

JAERI-Research
98-035



JP9808022



半導体レーザー励起高繰り返し・高平均出力Nd:YAG
グリーンレーザーの発振特性の研究

1998年7月

大場正規・加藤政明・丸山庸一郎

29-43

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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

半導体レーザー励起高繰り返し・高平均出力Nd:YAGグリーン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物質科学研究部

大場 正規・加藤 政明⁺・丸山庸一郎⁺

(1998年6月11日受理)

銅蒸気レーザーに代わる原子法レーザー同位体分離用波長可変レーザーの励起光源として期待されている半導体レーザー励起高繰り返し・高平均出力固体グリーンレーザーを試作し、その発振特性を測定した。レーザーは、発振器及び3段の増幅器から構成され、1 kHzの繰り返しで動作する。基本波(1064nm)の平均出力は約95W、これをKTP結晶により波長変換することによって第2高調波(532nm)として平均出力約50Wを得た。パルス時間幅は共振器長に依存するが、共振器長100cmで、基本波が約50ns、これをグリーン光に変換したとき約40nsであり、波長可変レーザー励起光源として十分な値が得られた。電気入力に対するエネルギー効率は、グリーン出力で約1.6%であり、銅蒸気レーザーの約0.5~0.7%(511nm)を上回る効率が得られた。

Characteristics of LD Pumped High Repetition Frequency High
Average Power Nd:YAG Green Laser

Masaki OBA, Masaaki KATO⁺ and Yoichiro MARUYAMA⁺

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

(Received June 11, 1998)

Laser diode pumped all solid state high repetition rate, high average power Nd:YAG laser MOPA system is developed as a pumping source of tunable laser for atomic vapor laser isotope separation. The Nd:YAG laser consisting of an oscillator and three amplifiers is operated at the pulse repetition frequency of 1 kHz. The average output power of about 95 W at 1064 nm and 50 W at second harmonic by a KTP crystal is obtained. The pulse duration of the fundamental is 50 ns, and that of second harmonic is around 40 ns with the cavity length of 100 cm, which is suitable to pump tunable laser. The electrical efficiency is 1.6% which is greater than that of copper vapor laser.

Keywords: Laser Diode, Solid State Laser, High Average Power, High Repetition Rate,
Green Laser, Second Harmonic

⁺ Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	2
3. 測定結果	3
4. おわりに	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
3. Results	3
4. Conclusion	5
References	6

1. はじめに

高いデューティー比を持つ準連続発振半導体レーザー (LD : laser diode) で励起される固体レーザーは同位体分離用波長可変レーザーの励起光源や、微細加工用光源などとして、多くの研究機関で開発が進められている^{1)~5)}。同位体分離用波長可変レーザーは、パルス繰り返し10kHz以上、平均出力1kW以上が要求される。このような要求を満たすポンプレーザーとしては、現在銅蒸気レーザーが最も有力視されており、繰り返し数5~6kHz、出力約500Wのものが開発されている。しかし、銅蒸気レーザーは装置が非常に大型で、保守が容易でないなど、多くの問題も存在する。我々は、LD励起固体グリーンレーザーをこの銅蒸気レーザーに代わる次世代のポンプ光源として位置づけ、その高平均出力化、高繰り返し化のための研究開発を行っている。LD励起固体グリーンレーザーは、高効率発振ができるLDでレーザー結晶を励起することで、従来のランプ励起に比べて電気効率の大幅な向上が可能で、結晶中からエネルギーを効率良く取り出すことによって、3%以上の効率も期待できる。銅蒸気レーザーの効率は約0.5~0.7%程度であるから、銅蒸気レーザーと比較しても高いエネルギー効率が期待できる。LD励起固体レーザーにはスイッチング方式、結晶形状、励起方式などによっていくつかに分類される。中でも、同位体分離用としては現在、AO-Qスイッチを用いた連続発振 (CW) の半導体レーザーで励起される繰り返し10kHz以上の固体レーザーが主に開発されている^{6)~7)}。しかし、この方式は1パルスあたりのエネルギーが低く、また、CW半導体レーザーで励起されるため、増幅器を付加しても十分な増幅利得が得られない。一方、高エネルギーのパルスを高繰り返しで発生させることのできる固体レーザーとして、準連続発振 (Q-CW) 半導体レーザーで励起されるジグザグスラブ型の発振器+増幅器 (Master Oscillator Power Amplifier : MOPA) システムが研究されている^{3),4),8)~12),14)}。Q-CW励起では繰り返し数がCW励起AO-Qスイッチのものより低くなるが、kHzオーダーの繰り返しは可能であり、数台のレーザーを組み合わせ、それぞれの発振タイミングを少しずつずらすことで、10kHz級のシステムを構築することが可能である。また、スラブ結晶を採用することによって、レーザービームはレーザー媒質である結晶中を全反射しながらジグザグに伝播するため、結晶媒質中の熱勾配による歪みや熱復屈折、熱レンズなどの影響を補償でき、高平均出力、高品質レーザー光の発生に極めて有効である。

我々は、同位体分離用波長可変レーザーポンプ光源として、Q-CW LDで励起されるパルス繰り返し1kHz、グリーン出力100W級を目標に、テーブルトップのジグザグスラブ型LD励起固体レーザーMOPAシステムの開発を行っている。今回は、その前段階となる、繰り返し1kHz、グリーン出力50W機を試作し、その発振特性を測定するとともに、高出力化の可能性を検討した。

2. 実験装置

Fig. 1 に試作した固体グリーンレーザーMOPAシステムの構造を示す。レーザー媒質はNd³⁺イオンを1%ドープしたYAG結晶で、これを発振波長808nmの半導体レーザー(LD)で励起する。発振器はNd:YAGレーザー媒質、EO-Qスイッチ、ポラライザー、波長板、共振器ミラーから成る。発振器と増幅器#1のスラブ結晶寸法は、3 mm x 3 mm x 82 mm、増幅器#2及び#3のスラブ結晶寸法は3 mm x 6 mm x 82 mmである。結晶端面はビームの入射損失を少なくするためにプリースター角にカットしてある。レーザービームは結晶に入射した後、結晶内でジグザグに全反射し伝播する。各結晶媒質は結晶の片側から半導体レーザーにより励起される。発振器と増幅器#1は繰り返し数1kHz、デューティー比15%、パルス幅150 μ s、平均出力約100WのQ-CW LDで励起され、増幅器#2及び#3は平均出力約200WのLDで励起される。LDに供給される電気エネルギーは全体で約3100Wであり、電気-光変換効率は約20%である。LDは、チラーにより冷却され、水温は発振波長がNd:YAGの吸収波長に一致するように温度コントロールされる。また、YAGスラブ結晶も上下面を冷却水により冷却する。結晶側面は断熱材で支持し、その断熱効果により結晶内温度勾配を全反射面方向だけに限定している。発振器から出たレーザービームは増幅器#1に入射され、一度通過したあと約9°角度を付けて折り返し、再び結晶に入射され、2パスで増幅される。2パス目は角度を付けて折り返し入射されるため、プリースター角と少々異なるが、そのための入射損失は約1%である。その後、ビーム径をレンズにより増幅器#2のスラブ結晶断面に合うように調整した後、増幅器#2に入射し、増幅器#1と同様に2パスで増幅する。ビームはその後、増幅器#3に入射し、さらに増幅される。増幅器#3ではレーザーパルスは1パスで増幅される。Nd:YAGレーザーは1064nmの波長で発振するが、これを波長可変レーザーの励起光源として用いるためには波長532nmのグリーン光に変換する必要がある。波長変換用の非線形結晶は高い変換効率を有し、温度依存性が小さく、許容整合角が広いKTP結晶を用いる。非線形結晶の大きさは10 mm x 10 mm x 10 mmで、出力を安定化するために結晶の温度を100°Cに加熱する。波長変換した後、ダイクロイックミラーで基本波とグリーン光を分離する。

固体レーザーを同位体分離用波長可変レーザーや、Ti:Sapphireレーザー等の波長可変固体レーザーの励起に用いる場合、励起光源となる固体レーザーのパルス時間幅は重要な特性の一つである。同位体分離用レーザーのパルス時間幅は分離する原子の励起寿命にも依るが、40~50ns程度が適当であり、ポンプレーザーのパルス時間幅もこの程度に調整する必要がある。また、Ti:Sapphireレーザーなどの固体波長可変レーザーを励起する場合、結晶にダメージを与えないために、パルス幅を広くし、パルスのピークを低くすることが重要となる。パルス幅を変化させる方法としては、発振器の共振器長を変える、媒質の利得(ゲイン)を変える、などの方法があるが、後者では発振器出力が大きく変化するため、出力特性が大きく変化する。このため、今回は発振器の共振器長を変えて、共振器長に対するパルス時間幅の特性を測定した。増幅特性は、増幅器への入力、すなわち発

振器の出力を変えながら各増幅器の増幅特性、利得特性を測定する。波長変換の特性では、入力強度に対する出力と変換効率を測定する。また、実用化に重要となる出力の安定性を測定する。

3. 測定結果

Fig.2に発振器の共振器長を30cmから100cmまで変化させた場合のパルス時間幅を示す。共振器長30cmではパルス時間幅は約23nsで、共振器長を伸ばすに従って、ほぼ直線的にパルス時間幅も伸びる。共振器長100cmでパルス時間幅は約50nsとなる。このときの出力は約10mJである。これをグリーン光に波長変換すると共振器長30cmでは約20nsであるのに対して共振器長100cmでは約40nsである (Fig.3)。

Fig.4に共振器からの入力に対する増幅器の増幅特性を示す。実線は、Franz-Nodvicの式¹³⁾

$$J_{out} = J_s \ln[G_0 \{ \exp(J_{in} / J_s) - 1 \} + 1] \quad (1)$$

を用いて計算したもので、 J_{out} は増幅器出力密度、 J_s はNd:YAGの飽和強度 $620\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、 G_0 は小信号利得

$$G_0 = \exp(\sigma / h\nu \cdot E_{stor} / S) \quad (2)$$

を表し、 σ は誘導放出断面積、 E_{stor} は媒質中の蓄積エネルギー、 S はビームの断面積である。増幅器#1、#2において2パス目の増幅では1パス目による蓄積エネルギー E_{stor} の減少を考慮して計算を行っている。LDの出力は増幅器#1で100W、増幅器#2および#3で200Wである。このLDの出力の内、Nd:YAG結晶媒質による吸収効率90%、量子効率90%、LD発振波長808nmとNd:YAG固体レーザー発振波長1064nmの比で表される量子ディフェクト75%、Ndイオンの励起寿命 $230\mu\text{s}$ からLDの励起パルス時間幅 $150\mu\text{s}$ に対するエネルギー蓄積効率74%、結晶断面と発振ビームの断面のカップリングを約60%として計算すると、各増幅器に蓄積されているエネルギーは、増幅器#1で27mJ、増幅器#2及び#3で各54mJと見積もられる。これを基に計算した結果は測定値と良く一致している。発振器の出力8Wに対して最終増幅出力は95Wで、1パルスあたりのエネルギーは95mJである。このときのLDの光出力に対する光-光変換効率としては約16%である。増幅に蓄積されたエネルギーの抽出効率は $(E_{out} - E_{in}) / E_{stored}$ で定義する。ここで E_{out} は増幅器出力、 E_{in} は増幅器への入力である。これより、最大出力での増幅器#1の抽出効率は約52% (計算値59%)、増幅器#2では、約72% (計算値70%)、増幅器#3では48% (計算値52%)で、増幅器全体からのエネルギー抽出効率は約60%である。この値は、高いとは言えないが、これはビームの入射光強度が約 $100\text{mJ}/\text{cm}^2$ と飽和強度 $620\text{mJ}/\text{cm}^2$ より低い

ため十分にエネルギーが抽出されなかったためと考えられる。エネルギー抽出効率の向上には、増幅器への入力の増加、或いは増幅器のビームのパス数の増加によって可能である。また、本試作機では、LDをNd:YAGスラブ結晶の片側から励起しているが、LDを両サイド励起とすることで(2)式からわかるように増幅利得が指数関数的に増加するため、エネルギー抽出効率も増加し、高出力化、高効率化を図ることができる。増幅器#1、増幅器#2及び#3を両側から励起したときの増幅器の蓄積エネルギーはそれぞれ約54mJ、約100mJ、約100mJとなり、さらなる高出力化が可能である。

Fig.5に増幅された基本波を第2高調波に変換したときの変換特性を示す。波長変換は非線形効果のため、パルスエネルギーの増加とともにほぼ2次曲線で第2高調波のグリーン光の出力が得られ、変換効率も上昇していく。基本波の最大出力95Wにおいて、波長変換結晶への入力強度は約20MW/cm²となり、グリーン光の平均出力は51W、このときのグリーン光への変換効率は53%である。さらにレンズなどで結晶への入射強度を増していけば変換効率も上昇していくことが予想されるが、これ以上の入力強度では非線形結晶に損傷を与える危険性がある。結晶長を長くすることなどによって変換効率の向上も期待される。また、変換効率は、パルス波形、縦モード、空間モードなどのレーザービームの質にも大きく左右されるため、レーザービームの質を改善することにより変換効率の向上を図ることもできる。

レーザーに供給される電気入力、3100Wであり、したがってこのときの電気-グリーン光出力に対するエネルギー効率は約1.6%である。この値は、現在の銅蒸気レーザーのエネルギー効率約0.5~0.7%を上回る値である。しかし、LDの電気-光変換効率が約20%と、LDとしては高い効率とは言えない。現在、発振効率として約40%のLDも開発されていることから、LDの効率をこのレベルまで向上させることにより、さらに2倍程度のエネルギー効率の向上が期待できる。また、レーザー結晶からのエネルギー抽出効率をさらに向上させることで、現システムでも2%以上のエネルギー効率を達成できると考えられる。今後のLD技術の進展により、更なる高出力化と、高効率化が期待される。

固体レーザーを実用化する上で、出力の安定性は重要な要素である。Fig.6にグリーン光の出力の安定性を示す。上の線はグリーン出力、下の線は波長変換後の残った基本波を示している。発振開始とほぼ同時にグリーン光出力は約40Wに達し、安定な出力が得られている。短時間での出力の揺らぎは約±1%程度で、約30分の測定では、グリーン光出力は徐々に低下し、約5%程度の出力低下が観測された。それに伴って、基本波は徐々に増加している。しかし、非線形結晶KTPの角度を再調整することにより、ほぼ最初の出力まで回復することができ、出力の低下はレーザー光の吸収などによって非線形結晶がわずかに加熱され、この結果、位相整合角が変化したためであることがわかる。したがって、非線形結晶の温度が安定すれば、出力も安定すると考えられる。

4. おわりに

準連続発振LDで励起する固体グリーンレーザーを試作し、1kHzの繰り返しで基本波平均出力95W、グリーン光平均出力50Wを得た。電気入力に対するグリーン光の発生効率は約1.6%であり、銅蒸気レーザーのエネルギー効率を上回る値を得た。今回の試験結果をもとにした解析によってLDをさらに付加し、両サイドポンプすることで高出力化が可能であり、グリーン光出力100Wも十分可能であることを示した。LDの発振効率や、増幅器のエネルギー抽出効率の向上などによって、さらに高効率の固体グリーンレーザーを実現することが期待できる。また、出力の安定性も高い。

以上のように、LD励起固体グリーンレーザーは、コンパクト性、高効率性の点で、銅蒸気レーザーを凌いでおり、また、保守が容易であるなどの長所を持つ。また、近年のLD技術は急速に進展しており、LDのさらなる信頼性の向上で一層優位に立つと考えられる。

本研究は科学技術庁からの受託研究「レーザー法ウラン濃縮技術開発」で得られた成果の一部である。

参考文献

- 1) James R. Leger and William C. Goltsov, IEEE J. Quantum Electronics, vol. 28, No.4, 1088 (1992)
- 2) Tso Yee Fan and Robert L. Byer, IEEE J. Quantum Electronics, vol.24, No.6, 895 (1988)
- 3) B. Comaskey, G. Albrecht, R. Beach, S. Sutton, S.Mitchell, C.Petty, K. Jancaitis, W.Benett, B. Freitas and R. Solarz, SPIE, vol. 1865, 9 (1993)
- 4) Brian J. Comaskey, Ray Beach, G. Albrecht, William J. Benett, Barry L. Freitas, C. Petty, D.VanLue, D. Munding and Richard W. Solarz, IEEE J. Quantum Electronics, vol. 28, No. 4, 992 (1992)
- 5) Lonnie E. Holder, Chandler Kennedy, Larry Long and George Dube, IEEE J. Quantum Electronics, vol. 28, No.4, 986 (1992)
- 6) Camille Bibeau, Ray Beach, Chris Ebbers, Mark Emanuel, and Jay Skidmore, OSA TOPS, vol.10, Advanced Solid State lasers, 276, 1997
- 7) Hans Bruesselbach and David S. Sumida, OSA TOPS, vol.10, Advanced Solid State lasers, 285, 1997
- 8) J.M.Eggleston, T.J.Kane, K.Kuhn, J.Unternahrer, R.L.Byer, IEEE J.Quant. Electron, QE-20, 289-301,1984
- 9) T.J.Kane, J.M.Eggleston, R.L.Byer, IEEE J.Quant. Electron, QE-21, 1195-1210,1985
- 10) Y.Maruyama, M.Oba, M.Kato, T.Arisawa, " Characteristics of LD-pumped Nd:YAG green laser system," OSA TOPS on Advanced Solid State Lasers, Vol. 1, 369-372,1996
- 11) Randall St. Pierre, et. al., OSA TOPS, vol.10, Advanced Solid State lasers, vol.10, 288, 1997
- 12) Randall J. St. Pierre, Hagop Injeyan, Rodger C. Hilyard, Mark E. Weber, Jacqueline G. Berg, Michael G. Wickham, Carolyn S. Hoefler and Jason P. Machan, SPIE, vol. 1865, 2 (1993)
- 13) L. M. Frantz and J.S. Nodvik, J. Appl. Phys., vol. 34, No. 8, 2346, 1963
- 14) J.M.Egglestone, L.M.Frantz, H.Injeyan, " Derivation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry," IEEE J. Quant. Electron. Vol.25, 1855-1862,1989

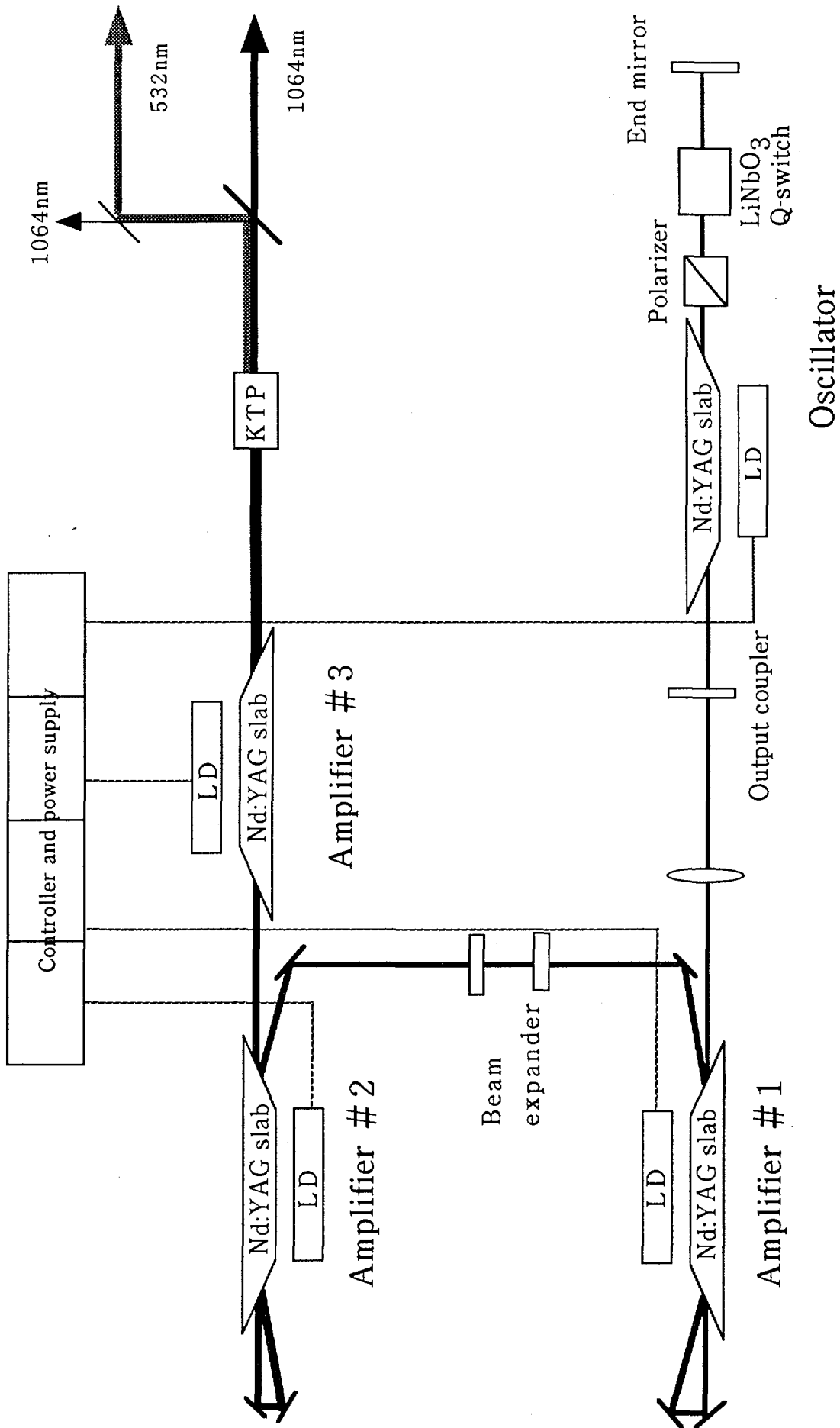


Fig.1 Schematic of LD pumped Nd:YAG laser MOPA system

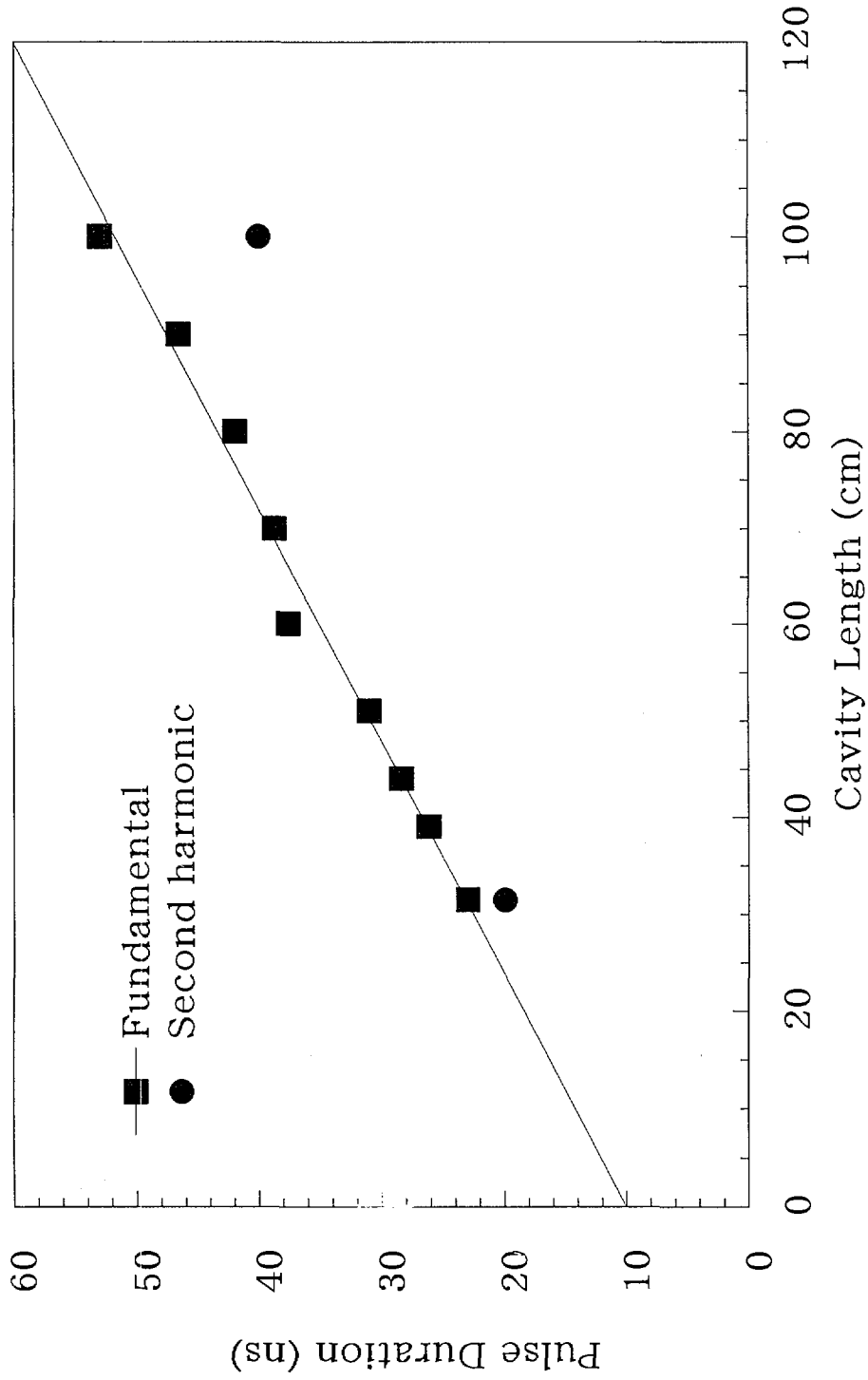


Fig.2 Pulse duration of fundamental and second harmonic vs. cavity length

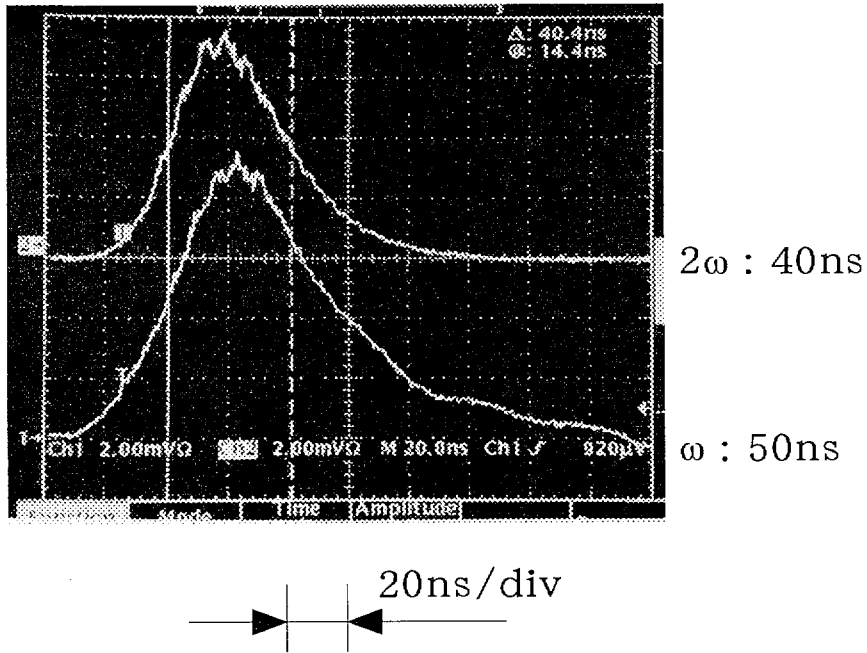


Fig.3 Pulse shape of fundamental and second harmonic

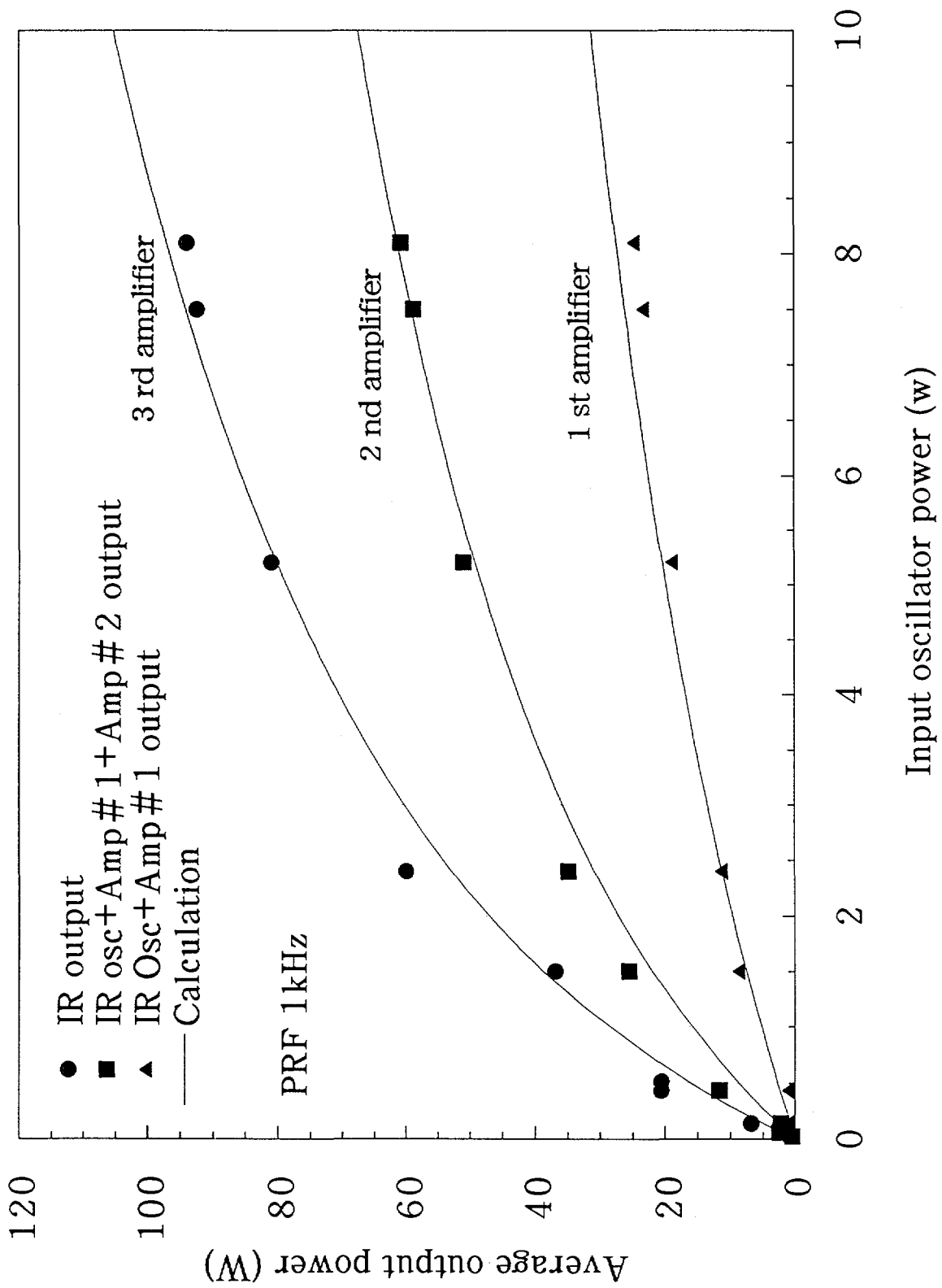


Fig.4 Characteristics of the LD pumped Nd:YAG laser amplifiers

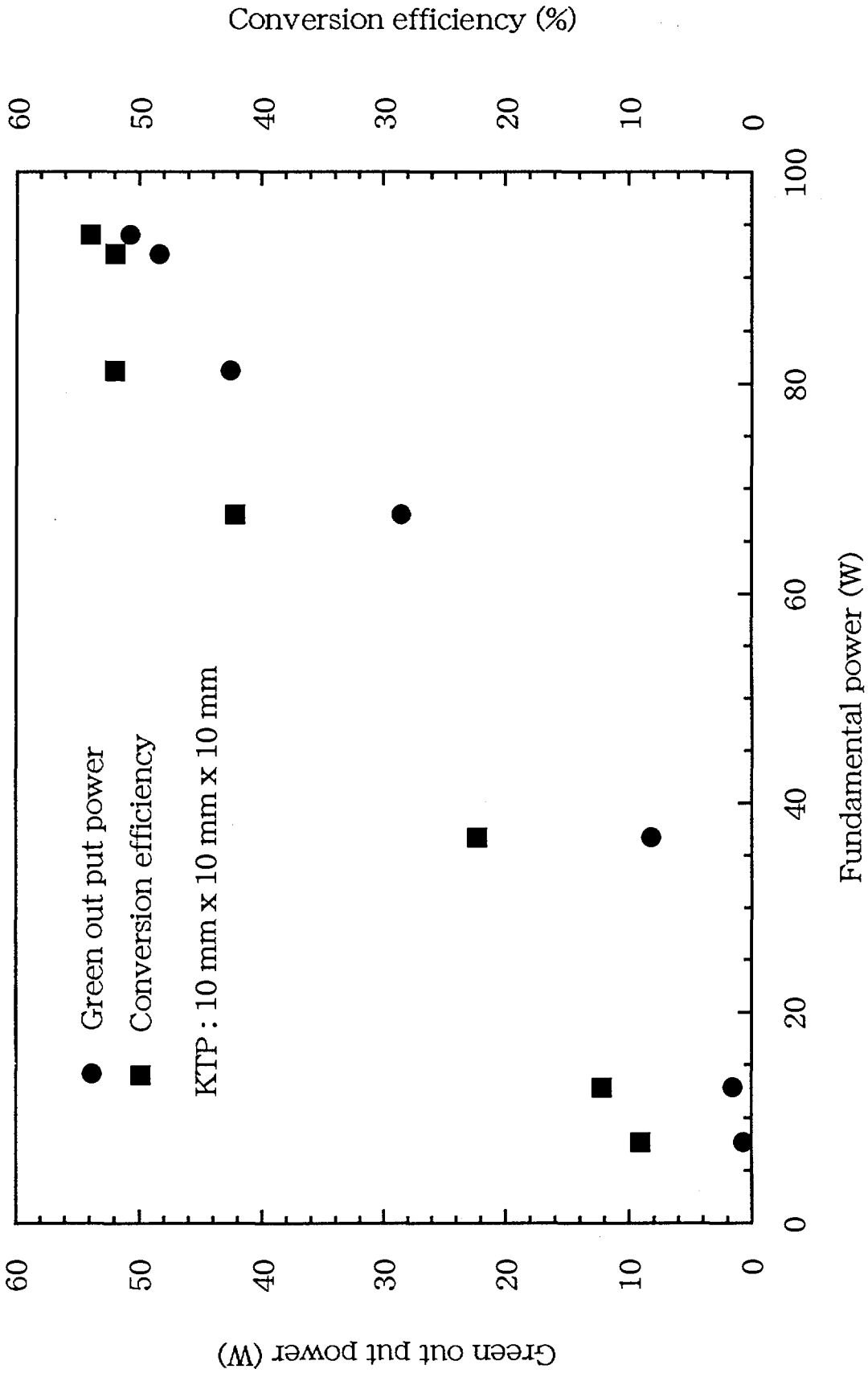


Fig.5 Green output power and energy conversion efficiency as a function of fundamental power

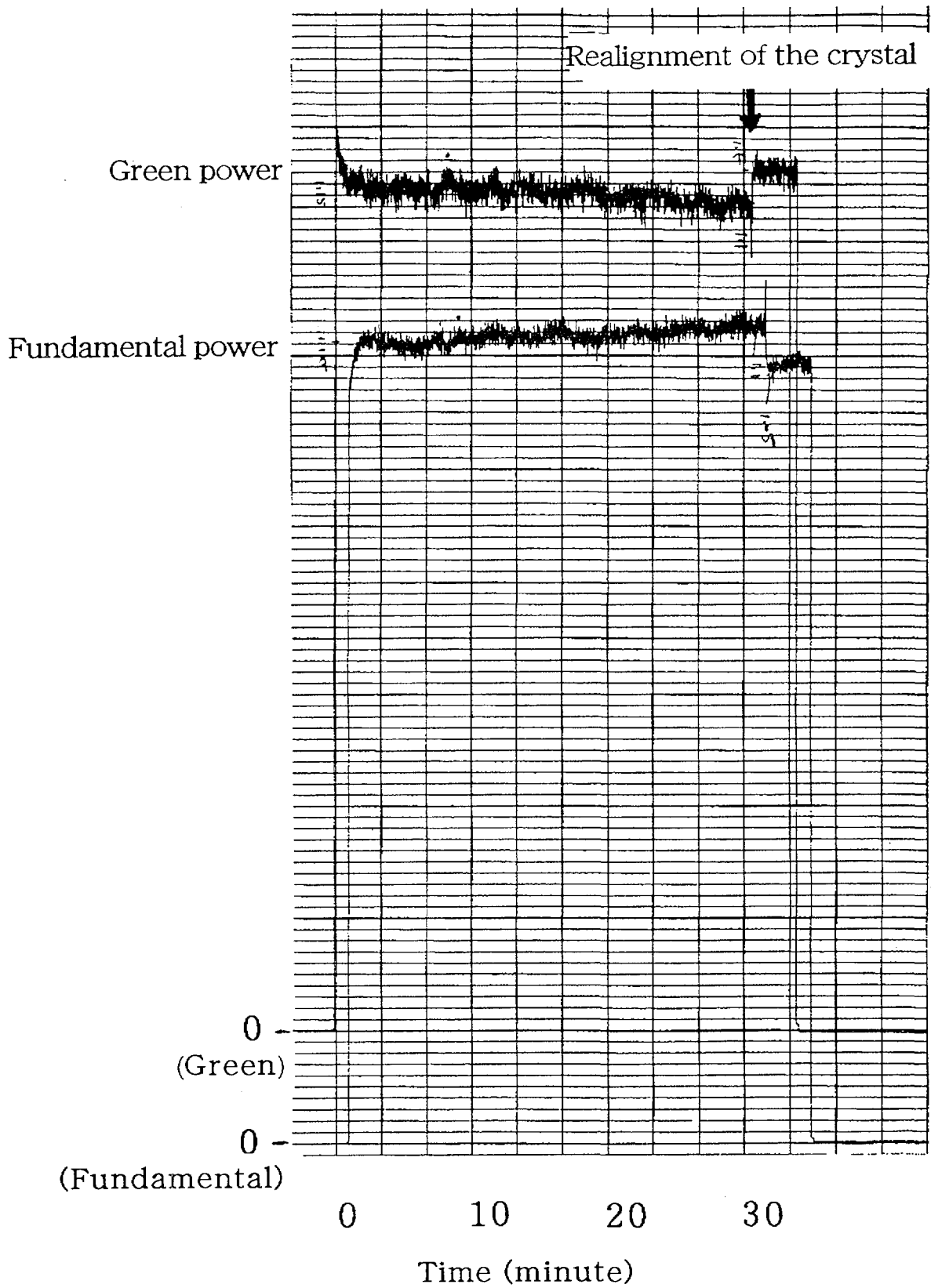


Fig.6 Long term output power stability of the second harmonic

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

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

(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, ヘクト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のカテゴリに分類されている。
- E C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
	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 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	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

半導体レーザー励起高繰り返し・高平均出力Nd:YAGグリーンレーザーの発振特性の研究