繰り返しパルスレーザー用 誘導ブリルアン散乱位相共役鏡の熱効果

吉田 英次, 大久保 彰律*, 藤田 尚徳, 中塚 正大

大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

*パイオニア(株) 総合研究所 (〒350-2288 埼玉県鶴ヶ島市富士見6-1-1)

Thermally Induced Effects of Stimulated Brillouin Scattering via Phase-Conjugation Mirror for Repetitive Laser Pulse

Hidetsugu YOSHIDA, Akinori OHKUBO,* Hisanori FUJITA, and Masahiro NAKATSUKA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

**Corporate Research, Pioneer Corporation, 6-1-1 Fujimi, Tsurugashima-shi, Saitama 350-2288*

(Received October 17, 2000)

We designed and demonstrated two new schemes to improve the performance of stimulated Brillouin scattering (SBS) cells for a high average power laser. By introducing a lamellar flow cell, thermally induced defocusing and convection via laser light absorption were removed. By inserting a rotational wedge plate, the spot was rotated in time and locate heat sources were diffused. As a result, the SBS reflectivity and fidelity were improved dramatically with acetone. Using the cell, the operational power can be improved by as much as several hundred times the closed-type. If a medium with a small absorption coefficient such as heavy fluorocarbons is used, the phase conjugate performance enables the incident power to reach a kW level.

Key Words: High average power laser, Phase conjugation mirror, Stimulated Brillouin scattering (SBS), Thermal defocusing, Liquid circulation

1. はじめに

近年, LD励起固体レーザーの研究が急激に進展し, 数kWレベルの高平均出力で効率約20%が達成された¹⁾. しかしながら, LD励起固体レーザーの高出力動作においても, LD光の媒質への熱負荷の影響によりビーム品質の低下は避けられず, 波面補償光学システムの採用は必要不可欠である. 代表的な波面補償光学素子には, (1)反射鏡やレンズ等の表面形状をアクチュエーターを用いて機械的に制御し, 波面の位相を補正するアダプティブオプティクス²⁾と, (2)入射電界が非線形媒質(気体, 液体, 固体等)中で誘起する三次の非線形現象により, 入射電界の全空間位相を瞬時に反転し, 共役波面を発生する誘導ブリルアン散乱(以下SBS)³⁾による方法がある. アダプティブオプティクス法は, 高速のフィードバック制御が必要であり, システムコストが高価になり, 小型レーザー装置にはあまり使用されていない. 補償光学と位相共役に関しては, J. Roddier⁴⁾, 植田⁵⁾とH. Wang⁶⁾らの解説記事が報告されている.

一方, SBSによる位相共役光の発生は高ピークレーザーを励起光とし, レーザー光をSBS媒質に集光するだけで容易に高い反射率を得ることが可能である. しかしながら, レーザー強度の増加により(1)自己集束, (2)レーザー誘起絶縁破壊, (3)誘導ラマン散乱および(4)共役波以外の雑音

となる非共役波の増幅等の不要な現象, (5)SBS媒質の熱光学効果などの種々の問題により励起入力制限される. SBS媒質の熱光学効果によるビーム忠実度の低下に関しては, メタンガスを用いたOttuschらによる実験⁷⁾, およびAndreevらによる高繰り返しレーザーにおける液体媒質について報告⁸⁾があるが, これらの報告では, 忠実度を向上させる方法については十分な検討を行っていない.

本論文では, 高平均出力の励起レーザー光に伴うSBS液体媒質内での相互作用領域の局所的熱発生による熱拡散効果を詳細に調べ, 高平均出力レーザー用SBS位相共役波特性を向上させる方法を実験的に検討した結果について述べる.

2. 封じ切り型液体SBS媒質の選定基準

高平均入力動作において, 液体SBS位相共役鏡内の集光点付近では, 局所的なレーザー光吸収による温度勾配が発生する. このため, 集光点付近は熱的ビーム拡散が発生するため集光強度が低下し, SBS反射率が低下する⁹⁾. また, 液体の温度差による対流により, セル内の集光スポットは乱れて分離するため, 同一位相から共役波増幅ができずビーム忠実度が低下する¹⁰⁾. よって, 高繰り返し動作用封じ切り型SBSセルでは, 励起波長での吸収係数が小さく, 熱

拡散時間の速い媒質を選択する必要がある。

屈折率温度依存係数 dn/dT が負の媒質に単一横モードパルスを入射した場合、熱レンズ効果は、回折限界集光スポット径内のエネルギー強度が $1/2$ に減少する熱的ビーム発散の臨界エネルギー E_{cr} によって特徴づけられる。臨界エネルギーは、

$$E_{cr} = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot C}{\left| \frac{dn}{dT} \right| \cdot \alpha \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2} \quad (1)$$

で表される⁸⁾。ここに、 λ はレーザー波長、 ρ , C , α , T , n はそれぞれ媒質の密度、比熱、吸収係数、温度および屈折率である。

液体媒質を用いてSBS反射を発生させるには、入射パワー P_{in} はSBS発生閾値パワー P_{th} を越えなければならない。一方、回折限界の発散角の入射レーザー光(パルス幅 τ_L)をSBS媒質に集光した時、集光ウェストを通過する透過エネルギー E_{tr} は、SBS閾値パワーとパルス幅の積 $P_{th} \cdot \tau_L$ となる。繰り返し数 f でのパルス列の合計時間 $\tau_L \cdot f$ が大きい場合、集光ウェストを透過する全エネルギー $E_{tr}(=P_{th} \cdot \tau_L \cdot f)$ は E_{cr} を越えることになる。この現象は $\tau_L \cdot f$ が、臨界パルス幅 $\tau_{cr} = E_{cr}/P_{th}$ を越えた時に発生する。例えば、臨界エネルギー $E_{cr} = 10J$, SBS発生閾値 $P_{th} = 100kW$ の液体を用いた時、臨界パルス幅 τ_{cr} は $100\mu s$ となり、パルス幅 $\tau_p = 20ns$ での繰り返し周波数 f は $5kHz$ まで可能である。また、(1)式における液体の熱物性値 A は、ほぼ同じであり、(1)より臨界パルス幅 $\tau_{cr}[s]$ は

$$\tau_{cr} = \frac{E_{cr}}{P_{th}} = \frac{A}{\alpha \cdot P_{th}} \quad (2)$$

と表すことができる。例えば、フッリナートFC-75の場合、励起波長 $1.06\mu m$ 、密度 $1.77(g/cm^3)$ 、比熱 $1.05(J/gK)$ 、 $dn/dT = -4.2 \times 10^{-4}(cm^{-1})$ から、熱物性値 $A = 7.9 \times 10^{-6}(J/cm)$ である。四塩化物やアセトンも $6 \times 10^{-6}(J/cm)$ 程度である。発生閾値パワー P_{th} はSBS利得係数によって異なるが、液体の場合 $100kW$ 程度であり、臨界パルス時間は吸収係数 α に大きく依存する。例えば、吸収係数 $\alpha = 1 \times 10^{-6}cm^{-1}$ 、熱物性値 $A = 5 \times 10^{-6}(J/cm)$ の液体の臨界パルス時間 τ_{cr} は $60\mu s$ となる。

繰り返しレーザー光によるSBSセル内の強い熱光学効果の防止を考慮する場合、集光点のウェストでの熱拡散時間 τ_d が $\tau_{cr}/f \cdot \tau_L$ 値より小さい時は、熱的発散は無視できる。熱拡散時間 τ_d はレンズの焦点スポットの2乗 $d^2(cm^2)$ と熱拡散率 $D(cm^2/s)$ によって $\tau_d = d^2/D$ で表される。例えば、波長 $1.06\mu m$ の回折限界ビーム(口径 $10mm$, 焦点距離 $f = 100mm$)をFC-75液体に集光した場合、 $d^2 = 1.6 \times 10^{-6}cm^2$, $D = 3.7 \times 10^{-4}cm^2/s$ であり、熱拡散時間 τ_d は $4.3ms$ である。よって、kHz程度までの繰り返しを考えた高平均出力用SBS位相共役鏡は、短い焦点距離レンズの使用と吸収係数の小さく、熱拡散時間の短い媒質の選択により可能である。代表的な液体SBS媒質の熱拡散率と臨界エネルギーの関係をFig.1に示す。高平均出力用液体SBS媒質としては、臨界エネルギーの大きい CCl_4 , $GeCl_4$, $TiCl_4$, $SiCl_4$, $SnCl_4$ 等の四塩化系化合物が優れている。しかしながら、取り扱いに注意を要し、不

Fig.1 Thermal critical energy of several liquid media as a function of a ratio of the thermal diffusion coefficient, D to an absorption coefficient, α .

純物除去が難しく、含有不純物等によりレーザーブレイクダウンが発生すると、金属元素のイオン化によって吸収が増加し、現状では臨界エネルギーまでの動作は困難である。一方、フロン系化合物の中で $C_2Cl_3F_3$ (Freon113)は四塩化系化合物と同等のSBS性能を有するが、大気オゾン層破壊から使用が規制され、現在は販売されていない。フッ化炭素系化合物であるフッリナートFC-72,75(3M商品名)¹¹⁻¹³⁾は、紫外から赤外域まで低吸収のため臨界エネルギーが高く、波長 $1\mu m$ 、パルス幅 $1ns$ で $100GW/cm^2$ 以上の高レーザー耐力をもち、化学的に非常に安定で取り扱い上安全な液体である。

3. 液体SBS媒質の熱光学効果低減の実験

3.1 封じ切りセルの熱光学効果

SBS媒質のレーザー光吸収熱により集光点での屈折率変化が生じた場合、反射率の低下と共に反射ビーム忠実度は大幅に低下する。SBS媒質の熱光学効果をFig.2の実験配置によって測定した。SBSセル入射側に設置された $f = 150mm$ の集光レンズを通過したHe-Neレーザープローブ光は、出射側の $f = 150mm$ のレンズで平行ビームとなる。セルを透過した励起YAGレーザー光はダイクロイックミラー($1.06\mu m$ 光反射、 $0.63\mu m$ 光透過)により分離される。励起レーザー光と同一光路上にアライメントされたHe-Neレーザー光の集光点像を $f = 1000mm$ の集光レンズを用いて、CCDカメラによって観測した。励起光によるSBSセル内の集光点付近のスポット径の増加や分離等の変化は、SBS反射率やビーム忠実度を大幅に低下することが観測されており⁹⁾、セル内の集光点付近の遠視野像を観測した。プローブレーザーには、測定の容易性から連続発振のHe-Neレーザーを使用した。SBS液体の屈折率の波長分散効果は小さく(励起レーザー波長 $1.06\mu m$ とプローブレーザー波長 $0.63\mu m$)、光吸収による屈折率変化量の方が大きいため、プローブ光による観測は問題とならない。励起レーザーは、ノーマルパルス発振YAGレーザー(最大繰り返し周波数 $50Hz$, 出力 $30W$)であり、SBS効果による反射はみら

Fig.2 Experimental layout for the laser induced thermal effect measurement.

れず、熱源として用いた。ダイクロイックミラーにより分離観測したSBSセルからのYAGレーザー光の透過パワーから、媒質による吸収パワーを求めた。SBS媒質には、波長 $1.06\mu\text{m}$ での吸収係数が $1 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ と大きく、熱光学効果が顕著にみられるアセトンを用いた。

Fig.3は励起レーザーエネルギー 80mJ/pulse 、繰り返し周波数 3Hz の時の透過He-Neレーザー光の代表的な遠視野像の時間変化を示す。SBSセルへの励起光がない場合、 $f = 1000 \text{mm}$ のレンズで集光されたHe-Neレーザー光のスポット径は約 $200\mu\text{m}$ ($1/e^2$ 径)である。液体媒質の温度に対する屈折率係数 dn/dT 値は負であるので、レーザー光吸収による放物線型温度分布が発生すると、負の屈折率分布が生じ凹レンズ特性を示す。励起開始から約2秒後間は熱レンズ効果により同心円上にスポット径は大きくなるが、セル内の集光点とその周辺部の温度差により対流が生じ、円形状から楕円状になった。9秒以上では、対流の結果、ビーム変形は緩和され、スポット形状は変化せず定常状態となった。

繰り返し周波数3, 5, 10Hz 時の吸収パワーに対する定常状態でのスポット径の変化をFig.4に示す。繰り返し周波数3, 5Hz 時の吸収パワー 100mW ではスポット径は、初期径 $200\mu\text{m}$ に比べ最大約15倍の 3mm 径まで増加し、集光強度は約225倍も低下したことになる。繰り返し周波数 10Hz 時は、 3.5mm 程度まで増加した。単一ショット時にはHe-Ne光の初期スポット径まで回復する緩和時間は 230ms 程度であり、繰り返し周波数 4Hz 以上になると次のパルス入射時までに初期径まで回復しないことになる。よって、集光付近の乱れた媒質内に熱拡散時間より速く、繰り返しパルス光が入射すると、繰り返し周波数が増加するにつれて熱的効果が顕著となり、スポット径が増加する。

3.2 集光点の移動による熱光学効果の低減

前節で述べた封じ切りSBSセルでは、媒質の熱拡散時間や臨界エネルギーによって入射パワーが制限される。熱

Fig.3 Far-field pattern of defocused He-Ne laser beam.

Input energy of 80mJ/pulse and repetition rate of 3Hz were used.

Fig.4 Spot size of far-field fidelity as a function of an absorbed power for the different repetition rate.

光学効果を低減する方法として、集光レンズ前に回転ウエッジ板を挿入し、入射パルス毎に集光点位置を移動させる概念図をFig.5に示す。入射レーザー光は、ウエッジ板の回転により集光レンズへの入射角が変化するため、集光点位置を移動させることができる。

実験配置図はFig.2と同様で、集光レンズ前に回転ウエッジ板を挿入することにより、ビーム集光位置をパルス毎に変化させ、熱光学効果の低減実験を行った。ウエッジ板は、口径 60mm 、ウエッジ角 6° のBK-7基板を用い、レーザー光に対して約 45° 傾けた。回転モーター軸はウエッジ板の中心に固定し、回転速度は 10rpm および 60rpm とした。集光スポットの移動半径は 5.3mm (円周距離 33mm)である。回転速度 60rpm の場合の集光点の移動線速度は約 33mm/s となり、繰り返し周波数 10Hz 動作でのパルス間の移動距離は 3.3mm である。この値はスポット径 ($200\mu\text{m}$) の16倍にあたる。

CCDカメラによるHe-Ne光の遠視野像測定結果をFig.6に示す。Fig.6(a)は、励起光を入射しない時、(b)はウエッジ

Fig.5 Schematic layout of rotational wedge plate for focal-point displacement.

Fig.6 Far-field pattern of defocused He-Ne laser beam with the wedge-plate rotation method.

板を停止し励起光(入射エネルギー80mJ/パルス, 繰り返し周波数10Hz)を入射した時, (c)はウエッジ板を60rpmで回転させた結果である. Fig.6(b)は, Fig.3の実験結果と同様に熱拡散効果により, スポット径は下方方向に広がり, 対流の影響により半円形状となった. Fig.6(c)ではプローブ光の円弧軌跡の一部を観測したとき, 入射直後のプローブ光の線幅(縦方向のスポット幅)は, 初期スポット幅200μmに比べ約350μmまで増加するが, 約12msで元のスポット幅まで回復することから, 約83Hzまで動作可能である.

平均吸収パワーに対する最大スポット径の変化をFig.7に示す. ウエッジ板を停止時のHe-Ne光の遠視野像は, 最大吸収パワー約170mWの時, X軸方向のスポット径は, 初期径約200μmの約20.5倍の4.1mmまで増加した. 一方, ウエッジ板を60rpmで回転した場合, 最大吸収パワー約170mWの時のスポット径は約1.7倍の約350μmまで低減した. Y軸方向の歪みが小さく出ているのは, 対流効果であって, ビームパターンの半分は強い屈折を受けて受光されていない.

ウエッジ板の回転により, 熱歪効果を大幅に抑制することが確認できたので, 単一縦モードQスイッチYAGレーザー光を用いて, 回転ウエッジ板によるSBS反射率特性の改善実験を行った. SBS励起用レーザー光は, パルス幅

Fig.7 Spot size of far-field fidelity as a function of absorbed power with the wedge-plate rotation.

25ns, 出力パルスエネルギー約10mJで最大繰り返し周波数45Hz(平均入力パワー450mW)である. Fig.8に入射パルスの繰り返し周波数に対するSBS反射率特性を示す. 単一ショット時のアセトンのSBS反射率は入射エネルギー10mJでは53%であった. ウエッジ板の回転を停止した場合, SBS反射率は繰り返し周波数2Hzから急激に低下し, 6Hz以上ではSBS反射は観測されなかった.

一方, ウエッジ板の回転数10rpmの場合, 繰り返し周波数25Hz以上ではSBS反射は観測されなかった. 初期反射率を53%とすると, ウエッジ板の回転停止時および10rpmと60rpmの繰り返し周波数に対する反射率の低下率は, それぞれ9.5, 2.0, 0.32%/Hzとなり, 回転数60rpmでのSBS反射率が1割低下する繰り返し周波数は, 30Hzと予想される. 回転数と反射率低下率の積は約 $1.95 \pm 0.02 \text{ rpm} \cdot \%/\text{Hz}$ 一定であった. 回転数1000rpmでの低下率は $1.95 \times 10^{-3} \%/\text{Hz}$ と予想され, 反射率の相対値で10%低下を使用限界とすると, 270Hz程度までの繰り返し入力に有効である. 熱緩和時間が12ms(80mJ入力)であると, それ以内に次のパルスが入ると熱蓄積効果が出る. 即ち, 83Hz以上でみられる.

Fig.9は, レーザーの繰り返し周波数を変えて計測した集光点のパルス移動距離に対するSBS反射率特性を示す. 集

Fig.8 SBS reflectivity as a function of repetition rate for the different rotation speed.

Fig.9 SBS reflectivity as a function of moving distance between focal spots.

光点の移動距離が約2.5mm以上あれば反射率は低下しない事から、回転数を1000rpmで動作させた場合、移動速度は約523mm/sであり、反射率は約200Hzまでは一定であると考えられる。よって、集光スポットの移動半径を拡大し、回転数を増加する事によりkHzオーダーのSBS位相共役鏡は可能であることがわかる。ただし、パルス位置が1回転した時に前にパルスの入射した位置と一致する様な場合は、蓄積効果により特性劣化が生じるので注意が必要である。

3.3 液体循環型SBSセルによる熱光学効果の低減

繰り返しレーザーによるSBS液体の熱蓄積効果にも対応できるフロー型セルを開発した。循環可能なSBSセルの概念図をFig.10に示す。ガラス製セルの内径20mm、長さ200mm、窓から集光点までの距離は約95mmであり、集光部に位置するセル中央部は、内径は約2mmまで狭めている。液流による集光位置の流速は、絞らない形状に比べ約100倍以上速くなるため、効果的に熱除去が可能となる。しかしながら、25cc/min.以上の流量では、媒質が細いセル中央部を通過した後、内径の広がる部分で、キャビテーション現象が生じた。このため、液体の流量は、3.6, 14.4, 23cc/secについての集光スポット径の変化を測定した。励起用レーザーを繰り返し周波数30Hzで動作させた場合、パルス間の流量は、0.12, 0.48, 0.77cc/pulseである。試験液体媒質には、吸収係数の大きいアセトンを用いた。

各流量での吸収パワーに対するスポット径の変化を、封じ切りセル、ウエッジ板回転法と対比した結果も合わせてFig.11に示す。流量0.12cc/pulseの場合においても、ウエッジ板回転法(60rpm)に比べ熱拡散効果を抑制できた。流量0.77cc/pulseの場合、吸収パワー約3Wからスポット径の増加がみられた。スポット強度が1/2となる吸収パワーから、各流量0.12と0.77cc/pulseの臨界パワーは、約1Wと4Wである。流量0.77cc/pulseの場合、SBS反射率90%以上の時、入射パワーは約40Wまで可能である。熱除去を効果的に行うには、繰り返しパルス間に温度上昇した媒質を押し流す必要

Fig.10 Optical layout of PC mirror with flowing liquid.

Fig.11 Far-field spot size as a function of absorbed power for the different circulation speed.

がある。今回、試作したセルの相互作用長(レーリー長の約3倍)と集光部の内径から求めた体積は約0.06ccであり、繰り返し周波数30Hz時に必要な流量は、 $0.06\text{cc} \times 30\text{Hz} = 1.8\text{cc/sec}$ である。流量0.77cc/pulseでの最大繰り返し周波数は、 $23\text{cc}/0.06\text{cc} = 383\text{Hz}$ と予想される。ノズル部の形状を最適化し、キャビテーションを防止することによってkHz級の動作は容易である。

4. 高平均出力用液体 SBS 位相共役鏡

本実験では、高平均出力用SBS位相共役鏡の熱吸収の影響を観測するため、波長 $1\mu\text{m}$ で吸収係数の大きいアセトンを用いた。実用的なSBS位相共役鏡には、取り扱いが容易で信頼性が高く、吸収が小さいFC化合物が有効である。アセトンおよびFC-75を同一形状セル内(内径25mm、長さ300mm)に封入して測定した入射パワーおよび吸収パワーに対するスポット径変化量の比較結果をFig.12に示す。アセトンでは入力約40mWからスポット径の変化が観測されたが、FC-75は入力20W程度では、スポット径は変わらなかった。吸収パワーの比較結果から、アセトンの臨界パワーは約6mWであり、吸収係数と熱物性値から求めた臨界エネルギー約6mJと良く一致している。一方、(1)式より求

Fig.12 Far-field spot size as a function of input power for acetone and FC-75 liquids.

Table 1 Estimate of critical incident power to acetone and FC-75 in three types of SBS cell.
@ Absorption coefficient at 1- μ m wavelength; 2×10^{-2} (cm⁻¹) for acetone
 3×10^{-6} (cm⁻¹) for FC-75

Optical layout	SBS materials			
	Acetone		Heavy fluorocarbon (FC-75)	
SBS reflectivity	50 %	90 %	50 %	90 %
Closed cell	20 mW	100 mW	10 W	50 W
Rotational wedge plate (60 rpm)	200 mW	1 W	100 W	500 W
Circulation type (0.77 cc/p)	8 W	40 W	4 kW	20 kW

めたFC-75の全臨界エネルギーは約5J(5W)である。高反射率動作のSBS位相共役鏡の場合、SBSセルの透過パワーが臨界パワーを越えない限り、優れたSBS特性が期待できる。SBS反射率90%以上では、入射パワー約50Wまで可能である。

アセトンによる熱光学効果低減実験結果から、FC-75を用いた場合は同様の集光光学配置により、数kWレベルのレーザー光に適用できることがわかった。Table 1にアセトンとFC-75について、各種光学配置のSBS位相共役鏡での可能な入射パワーをまとめた。高精度のろ過を施したFC-75とダストフリーの封じ切りセルは、1J級、数10Hz動作の市販Qスイッチレーザーに十分使用可能である^{14,15)}。また、液体循環型SBSセルにおける入射可能パワーは2kW以上であり、産業応用パルスレーザーレベルの殆どに利用可能である。SBS反射率90%以上が達成できれば、入射可能パワーは約20kWである。

5. まとめ

高平均出力レーザー光に伴うSBS液体媒質内での相互作用領域の局所的熱発生によるSBS反射率と忠実度低下の原因を詳細に調べ、SBS特性を向上させる方法を実験的に検討した結果について報告した。

SBS液体の励起光による吸収の熱光学効果を軽減する方法として、(1)ウエッジ回転板による集光点の移動法、(2)循環フロー型セル法について実験的検討を行った。その

結果、封じ切りセルに比べ熱拡散効果を大幅に軽減できることを確認した。低吸収媒質と循環フロー型セル法の採用により、数kW以上のレーザーシステムに適用可能である。

参考文献

- 1) N. W. Carlson and L. M. Marabella: レーザー学会研究会報告 **RTM-96-31** (1996).
- 2) R. K. Tyson: *Principles of Adaptive Optics* (Academic press, Boston, 1991).
- 3) B. Y. Zeldovich: *Principles of phase conjugation*, Vol. **142** (Spring Verg, 1985).
- 4) F. J. Roddier: レーザー研究 **27** (1999) 78.
- 5) 植田 憲一: レーザー研究 **27** (1999) 84.
- 6) H. Wang: レーザー研究 **27** (1999) 89.
- 7) J. J. Ottusch and D. A. Rockwell: Opt. Lett. **16** (1991) 369.
- 8) N. F. Andreev, E. Khazanov, and G. E. Pasmanik: IEEE Quantum. Electron **28** (1992) 330.
- 9) 吉田 英次, 藤田 尚徳, 吉田 国雄, 山中 龍彦: 光学 **26** (1996) 31.
- 10) M. Lefebvre, S. Pfeifer, and R. Johnson: J. Opt. Soc. Am. **B.9** (1992) 121.
- 11) H. Yoshida, V. Kmetik, H. Fujita, M. Nakatsuka, T. Yamanaka, and K. Yoshida: Appl. Opt. **36** (1997) 3739.
- 12) 吉田 英次, 吉田 国雄: レーザー研究 **22** (1994) 689.
- 13) 吉田 英次, 中塚 正大: レーザー研究 **27** (1999) 95.
- 14) 吉田 英次, 中井 光男, 藤田 尚徳, 宮永 憲明, 中塚 正大, 富永 英一, 藤野 正志: レーザー学会学術講演会第20回年次大会講演予稿集 20aI4 (2000) 30.
- 15) 天野 壮, 望月 孝晏, 宮本 修治, 安東 愛之輔, 細野 和彦: レーザー学会学術講演会第20回年次大会講演予稿集 20aI10 (2000) 33.