光学ガラスによる誘導ブリルアン散乱位相共役波の発生

吉田 英次, 藤田 尚徳, 中塚 正大, 吉田 國雄 *

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)

*大阪工業大学 電子工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

Generation of Stimulated Brillouin Scattering Phase-Conjugated Wave Using Optical Glasses

Hidetsugu YOSHIDA, Hisanori FUJITA, Masahiro NAKATSUKA, and Kunio YOSHIDA*

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

**Department of Electronic Engineering, Osaka Institute of Technology*

5-16-1 Ohmiya, Asahi-ku, Osaka 535-8585

(Received February 4, 1999)

Stimulated Brillouin scattering (SBS) reflectivity and gain coefficient of bulk optical glasses, a laser glass and a fused-silica glass are measured at wavelength of 1.06 μm . The reason why optical glass has a high damage threshold at long Q-switched pulse operation is explained in terms of the SBS backward reflectance. A flint glass of SF-6 has high SBS gain compared with the gaseous or liquid materials. Fused-silica glasses are most promising as a phase conjugated SBS mirror for all solid-state high-energy lasers because of high damage threshold and their low absorbance.

Key Words: Optical glass, Phase conjugation, Stimulated Brillouin Scattering, Nonlinear refractive index, Laser-induced damage

1. はじめに

固体媒質を用いた位相共役波の発生方法には、主に誘導散乱¹⁾やフォトリフレktiv効果²⁾等があり、我々は高繰り返し、高出力固体レーザーの波面補正方法として、誘導ブリルアン散乱(以下SBS)³⁻⁵⁾による位相共役鏡を検討してきた。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同一路の逆進行により補正できるため、画期的かつ簡便である。この方法は、高出力レーザー増幅器で誘起される波面の乱れの補正⁶⁻¹⁰⁾やマルチモードファイバ画像処理におけるひずみ補正¹¹⁾等への応用が期待されている。

SBS位相共役鏡として研究されている主な媒質¹²⁾は、気体、液体が中心であり、固体媒質の研究はブリルアン散乱の分光研究による物性値評価例¹³⁾はあるが、位相共役鏡としての研究はあまりなされていない。我々は、固体媒質として初めて、取り扱いが簡単で、小型、高感度、高いレーザー耐力を持つLアルギニンリン酸(LAP)有機結晶を用いたSBS位相共役鏡を見い出した¹⁴⁻¹⁵⁾。しかしながら、LAP結晶の大型化は困難であるため、入射レーザー強度が限定される。また、高価であるため、損傷の発生を考えた場合不向きである。一方、光学ガラスは結晶に比べ安価、入手が容易であり、比較的高品質で大型形状まで加工可能である。また、光学ガラス材料のSBS利得係数の測定により、大

型レーザーに使用される大口径光学素子(窓、レンズ等)のSBS損失を推測できる。

ガスや液体を用いる場合、実的なレーザーエネルギーの上限は媒質中の不純物で決まっており、容器の洗浄技術や媒質の高精度ろ過技術等が必要とされる。固体は高品質な材料を選択すればよい。また、ガスや液体は、高い励起入力時において媒質の吸収により集光領域が加熱される。このため、集光領域とそのまわりの温度差により対流が発生し、SBS特性が低下する¹⁶⁾。一方、固体での温度分布の発生は位相共役鏡として補償するため問題とならない。しかし、ガスや液体に比べ、LAP結晶以外の固体材料のSBS利得係数は一般的に小さい。また、固体材料の問題点は、レーザー損傷が発生すると使用できなくなるため、励起入力エネルギーが制限されることである。

本報告では、非晶質光学ガラスのSBS利得係数、SBS特性およびレーザー損傷しきい値とSBS発生しきい値の関係を測定した。また、これら光学ガラスを用いたSBS位相共役鏡としての入射可能なエネルギーについて議論した。

2. 光学ガラスのSBS反射特性とレーザー損傷

2.1 実験方法

固体は一度ダメージが発生すると使用することが困難となるため、使用する媒質のレーザー耐力とSBS発生の関

係を十分把握することにより、初めて使用可能となる。

測定した光学ガラスはフリント(Flint)系ガラス5種類(LF-1, LF-5, LLF-1, KF-6とSF-6)、クラウン(Crown)系ガラス3種類(BK-7, BK-7WとFK-5)、レーザーガラス(LG-760)と熔融石英ガラスの10種類である。測定試料の大きさは25×25×30mmである。

SBS反射率特性およびレーザー損傷しきい値測定配置図をFig.1に示す。単一縦モードQスイッチYAGレーザー(波長1.06μm, パルス幅1.1nsと25ns)は、焦点距離 $f=100\text{mm}$ の単レンズを用いて集光される。入射面は、表面損傷を考慮して反射防止膜は施さず、表面から約25mmの位置に集光した。このときの集光スポット径は約150μmである。

SBS反射率特性は通常の高反射率鏡の反射率99.8%を参照値とし、光学ガラス試料の入射波形状および透過波形状から測定した。また、サンプル有無時のエネルギー透過率からも求めた。ガラス内部のレーザー損傷しきい値は、入射パルス幅1.1nsの場合、SBS発生を抑制するためSBS反射波が発生しきい値に到達する時間(光学ガラスの音響緩和時間約4~6ns)より速い立ち上がりパルス(0.5ns)を入射することにより、真の内部損傷しきい値を測定した。パルス幅25nsの場合は、サンプルのSBS反射率を考慮し、透過エネルギー強度から真の内部損傷しきい値を求めた。

2.2 SBS反射率特性

SBS特性を測定した光学ガラスは、アッペ数 ν によって、 $\nu > 55$ をクラウン系ガラス、 $\nu < 50$ をフリント系ガラスとに分類される。クラウン系ガラスであるBKおよびFK系はアッペ数が大きく、屈折率1.5(可視域)前後のガラスである。特にBK-7はレーザー用光学部品に最も広く利用され、かつ多量に生産されている高品質材料である。一方、フリント系ガラスはアッペ数の減少によってSFからF, LF, LLF, KF系へと変化する。SF-6はアッペ数約27, 屈折率1.75であり、波長分散用プリズムとして広く利用されている。

パルス幅25nsのレーザー光を各種光学ガラスに入射した時、入射エネルギーに対するSBS反射率特性結果をFig.2 (a) フリント系光学ガラス、(b) クラウン系光学ガラス、レーザーガラスおよび石英ガラス、に示す。図において大きい丸印は、レーザー損傷が発生したことを示す。Fig.2 (a)において、SF-6のSBS反射しきい値は約5mJであり、測定サンプル中で最も低い入射エネルギー12mJにおいてレーザー損傷が発生し、その時のSBS反射率は32%であった。LF-1, LF-5のSBS発生しきい値は9mJであり、入射エネルギー33~

Fig.1 Schematic of the arrangement for observation of phase-conjugation by stimulated Brillouin scattering.

Fig.2 The SBS reflectivity of optical glasses as a function of input energy at pulse width of 25 ns; (a) Crown glasses, (b) Flint glasses, fused-silica and laser glass.

34mJの時最大反射率90%が得られた。SF-6を除くフリント系ガラスはSBS反射率80%以上が得られた。一方、Fig.2 (b)において、クラウン系ガラスのSBS発生しきい値は20mJ~30mJであり、フリント系に比べ約2~3倍高い。例えば、BK-7は発生しきい値20mJ, 入射エネルギー30mJの時SBS反射率40%が得られたが、30mJ以上では損傷が発生した。リン酸系レーザーガラスLG-760は入射エネルギー45mJ以上の時最大反射率60%が得られた。石英ガラスはSBS発生しきい値15mJ, 入射エネルギー90mJの時最大反射率90%が得られた。石英ガラスの場合、入射エネルギーは入射表面の損傷によって制限され、石英ガラスの内部損傷は発生しなかった。

2.3 光学ガラスのSBS物理定数(SBS利得係数)

各光学ガラスのSBS利得係数は、理論式とSBS発生しきい値から求めた。各光学ガラスの理論的SBS利得係数 g_B は、材料の物理定数から、以下のように表される^{17,18)}。

$$g_B = \frac{2\pi \cdot n^7 \cdot P_{12}^2}{c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta v_B} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (1)$$

ここで、 n は光学ガラスの励起波長での屈折率、 P_{12} は電気光学定数、 c は光速、 ρ は密度、 V はガラスの音速、 Δv_B はガラスのブリルアン散乱のスペクトル幅と λ は入射レーザー波長である。(1)式より、屈折率と電気光学定数の大きい材料、例えばフリント系ガラスは高いSBS利得係数 g_B を持つ。

実験的に定常状態でのSBS利得係数を測定する場合、物質の音響緩和時間の約10倍以上のパルス幅のレーザー光を使用して、SBS発生しきい値エネルギーから求める。例えば、波長 $1.06\mu\text{m}$ での石英ガラスの音響緩和時間は約4nsであり、約40ns以上のパルス幅で励起する必要がある。しかしながら、測定したパルス幅は約25nsであるため、過渡状態でのSBS発生しきい値から定常状態でのSBS利得係数を(2)式より求めた¹⁹⁾。

$$g_{B\text{exp}} = \lambda \frac{(15\tau_B + t)^2}{2mE_{th}} \quad (2)$$

ここで E_{th} はSBS発生しきい値エネルギー、 t はパルス幅、 τ_B は物質の音響緩和時間である。また、 m はSBSのノイズ発生しきい値ファクターで0.9から1である。

各光学ガラスのSBS利得係数の計算結果および実験結果をTable1に示す。(1)式より求めた熔融石英ガラスのSBS利得係数は2.8cm/GWが得られ、(2)式のSBS発生しきい値より求めた定常状態のSBS利得係数は3.4cm/GWとなり、ほぼ一致した。クラウン系光学ガラスは3cm/GW程度である。一方、フリント系光学ガラスのSBS利得係数はLF-1, 5では約6cm/GWである。測定材料中最も小さいSBS発生しきい値を示したSF-6は約9.3cm/GWとなり、計算値9.7cm/GWとほぼ一致した。よって、SF-6は石英ガラスやクラウン系ガラスに比べ、約3倍以上のSBS利得係数であり、液体媒質と同等である。

光学ガラスの非線形屈折率とSBS発生しきい値の関係について調べた。光学ガラスの非線形屈折率 n_2 は、

$$n_2 = (12\pi/n_0)\chi^3 \quad (3)$$

であり、三次の非線形感受率 χ_3 に比例する。 χ_3 はSBS利得係数 g_B と等価であることから、 n_2 の大きい光学ガラスはSBS利得係数が大きい。Fig.3は各光学ガラスの非線形屈折率 n_2 とSBS発生しきい値パワー P_{th} およびSBS利得係数 g_B の関係を示す。実験結果より求めた経験式を(4)式に示す。

Fig.3 SBS threshold power and SBS gain coefficient as a function of nonlinear refractive index for optical glasses.

$$\begin{aligned} P_{th} &= (820 \pm 100) \cdot n_2^{-0.74} \quad (\text{kW}) \\ g_B &= (2.3 \pm 0.6) \cdot n_2^{0.83} \quad (\text{cm/GW}) \end{aligned} \quad (4)$$

よって、 n_2 の大きい光学ガラスを選択することにより、低いSBS発生しきい値の固体材料が期待できる。しかしながら、2.4節で述べるように、 n_2 の大きい光学ガラスはレーザー耐力が小さいため、集光条件や入射エネルギー等に注意しなければならない。

2.4 レーザー損傷しきい値測定

2種類のパルス幅(1.1nsと25ns)について、各種光学ガラスのレーザー損傷しきい値測定結果をTable 2に示す。パルス幅1.1nsの内部損傷は、石英ガラスおよびBK-7, FK-5等のクラウン系は $28 \pm 3 \text{J/cm}^2$ 前後であったが、フリント系LF-1, 5は $15 \pm 2 \text{J/cm}^2$, SF-6は $8 \pm 1 \text{J/cm}^2$ であり、クラウン系に比べ低いレーザー耐力を示した。

次に、25nsパルスでの内部損傷は、SBSの反射率と内部吸収損失を考慮して損傷しきい値を求めた。すなわち、集光時に光学ガラス中の焦点位置を透過するエネルギーより求めた。BK-7の場合、損傷が発生した入射エネルギーは33mJであり、SBS反射率約40～55%を考慮するとガラス内部に集光されたレーザーフルエンスは約100～123J/cm²である。この値は、1.1nsパルスで得られた内部損傷フルエン

Table 1 SBS steady-state gain coefficient of optical glasses.

Materials	Nonlinear refractive index n_2 ($\times 10^{-13}$ esu)	SBS threshold power P_{th} (kW)	SBS gain coefficient g_B (cm/GW)		
			Calculated	Measured	Reported
FK-5	1.13	800	1.7	2.4	
BK-7	1.46	700	2.5	3.2	2.1
KF-6	1.56	600		3.2	
LF-1	2.5	320		6.0	
LF-2	2.6	320		6.0	
LLF-1	2.1	520		3.7	
SF-6	5.9	250	9.7	9.3	
Fused-silica	0.99	650	2.8	3.4	3.0
LG-760	1.0	1200		1.6	

Table 2 Laser induced damage threshold of several optical glasses.

Materials	Incident fluence at focus (J/cm ²)	1.1 ns		Incident energy E_{in} (mJ)	25 ns		Damage threshold (J/cm ²)	Damage threshold by scaling low. (J/cm ²)
		SBS reflectance R_{SBS} (%)	Damage threshold (J/cm ²)		Incident fluence at focus (J/cm ²)	SBS reflectance R_{SBS} R (%)		
FK-5	26.5		26.5	30	185	22	144	135
BK-7	24		24	33	205	46 ± 6	110 ± 12	120
KF-6	19		19	36 ± 4	220 ± 20	65	77	95
LF-1	15	0	15	34	210	88	25	75
LF-2	15		15	33	205	88	25	75
LLF-1	13.5		13.5	23 ± 3	140 ± 15	40	84 ± 9	68
SF-6	8.5		8	12	75	32	51	40
Fused-silica	28		28	90 ~	555	90	56	135
		0		(no damage)				
LG-760	25		25	54 ± 4	335 ± 25	40	200 ± 20	120

スからパルス幅の平方根比例則(熱的破壊)²⁰⁾により求めた値 $120 \pm 10 \text{ J/cm}^2$ とほぼ同じ値を示した。また、SF-6の場合、損傷が発生した入射エネルギー12mJとSBS反射率32%より、ガラス内部に集光されたレーザーフルエンスは 51 J/cm^2 (比例則値 $40 \pm 4 \text{ J/cm}^2$)である。石英ガラスは入射エネルギー90mJまで増加したが内部損傷は観測されず、SBS反射率90%より求めた内部レーザーフルエンスは 56 J/cm^2 となり、パルス幅比例則値 135 J/cm^2 に比べ約1/2以下であり、内部損傷は発生しない。

光学ガラスの非線形屈折率 n_2 に対するパルス幅1.1nsおよび25nsのレーザー損傷しきい値の関係をFig.4に示す。非線形屈折率 n_2 の小さい(約 $1 \times 10^{-13} \text{ esu}$)光学ガラスは、高いレーザー損傷しきい値を示す。一方、フリント系光学ガラスのSF-6は、非線形屈折率 n_2 が大きい(約 $6 \times 10^{-13} \text{ esu}$)ため、損傷しきい値は $8 \pm 1 \text{ J/cm}^2$ となった。実験結果より求めた経験式を(5)式に示す。

$$\begin{aligned} \text{DT}_{(1.1\text{ns})} &= (28 \pm 3) \cdot n_2^{-0.7} \quad (\text{J/cm}^2) \\ \text{DT}_{(25\text{ns})} &= (135 \pm 14) \cdot n_2^{-0.7} \quad (\text{J/cm}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Fig.4 Laser induced damage threshold as a function of nonlinear refractive index for optical glasses at pulse width of 1.1 ns and 25 ns.

この現象は、ガラス内部へレーザー光を集光した場合、ガラス内部集光点付近の屈折率はレーザー強度によって変化する。すなわち、自己収束効果を引き起こすため、ガラス内部の集光強度が増加し、レーザー損傷が発生する。ガラス内部の自己収束が発生する臨界パワー P_{self} は、

$$P_{\text{self}} = \frac{3.77 \cdot c \cdot \lambda^2}{32 \cdot \pi \cdot n_2} \quad (6)$$

となる²¹⁾。ここで、 c は光速(cm/s)、 λ は励起波長(cm)と n_2 は非線形屈折率(esu)である。もし、レーザー光パワーが臨界パワーより小さいならば、レーザー損傷しきい値測定は自己収束の影響はない。非線形屈折率 n_2 の小さい石英ガラスの自己収束臨界パワー P_{self} 1080kWに対し、 n_2 の大きいSF-6では181kWとなり約1/6である。

実験経験式(4)および(5)より、材料の非線形屈折率 n_2 とSBS発生しきい値およびレーザー損傷しきい値は密接に関係し、指数係数はほぼ同じである。このため、非線形屈折率 n_2 の大きいSF-6は、SBS発生しきい値は小さいがレーザー耐力が低いため、高出力動作には不向きである。一方、石英やフリント系ガラスは、SBS発生しきい値は大きい、高いSBS反射率が得られれば、等価入力で極めて高い入射エネルギーまで使用できる有望な位相共役鏡用SBS媒質である。

3. 光学ガラスへの入射可能エネルギーの評価

3.1 集光レンズによるレーザー損傷と入射エネルギー

SBS利得の異なる光学ガラスにおいて、集光レンズの焦点距離と入射可能なエネルギー(レーザー損傷しきい値)について検討した。SF-6と石英ガラスの場合、入射エネルギーとSBS反射率を考慮した透過エネルギーの関係をFig.5に示す。光学ガラスの損傷しきい値フルエンスは、レンズのスポット径に依存しないと仮定した。また、透過エネルギーはSBS反射率に依存するが、飽和反射率以降の透過エネルギーは入射レーザーのビーム品質や材料の吸収係数によって大きく異なる。飽和反射率は90, 95, 98%について予想した。材料は透過レーザーフルエンスが損傷しきい値を上回った時、破壊するとした。

SF-6のレーザー損傷しきい値(パルス幅25ns)は約40J/

Fig.5 The transmitted energy as a function of the incident energy for a SF-6 glass and a fused silica glass.

cm²であり、焦点距離 $f=100\text{mm}$ を使用すると、入射エネルギー約10.8mJの時SBS反射率40%以下では内部損傷が発生することになる。実験結果においても入射エネルギー約10.5mJの時SBS反射率30%で内部損傷が発生した。しかしながら、SBS反射率が90%以上得られたならば、 $f=200\text{mm}$ 集光レンズで約230mJ、 $f=300\text{mm}$ では約600mJまで入射可能である。一方、石英ガラスの内部損傷しきい値を約130J/cm²とすると、 $f=100\text{mm}$ レンズの透過損傷エネルギーは約20mJであり、SBS反射率が90%以上の時、入射可能なエネルギーは約200mJである。実験結果では最大入射エネルギー90mJの時、内部損傷は発生しなかった。飽和反射率90%以上の場合、 $f=200\text{mm}$ 集光レンズでは約500mJ、 $f=300\text{mm}$ では高エネルギー約2Jまで入射可能である。

入射エネルギーを増加すると高いSBS反射率が得られる結果、損傷は透過エネルギー強度が材料固有の内部損傷しきい値を上回った時に発生する。SBS反射率特性は励起レーザーのコヒーレント長が十分大きい(スペクトル幅が十分狭い)場合、集光レンズの焦点距離に依存しないため、焦点距離を長くすることで集光強度を抑制できることから、内部損傷も発生せず高いSBS反射率が期待できる。よって、集光強度を抑制することにより、SF-6は低いSBS発生しきい値から、低入力動作が可能であり、石英やフリント系ガラスは高い内部損傷しきい値から、高い入力エネルギーで動作可能なSBS媒質である。

3.2 固体材料の熱レンズ効果と入射エネルギー

固体媒質を用いたSBS発生では、単一ショットでの入射エネルギー制限(レーザー損傷の発生)以外に、レーザー光の吸収による熱効果により、レーザービームの熱拡散および集束効果が発生する。このため、集光強度が変化し入射可能なパワーが制限される。液体やガス媒質では温度差による媒質の対流や乱流が発生するため、集光スポットの分離により、位相が時間的に固定されず反射率の変動およ

び忠実度が低下する²²⁾。一方、固体もまた吸収による温度分布発生は避けられないが、対流や乱流は発生せず、集光スポットの分離はみられない。

熱効果は単一横モードパルスを屈折率温度係数 dn/dT が負の媒質に入射した場合、熱効果によりレンズの回折限界集光スポット径でのエネルギー強度が1/2に減少するときの過渡的な熱的発散する臨界エネルギー P_{cr} によって特徴づけられる。臨界エネルギー²³⁾は、

$$P_{cr} = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot c}{\left| \frac{dn}{dT} \right| \cdot \alpha \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2} \quad (7)$$

で表される。ここに、 ρ , c , α , T , n , λ はそれぞれ媒質の密度、比熱、吸収係数、温度、屈折率および励起波長である。

レーザービームの熱的発散は P_{cr} 以下の入射エネルギーに対して無視できる。ところが繰り返しレーザー光をSBS媒質に入射させた場合、媒質内での蓄熱効果によって熱的発散および収束が生じる。言い換えれば、集光点のウエストを熱拡散時間 τ 中に透過する全エネルギーが P_{cr} 以下であれば熱的影響は無視できる。屈折率温度係数 dn/dT が正の媒質である光学ガラス等の場合は、熱的収束効果を引き起こす。光学ガラス、レーザーガラスおよびレーザー結晶の熱的物理定数と臨界エネルギー P_{cr} をTable 3に示す。石英ガラスおよびクラウン系ガラスは波長1.06 μm での吸収係数 α は約 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ オーダーであり、臨界エネルギー P_{cr} は石英ガラス約8.3J、FK-5約5.2J、BK-7約2Jである。一方、フリント系ガラスSF-6の波長1.06 μm での吸収係数 α は約 $1 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ であり、臨界エネルギーは250mJ程度である。FK-5および一部のレーザーガラスは dn/dT が負であるため、熱拡散を引き起こす。石英ガラスやクラウンガラスの臨界エネルギーは、高平均出力レーザー用液体SBS媒質であるFC-72, 75の臨界エネルギー値3Jとほぼ同等である。実験に使用した $f=150\text{mm}$ のレンズの焦点スポット径の2乗約4.2

Table 3 Thermal critical energy of several solid materials.

Materials	Refractive index n (at 1.06 μm)	Density ρ (g/cc)	Specific heat c (J/gK)	Thermal conductivity (W/cmK)	dn/dT ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	Absorption coefficient α (cm^{-1}) (at 1.06 μm)	Thermal diffusion (cm^2/s)	Critical energy P_{cr} (J)
Fused-silica	1.45	2.2	0.840	14×10^{-3}	1.0	4×10^{-4}	7.3×10^{-3}	8.3
FK-5	1.487	2.45	0.808	9.2×10^{-3}	- 1.7	4×10^{-4}	4.7×10^{-3}	5.2
BK-7	1.517	2.51	0.858	11.1×10^{-3}	2.4	8×10^{-4}	5.2×10^{-3}	2
BK-7W	1.517	2.52	0.858	11.1×10^{-3}	2.4	8×10^{-4}	5.2×10^{-3}	2
LF-1	1.573	3.16	(0.657)	(8.7×10^{-3})	1.6	4×10^{-3}	4.1×10^{-3}	0.58
LF-2	1.58	3.22	(0.657)	(8.7×10^{-3})	1.6	8×10^{-3}	4.1×10^{-3}	0.30
LLF-1	1.548	2.94	—	—	2.1	1.6×10^{-3}	—	—
KF-6	1.517	2.67	(0.754)	9.5×10^{-3}	2.7	2×10^{-3}	4.7×10^{-3}	0.67
SF-6	1.805	5.18	0.389	10.9×10^{-3}	7.2	2×10^{-3}	5.4×10^{-3}	0.25
ED-2*	1.561	2.54	0.92	13.5×10^{-3}	2.9		5.8×10^{-3}	1.4
LSG-91H*	1.550	2.81	0.63	10.3×10^{-3}	1.6		5.8×10^{-3}	2
HAP-4*	1.533	2.70	0.71	10.2×10^{-3}	1.8	1×10^{-3}	5.3×10^{-3}	0.5
LG-760*	1.508	2.60	0.57	6.0×10^{-3}	- 6.8		4.0×10^{-3}	0.19
LHG-8*	1.520	2.83	0.75	5.8×10^{-3}	*- 5.3		2.7×10^{-3}	0.72
LHG-80*	1.533	2.92	0.63	6.3×10^{-3}	- 3.8		3.4×10^{-3}	0.87
YAG*	1.81	4.55	0.58	130×10^{-3}	9.7	1×10^{-2}	49.3×10^{-3}	0.49
Al_2O_3	1.76	3.98	0.724	420×10^{-3}	1.0-1.4	1×10^{-2}	146×10^{-3}	0.43

*: Nd-doped glass and crystal.

$\times 10^{-5} \text{cm}^2$ と熱拡散係数より求めた各光学ガラスの熱拡散時間は、石英ガラス：5.8ms, BK-7: 8.1ms, SF-6: 7.8msおよび Al_2O_3 : 0.29msであり、臨界エネルギー以内での最大繰り返し数は、石英ガラス：172Hz, BK-7: 123Hz, SF-6: 128Hzおよび Al_2O_3 : 3450Hzである。よって、石英ガラスは、繰り返し数170Hz程度動作において集光時にSBS発生に寄与せず透過する全エネルギー量が8J以下(1パルス当たり47mJ)であれば、安定に動作すると考えられる。

4. まとめ

非晶質光学ガラスのSBS利得係数, SBS反射特性および材料の非線形屈折率と、レーザー損傷しきい値とSBS発生の関係を調べた。また、これら光学ガラスを用いた位相共役鏡の入射可能パワーについて議論し、低入力動作ではSF-6フリントガラス, 高入力動作においては石英ガラスが優れたSBS特性を示すことが分かった。

以上の研究結果は、固体媒質としての光学ガラスは液体やガス媒質に代わるSBS位相共役鏡として動作することを示唆し、非晶質光学ガラス位相共役鏡とLD励起固体レーザーを組み合わせることにより、小型、高品質、高出力固体レーザーの実現が期待される。

参考文献

- 1) V. Wang and C. R. Giuliano: Opt. Lett. **2** (1978) 4.
- 2) A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman,

- J. J. Levinstein, and K. Nassau: Appl. Phys. Lett. **9** (1966) 72.
- 3) B. Y. Zeldovich, V. I. Popovichev, V. V. Ragulskii, and F. S. Faizullov: Sov. Phys.-JETP Lett. **15** (1972) 109.
- 4) B. Y. Zeldovich and V. V. Shunov: Sov. J. Quantum Electron. **8** (1978) 15.
- 5) D. A. Rockwell: IEEE Quantum Electron. **24** (1988) 1124.
- 6) 吉田 国雄, 吉田 英次: レーザー研究 **21** (1993) 832.
- 7) 吉田 英次, 吉田 国雄: 核融合研究 **68** (1992) 235.
- 8) I. D. Carr and D. C. Hanna: Opt. Commun. **62** (1987) 396.
- 9) C. B. Dane, L. E. Zapata, and L. A. Hackel: CLEO'93 Technical Digest CW11 (1993) 274.
- 10) H. J. Eichler, A. Haase, and R. Menzel: IEEE Quantum Electron. **31** (1995) 1265.
- 11) A. Yariv: Phys. Lett. **28** (1976) 88.
- 12) 吉田 英次, 吉田 国雄: レーザー研究 **22** (1994) 689.
- 13) D. Heiman, D. S. Hamiton, and R. W. Hellwarth: Phys. Rev. **B 19** (1979) 6583.
- 14) 吉田 英次, 藤田 尚徳, 中塚 正大, 吉村 政志, 佐々木 孝友, 吉田 国雄: レーザー研究 **25** (1997) 232.
- 15) H. Yoshida, M. Nakatsuka, H. Fujita, T. Sasaki, and K. Yoshida: Appl. Opt. **36** (1997) 7783.
- 16) 吉田 英次, 藤田 尚徳, 山中 龍彦, 吉田 国雄: 光学 **26** (1997) No.1, 31.
- 17) E. P. Ippen and R. H. Stolen: Appl. Phys. Lett. **21** (1972) 539.
- 18) G. W. Fairs, L. E. Jusinski, and A. P. Hickman: J. Opt. Soc. Am. **B10** (1993) 587.
- 19) H. J. Eicher, R. Menzel, R. Sander, M. Schulzke, and J. Schwartz: Opt. Commun. **121** (1995) 49.
- 20) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering, 2nd ed. in Springer Series **1** (1988) 540.
- 21) M. J. Soileau, W. E. Williams, N. Mansour, and E. W. V. Stryland: Opt. Eng. **28** (1989) 1133.
- 22) J. J. Ottusch, and D. A. Rockwell: Opt. Lett. **16** (1991) 369.
- 23) N. F. Andreev, E. Khazaniv, and G. A. Pasmanik: IEEE J. Quantum Electron. **QE-28** (1992) 330.