

レーザー発振と使用される材料

レーザー用ガラスの現状と将来

大阪大学レーザー核融合研究センター教授 加藤 義章

きょうは、「レーザー用ガラス」というテーマでガラスレーザーの最近の進歩に関する広い範囲の話を紹介したい。話の内容を表1に示す。

第1に、激光XII号ガラスレーザーシステムについて簡単に紹介する。

2番目に、高出力ガラスレーザー用光学素子特に激光XII号で使われている光学素子に関するやや詳細な説明をする。

3番目に最近ガラスレーザーを短波長化して使うことが非常に重要になってきており、これに伴い紫外域での光学素子の特性が非常に問題となっている。たとえば蒸着膜のレーザー耐力が非常に問題になってきているので、この点について述べる。

4番目の光学素子の取り扱いに関しては、我々が光学素子を取り扱う場合に、洗浄等に非常

に気を配っているので関連技術ということで若干触れる。

5番目に最近ガラスを使って平均的に高い出力の高線り返し固体レーザーを開発する動きがかなり活発になってきている。これはガラスレーザーとしては新しい方向であるので、それについて簡単に紹介し、最後にまとめをしたい。

1. 高出力ガラスレーザーシステム激光XII号¹⁾

図1に激光XII号ガラスレーザー装置の鳥瞰図を示す。発振器から出た光をある程度増幅して、直径5cmのビームとし、12ビームに分割した後増幅器列を通し最終的に直径35cmのビームとする。出力ビームをターゲットチェンバーに導くのであるが、ターゲットチェンバーは二つあり、大きな鏡でレーザー光の向きを変える。これによりいろいろな実験を効率よく一つのレーザー装置を使って行なうことができる。

激光XII号装置は、全体がクリーンルームになっており、レーザー室だけで長さが75mもある。

ターゲットチェンバーは直径1.8mのステンレスの球であり、正12面体の面の中心方向から対称にレーザー光が入る。レーザー光路をすべてビームチューブで覆っているが、これは空気の流れによる波面の乱れを防ぐためである。

レーザー光は、集光レンズによりターゲットチェンバーの中心部に集光される。ターゲットの大きさは、いままで使っていたもので直径500 μm ぐらいであるが、最近ではレーザーのエネルギーを上げて運転しているので、直径1mmに近いターゲットも使うようになってい

表1 レーザー用ガラスに関する最近の進歩

1. 高出力ガラスレーザーシステム：激光XII号
 - 1) レーザー装置
 - 2) ターゲット照射装置
2. 高出力ガラスレーザー用光学素子
 - 1) システム設計と光学部品
 - 2) 激光XII号用光学素子
 - 3) 光学素子の仕様
 - 4) 加工と検査
3. 高出力ガラスレーザーの短波長化
 - 1) 激光XII号の2倍高調波化
 - 2) 激光MII号の3倍高調波化
 - 3) KDP 単結晶のダイヤモンド切削加工
 - 4) 紫外レーザー用光学素子
 - 5) 高耐力反射防止膜
4. 光学素子の取扱い
 - 1) 洗浄設備
 - 2) 洗浄方法
5. 高平均出力固体レーザー
 - 1) スラプレーザー
 - 2) レーザーガラス

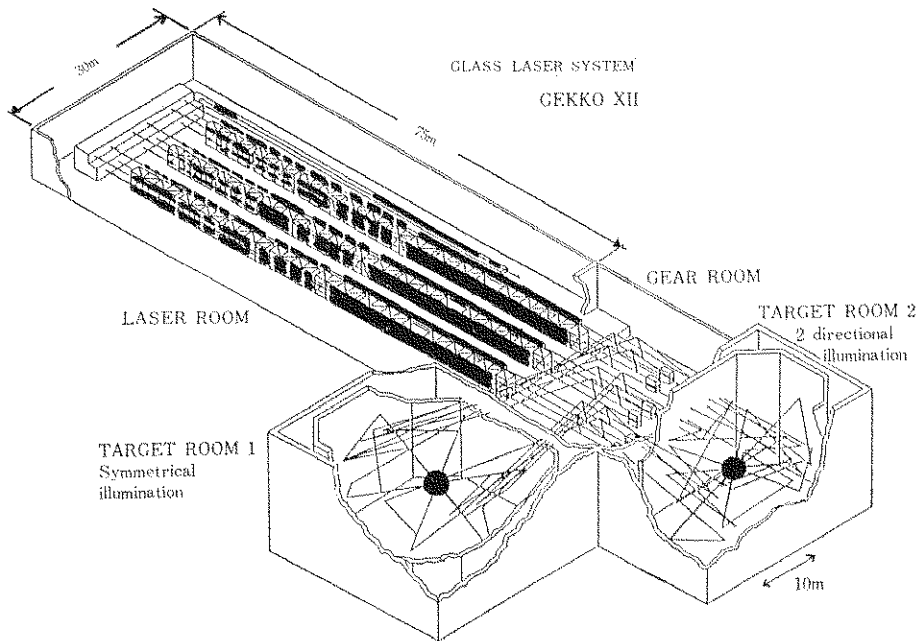


図 1 激光Ⅻ号ガラスレーザーシステム

る。

レーザー光を正しくターゲットに当てるために、大体 $20 \mu\text{m}$ の精度でレーザー光をアライメントする。レーザー光の波面が乱れていると、細かいスポットに集光できないため、そこに使われている光学素子は非常に高精度のものを必要とする。

図 2 に集光部分の光学系を示す。直径 35 cm

のレーザー光を単一の非球面レンズで集光する。レンズの焦点距離は約 1 m であり、 $1 \mu\text{m}$ と $0.5 \mu\text{m}$ の両方の波長で使える光学設計になっている。レーザー光の光路中に KDP の単結晶をおき、レーザー光の波長を $1 \mu\text{m}$ から $0.5 \mu\text{m}$ に変換して実験を行っている。

図 3 はレーザー部を一つの直線上に展開して画いたものである。発振器から出たレーザー光

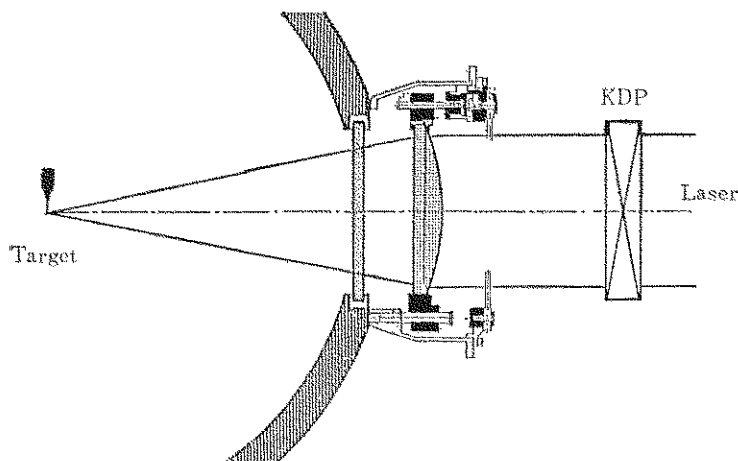


図 2 激光Ⅻ号集光光学系

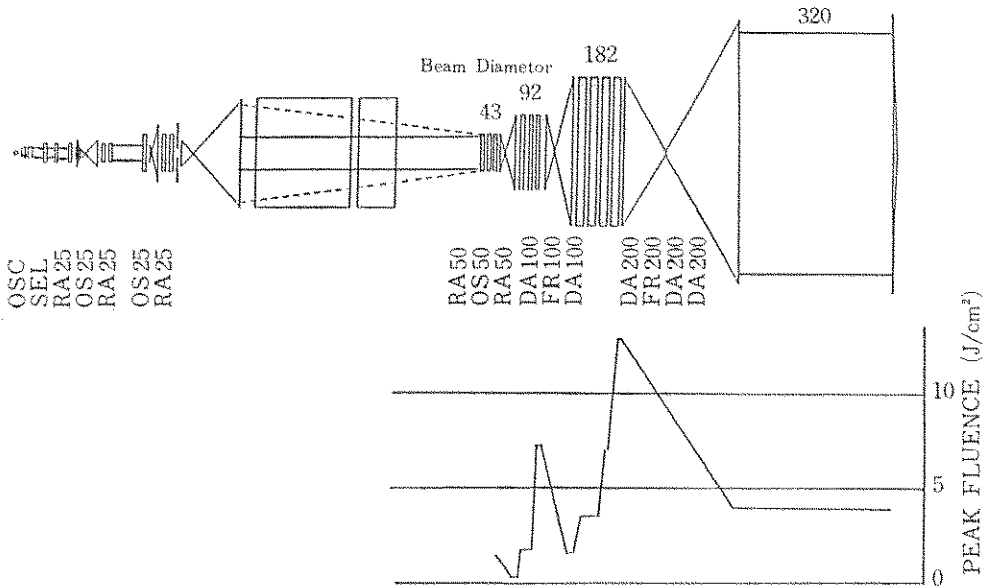


図3 激光XII号装置におけるレーザー光の伝搬. (RA: ロッド増幅器, DA: ディスク増幅器, OS: 光シャッター, FR: ファラデーローテーター). 下半分は、各段におけるレーザー光フルエンスを示す.

を先ずロッド増幅器 RA 25 (開口径 25 mm) で増幅する.

OSは光シャッターの略であり、ポッケルセルを使用している。スペーシャルフィルターは、2枚のレンズの組み合わせであり、この2枚のレンズの焦点にピンホールを置きそれを通すことによって、空間スペーシャルフィルタリングを行い、レーザー光の空間分布をきれいにする。

またスペーシャルフィルターによりビーム形をだんだん大きくしていく。ビームの主増幅器列は 50 mm のロッド増幅器 2 台、100 mm のディスク増幅器 2 台、ファラデーローテーター (逆進防止の光に対するダイオード) 1 台を通した後、スペーシャルフィルターによりビーム径を 200 mm にし、ディスク増幅器 3 台とファラデーローテーター 1 台を通した後にもう一度スペーシャルフィルターで直径が 35 cm のビーム径にする。それから長距離伝搬した後ターゲットに集光する。

非常に長距離をレーザー光は伝搬するので、空気の乱れ等による波面の乱れがあってはなら

ず、また多数の光学素子は高い精度を保つ必要がある。

もう一つ重要な点は、ピークフルエンスであり、図3には J/cm^2 単位で表したレーザー光のフルエンスを示す。誘電体多層膜のレーザー耐力 (レーザー光により破壊する限界) は目安として $5 J/cm^2$ 程度になる。従って、それを越えたところでは使えないが、これを越えないで設計すると、レーザー装置としては非常に効率の悪い使い方になる。

この激光XII号では、 $5 J/cm^2$ を越えたところは全部透過型の光学素子であるが、これらは全くコーティングを施していないか、あるいは、ガラスに特殊な表面処理をし、レーザー耐力の非常に高い反射防止面としている。

最終ディスク増幅器を出たところで、 $12 J/cm^2$ と非常に高いフルエンスになり、これが反射膜に当たると、たちまち壊れてしまう。それを防ぐためにビーム径を大きくしてピークフルエンスを下げ、レーザー光を伝搬させている。

激光XII号の性能は12ビームで、トータルエネルギーが約 20 kJ である。それを波長 0.5 μm

表 2 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 ● 回折現象の制御 	<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-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 ● 自働同期システム用光-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

に変換するが、変換効率は、約 70% である。したがって 14kJ までの 0.5 μm 波長レーザー光をターゲットに当てることができる。

表 2 にガラスレーザーのシステム設計における制限要因、制限要因の範囲内でできるだけ大きな出力エネルギーを得るためのシステム設計、それが光学部品に及ぼす効果を示す。

2. 高出力ガラスレーザー用光学素子³⁾²⁾

光学部品のところだけに着目すると、一つは、非常に大口径の光学部品が必要であり、また部品の数が多い。特に光損傷に強い光学部品が必要である。また使用環境が重要であり、ほこり等がガラスの表面についていると、そこにレーザー光が当たったときに、温度が上ってプラズマ化して、そのごみが光学素子の表面に焼きついてしまう。そうすると、ますます損傷をひどくするので、きれいな環境が必要である。

もう一つ重要な点として、非線形屈折率の小さな光学材料が必要である。レーザー光が強いと、光によってその屈折率が大きくなる。これを非線形屈折率と呼ぶ。レーザー光の強いところで屈折率が大きくなるので、その部分に凸レンズができ、自己集光して強度が強くなる。これを自己集束効果と呼ぶ。それが起こると、光学素子がすぐ破壊してしまうので、それを起こさないような材料が要る。それが非線形屈折率の小さな光学材料である。

10 年ぐらい前までは、レーザーガラスとして珪酸塩系のガラスが中心だったが、10 年ぐらい前に HOYA (株) が磷酸塩レーザーガラスで非常に高精度のものを商品化した。それを大阪大学のガラスレーザー装置でいろいろテストをした結果有用性が示され、いまそれを使っている。磷酸塩系ガラスの方が珪酸塩系ガラスよりも通常の屈折率が小さく、したがって非線形屈折率も小さい。したがって、現在は世界中のどこのレーザーシステムも磷酸塩系のレーザーガラスを使っている。

さらに非線形屈折率の小さなレーザーガラスとして、非磷酸塩系のガラスが開発されたが、実用上幾つか問題点があり、広く使われるところまでは至っていない。

光学素子としては収差の少ない素子が必要であり、また非球面の光学素子が要る。これは球面で構成すると、光学部品の数がふえシステムが複雑化しレーザー損傷も受け易いためである。

更に、波長変換用の KDP 結晶とか、あるいは短波長で高耐力の光学部品などが要求される。

表 3 に激光 X II 号のプロトタイプとして開発した激光 M II 号⁴⁾に使われている各種の光学素子のリストを示す。大きなものだけに着目すると、たとえばディスクの D 200 は、長径が 400 mm, 短径が 214 mm, 厚さが 32 mm の楕円形

表 3 ガラスレーザー激光 MII 及び激光 XII 用の主な光学素子
(アライメント及びレーザー光計測光学系を除く)

種 類	名 称	材 質	外 径 寸 法	個 数	
				激光 MII	激光 XII
レ ー ザ ー ガ ラ ス	R25	LHG-8	25φ×380mm	3	3
	R50	LHG-8	50φ×380mm	5	25
	D100	LHG-8	214×114×24mm	24	144
	D150	LHG-8	325×184×30mm	8	—
	D200	LHG-8	400×214×32mm	6	108
フ ェ ラ デ ー ガ ラ ス	FR 100	FR-5	120φ×20mm	2	12
	FR 150	FR-5	170φ×20mm	2	—
	FR 200	FR-5	220φ×20mm	2	12
誘 電 体 偏 光 子	OS 25	BK-7	66×38×5mm	8	8
	OS 50	BK-7	120×60×7mm	12	52
	FR 100	BK-7	230×120×10mm	8	48
	FR 150	BK-7	340×180×10mm	4	—
	FR 200	BK-7	448×240×10mm	4	24
ポ ッ ケ ル ス セ ル	OS 25	KDP	25φ	2	2
	OS 50	KDP	50φ	3	13
大 口 径 反 射 鏡 (ターゲット照射系)	GMII用	BK-7	最大 350φ×45mm	4	—
	GXII用	BK-7	最大 592φ×80mm	—	74
ス ペ ー シ ャ ル フ ィ ル タ ー 用 レ ン ズ	GMII用	BK-7	50φ~230φ (F 7~F 45)	16	—
	GXII用	BK-7	50φ~380φ (F 7~F 400)	—	78
タ ー ゲ ッ ト 照 射 用 レ ン ズ	GMII用	BK-7	有効径 200 F 2.8	32	—
	GXII用	BK-7	有効径 350 F 3	—	24
高 調 波 発 生 用 結 晶	GXII用	KDP	有効径 350φ	—	12

をしている。これが 108 枚使われている。その半分の大きさの D 100 は 144 枚である。

大口径の反射鏡は激光 XII 号の場合最大 592 mm, 厚さが 80 mm で、これは 74 枚使われている。

表 4 に使っている光学素子の仕様を示す。特徴としては均質度が非常に良く (10^{-6} のオーダー)、通常のガラスよりも 1 けたか 2 けたぐらいの品質が要求される。また泡とか脈理の規定も重要である。

研磨に関しては、エッジチップ、スクラッチ/ディグに関し高度なスペックを必要とする。研磨後の透過波面収差を規定しており、球面収差で $\lambda/4$ 以内、不整誤差で $\lambda/6 \sim \lambda/8$ 以内である。ここで波面を二次式にフィットする部分を球面収差、それから外れる部分を不整誤差として分けている。

更に波面収差の勾配も重要になる。非常に短い区間で波面が大きく変化すると、集光性能に

非常に大きな効果を及ぼすので、勾配がある一定以内でなければいけない。

実際つくったガラスの検査結果は、たとえばディスク 200 レーザーガラスの場合、108 枚の平均値が $\lambda/7.6$ ($\lambda=6328\text{\AA}$) となっている。

表 5 に光学部品の材料、研磨、表面処理(蒸着)の種類及び夫々の検査方法を示す。材質としては、レーザーガラス、ファラデーガラス、BK-7、フィルターガラスなどいろいろな種類がある。研磨法としては、大部分のものは高精度平面研磨(いわゆる RP 研磨)であり、レンズ等は球面研磨、あるいは非球面研磨を行う。

レーザーガラスはロッド状のレーザーガラスの場合長さが 40 cm にもなるので、たとえ屈折率の均質性が 1×10^{-6} であっても、両端面を平面に研磨したのでは、 $\lambda/6$ という透過波面におさまらない。そういう場合には、面の手修正も必要になる。これはかなり名人芸を必要とする。ダイヤモンドターニング加工は、KDP に

表 4 高出力ガラスレーザー用光学素子の仕様の例

	R 50	D 200	FR 200 用偏光子
(1) 外径寸法	50φ×380mm	400×214×32mm	448×240×10mm
(2) 材 種	LHG-8	LHG-8	BK-7
(3) 材 質			
(イ) 均 質 度	$< \pm 1.0 \times 10^{-6}$	$< \pm 2.0 \times 10^{-4}$	$\leq \pm 1.5 \times 10^{-4}$
(ロ) 残留歪 (nm/cm)	≤ 1	≤ 4	≤ 4
(ハ) 減衰係数 (m ⁻¹)	≤ 0.131	≤ 0.131	≤ 0.2
(ニ) 泡及び不純物		$\leq 0.03 \text{ mm}^2/100 \text{ cc}$	
●断面積総和			
●最大径 (mm)	0.15	0.15	0.20
(ホ) 脈 理		シュリーレン法にて観測されないこと	
(4) 研 磨			
(イ) エッジチップ			
●総数/エッジ	≤ 3	≤ 10	≤ 16
●最大径 (mm)	0.2	0.2	1
(ロ) スクラッチ/ディグ	30/10	30/10	30/20+ #50×2
(ハ) 透過波面取差 ($\lambda=0.633 \mu\text{m}$)			
●球面収差	$\lambda/4$	$\lambda/2$	—
●不整誤差	$\lambda/6$	$\lambda/6$	$\lambda/8$
●匂 配	$\lambda/12/\text{cm}$	$\lambda/30/\text{cm}$	$\lambda/20/\text{cm}$
(5) コーティング面			
(イ) コーティング面	端面全域	—	閉口面全域
(ロ) 透 過 率	反射率 $\leq 0.1\%$ ($\lambda=1.053 \mu\text{m}$)	—	$T_r \geq 95\%$
	$\leq 5\%$ ($\lambda=1.053 \mu\text{m}$)		$T_r \leq 1.5\%$
(ハ) 耐レーザー光強度		4J/cm ² (1ns)	4.5J/cm ² (1ns)

表 5 光学部品の加工と検査

材 料	研 磨	蒸 着
[材 質] ●レーザーガラス ●ファラデーガラス ●BK-7 ●KDP ●フィルターガラス ●短波長光用光学材料	[研 磨 法] ●高精度平面研磨 ●球面研磨 ●非球面研磨 ●面の手修正 ●ダイヤモンドターニング加工	[蒸着・表面処理] ●真空蒸着 ●イオンプレーティング ●スパッタリング ●化学処理法
[検 査] ●均 質 度 ●残 留 歪 ●減 衰 係 数 ●泡・不純物 ●脈 理	[検 査] ●反射波面 ●透過波面 ●曲率半径(球面) ●曲面の形状 ●スクラッチ/ディグ ●エッジチップ	[検 査] ●反射/透過波面 ●スクラッチ/ディグ ●エッジチップ ●反射・透過率 ●偏光特性 ●レーザー耐力

対して行っている。

蒸着は、通常は着空蒸着を行っているが、そのほかに化学処理法というものがある。

それに対して検査をきっちり行うことが非常

に重要である。激光XII号を開発していく過程で、光学素子の検査の方法等の規定をはっきりさせ、それによって全部品検査を行った。

3. 高出力ガラスレーザーの短波長化

レーザーの短波長化をするには非線形結晶を使う。ガラスレーザーの場合は非常に口径が大きいので、大きな結晶をつくれるものとしては、KDP しかない。図 4 は 2 倍高調波を発生させる場合の KDP 結晶切出し角度を示す。切り出した結晶にウィンドガラスをつけて、レーザー光を通す。切出し角度は波長で決まってお

り、波長 $1.05 \mu\text{m}$ に対しては $58^\circ 52'$ である。

KDP は潮解性の結晶なので、セルの中に入れ、その中にインデックスマッチング液を満たし、セルの表面に AR コーティングする。激光 XII 号の場合、口径が 360 mm と、世界一の大きな結晶を使用している。

いま激光 XII 号は、グリーンの光(波長 $0.5 \mu\text{m}$)で使用している。さらに短長波化するため 3 倍の高調波にするテストを激光 M II 号⁴⁾で行っ

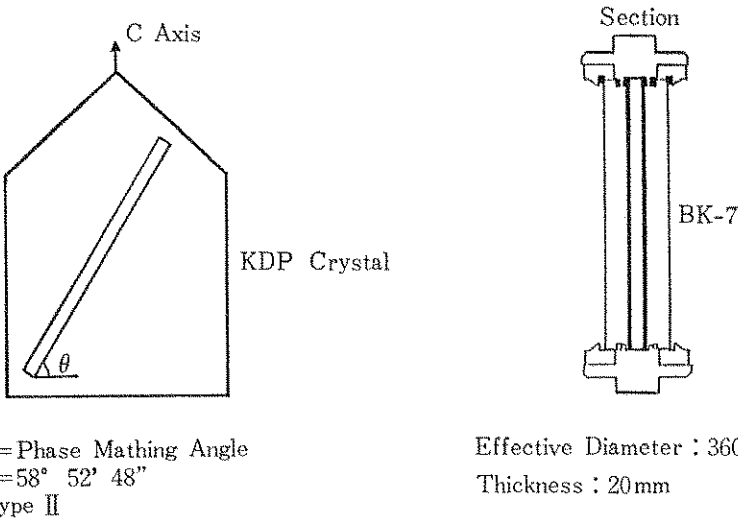


図 4 2 倍高調波発生用 KDP 結晶

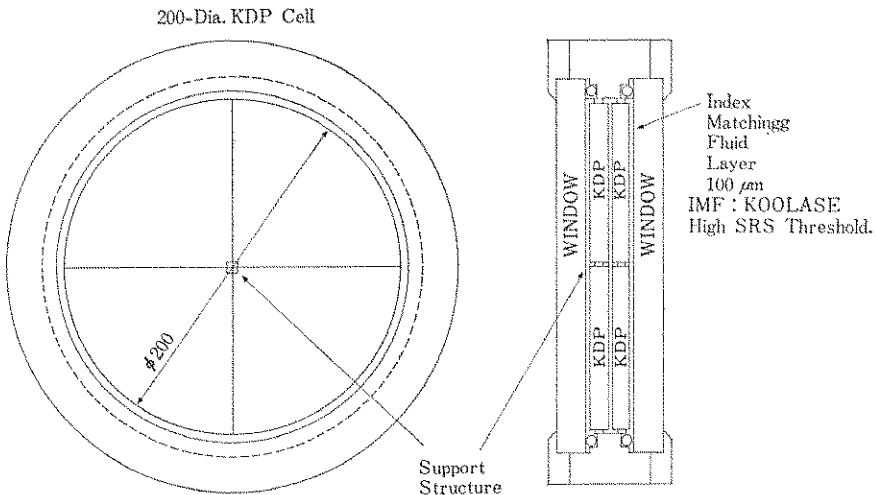


図 5 3 倍光高調波発生用 KDP セル

ている。レーザー光を短波長化すると、ターゲットでのレーザー光の吸収率が上がり、また圧縮効率が向上するためである。

総合的に見て、短波長化した方がはるかにパフォーマンスがよくなるということがいろんな研究でわかっており、そのために短波長化をする。

3倍の高調波を発生させるには、KDPの結晶を二つ通す(図5)大きなKDPの結晶がいつでも手に入れがいいが、必ずしもそうはいかない。図5の場合は直径200mmのビーム径であるが、それを4分割し、直径100mmのKDPを四分の一の円に切り、それを組み合わせて一つのものとする。したがって、このセルには全部で8枚KDPが使われている。

KDPの角度には非常に高い精度が要る。KDPはダイヤモンド切削加工で面研削、角度出しを行う。一たん4枚組み上げた後、それぞれに調整装置をつけていると非常に大変なので、そういうものは一切つけないで、仕上がり加工の精度だけで全部押えてしまう。表6に

表6 KDP加工精度

1. DIMENSION	
$R=104.5\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$	
◎ THICKNESS	$12\text{ mm} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$
◎ ANGLE	$90^\circ \pm 1'$
2. SURFACE ACCURACY	
◎ PARALLELISM	$< \pm 5''$
◎ FLATNESS	$< \lambda/2$ ($\lambda=6328\text{ \AA}$)
3. PHASE MATCHING ANGLE	
$\Delta\theta \leq \pm 12'' \cdot \text{ccm}$	
$\Delta\alpha \leq \pm 2.9^\circ$	
$\Delta\phi \leq \pm 2.9^\circ$	99% CONV.
4. SURFACE ROUGHNESS	
$R_{\text{max}} < 0.02\text{ }\mu\text{m}$	

KDP加工精度を示す。厚さの精度 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内、平行度は $5''$ 角度精度が $12''$ 以内、サーフェスラフネス $0.02\text{ }\mu\text{m}$ の精度で仕上げている。

集光部分の配置を図6に示す。KDPの結晶により、3倍の高調波に変換されたレーザー光が通る光路に、真空シールドガラス集光レンズ、さらにブラストシールドガラスがある。 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ は紫外線なので、紫外領域での光学素子の特性が問題になる。

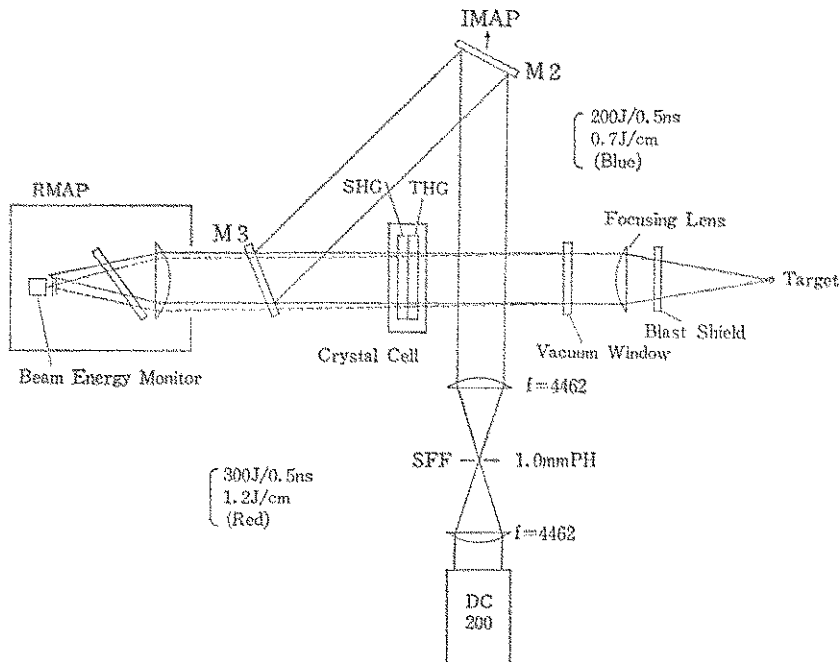


図6 激光 MII 号集光部光学系

表7は波長 $0.35 \mu\text{m}$ の光でいろいろなガラスがどのような変化をするかを測定した例で、アメリカのロチェスター大学のデータである。ソラライズドというところがほとんどを占めており、殆どのガラスは着色してしまう。ノーチェンジというのがいいわけで、そういうものを探していくが必要になる。

阪大レーザー研でも幾つかテストを行った。

図7に示すテスト用のレーザー装置で高調波を発生させてサンプルに通し、そのサンプルを通ってくる光量をはかって、そのサンプルの透過率を計測する。

表8は、ソラライゼーションが起こる前の、初期の特性である。この中では、BK-7 はあまり透過率はよくないが、FK-5 はかなり透過率が良い。

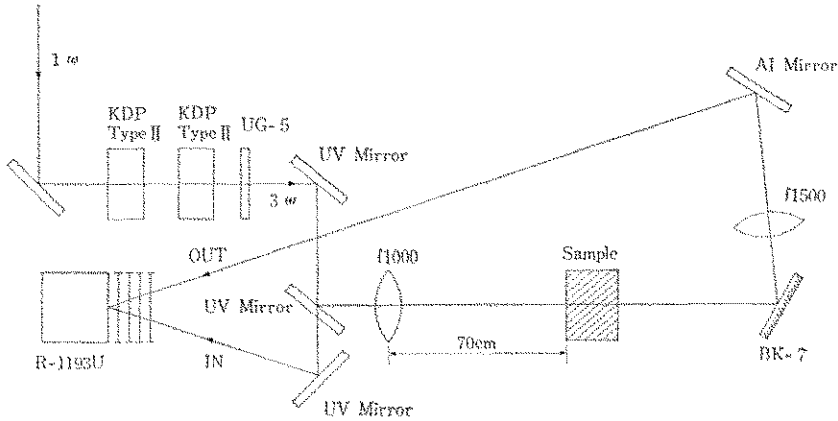


図7 3倍高調波光による光学部品のテスト

表7 波長 $0.351 \mu\text{m}$ レーザー照射により受ける各種光学部品の着色あるいは損傷

					observations at			
					#Shots	$0.5\text{J}/\text{cm}^2$	$1.0\text{J}/\text{cm}^2$	$4.0\text{J}/\text{cm}^2$
● Transmissive Optics for Windows and Lenses								
Silicate glass	ED-2	OI	1	1	—	solarized	—	—
	ED-6	OI	5	1	solarized	—	—	—
Borosilicates	BK-7	Schott	13	1	—	solarized	—	—
	ARG-2	Hoya	12	2	—	solarized	—	—
Phosphates	BK-10(UV)	Schott	3	4	—	—	—	no change
	LHG-8	Hoya	3	1	solarized	—	—	—
	P250	Kigre	16	4	—	solarized	—	—
Fluorophosphate	WG-280	Schott	2	19	solarized	—	—	—
	FK-54(UV)	Schott	17	4	—	—	—	sudst. bulk dmg.
Fluoroberyllate	FCD-10N	Hoya	11	4	—	—	—	no change
	816 KY	Corning	12	2	—	solarized	—	—
Fused silica	7940	Corning	7	5	—	—	—	no change
● Filter Glasses for $0.351 \mu\text{m}$								
0.351 μm pass	UG-11	Schott	3	19	solarized	—	—	—
	LCF-2	Hoya	5	2	—	—	—	no change
0.351 μm ND	GG 375	Schott	1	3	—	—	—	no change
● Optical Plastics for Blast Shields								
	CR-39	PPG	3	3	—	—	—	some bulk dmg.
	MYLAR	Dupont	0.013	1	decomposition	—	—	—
	PVA	Polaroid	0.050	1	decomposition	—	—	—

これに繰り返しショットすると、ショット数に対して透過率がだんだん減少していく。BK-7は急激に透過率が低下するが、FK-5はかなり少ない。いろいろテストした結果、やはり熔融石英が一番良いということになり現在は熔融石英を使っている。

次に、レーザーによる損傷の話をする。レーザー波長が $1\mu\text{m}$ の場合、反射防止膜のレーザー耐力は、アンダーコートしていないもので大体 $3\sim 4\text{J}/\text{cm}^2$ ぐらい、アンダーコートしたもので $4\text{J}/\text{cm}^2$ から、非常によくてもせいぜい $8\text{J}/\text{cm}^2$ ぐらいである。

我々が行ったNSP（ニュートラルソリューションプロセス）はやレーザーガラスの表面を化学的に処理するが、これによってレーザー耐力が $10\text{J}/\text{cm}^2$ から、条件によっては $25\text{J}/\text{cm}^2$ ぐらいまで上昇する。

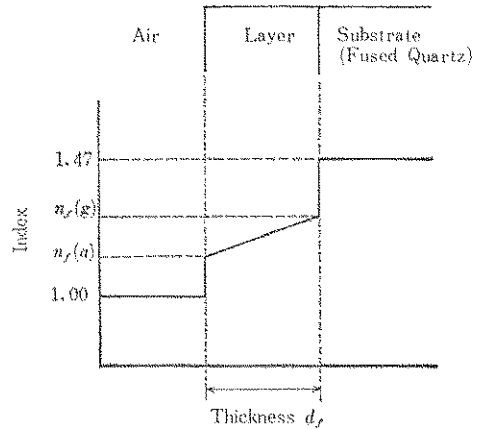
NSPの変形でポーラスARコーティングという我々の開発したAR膜がある。これは $13\text{J}/\text{cm}^2$ までいく。また高反射膜は、従来は大体 $6\text{J}/\text{cm}^2$ 位まで耐える、物によっては $13\text{J}/\text{cm}^2$ 位まで耐える。

ボラライザーは透過型の蒸着膜であり、透過型の場合は耐力が悪く $5\sim 7\text{J}/\text{cm}^2$ ぐらいで、なかなか向上できないで現在に至っている。

先ほどのNSP（ニュートラルソリューションプロセス）のAR膜は、昔からよく知られている方法であるが、ガラスの表面を化学的に処理し、アルカリ成分を外へ出してしまふ。そうすると図8に示すように屈折率が下がる。

こういう膜は非常にブロードバンドな反射防止特性を持っている。（図9参照）。図9に示す膜は $0.35\mu\text{m}$ で反射率が最小になるように作成した例だが、そのとき黒丸が実測値、点線が先ほどのような段階状屈折率で変化した場合の計算式で、その計算式とよく一致するということを示している。

化学処理する場合の処理時間に対して反射率が除々に変化するが、大体20時間ぐらいかけて反射率が変わっていく。可視光（ $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ ）の範囲内で反射率が最小になるように処理したとすれば、可視光全体にわたり大体 0.5% 以下



$$R \approx 1 - \frac{4n_f a n_f g n_q}{(n_f a n_q + n_f g)^2 - (n_f a^2 - 1)(n_g^2 - n_f g^2) \sin^2 \frac{1}{2} \delta_0}$$

$$\delta_0 \approx \frac{2\pi}{\lambda} (n_f a + n_f g) d_f$$

"Reflectance for an aoyake layer" by Schröder
Ann. physik vol 39, 55 (1941)

図8 化学処理されたガラス表面の屈折率勾配

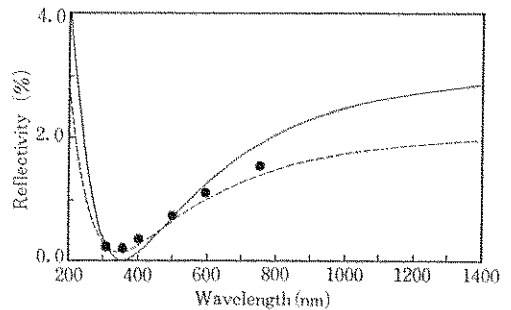


図9 NSP処理ガラスの反射率曲線

の反射率に十分抑えることができる。

図10はレーザー耐力を測るために我々が用いている装置である。試料で発生するダメージは非常に小さいわけで、肉眼ではほとんどわからないものを検出しなければいけない。このためノマルスキーの顕微鏡を使い、非常に小さなダメージを検出し、その結果よりダメージスレッショルドを決定する。

表9に、波長 $10.53, 527, 355\text{nm}$ の光に対する損傷しきい値の測定結果を示す。通常の多層コートした反射防止膜の場合は $10\text{J}/\text{cm}^2$ 以下ではほとんど破壊する。それに対してリーチン

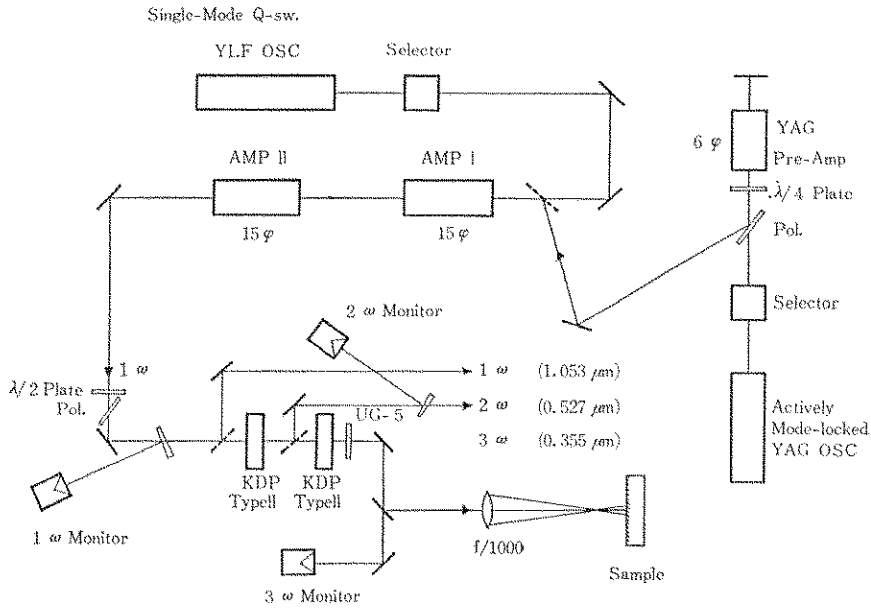


図10 レーザー損傷テスト装置

表 8 3倍高調波 (0.35 μ m) に対する光学ガラスの初期透過率

Sample	Sample Length (cm)	Transmission (%)	Linear Absorption Coefficient (cm^{-1})
BK-7	4.0	84	0.03
BK-3A	4.4	78	0.04
BSC-3N	3.0	86	0.02
BK-10S	5.0	84	0.02
FK-5	4.0	90	0.006

グ (NSP) したもののダメージの範囲は大体 10 J/cm^2 から 17~18 J/cm^2 ぐらいの範囲まで広がっている。それをさらに、1発で強い光を入れないで、弱いレーザー光を何回も当ててからレーザーのフルエンスを上げると、非常にダメージが起りにくくなる。

ダメージが起る場合は吸収中心があって、レーザー光のエネルギーがそこにデポジットされ、それで溶けてダメージが起るというふうに考えられる。したがって小さいレーザー光でそういう吸収中心を吹き飛ばしてしまうと、ダメージが起りにくくなり、コーティング処理していない洗浄表面のガラスのダメージにほとんど近い程度まで向上する。

上記は波長 1 μm の光に対するデータである

が、短波長になるとさらにダメージが起りやすくなる。たとえば 0.35 μm になると、表 9 の ARコーティングの場合、単層で 2~4 J/cm^2 ぐらい、多層になると 3 J/cm^2 ぐらいまで低下する、最近我々が開発したポーラスなダイエレクトリックコーティング⁶⁾は 6~8 J/cm^2 ぐらいと、非常に高いレーザー耐力が得られている。この膜は 2倍高調波だと 12 J/cm^2 、1倍高調波でも 12~13 J/cm^2 ぐらいと全波長域にわたってかなり強いレーザー耐力が得られている。

4. 光学素子の取扱い

次に、光学素子の取り扱いについて簡単に触れる。図11は我々の使っている激光XⅡ号洗浄用クリーンルームである。クラス 100のクリーンルーム内に、多数のクリーンベンチを置き、そこでレーザーガラス等をきれいにする。

いろいろな道具を使っているが、代表的なものとして、気密ブース、スプレーガン、フレオン、プラズマクリーナー、超音波洗浄装置などを使用する(表10)。

図 12 はディスク増幅器を分解した構造図である。レーザーガラス、ステンレスでつくったラダーストラクチャー、フラッシュランプ、リ

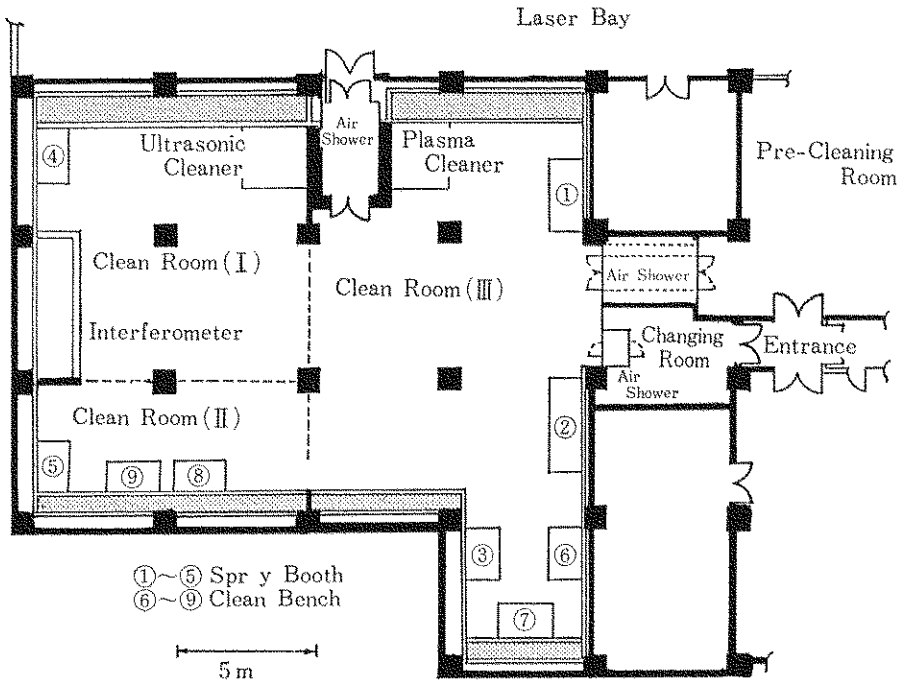


図11 激光X II号用クリーンルーム

表 9 各種 AR コーティングのレーザー損傷しきい値測定結果

AR coatings	Damage threshold (J/cm ²)	Laser	Coating materials and layers
Multilayer	3- 4	1053 nm 1 ns	No-undercoat TiO ₂ /SiO ₂ , 2-6 layers
Multilayer	4- 8		λ/2 SiO ₂ undercoat TiO ₂ /SiO ₂ , 3-7 layers
Porous dielectric	12-13		
Multilayer	2.5-3.5	527 nm 1 ns	No-undercoat TiO ₂ /SiO ₂ , 2-6 layers
Multilayer	4- 5		λ/2 SiO ₂ undercoat TiO ₂ /SiO ₂ , 3-7 layers ^s
Porous dielectric	12		
Monolayer	2- 4	355 nm 0.4 ns	λ/4 SiO ₂
Multilayer	1- 3		λ/2 SiO ₂ undercoat Al ₂ O ₃ /SiO ₂ SO ₃ O ₃ /SiO ₂
Porous dielectric	6- 8		3-7 layers

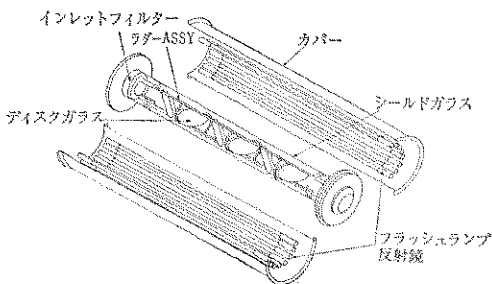


図12 ディスク増幅器

フレクターなどの光学部品と機械部品を個々全部きれいにする必要があります。

レーザーガラスの場合非常に丁寧に扱わなければならないので、有機溶剤で手拭き洗浄をして、それからプラズマ洗浄を行う。すなわち酸素雰囲気中で高周波放電を行い温度を上げて炭化物等を CO₂ にして蒸発させてしまう。

金属部分は、クリーンベンチ内でスプレー洗浄をする。このスプレーには、従来フロンを使っていたが、フロンは非常に多くのごみの中に含んでいるので、最近では超純水でスプレー

洗浄を行っている。洗浄した液をサンプリングし、顕微鏡でダスト数をカウントして、その値がある一定の基準以下になって洗浄完了とする。この作業のフローチャートを図13に示す。

有機溶剤には非常に多くのごみとか残渣が含まれている。アルコール、アセトン、エーテル、1級、特級、残留農業級など、いろいろありメーカーもいろいろあるがテストしてみると非常に千差万別で、よほど選んで注意していいものを使わないと、洗浄しているのか汚しているのかわからない。あたりまえのことではあるが、非常に重要である。

表 11 は高圧スプレーガンによる金属品の洗浄結果である。通常、ガラス部品は、金属部品の中に保持されているので、金属部品がきれいになっていないと汚れてしまう。70 気圧という非常に高圧の超純水で汚れを吹き飛ばす。洗浄後のダスト量が超純水の場合 333 と出るがフレオンの場合はもっと多い。結果は超純水でスプレー洗浄するのが一番よい。

5. 高平均出力固体レーザーの

最近ガラスレーザーの高出力化がいろいろと試みられている。図 14 (a) は、スラブレーザーと呼ばれるもので、板状のレーザーガラスの

表10 組立洗浄室主要洗浄用機器

名 称	性 能	用 途
気密ブース スプレーガン	無塵送風換気 (低圧用～5気圧) (高圧用～70気圧)	洗浄、組立 フレオン、超純水使用
フレオ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 18MΩ・cm	
プラズマクリーナー	型 (S/N82035)	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

中に光をジグザグに通す。レーザーガラスは厚さが数 mm、たとえば 5 mm ぐらい、幅が数 cm 長さが数十 cm でガラスのボリュームとしては非常に大きい。このため大きな出力をとりやすい。もしこれをロッド状にしたとすると、ロッドの直径が太くなるので、強い励起を与えるとストレスが生じてガラスが破壊してしまう。

図 14(b) は、板状のレーザーガラスに斜めにレーザー光を通す。この場合もガラスは板状であるから、熱を逃がすことが非常に容易である。冷却媒体として液体を用いると光路を乱す

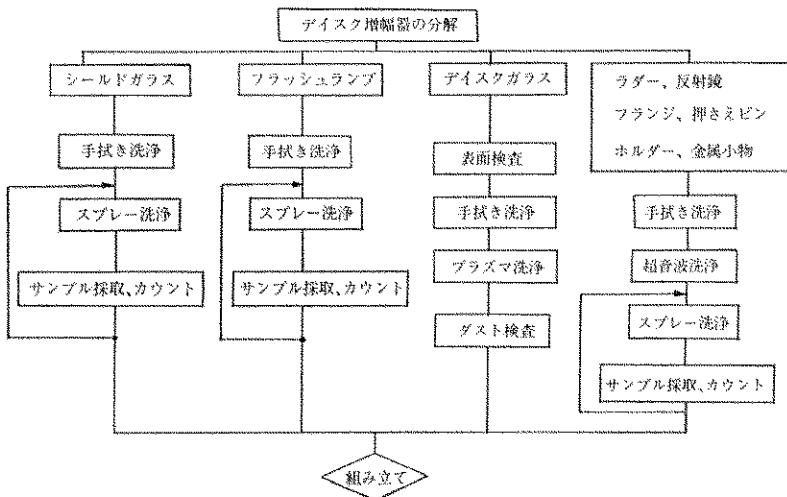


図13 ディスク増幅器洗浄フローチャート

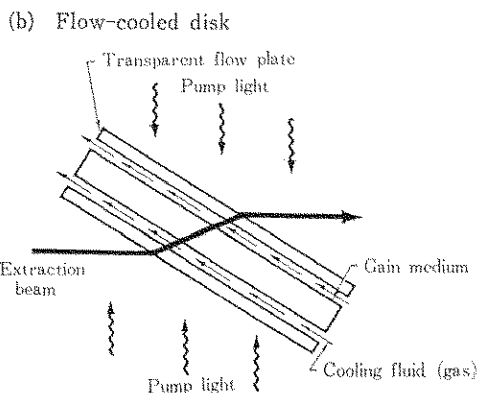
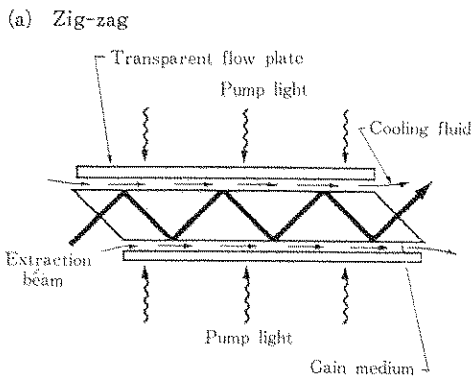


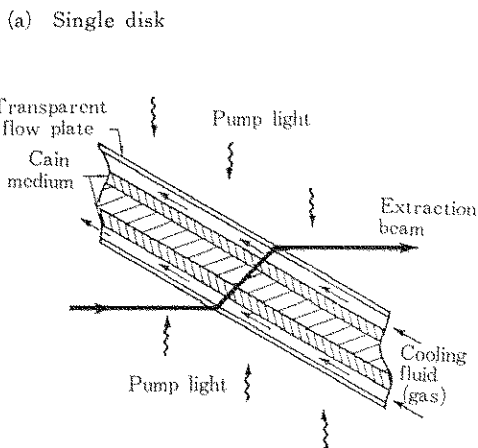
図14 高くり返し固体レーザー

のでヘリウムガスのような気体を用いる。

レーザーガラスの厚さを余り厚くしたくない場合は、図 15 に示すコンポジットガラスを使用する。中心部分は普通の透明ガラスで、その表面にレーザーガラスを付ける。励起光は表面だけで吸収されるため、励起効率は非常に良く、かつ、機械的にも強いものができる。さらにこういうものを何枚も層状にすると、さらに高出力が得られる。

固体レーザーでどの程度の高平均出力が得られるか現在いろいろな形で実験されている。現在の YAG レーザーは、1 pulse 当たりのエネルギーが大きいもので数 J/pulse ぐらいまで得られる。繰り返し 1,000 pps 程度まで上げられ大体 100 W ぐらいまでの出力が得られる。要するに YAG の場合は、どちらかという高くくり返して平均出力が高い動作に適している。

これに対して、ガラスは大きなレーザーガラスが使えるので、1 pulse 当たりのエネルギーは大きくとれる。しかし、繰り返しは上げられ



(b) Multiple disks

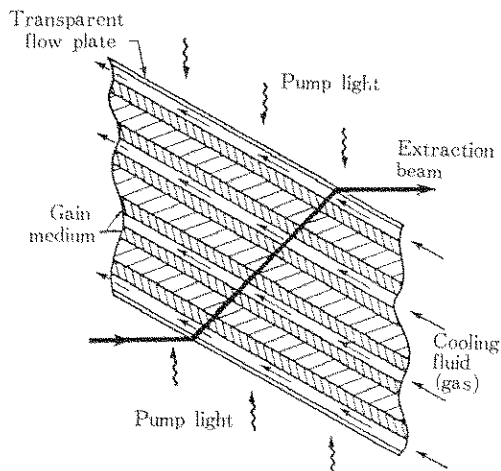


図15 複合構造 (コンポジット) レーザー

ない。スラブ状のレーザーガラスを使って、どこまで平均出力が上げられるかが現在の開発課題である。これが非常にうまくいけば、たとえばレーザーガラスを使って 1 kW、あるいは 10 kW 級の固体レーザーをつくれるかもしれない。その対抗馬としては、YAG よりも大きな結晶をつくれる、たとえば GGG といった新しい結晶が考えられる。

表 12 に各種材料の熱破壊に関する性能指数を示す。この表には、アメリカのレーザーガラスが示されているが、ED-2 は珪酸塩ガラスで、LG-750 とか Q-100 はリン酸塩ガラスで

表11 高圧スプレーガンによる洗浄度 (70 気圧…30 sec)

	手ふき洗浄→窒素ガン (5 気圧) のスプレー洗浄後ダスト量 (個)	高圧スプレーガンによる洗浄後ダスト量 (個)	高圧スプレーガン洗浄 手ふき洗浄+窒素ガン洗浄
超 純 水	5.8×10^5	333 (0.1個/cm ²)	$\frac{1}{1800}$
フ レ オ ン	9.2×10^5	1330 (0.5個/cm ²)	$\frac{1}{700}$

使用サンプル アルミニウム 2700 cm²

表12 高出力固体レーザーの性能指数, $R_T = S_T \frac{(1-\nu)\kappa}{\alpha E}$

Material	屈折率 n	ポアソン比 ν	熱伝導率 κ (W/m°C)	熱膨張係数 α (10 ⁻⁶ /°C)	ヤング率 E (kg/mm ²)	表面破壊強度 S _T (kg/mm ²)	性能指数 R _T (W/m)
Glasses							
ED-2	1.56	0.24	1.35	8.0	9,190	~10	140
LG-750	1.53	0.26	0.62	11.4	5,150	5.5	43
Q-100	1.56	0.24	0.82	9.6	7,150	6.5	59
Fused SiO ₂	1.45	0.17	1.38	0.55	7,190	5.0	1,450
Zerodur	1.54	0.24	1.64	0.12	9,060	9.3	10,600
Crystals							
Al ₂ O ₃	1.76	0.27	42	~5.0	35,230	~55	10,000
MgO	1.67	0.18	59	11.0	25,450	37	5,000
YAG	1.81	—	13	7.8	31,725	~20	~790
GSGG	1.92	~0.15	~8	7.8	21,000	~17	~700
BealsO ₄	1.73	—	23	~6.5	44,550	~60	~3,570
MgF ₂	1.38	0.27	21	~10.0	17,625	~5.4	~470
LiYF ₄	1.45	0.33	6	~10.0	7,650	~3.4	~180

ある。後者は前者の半分ぐらいの破壊強度である。

ガラスの場合は結晶に比べ破壊強度が小さくて、熱伝導率が小さいので、性能指数は YAG の 790 に対してガラスは 100、あるいはそれ以下となる。もっと結晶に近い性能指数を持つレーザーガラスができれば非常に画期的である。

6. ま と め

最後のまとめとして、レーザー用ガラスの今後について幾つか気のついた点を述べる。

まず、レーザーガラスに関しては、激光Ⅱ号のような高出力ガラスレーザーシステムの大型化が必要になってきている。

レーザーガラスのソラリゼーションはずいぶん昔から問題になり、非常に特性はよくなってきてはいるが、まだ皆無とに言えない。もう少しソラリゼーションの少ないレーザーガラスが望ましい。

次に内部ダメージの問題がある。これもずいぶん歴史の古いことである。最近また若干問題になってきている。非常に大きなレーザーガラスをつくったときに、それに内部ダメージが起るといことは致命的な問題であり、これの防止が必要になってきている。

非常に大きなレーザーガラスが必要になっている。生産コストの低減が、大きなガラスレーザーシステムを実現する場合のリミテイングファクターとして、重要な項目として挙げられる。

次に、高繰り返しガラスレーザーについては、表面破壊強度の強いつまり機械的に強いガラス、熱伝導率が良いガラス、それから励起効率のよいレーザーガラスが必要である。ネオジウム以外に、たとえばクロムをドープし励起光をより効率よく吸収させるとガラスレーザーの効率が飛躍的に向上する。

光学ガラスに関しては、短波長レーザー用光

学部品が重要である。紫外透過率の向上、紫外レーザー光でソラリゼーションのないものが挙げられよう。

関連光学部品としては、高反射膜について紫外域でのレーザー耐力の向上が必須条件になっている。最近の新しい応用の面から言うとX線用の高反射膜が必要になってきている。

透過膜に関しては、偏光型の反射膜のレーザー耐力がまだ低い。反射防止膜は、なかり高耐久化のめどがついてきたと私もは思っている。

さらに励起光源が必要である。通常キセノンフラッシュランプあるいはクリプトンアークランプを使っているが、紫外光が非常に強い。グリーンで発光するフラッシュランプが出来ると励起効率が大きく向上する。半導体レーザーで励起するというのも非常に望まれるが、この場合、半導体レーザーあるいは発光ダイオードの高出力化が要る。

加工技術に関しては、表面粗さが最近非常に問題になってきている。表面の平坦度を良くすると、誘電体多層膜のレーザー耐力が向上する。散乱の少ないミラーはレーザージャイロに不可欠である。またX線素子等の性能はこれで支配される。

最後に、研削、研磨、蒸着等の工程を一貫することが必要である。これらを別々の工程で行い、お互いのことを知らない場合どこかで一つ

でも手抜きができるの良いものがない。生産の面でこういう点に留意することが重要ではないかと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 山中千代衛, 加藤義章, 日本原子力学会誌 **26** [5], p. 362 (1984)
- 2) 加藤義章; 光学材料・部品の加工技術(今中修監修), 総合技術センター p. 201 (昭58)
- 3) 吉田国雄, 加藤義章; 光学 **14** [7], p. 175 (1985)
- 4) Y. Kato et al. Appl. phys Lett. **39** [2], p. 72 (1981).
- 5) 佐々木孝友, 横谷篤志, 山中龍彦, 山中千代衛; レーザー研究 **13** [6], 500 (1985)
- 6) K. Yoshida, H. Yoshida, Y. Kato and C. Yamanaka; Appl Phys. Lett, **47** [9], p. 911 (1985)
- 7) J.L. Emmett, W.F. Krupke and W.R. Sooy; UCRL-53571, Lawrence Livermore National Laboratory (1984)

〔著 者 紹 介〕



加藤義章 (かとうよしあき)

昭和40年3月東京大学工学部応用物理学科物理学課程卒業, 昭和45年3月東京工学系研究科博士課程修了。工学博士。昭和46年4月日本電子(株)開発事業本部研究員。昭和47年10月トロント大学物理学科研究助手, 昭和50年8月大阪大学助教授(工学部レーザー工学研究施設), 昭和58年5月大阪大学教授(レーザー核総合研究センター)。現在に至る。この間、レーザーを用いた気体・液体・固体の高分解能分光学、高効率エキシマーレーザー、高出力ガラスレーザーシステム、レーザー核融合実験等の研究に従事してきた。