

SBS 位相共役鏡の熱的影響の改善

吉田 英次*・藤田 尚徳*・吉田 国雄**・山中 龍彦*

*大阪大学レーザー核融合研究センター 〒565 吹田市山田丘 2-6

**大阪工業大学工学部電子工学科 〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1

Improvement of Thermal Effects in SBS Phase-Conjugate Mirror

Hidetsugu YOSHIDA,* Hisanori FUJITA,* Kunio YOSHIDA** and Tatsuhiko YAMANAKA*

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

**Department of Electronic Engineering, Osaka Institute of Technology, 5-16-1, Ohmiya, Asahi-ku, Osaka 535

Phase conjugation via stimulated Brillouin scattering (SBS) is very important to improve the thermally induced wavefront distortion in solid-state lasers. Under high repetition operation, we show that the best solution for improvement in the fidelity of phase conjugate mirror is the adoption of an SBS cell having a short length and circulation of a liquid.

1. まえがき

位相共役鏡を発生させる物理過程としては、誘導散乱¹⁾やフォトリラクティブ効果²⁾等がある。筆者らは高出力レーザー用の波面補正として、誘導ブリルアン散乱 (SBS)³⁾による位相共役鏡の開発を行ってきた⁴⁻⁶⁾。これは、入射電界が非線形媒質（ガス、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方法である。この位相共役効果により、空間波面の形が同じで伝搬方向が完全に逆になった波を発生できる。この特性を利用すれば、レーザー光が光学的に不均質な媒質を伝搬する場合に発生する波面収差を補正できるため、画期的ともいえる方法である。この方法は、高出力レーザー增幅器で誘起される波面の乱れの補正⁷⁻¹⁰⁾やマルチモードファイバー画像処理¹¹⁾におけるひずみ補正等への応用が期待されている。

SBS による位相共役は高ピークリーザーを励起光とし、レンズを用いてレーザー光を 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伴って、(1)自己集束、(2)スパーキングやレーザーブレークダウン、(3)誘導ランダム散乱および(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が発生する。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¹²⁾、および Andreev らによる高繰返しレーザーにおける液体媒質について報告⁷⁾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 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述べる。

2. 実験方法

Fig. 1 に SBS 特性の実験配置図を示す。実験に用いた励起レーザー光は、単一縦モード（スペクトル幅 0.008 cm^{-1} 以上）の TEM₀₀ モード Q スイッチ YAG レーザー（発振波長 $1.064 \mu\text{m}$ ）で、パルス幅 8 ns の準ガウス形パルス波形である。励起レーザー光は繰返し動作 2, 5, 10 Hz で、1 パルス当りの最大出力エネルギーは約 250 mJ、最大平均出力は約 2.5 W である。SBS セルへの入射エネルギー強度は、 $\lambda/2$ 板と偏光子の組合せで調整した。この方法は、ビームの空間強度分布および発散角を変化させることなく、励起エネルギーを可変できるという特徴がある。本実験で用いる SBS 用液体媒質としては、波長 $1 \mu\text{m}$ での吸収係数が 10^3 程度異なるア

セトンとフロリナート (FC-75) を選んだ。アセトンはブリルアン利得係数 ($g=10\sim15 \text{ cm/GW}$) は高く、 $1.06 \mu\text{m}$ での吸収係数 ($\alpha=1.2\times10^{-2}/\text{cm}$) は比較的大きい。一方、フロリナートの利得係数 ($g=4\sim6 \text{ cm/GW}$) はアセトンより小さいが、吸収係数 ($\alpha=1\times10^{-5}/\text{cm}$ 以下) は 3 術ほど小さい。SBS セルはガラス製で、セルの入出射窓には $1.06 \mu\text{m}$ 用反射防止膜を施した。 p 偏光の励起レーザー光は偏光子と $\lambda/4$ 板を通して右回り円偏光のレーザー光は焦点距離 100 mm の単レンズで SBS セルに集光される。SBS 反射光は入射方向からみて右回りの円偏光となって再び $\lambda/4$ 板を通過すると s 偏光となり、偏光子によって反射され、検出器に入射する。SBS 反射光は通常の反射鏡と同様の偏光特性をもつため偏光保持位相共役鏡となっていないが、入射空間波面に対しては位相共役鏡となっているので、偏光子によって 90° 回転した反射光

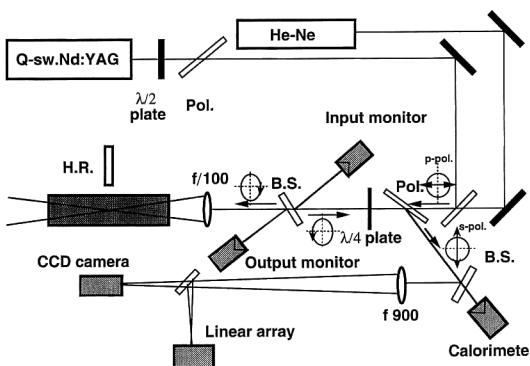


Fig. 1. Experimental arrangement of SBS phase conjugate mirror.

を位相共役波として取り出すことができる⁷⁾。SBS 媒質への入射および反射レーザーパルス波形はバイプラーナーホトチュープにより測定した。反射エネルギーはカロリーメーターで測定した。近視野像はポラロイドフィルムにより、遠視野像は焦点距離 900 mm の単レンズの集光スポット像を CCD カメラおよびリニアアレイ型 pin ダイオードを用いて測定した。SBS 媒質の反射率は、反射率 99.8% の誘電体多層膜ミラーを校正用として用い、入反射波形および反射エネルギー比から求めた。位相共役光の忠実度は、同様に誘電体ミラーによって反射された励起ビームの遠視野像およびスポット径 (約 $650 \mu\text{m}$) を基準として、遠視野像の変化から評価した。

3. 実験結果

3.1 吸収の異なる SBS 媒質での反射率と忠実度の測定

長さ 150 mm の同一セルを用い、吸収係数の異なる 2 種類の SBS 媒質 (フロリナートおよびアセトン) の反射率特性およびビーム忠実度を測定した。

3.1.1 フロリナート (FC-75)

Fig. 2 は、SBS 媒質にフロリナートを用い、(a) 励起エネルギーに対する反射率および(b) 遠視野像 (F.F.P.) のスポット径で評価したビーム忠実度の測定結果を示す。反射率特性において、繰返し $5, 10 \text{ Hz}$ での反射閾値は約 3 mJ であった。反射率は励起エネルギーの増加とともに急激に増加し、約 220 mJ (反射閾値の約 70 倍) では最大反射率約 95% が得られた。繰返し数の増加による反射率特性には変化がみられなかった。

繰返し $5, 10 \text{ Hz}$ 動作の励起エネルギーに対するビー

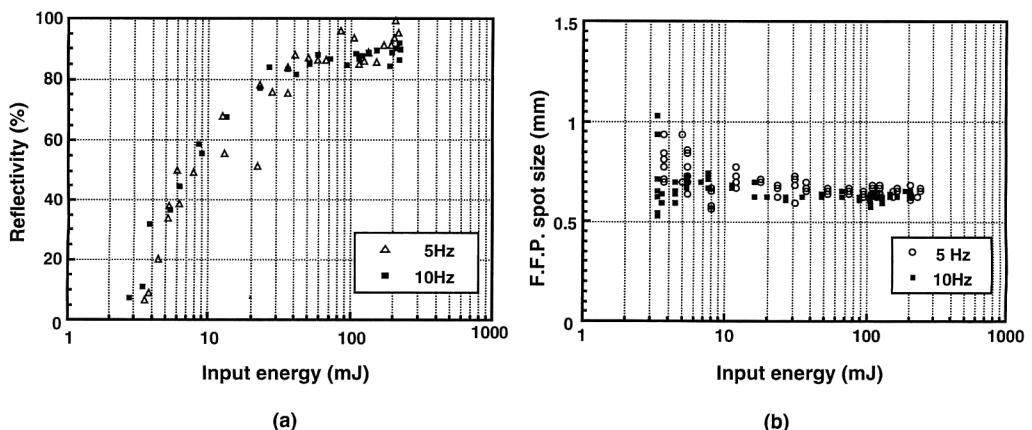


Fig. 2. Reflectivity (a) and far-field fidelity (b) characteristics of PC mirror (cell length of 150 mm including Fluorinert) for the different repetition rate.

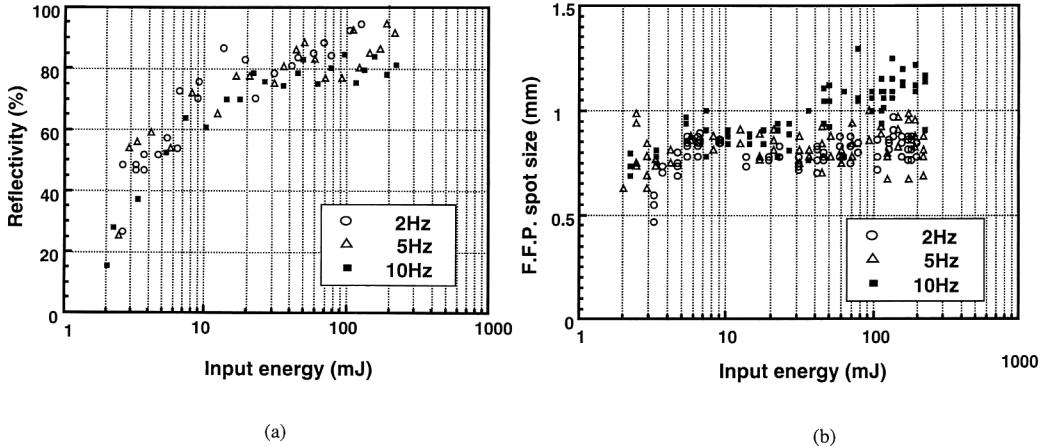


Fig. 3. Reflectivity (a) and far-field fidelity (b) characteristics of PC mirror (cell length of 150 mm including acetone) for the different repetition rate.

ムスポット径（忠実度）の変化は、反射閾値付近から閾値の約5~6倍（~20 mJ）までは不安定である。これは、反射閾値付近での励起エネルギーでは、回折格子の形成が不安定であるため、遠視野像もその影響を受けたと思われる。ミラーのスポット径より小さい径の発生は、集光スポットのSBS閾値を超える強度の部分のみが閾値を超えて回折格子を形成したためである。この現象は励起ビーム空間フィルター効果により空間モードの高周波成分は反射されず基本空間モード（回折限界）が反射されたためである。よって、反射されるSBS反射光は小さな発散角となったと思われる。この現象は閾値付近のみで観測された。20 mJ以上の励起エネルギーに対しては安定となり、ミラーでの反射スポット径約650 μm とほぼ同じスポット径になった。すなわち、励起レーザーの遠視野像を忠実に再生しており、ビーム忠実度は良好であった。

3.1.2 アセトン

Fig. 3は、フロリナートと同一実験条件でのアセトンを用いた場合の(a)反射率特性と(b)ビーム忠実度の測定結果を示す。アセトンは利得係数がフロリナートに比べて約2~3倍あることから、アセトンの反射閾値は1.5~2 mJとなった。しかしながら、アセトンの反射率特性は、フロリナートに比べて反射率勾配は低下した。また、繰返し数による反射率特性において、2 Hz動作に比べ5, 10 Hz動作での反射率勾配はさらに低下した。最大反射率は約75~95%の範囲で変動し、フロリナートの95%に比べ低い値となった。

ビーム忠実度測定において、繰返し2, 5 Hz動作で

は励起エネルギーに依存せず、スポット径約650~1000 μm の間で大きな変動が観測された。また、10 Hz動作では、励起エネルギーの増加につれてスポット径が大きくなっていた。このビーム忠実度の低下は、平均励起入力の増加によりアセトンでのレーザー光吸収量が大きくなり、吸収領域での液体の乱れがレーザービーム反射率や忠実度に悪影響を与えていると予想される。このため、次節ではSBS媒質のレーザー光吸収による熱的影響を調べ、これを軽減する方法について検討した。

3.2 SBS 媒質の熱的影響

3.2.1 単一励起パルス照射での熱の影響

前節の実験結果より、励起レーザー光をSBS媒質が吸収することによってビーム忠実度が大幅に低下することがわかった。このため、Fig. 4の実験配置でSBS媒質の熱的影響を測定した。励起レーザー光と同じ光路上にアライメントされたHe-Neレーザー光が励起レーザー光の集光付近の像を結像するようにして熱の影響を測定した。SBSセル入射側に設置された集光レンズを通過したHe-Neレーザー光は、f/100 mmのレンズで平行ビームとなり、セルを透過した励起光はダイクロイックミラー（1.06 μm 光反射、0.63 μm 光透過）により分離される。SBSセルへの励起光がない場合、f/500 mmのレンズで集光されたHe-Neレーザー光が、直径約350 μm ($1/e^2$)の円形ピンホールを透過した光量を100%とすることにより、励起光入射による透過率の変化を求めた。この方法を用いれば、励起レーザー光によってSBSセル内で屈折率変化が生じた場合、励起光透

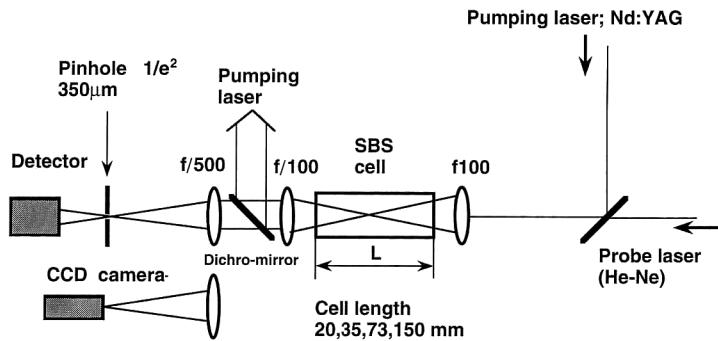


Fig. 4. Experimental layout for the laser induced thermal effects measurement.

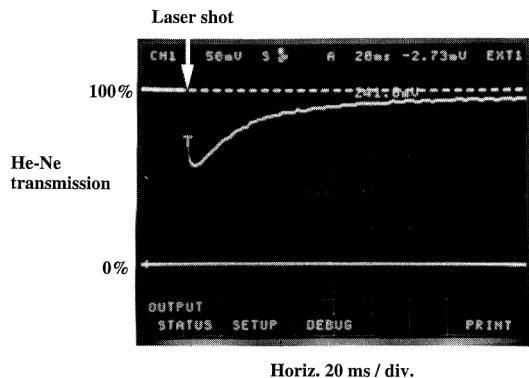


Fig. 5. Transmitted intensity of He-Ne laser beam after the YAG laser pumping.

過率の低下を容易に観測できる。Fig. 5 に单一励起パルス照射による He-Ne 光の透過率の時間変化の一例を示す。3.1 で使用したセル長 150 mm のアセトンの場合、励起エネルギーの増加とともに透過率の低下がみられ、励起エネルギー約 200 mJ のとき、最大透過率は約 50 %まで低下した。He-Ne 光の透過率の変化は SBS 反射が起きる励起エネルギーから観測された。また、励起エネルギー 200 mJ のとき、He-Ne 光が透過率 100 %まで回復する緩和時間は約 200~250 ms であった。本実験条件では、繰返し数が 4~5 Hz 以上になると透過率が回復しないことがわかった。すなわち、集光付近の乱れた SBS 媒質内に次から次へとパルスが入射する結果、レンズ集光点付近での集光性が悪くなり、入射パルスごとに集光強度分布が変化した。このように、集光付近での熱勾配により媒質の流動が生じて SBS 反射率とビーム忠実度が低下した。なお、フロリナートについても同様の実験を行ったが、透過率の低下を入射エネルギーの範囲内で観測できなかった。

3.2.2 繰返しレーザー照射での熱の影響

3.1 および 3.2 の実験結果から、励起レーザー光によって SBS 媒質内に熱的誘起された屈折率変化が反射率やビーム忠実度を低下させることがわかった。この問題点をさらに追究するため、吸収係数の大きいアセトンを SBS 媒質として用い、SBS セル長を従来の 150 mm セルから 73 mm, 35 mm, 20 mm と短くすることにより、励起光のセル内の吸収長を変化させて SBS 反射率とビーム忠実度特性を測定した。集光レンズには焦点距離 f 100 mm を用い、レンズの焦点位置が各セルの中心位置となるようにレンズとセルの距離を調整した。なお、相互作用長 $L=4\lambda F^2$ (λ : レーザー波長, F : 開口数) はレーリー長であり、セル長より十分短いことが必要である。本実験に使用した最も短いセル長 20 mm の場合、 $L=1.5$ mm となり、問題とならない。

繰返し数 10 Hz のとき、3種類の SBS セル長での He-Ne 光の透過率時間変化を Fig. 6 に示す。励起レーザー光は SBS セルへ約 30 秒間 (300 ショット) 照射した。セル長 150 mm, 73 mm を比較すると、励起エネルギー約 4~4.4 mJ (40~44 mW) のとき、透過率は各セルで約 85 %, 92 % となった。励起エネルギーを増加するとセル長による透過率低下は顕著になり、レーザー光を SBS 媒質に照射してから約 3 秒間透過率は大幅に低下した後、再び一定の透過率まで回復し、定常状態となった。励起エネルギー約 22 mJ では、セル長 150 mm に対する初期の透過率は約 5 %まで低下したのに対し、セル長 73 mm では 40 %となった。150 mm セルにおいて励起エネルギーを 22 mJ から 220 mJ まで増加したとき、一貫して約 5 %の透過率であった。73 mm セルは、約 70 mJ 以上になると約 5 %の透過率まで低下した。

He-Ne 光の透過率が一定となったとき、励起レーザー光と同一光路での He-Ne 光のスポット像を CCD カ

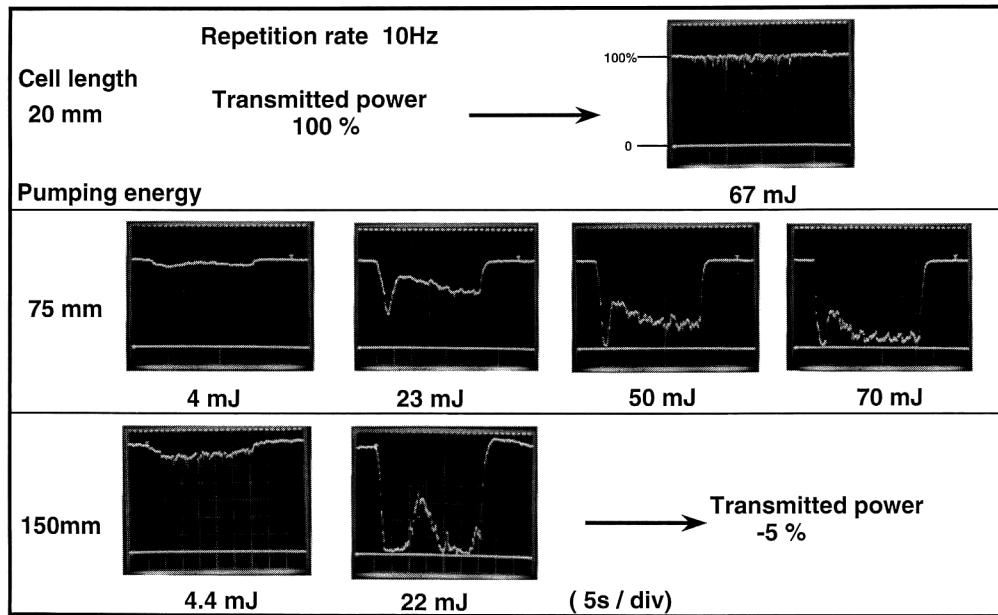


Fig. 6. Transmitted intensity of He-Ne laser beam as a function of the cell length at repetition rate of 10 Hz.

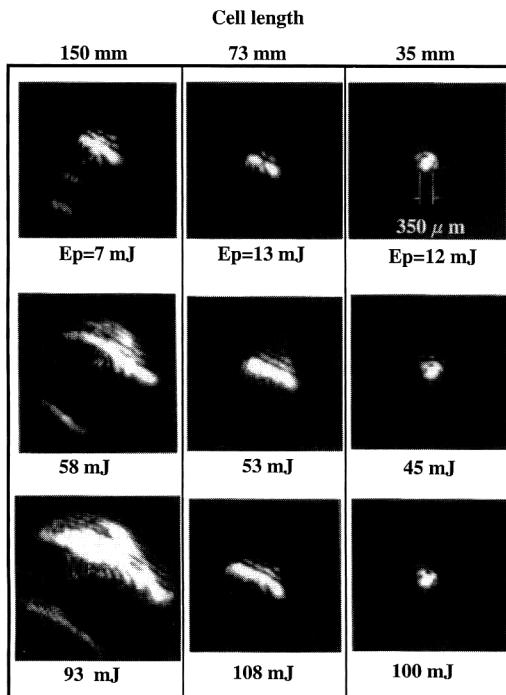


Fig. 7. Far-field pattern of defocusing He-Ne laser beam as a function of the cell length.

メラで測定した結果を Fig. 7 に示す。SBS セル長 150, 73, 35 mm において励起エネルギーの増加によるスポット像の変化を観測した。セル長が 35 mm のとき,

励起エネルギーを最大 100 mJ まで増加したが、励起レーザー光がない場合のスポット径と同じであった。これに対して、73 mm, 150 mm 長のセルを用いた場合、励起エネルギーの増加とともにスポット像は大きく変化した。150 mm セルのとき、励起エネルギー約 7 mJ で横長の像で初期の像径の約 3 倍（最大 1 mm）となった。励起エネルギー約 93 mJ では約 11 倍 (3.9 mm) まで大きくなかった。初期のビーム位置に He-Ne 光の像は存在せず、焦点の径方向に像が拡散していることを確認した。以上から、Fig. 7 で示した透過特性において励起エネルギーが 50 mJ 以上で透過率が大幅に低下した原因を説明できる。なお、初期の CCD カメラの軸方向位置 ($f/500$ mm の焦点位置) を z 方向に前後 100 mm まで移動して結像位置を調べたところ、初期位置と同じであった。すなわち、媒質の吸収に伴う自己発散効果により、焦点付近の強度が大幅に低下したのが原因で He-Ne レーザー光の透過率が大きく低下した。

3.3 SBS セル長依存性

Fig. 8(a), (b) は SBS セル長を変化させたとき、励起エネルギー（繰返し数 10 Hz）に対する反射率特性および遠視野ビーム径（ビーム忠実度）を示す。反射率特性において、各セル長の反射閾値エネルギーは約 1.5~2 mJ となり、反射率勾配はセル長が短いほど高い効率が得られた。セル長 35 mm のときの反射率特性は、

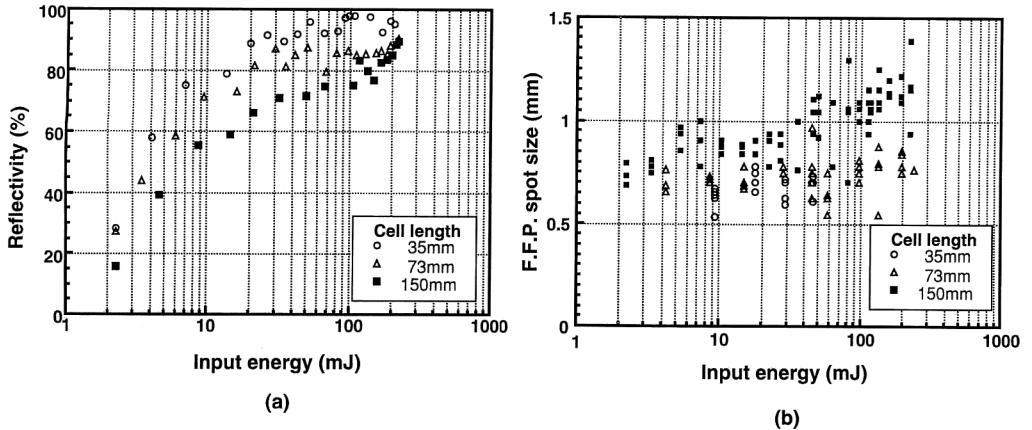


Fig. 8. (a) Reflectivity and (b) far-field fidelity characteristics of PC mirror for different SBS cell lengths.

吸収の少ないフロリナートの反射率勾配と同じであり、励起エネルギー 220 mJ のとき、反射率 95 %以上が得られた。しかしながら、セル長 73, 150 mm での最大反射率は約 90 %, 80 % となった。アセトンの吸収係数は $\alpha=1.2 \times 10^{-2}/\text{cm}$ であるため、各セルの吸収長に対する往復距離での各セルの吸収損失を計算すると、35 mm セルで 4.1 %, 73 mm で 8.4 %, 150 mm で 16 % となる。このことから、各セルの最大反射率は、それぞれ 96 %, 92 %, 84 % となる。残りの反射損失の要因としては、熱的発散による集光点付近のレーザー強度の低下やセル内での対流等が考えられる。

以上の実験結果から、今回行った励起入力ではブレークダウン等は発生していないため、反射率特性に対しては媒質の吸収損失が大きく依存することがわかった。しかし、吸収の大きい媒質を用いる場合、繰返し数の増加や励起入力が大きくなると吸収損失よりもむしろ集光ビームの熱的発散が問題となるため、セル長を短くすることが重要であることがわかった。

Fig. 8(b)のビーム忠実度（遠視野スポット径）においてセル長が長い場合、励起エネルギーが増加すると遠視野スポット径も大きくなり、ビーム性能が大幅に低下する。セル長 35 mm の場合は最大励起エネルギー 50 mJ まではスポット径が一定であった。しかし、セル長 73 mm でのスポット径は励起エネルギー 200 mJ 以上に對して高反射ミラーで反射させた場合の約 1.3 倍、150 mm セルでは約 2 倍まで増加し、ビーム忠実度が大幅に低下した。これは、Fig. 6, Fig. 7 で述べた He-Ne 光の透過率特性およびセル集光像の変化で説明できる。

以上をまとめると、熱的に乱れた集光付近の SBS 媒質に次の入射パルスを入射すると、集光スポットが完全

に分離する。このような場合、スポット径の間隔がスポット径の 3 倍以上離れると、位相がロックされず忠実度が低下することを Lefebvre らが報告している¹³⁾。本研究では、レーザー光はいくつかの位相の異なる回折格子によって反射されるため、位相はロックされず反射ビームの忠実度が低下したと考えられる。また、一般的に SBS における位相共役波の忠実度は、入射ビームの波面が乱れているほうが良好となることが実験的および理論的に示されている¹⁴⁾。報告されている実験では、空間周波数の高いアベレーターを用いて実施されているため、集光時のスペックルのスポット間隔が媒質の音速で決まる距離（約 10 μm）より小さい場合、位相はロックされる。このような場合、高い忠実度が得られるが、実験結果のように集光スポットが大きく分離すると忠実度は低下する。

3.4 SBS セルの循環

3.3 の実験結果より、SBS セル長を変化させると吸収損失および吸収による熱的影響等により、反射率特性とビーム忠実度が大幅に低下することがわかった。この吸収損失と熱的影響を軽減するために SBS セル長を短くし、液体を循環する方式を検討した。

使用したセルは長さ 50 mm の循環型で、アセトンの流速を 11 cm/s とした。Fig. 9(a) は、SBS セルでの液体循環の有無に対する反射率特性を示す。反射率特性において、セル長が 50 mm であるため吸収損失は約 6 % あり、液体の循環の有無にかかわらず同じ反射率特性となり、最大反射率 90~95 %（励起エネルギー 200 mJ）が得られ、循環によるセル内の液体の乱流等による反射率低下はみられなかった。

Fig. 9(b) に SBS 媒質の循環の有無によるビーム忠実

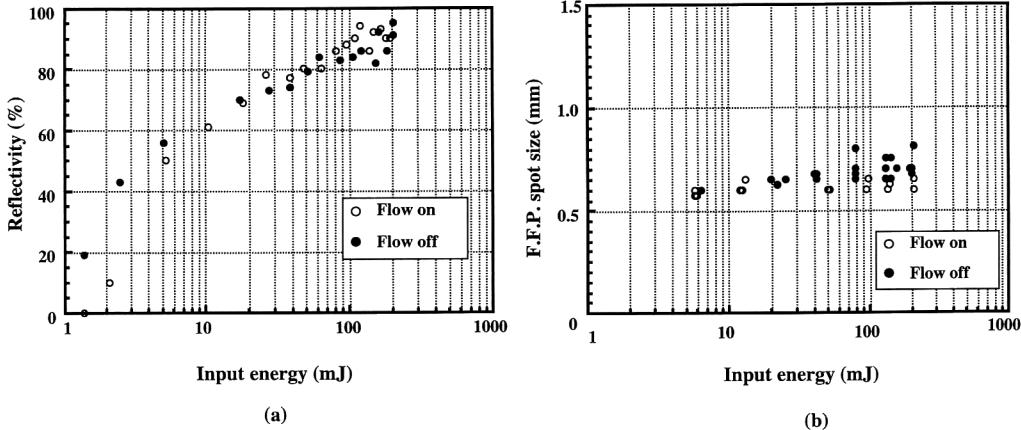


Fig. 9. (a) Reflectivity and (b) far-field fidelity characteristics of PC mirror with flowing liquid.

度の測定結果を示す。媒質を循環しないとき、セル長依存性と同様に励起入力（平均入力）を増加すると、遠視野ビームスポット径は増加する傾向がみられたが、循環を行った場合、スポット径は励起エネルギーに依存せず（最大 200 mJ）一定となった。すなわち、液体媒質の循環によって励起レーザー光による熱的影響を除去することができ、ビーム忠実度の向上を確認できた。

焦点距離 $f/100$ mm のレンズを用いた場合、レーザー光の相互作用長（1 レーリー長）は約 0.4 mm、スポット径は約 39 μm である。液体が光軸に対して垂直方向に一様に流れた場合、液体の流速を 11 cm/s とすれば、繰返し数が 10 Hz では励起レーザーパルスから次のパルスが入射するまで液体は 1.1 cm 進む。このため集光点で吸収された熱は次のパルスが入射するまでに音波が励起されるところより、十分に離れた位置まで押し流される。本実験の最大流速では、繰返し数約 2.9 kHz まで熱の影響を受けることなく動作させることができ、実験条件の 10 Hz ではまったく熱の影響を受けない。以上のように、吸収係数が問題となる液体の場合は、循環を行えば繰返しレーザー光の吸収に伴う熱の発生を大幅に軽減でき、ビーム忠実度を大幅に向上させることができる。

4. ま と め

高繰返しレーザー励起による液体を封入した SBS 媒質の反射率、遠視野ビーム忠実度特性を測定した。その結果、励起光による吸収が小さい媒質（フロリナート）の場合、反射率、忠実度は良好であったが、吸収の大きい媒質（アセトン）を用いた場合、励起光が高繰返し、高強度になると液体のゆらぎ（屈折率変化）が増加し、

反射率と忠実度が大幅に低下することを示した。

SBS 液体の励起光による吸収の熱的影響を軽減する方法として、(1)セル長の変化、(2)SBS 液体の循環の 2 つの方法について実験的検討を行った。その結果、セル長を短くして吸収損失を少なくすることにより、反射率を向上させることができた。また、液体循環はレーザー光の吸収による熱的問題をほぼ完全に除去でき、ビーム忠実度を大幅に改善できる。

今後、高繰返し、高輝度のレーザーにおいて、吸収の少ない媒質の場合でも励起光吸収による SBS 媒質の熱的問題は避けられないため、SBS セル長を短くし、SBS 液体を循環させる方法によって、出力増加に伴う SBS 媒質の熱的影響を大幅に軽減でき、ビーム忠実度を高めることが可能である。

本研究にあたり、日頃からご指導いただき中塚正大教授、中井貞雄教授に感謝いたします。

文 献

- 1) V. Wang and C. R. Giuliano: "Correction of phase aberrations via stimulated Brillouin scattering," Opt. Lett., **2** (1978) 4-6.
- 2) P. Gunter and J. P. Huignard: "Photorefractive materials and their application I: Fundamental phenomena," *Topics in Applied Physics* (Springer, Berlin, 1988).
- 3) B. Ya. Zeldovich, V. I. Popovichev, V. V. Ragul'skii and F. S. Faizullov: "Correction between the wave fronts of the reflected and exciting liquid in stimulated Mandel'shtam Brillouin scattering," ZhETF Pis, Red., **15** (1972) 160-164. (Transl., JETP Lett., **15** (1972) 109-113).
- 4) 吉田国雄、吉田英次： “YAG レーザー構成法のルネッサンスレーザー共振器の新しい試み：位相共役鏡の導入”， レーザー研究, **21** (1993) 832-838.
- 5) 吉田英次、吉田国雄、田中和夫： “位相共役鏡による固体レーザーの高性能化”， 電気学会光・量子デバイス研究会資料,

- OQD-92-9 (1992) 1-6.
- 6) H. Yoshida, K. Yoshida, T. A. Tanaka and S. Nakai: "Nd³⁺: GGG slab laser using a stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror," *CLEO '91 Tech. Digest*, **10** (1991) p. 190.
 - 7) N. F. Andreev, E. Khazanov and G. A. Pasmanik: "Applications of Brillouin to high repetition rate solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 330-341.
 - 8) C. B. Dane, L. E. Zepata, W. A. Neuman, M. A. Norton and L. A. Hackel: "Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1995) 148-163.
 - 9) D. S. Sumida, C. Jones and D. A. Rockwell: "An 8.2 J phase conjugate solid state laser coherently combining eight parallel amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 2617-2626.
 - 10) H. J. Eichler, A. Hasse and R. Menzel: "100-watt average output power 1.2 diffraction limited beam from pulsed neodymium single-rod amplifier with SBS phase conjugation," *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (1995) 1265-1269.
 - 11) S. C. Matthews and D. A. Rockwell: "Correction of phase and depolarizations in a multimode fiber at 1.064 μm with stimulated-Brillouin-scattering phase conjugation," *Opt. Lett.*, **19** (1978) 1729-1731.
 - 12) J. J. Ottusch and D. A. Rockwell: "Stimulated Brillouin scattering phase conjugation fidelity fluctuation," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 369-371.
 - 13) M. Lefebvre, S. Pfeifer and R. Johnson: "Dependence of stimulated-Brillouin-scattering phase conjugation correction on the far-field intensity distribution of the pump light," *J. Opt. Soc. Am. B*, **9** (1992) 121-131.
 - 14) A. Yariv: *Optical Electronics*, 4th ed. (HR & W, Philadelphia, 1990) p. 682.