

JAERI-Tech
98-024

JAERI-Tech--98-024



波長可変レーザー励起用全固体グリーンレーザーの開発
—(Ⅱ) ダブルパス増幅システムの開発—

1998 年 6 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

L

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。

入手の間合わせは、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

波長可変レーザー励起用全固体グリーンレーザーの開発
—(II) ダブルパス増幅システムの開発—

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1日受理)

半導体レーザー (LD : Laser Diode) 励起ジグザグスラブYAGレーザーダブルパスMOPAシステムを試作し、増幅出力43Wを得た。増幅特性を解析した結果、増幅器の蓄積エネルギーに対するエネルギー抽出効率は最大40%、電気入力に対するエネルギー効率は3.7%であった。またKTP結晶によるグリーン光への変換を行い、グリーン出力で19W、基本波ーグリーン光変換効率46%を得た。このときのシステムの電気入力に対するエネルギー効率は1.4%であった。また、波面やビーム拡がりなどのモード測定を行い、ジグザグスラブ増幅器では増幅によるモード劣化の少ないことを明らかにすることができた。

Development of Laser Diode-pumped Solid State Green Laser
for the Pumping of Wavelength Tunable Laser
— (II) Development of Double-pass Nd:YAG MOPA System —

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 1, 1998)

The characteristics of a LD pumped zigzag slab YAG laser double-pass amplification is studied. The amplified laser power of 43W in IR is obtained, and the energy extraction efficiency from Nd:YAG crystals 40%. The electrical efficiency is 3.7%. The green power is 19W by using a KTP crystal, with the conversion efficiency of 46%. In this condition, electrical energy efficiency is 1.4%. We also study the quality of the laser beam, and shows that the M^2 of the laser beam is around 1.5 at high average power condition.

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

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	2
3. 実験結果	2
3.1 入出力特性	2
3.2 パルス波形	4
3.3 ビーム質	5
3.4 波長変換特性	6
4. おわりに	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
3. Result	2
3.1 Amplification Characteristics	2
3.2 Pulse Duration Characteristics	4
3.3 Beam Quality	5
3.4 Second Harmonic Generation	6
4. Summary	6
References	7

1.はじめに

銅蒸気レーザー (CVL: Copper vapor laser) は高平均出力、高繰り返し、高エネルギー効率 (グリーン光で約0.5%~0.8%) の同位体分離用波長可変レーザーの励起光源として現在最も有力な光源である。しかし最近、小型、高出力で高効率の半導体レーザー (LD: Laser Diode) を励起光源とした固体レーザーがCVLやエキシマレーザーに代わる次世代の新光源として注目されている ([1]~[7])。このレーザーは、従来のフラッシュランプ励起固体レーザーに比べて高繰り返しが可能であり、1kHz以上の高繰り返しで高平均出力レーザー光が発生できると期待されている。また、LDは固体レーザー媒質が吸収する波長の光のみを発生できるため、フラッシュランプ励起よりも効率が高く、また固体レーザーの最大の問題点であるレーザー結晶の熱歪みに起因する、熱レンズ、熱複屈折等の熱的な効果によるビーム質の低下を軽減することができる。これまで、我々は、ロッドタイプのLD励起固体レーザー発振器を試作し、その発振特性を測定したが、高平均出力条件下ではLD励起であっても熱歪み等の影響が補償できず、この結果、モードが劣化し、グリーン変換効率が大きく低下した ([21])。そこで熱の影響の少ないスラブ状の結晶を用いた低出力の発振器を試作し、ほぼガウシアンビームに近いビーム質を得た ([22])。Bayerらはジグザグスラブの特性について理論的、実験的な研究を行い ([8]~[11])、スラブレーザーの熱レンズ効果、熱複屈折による偏光解消などの効果は、ロッドタイプのレーザーに比べて極めて少ないことを明らかにしている。このため高平均出力の固体レーザーではスラブタイプの結晶を用いることが多く、McDonnell Douglas社では繰り返し32Hzで1Jの単一縦モードのLD励起YAGスラブレーザーMOPAシステムの試作に成功している[5]。LD励起高繰り返し高出力スラブレーザーとしては、LLNLが繰り返し2.5kHz、平均出力1kWを達成している。

固体レーザーの高出力化にはMOPAシステムが必要となるが、Nd:YAGの飽和フルエンスが0.6J/cm²程度であるため、入射光が1回増幅器を通過しただけでは結晶中のエネルギーを効率良く取り出すことができない。従って結晶中に蓄えられたエネルギーを効率良く取り出すためにはビームを折り返して何回か増幅器中を通過させることが必要である。ローレンスリバモア研究所では、スラブ結晶を用いて入射光軸を少しずつずらすことにより4パス増幅を行い、さらにSBSミラーで折り返して合計8パス増幅とし、繰り返し750Hzでビーム質が回折限界の約3倍、出力450mJを得ている[15]。

我々はCVLに代わる同位体分離用波長可変レーザーのポンプ光源として高平均出力LD励起固体グリーンレーザーシステムの構築を目指して、その要素技術であるスラブタイプ発振器及び、増幅器を試作し、その増幅特性、ビーム質などの測定を行っている。今回は、増幅器のエネルギー抽出効率向上を図るため小型のダブルパス増幅システムを組み上げ、その増幅特性、ビーム質特性などについて研究を行った。また、CVLなどのグリーンレーザーの代替光源とするためには、第2高調波へ波長変換する必要があるため、非線形結晶KTPを用いての増幅光のグリーン光への波長変換の特性も測定した。

2. 実験装置

Fig.1にダブルパス増幅試験の装置構成図を示す。試作したジグザグスラブレーザー発振器 ([22]) は、パルス繰り返し数1kHz、LDパルス幅185 μ s、ピーク電流35AでNd:YAG結晶を励起すると最大平均出力16Wが得られる。ビーム径は出射口で約2.5mm、ビーム拡がり角は約3mradである。励起用LDの出力は、ピーク電流35A、パルス幅150 μ sで約114mJ、また、ピーク電流35A、パルス幅185 μ sで約140mJであり、最大1kHzのパルス繰り返し数で動作できる。今回の試験ではパルス繰り返しをすべて1kHzとした。LD及びスラブ結晶の全反射面を水冷しているが、スラブ結晶の両側をシリコン系のゴムで断熱、支持し、ジグザグ伝播面に垂直な方向には熱勾配が少なく、ジグザグ伝播面上下方向にのみ熱勾配が生じるようにしている。これはレーザー光を上下方向にジグザグに伝播させることによって熱複屈折、熱レンズ効果を補償するためである。また、入射損失を無くすため、入射面をブリュースター角にカットしてある。増幅器には発振器のレーザーヘッドと同じ構造のレーザーヘッドを用いる。発振器で発生したビームは、ポライザー、 $\lambda/2$ 板、ファラデーローテータを通過して増幅器に入射する。 $\lambda/2$ 板はスラブ増幅器のブリュースター面に偏光面を調整するために用いられる。1度増幅されたビームはミラーにより同軸上に折り返され、再び増幅された後ファラデーローテータ、 $\lambda/2$ 板を通りポライザーに入る。このときファラデーローテータにより偏光面は入射ビームに対して90度回転しており、ポライザーにより増幅光のみが取り出される。増幅器のNd:YAGスラブ結晶は、断面3mm \times 3mm、長さ83mmであり、ピーク電流35A、パルス幅185 μ sで最大出力140mJのLDにより励起される。また、増幅器媒質中での反射回数は15回である。ファラデーローテータ (Litton Airtron 社製 TG-1064-5) の媒質はTGG単結晶であり、損傷閾値は500 MW/cm²である。SHG試験で用いた非線形結晶は中国CASIX社製Type II KTP結晶(5mm \times 5mm \times 5mm)である。

3. 実験結果

3.1 入出力特性

シングルパス増幅の入力密度と出力密度の関係は次式で表される。

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

$$G_0 = \exp\{ (s/h\nu) (E_{st} / S) \} \quad (2)$$

$$E_{st} = aE_{LD} \quad (3)$$

ここで J_{in} は入力密度、 J_{out} は出力密度、 s は誘導放出断面積、 $J_s (=h\nu/s)$ は飽和強度でNd:YAGの場合0.623J/cm²、 S はビームの断面積、 E_{st} は増幅器の蓄積エネルギーで、LDの入力強度 E_{LD} にポンプ効率 a をかけたものである。ポンプ効率 a は、量子効率、量子ディフェクト、吸収効率などを考慮して算出する係数で、

$$a = h_T h_A h_Q h_{SD} h_S \quad (4)$$

で表される。 h_T はLD光とYAG媒質のカップリング率で励起光はほとんどYAG媒質に入射しているものとして100%としている。 h_A はLD光の吸収効率でLD光をYAG結晶の裏面で反射すると媒質長 L は6mmとなり91%、 h_Q は量子効率でNd:YAGでは90%、 h_{SD} は量子ディフェクトで76%、 h_S は励起パルス幅に対するエネルギー蓄積効率でLDパルス幅150 μ sでは74%、185 μ sでは70%である。これらの値を用いると、 a の値はLDパルス幅が150 μ sでは0.463、LDパルス幅が185 μ sでは0.435である。 G_0 は発振器の入力(J_{in})が非常に小さいときの利得を表しており、シングルパス増幅の場合、蓄積エネルギー E_{st} にのみ依存する量であるが、ダブルパスの場合1パス目で E_{st} が減少するため2パス目ではこの変化分(ΔE)を考慮する必要がある。1パス後の蓄積エネルギー E_{st}' は

$$E_{st}' = E_{st} - \Delta E = J_s \ln(G_0) - (E_{out} - E_{in}) \quad (5)$$

で表される ([23])。従って2パス目の利得 G_0' は

$$G_0' = \exp\{ (s/h\nu) (E_{st}' / S) \} \quad (6)$$

で表される。

Fig. 2 に測定した増幅器の入出力の関係を示す。発振器及び、増幅器のLDピーク電流が35AでLDパルス幅が150 μ sのパルスエネルギーは114mJである。この時の増幅器出力は発振器からの入力が10mJのときシングルパス増幅18.3mJ (平均出力18.3W)であったのに対し、ダブルパス増幅では27.5mJ (平均出力27.5W) と約1.5倍の出力が得られた。さらに発振器、増幅器のLDパルス幅を185 μ s、140mJとして、発振器からの入力を16mJに増加したとき、シングルパス増幅出力30mJ (平均出力30W)であった。これに対して、ダブルパス増幅では13mJ高い43mJ (平均出力43W) の出力が得られた。ビーム断面積 (S) とスラブ結晶断面積 (3mmx3mm) のカップリングを約50%とすると、LDのポンプ入力114mJの時、蓄積エネルギー (E_{st}) は約26mJであり、この値を用いて計算した結果は実験値とほぼ一致する。従ってスラブ結晶内にはまだ半分以上のエネルギーが残っていることになる。これは、スラブ結晶の断面が一辺3mmの正方形であるのに対して、入射レーザー光がほぼ円形のビームであり、カップリング率が小さいためである。Fig. 3 に発振器入力に対する利得特性を示す。小信号利得 G_0 はシングルパス増幅で約2.3であるが、ダブルパス増幅ではその二乗の約5.0となる。入力が高いところでは上述したように蓄積エネルギーが減少するため二乗より小さくなり、シングルパス増幅で1.83、ダブルパス増幅で2.75である。入力が飽和強度0.623mJ/cm²に近づいていくと、1パス目で

ほとんどエネルギーが抽出されるため、シングルパスとダブルパスの利得は接近していくと思われるが、ダブルパスによる増幅がシングルパス増幅よりも大きな利得が得られる。この測定で得られたシングルパスでの G_0 を用い、ビーム径を2.5mmとして利得を計算するとFig. 3のようにダブルパス利得の実験値の方が多少低い値になっている。これは媒質中の透過損失などによるものと思われる。発振器と増幅器のLDポンプ入力を140mJにして、発振器からの入力を16mJにしたときにはシングルパス増幅で1.9倍、ダブルパス増幅で2.7倍であった。式(1)を用い、さらに上述のカップリング率50%を用いて計算したダブルパス増幅の利得は2.6で実験値とほぼ一致した値が得られた。

小信号利得係数 g_0 と媒質長 L の積(g_0L)は G_0 と次の関係で表される。

$$g_0L = (s/h\nu)(E_{st}/S) = \ln(G_0) \quad (7)$$

この式は、シングルパス増幅に対する入出力関係の式であるが、ダブルパス増幅特性もこの式で評価した。式(7)によるLDのポンプ入力(E_{st})に対する利得と媒質長の積(g_0L)の関係を図4に示す。シングルパス増幅では g_0L は E_{st} の増加とともに直線的に増加し、LDポンプ入力140mJのとき0.9であるが、ダブルパス増幅では1.4と0.5大きい値が得られ、同じ媒質長でも等価的に g_0L を増加することができる。

Fig.5にエネルギー抽出効率を示す。エネルギー抽出効率 h は次式により求める。

$$h = (E_{out} - E_{in}) / E_{st} \quad (8)$$

ここで E_{out} はアンプ後のレーザー出力、 E_{in} はアンプへの発振器からの入力強度、 E_{st} は増幅器の蓄積エネルギーである。シングルパスでの抽出効率は、最大で23%であるがダブルパスでは40%のエネルギー抽出効率を得られた。しかし、上述したように励起光と入射光とのカップリング率が約50%であることを考慮すると抽出可能な蓄積エネルギーに対しては約80%のエネルギー抽出効率となる。基本波平均出力43Wでのレーザーシステムの電気入力に対するエネルギー変換効率は約3.0%であり、発振器は約2.3%、増幅器は約3.7%であった。

カップリング率が小さいために抽出可能なエネルギーが制限されていることは問題であり、今後、ビーム形状の調節によってカップリング率を高め、さらにエネルギー抽出効率を高めることでシステムのエネルギー効率を上げる必要がある。

3.2 パルス波形

増幅されたパルスのパルス幅は利得狭帯域化により次式で表される ([23])。

$$t_o^2 = t_i^2 + (16 \ln 2) Ng / \Delta \omega^2 \quad (9)$$

t_i は入射レーザー光のパルス幅、 N は通過回数でシングルパス増幅で $N=1$ 、ダブルパス増幅で $N=2$ 、 $g=\ln G_0$ 、 $\Delta\omega$ は利得帯域幅で $9.8 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ である。これらを代入すると右辺第2項は $3 \times 10^{-23} \text{ s}$ となり、入射レーザー光のパルス幅 t_i^2 ($=23 \text{ ns}^2$) に対して非常に小さい値であるから増幅後のパルス幅もほとんど変化はない。発振器、増幅されたレーザー光のパルス波形の測定結果をFig.6に示す。発振器、1パス増幅後、2パス増幅後のパルス幅は 23 ns で上述したようにほとんど変化がなかった。パルス幅とパルスエネルギーとからパルスのピーク出力が得られ、平均出力 43 W すなわちパルスエネルギー 43 mJ のときのパルスのピーク出力は、 1.9 MW である。

3.3 ビーム質

ダブルパス増幅時のレーザービーム強度分布をFig.7に示す。ビームにホットスポットは観測されないが、Gaussianモードとはなっていない。これは、増幅過程でのモードの悪化ではなく、発振器のモードが一様でないためである。ビーム質の変化は、ポンプ入力の1パルス当たりのエネルギーより、むしろ平均的なポンプ入力強度による熱歪みなどが原因となる。発振器のLD入力 114 W において、発振器のモードは比較的良好である。しかしLD入力を 140 W に増すと熱の影響により結晶の歪みが増し、モードが悪化してくるものと考えられる。実験では増幅器のLD入力の増加と同時に発振器のLD入力をも増加させたため、発振器が最適運転条件からはずれたものと思われる。

Fig.8にダブルパス増幅後のレーザー光の波面を示す。LD入力 114 W に比べて 140 W の場合の波面歪みが大きくなっている。発散成分を取り除けば歪みはほとんど観られず、波面歪みのほとんどは容易に補正可能な発散成分であることがわかる。Fig.9にLD入力強度に対するレーザービームの波面歪みの変化を示す。これは、増幅後の波面歪みから、発振器の波面歪みを差し引いたものである。増幅器のLD入力強度が大きくなるに従って波面の歪み量が大きくなっていることがわかる。しかし、波面歪みは1波長以下の小さな値であり増幅による影響は少ないと考えて良い。

Fig.10にLD入力に対するビーム拡がりを示す。ビーム拡がりにはX軸方向（水平方向）、Y軸方向（垂直方向）ともに $2.5 \sim 3.0 \text{ mrad}$ で大きな変化は観られなかったが、X軸方向には僅かに増加傾向が観られた。これは、結晶のY軸方向にはジグザグに伝播するため熱効果が相殺されるが、X軸方向はシリコンゴムによって結晶が断熱されているものの完全ではなく温度勾配が一様にならず熱効果が現れているものと思われる。

Fig.11にLD入力に対する M^2 を示す。 M^2 の値は約 1.5 でLD入力を増加させても発振器の M^2 値からほとんど変化が観られず、増幅によるモード悪化はほとんどないものと思われる。LD入力が 140 W のときは 114 W のときの値より多少大きな値になっているが、これは上述のように発振器のモードに依るものと思われる。

3.4 波長変換特性

SHG波長変換特性をFig.12に示す。増幅器出力41Wでレンズの焦点距離を変化させて変換出力を測定した。その結果、入射光強度90MW/cm²でグリーン線の最大出力19Wが得られた。最大出力での変換効率46%である。ビーム質改善によっても効率向上が期待される。最大グリーン出力のときの電気入力に対するエネルギー効率は約1.4%であった。この値は、銅蒸気レーザーのグリーン光のエネルギー効率約0.5~0.8%を上回っている。増幅器のエネルギー抽出の高効率化、SHG変換の高効率化によってエネルギー効率2%以上のグリーンレーザーを達成できるものと期待される。

4.おわりに

ダブルパス増幅で最大出力基本波43W、グリーン出力19Wが得られ、シングルパス増幅に比較して高いエネルギー抽出効率を達成した。しかし、励起光と入射レーザー光のカップリング率が約50%と低く、エネルギー抽出効率が40%と低い。この原因としては、ビーム形状と結晶形状が一致していないことに依るものであり、改善が可能である。今後は、エネルギー抽出効率の向上、増幅器の増設などにより、グリーン光の高品質化、高出力化を図っていく。さらに高出力、高繰り返し条件下におけるSBSによるビーム歪み補償を行い、高効率の波長変換を実現していく計画である。

参考文献

- [1] J. G. Endriz, M. Vakili, G. S. Browder, M. DeVito, J. M. Haden, G. L. Hamagel, W. E. Plano, M. Sakamoto, D. F. Welch, S. Willing, D. P. Worland and H. C. Yao, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 952 (1992)
- [2] R. Beach, W. J. Bennett, B. L. Freitas, D. Munding, B. J. Comaskey, R. W. Solarz and M. A. Emanuel, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 966 (1992)
- [3] J. R. Leger and W. C. Goltsov, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 1088 (1992)
- [4] R. J. St. Pierre, H. Injeyan, R. C. Hilyard, M. E. Weber, J. G. Berg, M. G. Wickham, C. S. Hofer and J. P. Machan, SPIE, vol. 1865, 2 (1993)
- [5] L. E. Holder, C. Kennedy, L. Long and G. Dube, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 986 (1992)
- [6] J. J. Kasinski, W. Hughes, D. DiBiase, P. Bourne and R. Burnham, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 977 (1992)
- [7] S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers and A. K. Cousins, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 997 (1992)
- [8] T. Y. Fan and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electronics, vol.24, No.6, 895 (1988)
- [9] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn, J. Unternahrer and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-20, No.3, 289 (1984)
- [10] T. J. Kane, J. M. Eggleston, J. Unternahrer and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-21, No.8, 1195 (1985)
- [11] R. J. Shine Jr., T. C. Merrill, A. J. Alfrey, E. K. Gustafson and R. L. Byer, SPIE, vol.1865, 17 (1993)
- [12] B. J. Comaskey, R. Beach, G. Albrecht, W. J. Bennett, B. L. Freitas, C. Petty, D. VanLue, D. Munding and R. W. Solarz, IEEE J. Quantum Electronics, vol.28, No.4, 992 (1992)
- [13] B. Comaskey, G. Albrecht, R. Beach, S. Sutton, S. Mitchell, C. Petty, K. Jancaitis, W. Bennett, B. Freitas and R. Solarz, SPIE, vol.1865, 9 (1993)
- [14] I. V. Golovnin, V. M. Gordienko, A. I. Kovrigin, A. V. Kudryashov, G. D.

Laptev and A. V. Seliverstov, Quantum Electronics, 24 (4) 284 (1994)

- [15] M. Harmann, et. al., CLEO/QELS' 95, CTuC5, CTuM4, (1995)
- [16] B. Ya. Zel'dovich, V. I. Popovichev, V. V. Ragul'skii and F. S. Faizullof, JETP Letter, vol. 15, 109 (1972)
- [17] O. Yu. Nosach, V. I. Popovichev, V. V. Ragul'skii and F. S. Faizullof, JETP Letter, vol. 16, 435 (1972)
- [18] T. A. Wiggins, R. V. Wick and D. H. Rank, Applied Optics vol. 5, No. 6, 1069 (1966)
- [19] V. G. Sidorovich, Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 21, No.10, 1270 (1976)
- [20] C. B. Dane, W. A. Neuman and L. A. Hackel, Optics Letters, vol.17, No.18, 1271 (1992)
- [21]加藤政明 他、日本原子力学会「1993春の年会」予稿集
- [22]大場正規 他、”高繰り返しジグザグスラブYAGレーザーの発振特性”、日本原子力学会「'94秋の大会」予稿集
- [23] L. M. Frabtz and J. S. Nodvik, J. Appl. Phys. vol. 34, No. 8, 2346 (1963)
- [24] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, J. Appl. Phys., vol. 51, No.5, 2436 (1980)

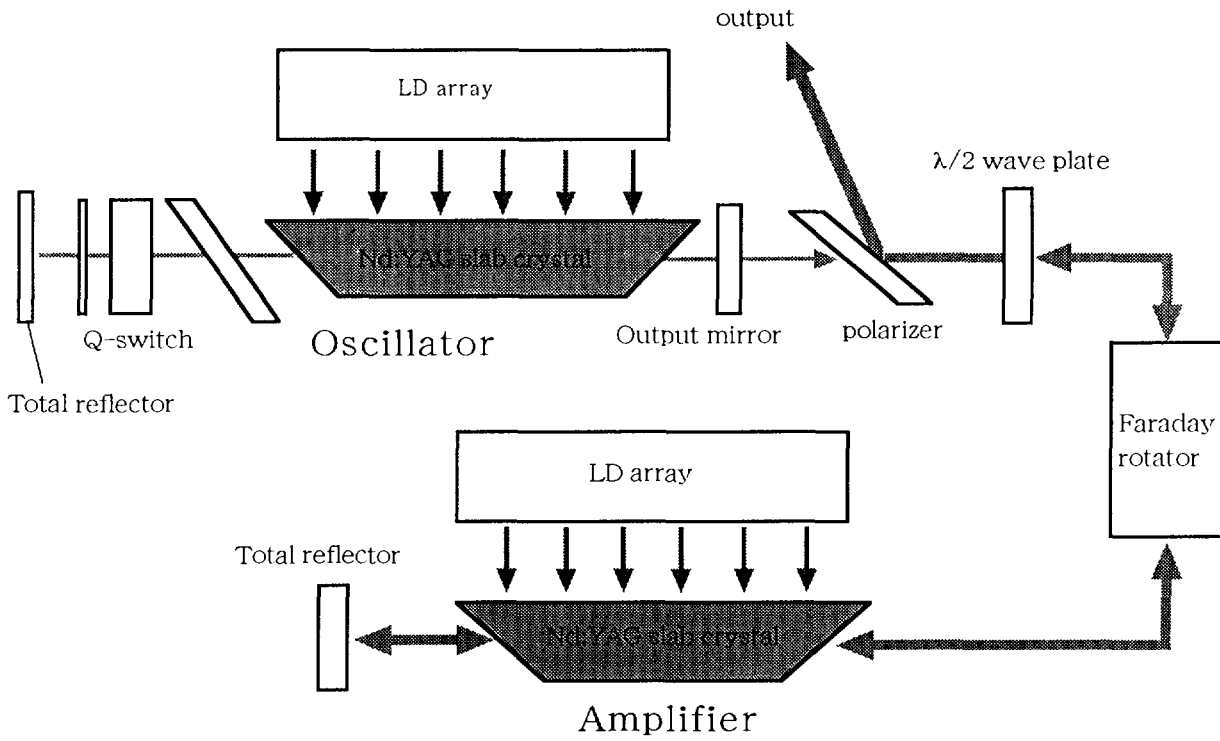


Fig.1 LD-pumped zigzag slab Nd:YAG MOPA system laser with a double-pass amplifier

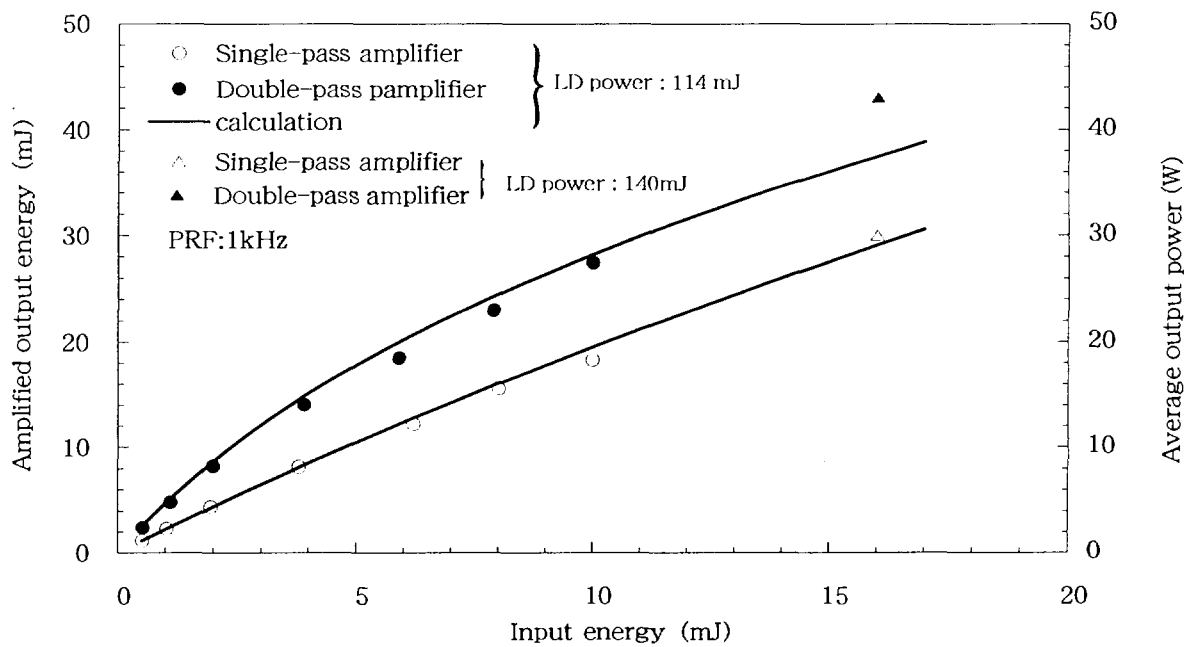


Fig.2 Input-output characteristics of double-pass amplifier

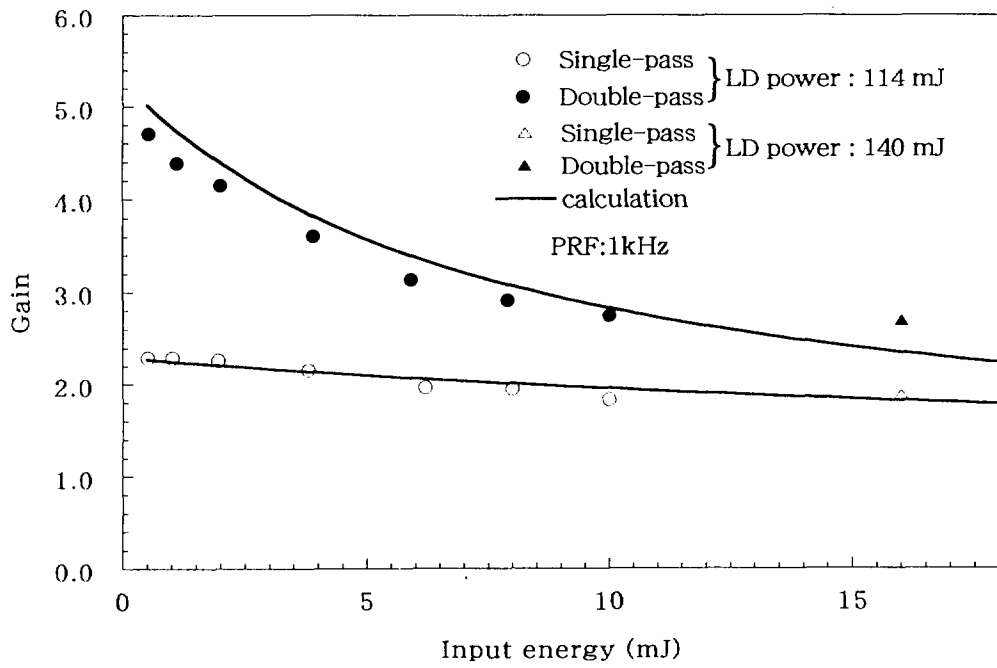


Fig. 3 Gain characteristics of amplifier

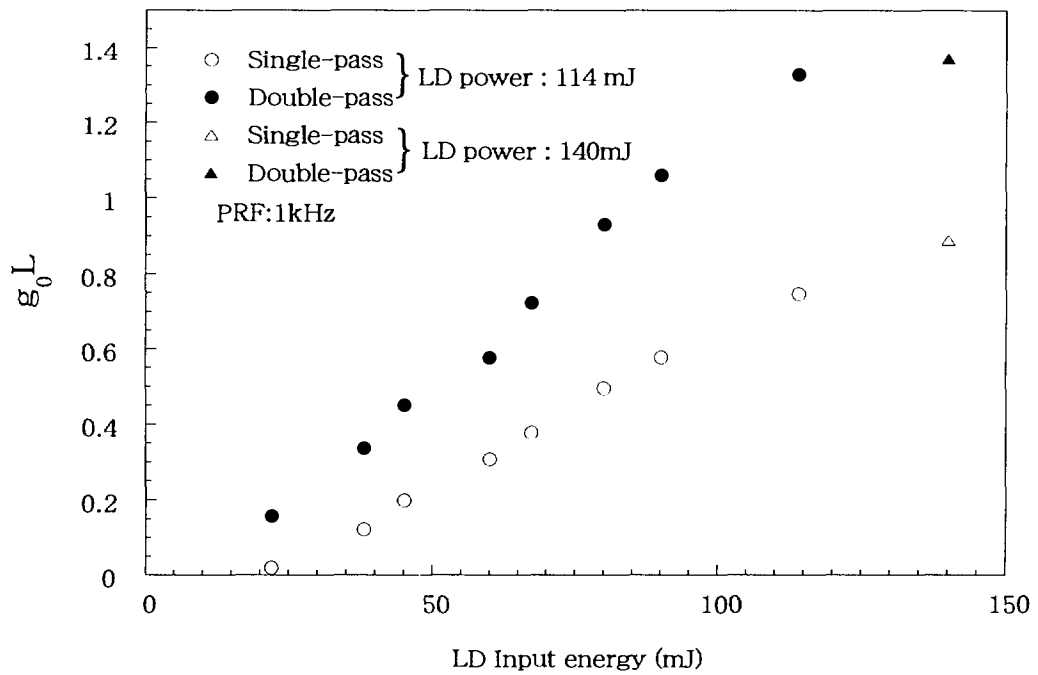


Fig. 4 $g_0 L$ characteristics of amplifier

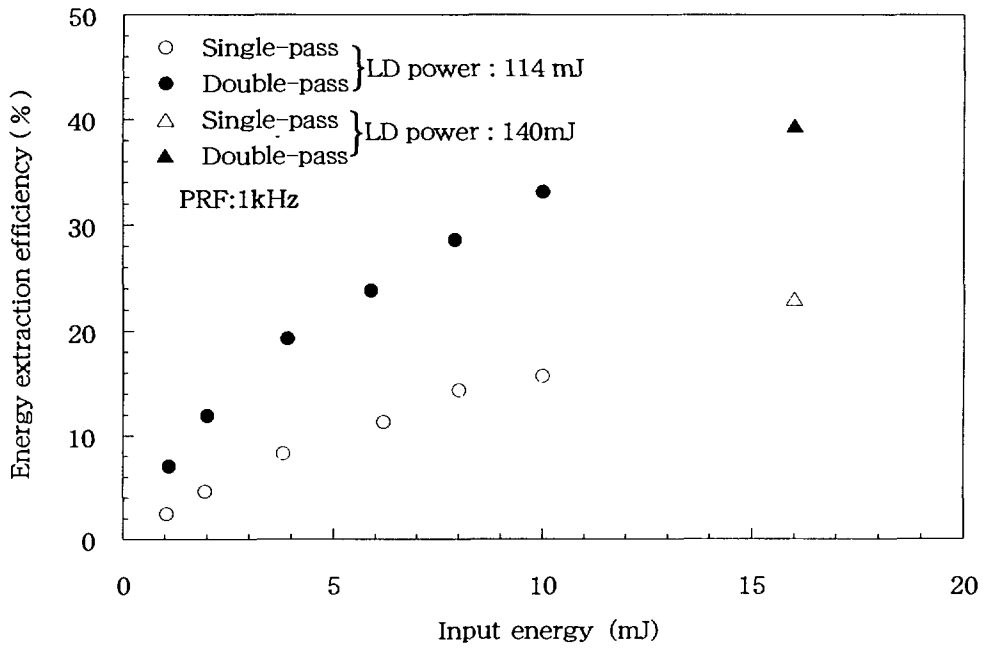


Fig.5 Energy extraction efficiency of amplifier

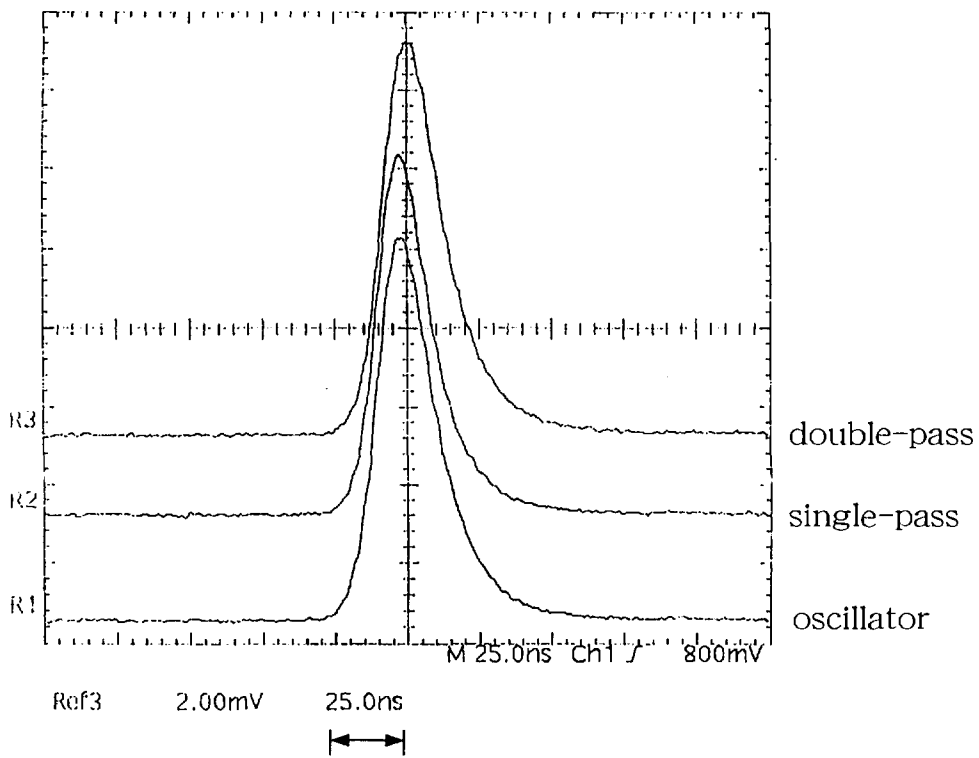
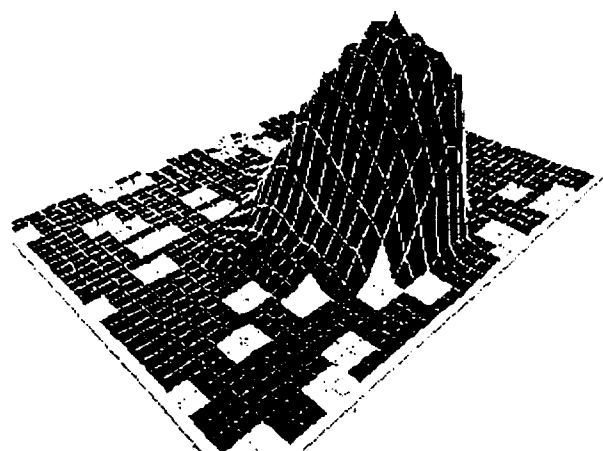
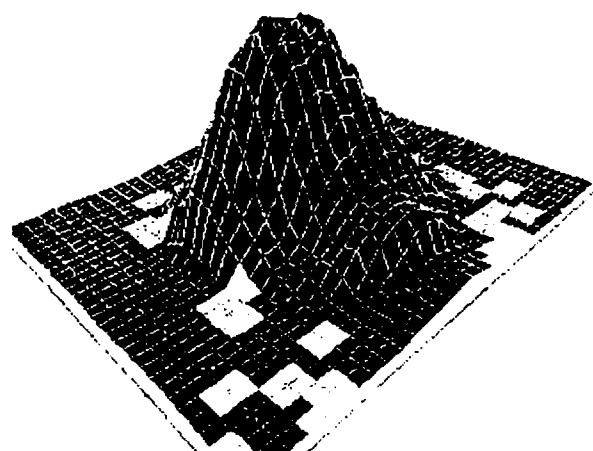


Fig.6 Pulse shape of the oscillator and amplified laser pulse

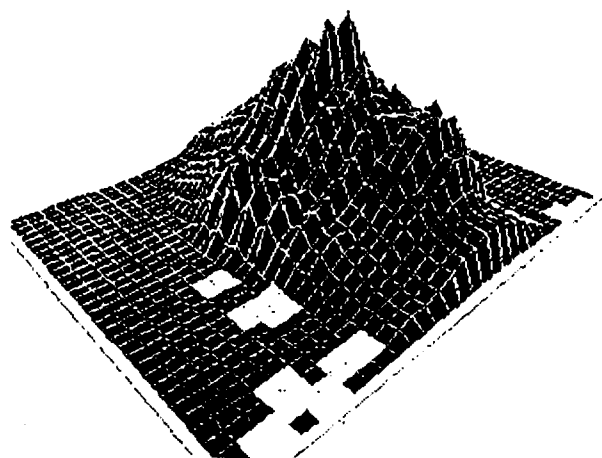


Oscillator laser beam

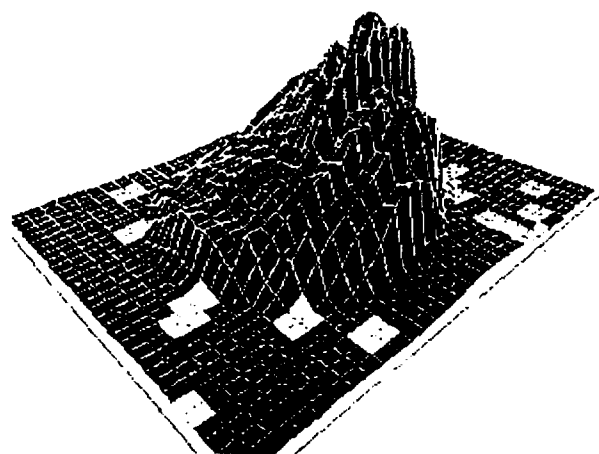


Amplified laser beam

LD power:114 W



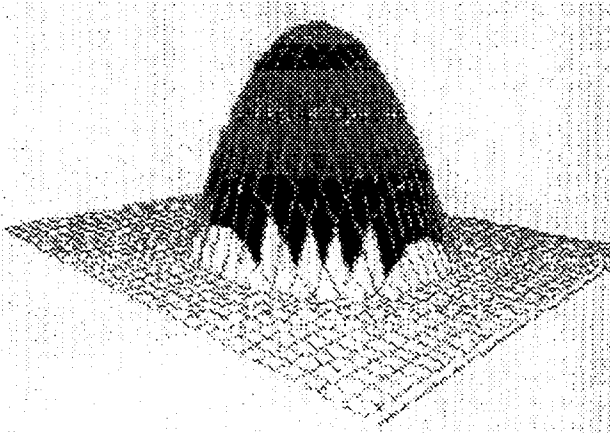
Oscillator laser beam



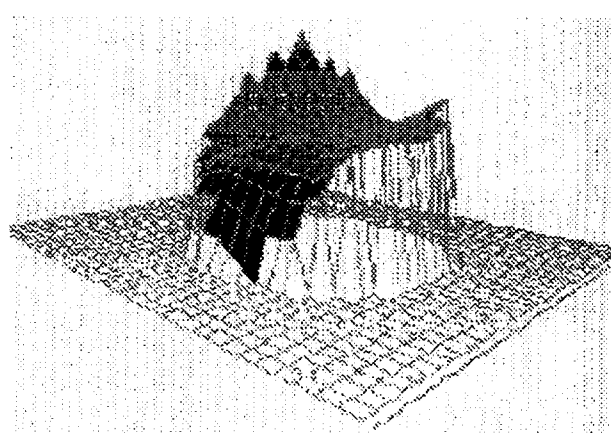
Amplified laser beam

LD power: 140 W

Fig.7 Profile of the oscillator and amplified beam at the different input LD power

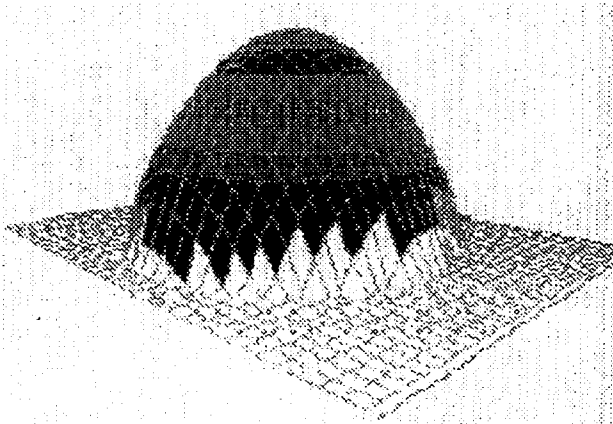


wave front distortion 2.7λ

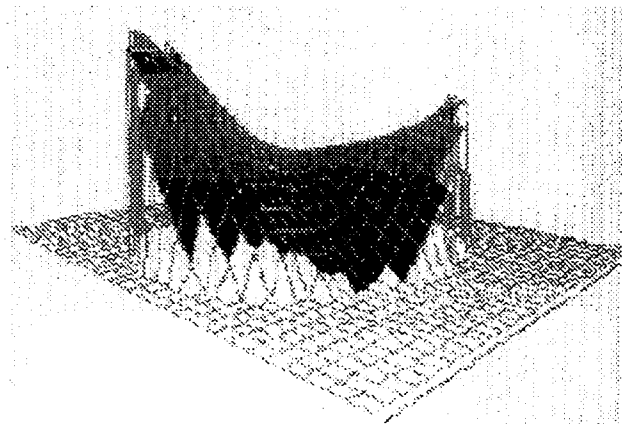


without divergence 0.7λ

LD power : 114W



wave front distortion 3.3λ



without divergence 0.5λ

LD power : 140W

Fig.8 Wave front distortion of the double-pass amplified laser beam

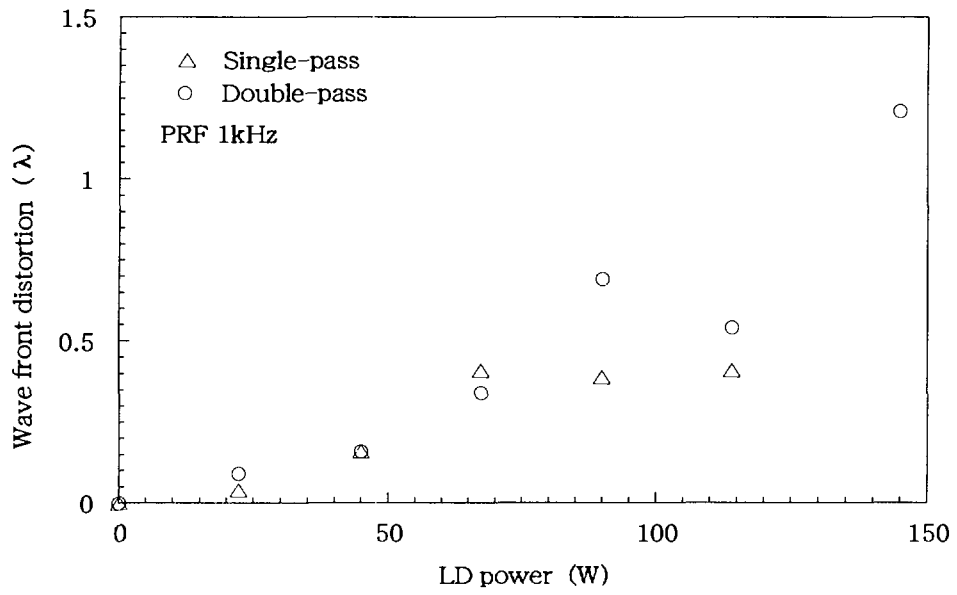


Fig.9 Wave front distortion vs. LD power

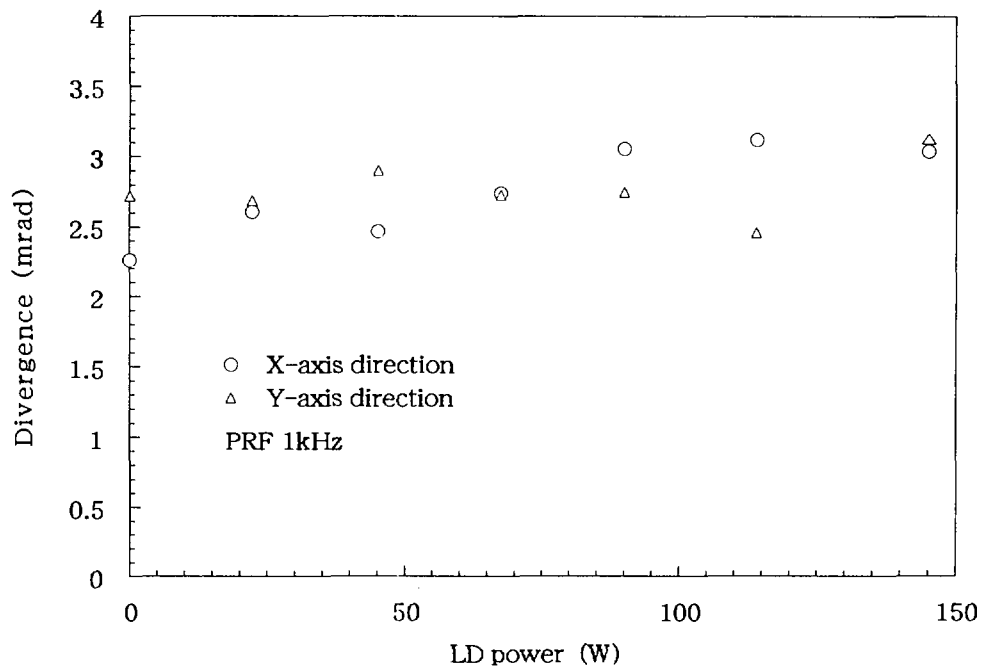


Fig.10 Divergence component of double-pass amplified laser beam

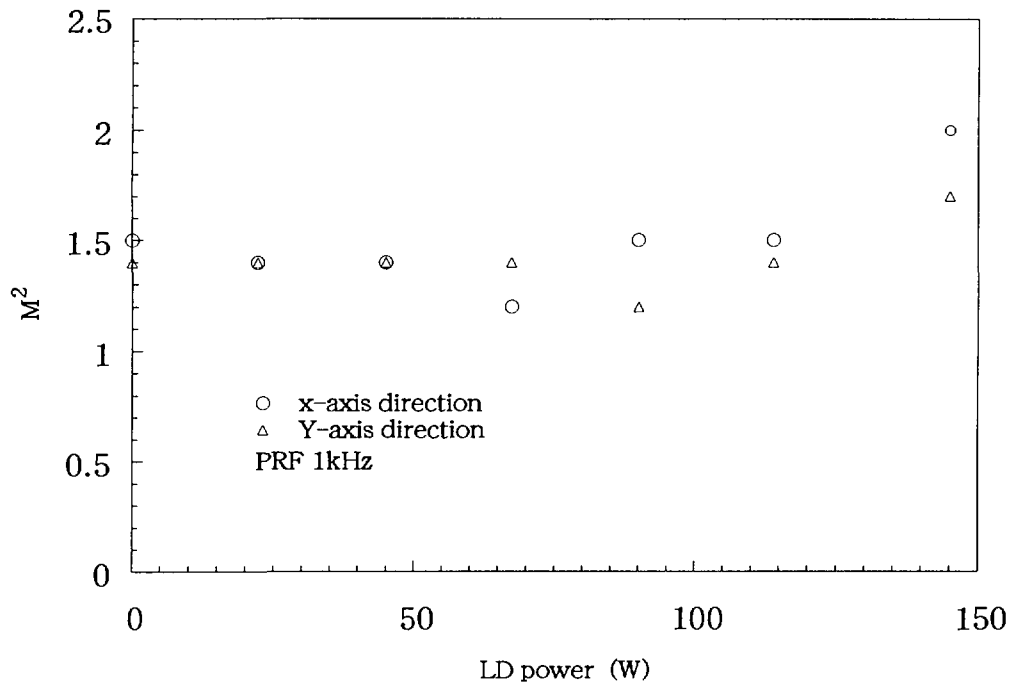


Fig.11 M² vs. LD power

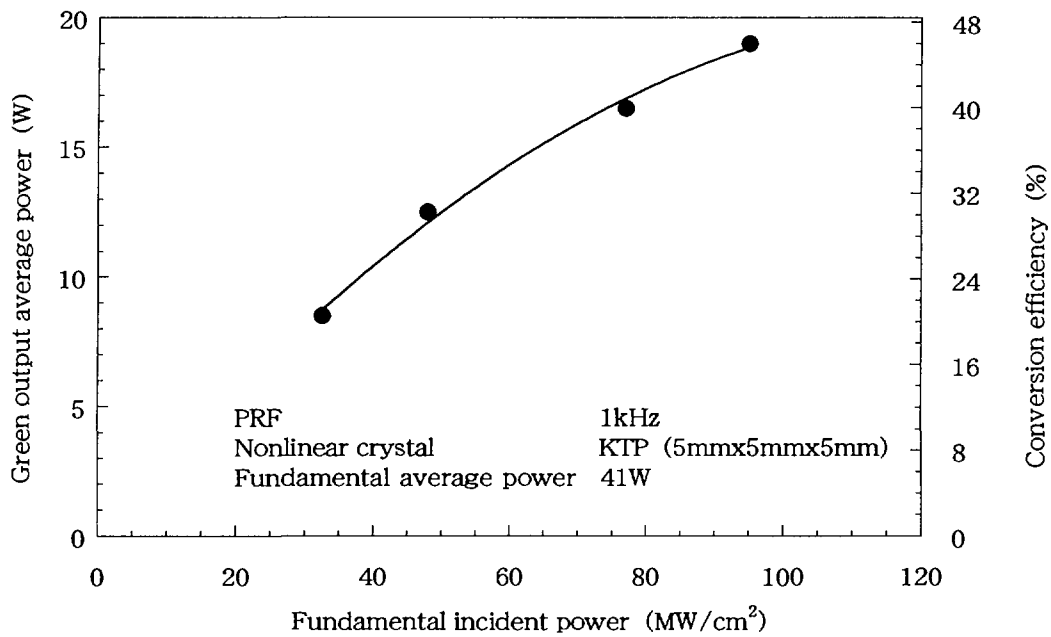


Fig.12 Green average output power and conversion efficiency vs. incident power

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	
光強度	ルーメン	lm	cd·sr
照射線量	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
バール	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm = 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 (=1 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)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °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 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 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

波長可変レーザー励起用全固体グリーンレーザーの開発

Ⅰ(Ⅱ)ダブルパス増幅システムの開発Ⅰ