



超高性能光学素子

村上 敏貴・平山 義一・浅見 武史

(株)ニコン相模原製作所レンズ部 〒228 相模原市麻溝台 1-10-1

(1990年6月9日受理)

Advanced Optical Elements

Toshitaka MURAKAMI, Yoshikazu HIRAYAMA and Takeshi ASAMI

Lens Division, Sagami-hara Plant, NIKON Corp.,
1-10-1, Asamizodai, Sagami-hara 228

1. はじめに

カメラ、メガネ等の可視域で使用される古典的な光学素子と異なり、レーザーの進歩に伴い、波動光学、量子光学的な立場から設計される種々の光学素子について、ナノメートルオーダーもしくはそれ以上の非常に厳しい精度が要求されるようになってきている。また可視域外でのハイパワーレーザー下で使用される場合も多くなってきている。これらの高精度な要求を満たすために、材料の選択、研磨加工、成膜加工、計測に細心の注意と高度な技術が必要となり、現在、活発な研究開発が行われている。本稿では本紙8月号に特集されている量子光学の分野で使用される超高性能な光学素子について、物造りの立場から、加工技術の現状について紹介する。

2章では表面粗さ、面精度に着目して研磨技術および計測技術について述べ、3章では高反射、低損失、耐レーザー性に着目して成膜技術および計測技術について述べ、4章では超高性能光学素子の具体的な例として、エキシマレーザーの狭帯域化に使用されるファブリペローエタロンについて紹介する。

2. 超精密加工技術および測定法

通常のレンズ・ミラー等に要求される機械的精度としては、①曲率半径精度や球面精度、平面精度などの形状精度、②表面の微細な凹凸である表面粗さ、また局所的なスクラッチ、ディグなどのキズ、が挙げられる。①は光学系の結像性能、波面収差等に影響し、②はミラー表面での光の散乱、それにより誘起される発熱、面精度劣

化、レーザー耐力等に関係してくる。

2.1 超精密研磨加工技術

光学素子として使用される加工面は現在でも最終仕上げとして、遊離砥粒による研磨加工を施すのが主流である。これは、初めに述べた大出力レーザーや短波長領域の光源に対して使用される素子は、その基材として、ガラス、セラミックス、各種結晶材料等がおもに用いられ、このような脆性材料に対しては、切削、研削等の切込み規制方式の加工よりも、ラッピング、ポリシングのような圧力規制方式の加工が適していると考えられているためである¹⁾。研磨加工は微細な研磨砥粒を液中に分散させたスラリー状の加工液を介して、加工物とラップ、ポリシャ（ピッチやポリウレタン製不織布等）とを相対的に擦り合わせることにより、高精度の加工を行う。その加工機構ゆえに加工機や工具の精度以上の加工精度が得られるという特徴を有する。

従来からよく用いられてきた揺動型の研磨方式とは異なり、 $\lambda/50$, $\lambda/100$ という高精度面を得る技術として、近年平面研磨加工の分野でリングポリシャと呼ばれる輪帯状のポリシャをもった遊星運動型の研磨機が開発され、高平面精度を比較的容易に得られるようになった。加工機も大型化が可能で、現在直径2.5m以上のポリシャをもつものも製作されている²⁾。米国 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) で稼働中の同機は $\phi 800$ まで加工可能である。リングポリシャの加工原理図を図1に示す。研磨加工における材量除去量は、

$$dW = CPVdt \quad (1)$$

と表される。 W は除去量、 C は定数、 P は加工圧力、

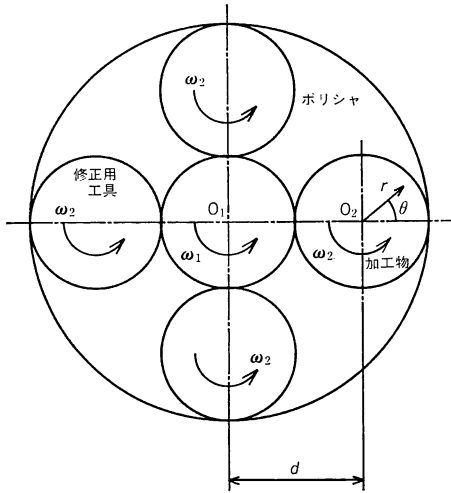


図1 リングポリシャ加工原理図

V は相対速度である。加工物の厚みを一定とすると、平面加工の場合、 $P=const.$ である。加工物上の任意の点と工具面との相対速度は、

$$V = [d^2\omega_1^2 + r^2(\omega_1 - \omega_2)^2 + 2dr\omega_1(\omega_1 - \omega_2)\cos\theta]^{1/2} \quad (2)$$

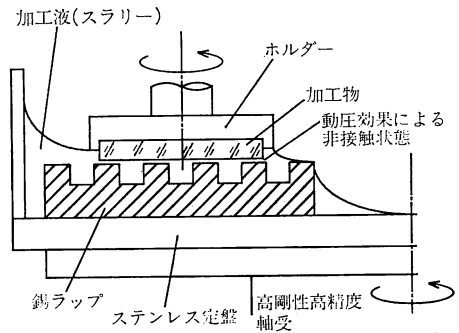
となる。ここで $\omega_1 = \omega_2$ とすることにより、 $V = d\omega_1$ となり、加工面全面で V は一定となるため、加工物の全面において一様な材料除去が行われることになる。しかし、ポリシャは粘弾性体であるため、工具面形状は刻々変化する。輪帯幅以上の径をもつ修正用定盤もしくは輪環をポリシャ上に配置する。ポリシャ-加工物-修正用工具間のわずかな回転数誤差 $\Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2|$ 、修正用工具の位置 d 、さらにポリシャの種類や砥粒の種類、粒度、濃度等も面精度や表面粗さに大きく影響を及ぼすファクターとなる。加工物径にもよるが、面精度 $\lambda/100$ 以上も達成可能である。球面形状に対しても同様の原理に基づく加工法が提案されている³⁾。

リングポリシャと同じく接触加工方式で高精度な面を得る方法として、スモールツール方式と呼ばれる部分修正研磨法がある⁴⁾。これは、加工物よりも十分小さな研磨ヘッドを用い、加工物と理想の面形状との形状誤差をあらかじめ干渉計等により計測し、各部の必要除去量をNC制御で加工面を順次走査することにより、高精度な面を得ようとする方法である。米国パーキン・エルマー社においてもCCP (Computer Control Polisher) と称する同様の加工方式が開発されており、 $\lambda/100$ 程度の面精度の得られたことが報告されている⁵⁾。なお、この方法は、平面、球面、非球面と多様に対応可能という特徴

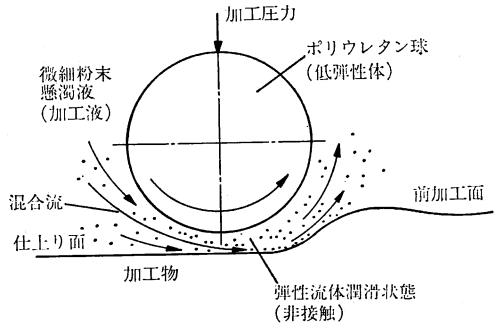
を有する。

2.2 非接触式研磨加工法

非接触研磨加工の例として、フロートポリシング法とEEM (Elastic Emission Machining) 法について紹介する。フロートポリシング法は大阪大学の難波らによって開発された超精密研磨法である⁶⁾。図2(a)はその加工方式の概略図である。ラップ工具として錫などの金属材料を用い、この表面をあらかじめダイヤモンドバイトにより高精度に平面切削加工し、さらに溝加工を施す。加工液として SiO_2 等の微細粉末を分散させたスラリーを用いる。ラップと加工物を高速回転させ、その際生ずる液体の動圧効果により非接触状態を実現し、砥粒の運動エネルギーと加工物との化学作用により除去加工が行われる。材料表面に加わる加工圧がきわめて小さいため、加工物に与えるダメージも小さくすることができる。石英ガラス、ULE (米: Corning 社)、Cer-Vit (米: Owens-Illinois 社)、Zerodur (独: Schott 社)、サファイア等の加工例がある。表面粗さとして、サファイアで $R_{rms} 0.8 \text{ \AA}$ 、Zerodur で $R_{rms} 1.0 \text{ \AA}$ 、SiC で $R_{rms} 1.1 \text{ \AA}$ の数値の得られたことが報告されている⁷⁾ (R_{rms} : 表面粗さ Roughness の表示法で、二乗平均粗



(a) フロートポリシング法



(b) EEM法

図2 非接触式超精密研磨加工法概略図

さを表わす).

EEM 法は大阪大学の森らによって開発された極微小弾性破壊を利用した超精密研磨法であり、すでに詳細な検討が行われている⁹⁾. 図 2(b)はその加工概略図である. 0.数 μm 程度もしくはそれ以下の微細粉末を一様に懸濁した液中で低弾性体であるポリウレタン球を回転させ、それを工作物に近づけた際に生ずる弾性流体潤滑を利用し、加工液中の微細粉末粒子を、加工物表面の微小領域に対し、その流体軸受的流れにより加速し、工作物表面に到達させ加工を行う. このとき流体膜は荷重と流体の動圧とのつりあいにより一定に保たれ、非接触状態を実現し、維持する. この加工法によると、超微細砥粒を工作物にほぼ水平に近い角度で作用させることが可能なため、加工物の応力場は弾性域にとどまり、転位の発生、運動を促すような余分なエネルギーを与えることはなく、原子オーダーの弾性破壊に基づく加工がなされているとしている. また EEM 法では、2種類の固体を接触させた場合に生ずる、その界面における相互作用力(結合力)が重要となるため、工作物との化学反応性に富む砥粒の選択に注意が必要となる. 本加工法を用いることにより、工具-工作物間に供給される作用砥粒数を一定にすることができ、加工領域での除去量はその加工時間に比例する. 各点での加工時間、つまり送り速度を制御しながらポリウレタン球を加工領域全域にわたって走査すれば、任意の面積、形状に対する加工が可能となる. このような NC-EEM 法と呼ばれる手法についても、本郷らなどによっても開発が進められている⁹⁾.

2.3 メカノケミカルポリシング

加工物と研磨砥粒との化学反応を積極的に利用する加工法として、今中らによって開発されたメカノケミカルポリシング法がある^{10,11)}. 本加工法は、加工物より力学的に軟質で、かつ加工物材料との化学反応性に富み、固相反応を生じうるような微粒子を砥粒として用いる点で従来法とはまったく異なる加工原理に基づく加工法といえる. 通常のポリシング加工と同様の摺動運動を与えることにより粒子と加工物との接触点で微小反応部分(10 Å オーダー)が生じ、この部分は母材より結合力が弱くなるため、これが摩擦力により除去され、研磨加工が進行すると考えられている. 固相反応が加工の主要因であるため、単位除去量はきわめて微量となる. また加工物より軟質な粒子を用いるため、砥粒の加工物に対する押し込みや引っ掻き作用が働く可能性はほとんどなく、加工変質層もきわめて小さくなる. また、剛性の高いポリシヤを用いることも可能となるため、縁ダレのきわめて

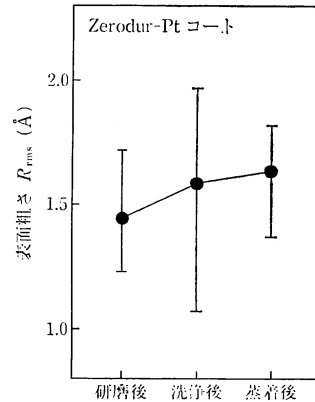


図 3 各加工工程と表面粗さとの相関

少ない高精度な面を得ることができる.

従来のピッチ研磨加工法においても表面粗さを向上させるための研究が行われており、 R_{rms} 1 Å 以下の表面粗さが得られたという報告もある¹²⁾. 超精密研磨加工が施された加工面には通常、反射防止膜や高反射膜が成膜されるが、そのレーザー耐力が基板の表面粗さに強く依存することが実験的に明らかにされている¹³⁾. また成膜後の膜面の表面粗さも基板の粗さによってほぼ決定される(図 3 参照)ので、基板の表面粗さをできるだけ小さくする加工法がとりわけ重要となっている. 近年、ダイヤモンド工具を使った切削加工により超精密な平滑面を得ようとする研究開発が活発に行われており¹⁴⁾, この方面の成果にも大いに期待がもたれる.

2.4 面形状および表面粗さ評価法

形状評価法として、現在レーザーを利用したフィゾー型干渉計が外乱の影響の少ない、高精度な面形状測定法として多用されているようである. 最近では干渉縞をコンピュータにより画像解析することで、より高精度で再現性の高い測定が可能となってきている. 干渉縞を解析して面精度を算出する方法として、縞走査による位相検出法¹⁵⁾が一般的となっている. 縞走査させることにより $\lambda/1000$ 以上の測定が可能となる. 面精度測定は参照面の面精度に依存するため、通常 $\lambda/50$ 以上という高精度な測定は非常にむずかしくなる. 現在参照面の精度によらない種々の絶対面精度測定法の研究が行われており^{15,16)}, また光波干渉計以外の方法も提案されており⁹⁾, この方面の技術開発が期待される. 図 4 は、ピッチ研磨により加工されたエタロンの面精度測定結果である. これは相対する 2 枚のエタロン板の相対面精度であるが、 $\lambda=633 \text{ nm}$ で W_{rms} $\lambda/200$ 以上の面精度を達成している (W_{rms} : 表面形状精度の二乗平均を表す).

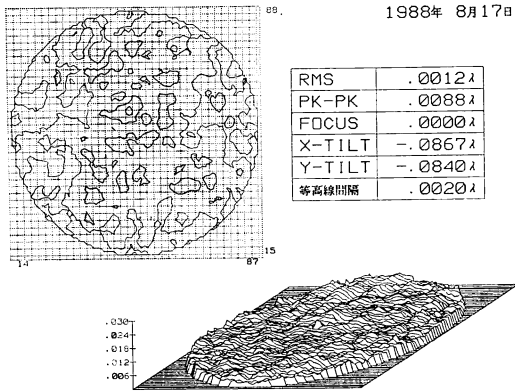


図 4 エタロンの相対面精度測定例

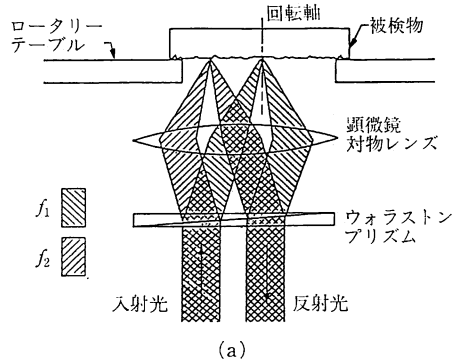
表面粗さの測定には、英国 Rank Taylor Hobson 社の Taly-Step が現在でもスタンダードになっていると思われる。触針式粗さ計としては最も実績あるものであるが、触針式であるため被検面へのダメージを避けることはできない。そこで最近では、光を用いた非接触型の超精密表面粗さ計が種々開発¹⁷⁾、市販され、普及し始めている。代表的なものとして、Wyko 社の Topo-2 D, 3D, Zygo 社の HPI-5500 がある。ここでは Zygo 社のものを紹介する。HPI-5500 の光学系および測定部分の概略図を図 5(a) に示す。測定原理は、光のドップラー効果とヘテロダイン干渉法を組み合わせたものである。ゼーマンレーザーより発振する僅かに周波数の異なる光、 f_1, f_2 のうち、 f_1 を参照光とする。 f_2 の反射光は試料表面に凹凸があるとドップラー効果により変調され、ビート信号に位相差 $\Delta\phi$ を生ずる。表面の凹凸量を Δh 、対物レンズの開口数を N. A. とすると、

$$\Delta h = (\lambda/8\pi) \{ (N. A.)^2 + 4 \}^{1/2} \Delta\phi \quad (3)$$

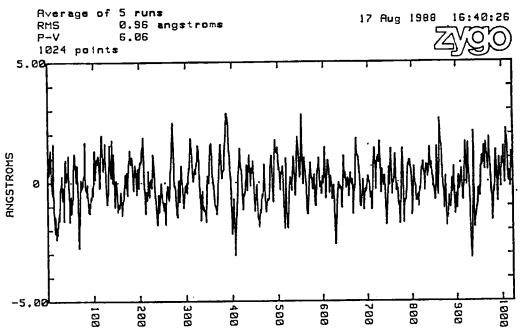
となる¹⁸⁾。試料の一部を参照面に使う自己参照方式を採用することにより、振動にも強く、 0.1 \AA というきわめて高い分解能を実現している。測定例は、石英ガラスおよび Zerodur のものである。以上の他にも、臨界角法やオプティカルスキッド法¹⁹⁾等の方法も提案され、市販されているものもある。定性的な評価となるが、ノルムスキー型微分干渉顕微鏡による観察も有効な手段となる。また光学式以外では、最近 STM (走査型トンネル顕微鏡)、AFM (原子間力顕微鏡) といった原子像を直接観察する手法の研究開発が進んでいる。横方向の分解能もきわめて高く、その成果が発表されつつある²⁰⁾。

3. 超高性能成膜技術

前節までに述べた各種の方法で加工された光学素子基



QUARTZ-ETALON ROUGHNESS Averaged



SAMPLE-E3/ZERODUR Averaged

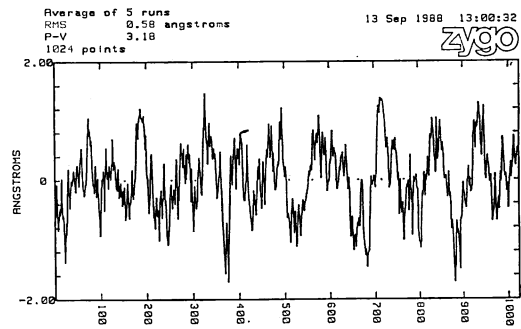


図 5 超高精度表面粗さ測定

- (a) Zygo 社製 HPI-5500 測定部概略図、
- (b) 測定例 (上) 石英ガラス、 R_{rms} 0.96 Å,
- (下) Zerodur、 R_{rms} 0.58 Å

板は、最終的に成膜処理されることで、光の反射率・透過率・位相・偏光状態等を制御する種々の光学機能を与えられる。本節では、多種にわたる機能の薄膜の中から各種光機器・レーザーシステムで多く用いられる高反射ミラーをとりあげ、成膜技術・計測評価技術の両面から最近の動向について述べる。

3.1 高反射ミラーの成膜

限りなく100%に近い反射率を要求される高反射ミラーは高屈折率物質と低屈折率物質の交互多層膜から成っている。高反射率を達成するためには、多層膜の膜厚や層数を最適化した設計を行い、かつ膜質を制御して反射損失(吸収・散乱)を極力抑える必要がある。薄膜の損失は一般に膜中の不純物、空孔、欠陥によるといわれ²¹⁾、さらに基板や膜表面の粗さによる散乱²²⁾も無視できない。したがって十分小さな表面の粗さをもつ基板の上に、稠密で充填率が高くバルクに近い膜質の薄膜を形成することが望ましい。この種の膜質の薄膜では、経時安定性や耐侯性の向上も期待できるが、一般的に膜応力が大きくなる場合が多いので基板の形状や精度への配慮が必要となる。

成膜方法としては、真空蒸着が最も一般的である。この方法で高反射ミラーを製作する際の留意点を次に示す。①使用する波長域で吸収の少ない物質を選び層数、膜厚等を最適化した設計を行う。②膜中への不純物混入を防ぐには、高純度な蒸着材料を使用しクリーンな高真空(10^{-6} Torr以下)が得られる装置を用いて、装置内部の壁面、治具等を清浄に保って成膜する。③良好な膜質を得るには、排気時間、到達真空度、基板温度、蒸着速度等を最適化して管理する。さらに、正確な膜厚制御も必要である。

このような対策によって真空蒸着で高反射ミラーの成膜が行えるが、さらに高反射、低損失が要求された場合にはより積極的に膜質制御が行える。①イオンビームアシスト法²⁴⁾、②イオンプレーティング法²⁵⁾、③スパッタ法²⁶⁾等のイオンプロセスの採用が必要となる。①はAr, N₂等のガスをイオン化して加速し、蒸着中の基板に照射してイオンビームの運動エネルギーで膜質を改善する方法であり、②は真空槽内に適当な圧力のAr, O₂等のガスを導入してRF放電によってプラズマ化し、蒸発し

た材料物質を活性化して基板上に堆積させることで膜質の改善を図る方法である。これら二つの方法は真空蒸着に併用するものであるが、③は加熱による試料の蒸発を行わずにイオンの運動エネルギーで試料ターゲットから原子、分子をたたき出し(スパッタ)して成膜を行う。これらのイオンプロセスでは、従来の真空蒸着に比較して薄膜の充填率を高くでき、低温成膜の可能性もあるため応用範囲は広い。

3.2 高反射ミラーの反射率測定

通常ミラー類の反射率は、基準光と反射光の強度比から求められるが、高反射ミラー($R \geq 99\%$)ではこの比がほぼ1に近くなり精密な測定がむずかしい。このため①多重反射法、②光共振器の減衰時間測定法等^{28,29)}が提案されている。①は面内で反射率が均一である短冊状のサンプルを2枚向い合わせ、この間で光を n 回多重反射させ損失を増幅して反射率 R の n 乗を検出する(図6)。この方法で、 $R=99.5\%$ 、 $n=10$ とすると、 $R^{10}=95.1\%$ となり1回反射に比べて有利な測定が行える。②は測定したいミラーで光共振器を構成し、この共振器中での光の減衰時定数を測定する(図7)。 d を共振器間隔、 c を光速、 τ を減衰時定数とすると、共振器ミラーの反射率 R との関係は次式のようになる²⁹⁾。

$$d/c\tau = 1 - R \quad (4)$$

τ の測定は、光の減衰から直接求める方法や、入射光を変調し、出力光の位相変化から換算する方法²⁸⁾が報告されている。なおここで求めた R は共振器を構成する複数のミラーの平均値となるので、幾つかのミラーを組み合わせ測定し、単独の絶対反射率を求める。この方法を使って $R=99.05\% \sim 99.97\%$ ($\lambda=529$ nm, 633 nm)を測定した報告がある²⁸⁾。

3.3 吸収、散乱の測定法

薄膜の損失は吸収と散乱に分けられ、高反射ミラーでは微小なこれらの量を正確に測定する必要が生じてく

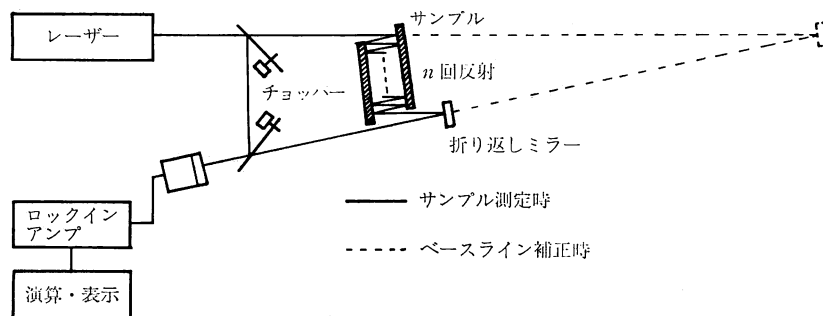


図6 多重反射法による高反射ミラーの反射率測定

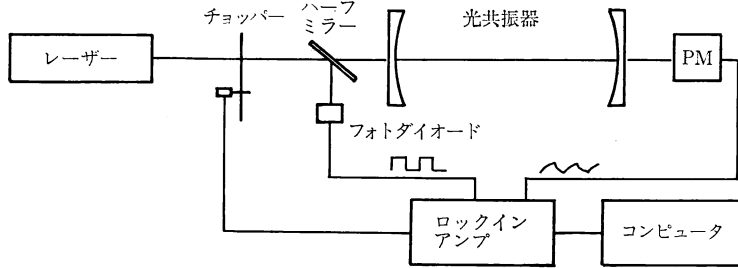


図 7 光共振器を用いた反射率測定

る。本節ではこれらの測定、評価方法について述べる。微小吸収測定法としては、サンプルにレーザー光を照射したときの温度上昇を測定するレーザーカロリメトリー法³⁰⁻³²⁾が一般的である。この方法では熱電対、サーミスタ等でサンプルの温度を直接測る方法^{31,32)}や干渉計を用いてサンプル内部の熱歪を測定する方法³⁰⁾、プローブレーザー光でサンプル表面の熱変形を検出する方法等が報告されている。測定結果として、Ar レーザーでレーザージャイロ用コートの吸収率を 10^{-5} まで検出³²⁾、赤外でのコートの減衰係数を 10^{-4} で測定³¹⁾、Kr F エキシマレーザーで 10^{-3} 台の吸収率を測定した³⁰⁾等の報告がある。またパルスレーザー照射時の光音響信号から吸収を求める方法もあり、Kr F エキシマレーザーで 10^{-4} 台の減衰係数が得られている³³⁾。カロリメトリー法は高感度な吸収測定法であるが、微小な発熱を正確に検出せねばならず、測定雰囲気や測定装置のセッティング等に細かい配慮が必要であり、データ処理を含めて高度な測定技術が要求される。

微小散乱の測定は、サンプルに当たって散乱した光を積分球や光電管を用いて検出する。基本概念は簡単であるが微弱光を対象とするため、迷光や電氣的ノイズ等には徹底した対策が必要である。また入射全光量に対して散乱光の強度が非常に小さくなるため、基準参照光量を適当に設定する等の工夫が重要である。散乱光の空間強度分布を求めたい場合、光電管をサンプル周囲に回転させて測定した報告がある^{22,34)}。これらの測定感度としては $1\sim 10$ ppm が報告されている。

3.4 耐レーザー性の測定

高出力レーザーシステム (CO_2 , YAG エキシマ等) で用いられる光学素子では、基板や薄膜の耐レーザー性の定量的な評価が求められる。耐レーザー性の評価方法としては、サンプル表面上に場所を変えながらエネルギー密度を変化させたレーザー光をスポットにして照射し、損傷の有無を調べるのが一般的である³⁰⁾。このとき、

E_{ND} : 損傷の生じない最大エネルギー密度

E_D : 損傷の生じる最小エネルギー密度

を用いて下式で表される LDT (laser damage threshold) を素子がどの程度のエネルギー密度に耐えられるかを示す量とする。

$$\text{LDT} = (E_{ND} + E_D) / 2 \quad (\text{J}/\text{cm}^2) \quad (5)$$

この LDT を測定する装置の構成を図 8 に示す。レーザービームを整形後ズームエキスパンダでビーム径を任意の大きさに変える。これにより単位面積あたりのエネルギー量を変化させて、対物レンズでサンプル表面に照射する。このときの光エネルギーはディテクターで常時モニターできる。

光学素子のレーザー光による破壊は、基板や薄膜の吸収発熱による溶解、熱応力による脆性破壊、強い光電界による絶縁破壊が根本的な原因といわれている³⁵⁾。現実の光学素子では、基板材料の純度や均質性、加工後の表面状態や粗さ、研磨材の残留物、コートの吸収やコート内部の電界強度分布等の加工プロセス全体での各種の要因が前述の根本的原因と結びついて LDT を決定している^{14,23,27,30)}。またレーザー側の条件として、波長、パルス幅、スポット径、連続運転時のパルス繰返しレート等にも LDT は依存し、目視的に破壊の様相が異なってくる場合もある。

光学素子の耐レーザー性の向上には、前述のように加工のおおのの工程 (材料選択, 研磨, 洗浄, コート等) で耐レーザー性に悪影響を及ぼす要因を極力排除するように努める総合的な対策が必要であろう。

4. エキシマレーザー用ファブリペローエタロン

超高性能光学素子の具体例として Kr F エキシマレーザーの狭帯化に用いるファブリペローエタロン (以下エタロンに略) の加工について述べる。エタロンは図 9 に示すように高い面精度をもつ反射面を微小な間隔で向か

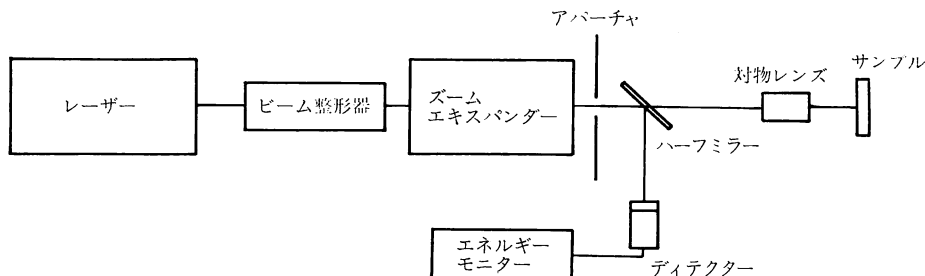


図8 LDT 測定器概要図

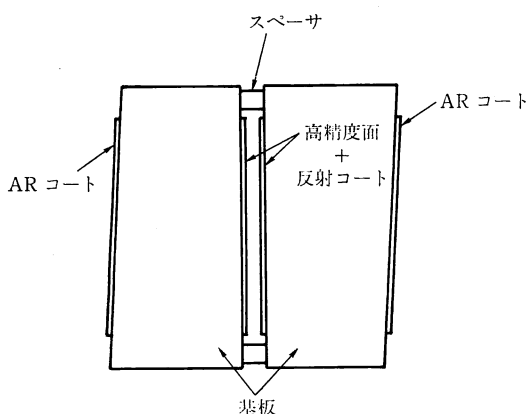


図9 ファブリペローエタロン

い合わせて固定した波長選択フィルターである。エタロンの選択波長の鋭さを示す量としてフィネスがある。フィネスは、反射面の反射率、ギャップ間隔、高精度面の面精度、表面粗さ等によって決定され、高出力な紫外レーザーの共振器中で長期間にわたって初期性能を維持することが要求される。このためエタロン加工のプロセスにおいては次の項目の実行が不可欠である。①Kr F波長の紫外光に対して吸収が少なく、耐久性、安定性の高い基板材料の評価と選択、②所定のフィネスを達成するのに要する反射面の面精度、表面粗さ等を実現する研磨加工、③所定の反射率をもち、経時変化が少なく、耐レーザー性の高い反射コートの成膜、④微小なギャップを必要精度内に保持し、かつ長期にわたってエタロン全体を保持できるスペーサ薄板の加工とコンタクト。

材料選択の段階では、レーザー照射時の透過率や屈折率の変化、蛍光の発生や発熱等を評価し、これらができるだけ小さい素材を選ぶ。選ばれた良質の基板材料について研磨加工を行う。高精度面を得るために、第2節で示したような高精度研磨法を用いる場合がある。仕上がった基板は速やかに成膜加工にかかる。このときの前処理としては、超音波洗浄が一般的であるが、UV光洗

浄やイオンビームクリーニングが研磨材の残留物の除去に有効との報告もある。成膜工程では、第3節に示した高反射ミラーに準じた対策をとり、この後別途作製したスペーサ薄板を基板とコンタクトして完成する。コンタクト強度を確保するにはコンタクト面への微細な塵埃の付着や、温度、湿度が微妙に影響するため、空調されたクリーンルーム内での作業が望ましい。このようにエタロンの加工には、先端的な光学素子加工技術が多用されており、光学素子のなかでも最も加工技術に関する要求の厳しいものといえよう。

5. あとがき

種々の加工法、測定法について述べた。これらの手法は徐々に工場で使用されてきている。しかし、たとえば本紙8月号で大橋らが提案しているファブリペロー干渉計用大型ミラーについて考えると、個々の仕様は達成可能としても、とくに大型ということで全体性能をすべて引き出すことはきわめてむずかしいものと考えられる。量子光学の分野のニーズに対応するためには、今後、よりいっそうの技術開発と、使う側と造る側との積極的な接触が必要であると思われる。

文 献

- 1) 今中 治: 機械の研究, **19** (1967) 605.
- 2) F. Cooke, *et al.*: Opt. Eng., **15** (1976) 407.
- 3) N. J. Brown, *et al.*: Workshop on Optical Fabrication and Testing Technical Digest (Opt. Soc. America, 1984) ThD-B4-1.
- 4) 川井誠一: 光技術コンタクト, **26** (1988) 187.
- 5) R. Jones: Opt. Eng., **22** (1983) 236.
- 6) J. Bennett, *et al.*: Appl. Opt., **26** (1987) 696.
- 7) A. Tebo: Laser Focus, **23**, 2 (1987) 60.
- 8) 森 勇蔵ら: 精密機械, **51** (1985) 1033.
- 9) 本郷俊夫: 光学, **13** (1984) 463.
- 10) 今中 治, 安永暢男: 固体物理, **9** (1974) 444.
- 11) H. Vora, *et al.*: J. Am. Ceram. Soc., **65** (1982) C 140.
- 12) 安藤 学ら: 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1990) 241 (G03).

- 13) Y. Nose, Y. Kato, K. Yoshida, C. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) 1256.
- 14) 宮田威男: 応用物理, **58** (1989) 842.
- 15) J. H. Bruning, *et al.*: Appl. Opt., **13** (1974) 2693.
- 16) B. R. Fritz: Opt. Eng., **23** (1984) 379.
- 17) 佐藤壽芳: 生産研究, **39** (1987) 201.
- 18) G. E. Sommargren: Appl. Opt., **20** (1981) 610.
- 19) 安達正明, 三木秀司, 中井康秀, 川口 格: 精密工学会誌, **56** (1990) 140.
- 20) 梶村皓二, ほか: 応用物理, **56** (1987) 1126.
- 21) H. K. Pulker: Appl. Opt., **18** (1979) 1969.
- 22) K. H. Gunther, *et al.*: Thin Solid Films, **34** (1976) 363.
- 23) 吉田国雄: 光技術コンタクト, **26** (1988) 566.
- 24) P. J. Martin, *et al.*: Appl. Opt., **22** (1983) 178.
- 25) H. K. Pulker, *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. A., **3** (1985) 2700.
- 26) 早川 茂, 和佐清隆: スパッタ技術 (共立出版, 東京, 1988) p. 93.
- 27) 佐藤義幸, ほか: 大工試季報, **39** (1988) 206.
- 28) J. M. Herbelin, *et al.*: Appl. Opt., **19** (1980) 144.
- 29) P. Elleaume, *et al.*: Appl. Opt., **24** (1985) 2762.
- 30) 伊藤雅英, ほか: 東京大学生産技術研究所報告, **35** (1988) 1.
- 31) J. A. Harrington, *et al.*: Appl. Opt., **16** (1977) 2843.
- 32) S. Jin, *et al.*: Appl. Opt., **15** (1987) 2407.
- 33) 植田憲一, ほか: レーザー研究, **15** (1987) 22.
- 34) P. Roche, *et al.*: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **652** (1986) 256.
- 35) R. Wood: *Laser Damage in Optical Materials* (Adam Hilger, Bristol and Boston, 1986) p. 1.