

# 新型闪烁材料——闪烁光纤

刘淑美

王延恒

(天津大学物理系 天津 300072)

天津大学电子系 天津 300072)

**摘要** 本文简要地介绍闪烁光纤的工作原理,指出了掺  $Tb^{3+}$  和  $Ce^{3+}$  闪烁玻璃光纤的谱特性和衰变时间常数,将它们和  $CeF_3$  与其它无机闪烁材料的特性进行了比较,从而得知  $CeF_3$  及掺  $Ce^{3+}$  闪烁玻璃光纤存在着潜在的巨大应用市场。

**关键词** 闪烁光纤, 谱特性, 衰变时间常数。

## 1 引言

目前,高纯度的石英光纤已广泛地应用于通信领域——光纤通信。几乎与高纯度石英光纤同时进行的关于闪烁光纤的研究工作,1985年以来取得了突破性的进展。80年代末、90年代初,在先进国家中,闪烁光纤的研究工作已进入了实用化阶段。闪烁光纤可广泛应用于军事、工业、医学和生物医学等领域。主要应用方面有量热学、跟踪探测器、分光仪、辐照计数器、中子探测器和图像探测器等<sup>[1]</sup>。

## 2 闪烁光纤的种类和工作机理

根据使用的闪烁材料,闪烁光纤可分为三大类:闪烁玻璃光纤、闪烁塑料(聚苯乙烯)光纤和闪烁毛细管液体(苯、二甲苯、甲苯)光纤。闪烁玻璃光纤根据掺杂的稀土元素种类又可分为三小类:掺铈( $Ce^{3+}$ )、掺铽( $Tb^{3+}$ )和掺镨( $Pr^{3+}$ )闪烁玻璃光纤。

不论哪一种闪烁光纤,其工作机理大体一样,都具有双重作用:闪烁器作用和光导管作用。根据图1所示,当有快速运动的  $\alpha$ 、 $\beta$  粒子、 $\gamma$  或 X 射线射向闪烁光纤时,在光纤芯内将会激励起闪烁光。这时,闪烁光纤就是一个闪烁器;在光纤芯内激励起的闪烁光是各向同性的。由于光纤芯部的折射率  $n_1 = 1.61$  大于包层的折射率  $n_2 = 1.463$ ,根据全反射原理,只有那些位于临界角  $\theta_c = \sin^{-1}n_2/n_1$  以外的闪烁光才能在光纤内传输。这时,闪烁光纤便起光

导管的作用——引导闪烁光在光纤内部传输。

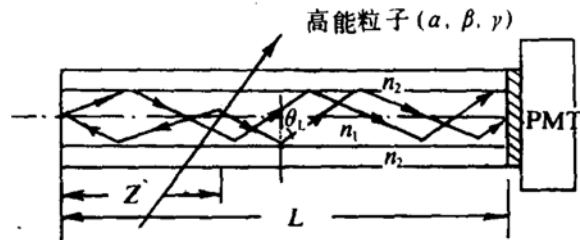


图1 闪烁光纤的工作机理

由图1可知,闪烁光纤可作为射线拍摄系统中的闪烁探测器。可用其探测效率  $DE$  来表征它的探测能力。它被定义为

$$DE = \frac{\text{输出闪烁光能量}}{\text{输入光子能量}} = T_a \times T_c \times T_t \quad (1)$$

式中,  $T_a$  是闪烁器的光子能量吸收效率,它反映有多少注入的光子能量转变为激励起二次电子跃迁的吸收损耗,它的值应为

$$T_a = \frac{\text{吸收的光子能量}}{\text{注入的光子能量}} \quad (2)$$

$T_c$  是闪烁器的光转换效率,又称量子效率。它表明有多少吸收的光子能量转变为闪烁光。它的大小为

$$T_c = \frac{\text{产生的闪烁光能量}}{\text{吸收的光子能量}} \quad (3)$$

$T_t$  是闪烁器的传输效率,它表明产生的闪烁光有多少可被光纤捕获而在光纤内传输。其定义为

$$T_t = \frac{\text{输出的闪烁光能量}}{\text{产生的闪烁光能量}} \quad (4)$$

在射线拍摄系统中,入射的光子、X 或  $\gamma$

射线等,都是电磁辐射.它们与物质的相互作用主要是与电子的离散碰撞.在光子能量为 10keV~10MeV 的范围内,占优势的相互作用是光电吸收、电子对的产生和康普顿散射.因此,光子能量吸收应包含注入的光子能量转变为二次电子的动能.这时,光子能量吸收效率可近似表示为<sup>[1]</sup>

$$T_a = \frac{I(t)}{I_0} = 1 - \exp\left[-\sum_i \int_0^{E_{max}} \mu_i(E) t dE\right] \quad (5)$$

式中,  $I_0$  是注入的光子强度;  $t$  是相互作用物质的厚度;  $\mu_i(E)$  是  $i$  材料的能量吸收系数.

由(5)式可知,较厚的探测器和较高的  $\mu_i(E)$  值,将使探测器具有较高的吸收效率  $T_a$ . 又因相互作用率  $N$  与吸收效率  $T_a$  成正比,以及泊松统计支配着辐射探测,所以探测器的信噪比(SNR)与相互作用率  $N$  的平方根成正比.即

$$N \propto T_a, \quad SNR \propto \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N} \quad (6)$$

可见,对于给定的爆光周期,具有较高吸收效率  $T_a$  的探测器,将会具有高的信噪比.

按照图 1 所示,由于被激励起的闪烁光是各向同性的,同时只有位于临界角  $\theta_c$  以外的那些闪烁光才能在光纤内被反射并传输,所以可传输的闪烁光总量大约为  $1 - n_1/n_2$ <sup>[2]</sup>. 此光的一半传输至接有光电倍增管 PMT 的右端面,传输的平均距离为  $L \times 1/2$ ; 另一半光则传输至左端面后被反射再传输至右端面. 此时传输的平均距离为  $L \times 3/2$ . 显然,此时的传输效率应为

$$T_t = T_{t_1} + T_{t_2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right) \exp\left(-\frac{L}{2\alpha}\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right) \times \exp\left(-\frac{3L}{2\alpha}\right) \left(1 - \frac{t_{\perp} + t_{\parallel}}{2}\right) \quad (7)$$

式中,  $L$  是闪烁光纤的长度,  $\alpha$  是反映吸收损耗和反射损耗的衰减系数,  $t_{\perp}$  和  $t_{\parallel}$  是闪烁光纤左端处光的垂直分量和水平分量的透射率. 它们的大小分别为

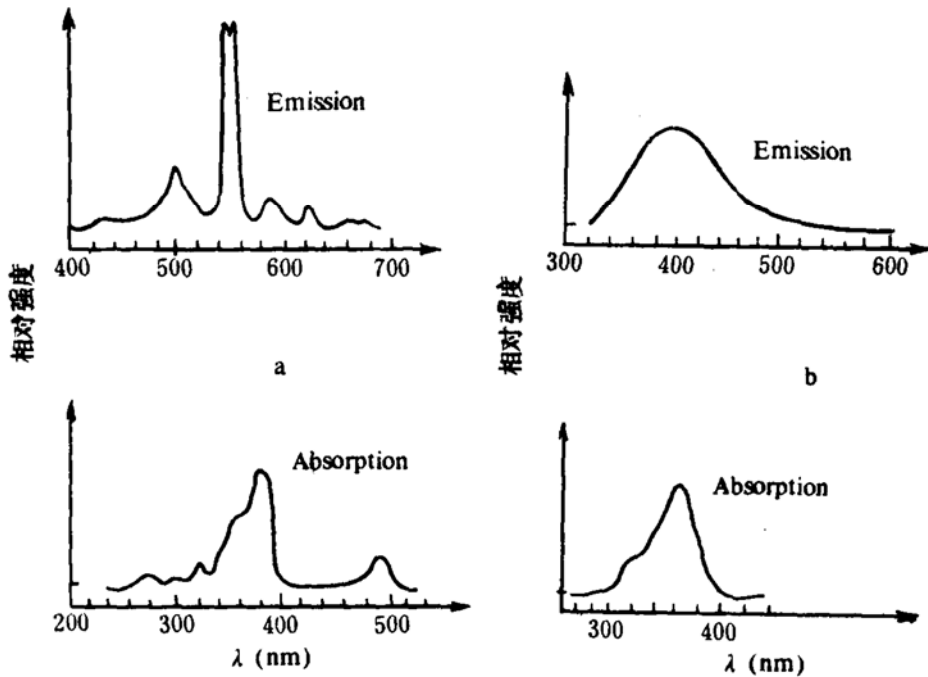


图 2 掺铽(Tb<sup>3+</sup>)(a)和掺铈(Ce<sup>3+</sup>)(b)闪烁玻璃光纤的谱特性

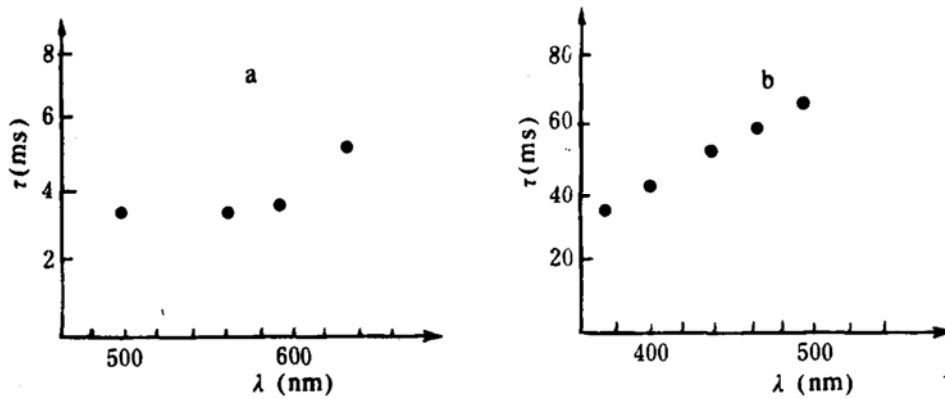


图 3 掺铽(Tb<sup>3+</sup>)(a)和掺铈(Ce<sup>3+</sup>)(b)闪烁玻璃光纤的衰变时间常数

表 1 CeF<sub>3</sub> 与 BaF<sub>2</sub> 等各种无机闪烁材料特性

		CeF <sub>3</sub>	BaF <sub>2</sub>	BGO	CsF	CsI	NaI	GSO
密度[g/cm <sup>3</sup> ]		6.16	4.9	7.13	4.64	4.53	3.67	6.71
衰变时间常数[ns]	短组分	≈5	0.6	300	2.8	71000	230[ms]	60
	长组分	30	620		4.4		150[ms]	
发射谱[nm]	短组分	310	220	480	390	550	415	430
	长组分	340	310					
折射率		1.68	1.56	2.15	1.48	1.8	1.85	1.9
光产额[NaI=100]		4~5	5~16	7~10	6	85	100	20
吸收情况		不	轻微	不	很	轻微	很	不

$$\left. \begin{aligned} t_{\perp} &= \frac{4n_1 \cos\theta (n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta)^{1/2}}{[n_1 \cos\theta + (n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta)^{1/2}]^2} \\ t_{\parallel} &= \frac{4n_0 n_1 \cos\theta (n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta)^{1/2}}{[n_0^2 \cos\theta + n_1 (n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta)^{1/2}]^2} \end{aligned} \right\} (8)$$

其中,  $n_0$  是闪烁光纤左端面外部介质的折射率,  $\theta$  是相对于光纤轴向的平均角度。

### 3 闪烁光纤的吸收和发射光谱

闪烁光纤是被动发光体. 当有高能  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  或 X 射线射向闪烁光纤时, 它才有闪烁光产生. 因此, 它应有两个光谱——吸收光谱和发射光谱. 图 2 所示, 为掺铽(Tb<sup>3+</sup>)(a)和掺铈(Ce<sup>3+</sup>)(b)闪烁玻璃光纤的吸收光谱和发射光谱<sup>[3]</sup>.

由图 2 看出, 掺铽(Tb<sup>3+</sup>)闪烁玻璃光纤的

吸收光谱和发射光谱的中心波长是分离的, 并且其发射光谱很窄, 主要集中在  $\lambda=550$  (nm) 的黄-绿光区. 这有利于闪烁光的传输和检测. 掺铈(Ce<sup>3+</sup>)闪烁玻璃光纤的吸收光谱和发射光谱存在着重叠现象, 其中心波长靠得很近, 并且其发射光谱很宽. 这对闪烁光的传输和检测是不利的.

### 4 闪烁光纤的衰变时间常数

闪烁光纤具有自吸收的特点, 即闪烁光在其中传输时是要衰变的. 当光强度衰变至其初始值的  $1/e$  时所经历的时间, 便称为闪烁光纤的衰变时间常数.

对照图 2, 由图 3 可知, 掺铽(Tb<sup>3+</sup>)和掺铈(Ce<sup>3+</sup>)闪烁玻璃光纤的衰变时间常数分别为  $\tau \approx 3$ (ms) 和  $\tau \approx 30$ (ns). 时间常数大意味着

余辉时间长. 因此, 从时间分辨率来讲, 掺铈( $Ce^{3+}$ )的闪烁玻璃光纤将优于掺铽( $Tb^{3+}$ )的闪烁玻璃光纤.

### 5 比较和结论

由图 2 可知, 掺铽( $Tb^{3+}$ )和掺铈( $Ce^{3+}$ )闪烁玻璃光纤发射谱的中心波长分别为  $\lambda \approx 550$  (nm) 和  $\lambda \approx 395$  (nm). 已知光电倍增管 PMT 的响应波长范围为  $\lambda \approx 330 \sim 400$  (nm). 因此, 从耦合的角度来讲, 掺铈( $Ce^{3+}$ )玻璃光纤将优于掺铽( $Tb^{3+}$ )玻璃光纤. 从时间分辨率来讲, 掺铈( $Ce^{3+}$ )玻璃光纤也优于掺铽( $Tb^{3+}$ )玻璃光纤.

目前已知的无机闪烁材料有许多种. 表 1

列举了它们的一些主要特性<sup>[4]</sup>, 以资比较.

因此, 可以看出,  $CeF_3$  这种无机闪烁材料, 包括掺杂它拉制出来的闪烁玻璃光纤, 在实际应用中具有明显的优势. 不足之处, 是它的光产额低一些.

### 参 考 文 献

- 1 Hua Shao, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, April, 1991, 38(2)
- 2 Bigler E, et al. Appl. Opt., 1985, 24(7)
- 3 Ruchti R, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1984, Ns-31(1)
- 4 Anderson D F, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. 1990, A287

## New Scintillating Material —— Scintillating Fiber

Liu Shumei

(Department of Physics, Tianjin University, Tianjin 300072)

Wang Yanheng

(Department of Electronic, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The working principle of scintillating fibers is briefly introduced in this paper. The decay time constant and spectral properties of the scintillating fibers of  $Tb_2O_3$  and  $Ce_2O_3$  glass are given. Comparing the properties of materials above and  $CeF_3$  with those of other inorganic scintillating materials, we find that  $CeF_3$  and scintillating fibers of the  $Ce_2O_3$  have an immense potential application market.

**Key Words** scintillating fibers, spectral properties, decay time constant.

(上接 59 页)

四极磁铁, 它将用于超导超级碰撞机束流的聚焦. 这个小组制造了六个 5 米长的样机, 然后把技术转让给选定的几家公司, 来制造成千上万个这样的磁铁. 加速器和聚变研究部小组和工程部还设计和试验一个 10 特斯拉的偶极(弯曲)磁铁, 是加速器型磁铁的创记录的场强.

加速器和聚变研究部的研究人员发明了制造优质金属

薄膜的新技术. 这种薄膜对于从固体电子学到 X 射线光学范围的应用, 是很有益的. 用一种“等离子体枪”产生羽状物, 再由磁场把这些羽状物引导到基质上面; 实际上用任何一种固体金属都可产生从几个原子到几个微米厚的薄膜. 用相关的精密技术, 还可以把离子注入表面.

(中国科学院近代物理研究所 王学敏供稿)