

解説

大出力ガラスレーザーの光学

吉田 国雄・加藤 義章

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

(1985年3月21日受理)

Optics for High Power Glass Laser

Kunio YOSHIDA and Yoshiaki KATO

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

1. ま え が き

1970年頃より、おもにレーザー核融合研究¹⁻³⁾を目的としてガラスレーザーの大出力化が積極的に推進され、現在では各種大出力レーザー装置のなかで最も技術的完成度の高いレーザーとなった。その出力エネルギーは約4年で1桁ずつ大きくなってきており、このまま順調に研究が進展すれば1990年代に1MJ級ガラスレーザーによる工業化試験装置を実現することも可能となってきた。

ガラスレーザーの大出力化およびそれを用いた核融合研究は、米国ではローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)を中心に進められており、1983年には出力20kJ(波長1.053 μm , パルス幅1ns)のNovette装置^{4,5)}が稼動し始め、1985年6月頃には出力100kJのNova装置⁶⁾を用いた高密度爆縮実験を開始する。欧州諸国のレーザー核融合研究の歴史は古いが、大出力ガラスレーザー用光学部品の開発があまり進展せず、研究の展開が遅れ気味である。このため、最近英国および仏国では米国から大出力ガラスレーザー装置を購入して核融合研究を推進しつつある。

わが国では1965年より大阪大学を中心としてレーザーガラスをはじめとする各種光学部品の性能向上の研究が開始され⁷⁾、1976年には世界で最も高品質のレーザーガラスが日本で生産されるようになり、世界各国のガラスレーザー装置に採用されている⁸⁾。これら光学部品の開発と並行して大阪大学ではガラスレーザーの大出力化を年次を追って進め⁹⁾、1983年12月には出力エネルギー

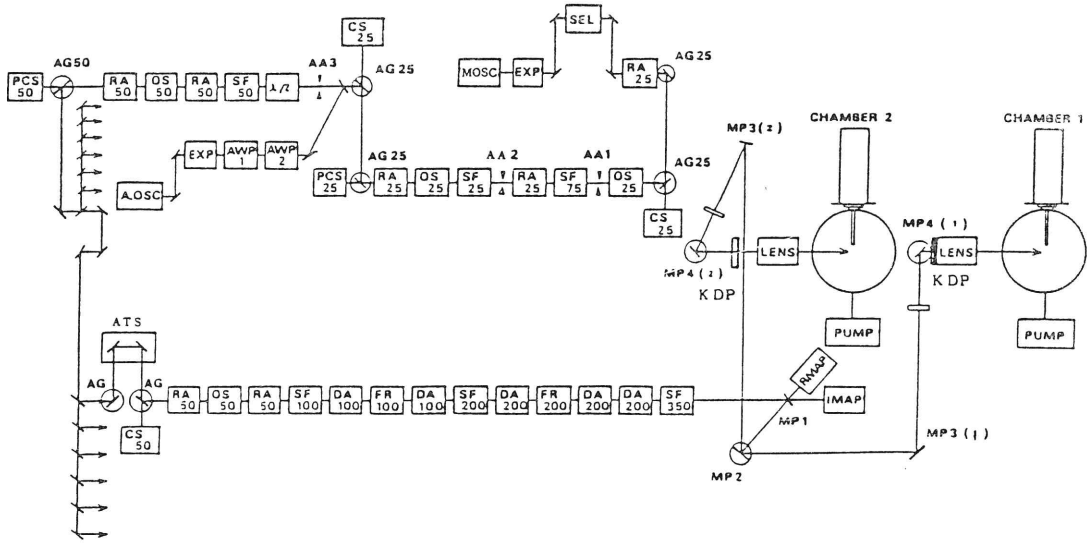
20kJの激光XII号(GXII)装置^{10,11)}を使った高密度爆縮実験^{12,13)}を開始した。この間、世界最大のレーザー出力55TW、世界最高の核融合反応中性子 4×10^{10} 個、DT燃料温度1億度を実現した。また、阪大開発によるキャノンボール・ターゲットを用いた爆縮実験で、燃料密度10g/cc(固体密度の50倍)を達成した。

本稿では、GXII装置について簡単に述べ、次に本装置に使用されている光学部品を中心に、その性能と取扱い方法等について概説する。

2. 大出力ガラスレーザー装置「激光XII号」

2.1 システム配置

図1にGXIIのシステム配置図を示す。レーザー光の波長は1.053 μm 、ビーム数は12本、出力部の開口径は35cm、出力ビーム径は約32cmである。レーザー部の出力エネルギーは20kJ(パルス幅1ns)、ピーク出力は40TW(同100ps)である。GXIIは、正12面体配置球対称照射用のターゲット室および全頂角100度の6ビームバンドル2方向照射のターゲット室とを有し、ターゲット室間のビーム切換えはギヤ室に設置された高精度回転機構付反射鏡で行なわれる。レーザー部は、主発振器から開口径25mmの増幅器までは1階の主発振器室に設置され、出力光は2階のレーザー室へと導かれる。主発振器室からのレーザー光は、レーザー室で12ビームに振り分けられたのち主増幅器列に送られる。主増幅器列は、開口径50mmのロッド型増幅器、開口径100mmおよび200mmのディスク型増幅器、光シャッター、スペーシャルフィルター、ファラデー回転子より構成されて



RA: rod amplifier, DA: disk amplifier, OS: optical shutter, SF: spatial filter, AG: automatic mirror gimbal, CS: centering sensor, PCS: pointing-centering sensor, AWP: automatic wedge prism, ATS: automatic translational stage, IMAP: incident-beam monitoring and analyzing package, RMAP: reflected-beam monitoring and analyzing package.

図1 激光XII号ガラスレーザーシステム配置図

いる。開口径 350mm の真空型スペーシャルフィルターを出射したレーザー光は大口径反射鏡で 4 回反射されたのち、F/3 の非球面レンズによってターゲット上に集光される。大口径反射鏡は、ミラーマウントで保持する際に変形を生じやすいので、阪大で特別に開発した手法を用いた。また、12ビームの光路長を同一とするために各光学部品は、絶対位置で 5mm 以内の精度で設定され、各ビームの光路長差は 3mm 以内に調整された。

GXII を 2.6 kJ/ビーム、パルス幅 1 ns で動作させた場合のシステム各部でのレーザー光のフルエンスの変化を図 2 に示す。GXII の設計においては、誘電体多層蒸着膜の損傷しきい値を 5 J/cm² としており、この値を超

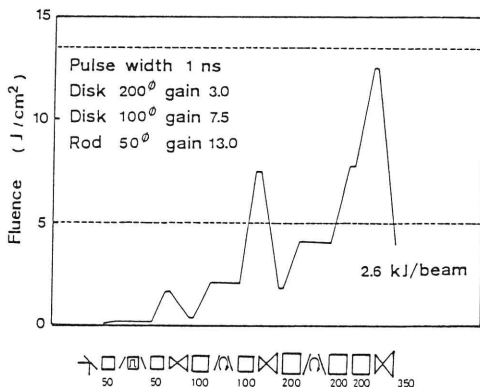


図2 出力 2.6 kJ/ビームに対するレーザー光のフルエンス

える透過型光学ガラスの表面には、後述の化学処理を施した反射防止膜を使用している。

2.2 光学部品

表 1 に、GXII に使用されているおもな光学部品の一覧を示す。光学材料としては 磷酸塩レーザーガラス (HOYA LHG-8)、ファラデー回転ガラス (HOYA FR-5)、BK-7、KDP 結晶等が用いられている。ロッド型レーザーガラスは長さ 380mm、直径 25mm あるいは 50mm の円柱状をしている。両端面は平面研磨をして反射防止膜を蒸着してあり、側面は砂がけである。ディスク型レーザーガラスは楕円状で、開口径 200mm 用の場合には長径 400mm、短径 214mm、厚さ 32mm である。ディスクガラスの側面には、波長 1 μm の自然放光を吸収してディスクガラス内での寄生発振を防止するためにエッジコートガラスが付着してある。研磨した光学ガラスのなかで最大寸法のもの、レーザー光をターゲットへ導くのに使用される反射鏡であり、最大 664mm^φ、88mm^t (重さ 71kg) となる。このような大口径反射鏡によって 1 ビーム当り 4 回反射されるが、各反射面で生じる収差が打ち消し合うように反射鏡を配置することによって収差量を λ/5 (λ=0.6328 μm) 以下にすることが可能となる。スペーシャルフィルター用レンズとしては大部分球面レンズを用いているが、ターゲット集光用レンズには F/3 の非球面レンズを使用している。誘電体偏光子^{14,15)}は、BK-7 の基板に、SiO₂ (低屈折率材料) およ

表 1 GXII 用光学部品の一覧

種 類	名 称	材 質	外 径 寸 法	個 数	使用 方法
レーザーガラス	R 25	LHG-8	25 ^φ ×380 ^t	3	透過
	R 50	LHG-8	50 ^φ ×380 ^t	25	透過
	D100	LHG-8	214×114×24 ^t	144	透過
	D200	LHG-8	400×214×32 ^t	108	透過
ファラデーガラス	FR 100	FR-5	120 ^φ ×20 ^t	12	透過
	FR 200	FR-5	220 ^φ ×20 ^t	12	透過
誘電体偏光子	OS 25	BK-7	66×38×5 ^t	8	透過
	OS 50	BK-7	120×60×7 ^t	52	透過
	FR 100	BK-7	230×120×10 ^t	48	透過
	FR 200	BK-7	448×240×10 ^t	24	透過
ポッケルスセル	OS 25	KD*P	25 ^φ	2	透過
	OS 50	KD*P	50 ^φ	13	透過
大口径反射鏡 (ターゲット照射系)		BK-7	最大 664 ^φ ×88 ^t	74	透過・反射
スペシャルフィルター 用レンズ		BK-7	50 ^φ ~380 ^φ (F 7~F 400)	78	透過
ターゲット照射用レ ンズ		BK-7	有効径 350 ^φ F/3	24	透過
高調波発生用結晶		KDP	有効径 350 ^φ	12	透過

び TiO₂ (高屈折率材料) を交互に 25 層程度蒸着したもので、p 成分の透過率は 95% 以上、s 成分の透過率は 1.5% 以下である。この偏光子は光学部品のなかで最もレーザー損傷を受けやすいので、さらに高耐力の偏光子開発が必要である。高調波発生¹⁶⁾には、有効径 350 mm、厚さ 20mm の KDP 結晶 (Type II) を使用している。KDP セルの窓には反射防止膜を蒸着した BK-7 が使用され、ガラスと KDP との間隙は約 100 μm であり、この間隙に屈折率整合液体を満たしてある。これにより、KDP の表面反射損失と潮解を防止し、KDP 研磨精度に対する許容度を大きくした。整合用液体は、非線形効果 (誘導ラマン散乱や自己集束) およびレーザー光の吸収 (線形および非線形吸収) が小さいこと、蒸発しにくいこと等の条件を満足する必要がある。

3. 大出力ガラスレーザー用光学部品

3.1 特 徴

大出力レーザーの設計においては、システムの信頼性を確保しつつ、いかに高い性能を得るかを第一の目標とする。このため光学部品に対しては、材料、形状、加工方法、蒸着技術、洗浄方法などの面で従来の技術レベルを超えたものが要求されている。

表 2 にレーザーの必要性能と、それらの光学部品に与

える効果との関係を示す。第 1 列は核融合用レーザーに要求される性能、第 2 列はこの性能を制限する要因、第 3 列は制限された範囲内でできるだけ高い性能を得るためのシステム設計上の配慮であり、第 4 列はこれらの結果として光学部品に要求される条件を示す。

3.2 研磨と検査

3.2.1 平面研磨と検査

光学部品はその使用目的に応じて必要とされる加工精度に大きな違いがあるため、研磨法も異なってくる。光学ガラスの研磨方法¹⁷⁾としては、(1) 圧力研磨法、(2) 強制研磨法に大別できる。圧力研磨は一般にラップとしてピッチを用い、ラップとワークとの間に液体中に懸濁した研磨剤を介して相対運動させ、最終的に高精度の面を得る研磨をさす。この方法は、低速・低圧での高精度加工に主として用いられる。これに対して強制研磨は、ラップ材として硬いポリウレタンを用いた高速・高圧加工に用いられる。

大出力ガラスレーザー用光学部品の材料は、一般に硬度が小さく大口径で、平面度および表面状態に対して高精度の研磨を要求される。このため、おもに圧力研磨法が用いられる。大口径光学材料の高精度平面研磨に対する要求に応じて、最近大型のリングポリシヤが開発され、この要求に十分に答えている。これは 1896 年に

表2 大出力ガラスレーザーのシステム設計と光学部品

必要性能	制限要因	システム設計	光学部品
大出力エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ● 増幅の飽和 ● 光損傷 	<ul style="list-style-type: none"> ● 大口径多ビームシステム ● フルエンスの制御 ● 回折現象の抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ● 大口径部品, 部品数大 ● 光損傷に強い光学部品 ● 使用環境に注意(除塵)
高いピーク出力	<ul style="list-style-type: none"> ● 非線形光学効果(自己収束) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 自己収束の成長の抑制(スペーシャルフィルター使用) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 非線形屈折率の小さな光学材料
小さなターゲットを均一照射	<ul style="list-style-type: none"> ● レーザー装置・光学系の収差 ● 集光レンズの明るさ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 無収差光学系 ● 明るい集光系 	<ul style="list-style-type: none"> ● 収差の少ない光学素子 ● 非球面光学素子
時間波形制御	<ul style="list-style-type: none"> ● 増幅段階での波形変形 ● 多ビームの同期 	<ul style="list-style-type: none"> ● 多ビーム同期システム 	<ul style="list-style-type: none"> ● 時間波形制御素子 ● 自動同期システム用光-電気変換素子
吸収・圧縮効率向上	<ul style="list-style-type: none"> ● レーザー波長 ● ターゲット設計 	<ul style="list-style-type: none"> ● レーザー光の短波長化 ● 非球形ターゲット照射 	<ul style="list-style-type: none"> ● 波長変換素子 ● 短波長用高耐力光学部品

C. Johanson が導入した遊星運動研磨法によるもので、その原理図を図3に示す。リング状で中心部の抜けたラップ面がその中心を軸として角速度 Ω で回転する。ラップ面上にワークを置き、これを角速度 ω で回転させる。 ω と Ω を等しくすると、ワークのすべての点とラップ面との相対速度が等しくなる。この場合、ラップ面が均一で、圧力分布が一定であれば、ワークの各点は均一の速度で研磨される。リングポリシャのラップ面は、加工中にワークが当たった部分は変形するので、ドレッサーを用いてラップ面をつねに完全な状態に保つように修正する。この方式を用いてもワークおよびラップに温度分布が生じ、ワークを変形させる。ワークの温度分布を減少させるには、加工圧をできるだけ小さく、研磨速度もなるべく遅くし、研磨液の温度、室温等を厳密に制御する

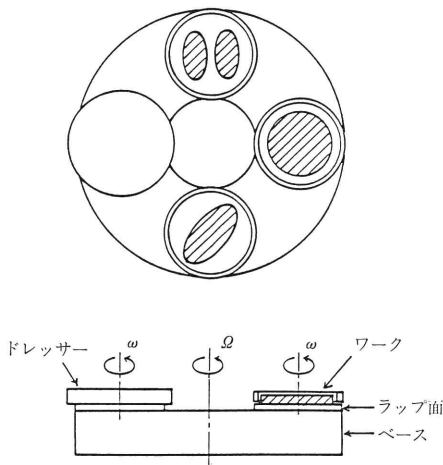


図3 リングポリシャの概略図

必要がある。大きな基板の場合、仕上げるのに80時間程度かかるので高精度に仕上げるには昼夜連続して運転することが望ましい。リングポリシャは、米国のZygo社にベース直径144インチの機械(LLNLの所有物)があり、これを用いると直径1m程度のワークまで $\lambda/10$ の加工が可能である。

平面研磨した光学材料の平面度や波面収差は、干渉計を用いれば高精度の測定が可能となる。干渉計としては単一モード He-Ne レーザーを光源としたフィゾー干渉計が市販されており、平面度は $\lambda/20$ あるいはそれ以上の精度で検査できる¹⁸⁾。またビームエキスパンダーを用いれば32インチの口径まで検査できる。最近の干渉計は、干渉縞の形状を解析して、研磨面の形状、平面からの収差、球面収差からのずれ、透過波面収差などを自動的に出力する。さらに基準球面を参照面として用いることにより、球面の面形状と精度、レンズの透過波面収差などを容易に計測できる。

研磨面の表面粗さの測定法には、針接触方式と非接触方式の2方式がある。前者の方式としては、Rank Taylor Hobson 社製の Talystep (最小解読表面高さ; 5\AA)¹⁹⁾ が最も解読能力がある。非接触方式としては、Wyko Optical 社製の Digital Optical Profilometer NCP-1000 が最近市販されるようになった。この方式は光干渉を利用して表面粗さを測定する方法であり、得られた干渉縞から高精度に表面粗さを測定するのに、phase-shifting 法を用いて基準面と測定面での二つの反射光の位相差を測定し、これをもとに計算によって表面粗さを求める²⁰⁾。この測定器の最小解読表面高さは 1\AA

表 3 蒸着膜の種類と必要な条件

種 類	用 途	基 板	入射角	偏 光	特 性
反 射 防 止 膜	レーザーロッド, FRガラスレンズ, ウィンドーガラス	レーザーガラス FR ガラス BK-7	0°		$R < 0.1\%$
反 射 増 加 膜	各種折返しミラー	BK-7	各種	混合	$R = 98 \sim 100\%$
偏 光 膜	ファラデー回転子, ポッケルスセル	BK-7	56.5°	P 偏光 S 偏光	$T_p \geq 95\%$ $T_s \leq 1.5\%$

以下 (カタログ値) となっている。Digital Optical Profilometer を用いて大出力ガラスレーザーに使用されている精密研磨された光学ガラスの表面粗さを測定したところ、 $20 \sim 40 \text{ \AA rms}$ 程度であった。

3.2.2 球面および非球面加工と検査

球面レンズの加工は、既知の曲率半径の研磨皿で研磨する方法が一般的によく用いられている。この場合、検査方法が重要であり、透過波面は前記の干渉計により高精度で検査できる。ただし通常の干渉計の波長 $0.6328 \mu\text{m}$ は使用波長 ($1.053, 0.526 \mu\text{m}$ など) と異なるため、波長の差による収差量をあらかじめ計算で予測し、それとの対応を見る方法が用いられる。焦点距離を高精度で求めるには、球面の曲率半径をアスカニヤ球面計で計測する方法がよい。GXII の大口径長焦点レンズの曲率半径は、アスカニヤ球面計の最大リング ($120 \text{ mm}\phi$) よりも大きな径のリングを製作して測定され、ガラスの屈折率のばらつきも含め、総合で 0.17% の精度で焦点距離が決定された。

非球面レンズの加工は、計算機制御による研削および研磨機を使用する。精度を上げるためには、これらの機械の可動性および軸受け等の精度がよいことが要求される。非球面研削された表面形状は、He-Ne レーザーを用いた測距器で測定しつつ加工をくり返し、最終的に所定の形状を得る。次に精密研磨機によって研磨を行なうが、この場合も干渉計による検査と研磨とを順次繰り返しながら、最終的に収差量の少ない非球面レンズを得る。非球面レンズの研磨には長い日数を必要とし、たとえば GXII 用のターゲット集光用レンズ (材料 BK-7, 有効径 $350 \text{ mm}\phi$, F/3) の場合には1枚の加工に約1カ月を必要とした。非球面レンズは明るく波長の変化による収差量が大きいので、できるだけ使用波長で検査を行なうことが望ましい。

3.3 光学面の蒸着と検査

3.3.1 誘電体多層蒸着膜²¹⁾

レーザー装置に用いられる多数の光学部品には誘電体多層薄膜が蒸着されている。これらの蒸着膜は、目的に

じて表 3 に示すような所定の条件を満足し、かつ高エネルギー密度のレーザー光に対して十分な耐力を有することが必要である。誘電体多層膜のレーザー耐力は多くの条件に支配され、現状では満足できる強度が得られていない。光破壊の機構としてはレーザー光電界による絶縁破壊、多光子吸収による電離²²⁾、不純物吸収²³⁾などが考えられるが、測定データの解析によれば不純物吸収が支配的であると考えられている。高いレーザー耐力を得るには、基板の表面粗さをできるだけ小さくすること²⁴⁾、および研磨面を清浄に保つことが必要である。ガラスは水と反応してヤケを生じるので乾燥空气中に保存するか、あるいは空気との接触を断つ必要がある。後者の場合、表面に保護膜を塗布するか、有機溶剤中で保管するなどの方法がある。蒸着前に基板面を高度洗浄することが重要であり、レーザーの耐力はこの工程に強く依存する。蒸着物質および蒸着条件は基板ガラスの種類によって異なる。これらは実験的に決定できるので、最適条件が得られるまで多くのパラメータランをする必要がある。こうして小さなサンプルで最適化を図ったら、次いで実物大の基板で蒸着テストをする。これは大型基板の場合には、基板の温度分布および蒸着ムラが生じやすくなるからである。反射増加膜や偏光膜のレーザー耐力は、膜内で発生する定在波電界強度に依存するので²⁵⁾、この電界強度をできるだけ小さくするような設計が望ましい。反射防止 (AR) 膜および偏光膜のレーザー耐力は、蒸着膜と基板ガラスの界面の吸収層、あるいは基板面上の局所的な吸収部分 (直径数 μm 以下で多数存在する) がレーザー光を吸収して破壊に至るために低下すると考えられている。

表 4 に各種蒸着膜のレーザー耐力を示す。表 4 から明らかかなように AR 膜の場合は、膜厚 $\lambda/2$ の SiO_2 を under coat することによってレーザー耐力が数十%以上高くなる。また、反射増加膜や偏光膜では、数層の膜厚を $\lambda/4$ 設計 (QW) からわずかにずらした設計 (NQW) を行ない、膜内の電界強度を減少させることによって、レーザー耐力が向上した。

表4 各種蒸着膜のレーザー耐力

蒸着膜	レーザー耐力 (J/cm ²)	レーザー	備考
AR			
多層	3~4		アンダーコートなし
多層	4~8		$\lambda/2$ SiO ₂ アンダーコート
HR		1.065 μ m	
多層	7~11	1 ns	QW 設計
多層	8~13		NQW 設計
偏光膜			
多層	5~7		NQW 設計
AR			
多層	2.5~3.5	0.53 μ m	アンダーコートなし
多層	4~5	1 ns	$\lambda/2$ SiO ₂ アンダーコート
AR			
多層	1~3	0.35 μ m	$\lambda/2$ SiO ₂ アンダーコート
単層	2~4	0.4 ns	$\lambda/4$ SiO ₂

短波長レーザー用の蒸着膜のレーザー耐力は非常に低く、波長 0.35 μ m のレーザー光に対して 1~3 J/cm 程度²⁶⁾である。短波長において高耐力の AR 膜は米国および日本で開発されつつあり、3.3.2 項で述べる。

われわれが実施している蒸着膜の検査について述べる。波長 1 μ m 用蒸着膜の反射率や透過率測定には、直線偏光の CW YAG レーザーを用いる。入射光および蒸着膜からの反射光または透過光の強度をホトダイオードで測定し、計算機で比をとる。本方式の測定精度は $\pm 1\%$ 以内である。

レーザー耐力は、Nd:YAG レーザー発振器と3段増幅器を組み合わせた専用の検査装置で測定している。パルス幅はモード同期パルスレーザーの場合100 ps~1 ns、単一縦モードQスイッチ発振器からの切り出しパルスの場合1~15 ns(可変)であり、波長は1.064, 0.532, 0.354, 0.266 μ m である。レーザー損傷の検出には、レーザー照射部分を光学顕微鏡を用いて暗視野照明法で観測し、同時に損傷に伴って発生するプラズマ発光も測定している。なお、蒸着膜の種類によっては前述の手法では検出不可能なことがあり、この場合には Nomarski 顕微鏡を用いる。レーザー耐力の検査において重要なことは、被検査物を使用条件と同じ入射角および偏光で測定することである。これが異なるとレーザー耐力の検査値は大きく変化することが多いので注意を要する。

3.3.2 化学処理法による反射防止膜

レーザーが大出力化するにつれて、誘電体多層膜のレーザー耐力を凌ぐ高耐力 AR 膜に対する要求が強くなり、ガラス表面をエッチングして AR 膜を生成する手法

が脚光を浴びるようになった。エッチングによってガラス表面の反射率を減少させる方法は古くから知られており²⁷⁾、1930~40 年にかけてこの方法で AR 膜を得ようとする努力がなされたが、再現性、耐久性等の問題点を解決できず実用化に至らなかった。

Corning 社の Minot²⁸⁾は、分相したパイレックスガラス 7740 を HF や NaOH などの溶液で化学的に処理し、ガラス表面の屈折率が空気層からガラス基板にかけてしだいに増大していく AR 膜 (graded-index antireflection layer) を製作した。このパイレックスガラスは光学的均質度が悪いため大出力ガラスレーザーには採用されなかった。その後、保谷硝子、Owens-Illinois、Corning 各社は相次いで均質度の優れた分相性ガラスを開発した。図4に分相性ガラス ARG-2 (保谷硝子製)の透過率曲線²⁹⁾を示す。ガラスの厚さは5mmで、両面は化学的に処理されており、可視から赤外域にわたって100%近い透過率を示している。図5は、graded-index AR 膜と大出力ガラスレーザー用によく用いられている

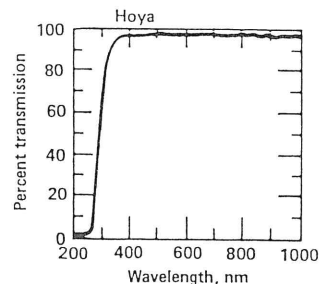


図4 ARG-2の透過曲線

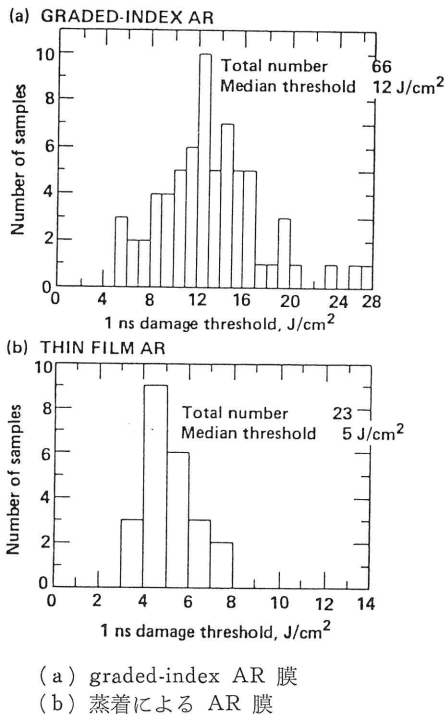


図 5 1.06 μm, 1 ns のレーザーによるレーザー損傷しきい値

4層構成の SiO₂/TiO₂ 反射防止蒸着膜のレーザー耐力の比較を示す²⁹⁾. この実験結果では, graded-index AR 膜のレーザー耐力は蒸着膜の 2.5 倍高い値を示した. この graded-index AR 膜は, レーザー耐力が高く, 反射率も広帯域にわたり低いため, 非常に優れた膜といえる. ところが, graded-index 面は軟らかく, 表面に指紋などの汚れをつけた場合に洗浄できない, 再現性が困難などの理由により実用化されなかった.

1982 年 Schott 社の Cook らは³⁰⁾, 硫酸ソーダと Al³⁺ を溶解した中性溶液中で硼珪クラウンガラス BK-7 を化学的に処理し, 高耐力の AR 膜を生成した. 中性溶液中で生成された AR 膜は, 分相性の AR 膜と比べて膜生成の再現性, 取扱以上の点でかなり優れている. LLNL では, 出力 100 kJ の大出力ガラスレーザー装置 NOVA に本方式の AR 膜を採用した³¹⁾. 本方式は大口徑の光学部品にも歪みを与えることなく簡単に AR 膜を生成できる.

筆者らは, Cook らによって報告されている方法では満足な AR 膜を生成できなかったので, 少し改良を加えた処理法によって AR 膜を生成した³²⁾. 図 6 は, 波長 1 μm 用として BK-7 の表面に生成された AR 膜の分光特性を示す. この方法で 0.5% 以下の片面反射率を得る

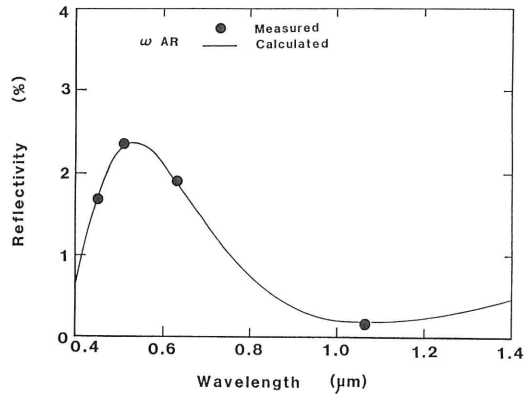


図 6 化学的処理法によって BK-7 の表面に生成された AR 膜の分光特性

のは容易であり, よい条件で化学処理をすれば 0.01% とすることもできる.

波長 1.06 μm および 0.53 μm (パルス幅 1 ns) のレーザー光を AR 膜表面に照射し, レーザー耐力を測定した. 1 回の照射でのレーザー耐力は, 1.06 μm に対し 9.3~16.7 J/cm², 0.53 μm では 9.5~13 J/cm² となり, 蒸着膜の 2 倍以上の耐力を示した. また, 上記のレーザー耐力の 20~80% の低強度のレーザー光を表面に 10 回程度照射した後でのレーザー耐力は, 1.06 μm のレーザー光に対し 15.5~25 J/cm² と大幅に向上した. これは表面が“レーザークリーニング”されたためである.

3.3.3 短波長レーザー用反射防止膜

誘電体蒸着の AR 膜のレーザー耐力は, 0.35 μm のレーザー光に対し 1~3 J/cm² 程度と非常に弱い.

LLNL の Milam らは, Sol-Gel 法により石英基板上に多孔性シリカ膜を付着させることによって短波長レーザー用の高耐力 AR 膜を生成した³³⁾. 膜厚 90 nm の場合, 波長 0.355 μm, パルス幅 6 ns でのレーザー耐力は 6~9 J/cm² であり, 従来の蒸着膜の 3 倍以上の高耐力化を図るのに成功した. 問題点としては, 膜生成の再現性が困難であり, 膜面が比較的軟らかいためクリーニングペーパーなどを用いて膜を洗浄できないことがあげられる.

筆者らは, 蒸着膜を化学的に処理することによって石英基板上に多孔性薄膜を生成し, AR 膜を製作した^{34,35)}. この AR 膜の片面反射率は 0.5% 以下であり, 波長 0.355 μm, パルス幅 0.4 ns でのレーザー耐力は 6~8 J/cm² となった. この AR 膜の表面は機械的に強く, 製作の再現性もよく非常に優れた膜といえる.

3.4 洗 浄

清浄な面は, 光学部品のみならず超 LSI, 精密機械,

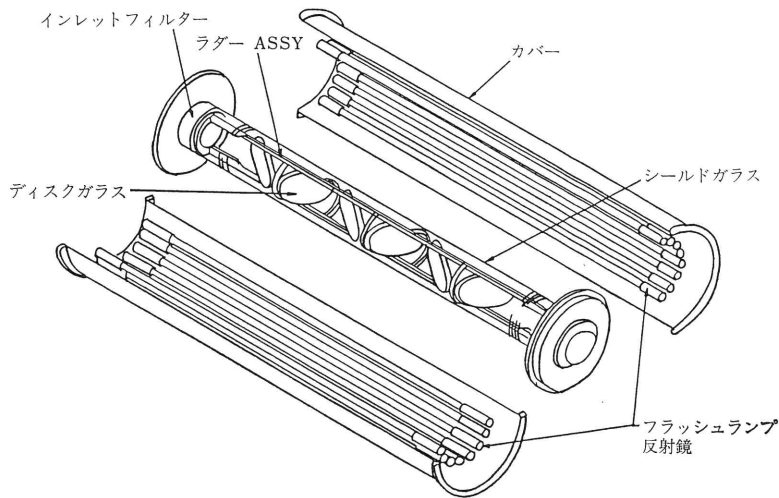


図7 ディスク型増幅器(有効径100mm)の分解図

精密印刷, 高真空装置等の多くの分野において必要不可欠となっている。大出力ガラスレーザーにおいては, 光学部品表面の塵埃や薄膜状の汚れは光学部品の損傷原因となり, このような損傷が一般にレーザー出力を制限する。たとえば, ディスク増幅器内のレーザーガラスはフラッシュランプと向かい合っており(図7参照), 約10 J/cm²の放射エネルギー束を受けるため, 増幅器内の塵埃や汚れが急激に加熱され, レーザーガラス表面に損傷を与える。これらの損傷は, 損傷した光学部品を通過するレーザー光が, 回折効果によって強い変調を受け他の光学部品に損傷を与えるおそれがある, 損傷部分での散乱や吸収による損失が増大する, 塵埃が反射鏡やシールドガラス等に焼きつく場合励起効率が低下する等の問題点を有する。したがって, 光学部品を定期的に洗浄する

必要がある。

筆者らは, GXII 用光学部品を洗浄するためにクリーン度クラス100のクリーンルーム(面積489 m²)を準備した。GXIIの全光学部品を高度の清浄度で洗浄できるように表5に示すような洗浄用装置を準備した³⁶⁾。

一例として, ディスクガラスとラダーの洗浄法について述べる³⁷⁾。レーザー光が通過するディスクガラスは, ガラス表面の取扱いに対しては特別な注意が必要である。この場合表面検査(スクラッチ/ディグ, ヤケ, 塵埃による損傷等)→手拭き洗浄→酸素プラズマ洗浄→ダスト検査という手順を経て洗浄が完了する。ラダーのような大型の金属類は, 手拭き洗浄→スプレー洗浄→ダストの採取・カウントを経て, 大きさ5 μmのダストが1 cm²当たり2個以下の場合に洗浄を完了する。ここでスプレー

表5 光学部品洗浄用機器

名 称	性 能	用 途
気 密 ブ ース	無塵送風換気	洗浄, 組立
ス プ レ ー ガ ン	低圧用 (~5気圧) 高圧用 (~70気圧)	フロン, 超純水使用
フロン回収蒸留精製設備	フロン 113	スプレー洗浄用液
超純水精製設備	比抵抗 18 MΩ・cm	
プラズマクリーナー	1.2 kW	ディスクガラス洗浄
超音波洗浄装置	25 kHz	小物洗浄
温 風 乾 燥 器	最大 3 kW	洗浄物乾燥
真空ピンセット		小物組立
窒 素 ガ ン	5気圧	吹飛ばし洗浄

洗浄とは、容積が約 30 l の高圧タンクにフロンまたは超純水を満たし、これに約 70 気圧のクリーンな窒素ガスを加圧し、1.3 mm ϕ のノズルから洗浄液を噴出させて洗浄する方法で、金属類に付着したダストを効率よく除去できる。ダストの採取・カウントは次のように行なう。スプレー法によって約 10 気圧の窒素ガスで加速したフロンを洗浄物表面に噴射し、表面から流出するフロンを採取してダストの寸法と数を光学顕微鏡で数える。これらの手法を用いれば、光学部品に付着しているダストを 99% 以上除去できる。

3.5 取扱い方法

光学部品を取り扱う際に、表面に唾、指紋、髪の毛等が付着したりすると再度洗浄が必要となり厄介である。筆者らは、市販品のマスク、手袋、帽子、クリーニングペーパー、洗浄用薬品のダストや汚れを厳密に調べ、クリーン度の高いものを使用している。光学部品を洗浄したり運搬する場合、光学部品の重さが 10 kg 以上になると重さおよび形状に応じた取扱い治具を必要とする。治具の設計に際しては、光学部品に機械的歪みや損傷を与えないようにとくに注意すべきである。大型の反射鏡やレンズ等をセルに取り付ける場合にも機械的歪みを発生しやすい。筆者らは、シリコンポットング剤を反射鏡の側面および周辺部に注入する方法を開発し、機械的歪みの発生を防止することができた。

光学部品の保管も非常に重要な要素の一つである。保管中に光学部品に歪みを生じたり、表面が変化しないように十分に注意すべきである。レーザーガラスやレンズ等の保管に対しては、1 μ m のフィルターを通したクリーンな窒素ガスを保管庫に満たし、ダストの付着およびヤケを防止している。光学部品は、保管庫の空間利用率や光学部品の変形を考慮した場合に、垂直に立てて保持する方式がよい。また、光学部品を紙に包んだ状態で保管するのはヤケが生じやすくなるので避けるべきである。

4. む す び

慣性閉じ込め核融合用の大出力ガラスレーザー装置の開発を通じて大口徑の高均質度ガラスの製造、研磨や蒸着などの加工技術、ならびにこれらの検査技術が飛躍的に向上した。約 10 年前と現在とを比較すると、10 年前には不可能だった技術が現在では標準的な技術となっている。

次の目標は、燃料点火実験を目的とした出力 100 kJ \sim 1 MJ 級レーザーの建設となる。この場合必然的に光学

部品の単体の大きさが大きくなるので、cost effective で、かついかに十分な性能を得るかが重要な設計課題となる。光学材料に関しては、もっと安価な素材を使用することが望ましく、ダイヤモンド切削による金属反射鏡、プラスチック光学素子等が使用できることが期待される。当然、収差等は増すであろうからレーザーおよびターゲット設計もこれを使用できるように対応する必要がある。位相共役波を発生させて増幅する方法は光学系の収差を打ち消すので、この点で新しい領域を開く可能性はある。

また、レーザー核融合研究は、ガラスレーザー光を KDP 結晶で波長変換した 3ω あるいは 4ω 光等の大出力短波長レーザーを用いた方向に指向している。このため紫外用の大口徑光学材料の製造、およびそれらの研磨・蒸着技術の確立が強く望まれるようになってきた。

これらの新しい技術が開発されるとともに、すでに開発された技術がより一般化され、新技術が広く各方面での研究分野ならびに産業界で役立つことが期待される。

文 献

- 1) N. G. Basov, P. G. Kriukov, S. D. Zakharov, Yu. V. Senatski and S. V. Tchekalin: Experiments on the observation of neutron emission at a focus of high-power laser radiation on a lithium deuteride surface. IEEE J. Quantum Electron., **QE-6** (1968) 864.
- 2) G. W. Gobeli, J. C. Bushnell, P. S. Peercy and E. D. Jones: Observation of neutrons produced by laser irradiation of lithium deuteride. Phys. Rev., **188** (1969) 300.
- 3) C. Yamanaka, T. Yamanaka, T. Sasaki, K. Yoshida, M. Waki and H. B. Kang: Anomalous heating of a plasma by a laser. Phys. Rev. A., **6** (1972) 2335.
- 4) K. R. Manes: Laser Program Ann. Rep., Lawrence Livermore Natl. Lab. Rep. UCRL-50021-82 (1983) 2-53.
- 5) K. R. Manes and W. W. Simmons: Statistical optics applied to high-power glass lasers. CLEO '84 Technical Digest (1984) p. 48.
- 6) W. W. Simmons: Laser Program Ann. Rep., Lawrence Livermore Natl. Lab. Rep. UCRL-50021-82 (1983) 2-2.
- 7) ガラスレーザー開発に関する年表が、「レーザー研究10年の進歩、第1部及び第2部」(大阪大学レーザー核融合研究センター、1983年)にまとめられている。また、1980年までの大阪大学の仕事に関しては下記の文献を参照されたい。
 - ①Progress Report VI, Laboratory for Plasma and Quantum Electronics, Osaka University (August 10, 1970).
 - ②Progress Report VIII, Institute of Laser Engineering, Osaka University (July 20, 1972); *ibid.* (June 30, 1974).
 - ③Annual Progress Report on Laser Fusion Program, Institute of Laser Engineering, Osaka University, September 1975-August 1976, ILE-APR-76 (No-

- vember 1976); *ibid.*, September 1976–August 1977, ILE-APR-77 (November 1977); *ibid.*, September 1977–August 1978, ILE-APR-78 (December 1978); *ibid.*, September 1978–August 1980, ILE-APR-79 (March 1981).
- ④ 佐々木孝友, 山中龍彦, 山口元太郎, 山中千代衛: 大出力増幅段付レーザー. 超高温研究, **6** (1969) 173.
 - ⑤ T. Sasaki, M. Hongyo, Y. Nagao and C. Yamanaka: Investigation of glass damage by laser. Technol. Res. Osaka Univ., **21** (1971) 1011.
 - ⑥ 長尾泰明, 佐々木孝友, 本行正信, 山中千代衛: レーザーガラスの損傷耐力向上に関する研究. 電学誌, **92-C** (1972) 361.
 - ⑦ C. Yamanaka, T. Yamanaka, T. Sasaki, K. Yoshida, M. Hongyo, Y. Nagao and E. Iri: High power Nd laser. Proc. Japan-US Seminar, **I-2** (1972) 19.
 - ⑧ 山中千代衛: 大出力レーザーの開発. 電子通信学会誌, **57** (1974) 584.
 - ⑨ Y. Kato, J. Kuroda, Y. Mizumoto, K. Yamada, K. Yoshida and C. Yamanaka: High power, high intensity, and extremely short light source of glass laser system "GEKKO IV". *Proceeding of the 13th International Conference on High Speed Photography and Photonics* (Tokyo, 1978) p. 233.
 - 8) 黒田寛人, 泉谷徹郎: レーザーガラスの開発の現状と展望. 応用物理, **50** (1981) 1342.
 - 9) C. Yamanaka, Y. Kato, Y. Izawa, K. Yoshida, T. Yamanaka, T. Sasaki, M. Nakatsuka, T. Mochizuki, J. Kuroda and S. Nakai: Nd-doped phosphate glass laser systems for laser-fusion research. IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1639.
 - 10) C. Yamanaka: Gekko XII glass laser system. レーザー研究, **11** (1983) 41.
 - 11) C. Yamanaka, Y. Kato, T. Mochizuki, M. Nakatsuka, T. Yamanaka, K. Yoshida and S. Nakai: Gekko XII System for laser fusion research. *CLEO '84 Technical Digest* (1984) p. 260.
 - 12) C. Yamanaka, *et al.*: 10th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-44 (1984).
 - 13) 山中千代衛, 加藤義章: ガラスレーザー「激光 XII 号」の初期成果. 日本原子力学会誌, **26** (1984) 362.
 - 14) W. W. Buchman, S. J. Holmes and F. J. Woodberry: Single-wavelength thin-film polarizers. J. Opt. Soc. Am., **16** (1971) 1604.
 - 15) 吉田国雄, 山中龍彦, 山中千代衛: 誘電体多層薄膜偏光子の製作と取扱い方. レーザー研究, **4** (1976) 37.
 - 16) R. S. Craxton, S. D. Jacobs, J. E. Rizzo and R. Boni: Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1 μ m laser radiation. IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1782.
 - 17) 佐柳和男: 光学部品の高精度化. 応用物理学会・光学懇話会第20回サマー・セミナー論文集 (1982).
 - 18) Zygo 社カタログ, 富士写真光機(株)カタログなど.
 - 19) Rank Taylor Hobson 社カタログ.
 - 20) Wyko Optical 社カタログ.
 - 21) 加藤義章: 大出力レーザー用光学部品の耐久性. 応用物理学会・光学懇話会第20回サマー・セミナー論文集(1982).
 - 22) A. Vaidyanathan, T. W. Walker and A. H. Guenther: The relative roles of avalanche multiplication and multiphoton absorption in laser-induced damage of dielectrics. IEEE J. Quantum. Electron., **QE-16** (1980) 89.
 - 23) T. W. Walker, A. H. Guenther and P. E. Nielsen: Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings. Part I: Experimental. IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 2041.
 - 24) N. Bloembergen: Role of cracks, pores and absorbing inclusions on laser-induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics. Appl. Opt., **12** (1973) 661.
 - 25) J. H. Apfel, J. S. Matteucci, B. E. Newnam and D. H. Gill: The role of electric field strength in laser damage of dielectric multilayers. NBS Special Publ., **462** (1976) 301.
 - 26) J. A. Abate, R. Roides, S. D. Jacobs, W. Piskorowski and T. Chipp: Laser damage thresholds of optical coatings at 351 nm. NBS Special Publ., **669** (1982) 282.
 - 27) J. Fraunhofer: *Gesamelte Schriften*, ed. F. Hommel (Munich, Germany, 1887).
 - 28) M. J. Minot: Single-layer, gradient refractive index antireflection films effective from 0.35 to 2.5 μ . J. Opt. Soc. Am., **66** (1976) 515.
 - 29) W. H. Lowdermilk and D. Milam: Graded-index antireflection surfaces for high-power laser applications. Appl. Phys. Lett., **36** (1980) 891.
 - 30) L. M. Cook, S. Ciolek and K. H. Mader: Integral antireflective surface production on optical glass. J. Am. Cer. Soc., **65** (1982) C-152.
 - 31) G. R. Wirtenson, N. J. Brown and L. M. Cook: Scaling up the neutral solution anti-reflection process. NBS Special Publ., **669** (1982) 225.
 - 32) 吉田国雄, 吉田英次, 山中千代衛: 化学処理法による高耐力反射防止膜の諸特性. レーザー学会学術講演会第5回年次大会予稿集 (1985) p. 81.
 - 33) D. Milam, W. H. Lowdermilk, J. G. Wilder and I. M. Thomas: Damage-resistant porous silica antireflection coatings for use at 351, 266, and 248 nm. *CLEO '84 Technical Digest* (1984) p. 136.
 - 34) 吉田国雄, 山中千代衛: 特許出願番号 60-11070 (1985).
 - 35) K. Yoshida, H. Yoshida, Y. Kato and C. Yamanaka: Highly damage resistant, broadband, hard antireflection coating for high-power lasers in the ultraviolet to near-infrared wavelength regions. *CLEO '85 Technical Digest* (1985) WP 2.
 - 36) K. Yoshida: Cleaning and assembling of optical components. ILE Quarterly Progress Report on Inertial Fusion Program, ILE-QPR-84-11 (1984) 8.
 - 37) 吉田国雄: レーザー用光学部品の性能と取扱い方法. 生産と技術, **36** (1984) 6.