

JAERI-Tech

JP0450784

2004-056



リモートモニター用高繰り返しNd:YAGレーザー
共振器長制御システムの開発
(共同研究)

2004年9月

丸山 康一郎・久保村 浩之*・笠松 直史*
松岡 伸一*・中野 文彦*・菅 博文*

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, Tokaimura, Naka-
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

リモートモニター用高繰り返し Nd : YAG レーザー共振器長制御システムの開発
(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所環境科学部
丸山 庸一郎・久保村 浩之*・笠松 直史*・松岡 伸一*・中野 文彦*・菅 博文*

(2004年7月23日受理)

リアルタイムモニター用高平均出力波長可変固体レーザーは、單一周波数で発振する高繰り返し Nd:YAG レーザー(ポンプレーザー)の第二高調波によって駆動される。ポンプレーザーは單一周波数で発振する発振器とその増幅器より構成され、光の質は発振器の特性によって決定される。発振器を外部から周波数幅の狭いシーダー光を入射させて單一周波数発振させる場合、ポンプレーザー発振器の共振周波数をシーダーの発振周波数と一致させなければならない。このためポンプレーザー発振器の共振器長を長時間一定に維持するための制御システムを試作し、その制御特性を測定した。

この結果、開発した制御システムは3時間以上にわたって共振器長を一定に制御でき、共振器長が変化した場合でも1ショットで單一周波数発振にフィードバックできることを確認した。発振器光のパルス時間幅は約36 ns、波長1064 nmの基本波を波長532 nmの光に変換して測定したポンプレーザー発振器の周波数幅は116 MHzであった。また、横モードはTEM₀₀であった。さらに、制御時の発振器のパルスエネルギーは3 mJで、増幅器への入力エネルギーとしては十分高い値であった。

本研究は日本原子力研究所と浜松ホトニクス株式会社との共同研究に基づいて実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

*浜松ホトニクス株式会社

**Development of Cavity Length Control System for High Repetition Rate Nd:YAG Laser Oscillator
(Joint Research)**

Yoichiro MARUYAMA, Hiroyuki KUBOMURA*, Tadashi KASAMATSU*,
Shin-ichi MATSUOKA*, Fumihiko NAKANO* and Hirofumi KAN*

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

(Received July 23, 2004)

A high average power tunable solid state laser is pumped by the second harmonic of LD-pumped high repetition rate Nd:YAG laser consisting of a single-longitudinal-mode oscillator and amplifiers. The beam quality of the laser light depends on the characteristics of the Nd:YAG laser oscillator. To operate the Nd:YAG laser oscillator with a single-longitudinal-mode by injection seeding, the cavity length control is required to coincide the resonant frequency of Nd:YAG laser oscillator with the frequency of seeder. To realize long term frequency stability, a cavity length control system of the Nd:YAG laser oscillator is developed and the characteristics are studied.

With this system, the cavity length is controlled at the pulse repetition rate of 0.5 kHz and the single frequency operation for more than three hours is realized. The frequency width of the oscillator is around 116 MHz at the wavelength of 532 nm. The pulse duration is about 16 ns at the wavelength of 532 nm and the pulse energy around 3 mJ. It is confirmed the cavity length control system has very good performance to maintain single longitudinal mode for a long time.

Keywords: Cavity Length Control, Single-longitudinal-mode, High Repetition Rate, Nd:YAG Laser, LD-pumped

This work has been performed in JAERI as a joint research with Hamamatsu Photonics K.K.

* Hamamatsu Photonics K.K.

目 次

1.	はじめに	1
2.	周波数制御 Nd : YAG レーザー発振器システムの構成	2
2.1	共振器長制御システム	2
2.2	Nd : YAG レーザー発振器システム	3
3.	レーザー発振器制御システム性能の測定	4
3.1	モード形成時間の測定	4
3.2	制御特性の測定	5
3.3	周波数幅の測定	9
3.4	時間波形の測定	10
3.5	出力安定性の測定	11
3.6	空間強度分布の測定	12
4.	おわりに	12
	謝辞	13
	参考文献	13

Contents

1.	Introduction	1
2.	Frequency Controlled Nd:YAG Laser Oscillator System	2
2.1	Frequency Control System	2
2.2	Nd:YAG Laser Oscillator	3
3.	Characteristics of Frequency Controlled Nd:YAG Laser System	4
3.1	Mode Build-up Time	4
3.2	Control Characteristics	5
3.3	Frequency Width	9
3.4	Temporal Shape of Laser Pulse	10
3.5	Output Stability	11
3.6	Transverse Mode	12
4.	Conclusion	12
	Acknowledgment	13
	References	13

This is a blank page.

1. はじめに

光パラメトリック発振を利用した波長可変固体レーザーは、BBO や KTP などの非線形結晶をレーザー発振媒質としたレーザーで、発振波長域が可視から赤外域と広く、レーザーを利用した環境計測への応用では種々の大気中有害物質をリアルタイムで計測することが可能になる^{1,2,3)}。中でもパルス発振の波長可変固体レーザーは、高エネルギーのパルス、コンパクト、取り扱いが容易など、従来のパルス発振色素レーザーにはない特徴を有している^{4,5,6,7)}。しかし、これまで、波長可変固体レーザーは、一般にパルス繰り返し数が数十 Hz 程度であり、リアルタイム測定に必要な kHz オーダーのパルス繰り返し数で数十 mJ のパルスエネルギーを発生できるものは実用化されていない。このような波長可変固体レーザーのパルス繰り返し数及び出力エネルギーは、基本的には、ポンプ光源の特性に依存する。また、従来の波長可変固体レーザーは近紫外から赤外までのより広い発振波長域を得るために、Nd:YAG レーザーの第三高調波（波長 355 nm）によってポンピングされていた。しかし、第 3 高調波を高い繰り返しで安定して得ることは、第三高調波発生用非線形結晶の熱歪み等の影響により極めて困難である。一方、高い信頼性を持つ高出力半導体レーザーで励起する高パルス繰り返し、高パルスエネルギーの Nd:YAG レーザーが実用化されつつある。この種のレーザーは、従来のランプ励起方式と比較して 1 枞以上高い効率と平均出力、高ビーム品質など、その基本波は優れた性能を持ち、非線形結晶 KTP によって効率良く波長 532 nm の第二高調波（緑色光）に変換できる^{8,9,10)}。このような Nd:YAG レーザーの第二高調波を波長可変固体レーザーのポンピングに利用すれば、その高繰り返し、高エネルギー発振が実現可能となる¹¹⁾。

発振周波数幅の狭い波長可変固体レーザーを実現するためにはポンプレーザーである Nd:YAG レーザーの周波数幅をも狭める必要がある。さらに、Nd:YAG レーザー光の強度分布は、結晶やコーティングに損傷を与えることがないよう一様な分布であることが要求される。これらの要求を満たすには Nd:YAG レーザーを單一周波数で発振させなければならない。このためには、(1)発振器自体を單一周波数で発振させる、(2)発振器外部から周波数幅の狭い、高品質のレーザー光でシーディングし、これを種光にして Nd:YAG レーザー発振器（ホストレーザー）を單一周波数で発振させる^{12,13,14)}、という 2 つの方法がある。前者は單一周波数を選択するため共振器内部に干渉計などの波長選択素子を設置する必要があり、発振器で高いエネルギーを得ることが難しく、所定のエネルギーを得るために利得の高い複数の増幅器が必要である。一方、後者はシーダー光の存在によりモード形成時間が不要となり、前者に比べて 1 枇以上高いエネルギーが得られ、この結果、その後の増幅で高エネルギーを得やすい。そこで、後者のシーディングによる発振器システムを構築した¹⁴⁾。

外部からシーディングするレーザー（シーダー）としては、單一周波数発振が容

易な連続発振レーザーを用いる。シーダーは一定の周波数で発振し、その周波数幅は数十 kHz と狭い。一方、通常、ホストレーザーは、ポンピングによる結晶の温度変化に起因する屈折率や室温変動による共振器長の僅かな変化により、共振周波数が変化し、シード光の周波数に共振せず、シーディングができなくなる。従って、共振周波数が変化するホストレーザーと発振周波数が一定のシーダーを組み合わせても、それだけではホストレーザーを单一周波数で発振させることはできない。ホストレーザーをシーダーの周波数で発振させるには、ホストレーザーの共振周波数をシーダーの発振周波数に一致させることが必要で、そのためには共振器長の制御が不可欠である^{15,16,17)}。そこで、レーザー媒質にスラブ結晶を使った高繰り返し、高エネルギーホストレーザーを長時間单一周波数で発振させるための共振器長制御システムを開発し、その制御特性を測定したので報告する。

2. 周波数制御 Nd : YAG レーザー発振器システムの構成

2.1 共振器長制御システム

Fig. 1 にホストレーザー共振器長制御システムの構成を示す。システムはホストレーザーの Q スイッチトリガ信号とレーザーパルスの時間差を測定するためのユニバーサルカウンタ、共振器ミラーを搭載した PZT (圧電トランസ്ട്യൂസ) を駆動し共振器長を変化させることでトリガ信号とパルス時間差を最小にするための制御信号を発生させるコンピュータ、コンピュータの制御信号を 0 ~ 10 V の電圧に変換する電圧変換器及び共振器ミラーを搭載した PZT へ 0 ~ 1,000 V の電圧を供給する DC 電源より構成される。カウンタは 20 msec の時間間隔で Q スイッチトリガ信号とレーザーパルスの時間差を測定し、結果をコンピュータに送る。共振器長の制御は、ユニバーサルカウンターで測定された時間差が予め定めた値以上になった場合に開始され、時間差が設定値以下になった時はその印加電圧を保持する。

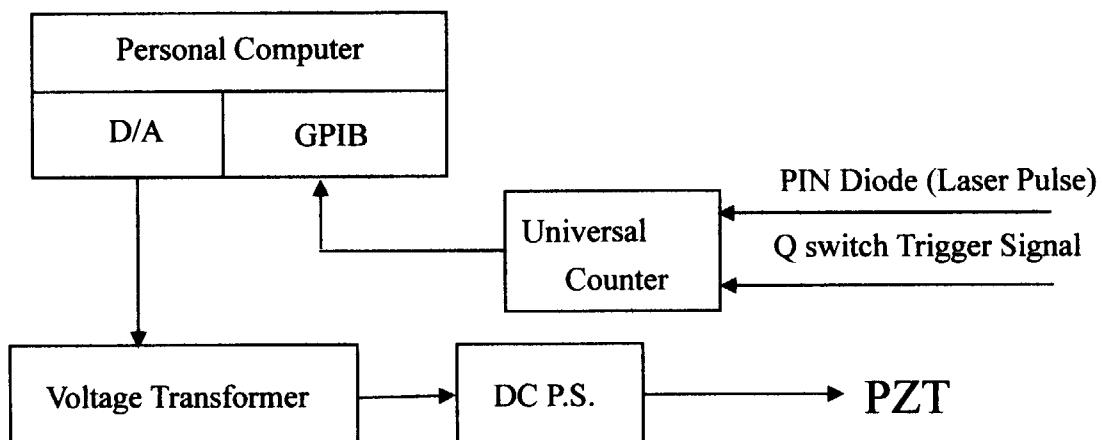


Fig.1 Cavity length control system

2.2 Nd : YAG レーザー発振器システム

Fig.2 に單一周波数発振器の構成を示す。発振器システムは最大繰り返し数が 1 kHz のホストレーザーとシーダーより構成される。シーダーは、周波数幅約 10 kHz (波長幅約 4×10^{-6} nm)、周波数安定性 100 MHz /時、強度分布 (空間モード) TEM₀₀ の連続発振 Nd:YAG レーザーである。シーダー光はホストレーザー共振器内の Q スイッチ用偏光素子を利用して共振器内に入射される。

ホストレーザー発振器の結晶は 100 W クラスの高平均出力の半導体レーザー光でポンピングされるが、通常使用される円筒状のレーザー結晶では高出力ポンピングに伴う熱歪み等による偏光解消効果の増加などにより、單一周波数での発振が困難になる。そこで、レーザービームがレーザー結晶中をジグザグに伝播することで、高平均入力ポンピング条件下での偏光解消効果を抑制し、高い出力エネルギーを達成できる入射面がブリュースターカットのジグザグスラブ結晶を採用した。シーダーは、この入射面がブリュースターカット面に垂直な偏光で入射する。

ホストレーザー共振器は、曲率半径 1,000 mm の全反射鏡と透過率 50% の出力ミラーにより構成され、その共振器長は約 50 cm である。パルス発振制御を行うための Q スイッチは LiNbO₃ 結晶である。レーザー結晶は、最大パルスエネルギー 100 mJ、最大デューティー 20% の半導体レーザーアレイでポンピングされる。共振器長は可動距離 2 μm/1,000 V の電歪素子 (PZT 素子) に搭載した全反射ミラーを共振器長制御システムで駆動することで制御する。ホストレーザーには、高次の空間モードの発振を防止するため、後部の全反射鏡と Q スイッチの間にアパーチャーを設置する。周波数制御を行わないレーザーの周波数は周辺環境の温度によって変化する (3.1 GHz/k)。そこで、ホストレーザー結晶の温度変化による屈折率 (共振器長) 変動を低く抑え、制御システムへの負荷を少なくするため、レーザー結晶を冷却水チラーにより設定温度 ±0.01°C に制御する。レーザー結晶の冷却水流量は 0.5 ~ 1.2 GPM の間で出力が最大となる最適な流量に設定する。

周波数幅及び周波数安定性は、波長 1064 nm の基本波を非線形結晶 (KTP) で波長 532 nm の第二高調波へ変換し、これを FSR (Free Spectral Range : 自由スペクトル域) を 3 GHz に設定したフィネス約 50 (波長域 550 nm ~ 650 nm) のファブリーペロー (F-P) エタロンで測定する。基本波のパルス時間幅は第二高調波より長く、また F-P エタロンのフィネスは波長 532 nm では低くなるため、基本波の周波数幅は実際に観測される値より狭くなる。レーザーパルス時間波形は、基本波、第二高調波をバイオプトローナ光電管で検出し、これを周波数帯域 1 GHz のオシロスコープで観測する。空間モードは CCD カメラにより観測する。

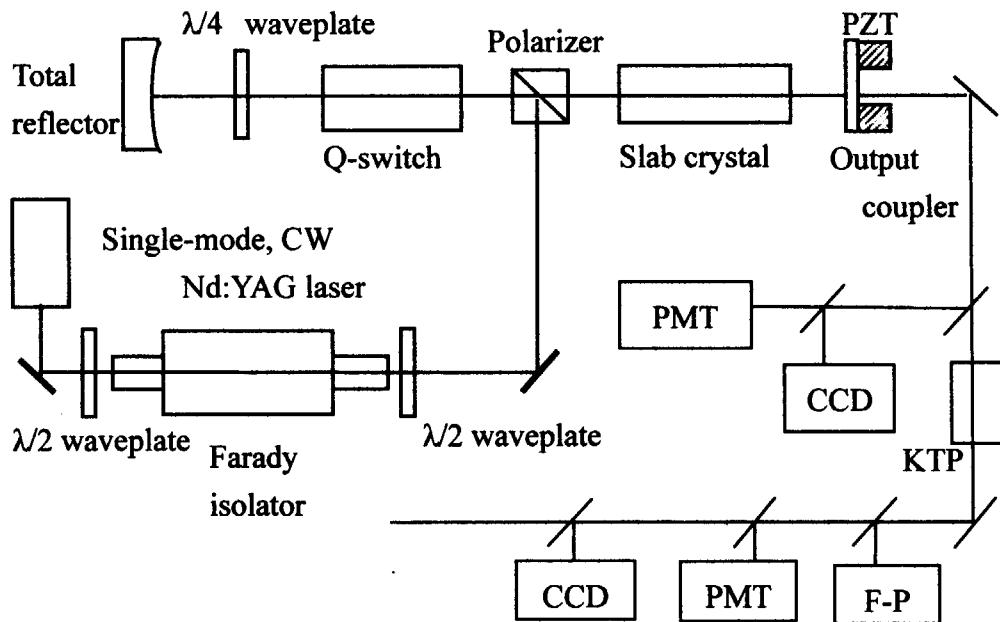


Fig.2 Injection seeded single longitudinal mode Nd:YAG laser oscillator

3. レーザー発振器制御システム性能の測定

3.1 モード形成時間の測定

ホストレーザー単独の場合は、自然放出光が共振器内を何回か往復してモードを形成してからレーザー発振する。このため、Qスイッチが開いてからレーザー発振までに時間を要する。一方、外部から單一周波数レーザー光をシーディングする場合は、シーディング光のモードが他のモードより早く成長してレーザー発振するため、ホストレーザー単独の場合に比べてレーザー発振までの時間が短くなる。従って、レーザーパルスの発生時間とパルス波形、周波数波形の関係を測定することによって共振器長の制御タイミングを決定することができる。Fig.3(1)はホストレーザーとシーダーの周波数が一致していない場合のホストレーザーのパルス時間波形である。マルチモード発振によるビート状の波形によってレーザーパルスが自然放出光から成長したものであることが分かる。Fig.3(2)はホストレーザーの共振器長が変化してシーダー光の周波数に近づいた時の時間波形である。レーザーパルスは、(1)に比べて約 22 ns 早く発振しているが、マルチモード発振による僅かなビートが観測され、自然放出光によるモード形成の影響が見られる。この時、周波数を観測すると、單一周波数発振と幾つかの周波数で発振するマルチモード発振が交互に観測され、完全な單一周波数でないことが分かる。(3)及び(4)のパルス波形は、ビートのない滑らかな形状で、ホストレーザーの共振周波数がシーダー光の周波数に一致し、シーダー光が種となって單一周波数発振している特徴を有している。

この時の発振時間は、(1)に比べて(3)が約 35 ns、(4)が約 54 ns 早く発振している。また、周波数波形の測定から両者とも完全に單一周波数であることが確認できた。これは、ホストレーザーの共振器のフィネスが小さいため、利得の得られる周波数幅が広く、共振に近い近共振状態でも單一周波数発振が起こるためである。(3)の結果は、近共振状態での発振を、さらに(4)は最も利得の高い共振状態である。以上の測定結果から、本ホストレーザーの自然放出光によるモード形成時間は約 55 ns であり、レーザーパルスがシーダーの外れている状態から約 30 ns 以上早く発振するように共振器長を調整することでホストレーザーの共振周波数はシーダーの発振周波数と一致し、單一周波数で発振することがわかる。即ち、試作したレーザーシステムでは、Q スイッチトリガ信号とホストレーザーパルスの時間差は、シーダーの外れた状態で約 510 ns であるから、レーザーパルスが 480 ns より早い時間で発振するようにホストレーザーの共振器長を調整することによって発振は單一周波数発振となる。

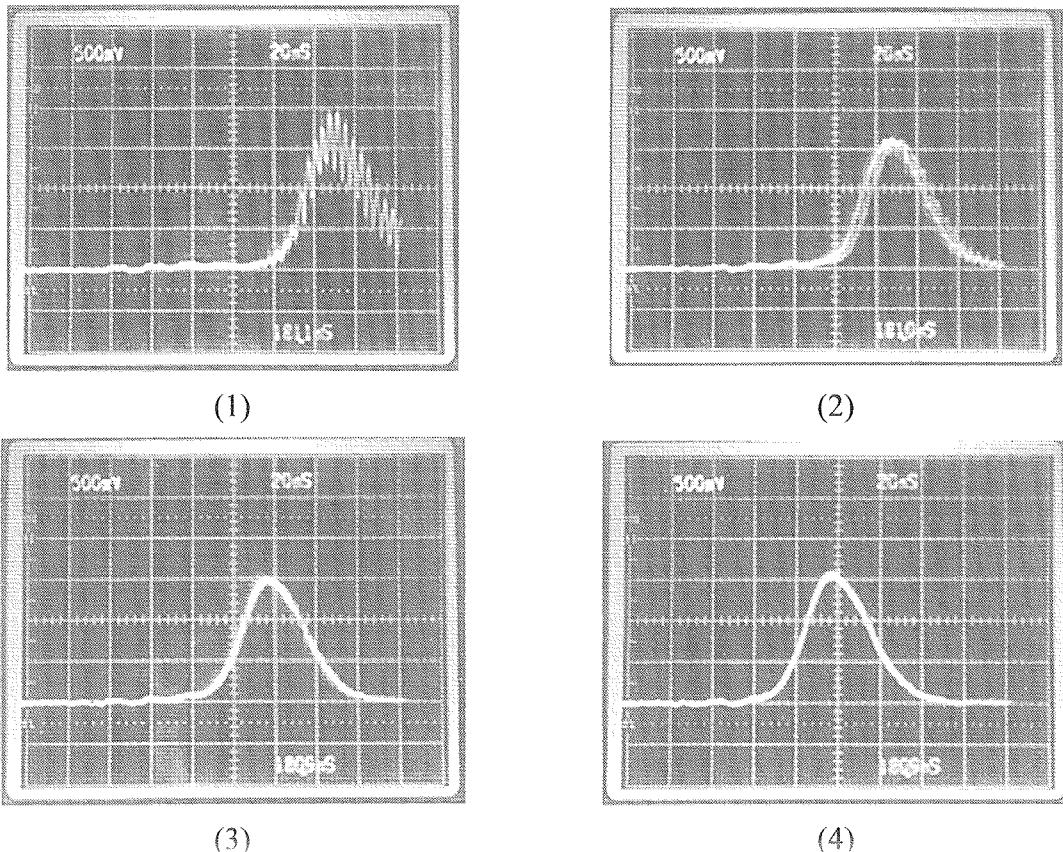


Fig.3 Mode build up of host laser pulse

3.2 制御特性の測定

Fig.4 にホストレーザー共振器の全反射ミラーを保持する PZT の電圧を変化させた時の出力パルス遅延時間の変化を示す。図に見られるように PZT に印加する電圧

を 0~1,000 V の間で変化させると、トリガ信号からレーザーパルスが発生するまでの時間遅れが 2 回変化し、この 2 点でシーダー光の発振周波数とホストレーザーの共振周波数が一致することが分かる。ホストレーザーの共振周波数がシーダー光の発振周波数から完全に外れた場合、レーザーパルスの発生時間は最も遅く約 510 ns である。逆に、ホストレーザーの共振周波数がシーダー光の発振周波数と完全に一致すると、レーザーパルスの発生が最も早くなり、その時間は約 460 ns である。

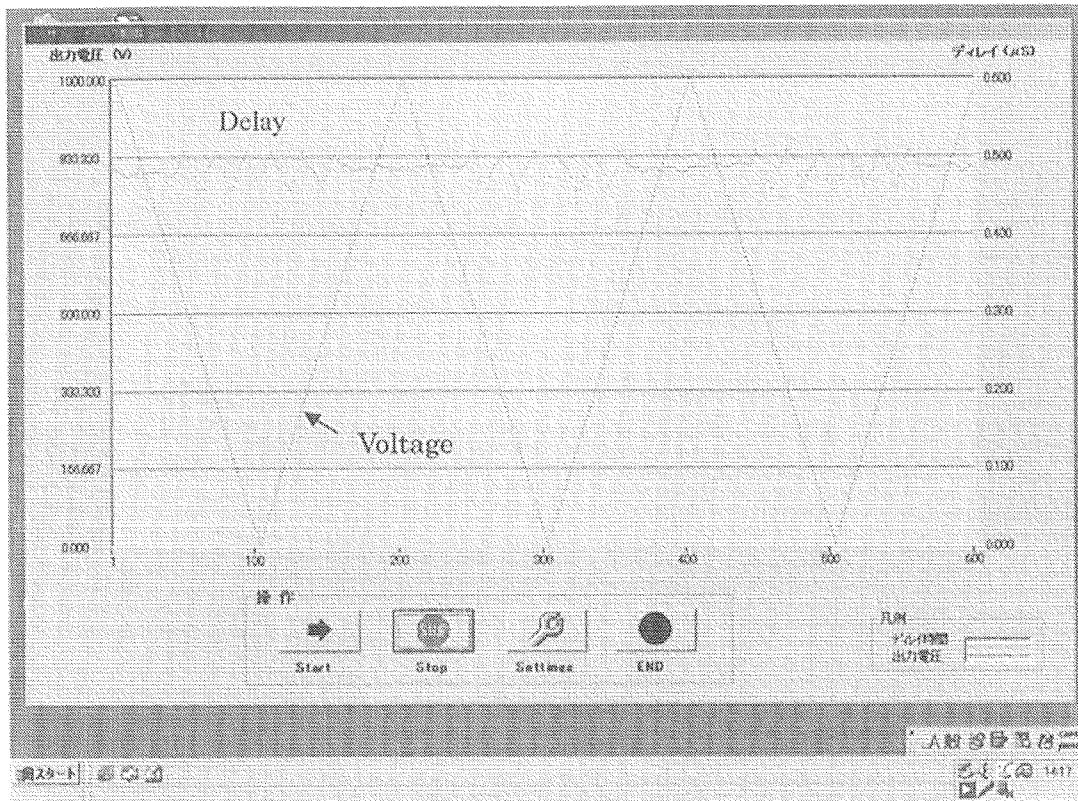


Fig.4 Laser pulse delay time as a function of PZT voltage

Fig.5 は、ホストレーザーの共振器長を、シーダーがない場合のレーザーパルス発生時間遅れの 95% (約 485 ns) で制御開始するように設定した時のホストレーザーの制御状態を示したもので、ホストレーザーが単一周波数で発振していることを表している。時間軸 500 ポイントまではパルス発生時間が約 460 ns に近い値を示し、ほぼ完全にホストレーザーの共振周波数とシーダーの発振周波数が一致している。時間軸が 500 ポイント以上のところでレーザーパルスの発生時間が多少長くなっているが、設定値よりまだ低く、設定範囲内となっているため制御は行われず、このため PZT への印加電圧は一定のままである。この時同時に観測しているホストレーザーの周波数波形及び時間波形から、ホストレーザーは単一周波数で発振していることを確認している。

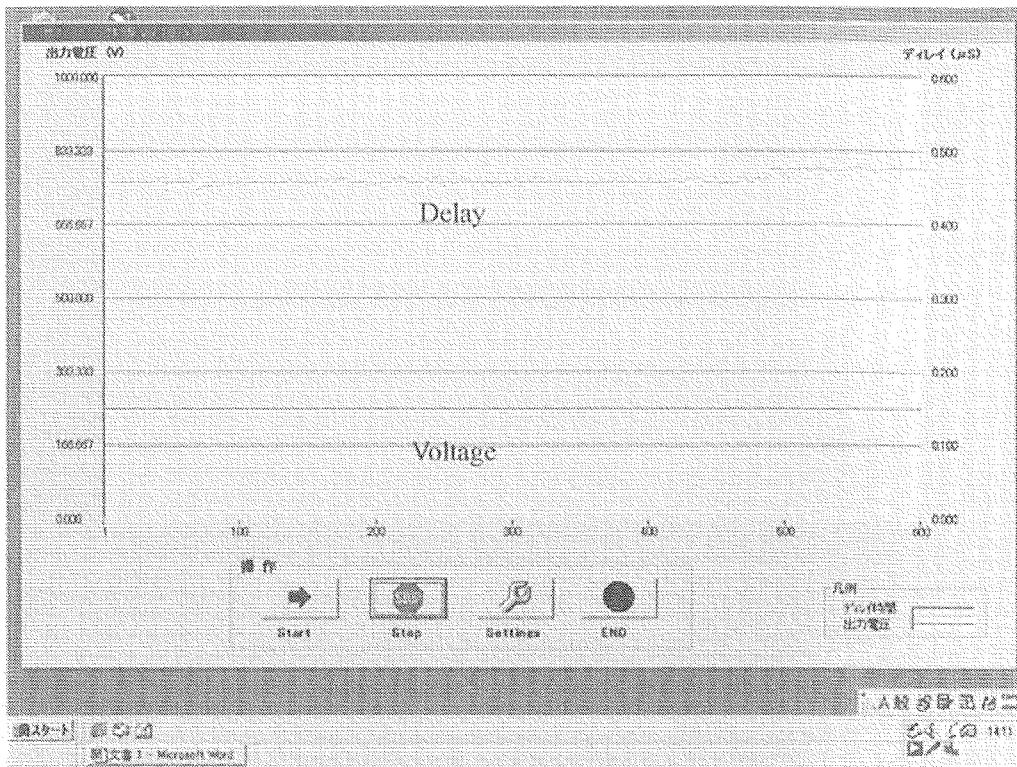


Fig.5 Pulse delay time and PZT voltage

Fig.6 は、PZT を制御する電圧のステップ初期値を 5 V に設定した時の制御状態を示したものである。時間軸約 330 ポイントでパルス発生時間が増大し、ホストレーザーの共振周波数とシーダー光の発振周波数がずれたことが分かる。制御システムはホストレーザーの共振周波数をシーダー光の発振周波数と一致させるため PZT への印加電圧を変化させているが、單一周波数へフィードバックするのに約 30 ms (15 ショット) の時間を要していることが分かる。

Fig.7 は、PZT への印加電圧ステップ初期値を 25 V に設定した時の制御電圧と遅延時間の変化である。時間軸 30、280、510 ポイントでは遅延時間が設定値 480 ns より大きくなり、マルチモード発振になったため、一方、時間軸 430 ポイントでは遅延時間が設定値の 480 ns になったため制御を行ったものである。電圧ステップ初期値が高いため、時間軸 30 ポイントでは 2 ショット目に、また 280、510 ポイントでは 3 ショット目に遅延時間が設定値内になり單一周波数発振にフィードバックされている。時間 430 ポイントでは、1 ショットで遅延時間が設定値内になっている。

Fig.8 は、PZT への印加電圧ステップ初期値を 50 V に設定した時の制御特性である。図より時間軸 100、500、及び 520 ポイントで遅延時間が設定値 480 ns より大きくなり、ホストレーザーの共振器長制御のために PZT 電圧が変化している。時間軸 100 ポイントでは遅延時間が設定値より僅かに大きくなつたために PZT へ印加する電圧の制御を行っている。時間軸 500 及び 510 ポイントでは、遅延時間が 500 ns を超えているが 1 ショットの制御で 480 ns 以下の設定値に戻っている。即ち、PZT への印加電圧ステップ初期値が 50 V の場合、ステップ電圧初期値が Fig.7 に比べて

2倍高いため、1ショットで共振器長は元に戻り、パルス毎に共振器長が制御できていることが分かる。

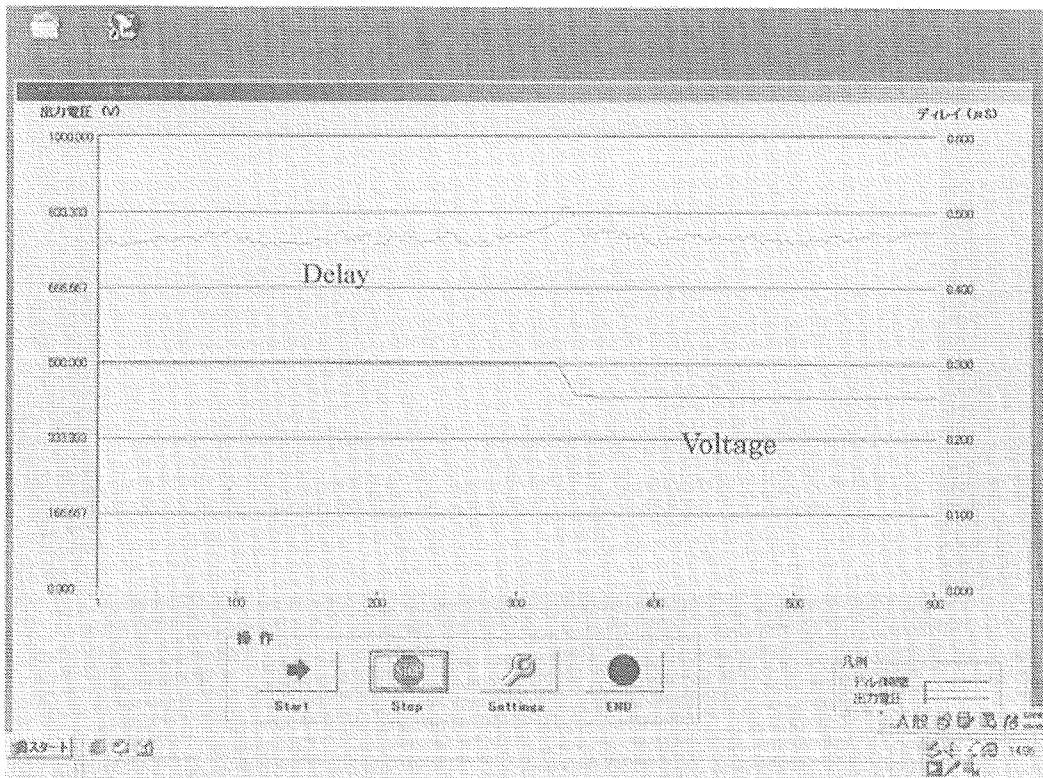


Fig.6 Cavity length control characteristic with initial voltage step of 5 V

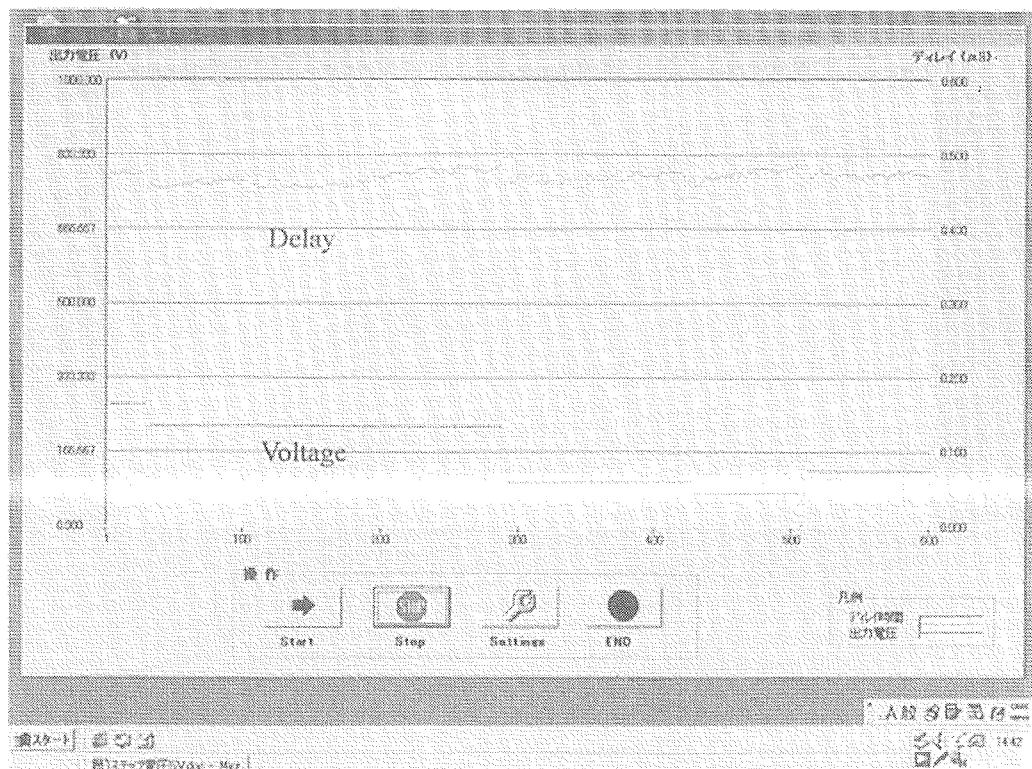


Fig.7 Cavity length control characteristic with initial voltage step of 25 V

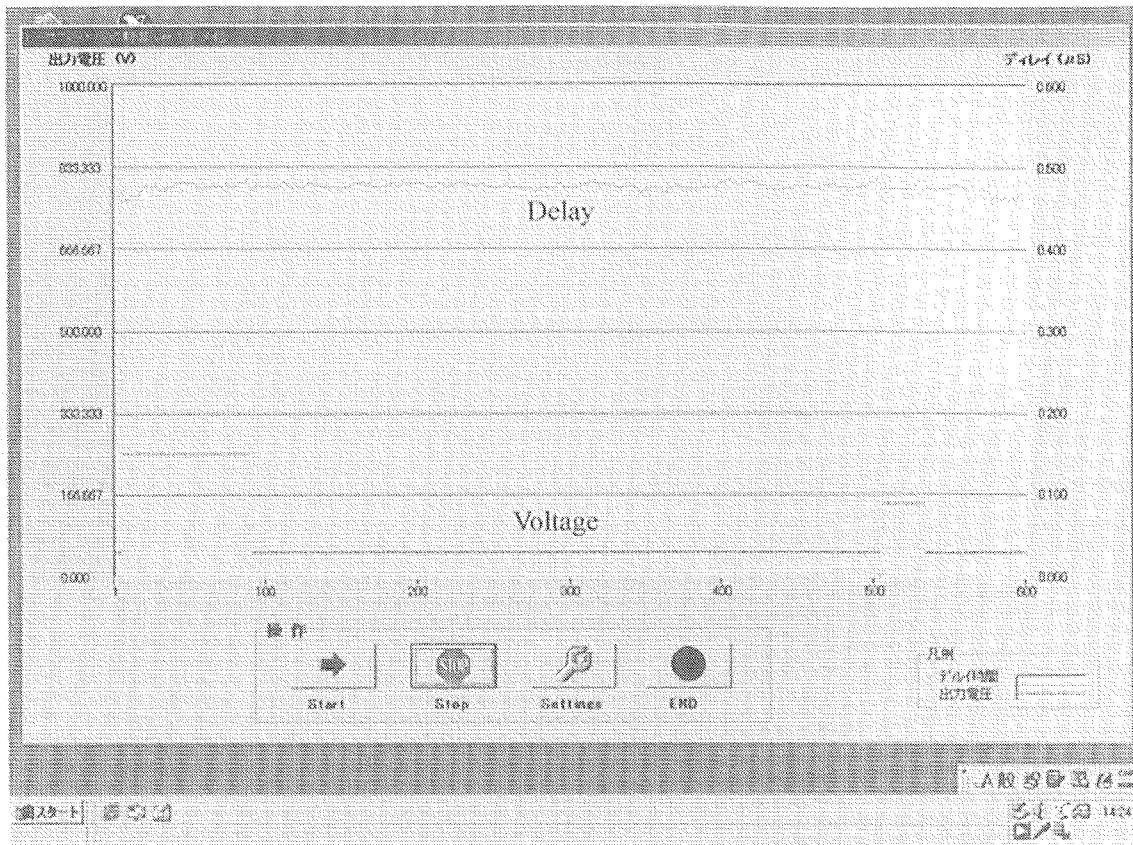


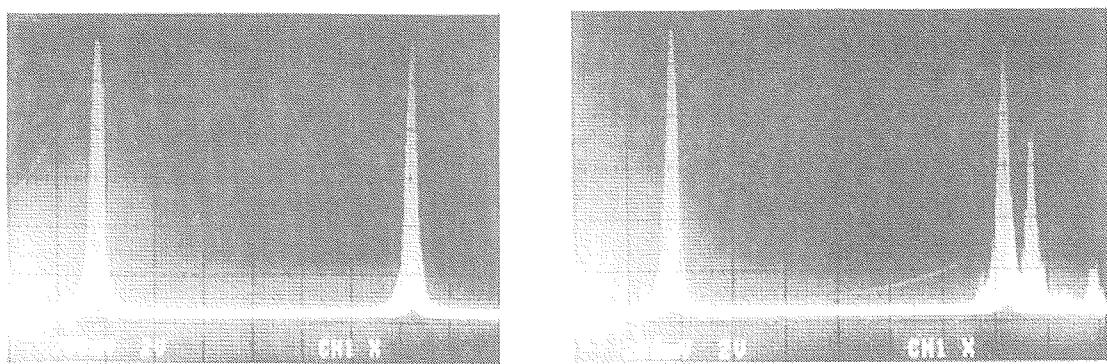
Fig.8 Cavity length control characteristic with initial voltage step of 50 V

3.3 周波数幅の測定

Fig9(1)に共振器長制御を行い、ホストレーザーが單一周波数で発振している時の波長 532 nm における第二高調波の周波数波形を示す。F-P 干渉計の FSR は 3 GHz であるから第二高調波の周波数幅は、約 116 MHz である。以下の 3.4 で述べるように、基本波及び第二高調波の時間幅はそれぞれ 36ns 及び 16ns であるから、フーリエ限界パルスとした第二高調波の周波数幅は約 60 MHz である。測定で使用した F-P 干渉計の使用波長域は 550 nm～650 nm であるため波長 532 nm でのフィネスは低くなる。従って、第二高調波の真の周波数幅は 116 MHz より十分狭いと考えて良い。

共振器長制御を停止すると、ホストレーザーの共振器長は温度や振動などによって変化し、この結果、單一周波数発振を維持できなくなり複数の縦モードで発振するマルチモード発振に移行する。Fig.9(2)は、マルチモード発振へ移行している時の周波数波形で、ホストレーザーは 3 本の縦モードで発振し始めていることが分かる。

シーダー光を完全に遮り、ホストレーザーがマルチモードで発振している時の周波数波形を Fig.10 に示す。周波数幅の狭い種光であるシーダー光がないためホストレーザーは非常に広い周波数幅で発振しており、使用した FSR の狭い干渉計では周波数幅の測定は不可能である。



(1)Single-longitudinal mode oscillation (2)Multi-longitudinal mode oscillation
Fig.9 Frequency characteristics Nd:YAG laser oscillator with single-longitudinal and multi-longitudinal mode operation

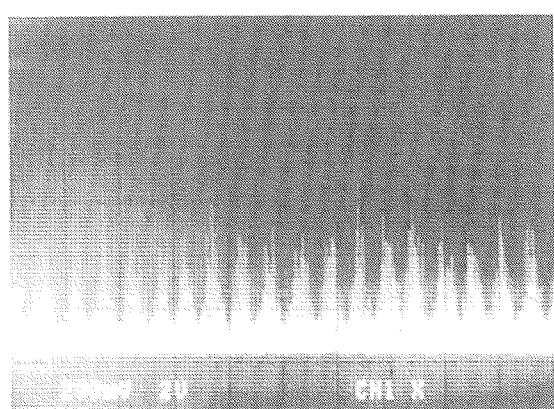
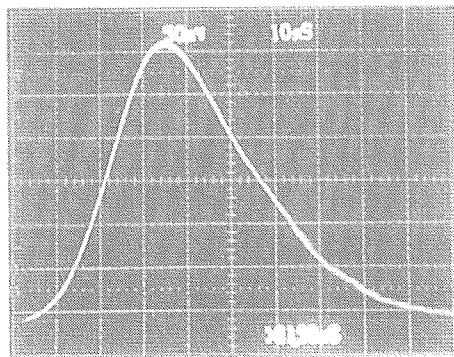


Fig.10 Frequency width of Nd:YAG laser oscillator without seeder

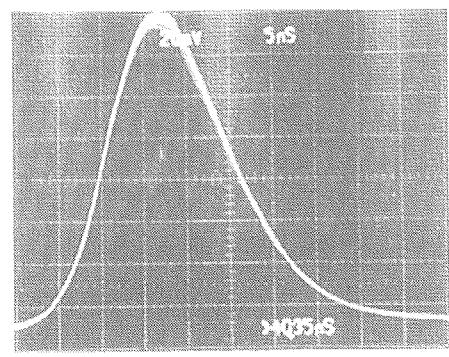
3.4 時間波形の測定

Fig.11 はホストレーザーで発生するレーザーパルスの時間波形である。(1)は波長 1064 nm でのパルス波形、(2)は周波数幅を測定するため非線形結晶で基本波を波長 532 nm の第二高調波に変換した後のパルス波形である。図より基本波のパルス時間幅は約 36 ns、第二高調波は約 16 ns であることが分かる。従って、基本波の周波数幅の決定にはこの時間幅の違いを考慮しなければならない。

Fig.12 はシーダーを遮った時の波長 532 nm におけるパルスの時間波形である。この時レーザーパルスは自然放出光が種となって共振器内を往復してモードを形成するため、図のような波形になる。このピークの時間間隔からホストレーザーの実効の光学的な共振器長が計算でき、その値は約 57 cm である。この値は、実際に測った共振器長が約 50 cm であり、結晶の屈折率や、レーザー光が結晶中をジグザグに伝播することを考慮すると妥当な値と考えられる。



(1) Pulse shape of 1064 nm light



(2) Pulse shape of 532 nm light

Fig.11 Temporal profiles of fundamental and second harmonic laser light

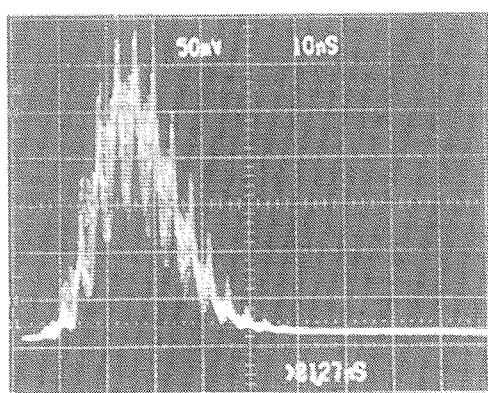
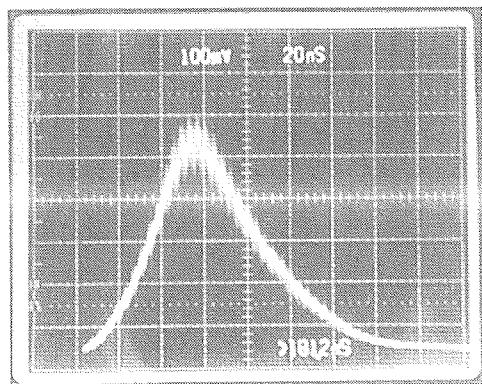


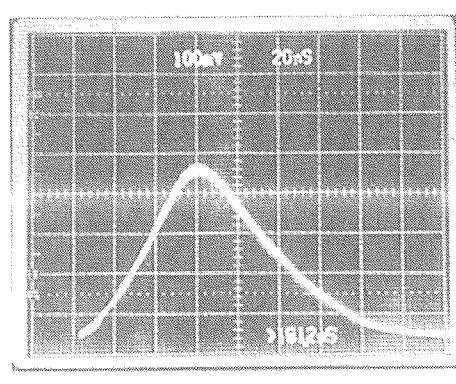
Fig.12 Temporal profile of non-seeding laser radiation

3.5 出力安定性の測定

Fig.13(1), (2)は、ホストレーザーが単一周波数発振及びマルチモードで発振している時のレーザーパルスを 1,000 ショット (露出 2 秒) 重ね合わせたものである。 (1)よりシーダー光の無いマルチモード発振の場合、出力は約 13% 変動している。



(1)



(2)

Fig.13 Output power stability of host laser without and with seeder

一方、(2)の單一周波数発振では、変動は約5%に減少している。これは、制御システムによってホストレーザーの発振周波数を利得のピーク近辺に維持できた結果である。

3.6 空間強度分布の測定

Fig.14(1), (2)は單一周波数発振時とマルチモード発振時のレーザー光の強度分布を示したものである。両者ともほぼガウス分布を示している。レーザービームの中心部を観察すると、(1)の單一周波数発振時の強度分布は(2)のマルチモード発振時に比べて低い。これは、シーダー光がある場合は、レーザー発振までの間、シーダー光による僅かな誘導放出によって光が損失するためである。

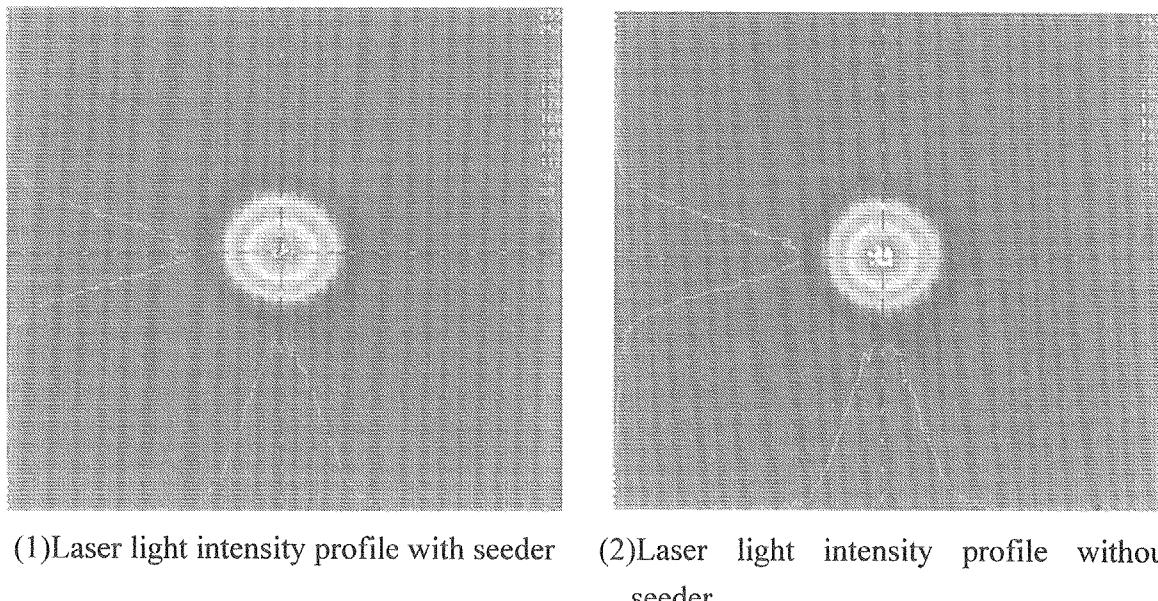


Fig.14 Intensity profile of seeded and non-seeded laser light

4. おわりに

発振繰り返し数0.5~1 kHz、パルスエネルギー3 mJの高繰り返しNd:YAGレーザー発振器の共振器長制御システムを開発して、その制御特性を明らかにし、以下の結果を得た。

- ・リアルタイムライダー用ポンプレーザー発振器として十分な周波数安定性が実現できる共振器長制御システムが開発できた。
- ・長時間運転時においても振動等の大きな外乱に起因する周波数不安定性をパルス毎に制御できた。
- ・波長532 nmの第二高調波で測定した周波数幅は116 MHz以下であり、波長可変固体レーザーポンプ用として十分狭い値である。

- ・本開発によりリアルタイムライダー用高平均出力波長可変固体レーザー実現の見通しが得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの有益な助言を頂いた大場正規氏に感謝いたします。

参考文献

1. Edner.H, et al,"Total fluxes of sulfur dioxide from the Italian volcanoes Etna, Stromboli, and Vulcano measured by differential absorption lidar and passive differential optical absorption spectroscopy," J.Geophys. Rev., 99, 18827-18837 (1994)
2. Privalov.V.E, Shermanin.V.G," Parameters of differential absorption lidar for detecting molecular iodine in the atmosphere," J. Opt. Technolo., 66, 112-114 (1999)
3. Reichardt.J, Bisson.S, Reichardt.S, Weitkamp.C, Neidhart.B," Rotational – vibrational-rotational Raman differential absorption lidar for atmospheric ozone measurements; Methodology and experiment," Appl. Opt., 39, 6072-6079 (2000)
4. Fan.Y.X, Echardt.R.C, Byer.R.L,"Visible BaB₂O₄ optical parametric oscillator pumped by at 355 nm by a single-axial-mode pulsed source," Appl. Opt. 53, 2014-2016(1988)
5. Wang.Y, Xu.Z, Daoqun.D, Zheng.W, Liu.X, Wu.B, Chen.C," Highly efficient visible and infrared β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator with pump refection," Appl. Phys.Lett. 58,1461-1463 (1991)
6. Cui.Y, Dunn.M.H, Norrie.C.J, Sibbett.W, Sinclair.B.D, Tang.Y, Terry.J.A.C," All-solid-state optical parametric oscillator for the visible," Opt. Lett. 17, 646-648 (1992)
7. Komine.H," Average power scaling for ultraviolet-pumped β -barium barium borate and lithium triborate optical parametric oscillator," Opt. Soc. Am.B 10, 1751-1757 (1993)
8. Le Garrec.B.J, Raze.G.J, Thro.P.Y, Gilbert.M," High average power diode array pumped frequency doubled YAG laser," Opt. Lett. 21, 1990-1992 (1996)
9. Chang.J.J, Dragon.E.P, Ebbers.C.A, Bass.L.L, Cochran.C.W," An efficient diode-pumped Nd:YAG laser with 451 W of CW and 182 W for pulsed green," OSA TOPS Advanced Solid State Laser, 19, 300(1998)
10. Maruyama.Y, Tei.K, Kato.M, Niwa.Y, Matuoka.F, Matoba.T, Arisawa.T," Second harmonic generation of LD-pumped high repetition rate and high energy Nd:YAG laser using a directly bonded KTP crystal," OSA TOPS Advanced Solid State Laser, 26, 45-48(1999)
11. 丸山庸一郎、加藤政明、“リアルタイムレーザーモニター用高繰り返し波長可変固

体レーザーの発振特性の研究、”日本原子力研究所報告書
JAERI-Research2002-040(2003)

12. Park.Y.K, Guilliani.G, Byer.R.L, "Single axial mode operation of a Q-switched Nd:YAG laser oscillator by injection seeding," IEEE J.Quantum Electron. QE-20,117(1984)
13. Schmitt.R.L, Rahn.L.A," Diode-laser-pumped Nd:YAG laser injection seeding system," Appl. Opt. 25, 629 (1986)
14. 丸山庸一郎、大場正規、加藤政明、“レーザーリモートモニターポンプレーザー用高繰り返し・單一周波数 Nd:YAG レーザー発振器の試作及び発振特性,” 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-Tech 2002-004 (2002)
15. Teets..E, "Feedback to maintain injection locking of Nd:YAG lasers," IEEE J. Quantum Electorn. QE-20, 326 (1984)
16. Rahn.L.A, “ Feedback stabilization of an injection-seeded Nd:YAG laser,” Appl. Opt. 24, 940 (1985)
17. Park.Y.K, Byer.R.L, “Electronic linewidth narrowing method for single axial mode operation of Q-switched Nd:YAG laser,” Opt. Commun. 37, 411 (1981)

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}
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m^2
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クーロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
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	$V \cdot s$
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	ヘンリイ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
照度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
放射能	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量	ベクレル	Bq	s^{-1}
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	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
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

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)

1. 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。

2. 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省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf	圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	0.101972	0.224809		1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	9.80665	1	2.20462		0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1		0.101325	1.03323	1	760	14.6959
粘度	1 Pa·s(N·s/m ²)	= 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))			1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
動粘度	1 m ² /s	= 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)			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 cal = 4.18605 J(計量法)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}	$= 4.185 \text{ J (15 } ^{\circ}\text{C)}$	
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{-25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	
	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}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-18}	$= 735.499 \text{ W}$	
	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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		100	
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

リモートモニター用高繰り返しNd-YAGレーザー共振器長制御システムの開発（共同研究）



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています