レーザーオリジナル

激光Ⅻ号ガラスレーザー集光装置用ターニングミラー
—高耐力コーティングの設計と結果—

伊 沢 孝 男*・橋 本 至*・鹿 倉 博 和*

(1983年 8 月17日 受理)

Design and Results of Dielectric Multilayers with High Damage
Resistance for Turning Mirrors in the GEKKO Ⅻ Target
Irradiation System.

Takao IZAWA*, Itaru HASHIMOTO* and Hirokazu SHIKAKURA*

(Received August 17, 1983)

We report designs and results of the dielectric laser reflectors to enhance the damage resistance. Tested samples were titania/silica multilayers and damage testing was done using 1.5 ns pulses at 1.06 μm . Damage threshold has been increased by using non-quarter-wave (NQW) design reducing the electric field strength at the titania/silica interface. Another improvement was done by addition of a halfwave silica overcoat. The results were applied to the turning mirrors in the GXII target irradiation.

1. はじめに

誘電体多層膜にレーザー光が入射すると、各膜の境界面でのくり返し反射の結果、膜内には進行波と反射波が生じる。膜内の電界強度は、その位置での進行波の電界と、反射波の電界の和となり、膜の設計に依存した電界強度分布が形成される。

一方、レーザーによる膜の破壊について考え

ると、発生の原因は大別して、熱的破壊によるものと、電子的破壊によるものとに分けられる。

熱的破壊は、一般にcwレーザーの様に、瞬間的なエネルギーレベルは低くても長時間照射された場合に起こり、さらにまた、パルス幅の長い場合や、くり返し回数の多い場合等も、この原因によるものがあると考えられる。この時、膜の吸収エネルギーは、各位置での屈折率、吸収係数、及び電界強度の積となるが、その値は

* 昭和光機製造株 (〒154 東京都世田谷区新町 3-5-3)

* Optical Engineering Department, Showa Optical Co., LTD (3-5-3 Shinmachi, Setagaya-ku, Tokyo, 154)

一般に場所により異なるために、ある程度周囲と平衡状態になる様に熱交換が行なわれ、やがて、融解点に達した部分が破壊されると考えられる。

これに対し電子的破壊は、パルス幅の短いレーザーの場合に起こり、激光Ⅻ号ガラスレーザー装置で用いられる100ps~1nsのオーダーは、この範囲に属すると考えられる。この場合には膜が熱吸収により融解される前に電子が電界より貰うエネルギーが格子振動で失なうエネルギーより大きくなり、電子はイオン化エネルギーまで加速され、電子なだれが起こる。そしてこの結果生じたプラズマによる加熱と圧力によって破壊されると考えられる¹⁾。

この時電子が電界より貰うエネルギーは、電子の緩和時間を τ とすると、 $A = (e^2/m)\tau E^2$ で与えられ、プラズマは熱的破壊の時とは違って他の部分との相互作用はなくミクロ的に起こると考えられるから、ダメージが起こった場所での電子なだれが生ずる限界の電界を E_f とし、入射光に対するこの場所での相対的な電界強度を E とすると、 $DT \propto E_f^2/E^2$ となる。したがって E_f を大きくすること、すなわち電子なだれの起きにくい物質を選ぶことと、最もダメージが起きやすい場所での電界強度を低下させることが膜の設計上重要になる。

本研究ではレーザー耐力の向上を目的として、主として膜内の電界強度を低下させた設計及び入射角によるレーザー耐力の依存性を検討し、実験結果との比較を行なった。またレーザー耐力が膜内のどの部分の電界強度に依存するかを実験的に求め、これから各部のレーザー耐力を推測した。さらにこれらの結果からGⅫターニングミラーの最適設計を検討し、その試作を行なった。

2. 理 論

2.1 電界強度の計算

多層膜にレーザー光が入射すると、多層膜内を任意に分割した境界面 $j-1$ と j 面ではFig. 1に示す入射波と反射波が存在する。(ただし、 j

-1と j 面の間は同一屈折率とする。)S成分に対しては E ベクトルの方向は境界面に平行であるから、境界面における連続条件と、 j と $j-1$ 面間の位相条件によってこの2つの面での電場の関係は次の式で与えられる²⁾。

$$E_j = \frac{(1+r_j^-) \cdot \exp(-i\phi_j)}{1+r_j^- \cdot \exp(-2i\phi_j)} E_{j-1} \quad (2.1)$$

ここで ϕ_j は j と $j-1$ 面との間の位相距離で、 $\phi_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ で与えられる。(2.1)式より j 面での電界強度の時間平均値は次の式で与えられる。

$$|\bar{E}_j|^2 = \frac{1}{2} \prod_{k=0}^j \left| \frac{(1+r_k^-) \exp(-i\phi_k)}{1+\gamma_k^- \exp(-2i\phi_k)} \right|^2 \times |E_0^+(1+r_0)|^2 \quad (2.2)$$

一方 p 成分に対しては j 面に平行な電界と垂直な電界が存在し、これを E_j' 、 E_j'' とすると、

$$E_j'' = \frac{(1-r_j^-) \tan \theta_j}{1+\gamma_j^-} E_j' \quad (2.3)$$

Fig.1 Illustration of notations used for function in the equation in this paper.

の関係が導びかれ³⁾, これと (2.1) 式より電界強度の時間平均値は次の式で表わされる。

$$\begin{aligned} |\bar{E}_j|^2 &= \frac{1}{2} (|E'|^2 + |E''|^2) \\ &= \frac{1}{2} \left[\prod_{k=0}^j \left| \frac{(1+r_k^-) \exp(-i\phi_k)}{1+r_k^- \exp(-2i\phi_k)} \right|^2 \right. \\ &\quad \times \left(1 + \left| \frac{1-r_j^-}{1+r_j^-} \tan \theta_j \right|^2 \right) \\ &\quad \times |E_0^+ \cos \theta_0 (1+r_0^-)|^2 \Big] \quad (2.4) \end{aligned}$$

また電磁波のエネルギー密度は $(\epsilon_0 \epsilon E^2 + \mu \mu_0 H^2)/2$ で与えられ, 一般に $\epsilon_0 \epsilon E^2 = \mu \mu_0 H^2$ であるから, j 面を単位時間に通過するエネルギーは, $w = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} n' |E_j|^2$ となり, 入射光に対する膜内の吸収率 A は厚さ方向を t として次の式で与えられる。

$$A = \frac{\int_{t_1}^{t_2} n'(t) k(t) |E(t)|^2 dt}{n_0 |E_0^+|^2 \cos \theta_0} \quad (2.5)$$

ただし $n = n' - ik$ である。

2.2 斜入射時の電場状態

S 成分においては, E ベクトルの振動方向は常に境界面に平行であるので, 電界強度の最大値は時間平均値の2倍の関係にある。これに対し P 成分では, 電場は境界面に平行な成分 E' と垂直な成分 E'' とのベクトル和となり, 一般に電界強度の最大値は時間平均値の2倍とは一致しない。また, E' と E'' とは一般に位相のずれがあるために E ベクトルはだ円を描き, さらに E'' 成分の不連続性により膜の境界面において電界強度は不連続となる。この時の E ベクトルの運動を考えると, まず E' 及び E'' は次の式で表わされる。

$$E' = \cos \theta_j \sqrt{1 + |r|^2 + 2|r| \cos \delta} \times \cos(\omega t + \delta x) \quad (2.6)$$

$$E'' = \sin \theta_j \sqrt{1 + |r|^2 - 2|r| \cos \delta} \times \cos(\omega t + \delta y) \quad (2.7)$$

ここで, $\delta x = \tan^{-1}(|r| \sin \delta / (|r| \cos \delta + 1))$, $\delta y = \tan^{-1}(|r| \sin \delta / (|r| \cos \delta - 1))$, $e^{i\delta} = r/|r|$, $r = r_j^-$ である。(2.6) (2.7) 式を座標変

換すると, E ベクトルの描く楕円の境界面からの傾き ψ , 長短軸方向の振幅 a , b は次の式で表わされる⁴⁾。

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1}(\tan 2\alpha \cdot \cos(\delta_x - \delta_y)) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} a^2 &= a_x^2 \cos^2 \psi + a_y^2 \sin^2 \psi + 2a_x a_y \cos \psi \\ &\quad \times \sin \psi \cos(\delta_y - \delta_x) \quad (2.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b^2 &= a_x^2 \sin^2 \psi + a_y^2 \cos^2 \psi - 2a_x a_y \cos \psi \\ &\quad \times \sin \psi \cos(\delta_y - \delta_x) \quad (2.10) \end{aligned}$$

ここで, $a_x = \cos \theta_j \sqrt{1 + |r|^2 + 2|r| \cos \delta}$, $a_y = \sin \theta_j \sqrt{1 + |r|^2 - 2|r| \cos \delta}$, $\tan \alpha = a_y/a_x$ である。これより $|E|^2$ のピーク値は次の式で与えられる。

$$|E|^2_{\text{peak}} = \frac{2c^2}{a^2 + b^2} |\bar{E}|^2 \quad (2.11)$$

ただし, $c^2 = \text{Max}(a^2, b^2)$ である。

また $|r| = 1$ の場合には, (2.6) (2.7) 式より,

$$\frac{E'^2 + E''^2}{a^2 + b^2} = 1 \quad (2.12)$$

となり, E ベクトルは E' または E'' 方向を軸とする楕円を描き, $\delta = 0$ または π の時 x 軸上または y 軸上のみとなる。ただし, $a = 2 \cos \theta \cos(\delta/2)$, $b = 2 \sin \theta \sin(\delta/2)$ である。さらに $|E'|^2_{\text{peak}}$, $|E''|^2_{\text{peak}}$, $|E|^2_{\text{peak}}$ は $|\bar{E}|^2$ を用いて,

$$|E'|^2_{\text{peak}} = \frac{2|\bar{E}|^2}{1 + \tan \theta_j |\tan(\delta/2)|} \quad (2.13)$$

$$|E''|^2_{\text{peak}} = \frac{2|\bar{E}|^2}{1 + \tan \theta_j |\cot(\delta/2)|} \quad (2.14)$$

$$|E|^2_{\text{peak}} = \text{Max}(|E'|^2_{\text{peak}}, |E''|^2_{\text{peak}}) \quad (2.15)$$

となる。

3. 高耐力ミラーコーティングの設計

3.1 基本設計

Fig. 2 は $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 19 層の入射角 0° に対して設計された, 一般的な $\lambda/4$ 交互層 (QWタイプ) における電界強度を示したもので, 膜の屈折率は $n_H = 2.2$, $n_L = 1.45$ である。図からわかるように, 電界強度は膜の境界面において, 空

気側より $m=1, 3, 5 \dots$ 面にピーク値があり、基板面にいくにしたがってしだいに減少し、 $m=0, 2, 4 \dots$ 面ではほぼ 0 になる。

Fig.2 The time averaged square of the electric field in a QW design.

反射率が理論的に 100% であるとする、これらの値は次の式で与えられる⁵⁾。

$$|\bar{E}|_{2l+1}^2 = 4 \left(\frac{n_o}{n_h} \right)^2 \left(\frac{n_L}{n_h} \right)^{2l} |\bar{E}_0|^2 \quad (3.1)$$

$$|\bar{E}|_{2l}^2 = 0 \quad (3.2)$$

ただし $l=0, 1, 2 \dots$ である。

このタイプの設計は膜に吸収がないとすると、同一層数で最も高い反射率が得られ、また製作も比較的容易なので一般に広く用いられているが、電界強度の最大ピーク値が存在している膜の境界面近傍は吸収係数、不純物、結合性、応力等の点で最もレーザー耐力的に弱い個所と考えられ、レーザー耐力の面から考えると決して望ましい状態とはいえない。そこでレーザー耐力を向上させるためには、このピーク値の位置を耐力的に十分強いと考えられる SiO_2 内部にもっていき、境界面での電界強度を低下させることが必要となる。このための設計は (2.2) 式に次の条件を課すことによって行なった。

$$|E_1| = |E_3| = \dots = |E_{2k-1}| \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial \phi_j} = 0 \quad (3.4)$$

この時の境界面での電界強度のピーク値は、 k 及び膜の屈折率によって決まり、 $n_h/n_L = N$ とすると次の式で与えられる。

$$|\bar{E}_{\text{int}}|^2_{\text{peak}} = \frac{4}{n_L^2 (kN^2 - k + 1)} |\bar{E}_0|^2 \quad (3.5)$$

またこの時の低屈折率層内の電界強度のピーク

値は

$$|\bar{E}_L|^2_{\text{peak}} = \frac{4 \{ (k-1)N^2 - k + 2 \}}{n_L^2 (kN^2 - k + 1)} |\bar{E}_0|^2 \quad (3.6)$$

で与えられる。(3.5) と (3.1) 式から境界面における QW タイプからの電界強度の低下率 P は

$$P = \frac{|\bar{E}_{\text{int}}|^2_{\text{peak}}(\text{NQW})}{|\bar{E}_{\text{int}}|^2_{\text{peak}}(\text{QW})} = \frac{N^2}{kN^2 - k + 1}$$

となり、 P は N と k によって決まり、高屈折率と低屈折率の比が大きい程低下率が高くなる。

Fig. 3 は $k=3$ についてこの設計を行った場合の電界強度を表わしたものである。

レーザー耐力向上のためのもうひとつの方法として、 TiO_2 の最上層の上に $\lambda/2$ の SiO_2 のオーバーコートを施すことが挙げられる⁶⁾。これによって光学特性及びそれ以下の膜内の電界強度には何の影響も与えないが、実験的に 30% 前後の耐力改善がなされる。Fig. 4 は Fig. 2 の QW タイプにオーバーコートを行った場合の電界強度を表わしたものである。

Fig.3 The time averaged square of the electric field in an NQW2 design.

Fig.4 The time averaged square of the electric field in a QW design with overcoat.

3.2 広範囲入射角ミラーの設計

レーザー耐力は一般に入射角及び偏光成分に依存し、その原因として膜の境界面における電界強度の変化が大きな要因を占める。電界強度が入射角によって変化する原因としては、(1)断面積の増加によるエネルギー密度の低下、(2)位相条件の変化、(3)フレネル反射率の変化、(4) E' と E'' 成分の比率の変化(P成分のみ)等がある。Fig.5はQWタイプ及びFig.3のNQW2タイプの入射角による境界面での電界強度の変化を表わしたもので、QWタイプでは位相条件の変化による影響が少ないために、入射角 0° に対して設計されていても入射角の増大によってS成分は減少しP成分もほぼ一定となる。これに対してNQW2タイプでは、最適争度(O.A.)をピークとしてこの角度からはずれてくると、電界強度はかな

り急激に増加し、同時にピーク値の存在する境界面の位置も変化する。これは境界面での電界強度が位相条件によって大きく影響されるため、低下率の高い設計程この傾向が強く表われる。これに関しては基本設計を補正することによって、使用角度範囲内での立ち上がりを多少抑えることはできるが、大きな改善は望めない。また、最適角度は使用角度内でレーザー耐力ができるだけ均一に向上する様に設定する必要があるが、この場合電界強度以外の要因も入射角依存性にかかわってくるので、必ずしも電界強度的にバランスがとれたところが最適位置とはならない。特にP成分については入射角によるレーザー耐力の増加要因があるために、最大角度の電界強度が最小角度のところより多少高い位置でレーザー耐力がバランスする。

3.3 GⅦターニングミラーの設計

GⅦターニングミラーは互換性を持たせるために、入射角により基板形状及びコーティングがグルーピングされ、RA, RB, RCについてその入射角範囲はそれぞれ $3.7^\circ \sim 22.7^\circ$, $15.7^\circ \sim 31.3^\circ$, $17.9^\circ \sim 38.1^\circ$ となっている。また入射光は直線偏光であるが、S成分とP成分のほとんどすべてのエネルギー比のものが入射する。コーティングに要求される主な性能は、それぞれの入射角範囲において、レーザー耐力が $1.053 \mu\text{m}$, 1.5ns において 6 J/cm^2 以上、平均反射率99%以上である。

この場合最も問題となるのはレーザー耐力の点で、従来のQWタイプを用いた場合、特に入射角が小さい場合に余裕がなく、また約 500mm^2 という大口径のために、通常の大サイズの基板に比べ蒸着粒子の入射角度が深くなることや、蒸着距離が長くなるために、さらに耐力が低下する要因が出てくる。またNQW2タイプを用いた場合、問題となるのは入射角による影響であるが、この場合それぞれの角度範囲が 20° 程度であるので、それ程電界強度が増大しない領域で使用できる。こうしたことからターニングミラーの設計はNQW2タイプをそれぞれに対し

Fig.5 Dependence of the time averaged square of the peak electric field at the titania/silica interface on the incident angle for various coatings designed for different optimum angles (O.A.).

て多少補正したものを採用し、最適角度は最終的に実験によりベストな位置を求めた。また膜物質は $1.06\mu\text{m}$ 、 1ns においてレーザー耐力的にすぐれた $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ の組み合わせを用いた。各ミラーの使用条件及び最終的な主な設計データをTable 1に示す。

4. 実 験

実験では、膜物質は $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ の組み合わせを用いた。蒸着は大型蒸着装置を使用し、蒸着条件等はすべて同一で行った。基板は基本的に 25°BK7 のダメージ用テストピースを使用した。ターニングミラーの最終実験では、 120° テストピースを用いた。またレーザー耐力の測定は、大阪大学レーザー核融合研究センターのダメージ測定装置により、 $1.06\mu\text{m}$ 、 1.5ns で行った。

5. 実験結果

5.1 オーバーコート及びNQWタイプの改善効果

Table 2はQWタイプとNQW2タイプについて、オーバーコートを行ったものを行なわないものを5～7サンプル作製し、それらのレーザー耐力を測定した結果を示したものである。

Fig. 6 Histogram of damage data on a QW and NQW2 designs.

Table 1. Specifications and coating designs of GⅩⅢ turning mirrors.

MIRROR	INCIDENT ANGLE (DEG.)	INCIDENT POLARIZATION (energy ratio)	COATING DESIGN			REFLECTANCE (%)	E _F peak AT INTERFACE		
			MATERIAL	LAYERS	FILM DESIGN		I.A.	S-POLA	P-POLA
RA	3.7 ~ 22.7	S:P = 1:0 ~ 0:1	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	21	REFINED NQW2 OPTIMUM ANGLE = 0°	$R_{s,p} > 99.5$	0°	0.39	0.39
							23°	0.54	0.58
RB	15.7 ~ 31.3	S:P = 1.6:1 ~ 1:24	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	21	REFINED NQW2 OPTIMUM ANGLE = 20°	$R_{s,p} > 99.5$	15°	0.40	0.44
							20°	0.37	0.41
							31°	0.47	0.54
RC	17.9 ~ 38.1	S:P = 1:0 ~ 0:1	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	21	REFINED NQW2 OPTIMUM ANGLE = 25°	$R_{s,p} > 99.5$	18°	0.44	0.50
							25°	0.35	0.41
							38°	0.48	0.60

Table 2. Experimental damage thresholds for various designs.

DESIGN	TIME AVERAGED SQUARE OF PEAK E-FIELD			DAMAGE THRESHOLD (J/cm²)	MEDIAN THRESHOLD (J/cm²)	IMPROVEMENT TO NON O.C.	IMPROVEMENT TO QW
	INTERFACE	H-LAY.	L-LAY.				
(A) QW	0.83	0.83	0.83	5.0 ~ 5.8	5.3	—	—
(B) QW WITH O.C.	0.83	0.83	1.95	5.1 ~ 8.4	6.7	26% For (A)	—
(C) NQW	0.39	0.39	0.39	7.5 ~ 10.3	9.3	—	75% For (A)
(D) NQW WITH O.C.	0.39	0.39	1.89	10.2 ~ 14.8	12.6	35% For (C)	88% For (B)

またオーバーコートがあるものについて、QWタイプとNQW2タイプの各サンプルのヒストグラムをFig. 6に示す。この結果NQW2タイプのものはQWタイプに比べ、オーバーコートのあるもので平均88%，なしのもので平均75%のレーザー耐力の向上が得られた。またオーバーコートを行ったものは行なわないものに比べ、QWタイプで26%，NQW2タイプで35%の改善が得られた。QWタイプに対するNQW2タイプの平均改善率が電界強度的予想より下回っている原因としては、(1)製作誤差による設計値からの電界強度の変化、(2)空気層内でのプラズマ発生による表面層の破壊、(3)蒸着ロット間のばらつき、(4)測定上の誤差等が挙げられる。特に(1)についてはコーティングした結果から推測すると、電界強度の変化は、QWタイプでは0～+6%の範囲に対し、NQWタイプでは0～+30%の範囲になる。またオーバーコートなしのものについては(2)の原因もかなり影響しているのではないかと考えられる。

5.2 膜内電界強度とレーザー耐力との相関関係

Fig. 7～10は内部電界強度の異なる種々の設計について、入射角0°でのレーザー耐力の測定値と膜の各部の電界強度の関係を表わしたものである。電界強度は、TiO₂とSiO₂の境界面、TiO₂内部、SiO₂内部、及びTiO₂の各層内で積分したもののそれぞれのピーク値を個々のサンプルについてコーティングした結果から計算した値を用いた。この結果からTiO₂とSiO₂の境界面の場合が、 $DT \propto 1/|E|^2_{\text{peak}}$ の関係に最も適合し、レーザー耐力がこの場所での電界強度によってほぼ決定されることを示している。Fig. 7の直線の傾きからレーザー耐力と電界強度との関係は、 $DT \text{ (J/cm}^2\text{)} = 5.5 |\overline{E_0}|^2 / |\overline{E_{\text{int}}}|^2_{\text{peak}}$ となる。

5.3 レーザー耐力の入射角による依存性

Table 3は入射角45°に対して設計されたQWタイプの同一サンプルを、入射角0°、30°、45°でレ

ーザー耐力を測定した結果を示したものである。ここでDT'は、レーザー耐力が膜の境界面での電界強度の時間平均値 $|\overline{E_{\text{int}}}|^2_{\text{peak}}$ によると仮定した場合の理論値で入射角0°に対して規格化してある。同様にDT''は電界強度のピーク値 $|\overline{E_{\text{int}}}|^2_{\text{peak}}$ による場合の理論値である。S成分については $|\overline{E_{\text{int}}}|^2_{\text{peak}}$ の入射角による変化とレーザー耐力がよく対応しているが、P成分については $|\overline{E_{\text{int}}}|^2_{\text{peak}}$ から想定した値よりもさらにレーザー耐力の増加率の方が大きい。また、

Fig. 7 Dependence of damage threshold on the time averaged square of the peak electric field at the titania/silica interfaces.

Fig. 8 Dependence of damage threshold on the time averaged square of the peak electric field in the titania layers.

Fig.9 Dependence of damage threshold on the time averaged square of the peak electric field in the silica layers.

Fig.10 Dependence of damage threshold on the integrated time averaged square of the peak electric field in the titania layers.

$|E|^2_{\text{peak}}$ を考えてもその量はわずかで説明はつかない。他に考えられる原因としては、フレネル反射率の減少によるもので、境界面では各格子の振動の重ね合わせの結果、透過波と反射波が形成されるので、フレネル反射率が異なれば、その位置の電界強度が同じであってもミクロ的にみれば電場の状態は異なると考えられる。また、電界ベクトルの楕円運動が電子の吸収効果や電子なだれの閾値に影響を及ぼすといったことも考えられるが、はっきりとした原因は今のところわかっていない。しかし現象的には他

Table 3. Dependence of damage threshold on incident angle for a QW design optimized for 45° incidence. Theoretical damage thresholds are normalized at normal incidence.

POLA	INCIDENT ANGLE (DEG.)	DAMAGE THRESHOLD (J/cm²)	PEAK E-FIELD AT INTERFACE		THEORETICAL THRESHOLD (J/cm²)	
			$ E ^2$	$ E ^2$	FROM $ E ^2$	FROM $ E ^2$
S	0	5.5	1.0	2.0	5.5	5.5
	30	8.7	0.66	1.32	8.3	8.3
	45	12.2	0.47	0.94	11.8	11.8
P	0	5.5	1.0	2.0	5.5	5.5
	30	8.1	0.81	1.52	6.8	7.2
	45	9.3	0.74	1.46	7.4	7.5

のいくつかの測定でもほとんど例外なく、 P 成分が電界強度的な推測よりかなり増大傾向を示すことが確認されている。また S 成分は P 成分より一般に電界強度は低く、おそらくこの理由によってレーザー耐力もほとんどの場合 S 成分の方が高いが、こうした増加要因のために必ずしもそうなるとは限らない。

5.4 ターニングミラーの設計最適化と最終実験結果

Fig.11はRBミラーの仕様に対して、設計上の最適角度の位置を求める実験を行った結果を示したもので、評価は P 成分で行った。この理由は、ほとんどの場合 P 成分のレーザー耐力は S 成分よりも低いためである。図からわかる様に、この中では $O. A. = 17^\circ$ の時が最も両端の角度でのレーザー耐力が均一に向上し、 17° と 25° の間に最適値があると考えられる。同様な実験をRA, RCについて行なった。これらの最終的な最適角度とレーザー耐力の測定結果をTable 4に示す。

6. 考 察

オーバーコートによるレーザー耐力の向上の原因は今のところはっきりつかめていないが、考えられる原因としては、(1)TiO₂が大気中の水分等を吸収し劣化するのを防ぐ。(2)オーバーコートにより膜の応力が緩和され、機械的に強くなる。(3)コート表面の $\lambda/2$ の空気層内で電界

Fig. 11 Dependence of damage threshold on incident angle for various optimum angle for RB mirror.

Table 4. Experimental damage threshold for test samples of GⅢ turning mirrors.

MIRROR	OPTIMUM ANGLE (DEG.)	INCIDENT ANGLE (DEG.)	DAMAGE THRESHOLD FOR P-POLARIZATION
			(J/cm²)
RA	0	0	10.2 - 14.8
		25	14.0 - 16.6
RB	20	15	12.0 - 14.5
		51	11.6 - 15.5
RC	25	18	15.5 - 16.2
		38	12.4 - 17.0

強度が入射光の4倍に達するため、エアブレークダウンが起こり、これによるプラズマからTiO₂を保護すること等があげられる。これらのどれも定性的には十分考えられることで、特に(3)は、エアブレークダウンの閾値やレーザー耐力が低くなると改善効果が小さくなるといった実験結果とも適合する。しかし、向上の原因は必ずしもひとつとは限らず、いくつかの要因が複合された結果とも考えられる。

NQW2タイプの改善効果の実験では、製作

誤差による電界強度変化等を考えると、ほぼ電界強度的に予想される理論値に近い値が得られたと言える。さらに設計上電界強度を低下させていけば、理論上はレーザー耐力が向上されてくるであろうが、その場合の設計の複雑さに比べると電界強度の低下率は悪く、また、この種の設計においては、製作誤差はほとんどの場合電界強度の増加をもたらす、さらに低下率が高い設計程その量も大きくなるので、現在の製造技術を考えるとこれ以上の設計は余りメリットがない様に思える。また入射角による電界強度の変化は低下率の高い設計程大きくなるので、広範囲入射角ミラーへの応用が困難になる。

5.2の実験で、SiO₂内部は明らかにレーザー耐力に何ら寄与していないと言えるが、TiO₂内部は境界面とそれ程の大差なく比例関係を示している。これは境界面とTiO₂内部との電界強度の比を設計上大きくすることが困難なためである。この実験結果から推測される各部のレーザー耐力の比は境界面近傍に対しSiO₂が4倍以上、TiO₂内部が1.3倍以上となる。設計の理論としては、各部の電界強度とレーザー耐力との積の最大値ができるだけ低くなる様に電界強度の分布を変えることを行うので、各部のレーザー耐力の比がいくつかということが重要となるが、実際の設計では、これらの比が今回行った範囲を越えることはまずないので、応用面からいえばこれで十分と言える。

最後に写真解析の例として、ダメージ部の顕微鏡写真をFig. 12, 13に示す。Fig. 12はRCの設計のものでいずれも38°(P成分)で入射させた時のものである。Aは微少ダメージに属するもので、中央はもりあがっている様にも見えるが、実際はへこみ、周辺がもりあがっている。これは、オーバーコートの下のTiO₂がプラズマによって融解され、これがプラズマの圧力によって周辺においやられ再結合した結果ではないかと考えられる。Cは完全に膜がふきとんだ状態で、くり返し干渉計による厚さ測定から、失われた層は、電界強度の最も高い境界面の上のオーバーコート及びTiO₂の2層と推測される。

Fig. 12 Nomarski micrograph of a damage site on an NQW design with overcoat. Laser power were about 15 J/cm^2 , and 30 J/cm^2 for A, B, and C, respectively.

Fig. 13 SEM micrograph of a damage site on a QW design with overcoat. The sample was laser-in radiated from reverse at normal incidence. Laser power was about 30 J/cm^2 .

また、その下の SiO_2 は何らの破壊も受けていないように見える。BはAとCの中間に属するものである。Fig. 13はQWタイプのものを裏面から入射させたもので、この場合も電界強度は表からと同じ様な状態となる。照射エネルギーは約 30 J/cm^2 であるが、ダメージが電界強度の高い基板面の方から発生したために膜を固定するものがなくなり、さらにプラズマの外への発散が抑えられたためにダメージが全層に及んだものと考えられる。ここで注目すべきことは、コーティングは21層の膜に対し、写真ではその半分の11層になっていることである。これはFig. 2で示すように、電界強度が1面おきに0となるために、その位置での境界面は付着したままピーク値をもつ境界面で破壊されたことを示していると言える。

以上の研究結果から、今後さらにレーザー耐力を向上させていくことについて最大の課題は、膜の境界面近傍のレーザー耐力をいかに上げるかということになるかと思われる。このためには、蒸着物質を含めた製造技術が重要な課題になるが、このひとつとして、境界面を連続にし、不純物を少なくすると同時に結合性を向上させることがあげられる。

7. 結 論

以上の設計検討及び実験より得られた結果をまとめると以下の様になる。

(1) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ の多層膜においては膜の境界面付近がレーザー耐力的に最も弱く、実験的推測では SiO_2 内部はその4倍以上、 TiO_2 内部は1.3倍以上の耐力を持っている。このためミラーコーティングでは、ダメージはほとんどの場合膜の境界での電界強度が最も高くなる場所で発生し、レーザー耐力はこの位置での電界強度とほぼ反比例の関係にある。

(2) 高耐力ミラーコーティングの設計においては、膜の境界面における電界強度を低下させることと、最上層に $\lambda/2 \text{ SiO}_2$ のオーバーコートを実施することが重要で、実験的な改善率はそれぞれ平均で約80%と30%であった。

- (3) レーザー耐力の入射角依存性は、S成分では膜の境界面での電界強度の変化とほぼ対応しているが、P成分では入射角が大きくなるにつれこれ以外の増加の要因が加わってくる。
- (4) 電界強度を低下させた設計では、膜の境界面の電界強度は入射角によって大きく変わり、最適入射角度からはずれてくると急激に増加するようになる。
- (5) GⅦ集光系ターニングミラーの試作では、2)の設計を適用することによって使用角度全域で、1.5nsにおいて $10\text{J}/\text{cm}^2$ 以上のレーザー耐力が得られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ダメージテスト装

置を借用させていただき、また色々と技術的御指導をいただいた、大阪大学レーザー核融合研究センター加藤義章教授、望月孝晏助教授、吉田国雄講師に深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 吉田：学位論文，ガラスレーザーの性能向上に関する研究 (1980) 47.
- 2) P.H.Berning: Physics of Thin Films Vol.1. (Academic, New York 1963) 73.
- 3) J.H.Apfel: Appl. Opt. 14 (1976) 2339
- 4) M.Born: Principle of Optics (Dergamon, New York (1975) 26.
- 5) H.E.Bennet and D.K.Burge: NBS Special Publication No.532 (1978) 266.
- 6) W.H.Lowdermilk, D.Milam and F.Rainer: NBS Special Publication No.568 (1979) 377.