

# 光纤 X 射线探针和测量系统

王耀才 石艺尉 王群威

(中国矿业大学自动化工程系, 江苏徐州, 221008)

**摘 要** 利用 X 射线在探针中的康普顿散射以及电子在光纤中的契仑柯夫效应可以构成光纤 X 射线探针和测量系统, 本文对此做了理论和实验研究。推导了光纤探针的灵敏度公式, 给出了计算结果, 并做了实验标定。讨论了光纤探针测量系统的构成、测量的动态范围和响应时间。

**关键词** 光纤探针, 契仑柯夫光, X 射线, 灵敏度。

## 1 引 言

用单次闪光 X 光机产生的高强度脉冲 X 射线进行各项研究时, 对脉冲 X 射线强度的测量是必要的。本文提出了新颖的光纤 X 射线探针和测量系统, 其基本原理是: 当 X 射线照射光纤时产生光电效应、康普顿散射和正负电子对, 能量为 0.5~8 MeV 的 X 射线, 康普顿散射是主要的, 其它两种效应可以忽略, 散射产生的康普顿电子在光纤中发射契仑柯夫光, 其中的一部分被光纤收集, 成为受导光线, 经光纤传输后在光电检测器中产生输出电流。这种光纤探针和测量系统比传统的由荧光体光电二极管组成的测量系统优越, 因为光纤探针体积微小而不影响 X 射线的空间分布, 抗电磁干扰能力强并具有超快的时间响应, 这是其它核辐射探测器难以实现的。

## 2 X 射线在光纤中激发的契仑柯夫光

### 2.1 X 射线在光纤中散射产生的电子

X 射线在光纤中的康普顿散射的几何条件如图 1 所示。能量为  $E$  的 X 光子在  $\varphi$  方向单位立体角内散射的康普顿电子数目的微分截面为<sup>[1]</sup>

$$\frac{d_e \sigma}{d\Omega'} = \frac{r_0}{2} \left\{ \frac{(1 + \alpha)^2 (1 - \cos \theta)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2 \cos^3 \varphi} \left[ 1 + \cos^2 \theta + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right] \right\} \quad (1)$$

其中  $r_0 = e^2/m_0c^2 = 2.8 \times 10^{-13}$  cm 是电子的经典半径,  $\alpha = E/m_0c^2$ 。在  $\varphi$  方向的康普顿电子能量为

$$E_e = \frac{2\alpha E}{1 + 2\alpha + (1 + \alpha)^2 \tan^2 \varphi} \quad (2)$$

康普顿电子的相对速度  $\beta$  与能量的关系由相对论公式确定:

$$\beta = [1 - 1/(1 + E_c/m_0c^2)^2]^{1/2} \tag{3}$$

角度  $\varphi$  与  $\theta$  的关系为  $\cot \varphi = (1 + \alpha) \tan (\theta/2)$ 。康普顿电子的能量范围为 0 至  $E/[1 + (2\alpha)^{-1}]$ 。在光纤中康普顿电子的产生是随机的，从产生到逸出纤芯，电子所走路程的平均值  $l_e$  可以近似地表示为  $l_e = \pi D/(8 \sin \psi_e)$ ，其中  $D$  为纤芯直径，为  $\mu\text{m}$  数量级，因此可忽略电子在纤芯中的散射。 $\psi_e$  是光纤轴向与康普顿电子运动方向的夹角。

### 2.2 康普顿电子在光纤中发射的契仑柯夫光

光纤中的康普顿电子，当其速度  $\beta$  超过光在光纤中的速度，即  $\beta > \beta_{th} = 1/n_1$  时，就会在其路径上发射契仑柯夫光。其中  $n_1$  为纤芯的折射率，称  $\beta_{th}$  为光纤中契仑柯夫辐射的阈速度。一个电子在其单位路径上发射的契仑柯夫光(光谱范围为  $\Delta\lambda$ ) 光子数目  $N$ ，随波长  $\lambda$  的分布为

$$\frac{dN_p}{dl} = \frac{(2\pi)^2 e^2}{hc} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n_1^2}\right) \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

其中  $h$  为普朗克常数， $2\pi e^2/hc = 1/137$ ，发光光谱分布在紫外、可见和近红外光谱区，光子均匀分布在以电子路径为轴线、以  $\theta_c$  为半角的圆锥表面上，称  $\theta_c$  为契仑柯夫辐射角，其表达式为  $\cos \theta_c = (\beta n_1)^{-1}$ ，它表明了契仑柯夫辐射的方向性。

欲使注入光纤某横截面的光线被光纤接收，成为受导光线，要求注入光的方向必须满足一定的几何条件，用光纤的接收角  $\theta_A$  表征这一特性，它与光纤的数值孔径  $NA$  和注入光所在介质的折射率  $n_1$  有关。圆柱形、阶梯折射率分布的熔融石英光纤，对子午光线有

$$NA = n_1 \sin \theta_A$$

因此，在光纤中产生的契仑柯夫光，只有与光纤轴向夹角  $\psi_e \leq \theta_A$  的那些光子才能被光纤接收、成为受导光线。因此，只有满足  $\psi_{e1} \leq \psi_e \leq \psi_{e2}$  条件的那些康普顿电子在光纤中发射的契仑柯夫光的一部分才能成为光纤中的受导光线，不难导出

$$\begin{aligned} \psi_{e1} &= |\cos^{-1}(1/\beta n_1) - \cos^{-1}(1 - NA^2/n_1^2)^{1/2}| \\ \psi_{e2} &= \cos^{-1}(1/\beta n_1) + \cos^{-1}(1 - NA^2/n_1^2)^{1/2} \end{aligned}$$

光纤中使康普顿电子发射的契仑柯夫光成为受导光线的份额，被定义为光纤的接收效率  $\eta$ 。参照图 1，设  $\xi$  为光纤轴向和光子发射方向在垂直电子运动方向的平面上投影线之间的夹角， $\zeta$  为光纤轴向和电子运动方向在垂直 X 射线入射方向的平面上投影线之间的夹角，根据立体几何有

$$\begin{aligned} \cos \psi_e &= \cos \psi_e \cos \theta_c + \sin \psi_e \sin \theta_c \cos \xi \\ \cos \psi_e &= \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \cos \zeta \end{aligned} \tag{4}$$

满足光线受导条件的  $\psi_e$  的最大值等于  $\theta_A$ ，此时  $\xi$  也达到最大值，于是可以导出

$$\eta = \frac{2\xi_{\max}}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{(n_1^2 - NA^2)^{1/2} - \cos \psi_e/\beta}{(n_1^2 - \beta^{-2})^{1/2} \sin \psi_e}$$

使  $\eta$  达到最大值的  $\psi_e$  称为最佳角度  $\psi_{e, \text{opt}}$ ，可导出

$$\psi_{e, \text{opt}} = \begin{cases} \cos^{-1} [(n_1^2 - NA^2)^{-1/2}/\beta], & \text{当 } \theta_c > \theta_A \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } \theta_c \leq \theta_A \text{ 时} \end{cases}$$

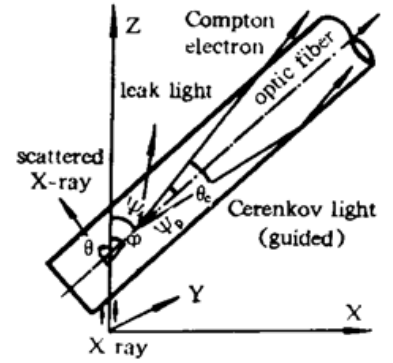


Fig. 1 Compton scattering and cerenkov radiation in optic fiber irradiated by X-ray

9823

其中,  $NA = 0.20$ ,  $n_1 = 1.5$ 。当  $\beta = 1$  时, 计算出  $\psi_{e, opt} = 47.7^\circ$ 、 $\psi_{e1} = 40.5^\circ$ 、 $\psi_{e2} = 55.8^\circ$ ; 图 2 示出计算的  $\eta$  与  $\psi_e$  关系曲线。须指出, 在后面的灵敏度计算中  $\psi_e$  是由  $\psi$ 、 $\varphi$  和  $\zeta$  的值算出的。

### 2.3 光纤对 X 射线激发的契仑柯夫光的灵敏度

光纤对 X 射线在其自身中激发的契仑柯夫光的灵敏度, 被定义为单位 X 射线通量强度照射单位长度光纤时在光纤中每单位波长宽度内产生的波长为  $\lambda$  的受导契仑柯夫光的光功率, 以  $S_F$  表示。基于前两节的讨论, 利用有关公式, 不难推导出

$$S_F = 8.94 \times 10^{-2} \rho N_0 \frac{Z}{A} \frac{D^3}{\lambda^3} \int_{\varphi_{eff}} \int_{\zeta_{eff}} \frac{d_e \sigma}{d \Omega'} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n_1^2} \right) \frac{\sin \varphi}{\sin \psi_e} \cos^{-1} \frac{(n_1^2 - NA^2)^{1/2} - \cos \psi_e / \beta}{(n_1^2 - \beta^{-2})^{1/2} \sin \psi_e} d\varphi d\zeta \quad (5)$$

其中  $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$  是石英光纤的密度,  $Z/A = 0.5$  是石英光纤原子的电荷数对质量数之比,  $N_0$  是阿佛伽德罗常数。  $S_F$  的单位常用  $[nW / \frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \cdot \text{cm} \cdot \text{nm}]$  表示。将(1)至(4)式代入被积函数, 它就变成初始变量  $\psi$ 、 $E$ 、 $\varphi$ 、 $\zeta$  的函数了。有效积分区间  $\varphi_{eff}$  和  $\zeta_{eff}$  分别表示在  $\varphi[0, \pi/2]$  和  $\zeta[0, 2\pi]$  积分区间内由约束条件( $\beta > \beta_{th}$  和  $\psi_{e1} \leq \psi_e \leq \psi_{e2}$ ) 确定的对灵敏度有贡献的积分区间, 因此(5)式只在此区间内进行积分。

用 FORTRAN 程序对(5)式积分做了数值计算, 图 3 示出计算的灵敏度与能量的关系曲线。选用的参数是,  $D = 50 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.5$ ,  $NA = 0.20$ ,  $E = 0.5 \sim 8 \text{ MeV}$ ,  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ 。计算结果表明, 当  $\psi = 47^\circ$  时获得最高灵敏度, 而且有比较平坦的能量响应, 当  $\psi = 47^\circ$ 、 $E = 1.5 \text{ MeV}$  时, 典型的计算结果为  $S_F = 7.15 \times 10^{-21} nW / \frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \cdot \text{cm} \cdot \text{nm}$ 。由数值计算结果可知  $S_F \propto NA^2$ 。由公式(5)可知  $S_F \propto D^3/\lambda^3$ , 即灵敏度对光纤芯径和波长很敏感。

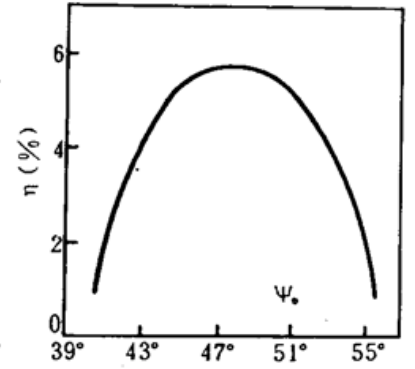


Fig. 2  $\eta$  vs  $\psi_e$  curve

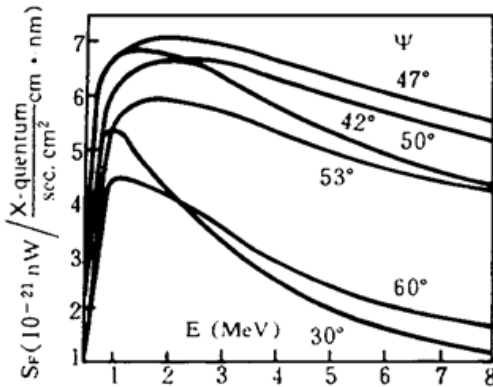


Fig. 3 Sensitivity of optic fiber to X-ray

## 3 光纤探针和测量系统

### 3.1 构成

光纤 X 射线探针(OFP)由光纤和包围它的灵敏度增强体构成, 增强体的作用是提高灵敏度和消除因 X 射线在光纤周围物质中的散射所造成对灵敏度的影响。增强体材料和尺寸的选择应使其在 X 射线照射下达到电子平衡。当  $E = 1 \sim 3 \text{ MeV}$  时, 选择能将光纤嵌入其中心的  $\phi 10 \text{ mm}$  有机玻璃棒是适合的, 估算的灵敏度增强因子  $\epsilon = 10$  左右, 则光纤 X 射线探针对 X 射线的灵敏度  $S = S_F \epsilon$ , 这提供了对  $S$  进行实验标定的依据。光纤 X 射线探针的尾纤耦合到传输光纤上。

光纤 X 射线测量系统由光纤 X 射线探针、光纤光缆(OFC)传输线、窄带滤光片(NBF)和光电器件(OED)组成, 其系统框图如图 4 所示。

窄带滤光片的作用是选择光波波长和谱线宽度  $\Delta\lambda$ 。光电器件可选用快速光电倍增管(PMT)或条纹照相机, 对前者可用宽带示波器记录。

### 3.2 系统灵敏度和动态范围

测量系统对 X 射线的灵敏度被定义为在单位 X 射线通量强度照射下, 条纹照相机所记录的黑度或光电倍增管的阳极输出电流。以后者为例, 系统灵敏度为

$$S_{stm} = 10^{-(9+0.1\beta_c L)} S I T \Delta \lambda S_k G \left[ \text{mA} / \frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right]$$

其中  $l$  [cm] 为光纤 X 射线探针的照射长度,  $T$  和  $\Delta \lambda$  [nm] 为窄带滤光片的透射率和光谱宽度,  $S_k$  [mA/W] 和  $G$  为光电倍增管的光阴极灵敏度和增益,  $\beta_c$  [dB/km] 和  $L$  [km] 为光纤光缆的损耗和长度。

系统可测量的最低 X 射线通量强度  $I_1$ : 当要求在系统分辨时间  $t_{RS}$  [ns] 内光阴极产生光电子数目的相对起伏为 5% 时, 可以表示为

$$I_1 = \frac{6.4 \times 10^{(4+0.1\beta_c L)}}{S I T \Delta \lambda S_k t_{RS}} \left[ \text{X-Quantum} / \text{s} \cdot \text{cm}^2 \right]$$

系统可测量的最高 X 射线通量强度  $I_2$ : 主要由长度为  $l$  的光纤 X 射线探针所容许的辐射非线性  $\beta_u$  [dB]、抗辐照水平  $\beta_{RR}$  [dB /  $\frac{\text{C}}{\text{kg}} \cdot \text{m}$ ] 和射线脉冲的持续时间  $t_D$  [ns] 决定, (其中  $\frac{\text{C}}{\text{kg}}$  表示库仑每千克) 可以导出

$$I_2 = \frac{10^{11} \beta_u}{t_D \beta_{RR}} \left[ \frac{\text{C}}{\text{kg}} / \text{s} \right] \frac{E \approx 1 \text{ MeV}}{7.75 \times 10^{23}} \frac{7.75 \times 10^{23} \beta_u}{t_D \beta_{RR}} \left[ \frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right]$$

系统测量的动态范围为

$$DR = \frac{I_2}{I_1} = 12.1 \times 10^{(18-0.1\beta_c L)} S I T S_k \frac{t_{RS}}{t_D} \cdot \frac{\beta_u}{\beta_{RR}}$$

对如下参数(单位从略, 上文已给出):  $l = 10$ ,  $\beta_{RR} = 1.163$ ,  $\beta_u = 0.3$ ,  $L = 0.5$ ,  $\beta_c = 3$ ,  $\lambda = 850$ ,  $\Delta \lambda = 20$ ,  $T = 0.7$ ,  $S_k = 130$ ,  $G = 2 \times 10^5$ ,  $S = 8 \times 10^{-20}$ ,  $t_{RS} = 3.5$ ,  $t_D = 10$ , 计算出:  $S_{stm} = 2 \times 10^{-19}$ ,  $I_1 = 1.8 \times 10^{19}$ ,  $I_2 = 2 \times 10^{21}$ ,  $DR = 111$ 。

### 3.3 系统的时间响应

光纤 X 射线探针: 由几何条件引起的信号最大时延差为  $\tau_1 = l(n_1 - \cos \psi) / c$ , 当  $l = 10$  cm,  $\psi = 47^\circ$  时,  $\tau_1 = 0.27$  ns; 由契仑柯夫辐射原子退激发产生的时间展宽最大为 0.1 ns。因此, 光纤 X 射线探针脉冲响应的宽度为  $\tau_{OFF} = 0.28$  ns。

光纤光缆: 对多模梯度石英光纤, 当  $L = 0.5$  km 时, 模式色散产生的脉冲展宽可达到 0.2 ns; 当  $\lambda = 850$  nm、 $\Delta \lambda = 20$  nm 和 5 nm 时, 材料色散导致的脉冲展宽分别为 1 ns 和 0.25 ns (取材料色散系数为 0.1 ns/km · nm)。因此, 当  $\Delta \lambda = 20$  nm 和 5 nm 时, 0.5 km 长的光纤光缆脉冲总展宽分别为 1 ns 和 0.32 ns。

光电倍增管: 普通快速光电倍增管和微通道板 (MCP) 光电倍增管的脉冲展宽分别为 2 ns 和 0.3 ns。

X 射线测量系统的脉冲展宽最小可达到 0.7 ns, 最大 (相当于最低配置) 为 2.7 ns。

## 4 实验与分析

光纤 X 射线探针的灵敏度标定实验装置如图 4 所示。单次闪光的 X 光机主要由直流电

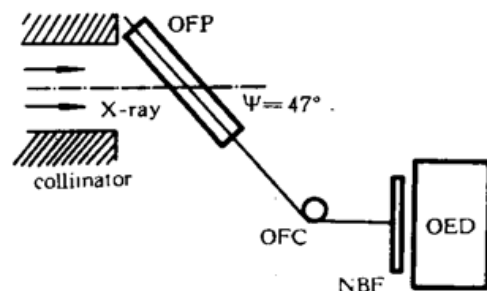


Fig. 4 Configuration of X-ray measurement system with optic fiber

源、电压脉冲发生器、脉冲成形器、二极管和靶室组成,可产生宽度为 20~100 ns 的 X 光脉冲, X 射线的平均能量为 2 MeV。X 射线通量强度的测量方法如下:用 LiF 玻璃受照射后的热释光效应测量单次闪光脉冲的累积剂量,同时用 ST401 塑料闪烁体和光电二极管构成的闪烁探测器测量闪光的脉冲波形,这样就可计算出探针处 X 射线的通量强度,其典型值为  $3 \times 10^{19}$  [X-Quantam/s · cm<sup>2</sup>]。

实验条件如下:光纤探针由  $\phi$  10 mm 有机玻璃棒和 Ge · P · Si 系梯度光纤构成,光纤光缆采用 SiO<sub>2</sub> · GeO<sub>2</sub> 梯度光纤,长度为  $L = 1.02$  km。光纤 X 射线探针和光纤光缆光纤的芯直径均为  $D = 50$   $\mu$ m,  $NA = 0.20$ ,  $n_1 = 1.5$ ,它们的其它参数以及窄带滤光片和光电倍增管的参数与上述 2.3 节和 3.2 节计算时采用的参数值相同。光电倍增管测量的信号经 3 m 长电缆传送给宽带示波器(OSC)。

实验初始数据是从示波器屏幕上取得的 0.3 V 电压波形,相当于光电倍增管输出 4 mA 电流,由此算出实验系统的  $S_{stm} = 1.3 \times 10^{-19}$  [mA /  $\frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ ],再由它的表达式代入相应参数值,便可求出标定结果为  $S = 8 \times 10^{-20}$  [nW /  $\frac{\text{X-Quantum}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \cdot \text{cm} \cdot \text{nm}$ ],波形的典型宽度为 82 ns,波形光滑无起伏。

若取  $\varepsilon = 10$ ,则  $S_f$  的计算值偏低 12%。理论计算用了光纤对子午光线的 NA,实际上光纤中存在大量的斜光线,而它的 NA 较前者为大,因此导致理论结果偏低。本文旨在建立光纤 X 射线探针的数学模型,用计算结果指导标定实验,最终以标定值为准。本系统对频带而言采用了最低配置,其上升时间为 2.8 ns。

**结 论** 理论和实验结果表明,这种新型的光纤 X 射线探针和测量系统是可应用的。使用条件是在光纤 X 射线探针前加准直器并保证  $\psi = 47^\circ$ ,其灵敏度和时间响应可以通过系统不同的配置进行调节,最佳系统的响应时间为亚毫秒级。

### 参 考 文 献

- [1] K. Siegbahn, *Alpha-Beta and Gamma-Ray Spectroscopy*. Vol. 1, Amsterdam Press, Amsterdam, 1965: 54~59

## Optic Fiber X-Ray Probe and Measurement System

Wang Yaocai      Shi Yiwei      Wang Qunwei

(Department of Autoengineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

(Received 31 October 1994; revised 11 October 1995)

**Abstract** Based on the Cerenkov radiation of electrons from the Compton scattering of the X-ray in optic fiber, an optic fiber X-ray probe and measurement system can be constructed. The theoretical and experimental study have been conducted. The analytical expression for the sensitivity of the probe is derived and its calculating result is given. We have made the calibration experiment and discussed the measurement dynamic range and time response of the system.

**Key words** optic fiber probe, Cerenkov light, X-ray, sensitivity.