

闪烁光纤二维成像技术研究*

汪晓莲 汪兆民 许咨宗 宋 勇 周 毅 张 斌

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

提要 报道了以 β 射线源为光源, 二维点阵闪烁光纤束为位置灵敏探测器, 与像增强器、CCD 摄像机、微机构成的二维成像系统, 给出了成像实验结果, 并讨论了其固有空间分辨和应用前景。

关键词 闪烁光纤, 二维成像, 空间分辨

1 引 言

闪烁光纤已被广泛地应用于高能物理实验中。由于单根闪烁光纤的光产额很低, 使它的应用受到很大的限制^[1]。随着各种像增强技术和电荷耦合器 CCD 技术的出现与发展, 使闪烁光纤在射线二维成像技术中的应用成为可能。运用现代光纤技术, 闪烁光纤的直径可以做得很细(几十微米)。经过适当的二维排列, 可以达到很高的空间分辨率, 可望在生物医学、工业 CT、海关检测等方面获得应用。

目前对闪烁光纤的研究, 虽然进行得非常广泛细致, 但绝大部分的研究集中在实验粒子物理领域^[2], 而将闪烁光纤的高空间分辨特性应用于二维成像系统中的研究尚未见报道。本文报道利用闪烁光纤构成的二维成像系统装置(Scintillating Fibers Imaging System, 简称为 SFIS), 并对成像技术进行了初步研究。

2 闪烁光纤的荧光收集传输原理

闪烁光纤芯层的材料主要是聚苯乙烯和聚乙烯甲苯加闪烁物质, 折射率 $n \approx 1.6$, 而包层的折射率 $n \approx 1.5$ 。有些闪烁光纤, 除了上述两层外, 最外面还有一层不透明吸收光的物质, 主要用以吸收离开光纤的荧光, 因此称为吸收层。闪烁光纤的直径可以做成几毫米到几十微米, 其中包层非常薄, 约为几十微米到几微米, 大部分是芯层物质。

当带电粒子或 γ 射线穿过有机闪烁光纤时, 苯环中 π 电子受激发, 跃迁到高能级, 而后又自发跃迁到低能级或基态, 并发出一个光子, 荧光光子的波长有一定范围, 通常发射谱和吸收谱有部分重叠, 造成荧光的自吸收。因此在实际应用中, 要在闪烁物质 (x) 中加入杂质 (y, z), 它们一般也是闪烁物质, 但与 x 相比具有较低的激发态。加入杂质后, x 发出的荧光光子 γ_x 会被第一种杂质 y 吸收, 释放出具有更大波长的光子 γ_y ; γ_y 还会发生和 γ_x 相同的过程, 把荧光变

* 国家自然科学基金资助项目。

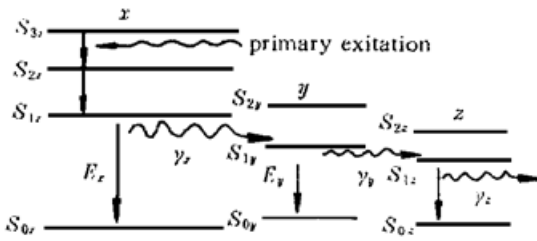


图 1 掺杂有机闪烁光纤的发光

Fig. 1 The luminescence of the doped scintillating fiber

到波长更大的范围。最终被探测到的是光子 γ_y 和 γ_z ，如图 1 所示。

芯层受激发后发光，根据全反射原理，芯层传输的闪烁光满足

$$\cos\alpha_1 = \sin\theta \sqrt{1 - (x \cos\phi/r)^2} \leq \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \quad (1)$$

式中角度 α_1 为界面的反射角， θ ， ϕ 定义如图 2。

包层的闪烁光满足

$$\cos\alpha_2 \leq \sqrt{1 - (1/n_2)^2} \quad (2)$$

α_2 为包层和空气界面的反射角。虽然光纤具有很大的荧光衰减长度和良好的时间特性，但能被闪烁光纤收集并沿之传播的光子的比例是很小的。芯层闪烁荧光的收集效率可按下式估计

$$\eta = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_r} \sin\theta d\theta = \frac{(1 - \cos\theta_r)}{2} = \frac{(1 - n_2/n_1)}{2} \quad (3)$$

式中 θ_r 为最大光锥顶角。

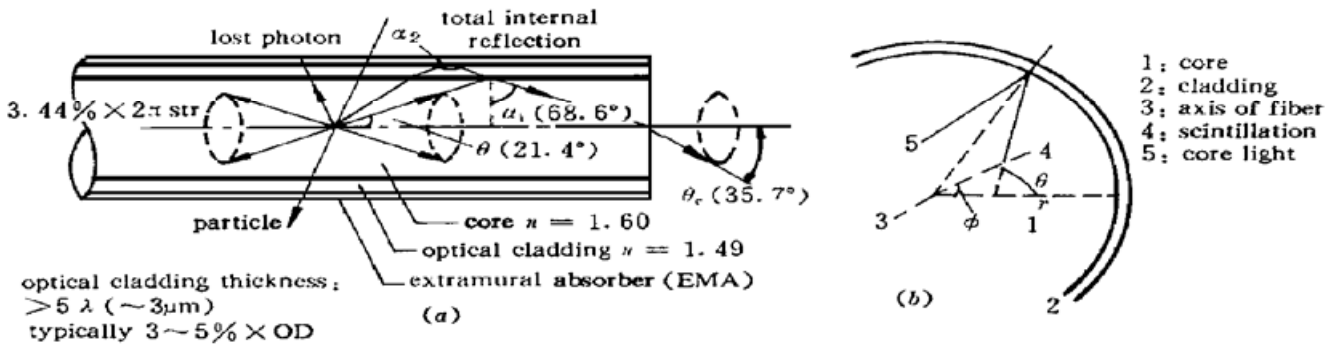


图 2 荧光在闪烁光纤中的收集和传输

Fig. 2 The fluorescence collection and transmission in the scintillating fiber

对我们使用的意大利 Pol. Hi. Tech 公司的 0046 闪烁光纤，芯层折射率 $n_1 \approx 1.59$ ，包层折射率 $n_2 \approx 1.49$ ， $\eta \approx 3.14\%$ 。

3 闪烁光纤成像系统

作为原理实验，我们用闪烁光纤建造了一个简单的闪烁光纤成像系统装置^[3]（如图 3 所示）。此系统由放射源、被测物和二维闪烁光纤位置灵敏探测装置三部分组成。放射源是 10mCi 的 Sr^{90} β 射线源，活性区直径为 8 mm，被测物是图像“土”字，然后是二维闪烁光纤位置灵敏探

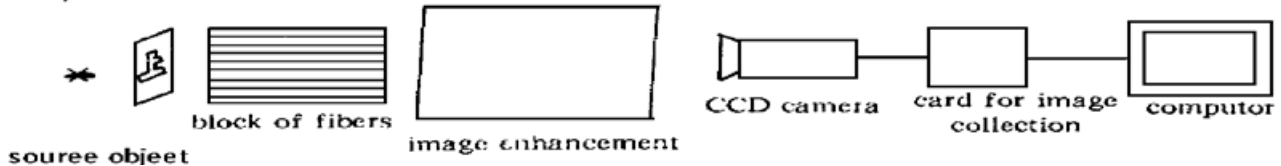


图 3 闪烁光纤成像系统

Fig. 3 The scintillating fiber imaging system

测装置。该装置接受从被测物体透射的射线, 并将其转换成闪烁荧光, 形成二维图像, 再把图像传输到像增强器; 图像经像增强器放大后, 肉眼可以直接观察到, 放大后的图像经 CCD 摄像, 图像采集卡数字化储存起来。

闪烁光纤探测装置是方形光纤束。用直径为 1 mm, 长度为 28 mm 的闪烁光纤平行粘结成二维的 14 mm × 14 mm 面阵, 端面经过精细抛光。光纤闪烁荧光中心波长为 437 nm, 最大孔径角为 33.7°, 荧光传输衰减长度为 2.46 m^[4]。

采用的反转式像增强器, 微通道板的每个通道直径为 8 μm, 窗由微光纤构成, 每根光纤的直径为 12 μm; CCD 摄像机的光电二极管面阵传感器由 795 × 595 个像素组成, 几何尺寸为 8 mm × 6 mm, 因此每个像素的尺寸为 10 μm × 10 μm。光纤束所成的像用像增强器和 CCD 读出后, 输出的是视频信号, 通过图像采集卡 VIDEO-VESA-M 将其数字化, 并输入计算机, 进行图像处理。

我们加工了一块铁板, 上面有一个“土”形的狭缝, 狭缝宽 1 mm, 长 6 mm, 上面一横长 3

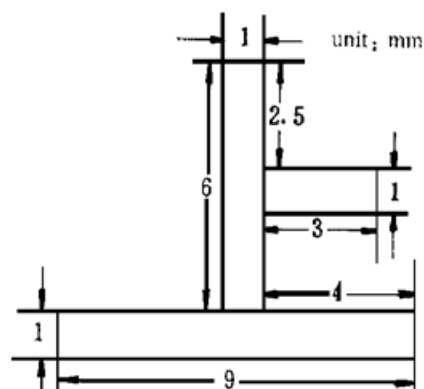


图 4 “土”字形的狭缝
Fig. 4 Shape of the collimator

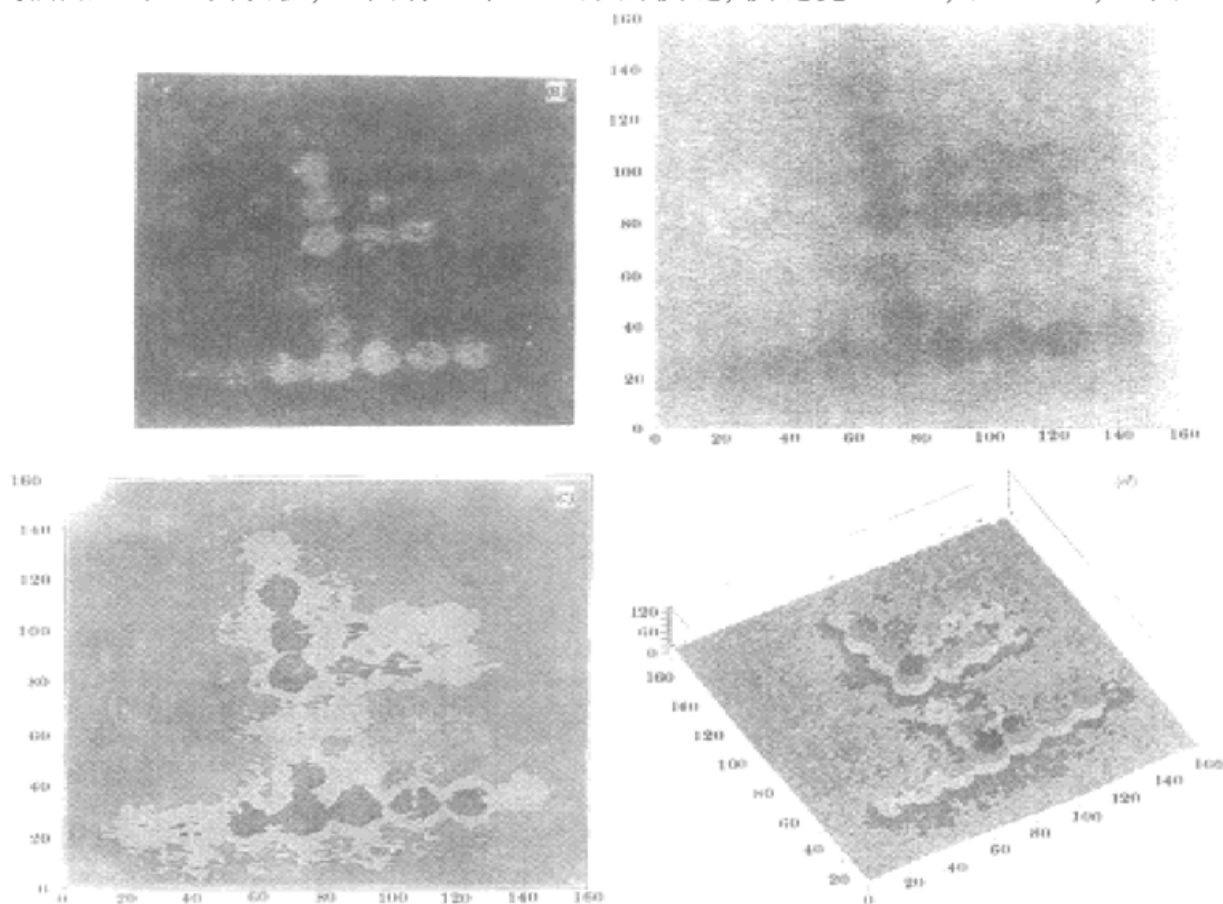


图 5 SFIS 成像实验结果

(a) SFIS 得到的成像; (b) 成像的灰度图; (c) 成像的等灰度图; (d) 成像的灰度二维直方图

Fig. 5 Results of SFIS experiment

(a) the image obtained with SFIS; (b) luminous intensity lines;

(c) equal luminous intensity lines; (d) 2-D histogram of luminous intensity lines

mm, 下面一横长 9 mm, 如图 4 所示。用它作为 SFIS 的被成像物。用 Sr^{90} β 射线源照射, 在计算机显示器(VGA)上得到了清晰的像。如图 5(a) 所示。

由图 5 可见, 由于 3 mm 长的狭缝对准二层光纤的中间, 而缝宽和光纤直径都是 1 mm, 所以 β 射线源在二层光纤中都损失能量, 二层光纤均有荧光产生, 但光强约是狭缝对准一层光纤时的一半。

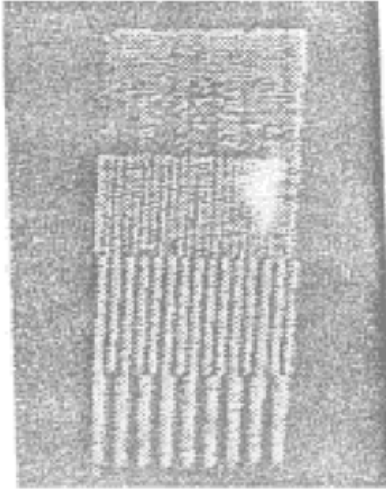


图 6 光栅成像

Fig. 6 The grating image

由于在实验中所用的光纤较粗(直径为 1 mm), 所以闪烁光纤位置灵敏探测装置是影响系统固有位置分辨率的最主要因素。如果用较细的光纤, 则主要影响因素将是像增强器荧光屏的分辨率。光纤一般都能达到几十微米的尺寸。为了确定像增强器和 CCD 的固有空间分辨率, 用一个四层的光栅, 每层光栅常数不同, 分别为 500 μm , 300 μm , 200 μm 和 100 μm , 把它用硅油紧紧耦合在像增强器的光阴极上, 由于耦合紧密, 一般不会产生衍射条纹。光栅成像的光源为经过红色滤光片的白炽光, 波长为 600 nm。光栅图像直接由 CCD 摄像机获取, 如图 6 所示。由图可见, 除最密的第四层外其余三层光栅条纹都很清晰, 凭肉眼就能分辨, 结果列于表 1。图像经处理后形成灰度数据, 可以分析各级条纹间的光强分布和对比度。由此可以得到, 荧光屏至少可以分辨 60 μm 的尺度。

表 1 光栅成像的结果

Table 1 Results of grating imaging

grating No.	1	2	3	4
wide of stripe/ μm	215	100	60	50
distance of stripes/ μm	285	200	140	50
resolution of CCD	very clear	clear	relatively clear	not separated

4 讨 论

我们采用闪烁光纤面阵作为二维成像系统的前端装置, 首次进行了闪烁光纤二维成像技术的原理实验。由于闪烁光纤的半径可以做到微米量级, SFIS 的分辨率将由像增强器的荧光屏的分辨率决定。

闪烁光纤既是射线探测的灵敏元件, 又是光信号传输的元件, 同传统的位置灵敏探测器相比, 闪烁光纤具有以下优点:

(1) 闪烁光纤位置灵敏探测易于和像增强器耦合, 把图像放大到人眼可观察的程度, 光电转换环节少, 非常直观且监视方便。

(2) 闪烁光纤具有较长的荧光传输衰减长度, 光纤束所成的二维图像, 可以在很长的距离上传播, 同时由于闪烁光纤的柔韧性, 可延伸到空间的某些大探测器不易安置的狭小地方, 扩大了探测范围。

(3) 塑料闪烁体时间响应快, 没有光信号的叠加。选用适当的读出装置, 就可以实时采集

和处理图像,对生物活体的生理研究很有意义。

(4) 闪烁光纤的位置灵敏探测器可以做到大面积灵敏,且同时具有很高的空间分辨率,对于宇宙探测尤为有利。

(5) 闪烁光纤的主要成份是塑料闪烁体,成本低廉,易于大范围推广使用。因此,闪烁光纤二维成像是一种很有发展前途的成像技术。

参 考 文 献

- 1 C. M. Hawkes, M. Kuhlen, B. Milliken *et al.*. Decay time and light yield measurement for scintillating fibres. *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research*, 1990, **A292**: 239
- 2 F. G. Hartjes, R. Wigmans. Scintillating fiber for Hadron calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research*, 1989, **A277**: 399
- 3 Wang Xiaolian, Xu Zizhong, Wang Zhaomin. Scintillating fiber imaging system. *Nuclear Technology* (核技术), 1997, **20**(10): 583~ 586 (in Chinese)
- 4 Wang Xiaolian, Xu Zhizhong, Hou Yunzhen *et al.*. Study of light characteristics of scintillating fibres. *High Energy Physics and Nuclear Physics* (高能物理与核物理), 1997, **2**(9): 787~ 792 (in Chinese)

The Study on the Scintillating Fibers Imaging Technique

Wang Xiaolian Wang Zhaomin Xu Zhizhong Song Yong Zhou Yi Zhang Bin
(Department of Modern Physics, USTC, Hefei 230027)

Abstract The 2-dimension imaging technique using scintillating fibres is described. The principle of the collection of the scintillation and the usage of the scintillating fibers in high energy physics is studied. At last, a simple scintillating fibers imaging system using scintillating fibers, enhancer, CCD camera, image capture card and computer is pretented.

Key words scintillating fiber, 2-dimension image, space resolution