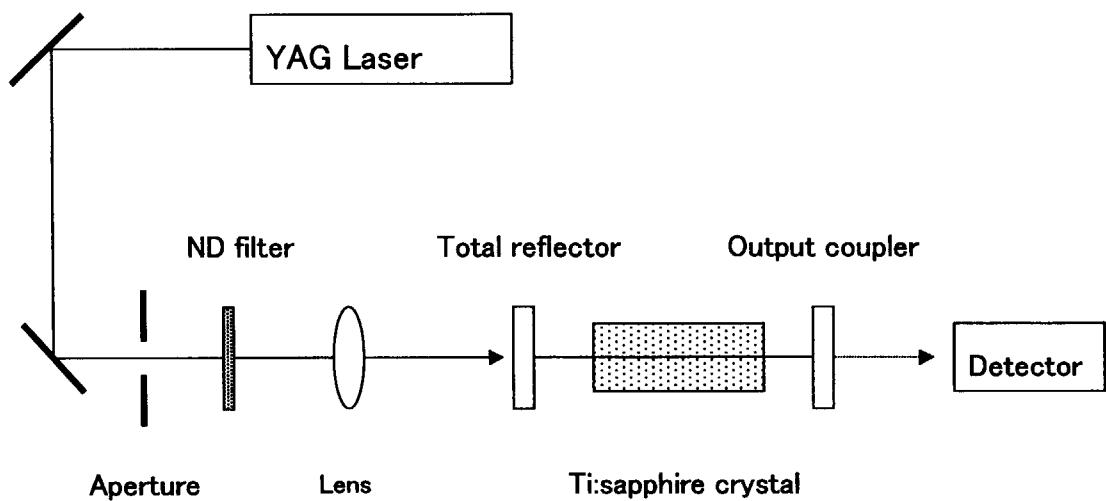


図 6 発振特性測定の実験配置。

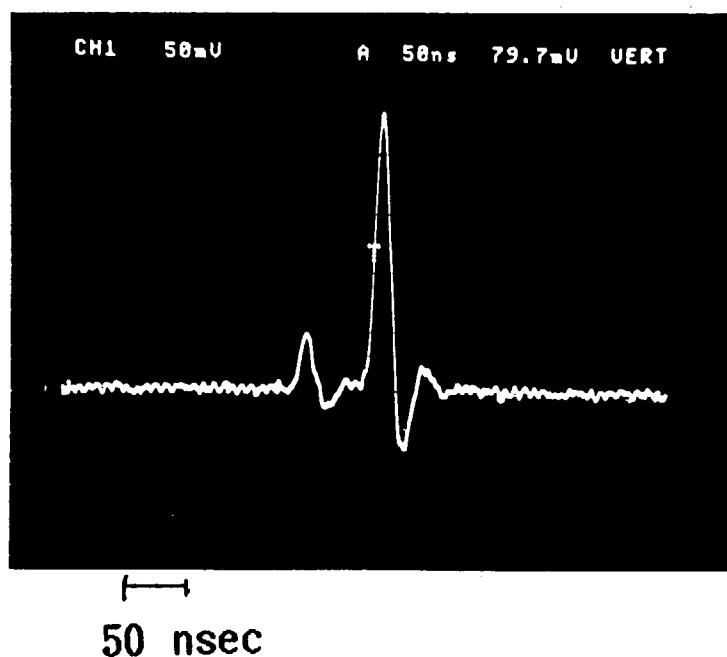


図 7 結晶 2 から得られた発振レーザー波形

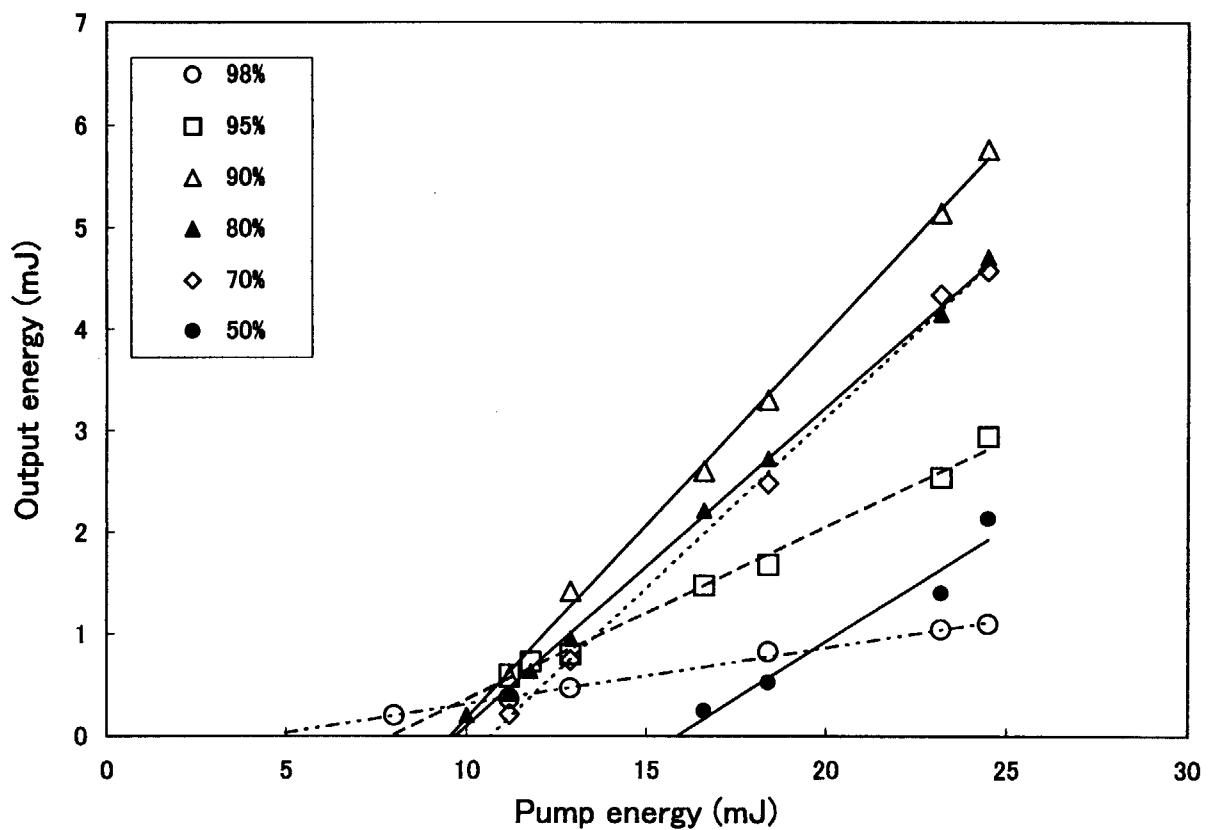


図8 結晶2の励起光入力と発振パルスエネルギーの関係

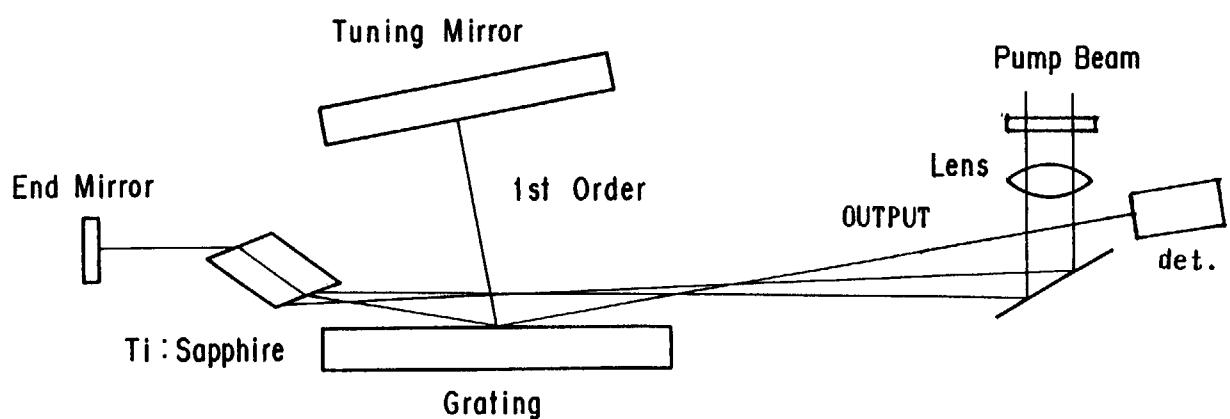


図9 斜入射型共振器の配置

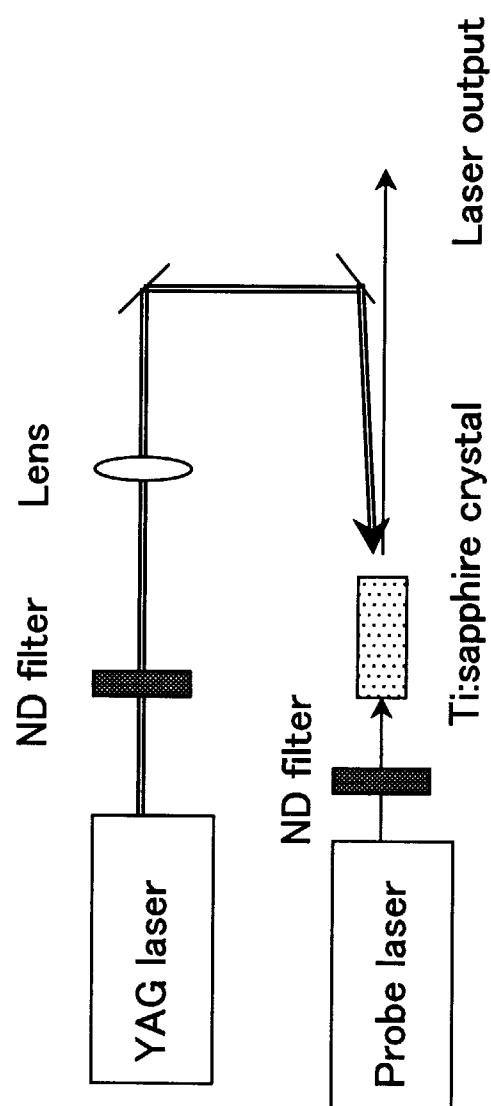
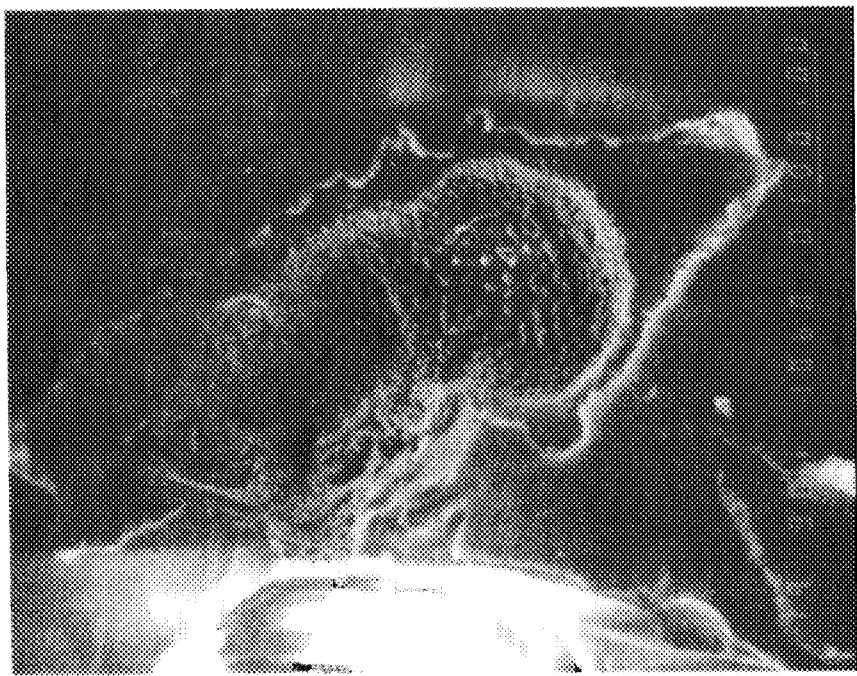


図10 増幅特性測定実験配置

(a)



(b)



図11 励起光照射により損傷を受けた結晶の電子顕微鏡写真

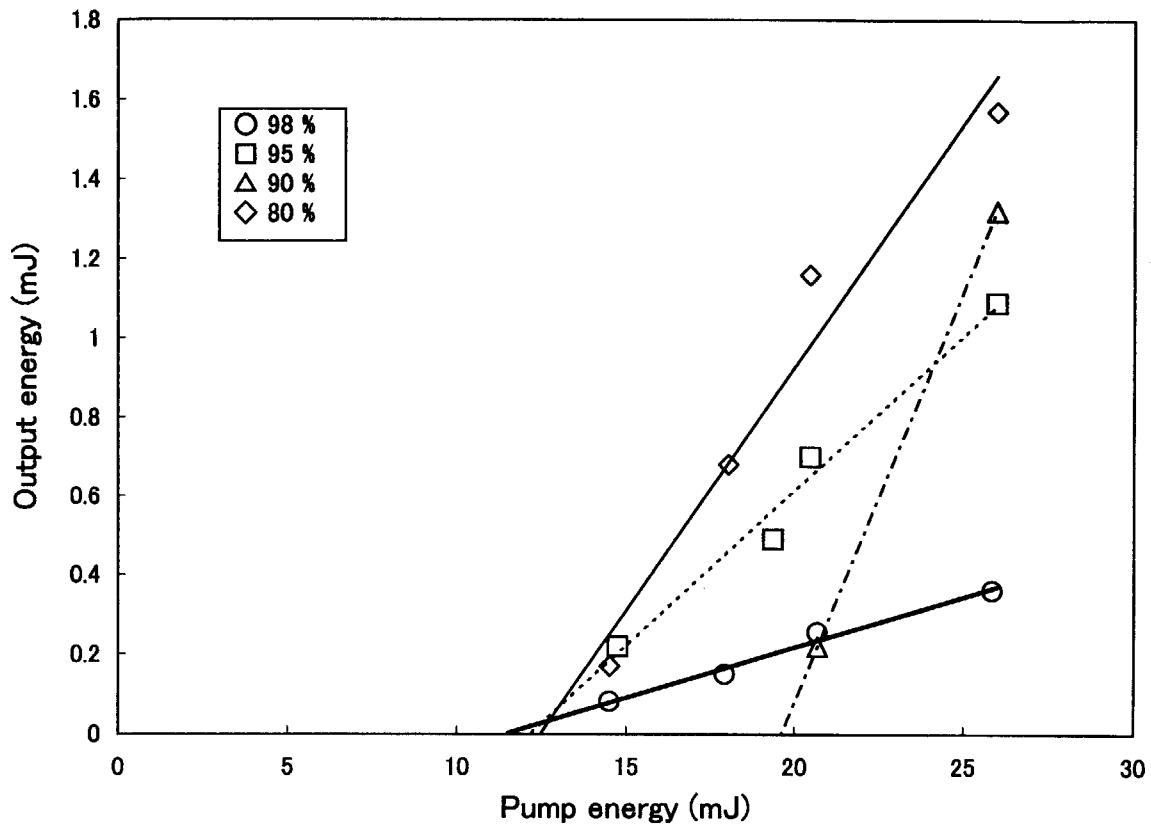


図 1 2 結晶 3 の発振特性

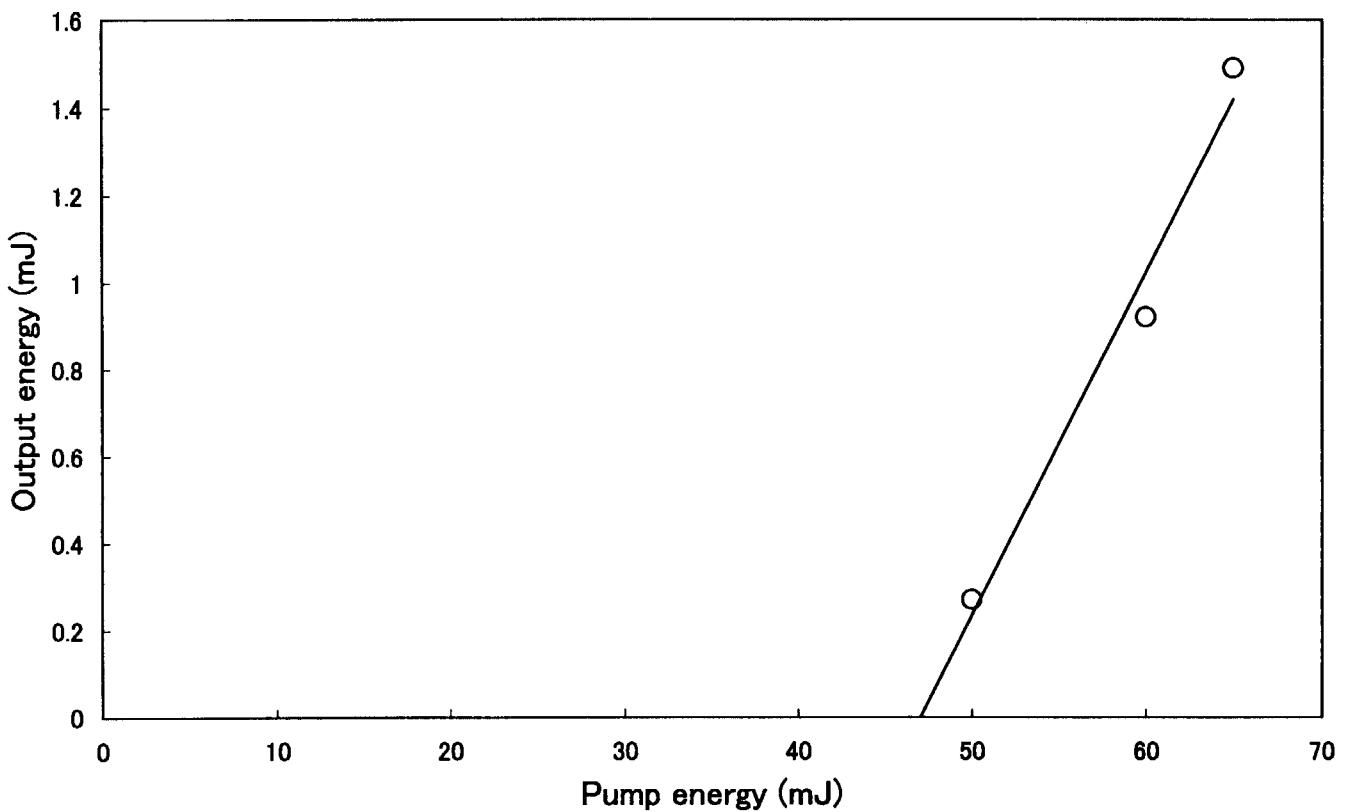


図 1 3 結晶 3 の斜入射型共振器による発振特性

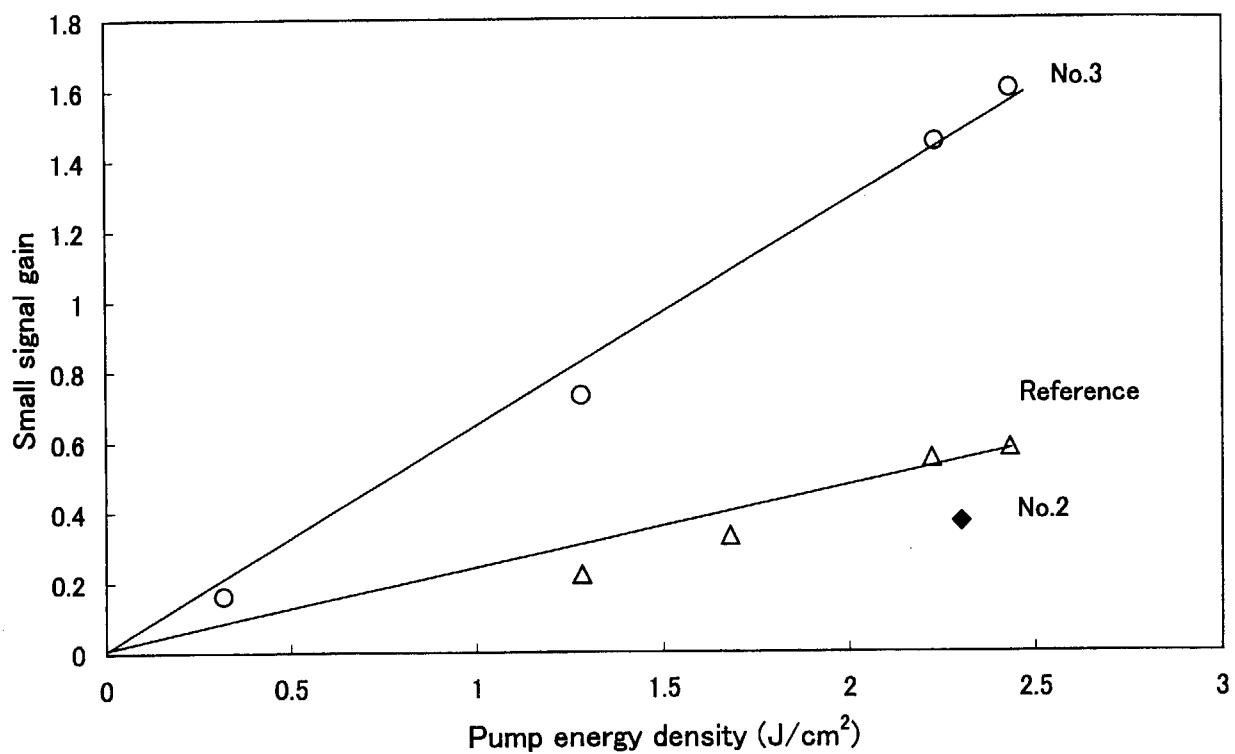


図14 小信号利得の励起光密度依存性。◆；結晶2、○；結晶3、△；市販結晶。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								1	= 4.184 J(熱化学)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		= 4.1855 J(15 °C)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}		= 4.1868 J(国際蒸気表)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}		
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W	
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

