

研 究**大出力 CO₂ レーザー用光学部品の評価実験**

高橋 秀実・木村 実

松下技研(株)研究開発グループ 〒214 川崎市多摩区東三田 3-10-1

(1989年3月17日受理)

Evaluation Experiments of High Power CO₂ Laser Optics

Hidemi TAKAHASHI and Minoru KIMURA

Department of Research and Development, Matsushita Research Institute, Tokyo Inc.,
3-10-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214

Measurements of reflectivity map and optical distortion have been performed as evaluation experiments of high power CO₂ laser optics. Reflectivity map of large-size optics of up to 150 mm diameter is measured automatically by means of the comparison between the CO₂ laser beam reflected by the sample and the reference one. The surface normal of any measuring point is adjusted to coincide with the axis of the optical system by the four-axes control. Accuracy of the measurement is confirmed to be 0.5% of the measured value. The optical distortions of the transmissive optics have been measured by the interference of a probe He-Ne laser. The interference fringe is observed by a video camera when the sample is irradiated by a CO₂ laser. From the change of the fringe pattern, the optical distortion is obtained. Moreover, the thermal lensing effects are measured as the influence to the laser beam transmitted through the optic.

1. ま え が き

大出力 CO₂ レーザー用光学部品には、すぐれた特性が要求される¹⁻³⁾。これら光学部品は、大口径で大出力のレーザー光を光学特性の劣化なしに扱わなければならない。しかし、母材やコーティング膜や表面付着物によるレーザー光の吸収は、光学部品の光学特性を変化させ、いわゆる熱レンズ効果としてレーザー光の特性に影響する。また、過度の温度上昇がある場合には、光学部品は破壊されてしまう。

筆者らのグループは、通産省の大型プロジェクトである「レーザー応用複合生産システム」において CW 20 kW 出力 CO₂ レーザー用の光学部品の開発に携わった⁴⁻⁶⁾。このなかで、筆者らはおもに光学部品の評価実験を担当した。本論文は、大口径の光学部品の反射率マップの自動測定ならびに CO₂ レーザー光照射時の光学歪みの測定に関するものである。以下に、これら二つの評価実験について述べる。

2. 反射率マップの測定

大口径の光学部品にコーティング膜を付けた場合に、全面において一様な反射率に仕上げることは重要な点である^{7,8)}。そこで、大口径の光学部品の反射率が一様であるかどうかを試験するために反射率マップ自動測定装置を開発し、光学部品の評価実験を行った^{9,10)}。

2.1 装置の構成**2.1.1 光 学 系**

反射率マップ自動測定装置の光学系の概略を **Fig. 1** に示す。出力 5 W の封じ切り型 CO₂ レーザーからの直線偏光したビームがビームスプリッター BS1 によって参照光とサンプル光に二分割される。この二つのビームはチョッパー C によって異なる周波数 f_1 ならびに f_2 でチョッピングされる。参照光は参照光路を通り検出器に導かれる。他方、サンプル光は凹面鏡 CM によって集光され、サンプルホルダーに保持された試料に照射される。試料上でのビーム直径は 5 mm である。

試料上の任意の測定点における垂線が常に測定光学系

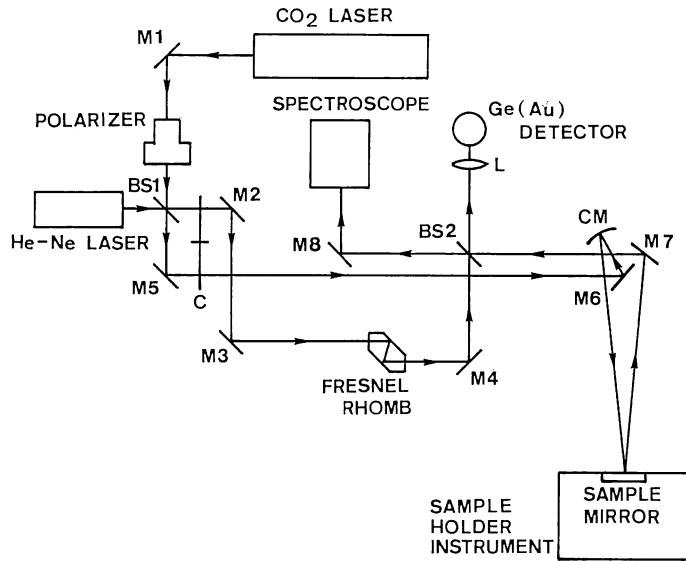


Fig. 1 Schematic of the optical system for the reflectivity map measurements: C, chopper; BS1, BS2, beam splitters; L, lens; M1-M8, mirrors; CM, concave mirror.

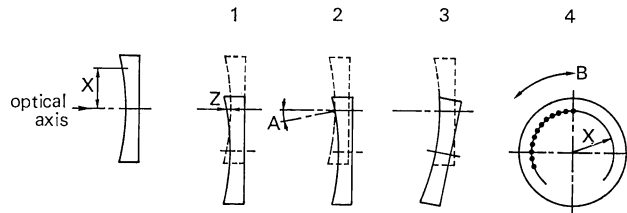


Fig. 2 Automatic mirror alignment by the four axes control. 1: X-axis movement, 2: Z-axis movement, 3: A-axis movement, 4: B-axis movement.

の光軸と一致するようにサンプルホルダーは4軸方向にコントロールされる。この4軸制御を Fig. 2 に示す。

X軸は径方向の直線移動であり、Z軸はレーザー光の進行方向の直線移動である。また、A軸は測定点の垂線が測定光学系の光軸と一致するようにするための試料の傾き角調整であり、B軸は同一円周上の次の測定点へ移動するための試料の中心のまわりの回転である。これら4軸の移動は、パルスモータによって行い、その精度は2 μm 以内である。

試料からの反射光はビームスプリッター BS2 によって参照光と同軸となり、Ge (Au) 検出器上に集光される。検出器からの信号から、それぞれ周波数 f_1 ならびに f_2 の成分をロックインアンプによって分離し、参照光と信号光の強度が求まる。このように参照光と信号光の強度を同時に求めることによって、光源のレーザーの強度の時間的なゆらぎによる測定誤差を補償している。

同一の検出器によって二つのレーザー光の強度を同時に測定することにおいて、レーザー光の干渉の問題が起

こる。干渉を避けるために、参照光の光路にフレネルロムを挿入した。フレネルロムは参照光の偏光方向を90°回転させるので、参照光と信号光の偏光方向は互いに直交し、干渉は避けられる。

CO₂ レーザーの発振ラインは分光器によってモニターされる。

2.1.2 電気系

Fig. 3 に電気系の概略を示す。レシオメータによって信号光と参照光との強度比を測定する。測定された強度比は、AD変換されミニコン (HP 9826) にストアされる。後述するように測定精度向上のために、試料上の一点に対して測定は2 Hzの周期で10回繰り返され、平均値をその点での測定値とした。その後、試料はサンプルホルダーによって回転され、次の測定点に対して反射率を測定する。Fig. 2 に示した同一円周上のすべての測定点に対して測定が終了すると、試料の中心点に対して測定を行い、測定の長期的なドリフトを補償している。この後、次の円周上の測定点に対して測定を行う。

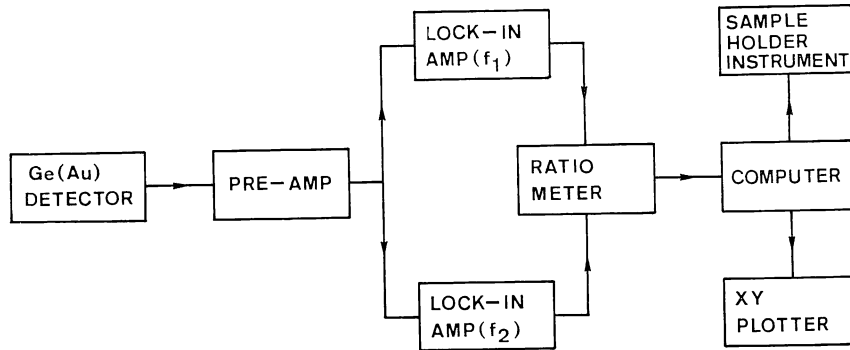


Fig. 3 Block diagram of the electronics and the data acquisition system.

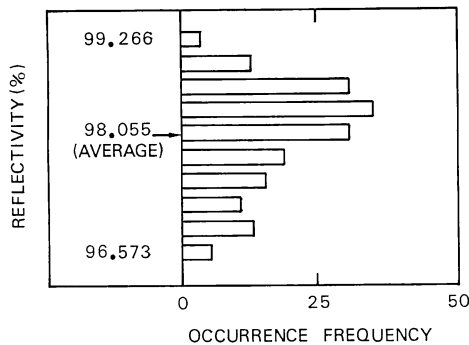


Fig. 4 Result of the distribution of the reflectivities measured 180 times at one point on gold-coated totally-reflective mirror.

このようにして、反射率マップが実時間で得られる。

ただし、ここで得られる反射率は、絶対値ではなく、相対値である。相対値から絶対値への変換は高反射率ミラーの中心位置での本実験における測定値とカロリメトリ法による測定値^{11,12)}とを比較することによって行われる。

2.2 実験結果

初めに、反射率の測定精度の確認実験を行った。金属の反射鏡の同一点に対して180回繰り返して反射率を測定した。結果をFig. 4に示す。測定値は平均値に対して-1.5%から+1.2%までばらつきをもつが、マップ測定においては測定の繰返しによって精度を向上させている。すなわち、ある測定点に対して10回の測定を行い、その平均値をその点における測定値として採用した。この値は180回の測定の平均値からは±0.5%のばらつきの範囲内にあり、したがって、反射率の測定精度は測定値の0.5%であるといえる。

本システムによって多数の光学部品の評価実験を行ったが、以下に例を示す。Fig. 5は、直径76mmのコーティング膜なしのZnSeの光学部品の反射率マップの

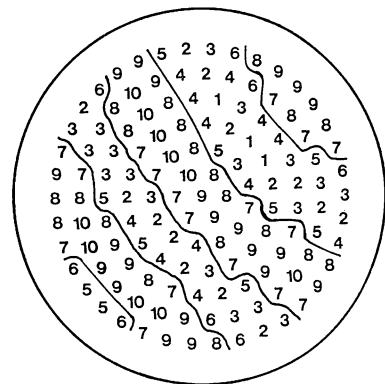


Fig. 5 Measured reflectivity map of an uncoated ZnSe plate of 76 mm in diameter. 1: 0-5%, 2: 5-10%, 3: 10-15%, 4: 15-20%, 5: 20-25%, 6: 25-30%, 7: 30-35%, 8: 35-40%, 9: 40-45%, 10: 45-50%.

測定例である。反射率の周期的な変化が明確に示されているが、これは光学部品の表裏面からの反射光による干渉縞である。この図からウェッジ角は 0.0048° と計算されるが、この値は可視のHe-Neレーザーを用いた干渉縞の測定から計算される 0.0039° とよく一致しており、本システムの測定精度の良さを示す証拠である。Fig. 6は直径76mmの反射防止膜付きのZnSeのレンズに対する測定例である。一点を除いて0.5%以下の反射率に仕上がっている。また、Fig. 7は直径150mmのKClの窓に対する測定例である。全面において反射率0.25%以下の反射防止膜が形成されている。

本システムを用いて評価した光学部品は筑波のFMS実験プラントにおいて行った実験によりCW 20kWのCO₂レーザーシステムに使用可能であることが実証された。

3. 光学歪の測定

波長 $0.6 \mu\text{m}$ の CO₂ レーザー光用の光学部品の母

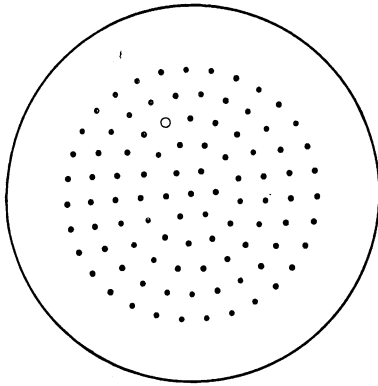


Fig. 6 Measured reflectivity map of an AR-coated ZnSe lens of 76 mm in diameter. ● : 0-0.5%, ○ : 0.5-1.0%.

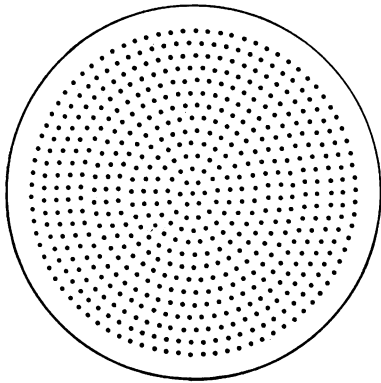


Fig. 7 Measured reflectivity map of an AR-coated KCl window of 150 mm in diameter. ● : 0-0.25%.

材の光学特性に関しては、多くの報告がある¹¹⁻¹⁵⁾。しかしながら、レーザー装置において使用する状態である両面にコーティング膜を付けた透過型光学部品における光学歪みの測定についての報告は少ない。両面に反射防止膜や部分反射膜をコーティングした透過型光学部品に対する評価実験として、CO₂ レーザー光を照射したときの光学歪みについて可視の He-Ne レーザー光により干渉測定を行った^{16,17)}。

3.1 測定系の構成

光学部品の表裏面からの反射光の光路差の温度による変化は

$$\Delta(2nl) = 2 \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha \right) l \Delta T \quad (1)$$

で表される。ここで n : 屈折率、 l : 試料の厚さ、 α : 線膨張率、 T : 温度である。 n 、 l 、 α 、 dn/dT が既知であれば、温度上昇 ΔT は光路差の変化 $\Delta(2nl)$ を測定する

ことよって求まる。したがって、光学部品の表裏面からの反射光の光路差の変化である干渉縞の変化を観測することにより温度上昇の空間的な分布が求まる。

ZnSe の場合には、波長 633 nm の He-Ne レーザーに対して α は $8.5 \times 10^{-6}/\text{deg}$ 、 dn/dT は $10.7 \times 10^{-5}/\text{deg}$ である。また、使用した試料の光学部品の厚さが 3 mm である。これらの値を(1)式に代入すると

$$\Delta(2nl)/\lambda = 1.22 \Delta T \quad (2)$$

となる。したがって、干渉縞の1縞の変化は 0.82°C の温度の上昇に対応する。同様にして、KCl の場合には、 α は $3.6 \times 10^{-5}/\text{deg}$ 、 dn/dT は $-3.7 \times 10^{-5}/\text{deg}$ であり、1縞の変化は 6.3°C の温度上昇に対応する。

測定系の概略を Fig. 8 に示す。最大出力 2 kW の高速軸流型 CO₂ レーザー光を入斜角 30° で試料に照射する。同時に、コリメートされたプローブ光の He-Ne レーザー光が、試料にはほぼ垂直に入斜する。試料は、くさび形をしているので、He-Ne レーザー光の表裏面からの反射光はほぼ等間隔の干渉縞を形成する。干渉縞の変化はテレビカメラによって記録される。試料の光学部品の直径は1インチである。CO₂ レーザー光は直径 40 mm であるが、試料上で直径 7 mm に集光され、高次の横モードを含むために、その強度分布はほぼ円筒状をしている。

CO₂ レーザー光が試料を照射すると、温度上昇により干渉縞パターンが変化する。照射後およそ1分で干渉縞パターンは定常状態に達する。干渉縞の次数はテレビカメラによって数えることができる。CO₂ レーザー光の照射パワーを変えて、この過程を繰り返す。

3.2 実験結果

3.2.1 ZnSe 光学部品

異なる CO₂ レーザー光の照射パワー時の定常状態において観測された干渉縞を Fig. 9 に示す。1050 W の

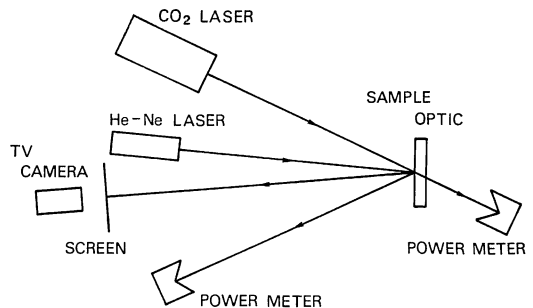


Fig. 8 Schematic of the experiment set-up for the interferometric measurements of the optical distortion.

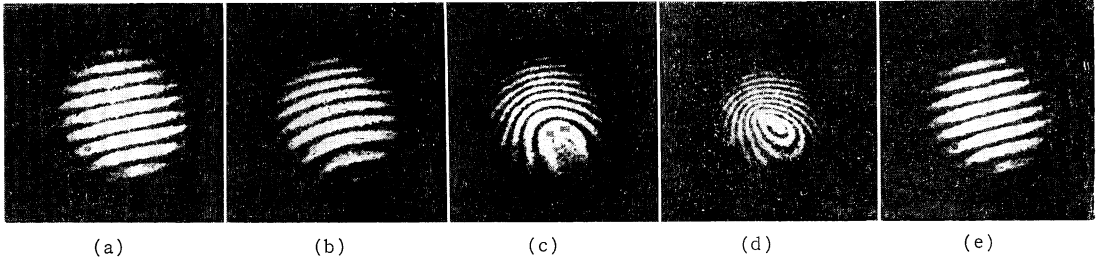


Fig. 9 Photographs of the interference fringe of the ZnSe optic at the irradiation of different power CO₂ laser. (a) before irradiation, (b) at the irradiation of 200 W, (c) at the irradiation of 650 W, (d) at the irradiation of 1050 W, (e) after the irradiation ended.

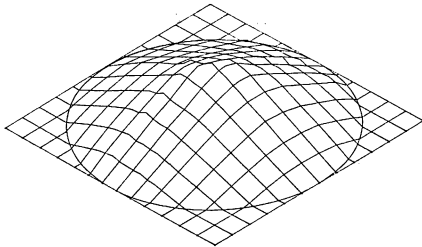


Fig. 10 Spatial distribution of the temperature rise derived from Fig. 9(d).

照射時において最大 16 縞の変化があり、これは 13°C の温度上昇になる。Fig. 9(d) から計算した温度上昇の空間分布を **Fig. 10** に示す。

ここで、温度上昇の空間分布をシミュレーションしてみる。光学部品は十分薄く、厚さ方向の温度分布はないこと、ならびに、熱の損失は光学部品のエッジのみで起こり、大気中への放熱はないものと仮定する。熱伝導方程式の定常状態における解は

$$T = T_0 + (\beta I / 4\kappa)(r_0^2 - r^2) + (\beta I / 2\kappa)r_0^2 \ln(R/r_0) \quad (3)$$

(if $0 \leq r \leq r_0$)

$$T = T_0 + (\beta I / 2\kappa)r_0^2 \ln(R/r) \quad (4)$$

(if $r_0 \leq r \leq R$)

となる。ここで、 r は中心からの距離、 κ は熱伝導率、 β は吸収率、 I はレーザー光の強度、 R は試料の直径である。また、試料の端面は温度 T_0 に冷却されており、CO₂ レーザー光は半径 r_0 の円筒である。

(3), (4) 式をもとに計算した温度上昇ならびに、Fig. 9(d) からの 1 軸方向の温度上昇を **Fig. 11** に示す。この計算において、試料の吸収率を 0.35% とした。これは母材の吸収係数 0.002 cm^{-1} 、部分反射膜面 0.3%、反射防止膜面 0.1% というカタログ値から求めた。Fig. 11 における計算値と実測値との差は、おもに計算において大気中への放熱を無視したことによるものと思われる。

Fig. 12 に CO₂ レーザー光の照射パワーと温度上昇

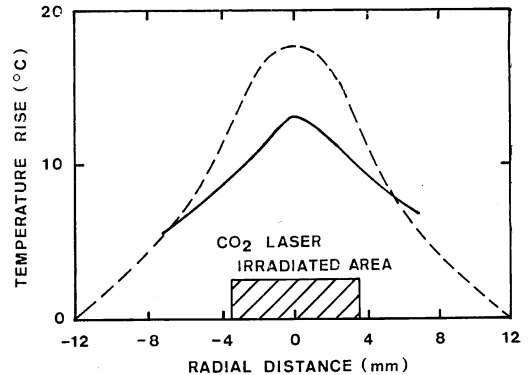


Fig. 11 Spatial distribution of the temperature rise on one axis of a ZnSe optic derived from Fig. 9(d). Solid line is the measured value and dashed line is the calculated value.

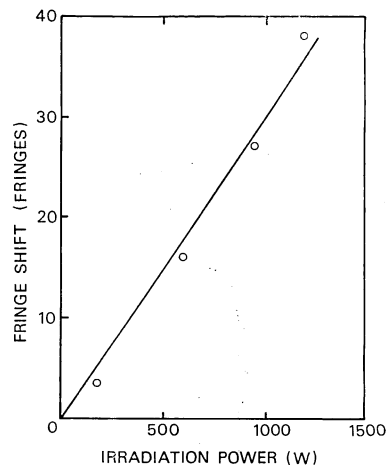


Fig. 12 Peak temperature rise of a ZnSe optic as a function of the irradiated power.

の最大値 (干渉縞シフト量で表示) との関係を示す。温度上昇の最大値は照射パワーに比例している。これは吸収率が試料の温度によらないことを示している。

3.2.2 KCl 光学部品

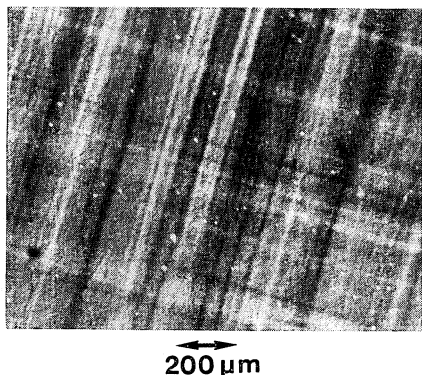


Fig. 13 Photograph of the observed permanent crosshatch distortion.

KCl 光学部品に対して同様の測定を行った。KCl の場合、ZnSe に比べて温度上昇は大きく、試料の中央と端との温度差が大きい。これは ZnSe の熱伝導率が $0.18 \text{ W/cm} \cdot \text{deg}$ に対して KCl は $0.065 \text{ W/cm} \cdot \text{deg}$ と小さいためである。

KCl の場合には、ZnSe と異なる現象が観測された。CO₂ レーザー光の照射後、クロスハッチ歪みならびに永久歪みが生じた。Fig. 13 にクロスハッチ歪みの観測例を示す。クロスハッチ歪みが生じる閾値の照射レーザー光パワー密度を Fig. 14 に示す。吸熱量がおおよそ 1.1 W/cm^2 を越えると、クロスハッチ歪みが生じている。この点からクロスハッチ歪みはレーザー光の吸収による熱応力によって結晶の方向に発生するものと考えられる。他方、多結晶の KCl の場合にはクロスハッチ歪は観測されていないが、多結晶では結晶の方向が揃っていないために発生しないものと考えられる。

また、CO₂ レーザー光照射前後の干涉縞の比較から求めた永久歪みの1軸方向の測定例を Fig. 15 に示す。

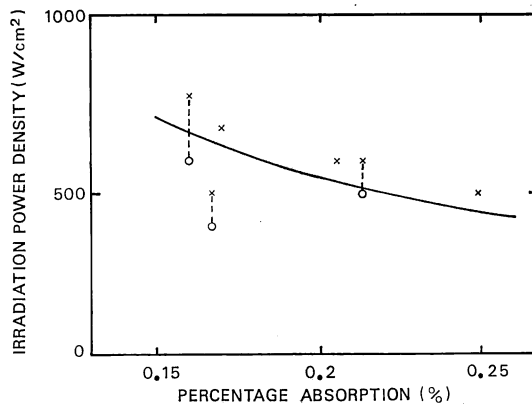


Fig. 14 Irradiation power density at which the permanent crosshatch distortion is observed as a function of the percentage absorption. O: no crosshatch observed, X: crosshatch observed. Solid line corresponds to the absorption power density of 1.1 W/cm^2 .

永久歪みは、主に CO₂ レーザー光の照射されている領域で生じている。この現象は、光学部品に熱膨張による厚み変化が生じ、熱を取り去った後も変形が残ってしまうものである。いくつかの試料について最大の永久歪み量と照射パワー密度との関係を Fig. 16 に示す。単結晶の KCl は大きな永久歪みを生じているが、一方多結晶の KCl の永久歪み量は小さい。

4. 熱レンズ効果の測定

光学部品を透過した後のビーム発散角の変化を測定することによって熱レンズ効果の測定を行った。1 kW の CO₂ レーザー光を ZnSe ならびに KCl の窓に透過させる。熱レンズ効果を強調するために、試料の光学部品の直後に全反射鏡を置き、CO₂ レーザー光が試料の光

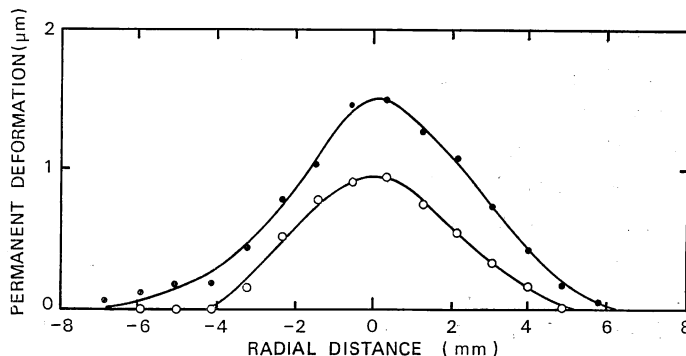


Fig. 15 Spatial distribution of the permanent deformation on one axis of a KCl optic. O: irradiation power density of 500 W/cm^2 , ●: irradiation power density of 600 W/cm^2 .

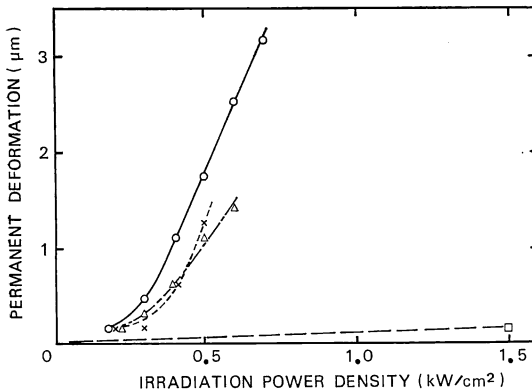


Fig. 16 Permanent deformation as a function of the irradiated power density for several KCl specimen optics. ○, ×, △: single crystal, □: polycrystal.

学部品を2回透過する構成とした。試料としては直径76 mm, 厚さ9 mmのZnSeならびに直径75 mm, 厚さ10 mmのKClを用いた。CO₂レーザー光のビーム発散角の変化の測定から熱レンズ効果の実効的焦点距離を計算した。その結果, ZnSeの実効的焦点距離は19 mであるのに対してKClを透過した後のレーザー光のビーム発散角はほとんど変化がみられなかった。温度上昇による光路差の変化は

$$\Delta(nl) = \left\{ \frac{dn}{dT} + (n-1)\alpha \right\} l \Delta T \quad (5)$$

で与えられる。lが9 mmの場合1°Cの温度変化はZnSeに対して0.63 μmの変化に、また、KClに対しては-0.18 μmの変化に対応する。KClの場合には、温度上昇による機械的膨張が屈折率の減少によって打ち消されるために熱レンズ効果が小さい。

大出力CO₂レーザーシステムは、おもに加工の用途に利用されており、対象物の表面においてレーザー光が集光されることが重要である。この点で、ZnSe光学部品は温度上昇により実効焦点距離が変動するために不都合である。他方、多結晶のKCl光学部品は熱レンズ効果が小さく、また、クロスハッチ歪みや永久歪みが小さいため、大出力CO₂レーザーシステムへの利用は有望である。

5. ま と め

大出力CO₂レーザー用光学部品の評価実験として反射率マップの自動測定ならびに光学歪みの測定を行った。

反射率マップの自動測定においては、大口径の光学部

品に対して各点において測定値の0.5%の精度により反射率マップの自動測定を行うシステムを開発し、高反射率の金属鏡, ZnSe, KClの窓やレンズの評価実験が行えた。

光学歪みの測定においては、ZnSe, KClの透過光学部品に対して、可視のHe-Neレーザー光の表裏面からの反射光による干渉縞の測定からCO₂レーザー照射時の光学歪みを求めた。KCl光学部品はZnSeに比べ、温度上昇は大きく、また、温度勾配も大きい。しかしながら、熱レンズ効果の測定ではKCl光学部品はZnSeより熱レンズ効果が小さい。これは、機械的膨張が屈折率の減少によって打ち消されるためである。したがって、ZnSe光学部品は大出力CO₂レーザーシステムに用いるには問題がある。他方、単結晶のKClは大出力CO₂レーザー照射後にクロスハッチ歪みや永久歪みを生じる。多結晶のKClはクロスハッチ歪みや永久歪みが小さく、大出力CO₂レーザーシステムに用いるのに有望である。

本研究は、通産省工業技術院の大型プロジェクトである「レーザー応用複合生産システム」の一環として行われたものである。

文 献

- 1) T.F. Deutsch: "Laser window materials—an overview," *J. Electron. Mater.*, **4** (1975) 663-719.
- 2) P. Miles: "High transparency infrared materials—a technology update," *Opt. Eng.*, **15** (1976) 451-459.
- 3) G.H. Sherman and G.F. Frazier: "Transmissive optics for high power CO₂ lasers: practical considerations," *Opt. Eng.*, **17** (1978) 225-231.
- 4) K. Ishihara and M. Ikeda: "R&D of Tsukuba FMSC test plant," *Proc. Material Processing Symposium in ICALOE '84* (Boston, 1984) pp. 232-237.
- 5) T. Miyata: "R&D of optics for high power CO₂ lasers in Japanese National Program," *Proc. SPIE*, **650** (1986) 131-140.
- 6) 宮田威男: "大出力CO₂レーザー用光学部品の開発", *レーザー研究*, **13** (1985) 129-147.
- 7) F. Petru and J. Krsek: "A reflectometer for measurements of dielectric mirrors," *Opt. Acta*, **21** (1974) 293-314.
- 8) D.D. Preonas: "Ultra-precision photometry of AR coatings," *Univ. Dayton Res. Inst.*, Report No. AWFL-TR-76-504 (1976).
- 9) R. Sano, T. Miyata, K. Kawata, S. Sakuragi, H. Nanba and M. Sumida: "R&D of optics for high power CO₂ lasers," *Proc. Material Processing Symposium in ICALOE '84* (Boston, 1984) pp. 246-252.
- 10) H. Takahashi, M. Kimura and R. Sano: "Automatic reflectivity map measurement of high power CO₂ laser optics," *Opt. Laser Technol.*, **21** (1989) 37-40.
- 11) H.B. Rosenstock: "Absorption measurements by laser calorimetry," *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) 102-110.

- 12) M. Hass, J. W. Davisson, P. H. Klein and L. L. Boyer: "Infrared absorption in low-loss KCl single crystals near $10.6 \mu\text{m}$," J. Appl. Phys., **45** (1974) 3959-3964.
- 13) 伊藤雅英, 小倉磐夫: "干渉カロリメトリーによるレーザー材料の吸収率測定", 応用物理, **51** (1982) 705-712.
- 14) J. S. Loomis and E. G. Bernal: *Laser Induced Damage in Optical Materials*, NBS Special Publication No. 435 (1975) pp. 126-141.
- 15) J. A. Detrio, J. A. Fox and J. M. O'Hara: *Laser Induced Damage in Optical Materials*, NBS Special Publication No. 568 (1979) pp. 73-89.
- 16) 高橋秀実, 木村 実, 森田泰之, 佐野令而: "ZnSe 部分反射鏡の CO_2 レーザー照射時の光学歪の干渉測定", 第44回応用物理学会学術講演会 (1983).
- 17) H. Takahashi, M. Kimura and R. Sano: "Optical distortion of transmissive optics at high power CO_2 laser irradiation," Appl. Opt., **28** (1989) 1727-1730.