

文章编号: 1000-324X(2004)03-0666-05

## 抑制 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光慢成分的选择吸收膜系的研究

马晓辉, 顾 牡, 徐荣昆, 吴永刚, 曹二华

(同济大学玻尔固体物理研究所, 上海 200092)

**摘 要:** 根据 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分波段的不同, 设计并制备了用于抑制该晶体闪烁光慢成分的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub>/Al/MgF<sub>2</sub>... 金属-介质选择吸收膜系. 透射光谱、发射光谱和发光衰减时间谱的实验结果显示, 所研制的选择吸收膜系达到了预期的要求, BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分比提高了 80 倍以上, 有效地提高了 BaF<sub>2</sub> 闪烁晶体在高计数率测量中的应用价值.

**关 键 词:** BaF<sub>2</sub> 闪烁晶体; 选择吸收膜系; 快、慢成分抑制比

**中图分类号:** O 482 **文献标识码:** A

### 1 引言

BaF<sub>2</sub> 是现已发现的最快的无机闪烁晶体, 其快成分的发光衰减时间仅为 0.6ns<sup>[1]</sup>, 发光峰峰位为 195 和 220nm, 在高能物理和核技术应用等领域有着重要的应用价值<sup>[2~4]</sup>. 然而除快成分外, 该晶体还具有衰减时间为 620ns, 发光峰峰位为 310nm 的慢成分, 其强度远大于快成分. 慢成分的存在在高计数率测量中会引起严重的信号堆积, 从而影响了该晶体的应用. 目前抑制 BaF<sub>2</sub> 晶体慢成分的方法主要有两种: 一是采用仅对快成分敏感的光电器件进行测量<sup>[5]</sup>; 但这样的光电器件目前品种有限, 在许多场合下不能满足实验需要, 且只能依赖进口; 二是通过掺镧来抑制 BaF<sub>2</sub> 晶体的慢成分<sup>[6]</sup>, 实验表明在 BaF<sub>2</sub> 晶体的生长过程中掺入适量的 LaF<sub>3</sub> 可使 BaF<sub>2</sub> 晶体的快、慢成分抑制比提高 6 倍<sup>[7]</sup>, 这一方法可以在一定程度上抑制慢成分的影响. 本文将根据 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分波段的不同, 通过设计并制备具有选择滤波功能的多层金属-介质选择吸收膜系, 使 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快成分能很好通过, 慢成分能有效滤去, 从而实现 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光慢成分的有效抑制.

### 2 理论设计

从 BaF<sub>2</sub> 晶体的闪烁光谱<sup>[5]</sup> 可以看出闪烁光快成分的发光波段处于 180~240nm 之间, 而慢成分处于 240~420nm 之间, 因此根据薄膜光学的理论制备<sup>[8]</sup> 的膜系, 要求能对 240~420nm 的慢成分尽可能的滤去, 而使 180~240nm 的快成分尽可能的通过. 并且考虑到 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光的快成分处于紫外区域, 因此在制备选择吸收膜系的材料上, 我们选用了紫外光吸收

收稿日期: 2003-05-09, 收到修改稿日期: 2003-06-09

基金项目: 教育部高等学校优秀教师教学科研奖励计划 (教人司 (2002)123); 上海市教育委员会曙光计划 (02SG19) 和青年教师项目 (01QN18); 863 高科技项目 (2002AA324070)

作者简介: 马晓辉 (1978-), 男, 硕士研究生. E-mail: maxiaohui@citiz.net

比较小的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgF<sub>2</sub> 分别作为高、低折射率膜料, 其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料在  $\lambda > 180\text{nm}$  时, 折射率  $> 1.85$ , 消光系数  $k < 0.03$ ; 而 MgF<sub>2</sub> 材料在  $\lambda > 180\text{nm}$  时, 折射率  $\leq 1.5$ , 消光系数  $k < 0.011$ .

如果采用简单的周期介质膜系, 要实现使 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分比提高 40 倍以上, 大约需要 50 多层薄膜, 而较多层数的光学薄膜的制备会对工艺带来一定的困难.

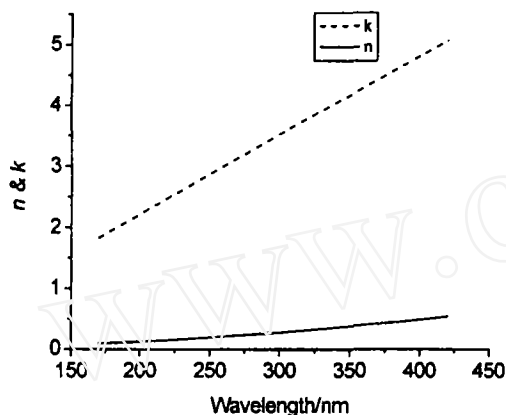


图 1 Al 的折射率  $n$  和消光系数  $k$

Fig. 1 Refractive index  $n$  and extinction coefficients  $k$  of Al

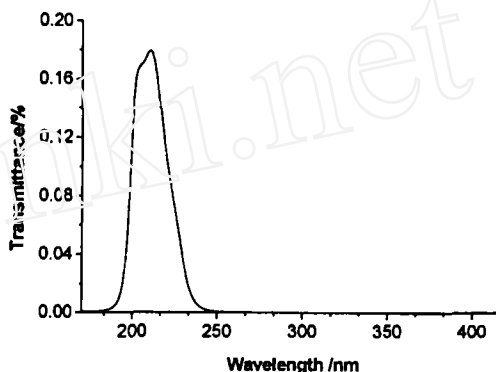


图 2 理论设计的 14 层膜系的透射曲线

Fig. 2 Transmittance of the designed 14 layers film

考虑到金属的反射率一般都比较低, 因此运用非周期金属诱导膜系的设计思想<sup>[8]</sup>, 用较少的膜层同样达到了理论设计的要求. 而且由于金属 Al 具有反射率高、熔点低、延展性好和价格便宜等特点, 因此我们选用 Al 作为金属反射膜. 图 1 为铝的折射率和消光系数.

膜系的设计以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub>/Al/MgF<sub>2</sub> 为一个周期结构, 依次叠加构成 3 重半金属 / 介质膜系. 图 2 为理论设计的由 14 层 (3 个半周期) 膜构成的金属 / 介质膜系的透射谱. 表 1 为膜系的不同材料的厚度.

表 1 不同材料的厚度 (nm)  
Table 1 Thickness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, Al (nm)

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgF <sub>2</sub>	Al
The first period	27.26	51.33 、 11.48	15
The second period	52.37	18.19 、 30.83	15
The third period	28.53	40.60 、 41.04	20
The last period		23.0	20

### 3 实验方法

薄膜在 GDM-450B 型真空镀膜机上采用电子束蒸发的方式制备, 其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgF<sub>2</sub> 材料的纯度都为 99.99%, 金属 Al 的纯度为 99.9%, 薄膜被直接制备于经过清洁处理的 BaF<sub>2</sub> 晶体基片上. 制备过程中, 系统的真空度为  $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ , 薄膜厚度采用石英晶体振荡法控制.

制备完成后,分别用透射光谱、发射光谱和发光衰减时间谱对膜系和  $\text{BaF}_2$ -膜系闪烁器件的性能进行了测量,检验膜系的实际性能,以及对提高  $\text{BaF}_2$  晶体快、慢成分抑制比的影响.

其中透射光谱测量分别采用了美国 Acton 公司的真空紫外光谱辐射探测系统 (ARC VM-505 型真空紫外单色仪)(用于 180~210nm 波段光谱的测量)和日本岛津公司的 UV-2201 分光光度仪 (用于 210~480nm 波段光谱的测量).

发射光谱测量采用了上海硅酸盐所自制的 X 射线激发发射谱仪,其中 X 射线源为 F-30 型 X 光机、光电探测器为 R456 光电倍增管、单色仪为上海光学仪器厂的 44W 平面光栅单色仪.

发光衰减时间谱在中国工程物理研究院发光衰减时间谱测量装置上进行.其工作原理为:由脉冲 X 光激发“ $\text{BaF}_2$ +选择吸收膜系+光电探测器”系统,由示波器记录输出电流波形获得发光时间谱.实验中脉冲 X 光源信号宽度为 2ns,光电探测器为北京综合仪器厂生产的透紫 GD-40Z 光电管,传输线为 20m 长 SYV-50-7 同轴电缆,采用 Tek684C 数字化示波器记录电流波形.

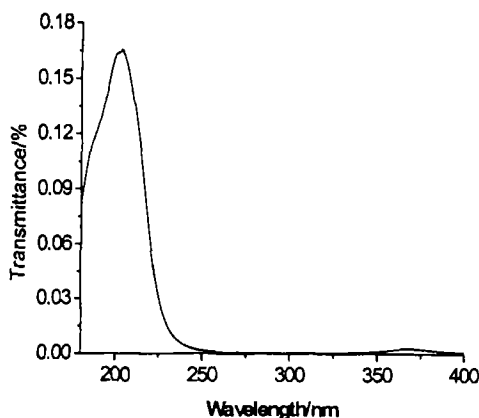


图 3 镀膜  $\text{BaF}_2$  晶体透射率

Fig. 3 Transmittance of  $\text{BaF}_2$  crystal with the film

## 4 结果和讨论

### 4.1 透射谱测量

图 3 为实验所测到的透射谱曲线,其透射谱峰高为 17%、峰位在 209nm,同时谱线在 240nm 波长附近有一个非常陡的陡坡,因此能有效地抑制波长  $>240\text{nm}$  的慢成分,而使快成分可以较多地保留.结合实测  $\text{BaF}_2$  晶体的发射谱(图 5)进行分析,所研制的选择吸收膜系可使  $\text{BaF}_2$  晶体的快、慢成分比提高 86 倍.由图 3 与图 2 的对比可以看到,实际研制的选择吸收膜系的性能指标与理论设计所期望的基本相同,表明膜系的制备是成功的.

### 4.2 发射谱测量

为了进一步检验所研制选择吸收膜系对  $\text{BaF}_2$  晶体慢成分的实际抑制作用,分别测量和比较了  $\text{BaF}_2$  晶体镀膜前、后的发射光谱.图 4、5(实线)是分别考虑了光电倍增管量子效率修正后得到的发射谱图,从结果可以看出图 5(实线)相对于图 4 而言,其发射谱谱形有了明显的改善,图 4 的短波段快成分强度远小于长波段慢成分强度,而图 5 的快成分已明显地突现出来,其强度已超过了慢成分强度.因此利用  $\text{BaF}_2$  晶体闪烁光快、慢成分波段的不同,通过在  $\text{BaF}_2$  晶体与光电器件之间插入特定的选择吸收膜系,可以很好地对  $\text{BaF}_2$  晶体的闪烁光慢成分进行有效地抑制.

由图 5 的发射谱还可以看出,镀膜后  $\text{BaF}_2$  晶体的慢成分除 310nm 处外,在 375nm 处还有一个小峰,该峰主要是由于在膜系理论设计时,很难做到既保证使快成分有一个较大的透射率,又能够使膜系在一个较大的慢成分发光波段范围内实现透射率都趋于零,事实

上从图 3 的透射谱可以看到镀膜后 BaF<sub>2</sub> 晶体透射谱曲线在 375nm 附近有一个很小的峰. 如果将镀膜后 BaF<sub>2</sub> 晶体的透射谱加权计算于镀膜前 BaF<sub>2</sub> 晶体的发射谱, 可以得到图 5 中计算得到的发射谱 (点划线), 从实验和计算所得到的两根谱线的比较可知, 它们从定性上看

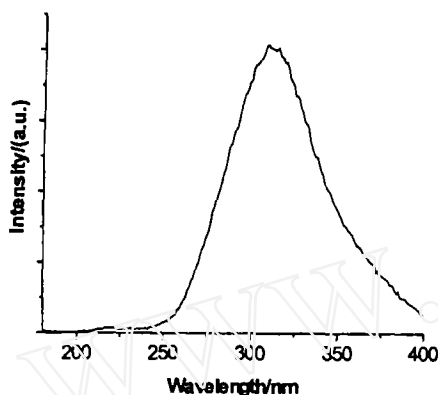


图 4 镀膜前 BaF<sub>2</sub> 晶体发射谱

Fig. 4 Emission of BaF<sub>2</sub> crystal without the film

一致性比较好, 其细微的差别可能来源于实验测量条件以及手段上的不同.

#### 4.3 衰减时间谱测量

从测量的角度来看, 选择吸收膜系对 BaF<sub>2</sub> 晶体发光慢成分抑制的最终效果应落实到发光衰减时间谱上, 图 6 为加载选择吸收膜系前、后 BaF<sub>2</sub> 闪烁体发光衰减时间谱. 从图中可以清楚地看到: 没有加载选择吸收膜系的 BaF<sub>2</sub> 闪烁体, 由于慢发光成分的存在, 脉冲响应后沿呈缓慢指数衰减, 在数百 ns 内后沿响应不回至基线, 而经加载选择吸收膜系后, 脉冲响应后沿幅度基本上接近基线, 低于未加载选择吸收膜系的响应幅度, BaF<sub>2</sub> 闪烁体慢发光成分得到有效抑制.

## 5 结论

根据 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分波段的不同, 设计并制备了具有选择滤波功能的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub>/Al/... 金属诱导选择吸收膜系, 实验表明: 加载膜系后的 BaF<sub>2</sub> 晶体闪烁光快、慢成分比提高了约 80 倍. 有效地提高了 BaF<sub>2</sub> 闪烁晶体在高计数率测量中的应用价值.

## 参考文献

- [1] Laval M, Moszynski M, Allemand R, et al. *Nucl Instr. Meth*, 1983, **A 206**: 169-176.

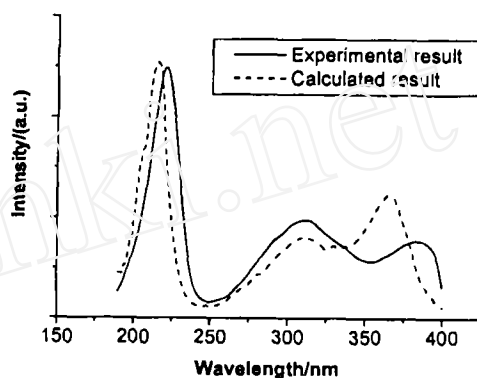


图 5 镀膜后 BaF<sub>2</sub> 晶体发射谱

Fig. 5 Emission of BaF<sub>2</sub> Crystal with the film

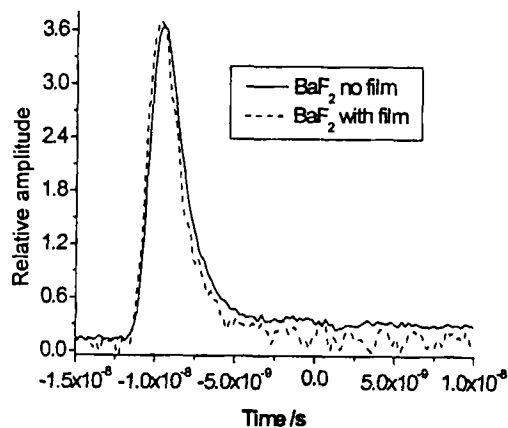


图 6 BaF<sub>2</sub> 闪烁体加载光子带隙膜系前、后的发光衰减时间谱

Fig. 6 Decay time of BaF<sub>2</sub> scintillators with and without the optical film

- [2] Newman H B. *Proc. of the " Crystal 2000 " International Workshop, Chamonix, France. Sept. 1992*, **5**: 22-26.
- [3] Tavernier S, *et al. Phys. Med. Biol.*, 1992, **37**: 635-643.
- [4] Schotanus P, Van Eijk C W E, Hollander R W, *et al. Nucl Instr. Meth*, 1988, **A 269**: 377-384.
- [5] Woody C L, Anderson D F. *Nucl. Instr. Meth.*, 1988, **A 265**: 291-300.
- [6] 陈玲燕, 顾 壮, 黎 青, 等. 强激光与粒子束, 1996, **8 (3)**: 362-366.
- [7] Schotanus P, Dorenbos P, Van Eijk C W E, *et al. Nucl Instr and Meth*, 1989, **A 281**: 162-166.
- [8] 唐晋发、郑 权, 应用薄膜光学. 上海科学技术出版社, 1984. 164-208.

## Metal/Dielectric Multilayers Filter to Suppress the Slow Component of the Scintillation Light in BaF<sub>2</sub> Crystal

MA Xiao-Hui, GU Mu, XU Rong-Kun, WU Yong-Gang, CAO Er-Hua

( Pchl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** On the basis of the difference of the emission bands between the fast and slow components in BaF<sub>2</sub> crystal, the metal/dielectric multilayers filter with several periods of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub>/Al/MgF<sub>2</sub>... was designed and developed in order to suppress the slow component of the scintillation light in BaF<sub>2</sub>. The results from transmission, emission and decay time spectrum show that the film can increase about 80 times of the ratio of the intensities of the fast emission to the slow one and can widen the application field of BaF<sub>2</sub> scintillation crystal in high count rate experiments.

**Key words** BaF<sub>2</sub> crystal; metal/dielectric multilayers filter; slow component suppression