

JAERI-Research
2002-040



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

2003年2月

丸山 庸一郎・加藤 政明

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、お申し越し下さい。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行っております。

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

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

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部
丸山 庸一郎・加藤 政明

(2002年12月13日受理)

大気中の微量有害物質或いは放射性物質を遠隔から測定するための波長可変光源としては、これまでアルコールなどの液体に色素を溶かして発振媒質とした色素レーザーが使われている。しかし、色素レーザーは、構造が複雑で取り扱いが難しく、かつ大型で、実用的な計測用光源とはなり得ないと考えられる。このため、1個の結晶で紫外から赤外域の波長においてレーザー発振が可能な光パラメトリック発振器 (Optical Parametric Oscillator : OPO) をリアルタイム計測のための実用化光源として選定し、その高繰り返し化、高エネルギー化を目指して研究を行った。実験では、高繰り返し化の第一段階としてOPOに非線形結晶の一種である発振波長域の広い β -Barium Borate (BBO) を用い、これをNd:YAGレーザーの第二高調波 (波長532nm) でポンピングし、繰り返し数0.5kHzにおける発振特性、波長変換特性を測定した。

この結果、Type-I及びII OPOの発振閾値でのポンプ光ピーク強度は、それぞれ約16 MW/cm²及び20 MW/cm²であった。OPOの最大平均出力としては、Type-I BBOで5.4 W (パルスエネルギー11 mJ) を45 %のエネルギー変換効率で達成した。また、ポンプ光平均パワー14WでのOPO出力は、依然増加傾向を示し、熱的な悪影響は観測されず、ポンプ光平均パワーの一層の増加により、より高い出力が期待できることを示すことができた。

Characteristics of High Repetition Rate Wavelength Tunable Solid State Laser
for Real Time Laser Monitoring System

Yoichiro MARUYAMA and Masaaki KATO

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

(Received December 13, 2002)

As a tunable laser source for the study of real time LIDAR (Light Detection And Ranging) technique to detect some trace impurities and radioactive material in atmosphere, a dye laser using liquid fluid as a laser media has been employed. However, the dye laser which has a complex structure is difficult to handle. Therefore, it is considered that the dye laser may not be used as a practical light source for real time LIDAR. A tunable solid state laser composed of an optical parametric oscillator (OPO) which has a wide wavelength range from violet to infrared with a single nonlinear crystal is one of the promising tunable light sources, however, there is no OPO with high repetition rate and large pulse energy for real time LIDAR. Therefore, high repetition rate lasing characteristics of OPO are studied. In this experiment, β -Barium Borate (BBO) crystal which has wide wavelength range is utilized as a gain medium of OPO and pumped by the second harmonic of Nd:YAG laser with the pulse repetition rate of 0.5 kHz.

The threshold pumping peak powers for Type-I and -II BBO-OPO are around 16 MW/cm² and 20 MW/cm², respectively. Maximum average output power of around 5.4 W corresponding to the pulse energy of 11 mJ is obtained for Type-I OPO with the power conversion efficiency of around 45%. At the average pumping power of 14 W, the average output power of OPO still increases and undesirable thermal effects are not observed.

Keywords: OPO, BBO, Tunable Solid State Laser, Real Time Measurement, LIDAR

目 次

1. はじめに	-----	1
2. 実験装置	-----	6
3. 実験結果及び検討	-----	7
3.1 発振波長と出力	-----	7
3.2 ポンプ光平均パワー依存性	-----	9
3.3 時間波形	-----	10
3.4 空間モード	-----	12
3.5 発振周波数幅	-----	13
4. おわりに	-----	14
参考文献	-----	14

Contents

1. Introduction	-----	1
2. Experimental Setup	-----	6
3. Results and Discussion	-----	7
3.1 Wavelength Range and Output Power	-----	7
3.2 Output Power vs. Pump Power	-----	9
3.3 Temporal Pulse Shape	-----	10
3.4 Transverse Mode	-----	12
3.5 Frequency Width	-----	13
4. Conclusion	-----	14
References	-----	14

This is a blank page.

1.はじめに

大気中に放出された微量有害物質或いは放射性物質の濃度や種類を遠隔から測定する手法として、波長可変レーザーを用いるライダー技術がある。この測定では、波長がわずかに異なる2本のレーザー光を利用する差分吸収ライダー (Differential Absorption Lidar : DIAL) を利用し、これまで種々の物質の検出の研究が行われている^{1,2,3,4,5)}。DIALでは、大気中に存在する物質に、その吸収波長と一致したレーザー光及びそれから僅かに波長が異なり物質に吸収されないレーザー光を照射する。次に、吸収を受けた光と吸収を受けない光の後方散乱光を測定し、その比から大気中の物質による吸収量を求め、この値から大気中の濃度を算出する。物質の種類は、レーザー波長から一義的に決定できる。

DIALによってリアルタイムで大気中微量物質の測定を行うには高い発振繰り返し数の波長可変レーザーが必要であり、これまでは、色素レーザーが用いられている⁶⁾。しかし、色素レーザーは、アルコールなどの溶媒に色素を溶かして発振媒質とする液体レーザーであるため発振繰り返し数が増加するとポンピングによる熱を除去するため色素の循環量を増す必要がありシステムが大きくなる。加えて、構造が複雑で取り扱いが難しいなどの問題がある。また、色素レーザーは、近紫外から近赤外域で発振可能であるが、そのためには多数の色素の交換が必要で、近紫外から近赤外域のレーザー光を連続的に発生することは現実的ではない。このような色素レーザーに変わる新たな光源としては、振動電子遷移を利用するレーザー結晶や非線形結晶などを利用するいわゆる波長可変固体レーザーがあり、チタンサファイア結晶や β -Barium Borate (BBO)、 KTiOPO_4 (KTP)、 LiNbO_3 などの非線形結晶をレーザー発振媒質として利用する。特に後者の非線形結晶を使った光パラメトリック発振 (Optical Parametric Oscillator : OPO) は、1個の結晶で近紫外から赤外域のレーザー光が連続的に発生でき、発振波長域が広く、より多くの物質の測定が可能になる。また、OPOは、構造が色素レーザーに比べて簡単であるためコンパクトで、製作コストの大幅低減が可能である。しかし、このような波長可変固体レーザーの発振繰り返し数は、一般に、数十Hz程度であり、リアルタイム計測に必要なkHzオーダーの発振繰り返し数で数十mJのエネルギーを発生できるものは、現在のところ市販品にはない。

OPOの発振波長、発振繰り返し数及び出力エネルギーは、原理的には、それを駆動するレーザー光源に依存する。これまで、OPOは広い発振波長域を実現するため、レーザー媒質である非線形結晶をエキシマレーザー光 (波長308 nm) や、Nd:YAGレーザーの

第三高調波（波長355 nm）などの紫外レーザー光でポンピングしている^{7,8,9,10}）。しかし、このような紫外域の波長において、高い繰り返し数で、高エネルギーのレーザー光を安定して発生することは非常に困難である。一方、半導体レーザーの高性能化に伴い、高繰り返し、高出力エネルギーのNd:YAGレーザーが実現し、発生する基本波（波長1064 nm）を50%以上の効率で第二高調波（波長532nm）に変換することが可能となっている^{11,12,13}）。OPOを第二高調波でポンピングした場合の発振波長域は、紫外レーザー光によるポンピング時に比べて狭くなるが、OPO結晶による波長532 nmのポンプレーザー光の吸収は、波長355 nmの紫外域のレーザー光に比べて少ないため、より安定した動作が期待できる。このため可視から近赤外の広い波長域で発振可能なBBO結晶を非線形結晶として選定し、kHzオーダーの発振繰り返し数のOPOの実現を目指し、第二高調波でポンピングした場合の発振特性を測定する。

光パラメトリック発振は、非線形結晶に周波数 ω_p のレーザー光（ポンプ光）を入射して、周波数 ω_s （シグナル光）と ω_i （アイドラー光）のレーザー光を発生させるもので、これら3つの周波数の間には次のような関係がある。

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

この関係を満足させる位相整合条件は、両方の光の偏光を屈折率の大きい方向にとるか、或いは、一方のみを屈折率の大きい方向にとるかによって二つに分けられる。前者は、Type-Iと呼ばれる位相整合で、その条件は次の式で、

$$\omega_p n_e^{\omega_p}(\theta) = \omega_s n_o^{\omega_s} + \omega_i n_o^{\omega_i} \quad (2)$$

また、後者は、Type-IIと呼ばれる位相整合で、その条件は以下のように与えられる。

$$\omega_p n_e^{\omega_p}(\theta) = \omega_s n_o^{\omega_s} + \omega_i n_e^{\omega_i}(\theta) \quad (3)$$

一軸結晶における異常光線の屈折率 $n^e(\theta)$ は次式で与えられる。

$$n^e(\theta) = \left[\frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

ここで、 n_o^2 及び n_e^2 は常光線及び異常光線に対する屈折率で、BBOに対しては、次のセルマイヤーの式によって与えられる¹⁴⁾。

$$n_o^2 = 2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2 \quad (5)$$

$$n_e^2 = 2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2 \quad (6)$$

従って、Type-IのBBO結晶の位相整合角度と発振波長は、セルマイヤーの式(5)、(6)と(2)式及び(4)式から解析的に、また、Type-IIのBBO結晶の位相整合角度と発振波長は、セルマイヤーの式と(3)式及び(4)式から数値計算によって求めることができる。

Fig.1にType-IのBBO-OPOに対する位相整合角度と発振波長の計算結果を示す。図からOPOは、波長532 nmのレーザーでポンピングすることによっても可視から赤外域の広い波長域でレーザー発振が可能であることが分かる。波長355 nm光によるポンピングで

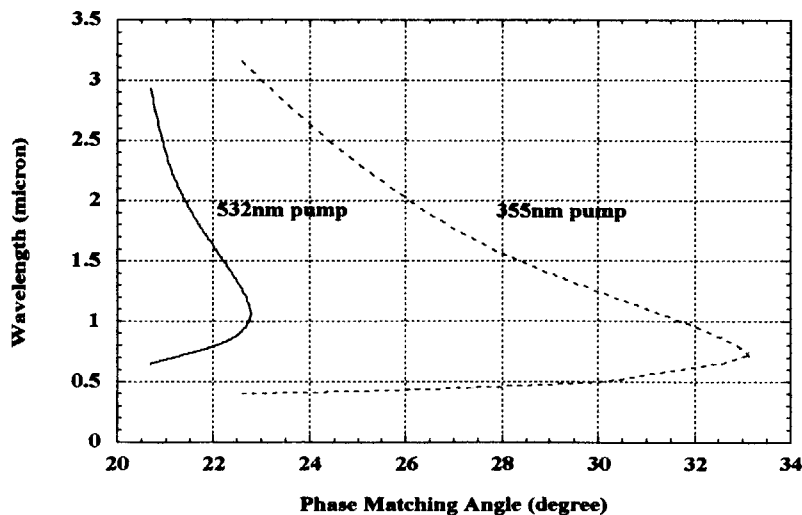


Fig. 1. Calculated tuning characteristics of Type-I and -II BBO-OPO pumped by the second (532 nm) and third (355 nm) harmonics of Nd:YAG laser.

は、近紫外域の波長での発振が可能で、また、位相整合角度も約10度と広く、波長のチューニングも波長532 nmでのポンピングより容易である。Fig.2にType-IIのBBO-OPOのチューニング特性の計算結果を示す。Type-IIは、Type-Iと異なり、同じ波長領域でも位相整合角度が広い。

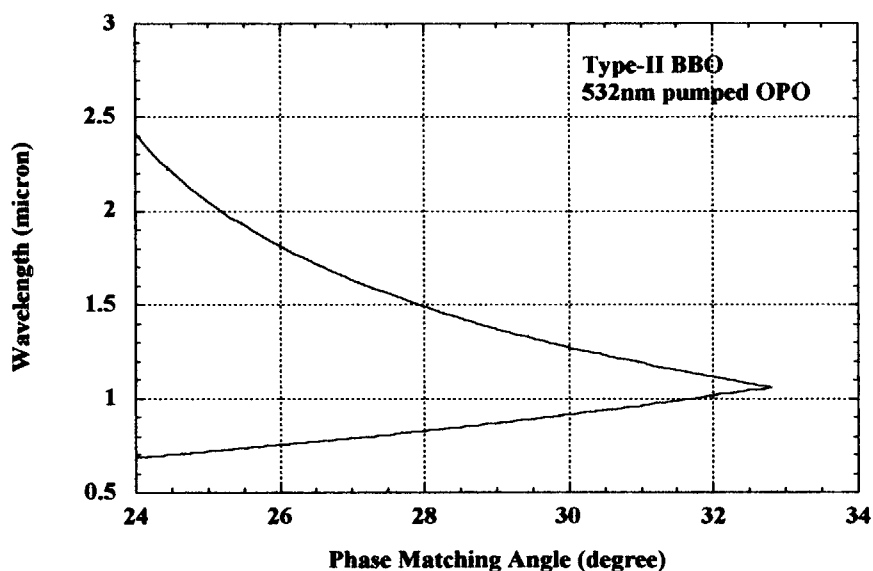


Fig. 2. Calculated tuning characteristic of Type-II BBO-OPO pumped by the second harmonic of Nd:YAG laser.

OPOにおいて発振する波長領域は、その利得によって決まる。位相整合条件での利得帯域幅の中心における増幅利得は次式で与えられる。

$$G_0 \propto \frac{d_{eff}^2}{\lambda_s \lambda_i n_p n_s n_i} \quad (7)$$

Fig.3に波長355 nm及び532 nmでポンピングするType-I並びにType-II BBO-OPOの増幅利得を示す。増幅利得は、355 nmの波長でポンピングする場合が最も大きく、次に波長532 nmでポンピングするType-Iが、最後に532 nmでポンピングするType-II BBO-OPOの順になる。しかし、波長532 nmでポンピングする場合においても、波長に対する増幅利得の変化は小さく、広い波長域で発振可能である。また、波長532 nmでポンピン

増幅率の低い増幅利得は、2個のOPO結晶をタンデムに使う方法や、結晶を通過したポンプ光を出力ミラーで反射させて再度結晶に戻す、ダブルパスポンピング法を利用することなどにより補償することができる。

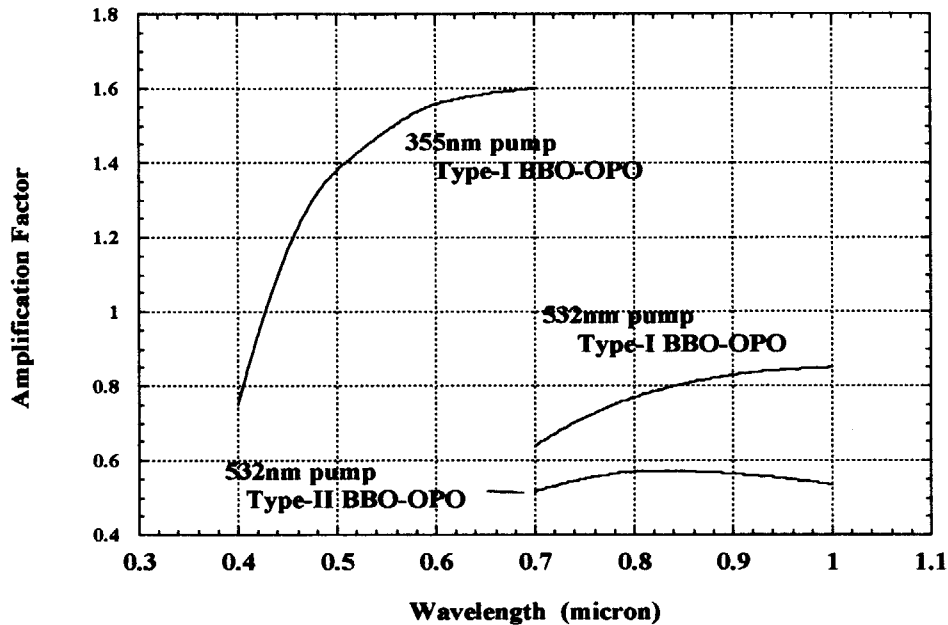


Fig. 3 Amplification factors for Type-I and -II BBO-OPO pumped by the second and third harmonics of Nd:YAG laser

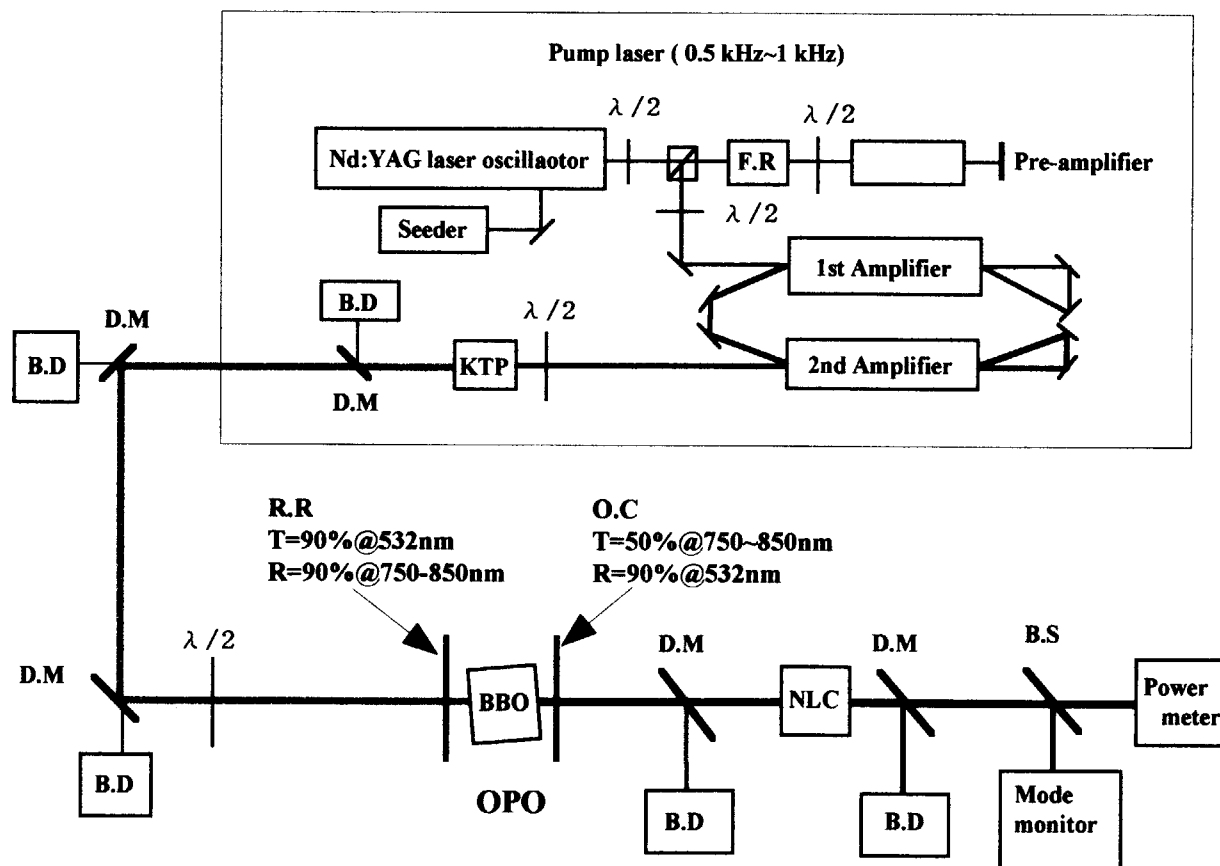
波長532 nmの光でポンピングする場合、その波長域は可視から赤外域となり、紫外域の光は発生できない。このため紫外光は、OPOで発生する可視或いは近赤外光を非線形結晶を用いて第二高調波に変換することによって発生させる。Type-I及びType-IIの波長変換用非線形結晶の位相整合条件は、セルマイヤーの式(5)、(6)と以下の(8)、(9)式によって与えられる。

$$\sin^2(\theta) = \frac{(n_{\omega}^0)^{-2} - (n_{2\omega}^0)^{-2}}{(n_{2\omega}^e)^{-2} - (n_{2\omega}^0)^{-2}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} [n_{\omega}^0 + n_{\omega}^e(\theta)] = n_{2\omega}^e(\theta) \quad (9)$$

2. 実験装置

実験装置の構成をFig.4に示す。装置は、波長可変レーザー光を発生させるOPOとその駆動光源であるポンプレーザー（Nd:YAGレーザー）より構成される。OPO結晶は、Type-I又はType-IIのBBOで、寸法は両者とも8 mm × 6 mm × 15 mm（長さ）、 $\theta = 22^\circ$ である。結晶のレーザー入射面の面精度は $\lambda/4$ 、両面はポンプ光（波長530 nm）及びシグナル光（波長650 nm～1060 nm）に対する広帯域無反射コーティングが施こされ、その反射率は0.5%以下である。OPOではシグナル光とアイドラー光が発生するが、共振器を構成する2枚のミラーのコーティングは、シグナル光のみがレーザー発振するよう波長域を設定している。共振器後方の全反射ミラーは、波長532 nmのポンプ光の透過率が90%以上、波長750 nm～850 nmの波長域におけるシグナル光の反射率が90%以上である。出力ミラーは、ダブルパスポンピングによって利得を高めるため波長532 nmのポンプ光の反射率が90%以上、波長750 nm～850 nmのシグナル光の透過率が約50



F.R:Farady rotator, D.M: Dichroic mirror, B.D:Beam dump, R.R:Rear reflector, O.C: Output coupler, B.S:Beam splitter, NLC:Nonlinear crystal, R:Reflection, T:Transmission

Fig.4 Experimental setup of BBO-OPO pumped by the second harmonic of Nd:YAG laser

%である。BBO結晶は、結晶を回転して発振波長を変えるためロータリーステージ上に固定する。OPOの共振器長は可変で、最短18mmである。ポンプレーザーは、スラブ結晶を半導体レーザーでポンピングする発振繰り返し数が0.5kHz~1kHzの全固体Nd:YAGレーザーである。Nd:YAGレーザー発振器光は、シーディングにより単一周波数発振とし、これを2段の主増幅器で増幅した後、非線形結晶（KTP）で波長532 nmの第二高調波に変換する¹⁵⁾。ポンプレーザー光のビーム寸法は、約1.2 mm、パルス幅は約20ns、ビームは楕円形に近く、強度分布は近ガウシアンである。OPOの外観写真をFig.5に示す。実験ではポンプレーザーの繰り返し数を0.5 kHzに設定した。

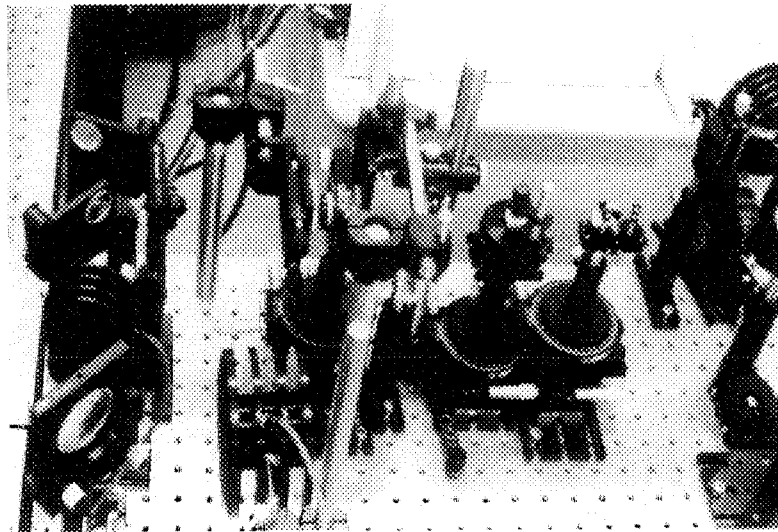
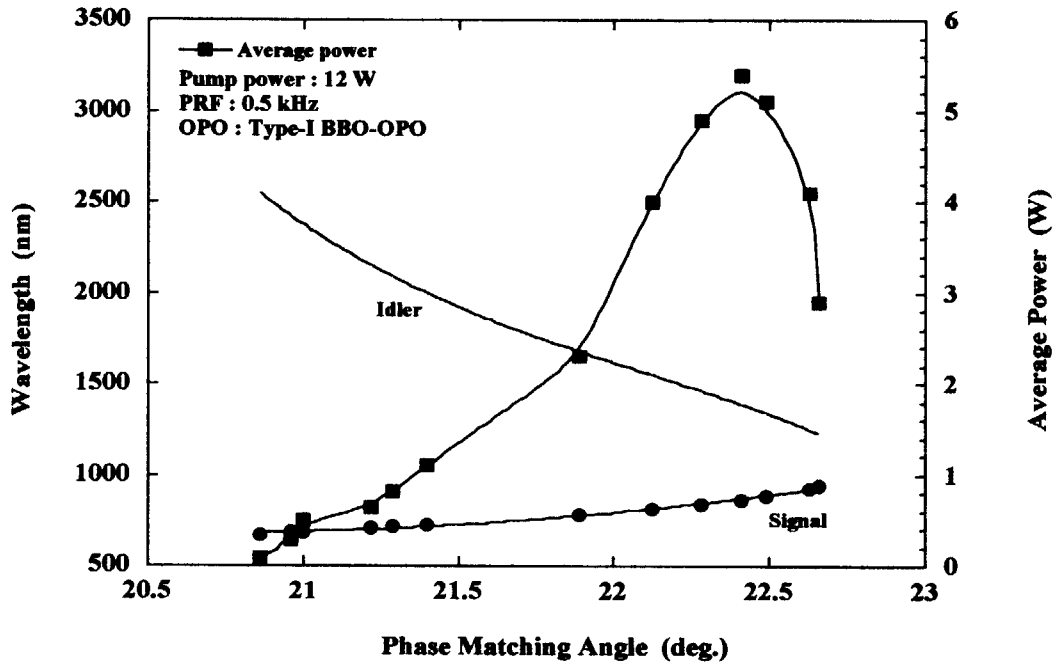


Fig. 5 High repetition rate BBO-OPO pumped by the second harmonic of Nd:YAG laser

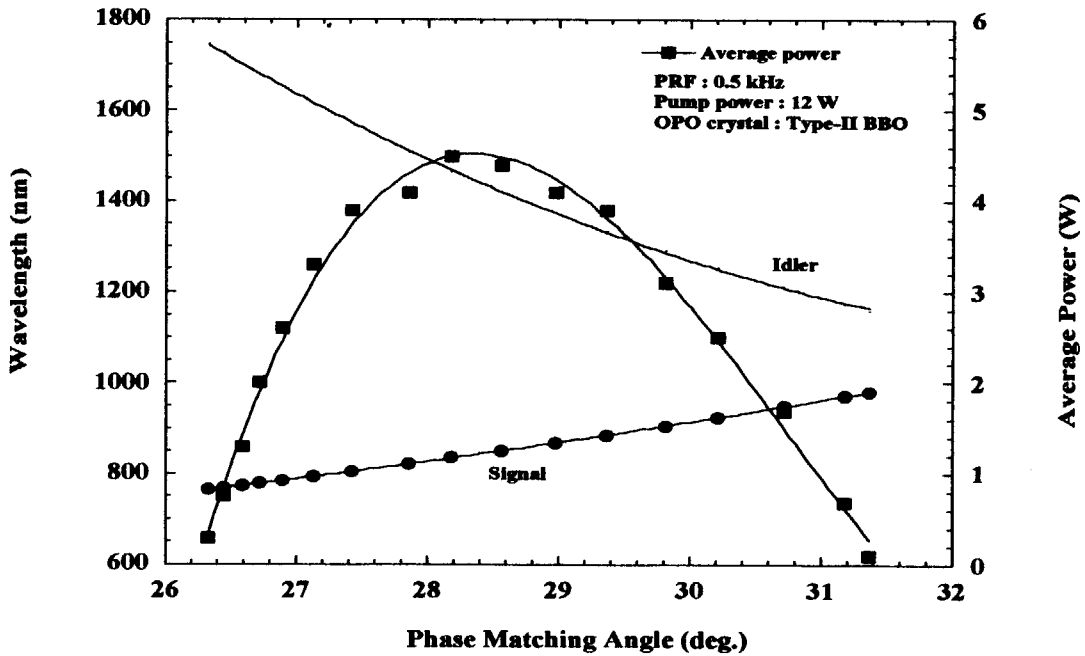
3. 実験結果及び検討

3.1 発振波長と出力

Fig.6の(1)及び(2)に、繰り返し数0.5 kHzで、Type-I及びII BBO-OPOの結晶角度を変化させた場合の波長と出力の関係を示す。●は、測定されたシグナル光の波長、実線はシグナル波長から(1)式を用いて計算したアイドラー光の波長である。■は測定したシグナル光の出力である。Type-I BBO-OPOでは、結晶角度を20.8度から22.7度まで変えることによって、シグナル光の波長を672 nmから937 nmまで変化させることができる。なお、共振器ミラーのコーティング波長を変えることによって発振波長は変化する。またコーティング波長をアイドラー光が共振するものに代えることによって赤外域の波長のレーザー光も発生できる。シグナルの出力は、波長によって変化するが、波長863 nmで最大



(1) Type-I BBO-OPO



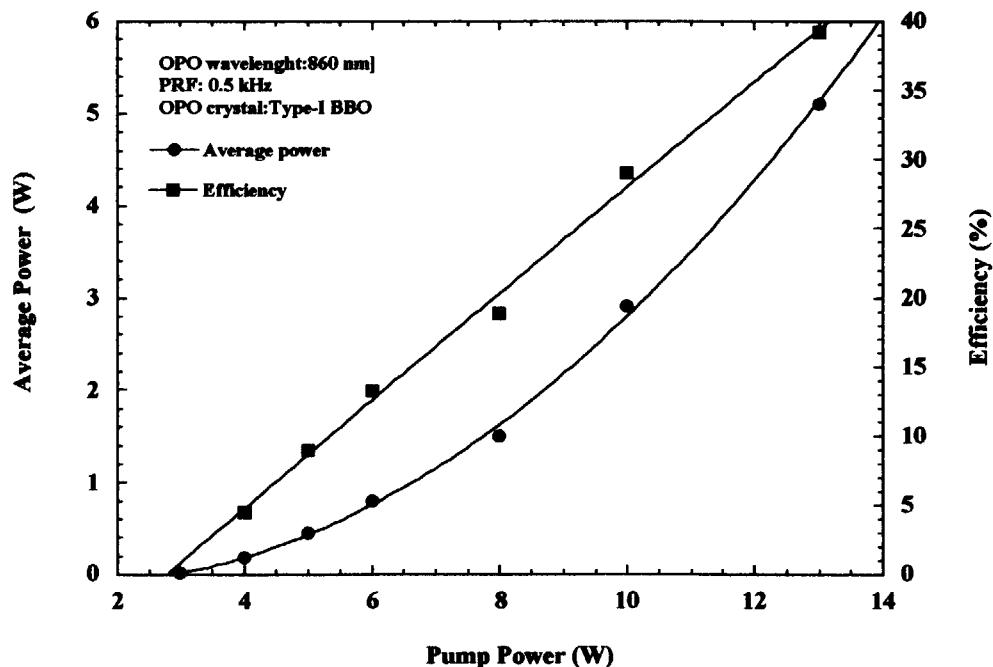
(2) Type-II BBO-OPO

Fig.6 Characteristics of Type-I and -II BBO-OPO pumped by the second harmonic of Nd:YAG laser

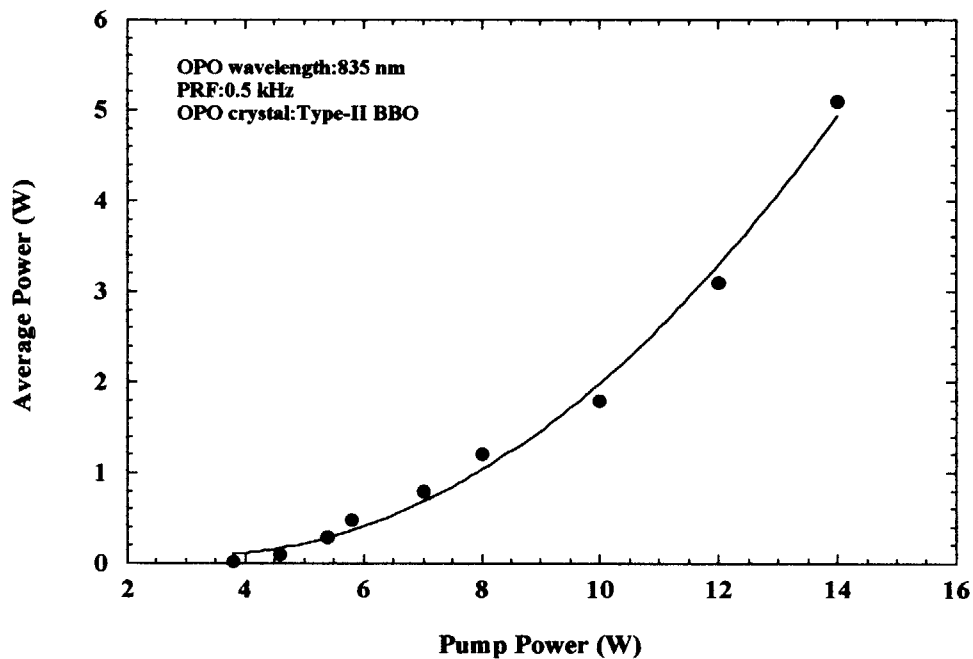
平均出力5.4 W (パルスエネルギー11 mJ) が得られる。この時のポンプ光の平均パワーは12 W (24 mJ) であるので、ポンプ光からOPOのシグナル光への変換効率は45%である。Type-II BBO-OPOは、結晶角度を約26.3度から31.4度まで変化させることによって765 nmから982 nmの可波長範囲で発振する。この時のシグナルの最大出力は、波長835 nmで4.5 W (9 mJ)、また、変換効率は約38%である。

3.2 ポンプ光平均パワー依存性

Fig.7(1)及び(2)は、発振波長835 nm、繰り返し数0.5 kHzにおいて、ポンプ光の平均パワーを変化させた場合のType-I及び-II OPOの出力である。Type-I BBO-OPOのレーザー発振の閾値は、約3Wである。この時のポンプレーザー光のビームの径は、約1.5 mm、パルス時間幅が約20nsであるから、発振閾値におけるポンプ光の強度は、約16 MW/cm²である。Type-I BBO-OPOの出力は、13 Wのポンプ光平均パワーで5.1 Wが得られ、この時のポンプレーザー光から波長可変レーザー光への変換効率は約40%である。一方、Type-II BBO-OPOは、発振の閾値が約3.8 W、強度で約20MW/cm²、出力はポンプ光平均パワー14 Wで5.1 Wが得られる。両者とも出力はポンプ光の平均パワーとともに増加する傾向を示している。



(1) Type-I BBO-OPO

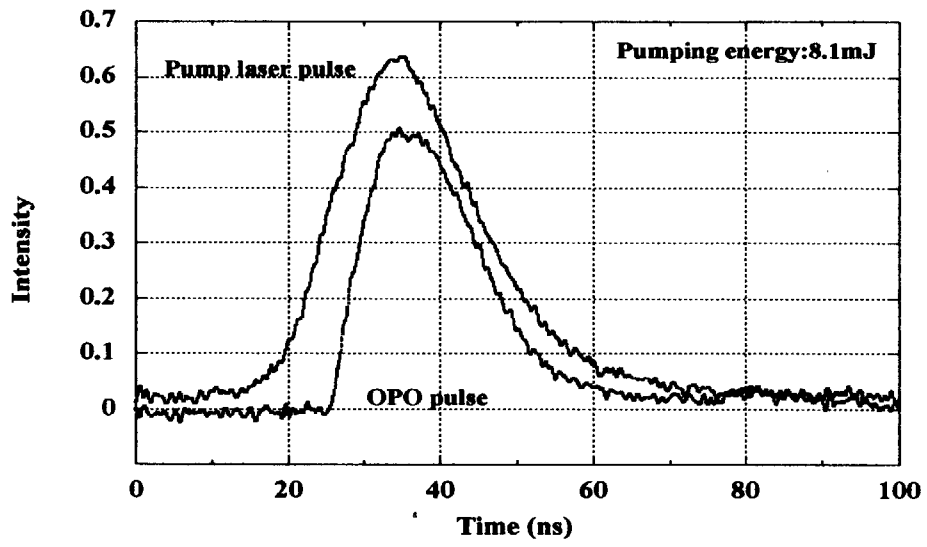


(2) Type-II BBO-OPO

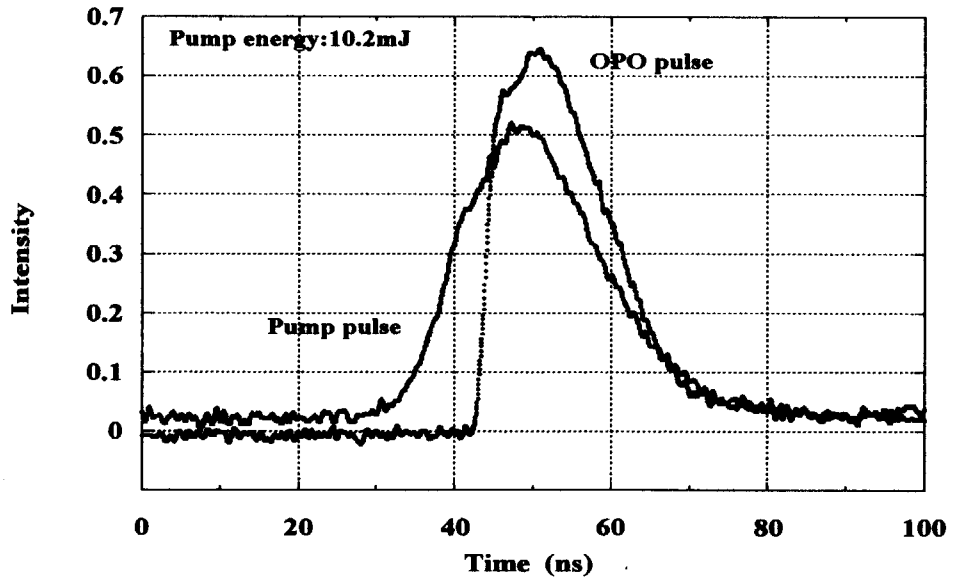
Fig.7 Average power of Type-I and -II BBO-OPO

3.3 時間波形

Fig. 8(1), (2)は、ポンプ光平均パワーが4 W及び5 WにおけるType-I及び-II BBO-OPOシグナル光の時間波形である。ポンプレーザー光が結晶に入射してからシグナル光が最大値になるまでの時間差は、約2 nsと少ない。これは、共振器長が20 mm程度と短く、モード形成に時間を要しないためである。また、BBO結晶が波長変換媒質であることからポンプレーザー光とシグナル光の時間波形はほぼ同じ形となっている。Fig. 9はポンプ光平均パワーを変化させたときのOPOパルス半値幅の変化を示したものである。Type-I、Type-II BBO-OPOともポンプ光平均パワーの増加に伴って僅かにパルス時間幅の増加傾向が観測される。これは、OPOの発振が非線形効果に基づくもので、ポンプ光パワーの増加に伴って閾値を越えたパルスのより広い部分が発振に寄与するためである。



(1) Type-I BBO-OPO



(2) Type-II BBO-OPO

Fig.8 Temporal pulse shapes of BBO-OPO and pump laser

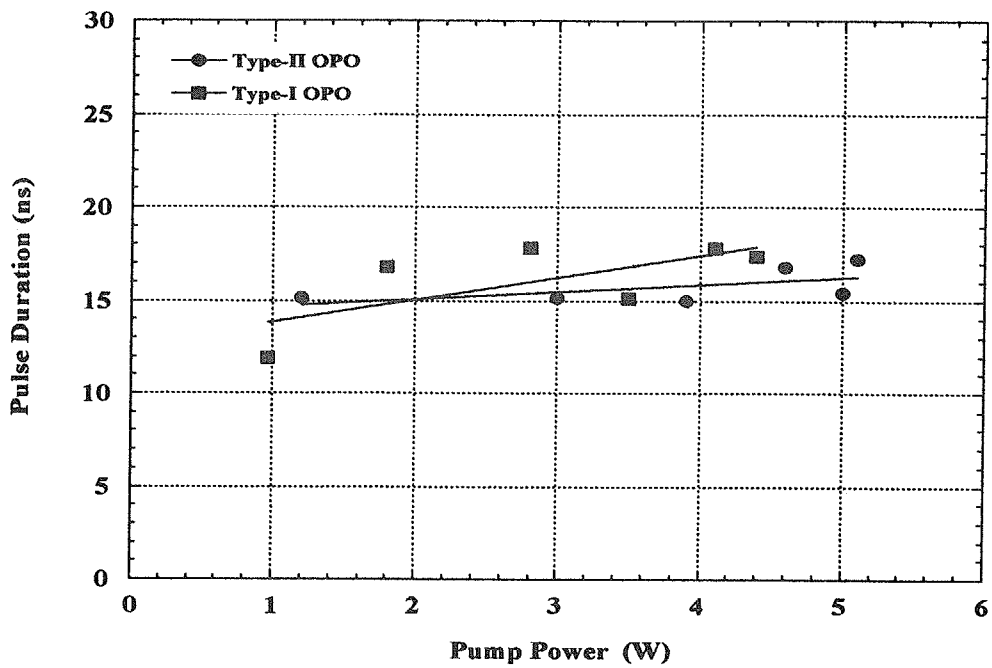


Fig. 9 Pulse duration of BBO-OPO as a function of pump power

3.4 空間モード

Fig.10にType-II BBO-OPOシグナル光の強度分布を示す。ポンプレーザーは断面積3×6mmのNd:YAGスラブ結晶を使っている。このためポンプレーザー光の断面形状は楕円形であり、この結果、シグナル光の形状もそれと同じ様に横に長い形となっている。し

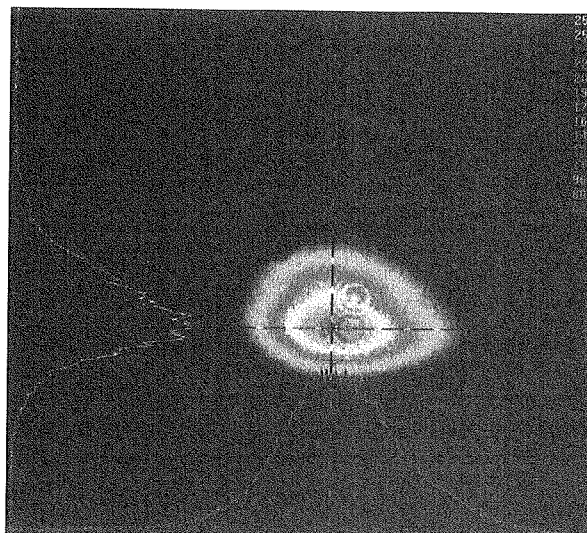


Fig.10 Spatial profile of Type-II BBO-OPO output pulse

かし、図より強度分布は一様であり、出力に影響を与える熱効果は観測されない。レーザー光の中心を通る断面の強度分布はガウシアンに近い形となっており、DIALのような光を長距離伝搬させるには都合が良い形状である。

3.5 発振周波数幅

実験を行ったOPOの共振器は、平行平板のファブリーペロー型である。従って、発振波長幅はポンプレーザー光の発振波長幅に依存する。Fig.11にOPOをポンプレーザーにシーダー光を入れないマルチモード光と、シーダー光を入れたシングルモード光でポンピングした場合のOPOの波長幅の測定結果を示す。図から波長幅が約30 GHzのマルチモード光でポンピングした場合のOPOの波長幅は0.76 nm (FWHM) で、一方、波長幅約0.6 GHzのシングルモード光でポンピングした時の波長幅は0.28 nm (FWHM) である。波長幅の測定に使用した分光器の装置は、約0.3 nmであるからOPOの波長幅はこれより狭いと考える良い。

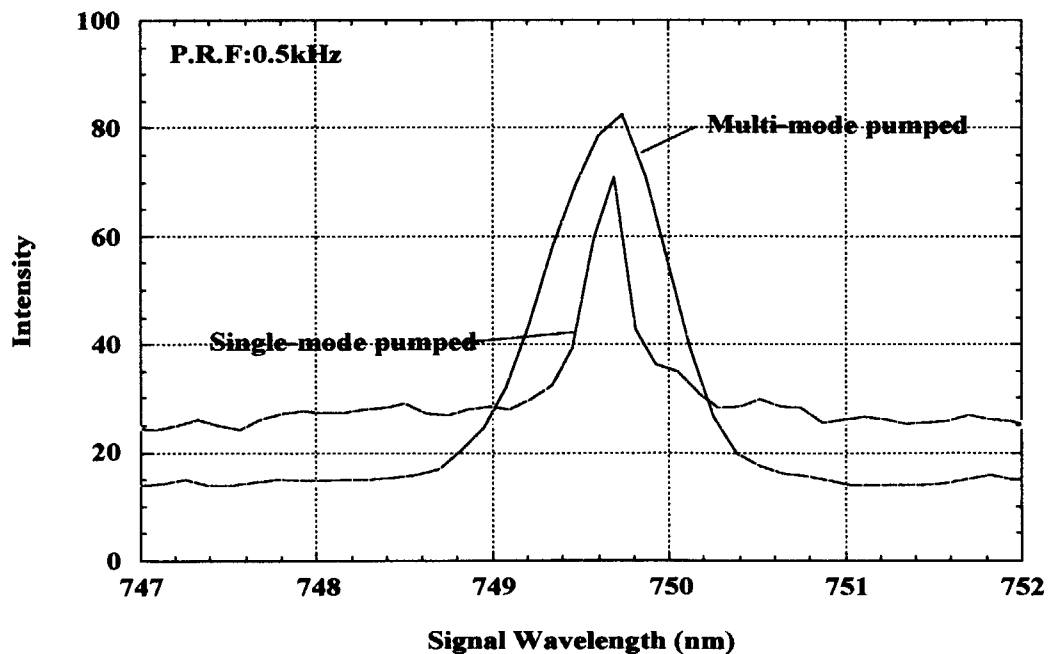


Fig.11 Linewidth of Type-II BBO-OPO pumped by multi- and single-mode Nd:YAG laser

4. おわりに

BBO結晶をレーザー媒質とした波長可変固体レーザー (OPO) を試作し、発振パルス繰り返し数0.5kHz、波長532nmのNd:YAGレーザー光でポンピングした場合の発振特性を測定し、以下の実験結果を得た。

- (1) 14 W (28 mJ) までのポンプ光平均パワー領域では、出力、変換効率とも増加の傾向を示した。
- (2) 最大平均出力は、Type-I OPOが5.4 W (11 mJ)、Type-II OPOが5.1 W (10mJ) であった。
- (3) ポンプ光からシグナル光への最大パワー変換効率として、色素レーザーの2倍以上高い、Type-Iで45%、Type-IIで38%を得た。
- (4) 波長532 nmのポンピングでは、結晶長15 mmのOPOの発振閾値は、Type-Iで16MW/cm²、Type-IIで20 MW/cm²であった。
- (5) このポンプ光パワー領域では、OPOビーム形状に変化は殆ど観測されず、BBO結晶によるポンプ光の吸収による熱レンズ効果などの影響は極めて少ないと考えられる。

参考文献

- 1) Edner.H, et al," Total fluxes of sulfur dioxide from the Italian volcanoes Etma, Stromboli, and Vulcano measured by differential absorption lidar and passive differential optical absorption spectroscopy," J. Geophys. Rev., 99,18827-18838(1994)
- 2) Privalov.V.E, Shemanin.V.G," Parameters of differential absorption lidar for detecting molecular iodine in the atmosphere," J. Opt. Techonol., 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) Reichardt,"Error analysis of raman differential absorption lidar ozone measurements in ice

- clouds," *Appl. Opt.* 39, 6058-6071 (2000)
- 5) Ambrico.P, Amodeo.A, Girolamo.P, Spinelli.N," Sensitivity analysis of differential absorption lidar measurements in the mid-infrared region," *Appl. Opt.* 39, 6847-6865 (2000)
 - 6) Maruyama.Y, Kato.M, Ohzu.A,"Realtime DIAL measurement using 1 kHz repetition rate tunable laser," *SPIE Proceedings*, 4271, 335-338(2001)
 - 7) Fan.Y.X, Eckardt.R.C, Byer., " Visible BaB₂O₄ optical parametric oscillator pumped by at 355 nm by a single-axial-mode pulsed source," *Appl. Opt.* 53,2014-2016(1988)
 - 8) Wang.Y, Xu.Z, Daoqun.D, Zheng.W, Liu.X, Wu.B, Chen.C,"Highly efficient visible and infrared β -BaB₂O₄ optical oscillator with pump reflection," *Appl. Phys. Lett.*58, 1461-1463 (1991)
 - 9) 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)
 - 10) Komine.H,"Average-power scaling for ultraviolet-pumped β -barium borate and lithium triborate optical parametric oscillator," *Opt. Soc.Am.B* 10, 1751-1757(1993)
 - 11) 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 (1996)
 - 12) Chang.J.J, Dragon.E.P, Ebberts.C.A, Bass.L.L,Cochran.C.W,"An efficient diode-pumped Nd:YAG laser with 451 W of CW and 182 W fo pulsed grenn," *OSA TOPS , Vol.19 Advanced Solid State Lasers*, 300 (1998)
 - 13) Maruyama.Y, Tei.K, Kato.M, Niwa.Y, Matuoka.F, Matoba.T, Arisawa.T, Oba.M,"Second harmonic generation of LD-pumped high repetition rate and high energy Nd:YAG laser uisng a directly bonded KTP crystal," *OSA TOPS 26 Advanced Sokid- State Lasers*, 45-48(1999)
 - 14) Dmitriev.V.G, Gurzadyan.G.G, Nikogosyan.D.N,"*Handbook of Nolinear Optical Crystals*," Springer, pp96 (1995)
 - 15) 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・単一周波数Nd:YAGレーザー発振器の試作及び発振特性," 日本原子力研究所報告書JAERI-Tech 2002-004 (2002)

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·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	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	ジーメンズ	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	
光束	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	b
バ	bar
ガ	Gal
キ	Ci
レントゲン	R
ラ	rd
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² 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)

- 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

力	N (=10 ⁵ 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 = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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

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

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

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

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています