

JAERI-Research
2000-013



JP0050327



Ti : Sapphire
フリーランニングレーザーの発振特性

2000年3月

大関 章・西村昭彦・宇佐美力・的場 徹

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。
入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

Ti : Sapphire フリーランニングレーザーの発振特性

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター

大図 章・西村 昭彦・宇佐美 力・的場 徹

(2000年2月1日受理)

高強度短パルスレーザーとしてコンパクト、高出力化が期待されるYb系固体レーザーに不可欠の強励起用光源としてフラッシュランプ励起Ti:Sapphire高出力フリーランニングレーザー発振器を開発した。本レーザーには、波長920nm近傍のレーザー光を従来に無い長いパルス幅で効率良く高出力かつ高品質で発生させることが要求される。このため、本レーザーの要素技術であるパルス放電、フラッシュランプからの紫外光遮光を最適化し、レーザー発振特性試験を行った。その結果、Ti:Sapphire (外径8 mm ϕ 、長さ180 mm) 結晶から波長約800 nm及びレーザー繰り返し数0.5 Hzで、最高出力6.8 J、電源効率0.7%を得ることができた。Ybレーザー励起波長920 nmでは、Ybレーザー強励起試験に十分な2 J程度を得た。また、励起用レーザー光源として重要な出力安定性及びレーザービーム品質において $\pm 5\%$ 以内の出力時間安定性、最高出力時に5 mrad以内に95%以上の出力が常時集中するビーム空間安定性等の性能をそれぞれ達成することができた。今後の更なる性能向上を目指した励起用光源の開発(増幅技術開発等)において基礎となる設計データ、レーザーのパラメータ依存性及び発振特性について報告する。

Lasing Performance of a Long Pulse Ti:Sapphire Free Running Laser

Akira OHZU, Akihiko NISHIMURA, Tsutomu USAMI and Tohru MATOBA

**Advanced Photon Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Kizu-machi, Souraku-gun, Kyoto**

(Received February 1, 2000)

A flash lamp pumped Ti:Sapphire free running laser has been developed for pumping Yb doped solid state glass materials, which is anticipated as a promising table top compact laser of high peak power in the near future. This laser is essentially required to efficiently produce high energy output with longer pulse than that of a conventional one. By optimizing flash lamp discharge and cut-off of UV light emitted from a flash lamp, the maximum output energy of 6.8 J and an electrical efficiency of 0.7 % have been obtained at 800 nm and at 0.5 Hz with a Ti:Sapphire crystal of diameter 8 mm ϕ and length 180 mm. And, an output energy of 2 J sufficient for high energy pumping to a Yb glass is achieved at around 920 nm. Furthermore, the other lasing performance indispensable for a pumping laser source, such as output energy stability of ± 5 % and spatial pointing stability of >95 % in 5 mrad at the maximum output energy, have been also obtained. The fundamental parametric dependence and the practical operating conditions useful for designing the upgrade high power pumping laser are presented.

Keywords: Table Top Compact Laser, High Peak Power, Ti:Sapphire, Free Running Laser, Yb Glass, Strong Pumping, Laser Performance, Long Pulse.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置	2
2.1 レーザーヘッド構造	3
2.2 UVカットフィルター	4
2.3 放電回路	4
3. 試験結果	5
3.1 出力特性	5
3.1.1 入力依存性	5
3.1.2 波長依存性	6
3.1.3 フラッシュランプ発光出力	7
3.2 パルスレーザー光発振スペクトル及びパルス幅	8
3.2.1 発振スペクトル	8
3.2.2 パルス幅	9
3.3 ビーム品質	10
3.3.1 空間強度分布	10
3.3.2 ビーム拡がり及びポインティング安定性	10
3.3.3 偏光	11
3.4 長時間運転特性	11
3.4.1 出力安定性	11
3.4.2 出力冷却水温度依存性	12
3.4.3 Ti:Sapphire 結晶及びフラッシュランプの劣化	12
4. 考察	13
5. まとめ	15
謝辞	16
参考文献	17

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Setup	2
2. 1 Structure of Laser Head	3
2. 2 UV Cut-off Filters	4
2. 3 Pulse Discharge Circuit	4
3. Experimental Results	5
3. 1 Output Energy Performance	5
3. 1. 1 Flash Lamp Input Energy Dependence	5
3. 1. 2 Wavelength Dependence	6
3. 1. 3 Flash Lamp Output Energy	7
3. 2 Laser Spectral Width and Pulse Width	8
3. 2. 1 Laser Spectrum	8
3. 2. 2 Pulse Width	9
3. 3. Laser Beam Quality	10
3. 3. 1 Spatial Intensity Distribution	10
3. 3. 2 Laser Beam Divergence	10
3. 3. 3 Polarization	11
3. 4. Long Time Operation	11
3. 4. 1 Output Energy Stability	11
3. 4. 2 Dependence on Water Coolant Temperature	12
3. 4. 3 Deterioration of Ti:Sapphire Rod and Flash Lamp	12
4. Discussion	13
5. Conclusion	15
Acknowledgment	16
References	17

1. はじめに

1985年にG. Mourou氏等¹⁾が提唱したCPA方式短パルスレーザーの高出力化により、従来不可能であった実験室内での高強度短パルスレーザーを用いたコンパクトX線源、X線レーザー、レーザー加速及び高強電場科学等^{2), 3)}の研究が可能となった。このコンパクトな短パルスレーザーは、従来に無い短パルス、高強度等のレーザー特性を応用した様々な分野への高度利用が期待され、次世代技術革新のキーテクノロジーと注目されている。CPA方式短パルスレーザーシステムの基本的な性能(出力、効率等)は、レーザー媒質の特性に大きく依存する。このため、様々な結晶、ガラス等のレーザー媒質を使用したレーザーシステムが試されているが、Ti:Sapphire(Ti:S)結晶が他のレーザー結晶に比して広い波長領域で利得が確保できることと高い熱伝導率を有するため高強度レーザーパルスを高出力発生させる上で最適なレーザー結晶とされている。しかしながら、Ti:S結晶を励起するには励起用の大出力パルスレーザー装置を必要とする。よって現在のTi:S結晶を用いたCPA短パルスレーザーをさらに小型化、高出力化することは困難である。この問題を克服するレーザー媒質としてYbドープの固体材料、例えばYbガラスに大きな期待が寄せられている。

YbガラスがTi:S結晶より優れている特徴は、(1)量子効率が高いこと(量子欠損率が小さい)、(2)励起波長が920nm近傍で半導体レーザー励起が可能であること、(3)Ti:S結晶より利得波長領域は狭いが、レーザー上準位寿命が2msとTi:S結晶の約千倍程度長く、エネルギーを長い時間媒質内に蓄積することが可能であること、等がある。中でも(3)のレーザー上準位寿命が長いことにより励起光源のレーザーパルス幅を広くとれるのでこれまでよりも小型、簡単化できる可能性がある。このため、Yb系固体材料には多大な関心が寄せられ、この材料に関する分光特性及びこの材料を用いたCPAレーザー研究開発が近年広範囲に行われている⁴⁾⁻⁶⁾。しかし、このレーザー媒質の欠点は、飽和フルエンスが30~80J/cm²とTi:S結晶の約50倍程度も高いことから、励起光源により強力なエネルギーを発生することが求められることである。この励起光源として、励起波長及び簡単操作、小型化かつ高出力の観点から強力な半導体レー

ザーまたはフラッシュランプ励起のフリーランニングTi:Sレーザー⁷⁻⁹⁾が考えられる。現時点では、半導体レーザーのコストが高すぎてYbガラスレーザー励起に要求される性能のものを構築するには、CPAレーザー本体程度またはそれ以上の多額の費用を必要とする。このため、半導体レーザーでYbガラスを励起することは励起光源を小型化、高出力化できるが現在は非現実的である。一方、フラッシュランプ励起Ti:Sフリーランニングレーザーの場合は、これまでフラッシュランプ励起Nd:YAGレーザーの代替品としてより短波長で強力なレーザー光源として最高5~6J/パルスのものが開発研究されてきた。しかも、半導体レーザーより安価でかつ容易に高エネルギーが得られている。よって、高エネルギー半導体レーザーが価格面、寿命等で現実的に供用可能になるまで、フラッシュランプ励起Ti:Sフリーランニングレーザーが最も現実的に最適な励起光源となる。しかしながら、フラッシュランプ励起Ti:Sフリーランニングレーザーには、市販のYbガラス励起に適した150 μ s程度のロングパルス幅をもつ高エネルギーパルスを発生できるものは無く、研究開発を必要とする。加えて、Ybガラス励起光源として使用する場合に必要なレーザー装置の基本的な運転特性及びレーザービームの品質等に関する詳細な情報は未だ調査、報告されていない。

そこで、今回、将来必要と予想される大出力励起光源の基礎研究開発としてYbガラス強励起試験用のフラッシュランプ励起Ti:Sフリーランニングレーザーを開発し、その基本運転性能及びレーザー発振特性を試験したので報告する。

2. 試験装置

図1にフラッシュランプ励起Ti:Sフリーランニングレーザーの基本構成を示す。レーザーは、レーザーヘッド(共振器、調整用光学系含む)、パルス放電部(放電制御システム及び直流高圧電源含む)及び冷却水循環部の3部分から構成される。放電部及び冷却水循環部は、ともに防振台上のレーザーヘッドに結合される。放電部はレーザーヘッド内に設置されているフラッシュランプの放電発光の制御、冷却水循環部はレーザーヘッド内のフラッシュランプ放電熱の除去に使用される。本レーザー装置の性

能目標は、取得できるフラッシュランプの性能を考慮して Yb ガラスの強励起試験のために波長 920nm 近傍で 2J 程度、かつ Ti:S レーザーの発振中心波長 800nm で 5～6J のパルスエネルギーを発生させること及び 150 μ s 程度のパルス幅を持つこととした。これを達成するためにフラッシュランプの最大許容入力、性能を考慮して放電回路の回路定数及びスイッチング素子の性能が決定された。また本装置には、レーザー出力測定用にジュールメータ、スペクトル測定用に広帯域分光器、レーザーパルス時間幅測定用にバイプレナー光電管、空間強度分布測定用ビームプロファイラー及びパルス電圧、電流測定用高電圧プローブ、カレントトランスが備えつけられている。各信号は、オシロスコープ及びパーソナルコンピュータ上で計測される。本レーザーの性能を決定する主な設計ポイントは、1)Ti:S 結晶ロッドの品質、2)フラッシュランプの性能及び発光特性、3)レーザーヘッド設計の 3 点である⁷⁾。今回、結晶ロッド及びフラッシュランプは市販で購入できるものを使用し、レーザーヘッド内部構造及び放電回路はこれまでの報告⁷⁻¹⁰⁾を参考にして設計した。以下に、Ti:S フリーランニングレーザー設計における重要となるレーザーヘッド内部構造及び放電回路について詳細に記す。

2.1 レーザーヘッド構造

図 2 にレーザーヘッド構造を示す。レーザーヘッドは、Ti:S 結晶ロッド 1 本に対しフラッシュランプ 1 本で結晶ロッドを片側励起する構造を採用した。この方式は、E. G. Erickson 等により単一のレーザーヘッドより 5～6J の高エネルギーパルスを発生させた実績がある¹⁰⁾。その構造は、ステンレス製直方体容器(長さ 270 x 横 80 x 高さ 75mm)中に Ti:S 結晶ロッド(長さ約 180mm x 9mm ϕ)、フラッシュランプ(放電部長さ: 200mm、外径: 7.8mm ϕ)が長尺方向に平行に配置されている。結晶ロッドとフラッシュランプは楕円形の断面を有するセラミック製リフレクターで囲まれている。結晶ロッドとフラッシュランプは楕円形リフレクターの二つの焦点あるためフラッシュランプからの発光はリフレクターで反射されロッド結晶に集光される。フラッ

シュランプと結晶ロッドの間には、Ti:S 結晶に有害な紫外光を減衰させるために長方形で厚さ 2mm の UV カットガラスと UV カットプラスチックフィルターが 1 枚ずつ設置されている。また容器内は、結晶ロッド、フラッシュランプ及びフィルター類の冷却のために冷却水循環部から供給される約 20°C に保たれた循環冷却水で満たされる。Ti:S 結晶ロッドは、Ti₂O₃ 濃度 0.1w%、F.O.M 600 の Union Carbide 社製のものを使用した。フラッシュランプは、Heraeus 社製 CP1481(Xenon:400 Torr)を使用した。

2.2 UV カットフィルター

フラッシュランプからの発光スペクトルにおける紫外光の割合は、フラッシュランプに流れる電流の増大にしたがって増える。Ti:S 結晶にとって 400nm 以下の紫外光は、結晶劣化(ソラリゼーション)の原因となるため出来る限り減衰されなければならない。効率の面から、これら紫外光を Ti:S 結晶の吸収スペクトルの中心波長である 500nm 付近に変換する UV 変換フィルターの適用が望ましい。しかし、現在これに適した性能を持つフィルターが無いため出来る限り有害な紫外光を減衰する構造とした。まず使用するフラッシュランプのガラス管を UV カットガラスとし、さらに UV カットガラス及び高性能 UV プラスチックフィルターの 2 枚でほぼ完全に 400nm 以下の紫外光を減衰することにした。UV ガラスフィルター(180 x 42.5 x 2mm³)は Schott 社製 GG385 を使用し、またプラスチックフィルター(ガラスフィルターと同形状)は Polycast 社製 UF-4 を使用した。

2.3 放電回路

図 3 に Ti:S フリーランニングレーザーの放電回路を示す。放電回路は、パルス励起光を発生するパルス放電回路とパルス放電をスムーズに行うための予備放電回路、いわゆるシマー放電回路からなる。シマー放電は、直流放電(200V, 3A 程度)で図中のパルストランスより高電圧パルスがフラッシュランプに印加され放電を開始する。パ

ルス放電は、PFN 回路をとらしてイグナイトロンのスイッチングにより開始する。回路上のコンデンサー容量は、レーザーのパルス幅を $150\mu\text{s}$ 程度とするために $65\mu\text{F}$ のものを 2 個並列使用し $130\mu\text{F}$ とした。さらにコンデンサーに印加する最高充電電圧は、放電のパルス幅とフラッシュランプの最大許容入力を考慮して最高 5kV とした。コイルのインダクタンス $L(10\mu\text{H})$ は、フラッシュランプの放電インピーダンス(放電電流 $3\sim 4\text{kA}$ 時)とインピーダンス整合が最適になる値を選択した。スイッチング素子として寿命、放電ジッター、最高放電電圧、最高放電電流、経済性を考慮してイグナイトロンを採用した。放電繰り返し数は、フラッシュランプ及び高圧直流電源容量の限界から 0.5Hz とした。

3. 試験結果

3.1 出力特性

3.1.1 入力依存性

図 4 にフラッシュランプをパルス放電してレーザー発振を得たときの典型的なパルス放電電圧、電流波形とレーザーパルス波形を示す。放電回路のインピーダンス整合が良く取れたため、放電電圧及び電流パルス波形は使用充電電圧内でオーバーシュートやアンダーシュートを起こすことはなかった。電圧電流波形の積よりフラッシュランプに供給される実質のエネルギーを求めると、ほぼ設計どおりにコンデンサーの蓄積エネルギーが 90%以上の効率でフラッシュランプに供給された。またパルス電流とレーザーパルス波形の関係をみると、レーザー発振の電流閾値は発振波長 800nm で約 2kA 程度であった。さらに、レーザーパルス波形は最初の shot(パルス放電)で図中の点線に示すように鋭い立ち上がりとなだらかな減衰を示すが、 0.5Hz 毎の shot を 10shots 以上続けることで実線に示すフラットピークなパルス波形に安定した。これは、パルス放電でのフラッシュランプ発光によって Ti:S 結晶が熱せられことによる温度上昇のために発振効率が低下したと考えられる。

この 10shots 後の安定した状態で、レーザー発振入出力特性をレーザー発振波長ご

とに測定した。使用した共振器は、反射率が 800nm にピークを有する全反射鏡と 90% の反射率を有する平行平板型出力ミラーの組み合わせのものと 900nm にピークを有するものの 2 組を使用した。これら 2 組の共振器にプリズム或いはファブリーペローエタロンを使用して発振波長を変化させた。その結果を、図 5、6 に示す。図より Ti:S 結晶の発光スペクトル中心 800nm 近傍で高い出力が得られた。795nm で、7J 弱の出力が 0.7% の電気効率で達成できた。また Yb ガラスの励起波長である 920nm 近傍の 910、915nm ではそれぞれ 2.0、1.7J 程度となった。また各波長の出力は、フラッシュランプに投入されるコンデンサーの充電エネルギーの増加に対してほぼ直線的に増加した。これは、さらに入力エネルギーを増加すればより高いレーザーエネルギーが得られることを示している。今回の試験では、フラッシュランプの入力限界により 1 kJ 以上の放電エネルギーを投入出来ず最高出力が 7J 弱程度にとどまった。発振波長 795、790nm の場合、投入エネルギーが 800J 以上での出力の伸びが 800J 以下での出力の伸びよりも緩やかになった。これは、フラッシュランプへの投入エネルギーの増加により可視光に対する UV 光の割合が多くなり、入力の増加に対して正味の Ti:S 結晶ロッドへの励起光量が 800J 以下の場合と同様に比例して増加しなかったためと考えられる。

3.1.2 波長依存性

図 7 に、共振器を外した状態での Ti:S 結晶ロッドから放出される蛍光スペクトルを示す。Ti:S 結晶による励起光の吸収は約 425nm から 560nm の範囲にあり、Ti:S 結晶の吸収中心約 490nm 近傍の 500nm 付近の放出光が最も少ないことがわかった。しかし、400~460nm にかけて吸収されない近紫外光が多く放出されていることも観測された。Ti:S 結晶の発光中心は、YAG レーザーの 2 倍高調波(532nm)で励起した場合蛍光スペクトルのピーク中心は 800nm 近傍にあるが、フラッシュランプで励起した場合その中心は 700nm 付近にピークが現れた。これは、フラッシュランプ励起光の中心が YAG 2 倍高調波よりも短波長(次節参照)にピークがあるためである。さら

に Yb ガラスの吸収波長である 900nm 近傍の蛍光量は、800nm の約 1/10 程度であった。このような Ti:S 結晶からの蛍光スペクトルを用いてフラッシュランプ入力を一定にした状態でのレーザー発振出力の波長依存性を図 8 に示す。反射率が 800 と 900nm にピークを有する共振器の 2 組を使用したため、発振出力の波長依存性は 800、900nm にピークが現れ、これらの波長から外れるに従って出力は小さくなった。800、900nm の間の 850nm 近傍では 1 J 程度と低出力であるが、この波長に反射率のピークを持つ共振器を使用すれば 5 J 程度の出力が期待できる。

3.1.3 フラッシュランプ発光出力

フラッシュランプの光変換効率を求めするため、フラッシュランプの発光出力特性を測定した。図 9 にフラッシュランプの発光スペクトルを示す。発光スペクトルは、350nm 以下の紫外光から 1,000nm の赤外光まで及んだ。中心スペクトルは 450nm から 500nm にあり、投入エネルギーの増大に伴い徐々に短波長側にシフトする。このフラッシュランプの発光全エネルギーを、セラミックリフレクターを外した状態でステンレス容器に明けた小穴から光ファイバーを通して流出した量から求めた。その結果を図 10 に示す。フラッシュランプの発光エネルギーは、投入エネルギーに対して一定の変換率(約 15%)で変換されることが測定された。この変換率より波長 800nm で 7J の出力が得られるときの励起光エネルギーに対する効率を求めると電源効率の約 6 倍の 4~5%になる。この光変換率はフラッシュランプ励起固体レーザーで計測された例は稀であるが、ほぼ同様の条件(ガス種、圧力)で 10J 入力のフラッシュランプで計測された結果(400~650nm)とほぼ同様の値であることから¹¹⁾、妥当な数値であることがわかる。発光エネルギー自身はこの変換率で決まるが、紫外光の割合は図 9 に示すように投入エネルギーの増加とともに増大する。従って、投入エネルギーの増大に伴って Ti:S 結晶ロッドに吸収される可視光の割合は低下する。400nm 以下の紫外光は図 11 に示すように UV カットフィルターにより大きく減衰され、減衰される割合は投入エネルギーの増大とともに増大する(7~15%)。図 5 でレーザ

一出力が入力 800J 以上で増加が鈍くなったのは、このように全励起光に対する減衰される紫外光の割合が多くなったためである。

フラッシュランプに実質的に投入されるエネルギーの放電入力エネルギー(コンデンサー蓄積エネルギー)依存性を図 12 に示す。投入エネルギーに依らずほぼ充電エネルギーの 95%程度がフラッシュランプに入っている。これより、ほぼ設計通りに良いインピーダンス整合が行われ、スイッチングに伴う損失を少なく抑え高い効率でコンデンサー充電エネルギーがフラッシュランプに投入されていることが確認できた。またこのときの放電インピーダンスを図 13 に示す。図中の値は、ピークの放電電圧、電流より求めたものである。図より投入エネルギー、すなわち放電電流の増加に対してインピーダンスが減少することが観測される。フラッシュランプの放電プラズマの電離度が電流の増加に対して増すことによって伝導度が増加しインピーダンスが減少するものと考えられる。設計では、放電インピーダンスを約 0.7Ω 程度とした。実際には、これよりも 0.1Ω 程度高くなった。この差は、設計時に予測できなかったスイッチング素子であるイグナイトロンのスイッチング抵抗及びインダクタンスコイルの抵抗によるものである。

3.2 パルスレーザー光発振スペクトル及びパルス幅

3.2.1 発振スペクトル

図 14 に 800nm 近傍に反射率ピークを有する平行平板型共振器を用いたときに得られるレーザー光スペクトルを示す。スペクトルの形は、印加電圧に依らずほぼ相似形であるが左右対称にはならず短波長側に長く尾を引いた形となった。これは、800nm より短波長側に Ti:S 結晶の利得のピークがあるためと思われる。入力が最高の 989J のときには、Yb ガラスの吸収幅 100nm(900~1000nm)に比べて狭いが約 40nm のスペクトル幅を持つことが観測された。またその半値全幅(FWHM: Full Width at Half Medium)は、約 8~9nm であった。さらに共振器に波長選択素子のエタロン板を付加して 920nm 付近でレーザー発振を得たときのレーザー光スペクトルを図 15 に示す。

図 14 の場合と違ってほぼ左右対称のスペクトルが得られた。半値全幅も約 6nm と小さくなった。エタロン板やプリズムを平行平板型の共振器に付加して波長を変えてレーザー発振を得たときの各々のレーザー光スペクトル半値全幅を図 16、17 に示す。これらより各波長で約 5~6nm の半値全幅をもつ発振スペクトルが得られた。また、800nm ではエタロン板を用いることにより大きな出力低下を招かずに半値全幅は 8 から 6 nm に減少した。さらに、平行平板型共振器のみを用いた発振波長 800 と 900nm の半値全幅を比較すると 800nm のほうが 8nm と 2nm ほど広がった。これは各々の波長域でのレーザー利得の差によるものであろう。

3.2.2 パルス幅

図 18 に 800nm でのレーザー発振光のパルス波形のフラッシュランプ印加電圧依存性を示す。電圧を上げるに従ってパルス幅は増加し、最長で 140 μ s のパルス幅が得られた。これらパルス幅の変化は、電圧上昇に伴いパルス電流値が変化するためである。パルス電流の幅は回路定数により決まるため電圧に依存しないが、レーザー発振する電流閾値の約 2kA を越える時間幅が長くなるためにレーザーパルス時間幅も長くなる。さらに、図 19、20 に各波長でのレーザーパルス幅入力依存性を示す。フラッシュランプへの入力エネルギーが 800J まで基本的に各波長でレーザーパルス幅は増加するが、それ以上では増加しなかった。すなわち、800nm のレーザー発振で得られる最長のレーザーパルス幅(140 μ s)がほぼ電流のパルス幅に等しくなった。この理由は、800J 以上の入力ではパルス電流の立ち上がりが十分急峻となり直ちに閾値である 2kA を越えたためである。さらに、各波長で得られる最長のパルス幅を図 21 に示す。図 8 のレーザー発振出力の波長依存性と同様の傾向が観測された。これは、使用した二組の共振器の中心波長が 800 と 900nm であるためである。それら波長近傍ではレーザー発振のためのパルス電流閾値が低いため長いパルス幅が得られるが、中心波長から離れるに従って電流閾値が高くなるためにパルス幅は短くなる。

3.3 ビーム品質

3.3.1 空間強度分布

図 22 に波長 800nm でのレーザー発振による最高出力及び最低出力でのレーザー光の空間強度分布を示す。図(a)より、レーザー光強度分布の特徴として空間分布の円の両端部分が直線状に欠けている。Ti:S 結晶ロッドを回転させるとそれに伴って欠けた部分も回転することから、レーザーヘッドランプハウス構造またはフラッシュランプ励起光の照射の違いによるものではなく、結晶そのものの特性と考えられる。つまり、欠けている部分に相当する結晶部分のレーザー利得がその他の部分よりも大幅に低いためである。この結晶で得られる空間強度分布は、部分的に細かな変動が見られるが、出力が低いときは中央にピークを持ち周辺になるに従って強度が低下するガウシアン分布を有する。さらに、出力が高くなるにつれて強度分布はトップハット状の台形に近い分布に変化する。また、強度分布に見られる細かな変動は相対的に出力が低いほど顕著であった。さらに、図 23 には、920、950nm 付近でのレーザー出力が最高値での強度分布を示す。920nm では 800nm の場合と同様の傾向を有するが 800nm の場合よりもより台形に近い分布を示し、かつ細かな変動の振幅が大きくなった。また 950nm の場合は、レーザー発振が漸く得られる波長のためレーザー結晶断面全体から発振は得られず、800、920nm での利得の高い部分である中心部のピークに相当する僅かな領域に限定された。また強度分布には共振器による干渉縞が現れている。

3.3.2 ビーム拡がり及びポインティング安定性

図 24 に、800nm でのレーザー発振でのビーム拡がりのレーザー出力依存性を示す。ビーム拡がりは、4mrad 以内に含まれるレーザー光の出力割合で評価した。この依存性より出力の増加に従って 4mrad 以内の割合が 97%から 75%にまで低下した。これは、出力の増加に伴って自然増幅放光(ASE)の割合が増加するためである。従って、低い出力しか得られない発振波長でのレーザー光は、出力が高い場合よりもレーザー

光のビーム拡がりは小さくなると考えられる。また、レーザー光を集光した状態でのビームの空間的変動を示すポインティング安定性を観測した。その結果、5分間あたりレーザー集光直径1%以下の小さな空間変動しかなく、5mradのビーム拡がりにはほぼ95%以上の出力が常時集中し、本レーザーのレーザーショット毎のレーザービーム空間変動は殆ど無視できる程度であった。

3.3.3 偏光

図25に波長800nm(共振器ミラーのみ)でのレーザー光の偏光度の入力依存性を示す。フラッシュランプへの入力及び発振出力に依らずほぼ0.97程度の高い偏光度が安定して得られた。さらに、Ti:S結晶の偏光面をフラッシュランプの方向より90°回転させても同様の高い偏光度が得られることから偏光面のフラッシュランプ方向の角度依存性はないことが確認できた。このような高い偏光度をもつことより、プリズムを共振器内に配置して波長選択をする場合、この偏光によるプリズム面での損失を可能な限り抑えるようプリズム面の調整を行う必要があった。

3.4 長時間運転特性

3.4.1 出力安定性

図26にレーザー発振出力の運転時間に対する変動を示す。フラッシュランプから発する光エネルギーの変動は、運転時間に対して±5%以内に収まった。フラッシュランプ入力が600J以下の場合、出力変動はこれとほぼ同様の値を示した。しかし、入力が600Jを超えるとレーザー出力は図のように大きく低下し、レーザー発振開始出力の約70%の出力まで徐々に低下した。この出力低下は、入力600J以上でTi:S結晶ロッドが励起光及びフラッシュランプからの熱により反り共振器調整がずれることが原因と考えられる。このため円形の空間強度分布は横に崩れ、半月のようなパターンとなってしまった。この結晶ロッドの熱変形は、5分程度で平衡に達し安定になった。この状態で共振器を正しく再調整した後に出力をモニターするとフラッシュ

ランプ発光エネルギーの変動にほぼ等しい一定値で安定した。これより、本レーザーではフラッシュランプ入力を変えて出力調整を行う場合、結晶熱歪により共振器のずれが生じ、出力を回復するためにはその都度共振器の微調整を必要とすることがわかった。

3.4.2 出力冷却水温度依存性

図 27 にレーザー発振出力の冷却循環水温度依存性を示す。冷却水温度を変えて長時間試験を行った結果、冷却水温度による違いはフラッシュランプ入力が 500J 以上のときに現れた。それ以下では、殆ど差が無い。入力が 900J のときには、20℃と 30℃では出力差が 1 J(17%減)に達する。このように高い入力では結晶ロッドの温度上昇が出力に大きく影響することがわかった。さらに、冷却水温度を下げれば高い出力を期待できるが、現在のレーザーヘッド構造では結露により結晶ロッドの AR コート面に損傷等を与えることが危惧される。結露が出ないようなレーザーヘッド構造とすれば、さらに低い温度の冷却水循環によって出力上昇は可能と予測される。また、0.5Hz のレーザー発振繰り返し数を下げることで出力上昇が期待できる。

3.4.3 Ti:Sapphire 結晶及びフラッシュランプの劣化

図 28 に 10^4 shots 程度のレーザー発振を行った Ti:S 結晶ロッド及びフラッシュランプをそれぞれ新品に変えてそれら材料の劣化の影響を観測した結果を示す。 10^4 shots 程度では結晶及びフラッシュランプとも劣化の顕著な影響は現れなかった。また、フラッシュランプは製品ばらつきがあり、新品のものは高い入力で放電を行うとシマー放電が停止して繰り返しレーザー発振が出来ないものもあった。さらに、新しい結晶ロッドを使用した場合、図 29 のレーザー光の強度分布に示すように古い結晶ロッドの場合では顕著であった円形両端の直線状に欠けた部分がなかった。古い結晶ロッドでは新品の状態から欠けた部分が見られたことから、このパターンが欠ける現象はこの結晶ロッド自体の問題であると断定できる。また新しい結晶ロッドの場合、

出力の差は無かったが強度分布の直径が古いものよりも1ないし2mm程度小さかった。これは、古い結晶内部の光散乱が大きいためかと考えられる。このため新しい結晶ロッドの場合、ビーム拡がりも古いものに比べて小さい可能性がある。

4. 考察

フラッシュランプの入力電力限界のため Yb ガラス強励起試験に必要な波長 920nm の出力はコンデンサー充電電圧 3.8 kV で約 2J(30kW/cm²)であったが、この出力でも強励起試験は十分可能と考えられる。さらに高出力が必要な場合は、今回用いたレーザーヘッドを複数組み合わせることによって対処できる。また波長 800nm での最高効率 0.7%は、これまで報告されたヘッド内にフラッシュランプを複数本使用するものと同等であるが、1本のフラッシュランプを用いたレーザーヘッドで報告された効率 2%には及ばなかった。これは、Ti:S 結晶の品質、例えば Ti ドープ率が同一でも発振に寄与する Ti³⁺と発振にマイナスの Ti⁴⁺の密度比が異なるためであると推測される。

レーザーヘッド単体の性能を向上させると同時に本レーザーの運転性能、効率及び出力を向上させるレーザーヘッドの改造点について考察した。まず運転の問題として、フラッシュランプへの入力変化によってその都度共振器を調整しなければならない点がある。これは励起用レーザーを効率良く運用する観点から、避けなくてはならない問題である。また、出力調整の度に励起レーザーの光軸が変わる可能性があり、レーザー光軸も調整し直さなければならない。この複雑な運転操作のために Yb ガラス強励起試験の実施スピードが制限される。本格的な強励起試験の前に解決する必要がある。さらに、入力増加に伴うフラッシュランプの紫外光量増大に伴う Ti:S 結晶強励起光吸収割合低下の問題がある。これは、フラッシュランプの発光スペクトル中心が短波長側にシフトするためフラッシュランプ全体の発光量に対する Ti:S 結晶の吸収波長領域(437~588nm)で吸収できるエネルギー割合が低下することである。この割合をフラッシュランプに流れる電流で決まるフラッシュランプ内のプラズマの温度及び黒

体輻射から得られる以下の式⁹⁾より見積もった。

$$\alpha = \frac{1}{\sigma T^4} \cdot \int_{437\text{nm}}^{588\text{nm}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot (\exp(hc/\lambda kT) - 1)} d\lambda \times 100 \quad (1)$$

$$T = 603(j \cdot \sqrt{r})^{4/11} \quad (2)$$

$$j = I / (\pi r^2) \quad (3)$$

α : Ti:S 結晶吸収波長領域エネルギー割合

T : プラズマ温度

λ : 波長

σ : ステファン・ボルツマン定数

h : プランク定数

k : ボルツマン定数

c : 光速

j : 電流密度

r : プラズマ半径

I : フラッシュランプ電流

その結果を図 30 に示す。図より、本装置のレーザー発振電流閾値 2 kA でのフラッシュランプ全発光量に対する Ti:S 結晶の吸収割合は 10%程度と見積もられる。電流値がこれ以上になるとその割合は図のように低下し、最高電流値 4 kA 付近では 7.5%程度になった。さらに、図 10 のフラッシュランプの発光エネルギーデータから本装置の実質的な Ti:S 結晶ロッドに吸収される励起光エネルギーの絶対値及びその効率を導出した。その結果を図 31、32 に示す。図 31 よりコンデンサー充電エネルギー増加に対して Ti:S 結晶に吸収される実効エネルギーが比例して増加しないことがわかる。投入電気入力 が 200J のとき約 4J 程度の光励起エネルギーであるのに対して、5 倍の投入電気入力である 1kJ のときは 2.7 倍のエネルギーである。さらに、投入エネルギーの増加に対して実質的に Ti:S 結晶ロッドに吸収されるエネルギーの割合は、図 32 のように減少する。仮に、1 本のフラッシュランプに 1 kJ 投入する方式から 5 本のフラッシュランプに 200J ずつ投入する方式に変更した場合、Ti:S 結晶ロッドに吸収されるエネルギーの効率は 2 倍になり、同時に電気効率も 2 倍になると

予想される。このようにフラッシュランプを複数本化することは、Ti:S レーザーの効率を大きく上昇させる効果をもつ。また、この複数本化は UV カットフィルター及び結晶の長寿命化につながる。フラッシュランプ入力が増え、900J 近傍になると UV 励起光の割合が多くなり、UV カットフィルターで吸収されるエネルギーが増加してフィルターを劣化させる。劣化したフィルター(プラスチック)は、透明度が低下して励起効率を低下させる。400nm 以下の UV 光だけを巧く 500nm の光に効率良く変換する UV 変換フィルターが現実には無く¹²⁾、有害な紫外光の発生はレーザー効率を低下させる最も大きな原因なので出来る限り抑えなければならない。

これら 2 つの問題点を同時かつ簡易的に解決する方法としてフラッシュランプ 2 本を用いたレーザーヘッドへの改造が考えられる。つまり、図 33 のように Ti:S 結晶ロッドを挟むようにフラッシュランプ 2 本で励起する構造である。この場合では、両側から結晶を対称的に励起するために片側励起による結晶ロッドの熱歪によるそりが緩和され、入力変化の共振器を再度調整する必要がなくなる。また、今まで片側励起で 1 本のフラッシュランプに加えていた電気入力を 2 本に与えることによって 1 本当たりの入力を半減させ、紫外光を大幅に低減させることができる。このため Ti:S 結晶励起に最適な 440~580nm の励起エネルギーを大幅に増やすことができ、約 1.5 倍程度の効率上昇が期待できる。この構造を用いる場合は、リフレクター部分及び冷却水循環経路がこれまでよりも複雑になるが、簡単かつ確実にレーザー本体の運転性能、効率及び出力を向上させる方法である。

5. まとめ

本運転試験において、ほぼ予想通りの出力を 800、920nm の発振波長で得ることができた。また、これまで報告されていなかったフラッシュランプ励起 Ti:S フリーランニングレーザーの詳細な電気・機械的性能、レーザービーム品質(時間、空間及び周波数特性)及び運転特性等が明らかになった。さらに運転性能、効率向上の面での改善すべき点も明確になった。これらの成果は、Yb ガラス強励起試験及び Ti:S レ

レーザー改造のみならず、他のレーザー媒質の励起、または本レーザーの他の分野への応用にとって貴重な情報となる。

謝辞

本レーザー特性試験において、計測器及び計測法に関して有益な助言、支援をしていただいた光量子科学研究センターの丸山庸一郎氏、加藤政明氏、松岡史哲氏、並びに環境科学研究部の大場正規氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, vol. 56, 219-221(1985)
- 2) G. A. Mourou, C. J. P. Barty, and M. D. Perry: *Phys. Today*, Jan. 22-27(1998).
- 3) C. Spielmann, C. Kan, N. H. Burnett, T. Brabec, M. Geissler, A. Scrinzi, M. Schnurer, and F. Krausz, *IEEE J. selected topics in Quantum Electron.* vol. 4, 249-265(1998).
- 4) S. Biswal, J. Itatani, J. Nees, and G. A. Mourou, *IEEE J. selected topics in Quantum Electron.* vol. 4, 421-425(1998).
- 5) J. Nees, S. Biswal, F. Druon, J. Faure, M. Nantel, G. A. Mourou, A. Nishimura, H. Takuma, J. Itatani, J. C. Chanteloup, and C. Honninger, *IEEE J. selected topics in Quantum Electron.* vol. 4, 376-384(1998).
- 6) S. Biswal, J. Nees, A. Nishimura, H. Takuma, and G. Mourou, *Opt. Commun.* Vol. 160, 92-97(1999)
- 7) A. J. W. Brown, and C. H. Fisher, *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 29, 2523-2518(1993).
- 8) Y. Lutz, A. Hirth, M. V. Salisch, *Opt. & Laser Technology*, vol. 26, 39-42(1994).
- 9) A. Hoffstadt, *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 33, 1850-1863(1997).
- 10) E. G. Erickson, in *OSA Proc. Tunable Solid State Lasers*, M. L. Shand and H. P. Jenssen, Eds., Washington, DC, vol. 5, 26-32(1989).
- 11) G. I. Linford: *Appl. Opt.* 33, 8333-8345(1994).
- 12) S. Nakamura, K. Midorikawa, M. Obara, and K. Toyada, *The Review of Laser Engineering*, vol. 24, 83-91(1995).

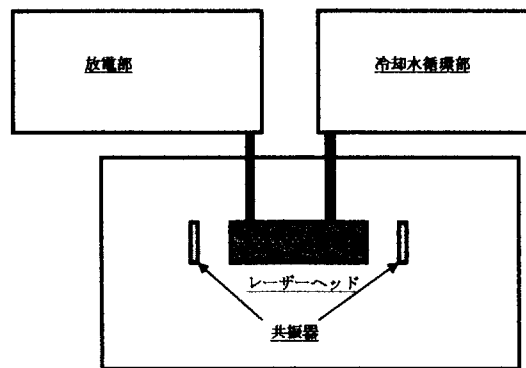
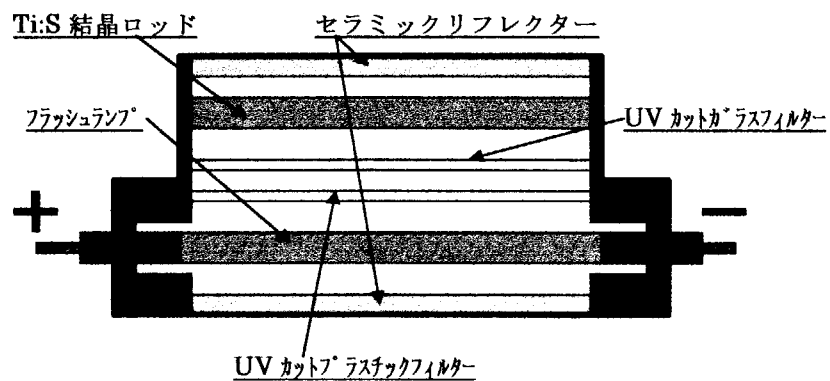
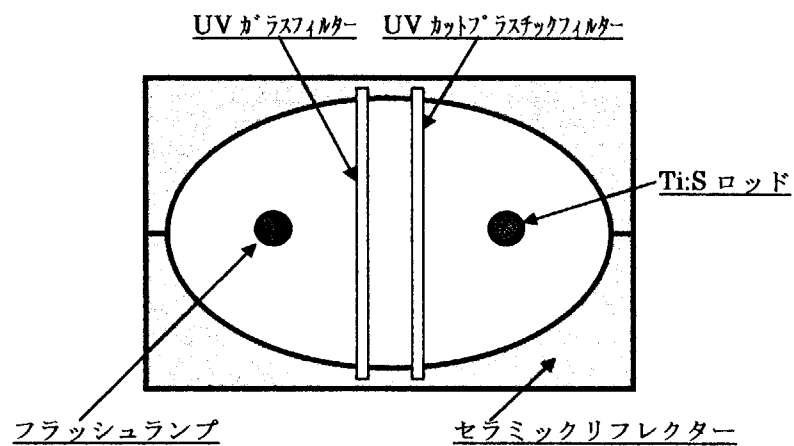


図1 Ti:S フリーランニングレーザー構成図



(a)レーザーヘッド構造 (平面図)



(b)レーザーヘッド構造 (断面図)

図2 Ti:S レーザーヘッド構造概略図

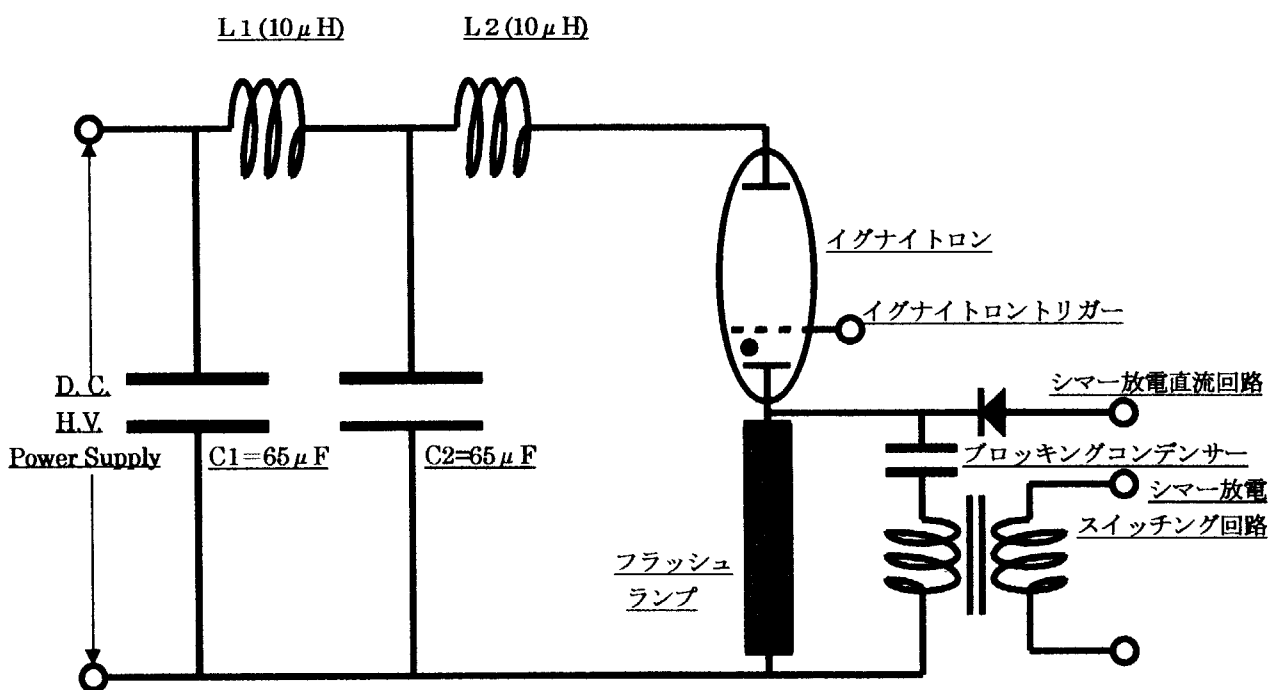


図 3 放電回路模式図

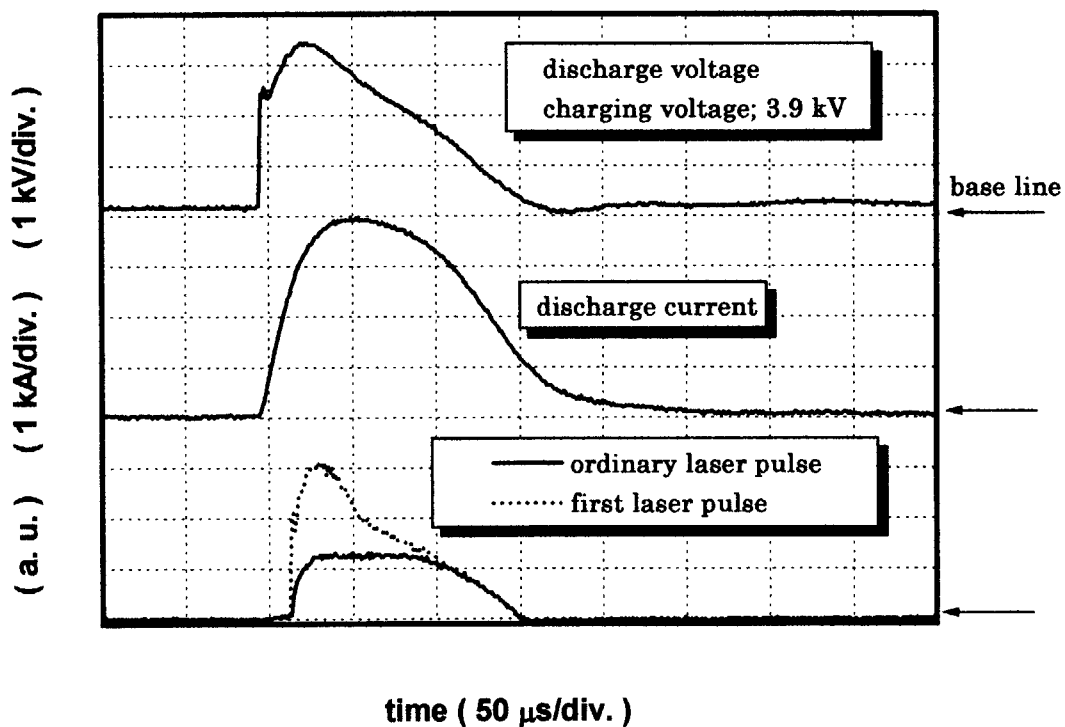


図 4 Ti:S レーザーの典型的な放電電圧、電流及びレーザーパルス波形

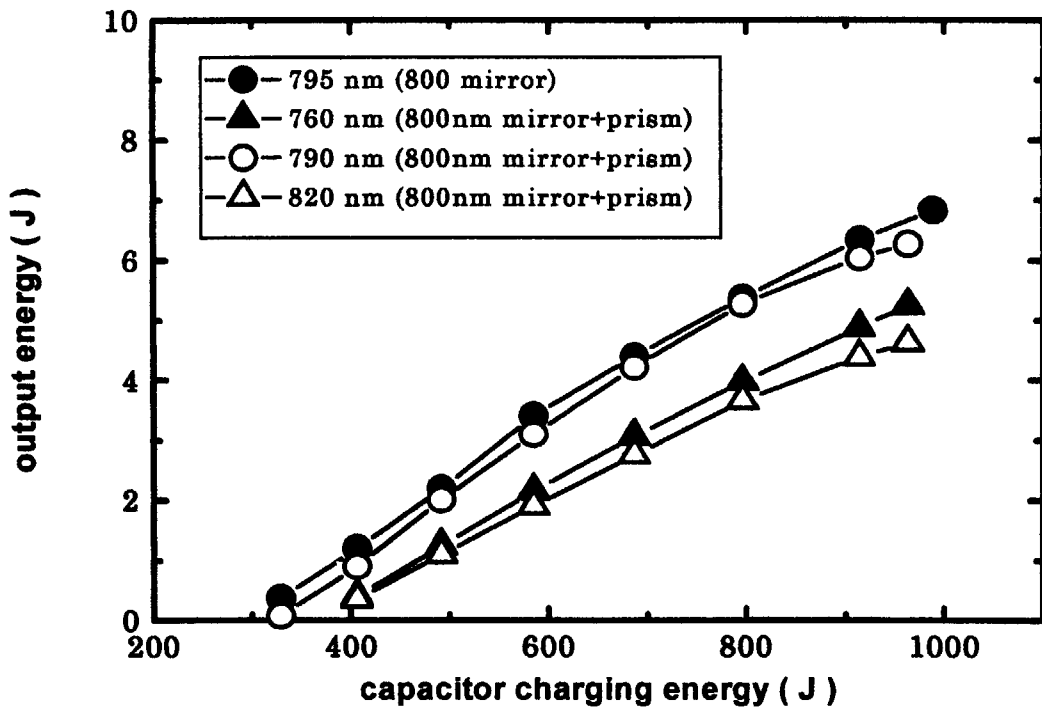


図 5 レーザー発振入出力特性 (I)

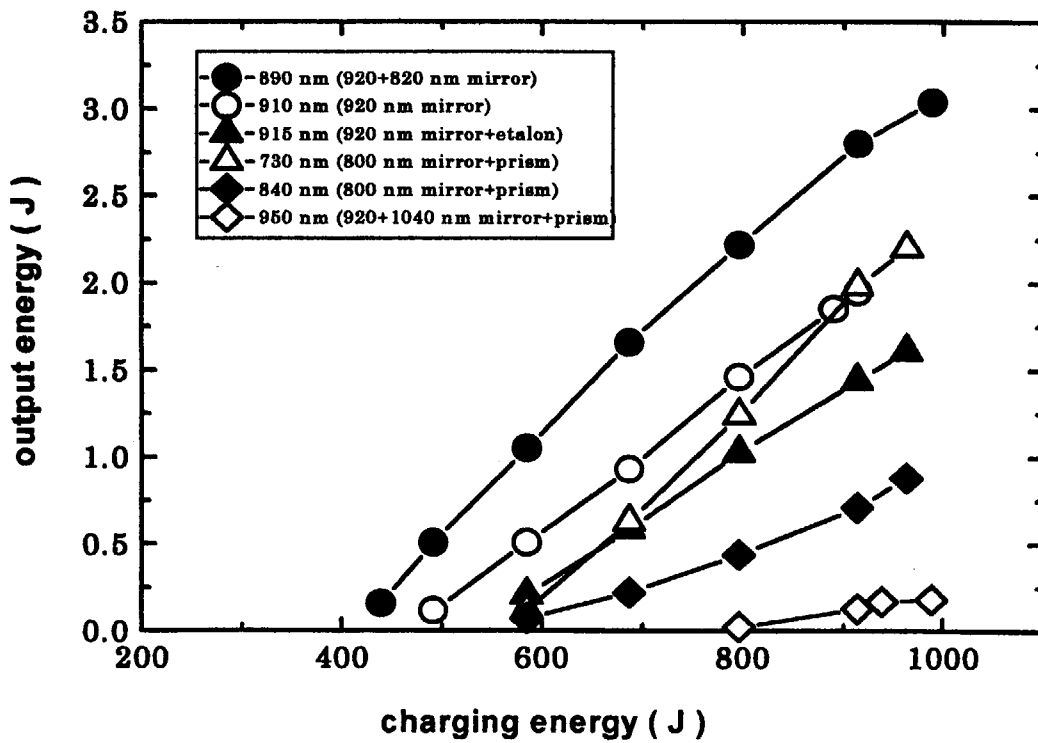


図 6 レーザー発振入出力特性 (II)

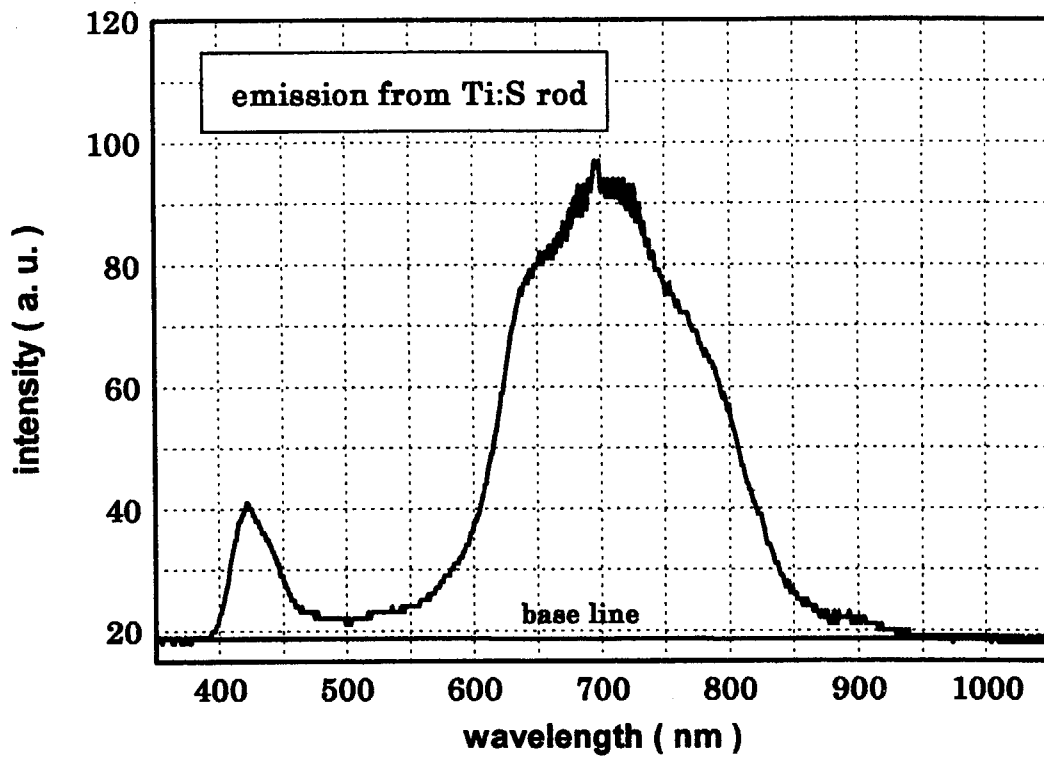


図 7 Ti:S 結晶からの発光スペクトル

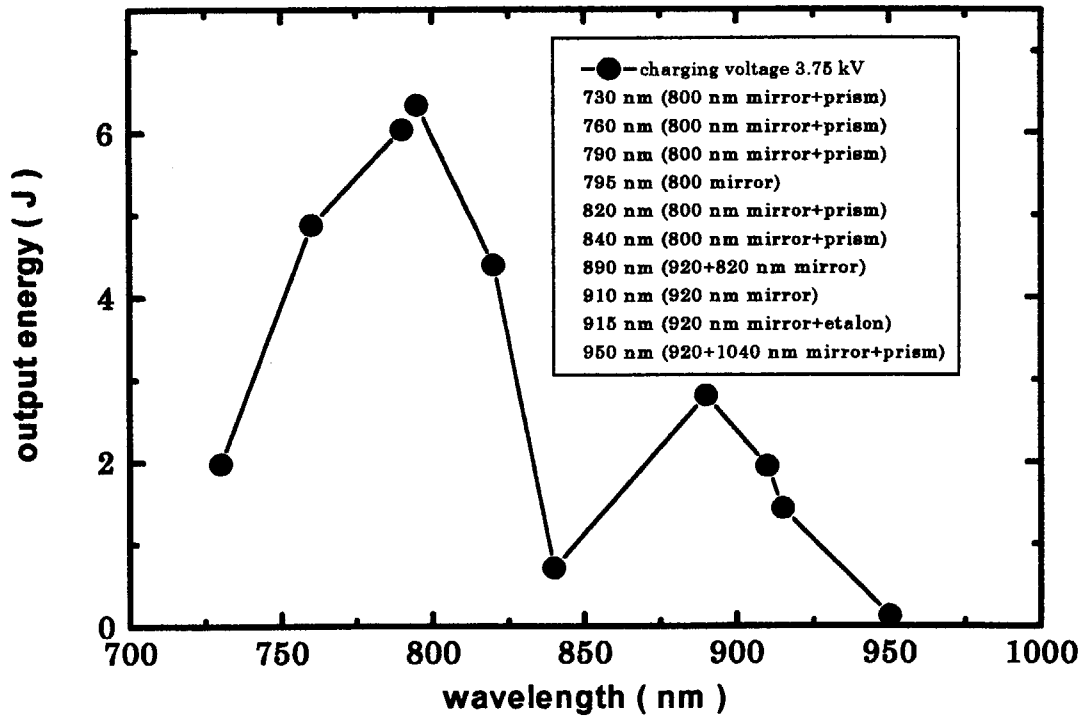


図 8 レーザー発振出力の波長依存性

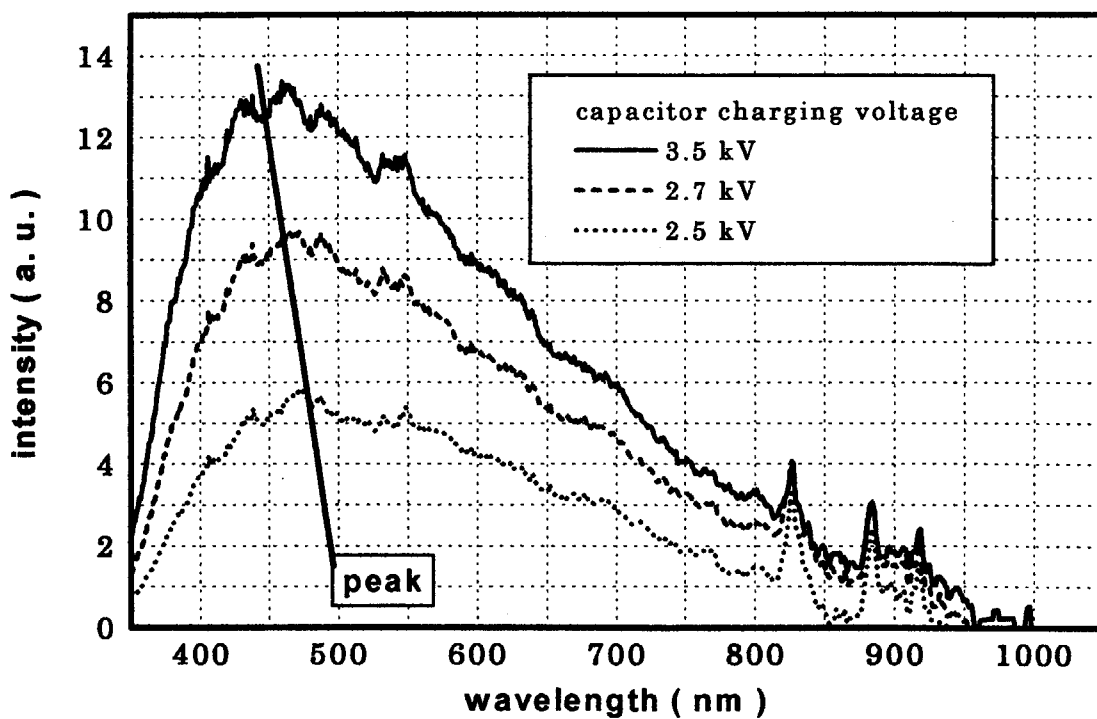


図 9 フラッシュランプからの発光スペクトル

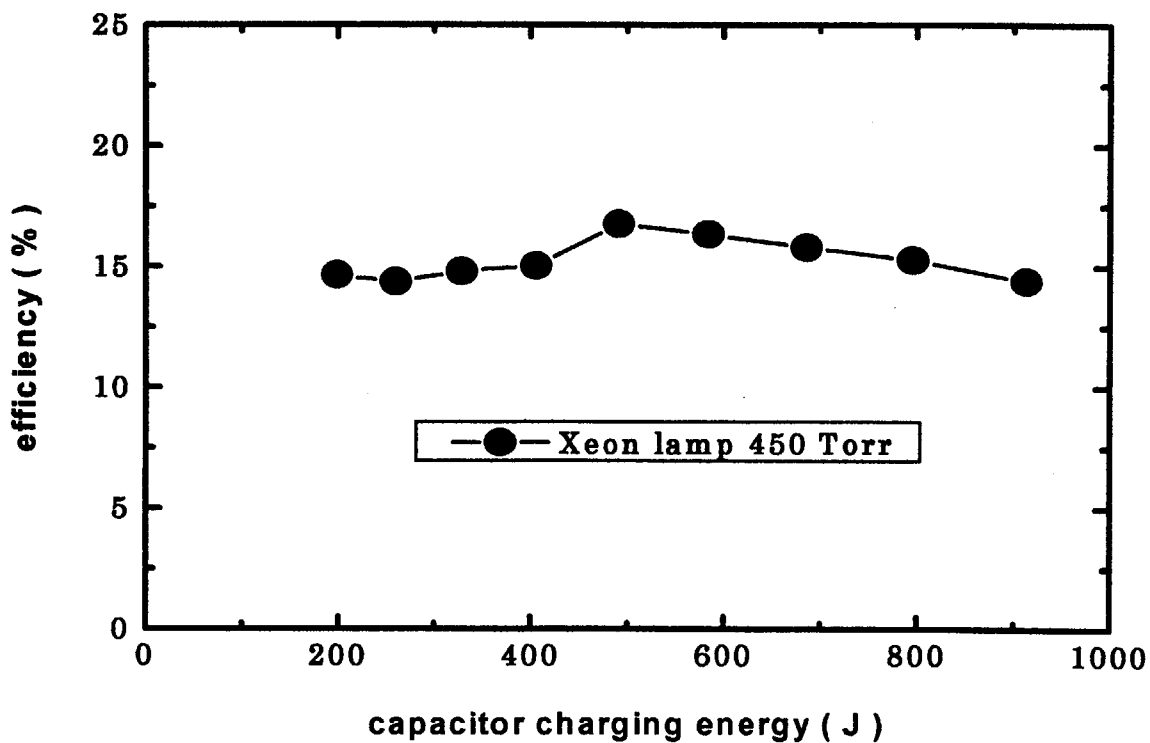


図 10 フラッシュランプ発光エネルギー

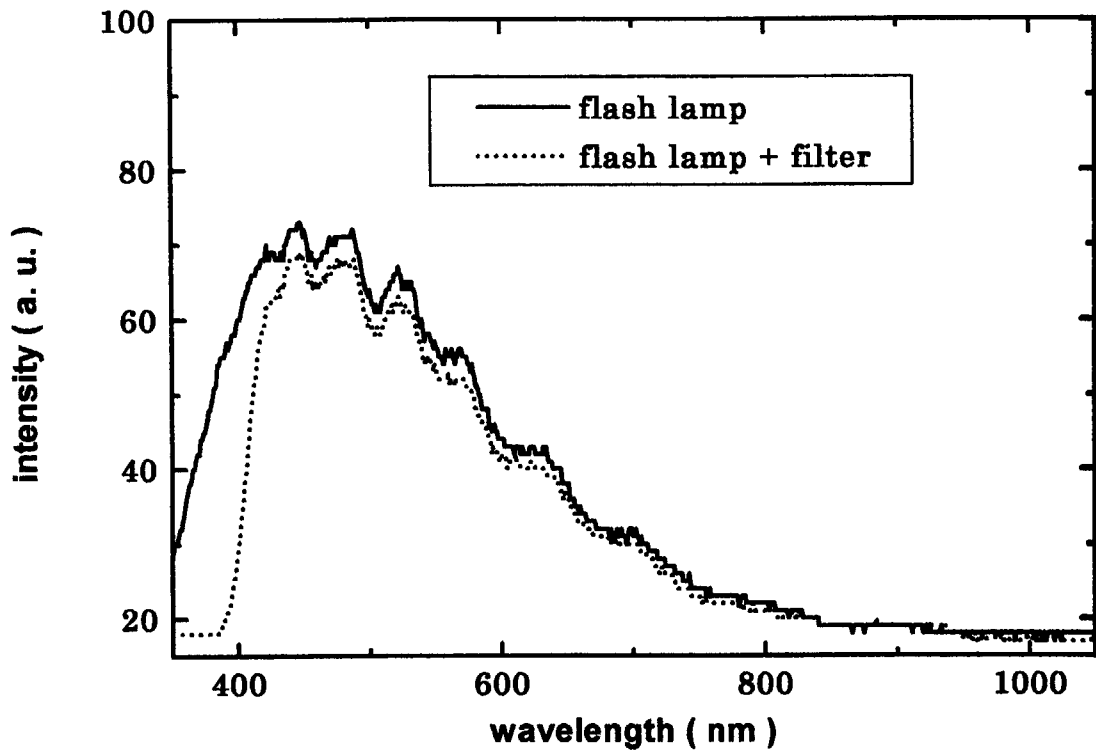


図 11 UV カットフィルターによる紫外光の除去

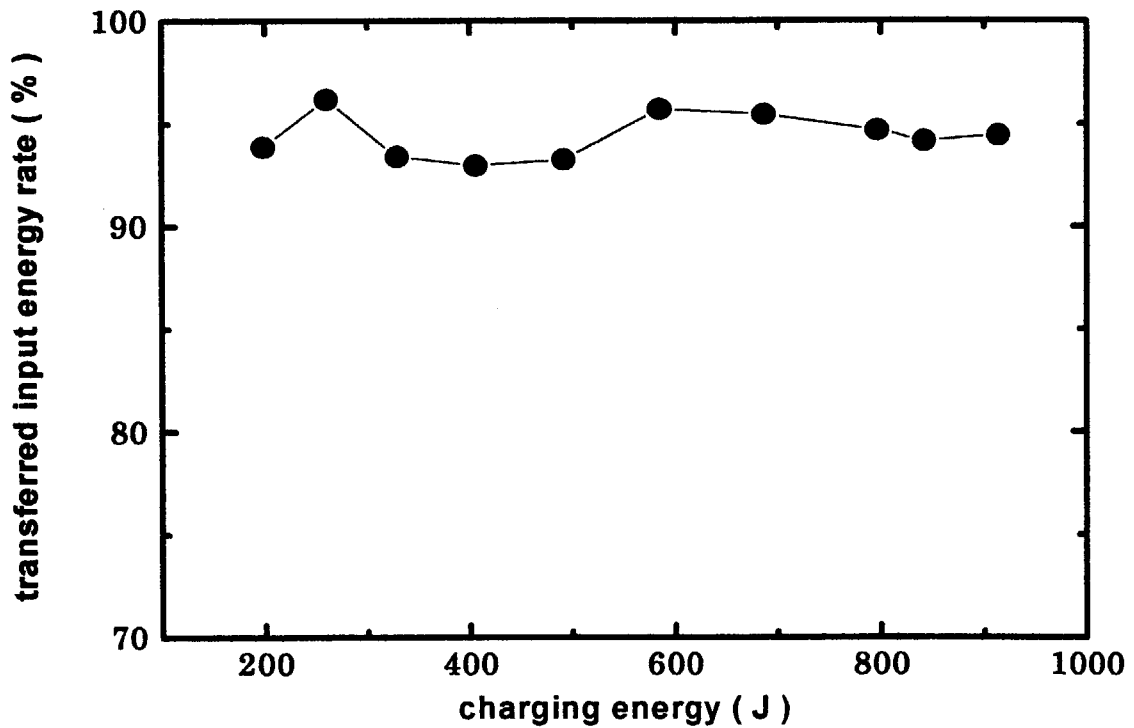


図 12 フラッシュランプ実効投入エネルギー

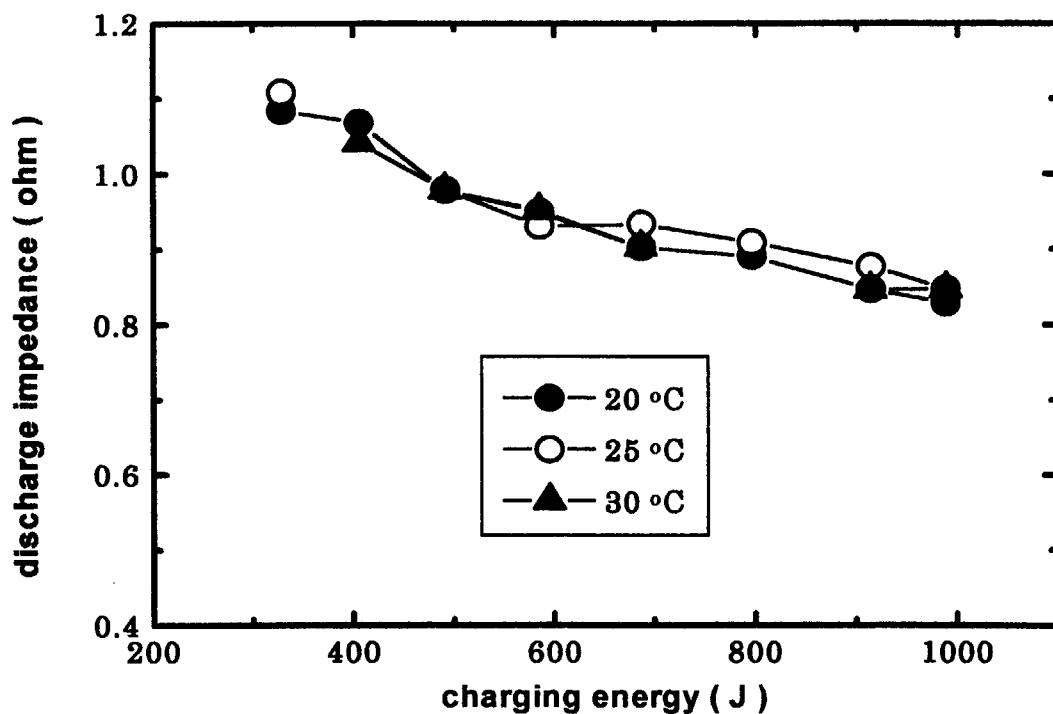


図 13 放電インピーダンスの入力依存性

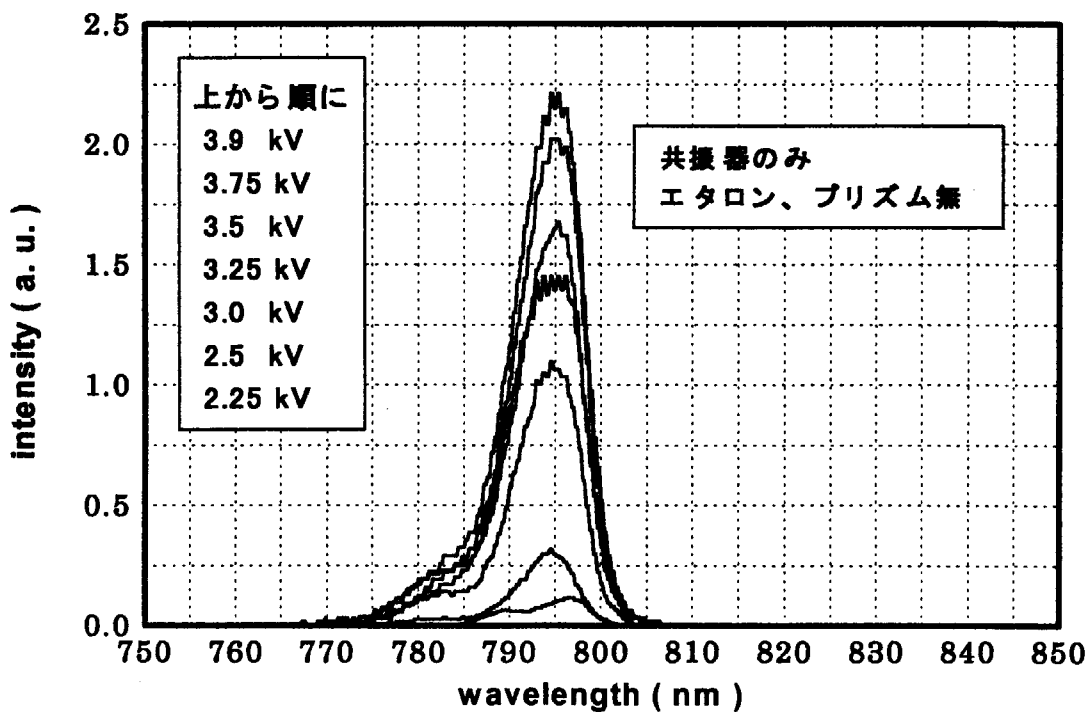


図 14 レーザー発振スペクトル(800nm)

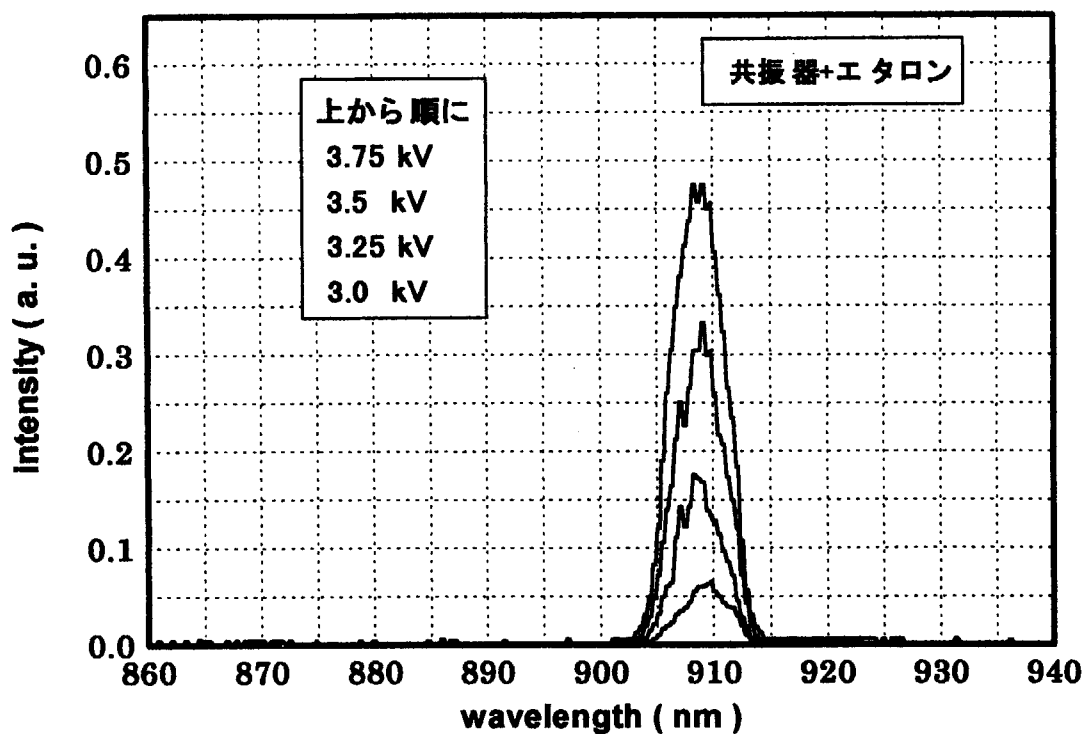


図 15 レーザー発振スペクトル(900nm)

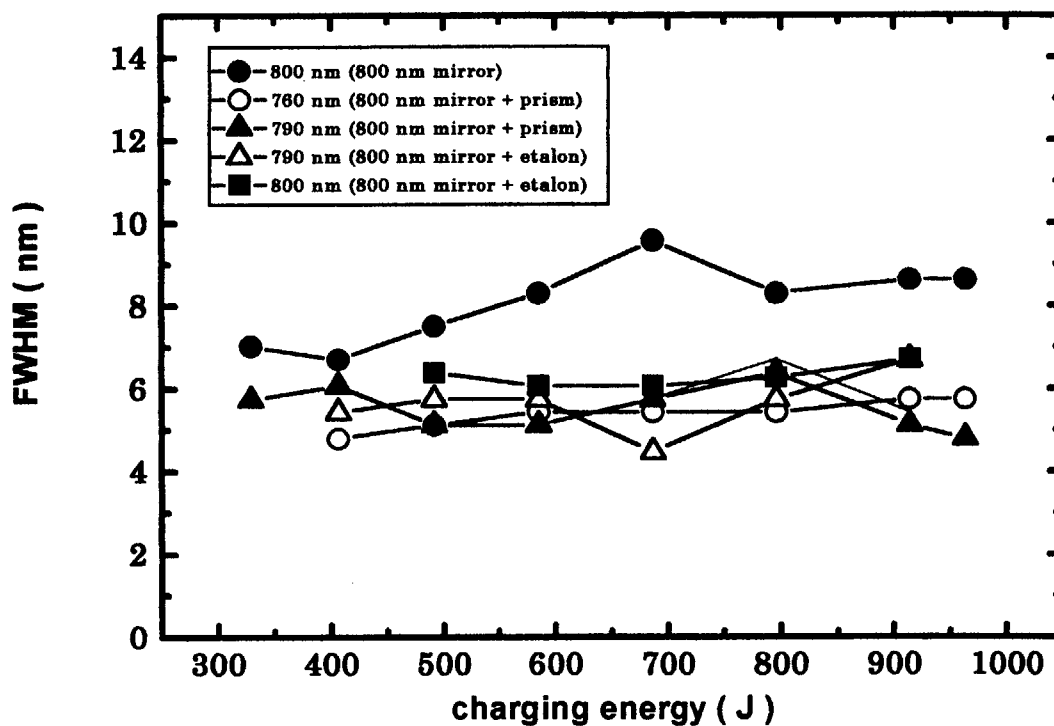


図 16 レーザー発振スペクトルの半値全幅(FWHM)(1)

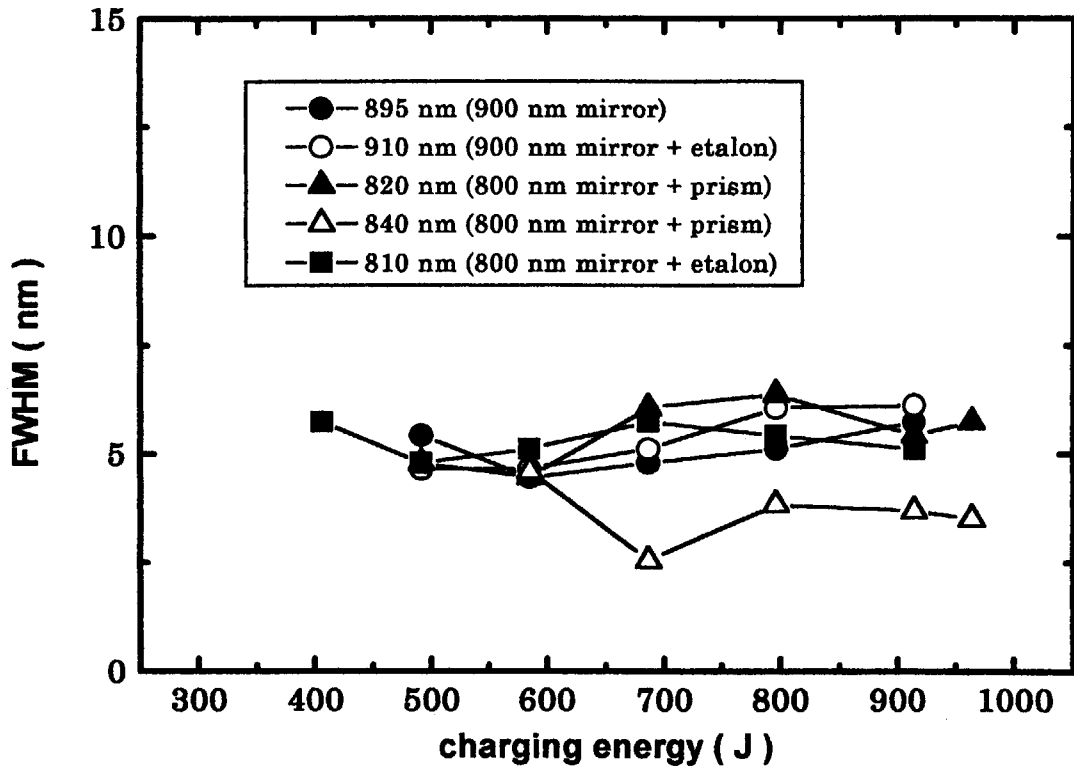


図 17 レーザー発振スペクトルの半値全幅(FWHM)(2)

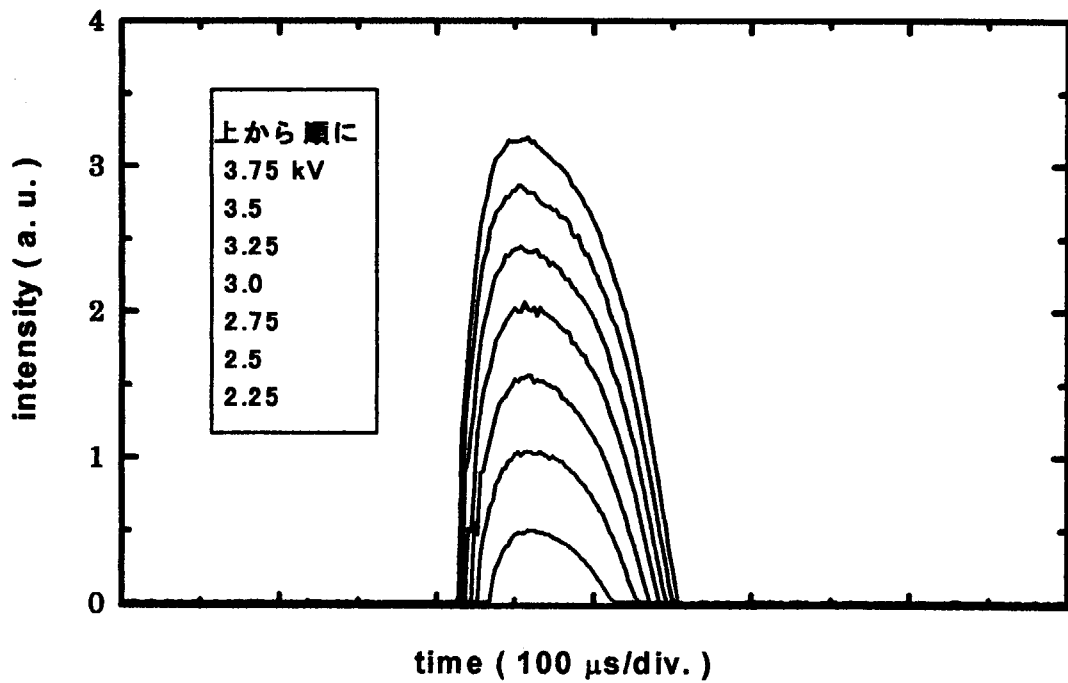


図 18 レーザーパルス波形(800nm)

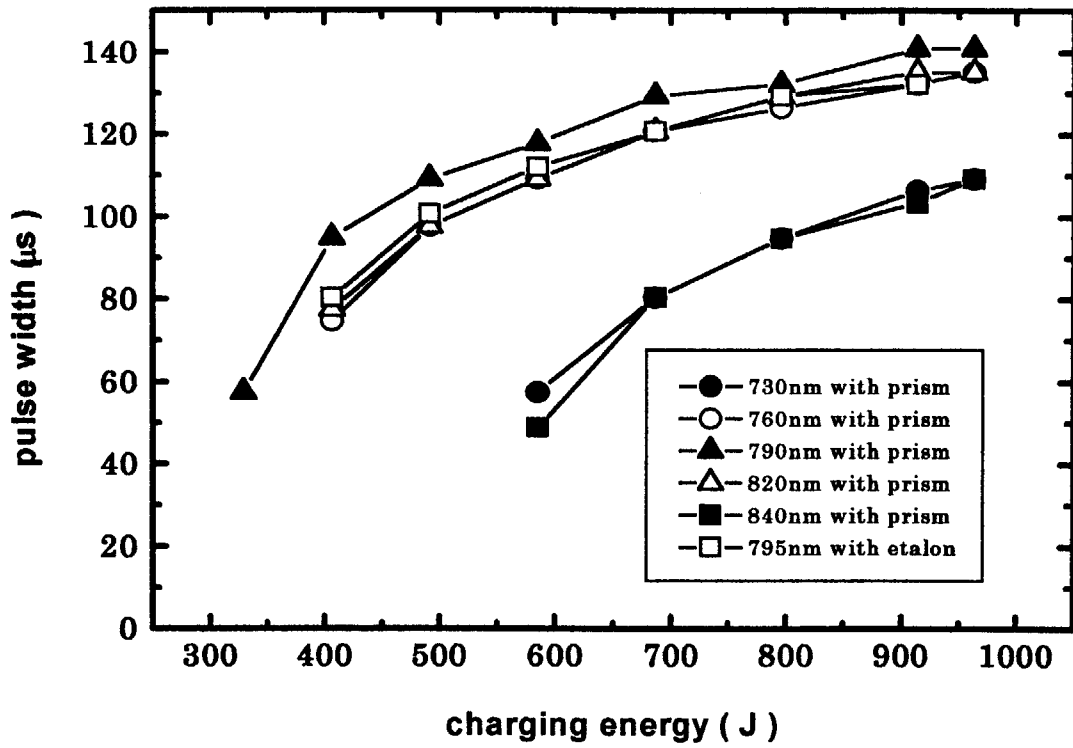


図 19 レーザーパルス幅入力依存性 (1)

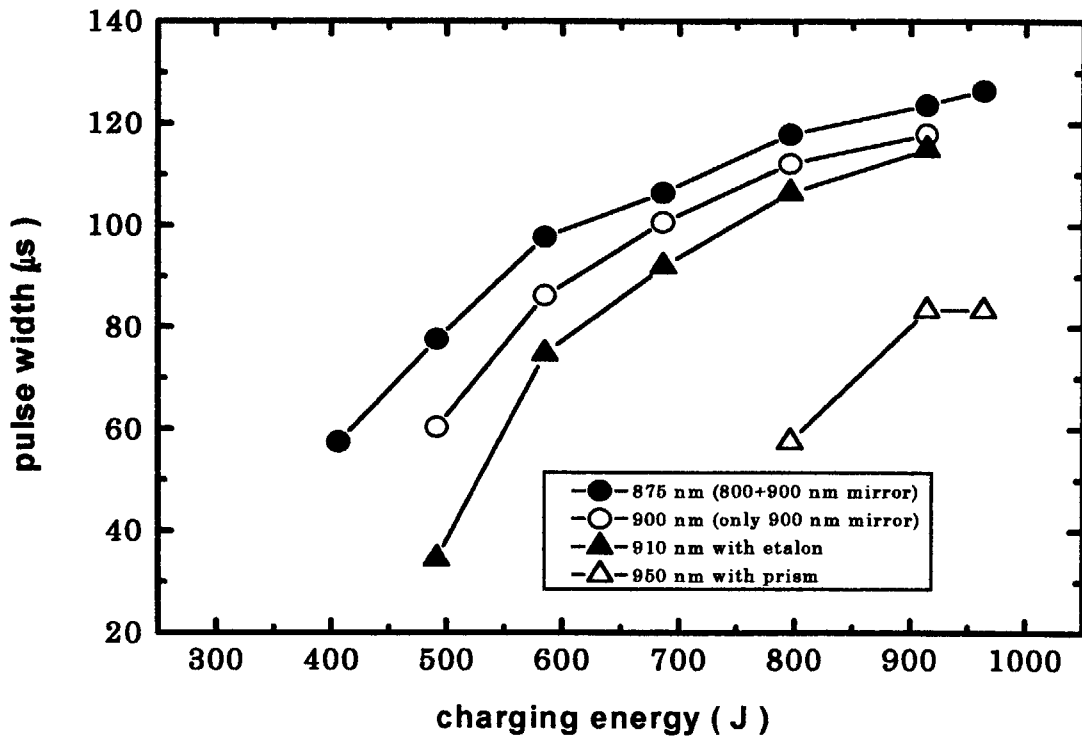


図 20 レーザーパルス幅入力依存性 (2)

This is a blank page.

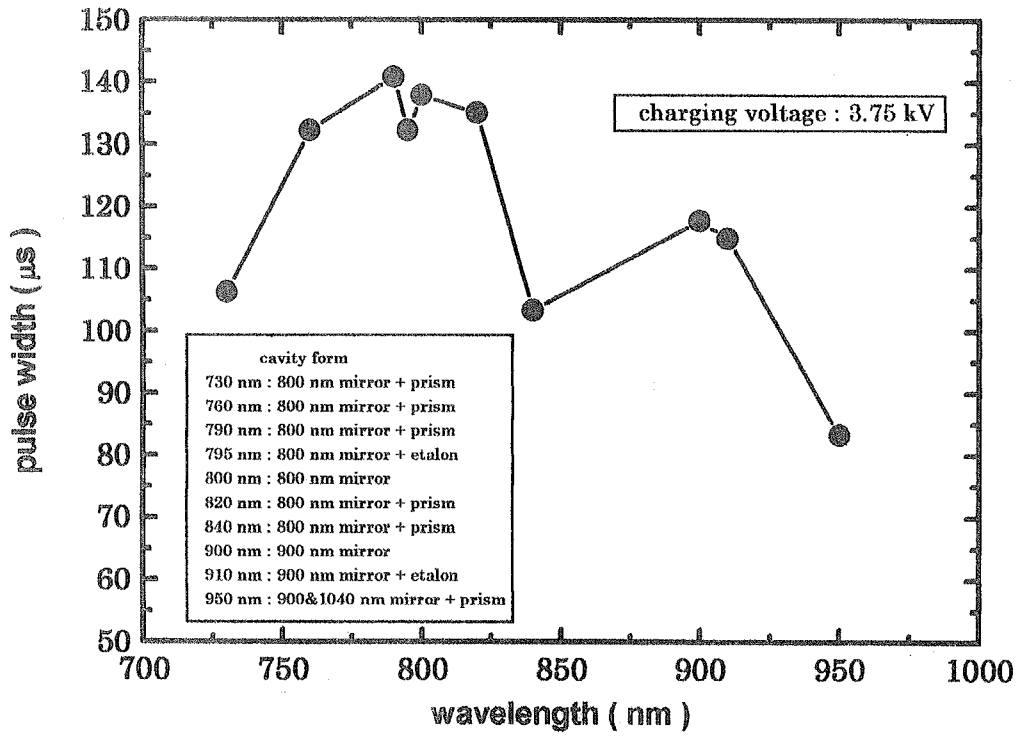


図 21 レーザーパルス幅波長依存性

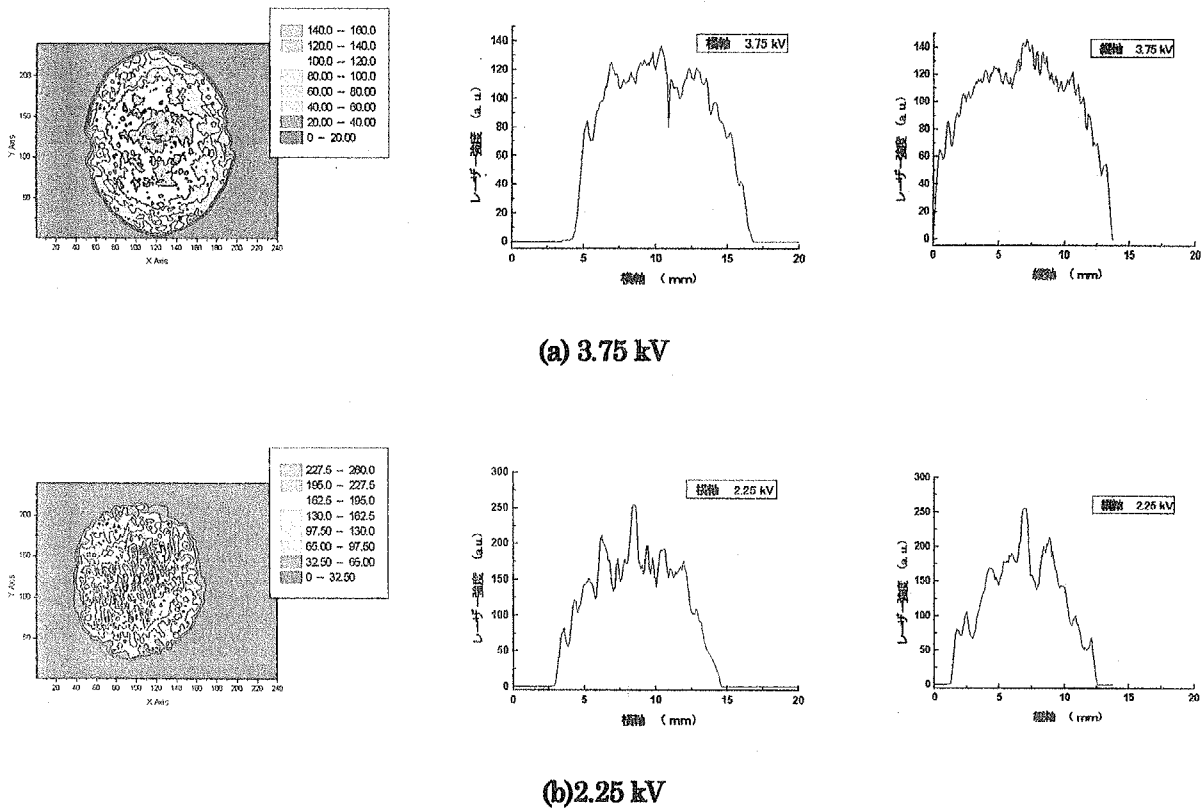


図 22 レーザー空間強度分布(800nm)

This is a blank page.

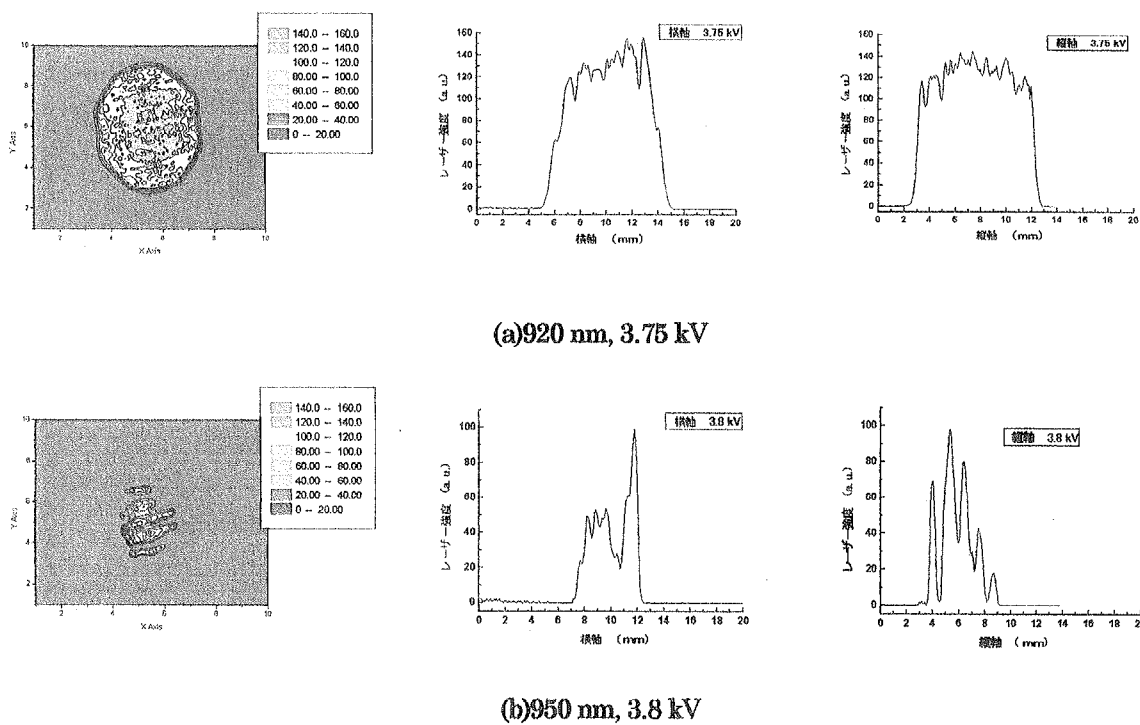


図 23 レーザー空間強度分布(920, 950nm)

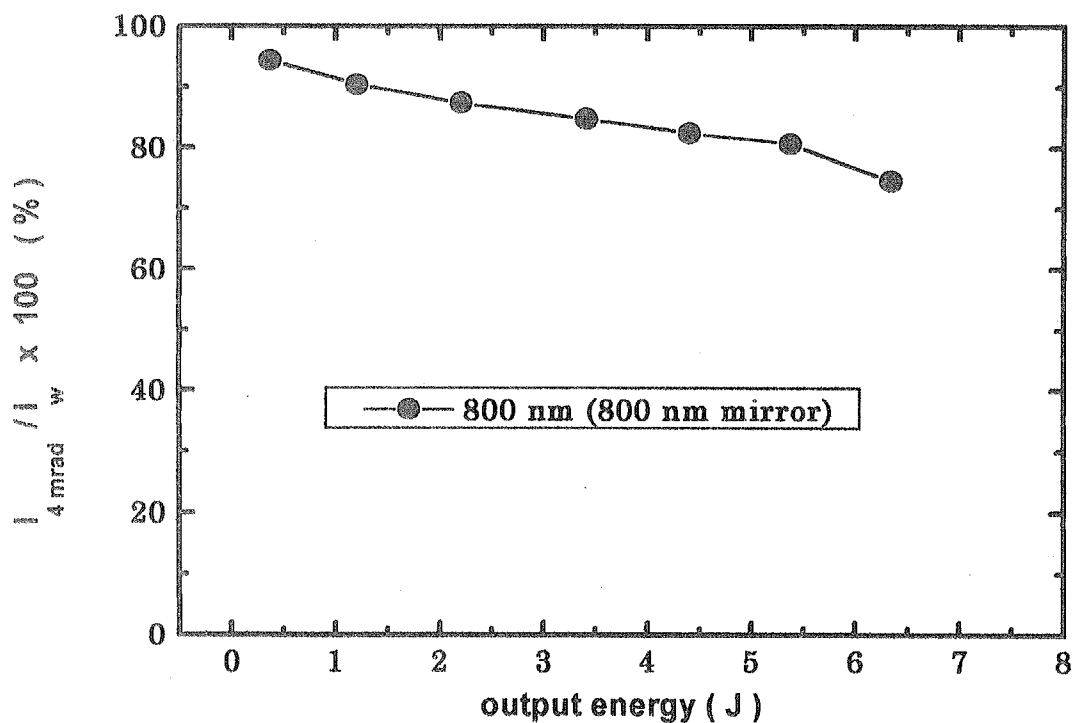


図 24 ビーム拡がりの出力依存性

This is a blank page.

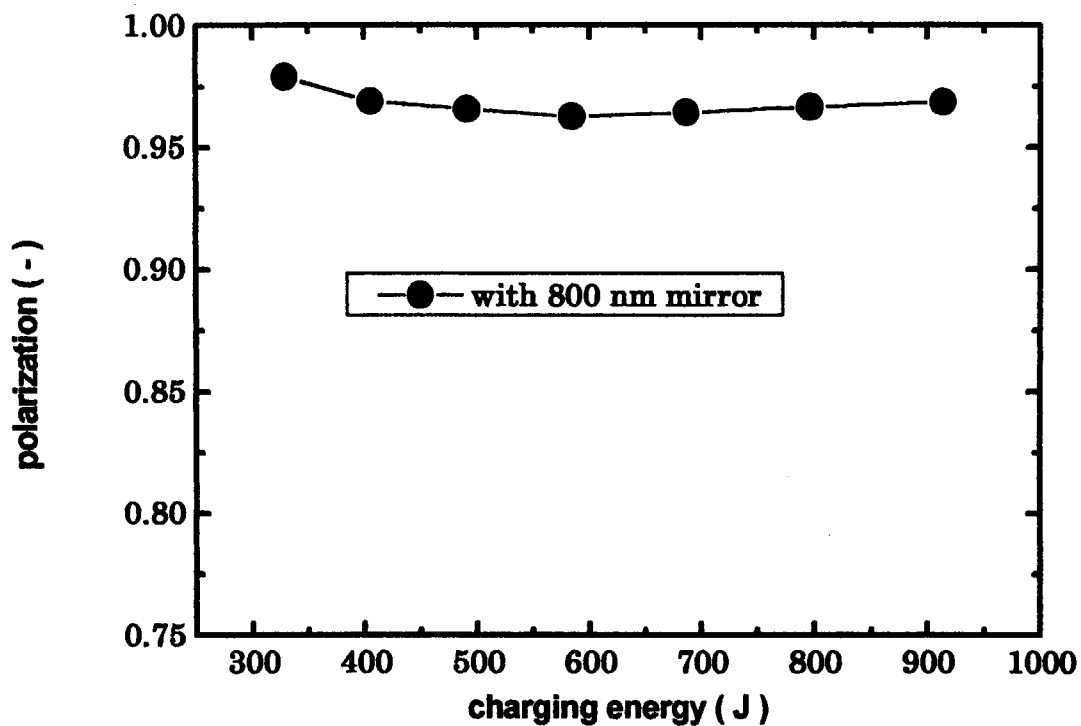


図 25 偏光入力依存性

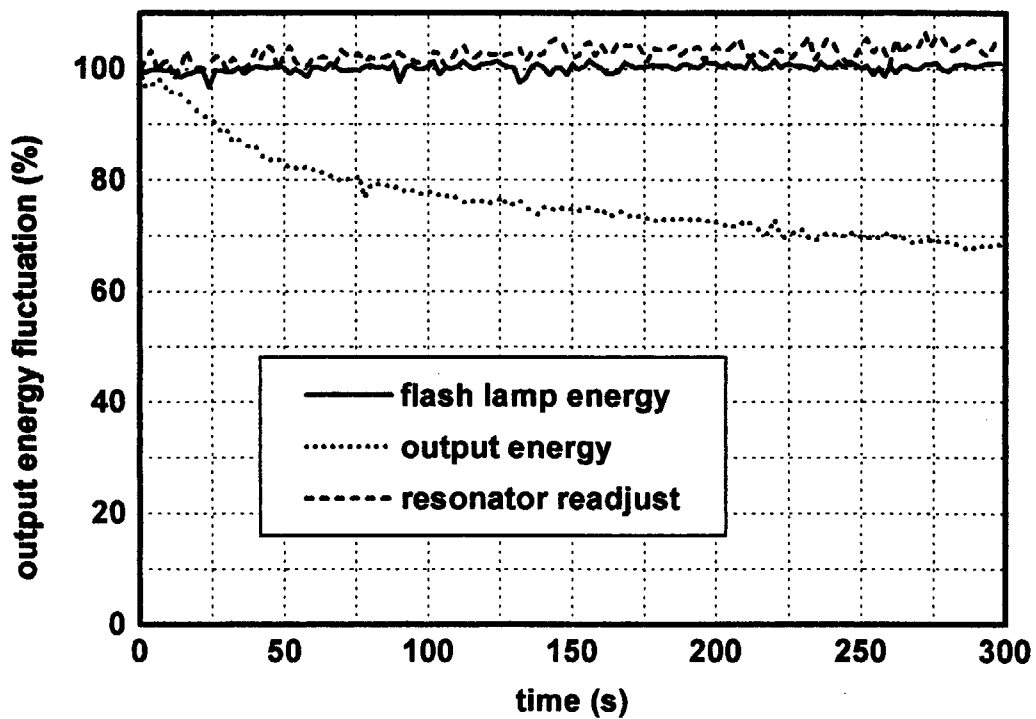


図 26 出力運転時間依存性

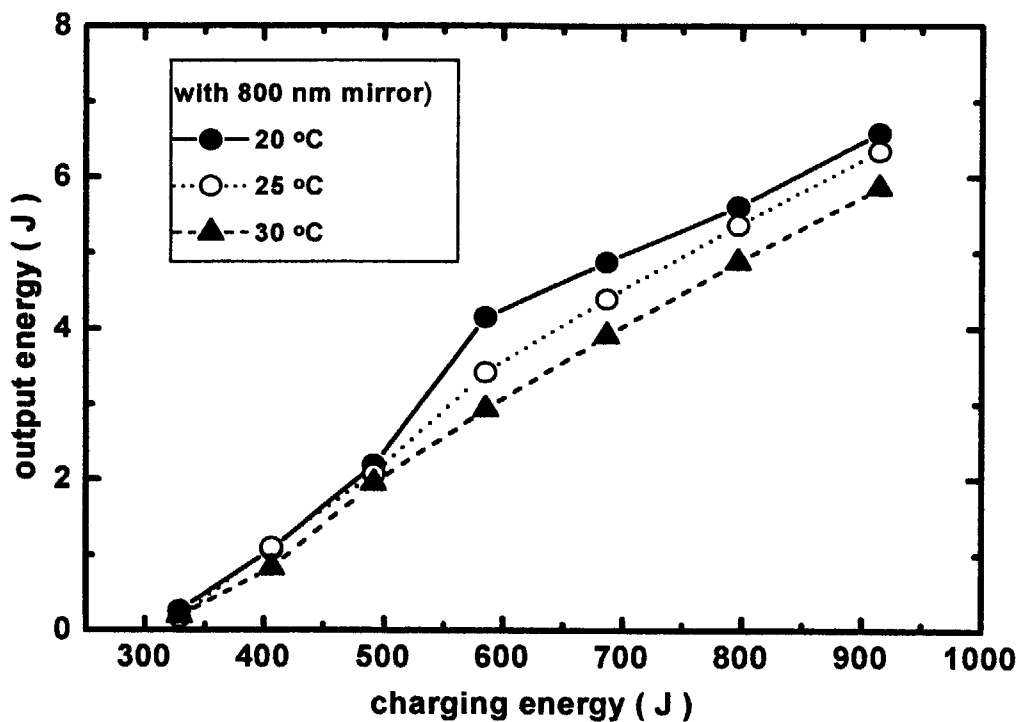


図 27 レーザー出力冷却水温度依存性

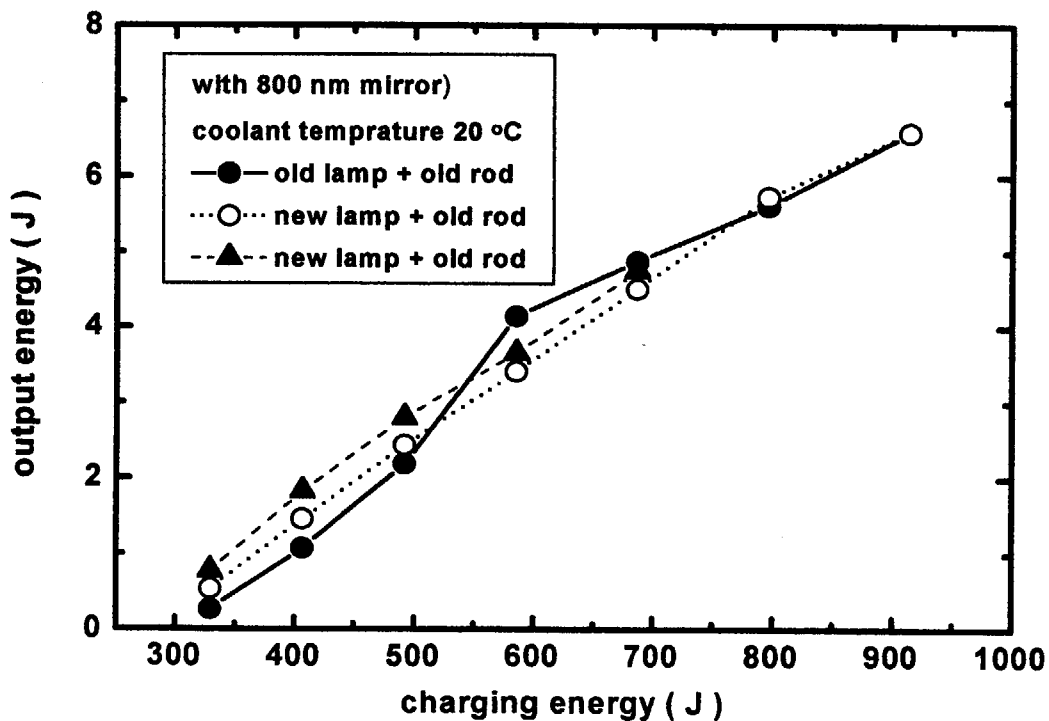


図 28 新 Ti:S ロッド、フラッシュランプ使用時の出力

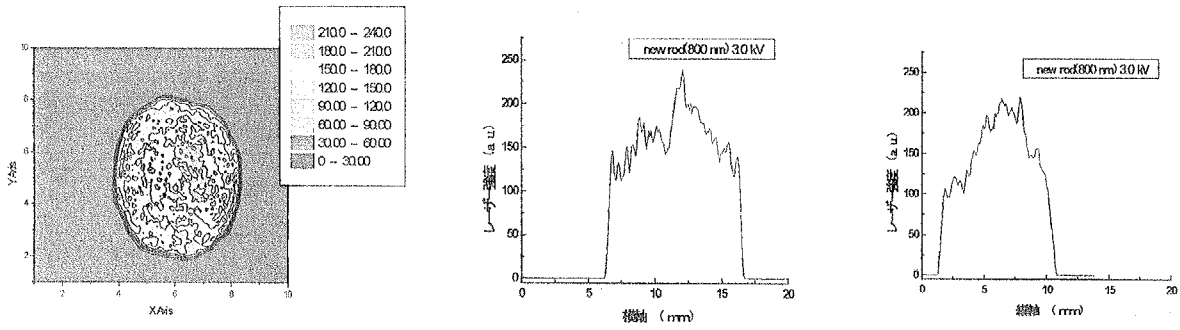


図 29 新 Ti:S 結晶ロッドレーザー空間強度分布(800nm)

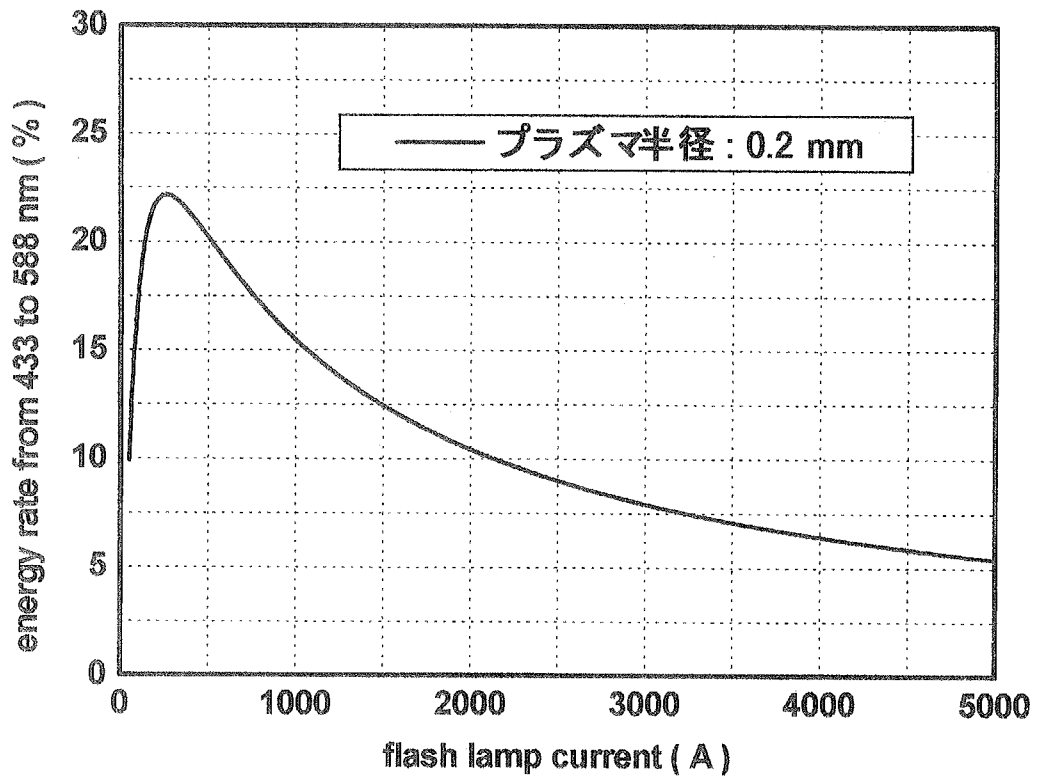


図 30 Ti:S 結晶光吸収率(437~588 nm)

This is a blank page.

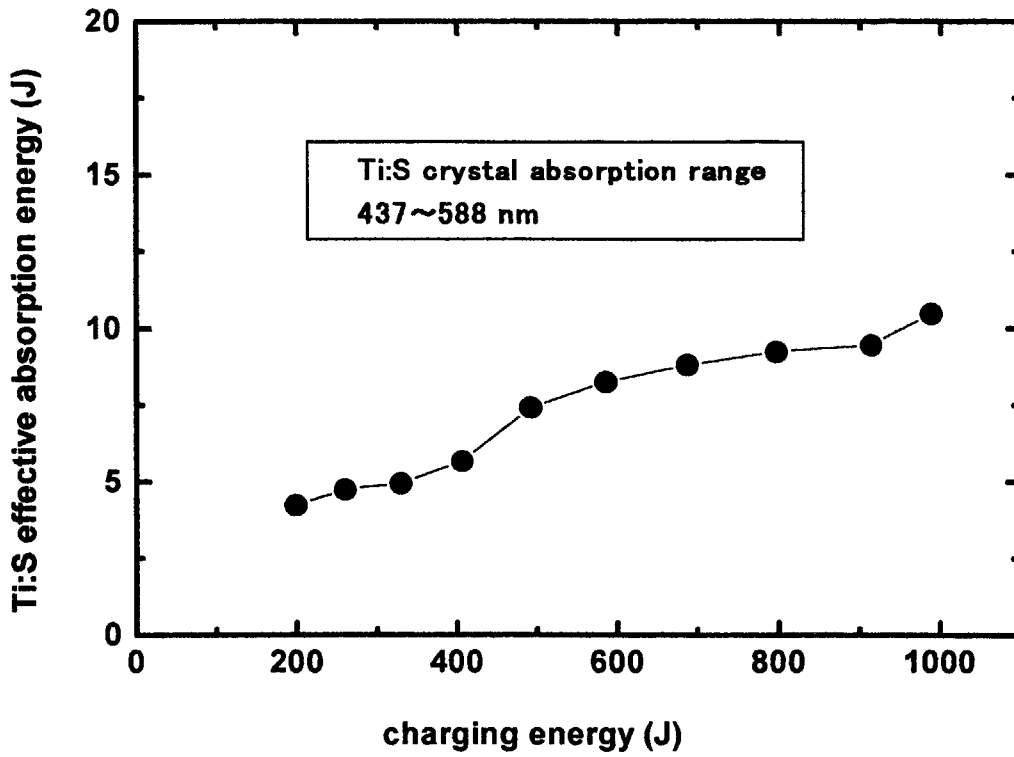


図 31 投入電気入力に対する Ti:S 結晶吸収励起エネルギー

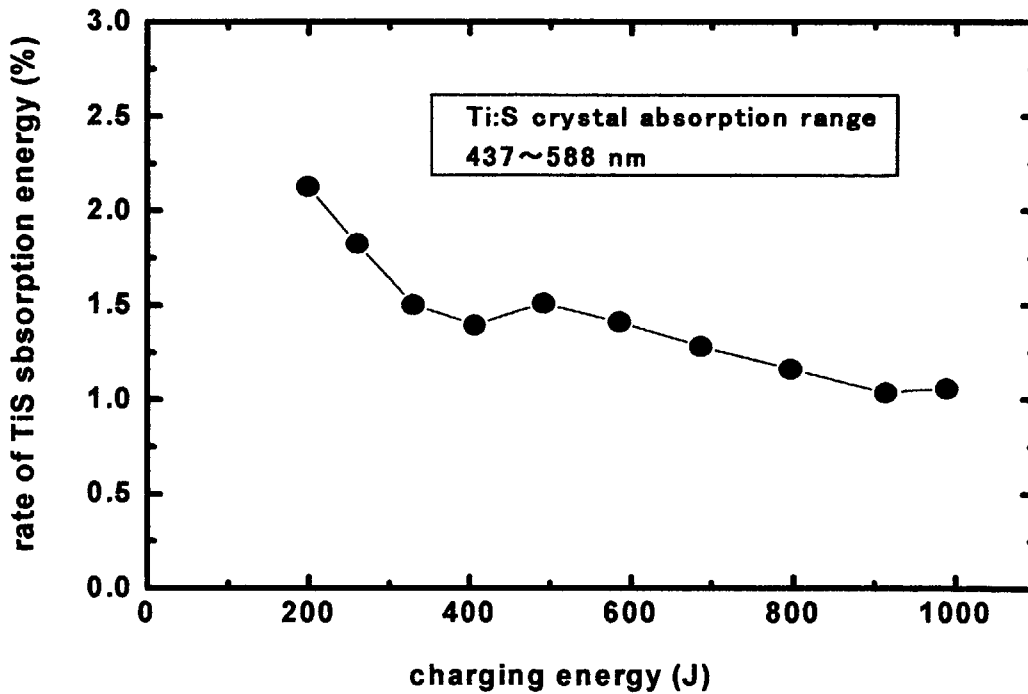
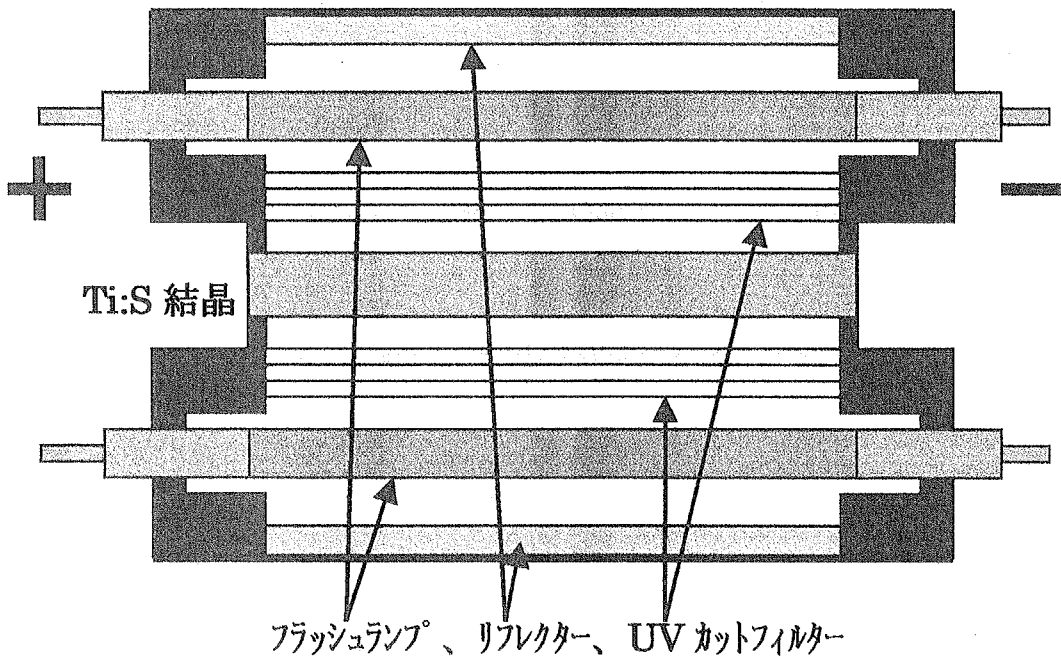
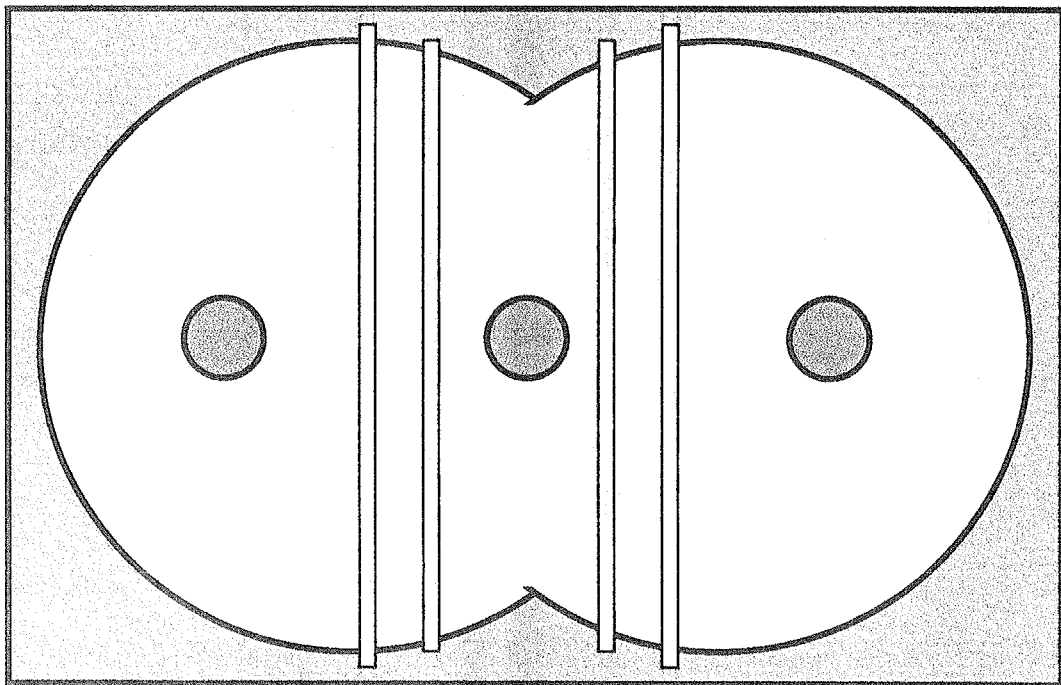


図 32 Ti:S 結晶吸収励起エネルギー率

This is a blank page.



(a) 平面図



(b) 断面図

図 33 新レーザーヘッド構造

This is a blank page.

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	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·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·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	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
線量等量	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

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, 1 eV および 1 u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。
- E,C関係理事会指令では 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

力	N(=10 ⁻⁷ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ¹	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻¹	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

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	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	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
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	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

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

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

Ti:Sapphireフリーランニングレーザーの発振特性