レーザー解説

大出力cw CO₂ レーザー用光学部品の開発

——そのⅡ. 透明光学部品——

宮田威男*・小野拓弘*・岩淵 俊*

(1984年11月30日 受理)

Development of Optics for High-Power cw CO₂ Lasers

——II. Transparent Optics——

Takeo MIYATA*, Takuhiro ONO* and Takashi IWABUCHI*

(Received November 30, 1984)

1. はじめに

CO₂ レーザー加工機に於いて、取出窓、レンズ、ビームスプリッター等レーザー光が通過する透明光学部品に ZnSe, GaAs, KCl 等が用いられている。これらの素材の熱伝導度は全反射鏡の素材である金属のそれに比べて約1桁小さいため発生熱も1桁低下させないと同じパワーレベルのレーザー光照射に耐えられないことになる。

透明光学部品の場合発生熱の要因として、素材自身の吸収、表面研磨時に発生する加工変質層における表面吸収、さらに反射防止膜、部分反射膜などのコーティングによる吸収が考えられる。

CO₂ レーザーの出力が20kWというように増大すると吸収による発熱量が出力に比例して増大するためわずかな吸収も光学部品の破壊の原因となる。そのため大出力レーザー用光学部品の開発において最も重要な課題は各工程に於いて、いかに吸収を低減するかということである。又これらの工程にフィードバックすべく光学部品の評価技術及び出来上った光学部品の実装技

術などが互いに助け合って20kWというような大出力CO₂ レーザーに耐えられる光学部が開発されて来た。

2. KCl ZnSe 素材の開発

KCl 素材の開発は堀場製作所¹⁾が担当し、水溶液反応により得た高純度KCl結晶化原料を活性ガスにCl₂を用いたP-RAP法(Pure Reactive Atmosphere Processing)により、高純度KCl単結晶を育成した。KCl円板の形状は直径150mm、厚み30mmであり、その母材吸収係数 β_{bulk} は $\approx 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ が得られている。我々は堀場製作所の機械研磨済みのKCl円板を真空容器の中に入れ250W級のCO₂レーザー光照射による熱電対カロリーメトリー法により吸収率の測定を行った。各種試料の厚みに対する全吸収をFig. 1に示した。又堀場製作所で市販しているRAP法によらない試料も比較のために測定し同図にプロットした。その結果それぞれの直線の傾から母材の内部吸収係数 β_{bulk} がそれぞれ $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 、 $6.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ と見積られ通常法による結晶はRAP法によるものより約3倍程度吸収係数が高いことが判明した。

*松下技研株式会社, 研究開発部門 (〒214 川崎市多摩区東三田3-10-1)

*Matsushita Research Institute Tokyo, Inc. (3-10-1, Higashimita, Tamaku, Kawasaki 214)

Fig. 1 堀場KCl 円板の波長10.6 μmにおける全吸収の厚みに対する依存性

又それぞれの直線の縦軸との切片が機械研磨による表面の吸収率 $2\beta_s$ を示し、これ等は実験誤差内で約 5×10^{-4} 程度と見積られる。

ZnSe 素材の開発は住友電工²⁾ が担当し、CVD法 (Chemichal Vapor Deposition 法) における温度分布、ガス流等の合成条件の最適化とHIP法 (Hot Isostatic Pressing 法) の導入により直径75mm、厚み10mmの円板を開発した。なお母材の内部吸収係数 $\beta_{bulk} \approx 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ が得られている。

我々は機械研磨時に発生した加工変質層を取りさり表面吸収率を低下させるためのメカノケミカルポリシング法を開発した³⁾。その結果表面吸収を機械研磨の場合の約6分の1に低減することが出来た。Fig. 2に代表的実験例を示す。試料はCVD社の同一素材から直径3cmで厚みが、10mm、6mm、3mmの円板を切り出した。図中、直線aは機械研磨仕上げで、直線bはメカノケミカルポリシング仕上のデータでありそれぞれ表面吸収率 $2\beta_s$ が約 7.2×10^{-4} 、約 1.2×10^{-4} が得られている。

3. 誘電体多層膜コーティング

透明光学部品は、一般に透明研磨基板の上に望みの光学特性 (反射防止、部分反射) をもつた誘電体多層膜がコーティングされ完成する。

Fig. 2 メカノケミカルポリシングによる加工変質層の除去

現在の技術レベルではレーザー光照射による耐光力で一番弱いところがコーティング膜とされている。一般に蒸着膜は多くの欠陥を含み、そ

Table I ZnSe, KCl 用反射防止膜構造設計結果¹⁴⁾

Substrate ZnSe			Substrate KCl		
Coating design	Optical thickness (wave lengths)	Reflectance per surface	Coating design	Optical thickness (wave lengths)	Reflectance per surface
PbF ₂	0.25	0.001	NaF	0.25	0.05
ThF ₄	0.25	1.98	ThF ₄	0.25	1.3
ZnS/BaF ₂	0.236/0.24	0	As ₂ S ₃ /BaF ₂	0.055 /0.162	0
BaF ₂ /ZnS	0.138/0.0588	0	Ge/As ₂ S ₃	0.075 /0.130	0
ThF ₄ /ZnSe	0.132/0.0525	0	As ₂ S ₃ /ThF ₄	0.0428/0.168	0
ThF ₄ /ZnS	0.126/0.0648	0	As ₂ Se ₃ /ThF ₄	0.0316/0.163	0
NaF/As ₂ S ₃	0.107/0.065	0	ZnSe/ThF ₄	0.041/ 0.167	0

の吸収係数は蒸着物質のそれより2桁も大きくなるため、蒸着膜厚が1～2 μm程度であってもその吸収は無視出来ない。そこで、いかに吸収の少ない無欠陥膜を得るかが最大の課題であり、さらに基板との密着性、耐湿性をはじめとした化学的安定性、表面をこすったときにきずがつきにくいという機械的強度などの項目に注目し、多くのコーティングが試みられているがいまだ完璧なものは見つかっていない。

現在用いられている10.6 μm波長領域での反射防止膜は3層構造まで、部分反射膜は4層か6層、多くても10層構造である。多層膜は低屈折率層と高屈折率層が交互に積み重なった構造になっている。多層膜中での光の電界強度分布の解析により高屈折率物質や膜間の境界に強い電界がかからないような多層膜構造デザインが提唱⁴⁾され、レーザー光耐力は向上してきている。

レンズの表面や出力取出窓の表面にコーティングする反射防止膜は、単層、2層、3層で構成することができる。単層で反射率が零になれば、製作上非常に簡単であると同時にレーザー光耐力もすぐれた反射防止膜ができるが、なかなかうまく条件を満足してくれる物質がない。あったとしても耐湿性の問題が生じたりする。単層で反射率零を満足する条件は次のようである。すなわち、基板の屈折率を n_s 、コーティング膜の屈折率を n として、膜厚 $d = \lambda/4n$ に

なるように基板上にコーティングすると、反射率は次式で与えられる。

$$R = [(n^2 - n_s)/(n^2 + n_s)]^2 \quad (1)$$

ここで、もし膜の屈折率 n の2乗が基板の屈折率 n_s に等しい物質が存在すれば単層で反射防止膜となる。Table IにZnSe, KCl基板についてこれに近い条件の場合の例を示した。ZnSeに対してはPbF₂が耐環境性の点でも使用し得るが、KClに対するNaFについては耐湿性の点で使用不能である。

そこで2層、3層構造について考えると使用し得る物質の候補が多くなる。2層構造の場合Schuster⁵⁾が求めた条件式があり、それを使った2層構造の計算結果をTable Iに示した。わが国ではThF₄が放射性規制物質でありまた高純度のものが入手できないため低屈折率物質としてPbF₂を使わざるを得ない。この制約のためにKCl用反射防止膜としてはMouchart⁶⁾の条件式による3層構造を考える必要がある。KClの場合は基板自身、潮解性があるため耐湿性反射防止膜でなければならない。3層構造の利点としてまず挙げられることは反射防止膜内の電界分布により、単層、2層構造より吸収を少なくできる可能性が有ることと次に物質選択の自由度がふえることにある。KClの反射防止膜としてAs₂S₃/PbF₂/As₂S₃なる3層構造がよい結果を示している⁷⁾。As₂S₃蒸着膜はアルモファスで本

Fig. 3 KCl 窓の透過率スペクトル¹³⁾Table II AR COATING RESULTS ON ZnSe AND KCl⁷⁾

COATING DESIGN	Absorption per Coating(%)	CO ₂ Laser Irradiation Effect (70kW/cm ² 2min)	Resistivity to humidity RH 95%, 45℃
ZnSe // PbF ₂	0.045	No change	>1000H
ZnSe // BaF ₂ /ZnSe	0.285	Change in film color	>1000H
ZnSe // PbF ₂ /ThF ₄	0.17	No change	>1000H
KCl // NaF	0.16	Damage in film	~1H
KCl // NaF/ThF ₄	0.18	Damage in film and substrate	~1H
KCl // As ₂ S ₃ /PbF ₂ /As ₂ S ₃	0.015	No change	>650H

質的にピンホールができにくくかつ水に溶けず KCl 基板との密着性もよい。さらに蒸着膜の吸収係数 β_{film} が 0.1cm^{-1} のオーダーと非常に膜としては吸収が少ないため大出力用に適している。PbF₂膜の吸収係数 β_{film} も 1cm^{-1} のオーダーで ThF₄より1桁低い。最外層のAs₂S₃膜がPbF₂膜の保護膜として有効に作用している。Table IIに示すように膜の吸収も少なく耐光力も有り耐湿性も優れており、表面に結露させないかぎり十分に実用に耐える見通しが得られている。現に通

産省大型プロジェクトにおいて、この反射防止膜を両面にコーティングした直径120mm、厚み25mmのKCl窓が発振器に実装され出力20KWの取り出しに成功している。このKCl窓の赤外透過スペクトルをFig. 3に示す。試作した各種KCl ZnSe用反射防止膜の諸特性をTable IIに示した。ZnSe用反射防止膜についてはPbF₂単層膜のものが一番吸収が少なく大出力用として適している。この反射防止膜を両面にコーティングしたZnSe窓の透過スペクトルをFig. 4に示す。

Fig. 4 ZnSe 窓の透過率スペクトル¹³⁾Table III 連続波CO₂ レーザー用光学部品の劣化の分類⁸⁾

		原因 (Cause)	
		熱 (Heat)	圧力 (Pressure)
劣化 (Failure)	破壊 (Fracture)	熱的破壊 (Thermal fracture)	圧力誘起破壊 (Pressure induced fracture)
		熱暴走 (Thermal runaway)	
		自然へき開 (Spontaneous Cleavage)	
	ひずみ (Distortion)	熱誘起光学ひずみ (Thermal induced optical distortion)	圧力誘起光学ひずみ (Pressure induced optical distortion)
		永久クロスハッチひずみ (Permanent crosshatch distortion)	
		永久変形 (Permanent deformation)	

4. 劣化の原因と現象

化現象はTable IIIのように分類出来る⁸⁾。

レーザー共振器に用いられる出力取出窓の劣化には、レーザー光通過により発生する熱が引

き起こす熱誘起劣化 (Thermal induced failure) とレーザー共振器に取り付けた時の圧力差が引き起こす圧力誘起劣化 (Pressure induced failure) および両者がからみあって引き起こす劣化が考えられる。

劣化の現象としては再起不能な破壊 (Fracture) と破壊に至る以前に生ずるひずみ (Distortion) に分類出来る。

破壊現象としては、溶解、蒸発、分解、破碎へき開、膜の剝離などが挙げられる。

ひずみ現象としては光路長の変化により生ずる熱レンズ効果、いわゆる光学ひずみ (Optical distortion) が主なものである。これは熱膨張や圧力差による幾何学的変形や温度の不均一分布によって生ずる屈折率の空間的不均一分布などが原因となっている。

この光学ひずみが窓において生ずると出力ビームの発散角が変化する。厄介なことにレーザーの出力を変化させるとそれにつれて発散角が変化するため出力ビーム処理用の外部光学系に大きな影響を与える。また集光レンズについて考えるならば、入射レーザービームの強度の増加につれて焦点距離が短くなる。したがってレーザー出力を変えて加工する場合その都合加工条件が変化するという不便さが避けられない。

4.1 熱的破壊 (Thermal fracture)⁹⁾

レーザー窓などはその材料の一部分が溶融あるいは分解する温度に達する以前に破壊する。すなわちレーザービームにより誘起される温度の不均一分布から生ずる熱応力が原因となる。端面が一定温度に冷却され、かつ支持された窓を連続波のレーザービームが通過し、母材の吸収係数 β によって中心部が加熱される場合に対して破壊が生ずるレーザー出力の臨界値 P

$$(F.M.)_T \equiv \sigma_c \cdot K / \beta \cdot \alpha \cdot E \quad (2)$$

に比例し、これを熱的破壊に対する性能評価指数 $(F.M.)_T$ と定義し、この値の大きい材料を選ぶことが必要になる。ここで σ_c は破壊応力、 K は熱伝導度、 α は線膨張係数、 E はヤング率

である。代表的な材料の物性値と $(F.M.)_T$ の計算値をDeutsch⁹⁾の論文を参考にしてTable IVにまとめた。これらの結果によれば半導体系材料の評価指数が大きく、アルカリハライド系材料の評価指数は小さい。しかし母材の純化と加熱鍛造法による機械強度の改良がなされればアルカリハライド系材料は大変有望であることがわかる。

3.2 熱暴走効果 (Thermal runaway)^{9) 10) 11)}

熱的破壊を極力避けるために幾何学的形状や冷却方法について色々な工夫がなされているが、吸収係数が温度上昇とともに急激に増加するフリーキャリア吸収が支配的な半導体 (例えばGe) では式(2)で予想される臨界パワー以前に結晶が融解したり破壊したりする。半導体は吸収係数の温度依存性が正であり、室温以上で熱伝導度の温度依存性が負なために、わずかな温度上昇によって加速度的に温度が上昇する可能性 (Thermal runaway 効果) がある。Geはバンドギャップがせまいために臨界温度が50℃付近にある。一方GaAs, ZnSeなどは300℃～400℃の範囲にある。

3.3 熱誘起光学ひずみ (Thermal induced optical distortion)

レーザー光通過により生ずる窓の不均一分布は光路長に変化を生じ、もと平板であった窓はレンズになる。この光学的ひずみは一般に熱的破壊よりも低いパワーレベルにおいて起るが、許容される光路差の大きさは窓材の使用目的によって異なるので、レーザー出力の臨界値は一義的には定義しにくい。そこで光学ひずみに対する評価指数は、ある一定の光路差を生じさせるレーザー出力値から次のように定義される。

$$(F.M.)_0 \equiv K / \beta \cdot \chi \quad (3)$$

ここで χ は光学ひずみパラメーターで次式で定義される。

$$\chi \equiv dn/dT + (1 + \nu) \cdot \alpha \cdot (n - 1) + (n^3/2) \cdot \alpha \cdot E \cdot \langle \pi \rangle \quad (4)$$

Table IV CO₂ レーザー用光学部品材料の物性値と性能評価指数^{8) 9)}

物質	定数 吸収係数 $\beta_{10.6\mu m}$ (cm^{-1})	熱伝導度 K ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)	熱膨張係数 α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	屈折率 n	ヤング率 E ($10^{11}\text{ dyn}/\text{cm}^2$)	抗張力 σ_c ($10^8\text{ dyn}/\text{cm}^2$)	光学ひずみパラメータ χ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	熱誘起劣化に対する性能評価指数 (相対値) (端冷却でCWモードに対して)	
								熱的破壊 $\sigma_c \cdot K / \alpha \cdot \beta \cdot E$	光学ひずみ $K / \beta \cdot \chi$
Ge	1.2×10^{-2}	0.59	5.7	4.02	10.3	9.31	317	(1.00)	(1.00)
CdTe	2.5×10^{-4} (1×10^{-7}) ^{*1}	0.06	5.9	2.69	2.3	3.1	117	6.9 ($\sim 2.6 \times 10^3$)	13 ($\sim 3.1 \times 10^4$)
GaAs	5×10^{-3}	0.48	5.7	3.30	8.48	13.8	160	2.1	2.3
ZnSe	1×10^{-3}	0.18	8.5	2.40	6.72	5.52	67	2.1	16.3
NaCl	1.3×10^{-3}	0.065	44	1.52	4.0	0.39 (3.9) ^{*2}	-0.6	0.01	519
KCl	7×10^{-5} (7×10^{-5}) ^{*1}	0.065	36	1.47	3.0	0.44 (4.4) ^{*2}	-5	0.5 (~ 5) ^{*3}	1163
KBr	4.2×10^{-1} (2×10^{-7}) ^{*1}	0.048	42	1.54	2.7	0.33 (3.3) ^{*2}	-3.6	0.04 (~ 128) ^{*3}	200 ($\sim 3 \times 10^5$) ^{*3}

*₁ 固有吸収レベル*₂ 加熱鍛造による*₃ 固有吸収と加熱鍛造による理想値Table V 各種材料の光学ひずみパラメータ⁹⁾

物質	定数	χ_1 ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	χ_2 ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	χ_3 ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\chi = \sum_{i=1}^3 \chi_i$ ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Ge		277	23.1	16.7	317
CdTe		107	13.2	3	117
GaAs		149	17.5	-6	160
ZnSe		48	15.8	2.9	67
NaCl		-33	30	3.6	-0.6
KCl		-32	23	4.0	-5
KBr		-40	31	5.4	-3.6

第1項 χ_1 は屈折率の温度依存性, 第2項 χ_2 は熱膨張による窓材の幾何学的変形, 第3項 χ_3 は応力による屈折率の変化 (Stress-optic effects)による光路長変化を与える。Table Vに代表的な材料に対し χ を作り上げている3個の項の値をまとめて示す。この表によると, 半導体材料は χ_1 が大きいために大きな χ 値となり, 一

方アルカリハライド系材料では χ_1 の値が負で熱膨張の項 χ_2 と消し合う傾向にあり, χ 値は半導体のものより10~100倍も小さくなることがわかる。これはまさに材料固有の特性である。この式を使って式(3)により計算した光学ひずみ評価指数(F.M.)をTable IVに示した。(F.M.)_rとは逆にアルカリハライドは半導体より大きな値を

Table VI 熱誘起光学ひずみ実験データ一覧¹³⁾

	試料	形状	試料番号	全吸収率(m)	実効焦点距離(m)
1	ZnSe 窓 (AR/AR)	φ75, 9°	169/170	1.49	3.4
2	ZnSe 窓 (AR/AR)	φ75, 10°	Z-1-1	0.95	4.2
3	ZnSe 窓 (AR/AR)	φ75, 10°	Z-3-2	0.28	9.8
4	KCl 窓 (AR/AR)	φ75, 10°	K-3-5	0.15	∞
5	試料なし	—	—	—	—

示し、この特性がアルカリハライドの最大の魅力である。

次に光学ひずみの実験例について述べる¹³⁾。屈折率の温度係数(dn/dT) が正の ZnSe と負の KCl を基板とした平面窓を試作した。Table VI に試料の番号に対応して窓の形状と全吸収率がまとめられている。光学ひずみの測定は Fig. 5 に示すように単一横モードの出力 378 W の CO₂ レーザービームを用いた。アクリルのバーンパターンからレーザー光の強度分布を求め、実効焦点距離として光学ひずみの大小を比較した Fig. 6 に 8 m の位置で測定したアクリルのバーンパターンを示す。図中の番号は Table V の試料番号に対応している。曲線 4 と 5 を比較して実験誤差内で KCl の光学ひずみは観測されない。ZnSe 試料については全吸収の増加に伴って光学ひずみが顕著になる。実効焦点距離 f_e は式(5)から求めた。 d_0 は 3 m 位置での入射レーザービームの半値幅 (7 mm), d_1, d_2 はそれぞれ 8 m 位置での光軸上に試

Fig. 5 光学ひずみ実験概念図¹³⁾ Fig. 6 8 m の位置でのアクリルのバーンパターン¹³⁾

料を挿入しない場合と挿入した場合のレーザービームの半値幅、 l はアクリルと試料との間の距離で 5 m である。

$$f_e = l \cdot d_0 / (d_1 - d_2) \quad (5)$$

得られた f_e 値は Table VI に示した。

次に実際にレーザーメーカーやユーザーが経験しはじめたレーザービームの横モード変化と光学ひずみの関係について説明する。半年近く (約1000時間) レーザーを使用していると、レーザーの出力がたいして低下していないのに加工性能が急激に低下することがある。この原因はレーザービームの横モード変化に対応していることが多い。例えば、初期にシングルモード (TEM₀₀) であったものが高次のモードを含んだものに変化している。そこで新しい出力結合鏡に交換すると多くの場合初期のモード (TEM₀₀) に復帰する。我々¹³⁾ はこのモード変化の主な原因が実装に伴う出力結合鏡の吸収増加による光学ひずみであることをつきとめた。この実験のため、全吸収の異った種々の ZnSe, KCl 出力

Table VII 各種出力結合鏡のレーザー実装結果¹³⁾

SAMPLE	OPERATING TIME		O H	600 H	1000 H
AR // KCl // PR AR: As ₂ S ₃ / PbF ₂ / As ₂ S ₃ PR: As ₂ S ₃ ; 20% + 363 / 363 - A +	near-field pattern
	total absorption		0.12% (2.5°)		0.49%
AR // ZnSe // PR AR: PbF ₂ / ThF ₄ PR: ZnSe Surface; 17% + 366 - B +	near-field pattern
	total absorption		0.49%	1.6%	
AR // ZnSe // PR AR: PbF ₂ PR: ZnSe Surface; 17% + 364 - C +	near-field pattern
	total absorption		0.17%	0.62%	0.78%

結合鏡を試作し、レーザーに実装して時間経過に伴う出力結合鏡の全吸収率とモードの相関を調べた。試作した出力結合鏡の形状は直径25mm、厚さ3mmの平行平板であり、膜構成はTable VIIに示した。実装したレーザー発振器は13段折返し型拡散冷却方式の500Wレーザー(PANARAYS GM-CL4)である。試料は加速試験の意味もかねて、かなり断熱性の良いマウントに装着した。いずれの試料についても1000時間実装後も特に基板が露出するような膜の破損はみられなかった。初期に吸収の多いものほど、その吸収増加が激しくモードの変化も著しい。表の中の全吸収の値は反射防止膜側からレーザー光を入射した場合のカロリーメトリック法による測定値である。全吸収が同程度であってもZnSeの方がKClよりもモード変化が生じやすいことがこの実験で確かめられた。

4. 今後の見通し

1972年にC. V. D. 法によりZnSeが開発され数kW出力までのレーザーにほとんど使われるようになり、アルカリハライドはほとんど使われなくなった。その最大の理由は材料それ自身の持つ潮解性と機械的な弱さにあった。ところがレーザー発振器の大出力化に伴って、またアルカリハライドのKClが注目されるようになって来た。それは屈折率の温度係数が負で熱

膨張による項を打ち消し合うためにZnSeに比べて熱レンズ効果が少なく良質なレーザービームが得られるからである。

KCl窓の反射防止膜として光学特性と同時に潮解性を防止する耐湿膜が大型プロジェクトにおいて開発され^{7) 13)} 表面に水を付着させない限り十分に実用に耐える見通しが得られ20kW出力の取出しにも成功した。なお機械的強度の弱さ等に対しては冷却方法やホルダーの工夫がなされた。一方ZnSeは機械的にも強く、潮解性もないため今後もさかんに使われて行く有力な材料であり、住友電工が本大プロの一環として国産化に成功し、米国のRaytheon社、II-VI社、CVD社に次ぐ第4番目のメーカーとなった意義は大きい。ZnSe光学部品の問題点としては極力光学ひずみを少なくすることにあり、そのためには出来るだけ表面吸収の少ない研磨と吸収の少ないコーティングが鍵を握っている。

CO₂レーザー加工機の国内市場は、昭和59年5月4日付けの日刊工業新聞によれば昭和65年度には1000億円に達すると予想されている。このような状況下にあつて、この大型プロジェクトの成果の波及効果として、大出力用のみならず、中、小出力用としても高性能、高信頼性、長寿命、低価格の光学部品が国産化され、我が国のCO₂レーザー加工機市場が予想に違わず拡大成長することを祈って筆をおく。

5. 謝 辞

本解説(I, II)の内容の多くは通産省工業技術院大型プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」の一環として得られたものであり御指導をいただいた開発官室、電総研、機械技研、レーザー組合、ならびに三菱電機、東芝、堀場製作所、住友電工の関係各位に深く感謝いたします。又一緒に仕事をして下さった松下技研レーザーグループの皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 桜木：大型プロジェクト超高性能レーザー応用複

- 合生産システム研究開発成果中間発表論文集
(1981)116.
小谷：レーザー研究, 11, 3. (1983)206.
桜木：ICALEO '84, Boston in U.S.A. (Nov. 12-15, 1984)
- 2) 山口ほか：大型プロジェクト超高性能レーザー応用複合生産システム研究開発成果中間発表論文集 (1981).109.
山口ほか：同上, 112.
難波ほか：ICALEO '84, Boston in U.S.A. (Nov. 12-15, 1984).
- 3) 河田ほか：同上, 126.
4) B. E. Newnam, et al. : N. B. S. special publication, **435** (1975) 254.
5) K. Schuster: Ann. Phys. **4** (1949) 352.
6) J. Muchart: Appl. Opt. **16** (1977) 2722.
- 7) 小野ほか：超高性能レーザー応用複合生産システムレーザー技術研究成果中間発表会論文集, (1982 6)130.
8) 宮田：精密機械, 49巻, 10号 (1983)1.
9) T. F. Deutsch: J. Electronic Materials **4**, 4 (1975) 663.
10) G. H. Sherman, et al. : Opt. Engg. **17**, 3 (1978) 225.
11) F. Horrigan, et al. : Micro Wave **8** (1968) 68.
12) M. Sparks: J. Appl. Phys. **42**, 12 (1971) 5029.
13) 宮田ほか：炭酸ガスレーザー用KCl, ZnSe光学部品(I)ー反射防止膜, (II)ー光学歪, (III)ー反射防止膜の実装評価, 第44回応用物理学会学術講演会予稿集 (1983.9)
14) 宮田：レーザー応用技術ハンドブック, レーザー協会編集, 朝倉書店, (1984) 158~172.