

改进 BaF₂ 闪烁体光输出特征研究*

徐荣昆¹⁾ 郭 存¹⁾ 温树槐¹⁾ 夏广新¹⁾ 宁佳敏¹⁾
宋凤军¹⁾ 何锡钧¹⁾ 吴永刚²⁾ 顾 牡²⁾ 陈玲燕²⁾ 吴 翔²⁾

¹⁾ 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

²⁾ 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200902)

(2002 年 6 月 14 日收到, 2003 年 1 月 14 日收到修改稿)

介绍旨在抑制 BaF₂ 闪烁体慢发光成分, 拓展其应用领域的紫外滤光膜系设计和性能测量结果. 研究表明, 以 Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂ 为基本结构优化设计的紫外滤光膜系对来自 BaF₂ 闪烁体不同角度入射的快/慢成分光分别具有高透射和强截止特性. 还提供了用纳秒级脉冲辐射源激发“BaF₂ + 紫外滤光膜系 + 光电闪烁探测器”系统获得的 BaF₂ 闪烁体时间响应曲线, 并对紫外滤光膜系中子辐照损伤特性进行了研究.

关键词: BaF₂ 闪烁体, 紫外线, 滤光片, 时间响应

PACC: 2940, 3320L, 4215E, 2290

1. 前 言

BaF₂ 是已发现的最快无机闪烁体, 由于它对中子探测效率较低, 对 γ 射线探测效率较高, 因而在裂变或聚变产生的脉冲 n, γ 辐射分辨测量等领域中具有广泛的应用前景. 然而除了快发光成分外, BaF₂ 晶体还存在着慢发光成分, 中心发光波长为 310nm, 衰减时间为 620ns, 慢发光量为快成分的 4—6 倍^[1], 慢发光成分的存在会使脉冲信号堆积而发生畸变, 很大程度上限制了 BaF₂ 闪烁体在快脉冲辐射测量中的应用. 目前消除 BaF₂ 闪烁体慢发光成分影响的方法主要有两种: 一是日本 Hamamatsu 公司开发的光阴极对波长 310nm 光不敏感的探测器(俗称盲管)^[2]; 二是通过掺镧来抑制闪烁体的慢发光成分, 该方法可将慢发光成分的强度抑制 6 倍^[3], 但离要求仍有很大距离.

针对 BaF₂ 发光光谱特性, 在 BaF₂ 闪烁体与光电探测器阴极间加载紫外滤光膜系, 使快成分光谱能很好地通过, 而慢成分光谱被滤去, 同样可对 BaF₂ 闪烁体慢成分光进行抑制. 本文即针对 BaF₂ 发光光谱特性, 设计了特有的滤光膜系, 此方式对

BaF₂ 闪烁体发光特性进行改进是继“盲管”和“掺 La”方案的另一种有效技术途径.

2. 膜系设计

膜系是用电子蒸镀制备的^[4]. 与普通光学膜系设计要求不同, 由于 BaF₂ 闪烁体与光电探测器石英密封窗紧贴使用, 探测器阴极所接收的光来自 BaF₂ 闪烁体内不同位置和角度, 这就要求滤光膜系能够对不同角度入射的快/慢光均具备高透射和强截止特性. 介质膜系虽可实现该目标, 但需要多个不同中心频率的膜系互相叠加, 通过增加膜层层数来增加透射效果. 理想的设计则需要数十层的膜层才能获得需要的透射特性, 制作极不容易.

通过金属与介质的组合, 利用金属具有强反射特性制成的膜系则可实现用较少的膜层数达到与较多全介质膜层数相当的效果. 由于工作在紫外波段, 一方面为减少膜系层数, 需选择高折射率材料与低折射率材料组成 HL 对, 另一方面还要求膜层材料在紫外波段的消光系数较低, 所以可选的材料为 Al₂O₃ 和 MgF₂, 这里 Al₂O₃ 为高折射率材料, 折射率依据镀膜工艺在 1.78—1.95 之间, MgF₂ 为低折射率

* 中国工程物理研究院行业科技预研基金(批准号 20000213)资助的课题.

材料 折射率依据镀膜工艺在 1.39—1.45 之间^[5]. 以 Al₂O₃/MgF₂ 为基本介质膜系,然后在低折射率介质中插入金属 Al 层就构成以 Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂ 为基本结构的金属诱导膜系结构^[6].

在依据镀膜工艺对 Al₂O₃ 和 MgF₂ 的光学参数进行修正,对 MgF₂ 层中 Al 位置进行优化,以及以快/慢成分光透射总量比值为评价参数对膜层进行优化后,我们设计以 Al₂O₃,MgF₂ 和 Al 为膜层材料的膜系,结构为 BaF₂ (基底)/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al/MgF₂/空气.使用特征矩阵计算表明,膜系具有良好的特性.图 1 是计算获得的 0°、30°、45° 入射角的膜系透射特性.

发光成分在经过膜系后获得不同透射率,慢发光成分被强抑制,而对 30°和 45°等其他入射角方向,膜系的这种透射率特性依然成立.

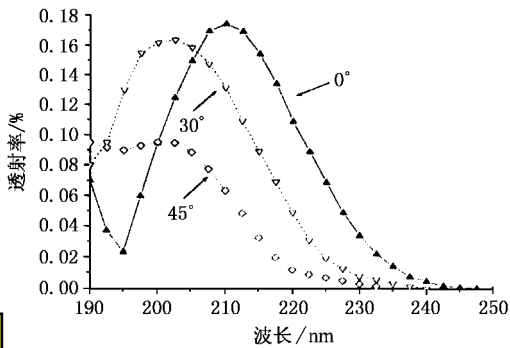
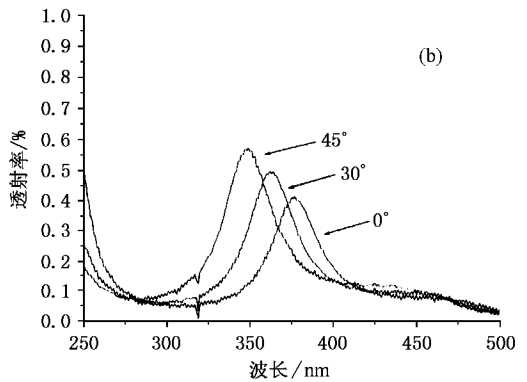
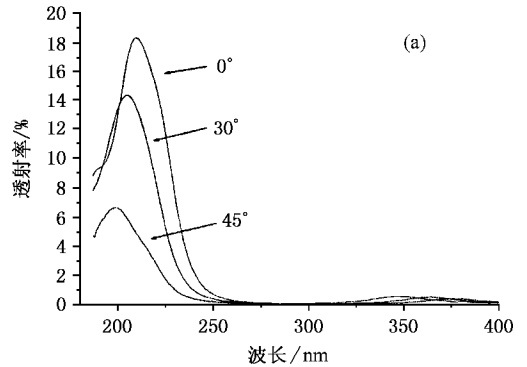


图 1 膜系透射率设计曲线

图 2 (a)膜系透射谱测量结果 (b)250—500nm 波段滤光膜系透射谱测量结果

由于光学常数存在测量误差,每层膜厚存在蒸镀误差,实际膜系的透射率曲线与设计值可能有所差异.为此,使用 Lamdda-19 紫外/可见/近红外分光光度计对膜系的透射率曲线 $T(\lambda)$ 进行了测量,测量方法是:先用光电倍增管(PMT)测出分光光度计选定波长的电信号输出量,然后在分光光度计与 PMT 光路间插入覆有膜系的 BaF₂ 闪烁体,调整膜系法线方向,比较光路间有无闪烁体前后的 PMT 电信号输出量,再对 BaF₂ 闪烁体基底材料(不含膜系)对光的吸收进行修正后即可获得闪烁体的 $T(\lambda)$ 曲线.图 3(a)(b)是覆有膜系的 BaF₂ 闪烁体透射率测量曲线.

图 3(a)和(b)表明,透射率曲线设计值与测量值仅略有差异,对于 195nm 和 220nm 波长光,0°入射角方向实际透射率分别约 12%和 16%,对于 310nm 的波长光,膜系透射率小于 0.6%.由于 BaF₂ 闪烁体成分的发光波长为 195nm 和 220nm,而慢发光成分的发光波长为 310nm,因此,BaF₂ 闪烁体快/慢两种

3. 特 性

3.1. 时间响应特性

脉冲辐射测量中,时间响应函数反映了探测元件对待测脉冲信号的时间跟随特性^[7].改进后 BaF₂ 闪烁体后沿时间响应特性是用脉冲 x 射线激发“BaF₂ + 滤光膜系 + 光电探测器”系统,由示波器记录输出电流波形获得的,实验使用的光电探测器是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 和图 4 是测量结果,其中,图 3(b)是将图 3(a)垂直灵敏度放大后观察到的纯 BaF₂ 闪烁体输出光脉冲后沿发光时间特性.

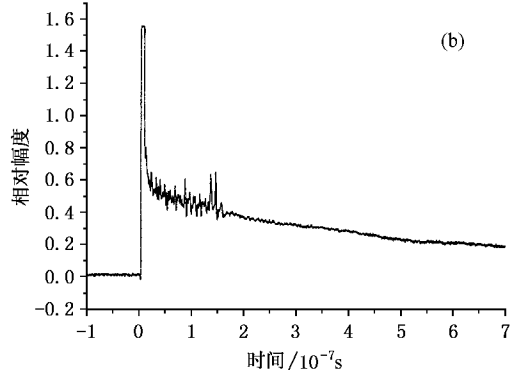
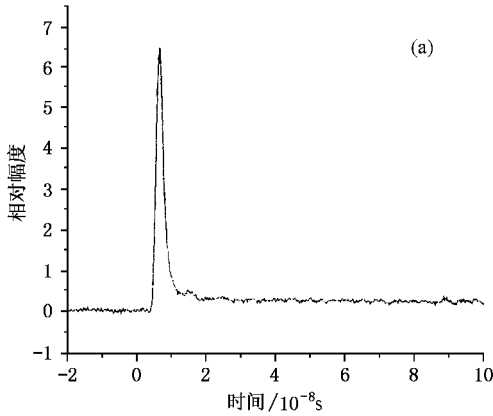


图3 (a) 纯 BaF₂ 闪烁体脉冲发光时间特性 (b) 纯 BaF₂ 后沿发光时间特性

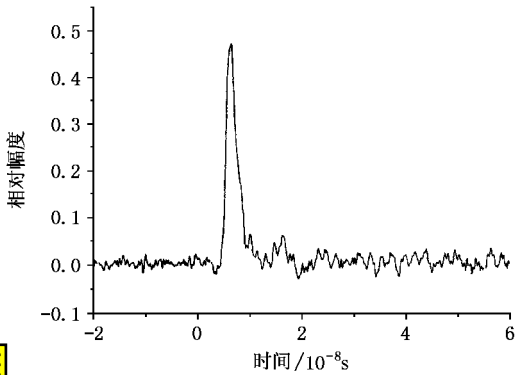


图4 改进后 BaF₂ 闪烁体脉冲后沿发光时间响应特性

为分析、比较加载滤光膜系前后 BaF₂ 闪烁体时间响应特性,图4波形峰值放大至与图3(a)波形峰值相等,可以获得便于后沿时间响应特征相比较的图5波形。

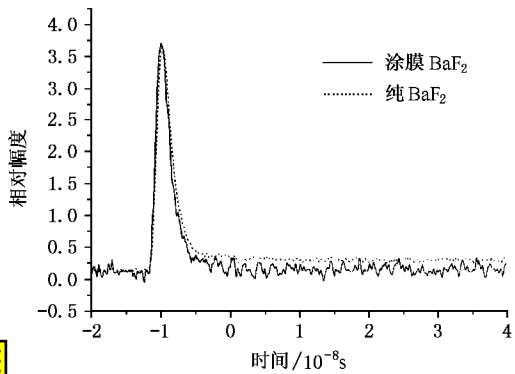


图5 加载滤光膜系前后 BaF₂ 闪烁体时间响应特性比较

图5波形清晰显示,纯 BaF₂ 闪烁体由于慢发光成分的存在,脉冲响应后沿呈长时指数衰减,在数百纳秒内后沿响应不回至基线,而经加载滤光膜系后,

脉冲响应后沿值远低于未加载滤光膜系的响应值, BaF₂ 闪烁体慢发光成分得到有效抑制。

3.2. 中子辐照效应

我们用 ⁶⁰Co 源对膜系进行了 γ 辐照效应研究^[8],辐照剂量为 10⁷ rad,结果表明,经该剂量辐照后膜系透射率曲线无明显改变。

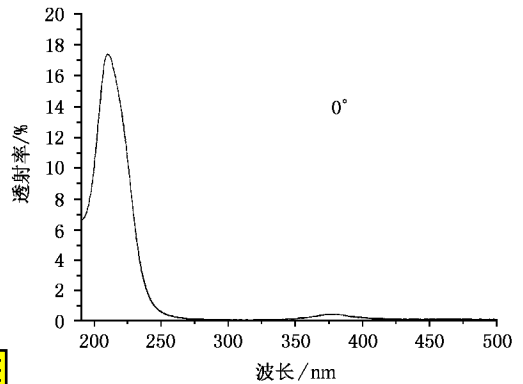


图6 4.0 × 10¹³ n/cm² 中子辐照后膜系透射率

中子辐照是使用加速器 DT 中子源进行的,辐照量分别为 4.0 × 10¹³ n/cm² (注量率 1.3 × 10⁹ n/cm² · s) 和 1.0 × 10¹³ n/cm² (注量率 3.3 × 10⁸ n/cm² · s)。实验发现样品经两种中子辐照量辐照后,样品透射率曲线无明显变化(图6),但 BaF₂ 闪烁体的发光效率因强流中子辐照分别下降约 60% 和 40%。对其结果的定性解释是,高能中子与 BaF₂ 闪烁体材料核反应主要为 ¹³⁸Ba(n,2n)¹³⁷Ba 反应通道,反应阈能 8.7MeV,反应截面为约 1.8b,当受到注量为 10¹³ n/cm² 的 14MeV 中子量辐照后,由于反应截面较高,闪烁体内引入的缺陷已经使发光效率降低,而多层膜厚度为微米量级,与中子的反应概率小于 10⁻⁶,中子的辐

照不足以在样品中引入大量缺陷,不会破坏膜层结构.关于纯 BaF₂ 闪烁体受强中子注量辐照后发光效率变化的研究还在进一步进行中.

实际脉冲辐射测量中,BaF₂ 闪烁体受中子的累计辐照量一般小于 1×10^{12} n/cm²,因此,综合⁶⁰Co 源 γ 辐照结果,膜系具有良好的抗辐照性能.

4. 结 论

不用“盲管”和“掺 La”方案,本项目设计出了以 Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂ 为基本结构的金属/介质膜系,对 BaF₂ 闪烁体发射光谱进行修饰,实现了高频区的

高透射,低频区的深截止.通过膜系的优化,实际制备的样品对 BaF₂ 闪烁体的慢成分光得到全方向有效抑制.

脉冲特性测量表明,BaF₂ 闪烁体光输出时间响应后沿特性得到了显著改善,BaF₂ 闪烁体在快脉冲辐射场中的应用限制得到彻底消除.用 10^{13} n/cm² 量级的高能中子辐照膜系后未观察到明显的辐照损伤.本工作拓展了闪烁体的使用领域,使之应用于快脉冲辐射场 n, γ 分辨测量成为可能.

作者对李文洪副研究员和王文川在实验中提供的良好条件表示感谢.

- [1] Lavel M *et al* 1983 *Nucl. Instr. and Meth. A* **206** 169
 [2] Woodys C L and Anderson D F 1988 *Nucl. Instr. and Meth. A* **265** 291
 [3] Schotanus P *et al* 1989 *Nucl. Instr. and Meth. A* **281** 162
 [4] Wu G M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1015 (in Chinese) [吴广明等 2000 物理学报 **49** 1015]

- [5] Palik E D 1991 *Handbook of Optical Constants of Solid* (San Diego , Calif. , Academic) Vol.2
 [6] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
 [7] Tang Z Y *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition), **8** 913
 [8] Chao E H 2000 *Master Dissertation* (Tongji University) (in Chinese) [曹二华 2000 硕士论文(同济大学)]

Study on modifying the output properties of BaF₂ scintillation spectrum *

Xu Rong-Kun¹⁾ Guo Chun¹⁾ Wen Shu-Huai¹⁾ Xia Guang-Xin¹⁾ Ning Jia-Min¹⁾ Song Feng-Jun¹⁾
He Xi-Jun¹⁾ Wu Yong-Gang²⁾ Gu Mu²⁾ Chen Ling-Yan²⁾ Wu Xiang²⁾

¹⁾*(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)*

²⁾*(Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)*

(Received 14 June 2002 ; revised manuscript received 14 January 2003)

Abstract

In order to extend the scope of application of BaF₂ scintillators in the diagnosis of the fast-pulse-radiation-field, an ultraviolet-light-filter has been developed for the modification of the scintillation spectrum. The experimental results reveal that the filter, which is composed of Al₂O₃, MgF₂, and Al, has a very low transmittance to the slow component light emitted by BaF₂ in the incident angles from 0° to 45° with respect to the surface normal, but has a relatively high transmittance to the fast component light also emitted by it. The property of the temporal response curve has been obtained by use of a pulse x-rays source, and the damage effect induced by the irradiation of the neutron with an energy of 14.1 MeV is also introduced in this paper.

Keywords : BaF₂ scintillators, ultraviolet ray, optical filter, time response

PACC : 2940, 3320L, 4215E, 2290