

# 宽波段高灵敏快响应热释电型 光卡计的研究

周复正 沈丽青

(中国科学院上海光机所, 201800)

**摘要:** 采用热释电材料, 设计并研制了适用于红外-可见-X光波段的高灵敏、快响应光能量计。计算了卡计的参数, 对  $1.06\mu\text{m}$ 、 $0.53\mu\text{m}$  激光和  $0.1\sim 10\text{keV}$  的软 X 射线进行了能量测量, 灵敏度达  $300\text{mV}/\mu\text{J}$ , 时间响应小于  $2\text{ns}$ 。

**关键词:** 热释电型卡计

## PE-calorimeter with broad spectra high sensitivity and fast response

*Zhou Fusheng, Shen Liqing*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** Photo-energymeter with high sensitivity, fine frequency and fast response has been developed with pyroelectric material. The parameters of the calorimeter are calculated. The energies of both laser at wavelength  $1.06\mu\text{m}$  and  $0.53\mu\text{m}$ , and soft x-ray ranging from  $0.1\text{keV}$  to  $10\text{keV}$  are measured. The sensitivity is about  $300\text{mV}/\mu\text{J}$  and the time response is less than  $2\text{ns}$ .

**Key words:** pyroelectric calorimeter

### 一、引 言

本文设计和研制了一种新型热释电光卡计, 可探测从红外、可见直到 X 光的微弱光能量信号, 同时具有快响应性质, 大大扩展了常规卡计<sup>[1~4]</sup>的功能和使用范围。

热释电材料是一种快响应的热敏元件。当材料被光辐射加热或附加吸收体被加热时, 产生温度变化, 导致材料内的热-电偶极子变化, 从而引起材料表面电荷量改变, 其潜在变化率高达微微秒量级。当接入一个负载电路, 就产生相应电压信号。如果入射光脉冲宽度远小于热释电材料的热时间常数和探测器电路的电时间常数, 则此感应的峰值电压就正比于入射光子总能量, 原理如图 1 所示。在此, 精确设计了卡计参数, 以达到满足光全吸收时有尽量高的温升和最快的响应时间。为了扩展探测器的光谱响应, 对红外到紫外光波段, 选择碳或金黑为吸收体, 考虑到提高抗破坏强度, 也采用发黑的氧化铝为吸收体。对软 X 射线波段, 选择银作吸

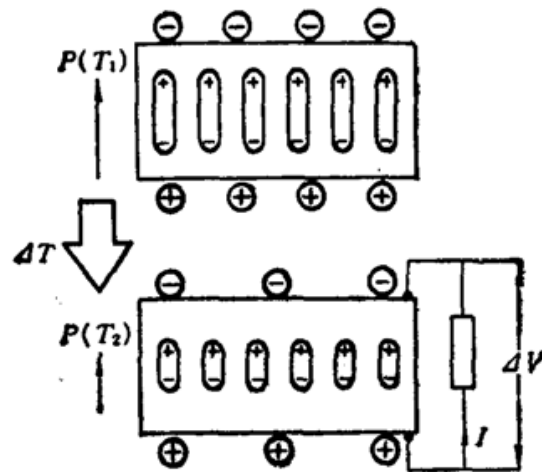


Fig. 1 Pyroelectric effect irradiated by a pulsed light source

收体, 如果可见光背底很弱, 使用金则更合适。

## 二、参数计算

吸收体被脉冲光辐照加热后, 如果忽略热辐射损耗, 在理想热传导情况下, 热释电材料的温升和电压变化为

$$T_t = \frac{A}{C_T} \int_0^t P_{(t)} dt$$

$$V_t = \frac{A^2 \lambda^*}{C C_T} \int_0^t P_{(t)} dt$$

式中  $C_T$  为材料的热容量,  $A$  为电极面积,  $C$  是热电元件极间和负载电容的总和,  $\lambda^*$  为热释电系数,  $P_{(t)}$  为光源功率。最高温升和峰值电压可表示为

$$\Delta T = E_a / C_T$$

$$U_{\max} = \xi E_p C_p / A C$$

在此  $\xi = \lambda^* / \epsilon C_p$  为热释电材料常数,  $\epsilon$  为介电常数,  $C_p$  为体比热,  $E_a$  为被吸收的入射光能量,  $C_p$  为热电元件极间电容。可见, 最高温升和峰值电压与入射光总能量成正比。在此以后, 温度和电压按下式衰减:

$$T_t = \frac{E_a}{C_T} e^{-t/\tau_T} / \alpha_T$$

$$V_t = \frac{A \lambda^* E_a}{C C_T} \cdot \frac{1}{\tau_T - \tau_e} \left[ \frac{\tau_T}{\alpha_e} e^{-t/\tau_e} - \frac{\tau_e}{\alpha_T} e^{-t/\tau_T} \right]$$

式中  $\alpha_T = 1 - e^{-T_i/\tau_T}$ ,  $\alpha_e = 1 - e^{-T_i/\tau_e}$ ,  $T_i$  为入射光源的重复频率,  $\tau_T$  为卡计的总热时间常数, 其中吸收体的热时间常数决定了卡计的上升时间:

$$\tau_{th} = \rho C_p d^2 / K_p$$

式中  $\rho$ 、 $K_p$  和  $d$  分别为吸收体的密度、热导和厚度。为了满足全吸收, 吸收体厚度必须达到  $d = (\ln 100) / \alpha$ , 其中  $\alpha$  为吸收体的吸收系数。  $\tau_e$  为卡计的电时间常数:

$$\tau_e = (R_1 // R_2) \cdot (C_1 // C_2)$$

式中  $R_1$  为热释电材料电阻,  $C_1 = k \epsilon_0 A / d$  为电极电容,  $k \epsilon_0$  是热释电材料的介电常数。  $R_2$  和

$C_2$  分别为电路的输入阻抗和容抗。由于卡计的电时间常数远小于热时间常数, 所以卡计的恢复时间取决于电路的放电时间。通常  $R_2 \ll R_1$ ,  $C_2 \ll C_1$ , 故卡计接收光脉冲的最大重复率为

$$f_c = 1/2\pi\tau_e \approx 1/2\pi R_2 C_1$$

设计一个口径为  $\phi 10 \text{ mm}$  的卡计, 热释电材料为钽酸铷 ( $\text{LiTaO}_3$ ),  $\xi = 4600$ , 入射脉冲光能量在微焦耳量级, 脉宽小于  $50 \text{ ns}$ , 卡计测试重复率为  $100 \text{ Hz}$ , 参数计算结果如表 1 所示。对红外-紫外光波段, 灵敏度达  $400 \text{ mV}/\mu\text{J}$ , 对软 X 射线波段, 灵敏度为  $40 \text{ mV}/\mu\text{J}$ , 上升时间为  $0.5 \mu\text{s}$ , 下降时间为  $2 \text{ ms}(1/e)$ , 温度、电压变化如图 2 所示。

Table 1 Parameters of PE-Calorimeter

Crest voltage	$U_{\max} \approx 200 \text{ mV}$
Sensitivity	$400 \text{ mV}/\mu\text{J} (\text{IR-V}); 40 \text{ mV}/\mu\text{J} (\text{X-ray})$
Rise time	$T_r \approx 0.1 \mu\text{s}$
Electrical time constant	$\tau_e = 2 \text{ ms}$
Repetition frequency	$f_c = 100 \text{ Hz}$
Signal-to-noise ratio	$N \approx 100 (\text{IR-V}); N \approx 40 (\text{X-ray})$
Hot time constant of absorption body	$\tau_{tha} \approx 20 \text{ ns}$
Hot time constant of PE	$\tau_{thPE} = 170 \text{ s}$
Temperature increment of single pulse	$\Delta T = 0.014 \text{ K}$

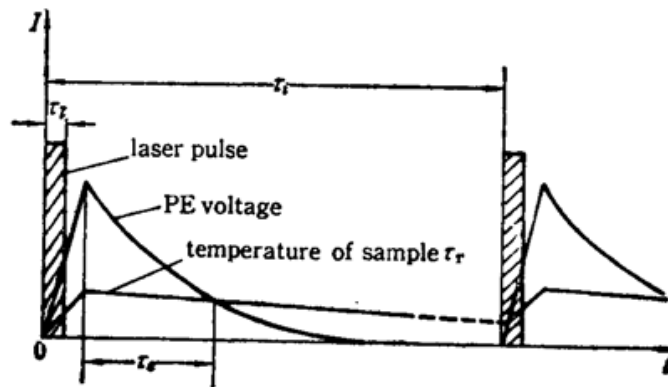


Fig. 2 Changes of PE voltage and temperature versus time

### 三、光谱响应

从远红外、可见到近紫外光, 热释电材料本身有良好的光谱响应。当附加一个高吸收的金黑或碳薄涂层, 可达到全吸收(图 3)。本文着重讨论卡计对软 X 射线波段的光谱响应。在  $0.1 \sim 10 \text{ keV}$ , 金有很好的吸收, 被许多软 X 射线探测器所使用。但对激光等离子体, 除了来自靶的 X 射线外, 还同时存在大量散射激光、离子、电子和非线性效应产生的宽波段光辐射。为此, 选择抛光银膜作吸收体是合适的, 因为它不仅对软 X 射线有较高的吸收<sup>[5]</sup>, 而且对可见和红外光有很高的反射<sup>[6]</sup>。在  $0.1 \sim 10 \text{ keV}$ ,  $\bar{\alpha}_{Ag} \approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ , 银的最小厚度为  $230 \text{ nm}$ 。

附加一个镀铝的有机薄膜作为窗口, 以透过 X 光和阻挡离子, 并进一步反射光辐射, 在

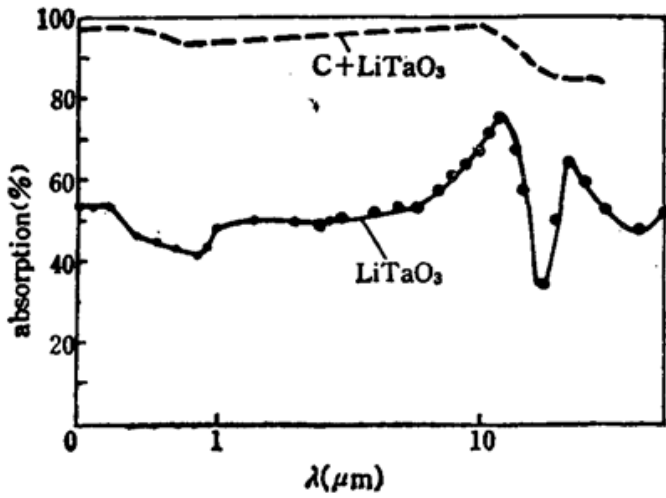


Fig. 3 Absorption of C coated on LiTaO<sub>3</sub> versus wavelength

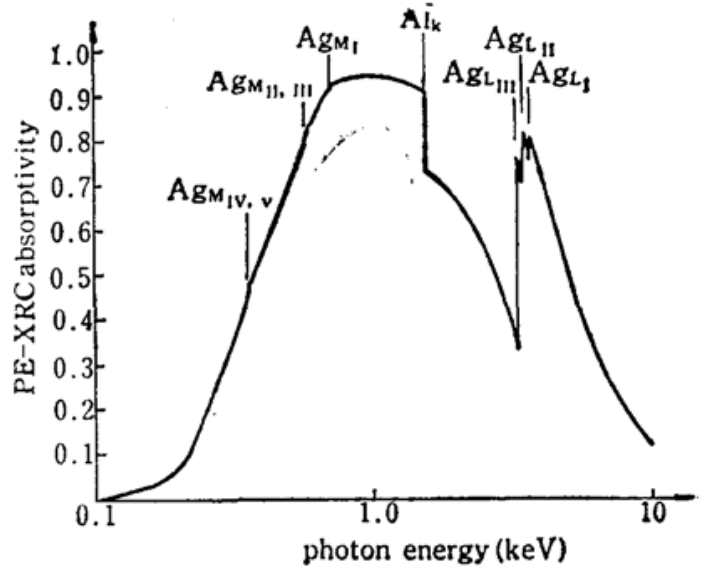


Fig. 4 Spectral response of soft X-ray calorimeter XRC spectral response, absorber: 1 μm Ag; filter: 0.2 μm Al

0.1~10 keV,  $\bar{\alpha}_{Al} \approx 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\bar{\alpha}_{Malar} \approx 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ , 假定透过 1/3 X 光, 则铝的最小厚度为  $d_{Al} = (\ln 3 - \alpha_M d_M) / \alpha_{Al} = 80 \text{ nm}$

对正入射和小角度入射红外-可见光, 经铝和银的双重反射, 强度降到  $10^{-3}$  量级, 对大角度的散射光, 仅有 0.1% 被吸收。计算到达吸收体表面的 X 光信号和光噪声的信噪比为  $S/N \approx 40$ 。用 1 μm 厚银作为吸收体, 用 0.2 μm 厚铝镀在 0.5 μm 厚的 Parylene 薄膜上作为窗口, 计算了卡计对 0.1~10 keV 软 X 射线的光谱响应如图 4 所示。可见对设计的中心波段 1 keV 处, 吸收达 94%。

### 四、实验结果

卡计结构如图 5 所示。LiTaO<sub>3</sub> 晶体厚 50 μm, 面积 14 × 14 mm<sup>2</sup>, 两面镀金电极, 吸收体为 5 μm 厚金黑, 有效接收光口径为 φ10 mm。热释电压信号经场效应管阻抗匹配耦合输出, 经放大、峰保电路, 直接数字显示。为了适应多路激光自动测量, 也采用了微机处理技术。能量对标实验使用的激光器输出能量 5 mJ, 脉宽 5 ns, 波长 1.06 μm。用标定过的标准卡计接

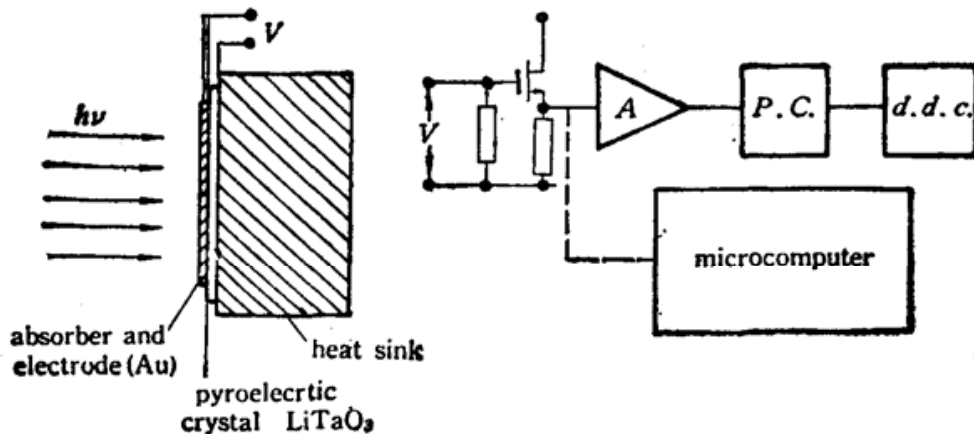


Fig. 5 Mechanical construction of PE calorimeter

收主光路激光, 经  $10^3 \sim 10^4$  重衰减后入射到热释电型卡计上, 控制能量在  $0.1 \sim 10 \mu\text{J}$  范围内进行标定实验。在主光路上插入倍频晶体 KTP, 即可进行  $0.53 \mu\text{m}$  波长能量定标实验。

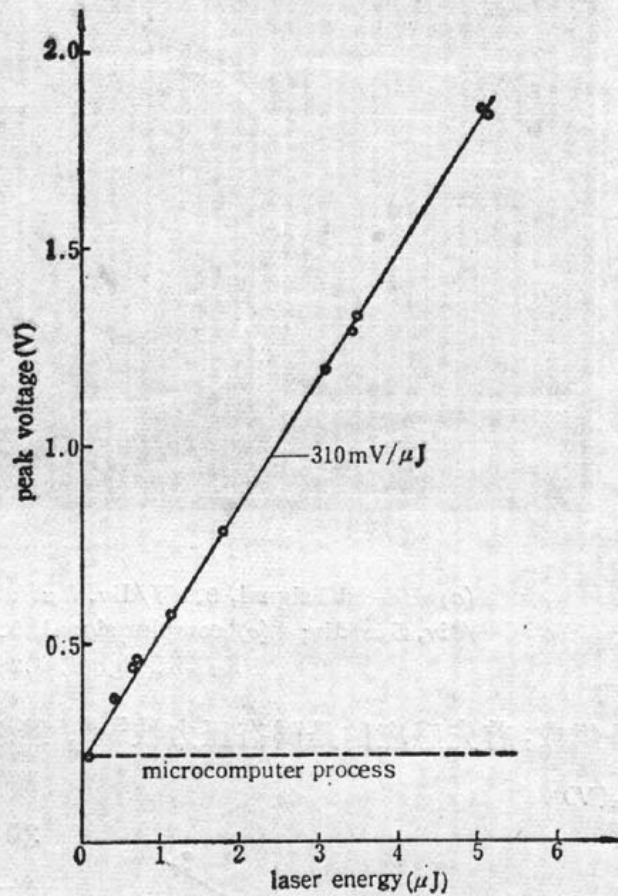
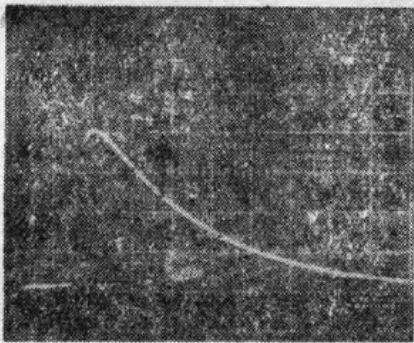


Fig. 6 Typical PE calorimeter signal

Fig. 7 Calibration curve of PE calorimeter

热释电型光卡计典型波形如图 6 所示。上升时间为  $0.02 \text{ ms}$ , 下降时间为  $1.2 \text{ ms}$ , 完全恢复时间约为  $4 \text{ ms}$ , 可用于测量  $200 \text{ pps}$  重复频率激光的每次单脉冲能量或器件的平均功率。能量标定实验结果如图 7 所示。灵敏度为  $310 \text{ mV}/\mu\text{J}$ , 在  $0.1 \mu\text{J}$  到  $5 \mu\text{J}$  之内, 对激光输出能量有良好的线性关系。该卡计已成功试用于波长  $1.5 \mu\text{m}$ 、脉宽小于  $50 \text{ ps}$  的前向喇曼散射微弱激光能量测量。

软 X 射线光卡计的吸收体为  $1 \mu\text{m}$  厚镜面银膜, 分别采用  $3.6 \mu\text{m}$  厚铝和  $0.2 \mu\text{m}$  厚铝镀在  $0.5 \mu\text{m}$  厚的 Parylene 膜的两种窗口材料, 其它结构同光卡计。测量激光等离子体 X 射线装置如图 8 所示。激光器输出能量  $10 \text{ J}$ , 脉宽  $20 \text{ ns}$ , 重复频率  $1 \text{ pps}$ , 采用中 Z 的铜、铁等靶材, 以得到较高的软 X 射线发射, 靶面功率密度为  $10^{12 \sim 13} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。为了判断激光等离子体发射的 X 光信号, 降低探头的匹配负载以提高时间响应, 得到一组波形如图 9 所示。(a) 为激光能量积分信号; (b) 为 X 光能量积分信号; (c) 为此两信号的叠加; (d) 为典型 X 光卡计信号,

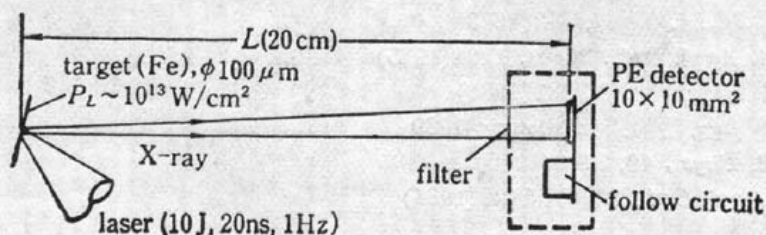


Fig. 8 Schematic diagram of soft X-ray detection

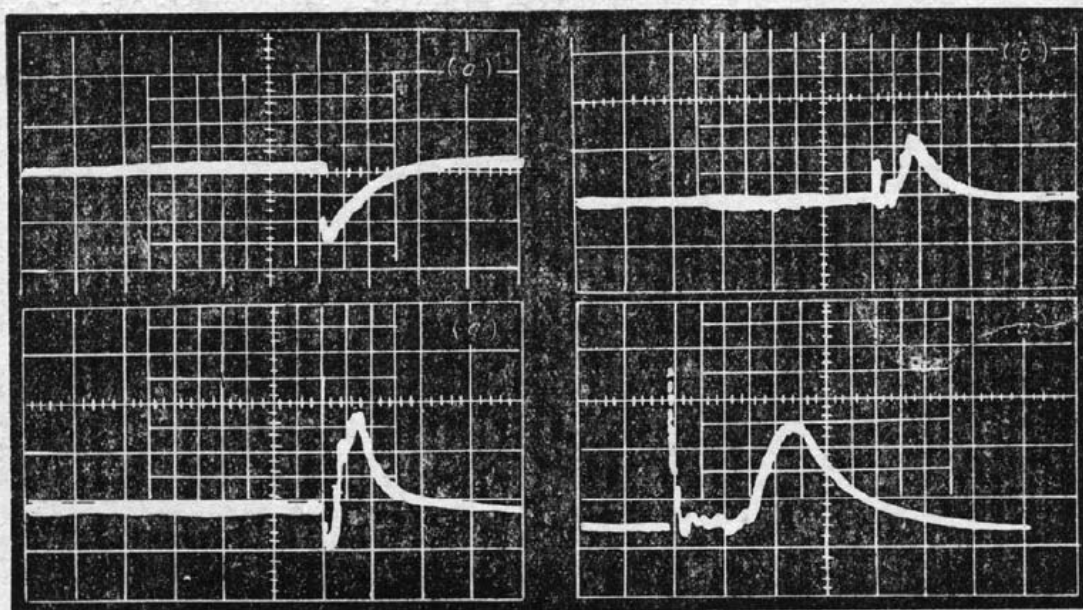


Fig. 9 Pyroelectric signals

(a) PE-IRC signal, 0.1 V/div, 5  $\mu$ s/div; (b) PE-XRC signal, 0.2 V/div, 5  $\mu$ s/div; (c) complex signal, 0.2 V/div, 5  $\mu$ s/div; (d) Typical PE-XRC signal, 0.2 V/div, 2  $\mu$ s/div

由三部分组成: 首先感应的是瞬态压力波<sup>[7,8]</sup>, 继之是 X 光能量积分信号, 与此同时, 叠加上低

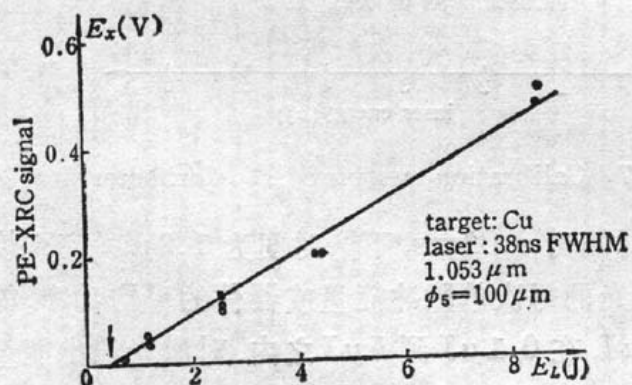


Fig. 10 Dependence of PE-XRC signal on laser energy

频弹性光声波和热电噪声。卡计灵敏度为 30 mV/ $\mu$ J, 比光卡计低一个量级, 这是由于 X 光卡计吸收体热容量大和低抗电路耦合, 导致灵敏度下降。卡计用于监测激光等离子体 X 光发射的结果如图 10 所示, 可见 X 光发射与激光驱动源基本上成线性关系, 产生 X 光的激光阈值能量约为 0.3 J, 与计算和其它 X 光诊断实验结果一致<sup>[9,10]</sup>。

本文部分实验结果是在日本大阪大学进行的, 感谢 O. Yamanaka 教授、S. Nakai 所长、

T. Yamanaka 教授的有关支持和 T. Jitsuno、M. Takahashi 等人的热情合作。

### 参 考 文 献

- 1 王瑞华, 周复正, 激光, **5**(11), 201 (1984)
- 2 林康春, 周复正, 核聚变与等离子体物理, (1), 41 (1983)
- 3 S. R. Gunn *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **48**, 1375 (1977)
- 4 H. Nishimura *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **56**, 1128 (1985)
- 5 H. J. Hageman *et al.*, *JOSA*, **65**(6), 742 (1975)
- 6 Dar-Yuan Song *et al.*, *Appl. Opt.*, **24**(8), 1164 (1985)
- 7 A. C. Tam, *Rev. Mod. Phys.*, **58**(2), 381 (1986)
- 8 周复正 *et al.*, 欧洲材料学会, 法国, Strasbourg, 1989
- 9 T. N. Lee *et al.*, *Appl. Phys.*, **46**, 3789 (1975)
- 10 D. J. Nagelet *et al.*, *Appl. Opt.*, **23**(9), 1428 (1984)