高繰返し固体レーザ用 キセノンフラッシュランプの長寿命化

正員 吉田英次 (大阪大学)

正員 吉田国雄 (大阪工業大学)

正員 山中龍彦 (大阪大学)

正員 中井貞雄 (大阪大学)

Long life operation of xenon-gas flashlamps for high-repetition rate solid state lasers

Hidetsugu Yoshida, Member(Osaka University), Kunio Yoshida, Member(Osaka Institute of Technology),
Tatsuhiko Yamanaka, Sadao Nakai, Member(Osaka University)

The lifetime of Xe flashlamp was tested by changing the geometrical shape and materials of electrode, and the fused silica tubes with and without large amount of OH base.

Tungsten was best material as a electrode, because the deterioration of fused silica tube caused by electrode evaporation due to flashlamp discharge at high repetition-rate was minimum. The lifetime of Xe flashlamp was lengthened by using the fused silica tube with high thermal conductivity.

キーワード： 固体レーザ、キセノンガス、電極材料、石英管、スパッタリング

1. まえがき

最近、高出力・高繰返し固体レーザが産業界で加工に広く使用されるようになった。これらの励起光源としては、Xe、Krなどの不活性ガスを封入したフラッシュランプ（以下ランプ）や半導体レーザが使われる。半導体レーザは開発途上にあり、現状では主としてランプが励起光源に使用されている。ランプ励起の場合、レーザの動作時間は現状では主としてランプの寿命によって制限されているが、ランプの長寿命化に関する文献は見当たらない。ランプの寿命は、大きく二つに大別できる。一つは光量が減衰する寿命であり、陰極や陽極物質の蒸発にともなう石英管内壁部の黒化による光量低下である。他の一つは、ランプを構成する石英管の加熱や紫外線による着色および溶解、破損などが考えられる。破損は、石英管に発生した応力が点灯時に石英の破壊強度以上になった場合に生じる。現状では、陽陰極物質の蒸発にともなう内壁部の黒化と石英管の着色による光量減衰が寿命の最大要因となっている。

高繰返し・高平均出力パルス固体レーザを開発する上で、ランプはレーザの性能に大きく影響を与えるが、ランプを構成する石英管、電極形状、電極材料、シール方法などの最適化を図ることによって現状のランプよりも長寿命化が可能であることが分かった。

筆者らは、石英管、電極形状、電極材料について、ラン

プの電気入力エネルギーと点灯周波数を広範囲に変化させ、電極のスパッタ、石英管の着色、溶解等による光量減衰などを調べ、長寿命ランプの開発を行ったので報告する。

2. ランプ寿命

測定に使用したランプの規格を表1に示す。内径6 mm、アーク長7.6 mm、石英管の肉厚1 mm、封入ガスXe、ガス圧力 6×10^4 Pa、電極シールは水冷が可能な方式を採用した。試験ランプは、石英管材質4種類、電極の形状2種類、電極材質2種類（タングステンとThO₂2%含有トリエーテッドタングステン；以下W、ThWと記す）について入力エネルギーと点灯周波数の関係を測定して、寿命を調べた。

ランプの破損（爆発）を生じる入力エネルギー E_{exp} を計算することによって、ランプの最大入力エネルギーおよび点灯寿命を決定できる。

一般にアーク長 l 、内径 d のランプの場合、点灯時間を $T (= L \cdot C)$ とすれば、 E_{exp} は経験的に次式のように表すことができる。(1)

$$E_{exp} = a \cdot l \cdot d \cdot \sqrt{T} \quad \text{--- (1)}$$

$$T = L \cdot C$$

表1 キセノンフラッシュランプの規格表
Table 1. Design parameter of Xe flashlamp.

石英管材質	4種類
電極材料	W, T h W
放電部内径	6 (mm)
アーク長	7 6 (mm)
石英管肉厚	1 (mm)
封入ガス	X e
封入ガス圧力	6 ×10 ⁴ (P a)

aはランプのガス圧力およびガスの種類によって決定される定数で、 $a=2.46 \times 10^4$ となる。

(1) 式より今回測定したランプの爆発エネルギー E_{exp} は点灯時間を $200 \mu s$ とすれば、 1590 (J) となる。爆発エネルギーに対する入力エネルギーの比が 0.2 以上になると、石英管の応力破壊、熱による溶解、電極のスパッタリング等が発生する確率が高くなり、ランプ寿命は短くなる。

ランプ寿命(または点灯回数) N は、入力エネルギーを E_{in} とすれば、次式の関係式で示される。

$$N = (E_{in}/E_{exp})^{-8.5} \quad \text{---(2)}$$

例えば、実験に使用したランプの場合、入力エネルギーが 400 J でのランプ寿命 N は、 1×10^5 回となる。ただし、ランプの寿命を決める(2)式は、数秒間隔でランプを点灯することによって得られた実験式であり、数Hz以上の点灯動作のランプ寿命を十分に評価できないことに注意する必要がある。ランプを高繰り返しで動作させた場合、石英管の熱的応力破壊によって最大電気入力制限される。石英管の温度上昇は、ガスによる熱伝導や紫外光による石英管の吸収等が考えられる。熱応力は、冷却される石英管外表面と温度の高い内表面との温度差によって生じ、引っ張り応力を定量的に測定して評価できる。

石英管内壁が耐え得る単位表面積当りの最大平均電気入力 P_{max} は、次式の関係式より求められる。(2)

$$P_{max} = \frac{2 \cdot R_t \cdot b}{t \cdot (1 - \eta)} \quad \text{---(3)}$$

- P_{max} : 単位面積当りの最大電気入力 (W/cm²)
 R_t : 熱衝撃係数 (W/cm)
 b : 0.35 (石英管の内表面温度差による張力歪み比)
 t : 石英管の厚さ (cm)
 h : ランプの発光効率

表2 ランプ寿命試験条件
Table 2. Operational condition of Xe flashlamp

入力エネルギー (J)	繰り返し周波数 (Hz)	爆発エネルギー比 E_{op}/E_{exp}	ランプ寿命 (ショット)
400	10	0.25	10^5
100	40	0.06	$<10^9$
40	100	0.025	$<10^{11}$

最大電気入力 5800 (W)
最大入力エネルギー 1590 (J)

石英の場合、熱衝撃係数 $R_t=14.5$ (W/cm)、石英管の厚さ $t=0.1$ (cm)、ランプの発光効率 $h=0.5 \sim 0.7$ とすると石英管の単位面積当りの最大電気入力は、約 $300 \sim 400$ (W/cm²) となる。今回実験を行ったランプの場合、放電部の内壁表面積は 14.2 (cm²) であり、ランプへの最大電気入力は、 $4200 \sim 5800$ (W) に制限される。

3. 試験用ランプ

<3-1>点灯条件

ランプ寿命試験条件を表2に示す。ランプへの最大電気入力の計算結果から、(入力エネルギー×点灯周波数) = 4 kWに保ち、放電パルスの立上り時間を約 $200 \mu s$ 、放電回路のダンピング定数^{(3)~(5)}を約 0.8 とした。点灯開始用シマー電流(放電開始用予備電流)を 0.3 Aとした。

入力エネルギーが 400 J のとき、爆発エネルギー比 0.2 、ランプ寿命は約 10^5 回となる。

<3-2>石英管と電極材料

ランプに使用される石英管は、早期破壊を引き起こす材料の欠陥(スクラッチ、ディグ、気泡など)の無い材料を選択する必要がある。また、石英管材料は、紫外線照射によるソラリゼーション(着色)を生じる。この現象は、石英に含有されるOH基、あるいは不純物などに左右される。この石英管に発生した欠陥部で光が吸収され、ランプの光量が減衰するとともに歪みが蓄積されガラス管の破壊を引き起こす。さらに、紫外光を吸収する石英管は、管の熱負荷が他に比べて増加する問題が生じる。これらのことから、同一形状・材料の電極を用い、下記に示すような種々の石英管材料に対して製作したランプの光量寿命試験を行った。

すなわち、石英管(内径 6 mmφ、外径 8 mmφ)には、以下の4種類を用いた。

- (a) 有水熔融石英 (OH量 200 ppm)
- (b) 有水合成石英 (OH量 1200 ppm)
- (c) 無水合成石英 (OH量 <1 ppm)
- (d) 無水熔融石英 (OH量 5 ppm)

ランプの陰極は、チップ部と基体部の二体構造から成って

いる。チップ部には、気孔率20%程度の多孔性Wにバリウム・カルシウム・アルミネート ($5\text{BaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) エミッターを含浸した。基体部にはWあるいはThWを用いた。

電極寸法は、 $6\text{mm}\phi \times 25\text{mm}$ (W, ThW), $5.5\text{mm}\phi \times 20\text{mm}$ (ThW) の2種類を用いた。電極部の冷却能率を高めるため、石英管内壁と電極外径間距離を数 μm とした。また、電極寸法が $6\text{mm}\phi \times 25\text{mm}$ の電極では、電極部の石英ガラス管厚を1mmから0.5mmにした。これは、電極の冷却をさらに高めるためである。

4. 寿命試験結果 (6) ~ (9)

< 4 - 1 > 光量寿命測定方法

寿命テスト用ランプは金属製の箱に取付け、電極端子および石英管放電部を約20℃で温度制御した純水を15 l/min流して冷却した。Nd添加結晶(YAG, GGG等)やレーザーガラスの主なNd吸収バンドは、530, 580, 750, 800, 880 nmにある。ランプからの発光量は、陰極部、中央部、陽極部に設けた光量測定用の合成石英ガラス窓を通過したランプ光を各吸収バンドに合致した干渉フィルター(バンド幅20 nm)およびピンホトダイオードで構成した測定器で、一定点灯回数ごとに測定した。光量減衰が大きい場合は、ランプの外観(電極のスパッタリング、石英管の着色、熔融など)を調べた。

< 4 - 2 > ランプ寿命試験 (1)

入力エネルギー $E_{in} = 400\text{ J}$,

点灯周波数 $F_{op} = 10\text{ Hz}$ の時

入力エネルギー400 J, 点灯周波数10 Hz, 最大電流1680 Aでランプの光量寿命試験を行った。(1)式から求めたランプの点灯寿命は約 1×10^5 回である。

図1は、陽極と陰極にThWを用い、石英管材料3種類

図1 各種石英管を用いたランプ光量寿命
(電極材料ThW)

Fig1 Radiated intensity of flashlamps for several quartz tubes.
(electrode material ThW)

について光量寿命試験を行った結果を示す。波長530nmのNd吸収バンドに関して点灯回数と陰極部の光量減衰の関係を示す。初期の発光量を100とすれば 2×10^5 回の時、それぞれの石英管による光量減衰は、(a), (c)および(d)のランプで、それぞれ32%, 19%および6%となった。しかしながら、各ランプの石英管内壁中央部ではランプにより多少異なるが、管内壁に熔融した痕跡(放電方向に沿った筋状の線)が見られた。この熔融の様子を図2に示す。(2×10^5 回点灯後)

この現象は、ピーク電流密度が高いため石英管内壁温度が溶解温度1200℃以上になったためと考えられる。また、陽極部のスパッタによる黒化が激しいことから電極に使用したThWの蒸発物が石英管内壁に付着し、石英ガラスの融点以上に温度上昇したために熔融が生じたと考えられる。

図2 各種石英管を用いたランプ外観写真
(点灯回数 2×10^5 回数)

Fig2. Photograph of flashlamp tubes
(Number of shots: 2×10^5 shots)

図3 各種石英管を用いたランプ光量寿命
(電極材料W)

Fig3. Radiated intensity of flashlamps for several quartz tubes.
(electrode material W)

次に、陽極と陰極にWを用いた（a）、（b）2種類の石英管材質で製作したランプの光量寿命試験を行った。点灯回数による陰極部の光量減衰を波長530nm、800nm（Nd吸収バンド）で測定し、その結果を図3に示す。初期の発光量を100とした場合に、 2×10^5 回点灯の時、ランプ（a）は530nmで約8%、800nmで約3%低下し、ランプ（b）は530nmで約13%、800nmで約8%低下した。

W電極を用いた場合、ThW電極を用いた光量寿命に比べ、光量の減衰量が改良された。また、石英管内壁の熔融もランプ（a）の石英管では見られなかった。ランプ（b）の石英管の場合、放電中央部に一部熔融が見られたが、ThW電極を用いた石英管に比べ、著しい管壁損傷は見られなかった。以上の実験結果から明らかなようにW電極を用いると、高エネルギー密度でもスパッタリングを生じにくいことが明らかになった。

石英管材料の違いによる光量寿命は、光量減衰の測定結果から、OH基の量、ソラリゼーションに影響を与える不純物量の差異による紫外線吸収量および熱耐力などの違いによって光量寿命に差が生じた。この理由については5章で述べる。

以上、 $E_{in} = 400\text{ J}$ 、 $F_{op} = 10\text{ Hz}$ によるランプの点灯寿命試験結果を表3にまとめた。ThW電極を用いたランプでは、全ての陰極、陽極のスパッタリングによる損傷が激しく、石英管の熔融は全てのランプで観測された。これに対し、電極にWを用いた（a）の有水熔融石英管のランプでは、電極のスパッタリングはみられず、陰極のエミッターによる蒸発により僅かに黄白色膜ができただけで、石英管の着色および溶解は見られず、光量減衰は僅かであった。

表3 ランプ寿命試験結果（400J、10Hz）

Table 3. Experimental results of lamp life tests at 400J,10Hz

電極材料	電極形状	石英管	石英管の劣化		光量減衰	評価
			電極部	放電部		
W	6φ×25 l	(a)	○	○	○	◎
		(b)	△	×	△	△
ThW	6φ×25 l	(a)	△	△	△	△
	5.5φ×25 l	(a)	×	×	×	×
		(c)	△	×	×	×
		(d)	△	△	△	△

電極部---スパッタリング、酸化（黒化）

放電部---石英管の着色、溶解

<4-3>ランプ寿命試験（2）

入力エネルギー $E_{in} = 400\text{ J}$ 、

点灯周波数 $F_{op} = 100\text{ Hz}$ の時

<4-2>のランプ寿命試験結果より最適な電極、石英管を選択し、入力エネルギー40J（爆発エネルギー比

0.025）、繰返し周波数100Hz、最大電気入力4kWの点灯条件で光量寿命試験を行った。（1）式で求めたランプの点灯寿命は、約 1×10^{11} 回である。

石英管は、（a）有水石英管を用い、比較のためW電極とThW電極について 5×10^6 回点灯したランプの陰極部の光量減衰（特に光量減衰の顕著な波長530nm）を図4に示す。陰極部はエミッターによる蒸発によってW、ThW電極とも僅かに白っぽくなった。しかし、陽極部は、先端から20mm程度まで石英管が黒化しているため、光量減衰は著しくなった。ランプの光量減衰結果を表4に示す。Ndの吸収バンド530nmでの陰極部光量は、両ランプともエミッター蒸発により15～18%低下したが、陽極部光量はW電極では減衰が見られなかった。しかしながら、ThW電極では石英管の黒化により、約53%と大幅に減衰した。

400J、10Hzの点灯寿命試験同様、ThW陽極部による石英管内壁の黒化（電極のスパッタリング）が激しく、光量減衰が見られた。これはWとThWの熱伝導率の違いにより電極部の温度上昇が異なるためと考えられる。

図4 電極材料によるランプ光量寿命
（点灯回数 5×10^6 回数）

Fig4. Electrode material dependence of flashlamp life as a function of number of shots (Number of shots: 5×10^6 shots)

表4 ランプ寿命試験結果（40J、100Hz）

Table 4. Experimental results of flashlamp life tests at 40J,100Hz

電極	石英管	光量減衰（初期光量100）		
		陰極部	中央部	陽極部
ThW	(a)	85	100	47
W	(a)	82	100	100

以下、石英管および電極について光量寿命との関係について検討した。

5. 検討

< 5 - 1 > 石英管

本報で使用したランプ封体用石英管は (a) 有水熔融石英ガラス、(b) 有水合成石英ガラス、(c) 無水合成石英ガラスおよび (d) 無水熔融石英ガラスの4種類である。

(a) と (d) の熔融石英ガラスはケイ砂や天然あるいは人工水晶を電熱やガス火炎などの熱源によって製造されている。一方、(b) と (c) の合成石英ガラスは高純度の SiCl_4 や人工ケイ素化合物を用い、ガス火炎や酸素プラズマ法によって作られており、不純物が極めて少ないという特徴を有する。したがって、紫外域の透過特性は合成石英ガラスの方が優れている。

図5に4種類の石英ガラスの分光透過率特性を示す。フラッシュランプ用封体石英管の具備すべき特性として、光学的な透過特性の他に、耐熱性と耐ソラリゼーション性がある。耐熱性については、一般に熔融石英ガラスの方が合成石英ガラスよりも高い。例えば、信越石英社のカタログでは最高使用温度（連続）が、熔融石英ガラスで1100℃、合成石英ガラスで950℃となっている⁽¹⁰⁾。一方、耐ソラリゼーション性ではOH基含有ガラスおよび高純度ガラスが優れている。本報で用いたガラスの中で耐ソラリゼーション性の高い方から順に (b) > (a) > (c) > (d) となる。また、ソラリゼーションはガラス温度が約600℃以上になると消失することが知られている⁽¹¹⁾。したがって、点灯時の管壁負荷が高い場合、すなわちランプ封体温度が高い場合はソラリゼーションは生じないことになる。

W電極使用ランプの400J、10Hz点灯動作結果において、(b)のランプでは放電中央部に一部溶解跡がみられた。この違いは、熔融石英ガラス(a)が合成石英ガラス(b)より耐熱性が高いために生じたと思われる。こ

図5 ランプに使用した石英管の分光透過特性

Fig.5 Spectral transmittance of four quartz tubes at UV wavelength region..

の結果、高入力点灯動作では熔融石英ガラスの使用が望ましいことを示している。

また、ThW電極を使用したランプの400J、10Hz動作結果において、(a)、(c)および(d)の石英ガラスも管内壁が黒化する前の段階でソラリゼーションによる封体のクラックや歪の発生はみられなかった。したがって、このような高入力の動作条件下では、管壁温度が高くなり(d)の無水熔融石英ガラスでも、ソラリゼーションに対して十分な耐久性を有するものと考えられる。

< 5 - 2 > 電極材料

電極材料にW、ThWを用いたランプにおいて、入力エネルギー400J、点灯回数10Hzの点灯動作および、40J、100Hzの点灯動作の光量寿命試験において差が見られた。

これは、電極温度が光量寿命に大きく依存していると推測し、ランプの入力エネルギーを400Jとし、点灯周波数を1、7、20Hzで動作させて、点灯回数による光量寿命を測定した。その結果を図6に示す。1Hzで点灯したランプは点灯回数 1.2×10^4 では光量減衰がみられないが、20Hzでは 6×10^4 回点灯で約20%の光量減衰が見られた。点灯回数が高くなると電極温度が高くなるため、電極からの蒸発が激しくなり、酸化物が電極周辺の管壁に付着し、光量が低下する。すなわち、電極の温度上昇を防ぐことが寿命を長くする手段と考えられる。

WとThWの温度Tによる各熱伝導率は、
Wは、

$$K_w(T) = 0.134 - (1.7 \times 10^{-5} \cdot T) \quad (\text{W/mmK})$$

図6 点灯周波数によるランプ光量寿命

Fig.6. Intensity reduction of flashlamp light as a function of number of shots.

ThWは、

$K_{ThW}(T) = 0.107 - (1.4 \times 10^{-5} \cdot T)$ (W/mmK) となり、ThWはWに比べて約2割劣っている。このため、フラッシュランプの電極部の温度分布について検討した。電極へのエネルギー（電気入力約10%、400Wが流入して熱エネルギーになったと考える）が電極先端面に一様かつ時間的に一定として電極の温度分布を計算した。計算は表5に示すパラメーター（1）電極材料、（2）電極の直径×長さ、（3）リード棒の直径×長さおよび（4）電極部の石英管の肉厚を変えた4種類のランプについて検討した。温度分布T(x)は、次の一次熱伝導方程式から求めた。

$$\pi \cdot \left(\frac{a}{2}\right)^2 \frac{d}{dx} \left\{ K_e(T(x)) \frac{dT(x)}{dx} \right\} = W(T(x), x) \quad \text{--- (4)}$$

$0 \leq x \leq L2$
a：電極の直径（mm）
 $K_e(T(x))$ ：温度による電極材料の熱伝導率
L2：電極の長さ（mm）

表5 計算に用いた電極材料および形状

Table5 Electrode material and shape used for calculation.

サンプル No.	電極材質	電極寸法 a × L2 (mm)	リード棒寸法 b × L1 (mm)	石英管肉厚 t (mm)
1	ThW	5.5 × 20	2 × 10	1
2	W	5.5 × 20	2 × 10	1
3	W	6 × 25	2.5 × 10	1
4	W	6 × 25	2.5 × 10	0.5

図7 電極部温度分布

Fig7. Temperature distribution of electrode parts

$W(T(x), x)$ は、電極の側面から逃げる単位長さ当りの熱量(W/mm)であり、熱損失は放射と対流によるものとして、封入ガスの熱伝導は電極と石英管の間隔が大きいため無視した。

各ランプについて電極部の温度分布を計算した結果を図7に示す。No.1とNo.2のランプを比較すると材料の熱伝導率の違いだけで電極先端部の温度は、ThWでは約2100℃に対し、Wは約1900℃となった。また、No.4のランプは、No.2のランプに比べ電極体積を約2割増加させ、No.3のランプ電極での絞り部の石英管肉厚を薄くする(0.5mm)ことにより、電極の冷却効果を大きくした。その結果、電極全体の温度を大幅に低減でき、電極先端部の温度は約1400℃まで低下することが分った。

以上の計算結果と寿命試験結果から、Wに比べThWを用いたランプは電極先端部の温度がかなり高くなることが予想されることから、電極からの蒸発が激しくなり電極の劣化が早くなったため、光量減衰に差がみられたと考えられる。

6.まとめ

本論文では、長寿命高繰返し高出力パルス固体レーザ用キセノンフラッシュランプの開発を行なった。

繰返し動作が1Hz以下のランプの寿命は、ランプ点灯によって石英管内部に発生する張力歪みで決まるため、その歪みをできるだけ少なくする方策を用いて長寿命化を図った。しかし、高繰返し点灯のランプでは、ランプを構成する石英管や電極材料の種類、電極形状をうまく選択することによってランプを長寿命化できることを明確にした。具体的には、以下のことが明らかになった。

1. フラッシュランプ用封体ガラスは、紫外域の透過特性よりもむしろ耐熱特性の方が重要な要因であることが分かった。すなわち、合成石英ガラスよりも熔融石英ガラスの方が適している。ソラリゼーションが問題となるような低い管壁負荷の動作条件では、有水熔融石英ガラスの使用が望ましい。

2. 点灯入力（平均電気入力）が高くなると電極温度が上昇し、電極物質の蒸発が激しくなり、酸化物が石英管内壁に付着し光量低下が著しい。このため、ThW電極に比べ熱伝導度の大きいW電極および電極容積の増大とガラス管の薄肉化は、電極先端部の温度の低下をもたらすため、電極物質の蒸発が抑制され、したがって石英管の溶解がみられず、光量寿命が延びた。

石英管および電極の最適化により、キセノンフラッシュランプの寿命を延ばすことができたことから、固体レーザの動作時間および出力安定度を向上させることが可能となった。

(平成7年4月21日受付、同7年8月11日再受付)

(謝辞)

本研究を実施するにあたり、実験で使用したランプを提供いただき、ご助言いただきましたウシオ電機株式会社の大久保啓介氏と山崎憲五氏に深く感謝いたします。

(文献)

- (1) J.H.Gomez: ISA Transation, 5, 28 (1966)
- (2) J.L.Emmett, W.F.Krupke, and W.R.Sooy: "The Potential of High-Average-Power Solid State Lasers." Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Calif., UCRL-53571(1984)
- (3) R.H.Dishington, W.R.Hook, and R.P.Hilberg: Flashlamp Discharge and Efficiency." Applied Optics, 13, 10(1974)
- (4) R.H.Dishington : "Flashlamp drive circuit optimization for Lasers.", Applied Optics, 16, 6, (1977)
- (5) J.P.Markiewicz, J.L.Emmett : IEEE J.Quantum Electron, QE-2, 707 (1968)
- (6) 吉田英次, 山崎憲五, 大久保啓介, 吉田国雄, 中井貞雄 : 「高繰返し固体レーザー用コンポーネントの開発 (5) 励起ランプ」第48回応用物理学会学術講演会, (1987)
- (7) 吉田英次, 山崎憲五, 大久保啓介, 吉田国雄, 中井貞雄 : 「高繰返し固体レーザー用コンポーネントの開発 (10) フラッシュランプ寿命」第35回応用物理学会関連連合講演会, (1988)
- (8) 吉田英次, 山崎憲五, 大久保啓介, 吉田国雄, 中井貞雄 : 「高繰返し固体レーザー (1) フラッシュランプ寿命」第49回応用物理学会学術講演会, (1988)
- (9) 吉田英次, 山崎憲五, 大久保啓介, 吉田国雄, 中井貞雄 : 「高繰返し固体レーザー (4) フラッシュランプ寿命」第36回応用物理学会関係連合講演会, (1989)
- (10) 信越石英社 : 「石英ガラスカタログ」
- (11) 岸井寛 : 「紫外線照射による石英ガラスの応力発生」窯業協会誌, 86, 193 (1978)

吉田英次 (正員)

昭和55年大阪工業大学電気工学科卒業。現在、大阪大学レーザー核融合研究センター文部技官。大型ガラスレーザー用光学素子および高ピーク、高平均出力固体レーザー用位相共役鏡の開発に従事。電気学会、応用物理学会、レーザー学会会員。

吉田國雄 (正員)

昭和48年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。工学博士。現在、大阪工業大学教授。高出力固体レーザー用光学部品、位相共役、高繰返し

しの高出力固体レーザー、レーザーアブレーションによる機能性薄膜製作の研究に従事。電気学会、物理学会、応用物理学会、レーザー学会会員。

山中龍彦 (正員)

昭和38年大阪大学工学部電気工学科卒業。昭和40年同大学大学院博士前期課程修了。工学博士。同大学助手、講師、助教授を経て、昭和55年同大学教授。現在、レーザー核融合研究センター教授。電気学会、物理学会、応用物理学会、レーザー学会、プラズマ核融合学会、APS 会員。

中井貞雄 (正員)

昭和36年大阪大学工学部電気工学科卒業。昭和41年同大学大学院博士課程修了。工学博士。同大学助手、講師、助教授を経て、昭和53年同大学教授。昭和62年より平成7年まで同大学レーザー核融合研究センター長。現在、同大学工学部電磁エネルギー工学専攻及びレーザー核融合研究センター教授。電気学会、物理学会、応用物理学会、レーザー学会、プラズマ核融合学会、APS、IEEE会員。