

多层金属/介质膜系中 Al 层的作用分析

魏军明^{1,2}, 吴永刚^{1,2}, 顾 牡¹, 顾春时^{1,2}, 马晓辉¹, 王 利^{1,2}, 林小燕^{1,2}, 陈玲燕^{1,2}

(1. 同济大学 波耳固体物理研究所, 上海 200092;

2. 同济大学 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要: 设计了一维金属/介质多层膜系, 膜系由几个周期的高折射率 (Al_2O_3) / 低折射率 (MgF_2) 材料所组成。在低折射率材料中插入金属层 (Al), 对膜系进行了优化, 利用电子束蒸发方法制备了该膜系。实验表明, 不仅 Al 层的总厚度直接影响透射谱的形状, 在同样 Al 层总厚度情况下, Al 层厚度分布对膜系也有影响。寻找到了最佳 Al 层分布结果, 并通过了实验验证, 制备出了能很好抑止 BaF_2 晶体发射光谱的长波成分的膜系。

关键词: 多层膜; 金属薄膜; 介质薄膜; BaF_2 闪烁晶体; Al

中图分类号: O484. 8 文献标识码: A

Role of Al layer in metallic dielectric multilayer

WEI Jurming^{1,2}, WU Yonggang^{1,2}, GU Mu¹, GU Chunshi^{1,2},
MA Xiaohui¹, WANG Li^{1,2}, LIN Xiaoyan^{1,2}, CHEN Lingyan^{1,2}

(1. Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Precise Optical Engineering and Technology,
Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A one dimensional metallic dielectric multilayer coating was designed to suppress the long wavelength component in the emission spectrum of BaF_2 crystal, while the short wavelength component is allowed to pass. The coating was composed of several periods of high (Al_2O_3) / low (MgF_2) refractive index materials inserted in the metallic layer (Al). The multilayer coating was optimized and the effect of layer thickness error was estimated. The effect of thickness and distribution of the metallic layers was emphatically discussed. The multilayer coating was prepared through electron beam evaporation and the experiment results were in very good agreement with the calculated results.

Key words: multilayer film; metal thin film; dielectric film; BaF_2 crystal; Al

1 引言

BaF_2 晶体作为超快无机闪烁晶体具有中子活化截面小, 时间分辨率好, 辐射时间短等优点, 目前在核试验测量中有着十分重要的应用价值; 同时在核医学^[1], 隐藏爆炸物检测^[2], γ 射线天文学, 物理勘探等方面也有着重要的应用前景。该晶体具有三波长发射成分: 在 195 nm 和 220 nm

处有两个快成分, 衰减时间仅为 600 ps; 在 310 nm 处有一个慢成分, 衰减时间为 620 ns, 其中慢成分在高计数测量时会引起严重的信号堆积, 如能对其充分抑制, 将极大地拓展 BaF_2 晶体在超快 γ 辐射探测领域的应用范围。利用 BaF_2 晶体快、慢发光成分处于不同波段的性质, 设计了具有特定透射光谱^[3] 的一维金属-介质多层膜系结构, 对 BaF_2 晶体的发射光谱进行修饰, 从而对慢成分进行抑制。

收稿日期: 2003 05 21; 修订日期: 2003 11 12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10175049)

2 光子晶体的设计、计算及模拟

所设计的一维金属-介质多层膜系, 具有高折射/低折射/金属/低折射材料为周期的多层膜系结构, 利用金属在可见光波段具有较大的消光系数和高反射特性^[4], 实现了在此波段深度的截止, 同时由于金属层和介质层组成交替的多层膜系时所产生的一个新的透明金属带, 导致一确定频率的光在其中传播, 而且透射带中心频率的位置、宽度和陡度将随结构的变化而变化^[5]。通过将金属层的总厚度分解至各周期之中, 可以充分增强在高频区的透射, 同时保持在低频区的优良截止特性。本文中设计膜系的截止边在 240 nm 处, 抑制中心波长在 310 nm (慢成分), 透射中心波长在 210 nm 处 (快成分)。在材料的选取中, 介质材料选用 Al₂O₃ 和 MgF₂, 金属材料选用 Al。

设计时, 以 BaF₂ 晶体的发射光谱为权重, 分别对快慢成分波段的膜系透射率积分, 将它们的比值 (快慢比) 作为评价函数, 来评价设计出的膜系的质量。计算了周期数分别为 1、2、3 和 4 的光子晶体的透射光谱。结果表明, 为得到适当的光谱透射曲线, 多层膜系结构必须至少具有 3 个周期。结构为: 基片/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/空气, 模拟过程中发现这种结构的抑制比明显要好于全介质膜系结构和金属诱导透射膜系结构。为了得到更加陡峭的带边, 还用了两种不同的多层膜系结构构成类似于异质结光子晶体材料的结构, 通过两种材料的能带交迭和交错, 不仅达到在高频区的高透射, 低频区的深截止, 而且在两个能带之间获得陡峭的边缘。最终得到的结构为: 基片/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂/空气。下面用理论计算^[6]对可能的膜厚误差对透射谱的影响进行模拟, 以找出膜厚误差对膜系性质影响的关键因素:

(1) 膜系中介质层厚度的误差对透射谱的影响^[7]。在具体的实验中能够控制的介质层膜厚误差范围是 5%, 因此讨论了介质层厚度随机误差为 10% 和 20% 时膜系透射谱的比较, 如图 1 所示。由图可以看出, 介质层的膜厚误差对膜系的透射峰位置和高度影响都不大。在实验中, 当 Al 层的厚度一定时, 得到重复性很好的膜系,

表明与设计的计算结果是相符合的。

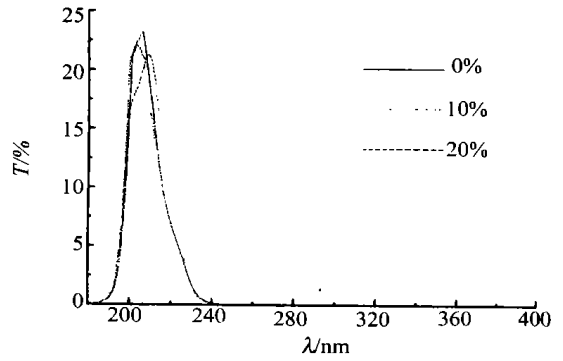


图 1 介质层厚度随机误差为 10% 和 20% 时膜系的透射谱

Fig. 1 Transmittance spectra of 10% and 20% dielectric thickness random errors

(2) 图 2 为膜系中金属 Al 层总厚度的误差对透射谱的影响, 可以看出当 Al 层总厚度偏差为 10% 时, 对膜系的透射谱影响较大。然而当偏差小于 3% 时, 偏差则相对较小。

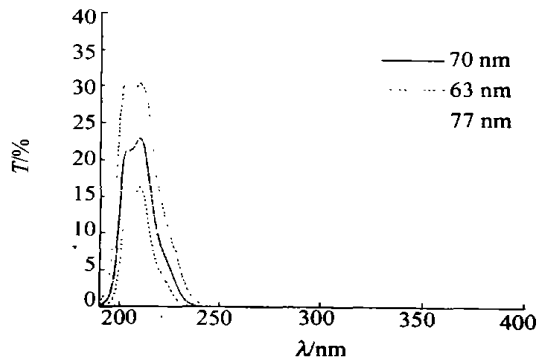


图 2 膜系中金属 Al 层总厚度的误差对透射谱的影响

Fig. 2 Influence of Al layer thickness on the transmittance spectrum

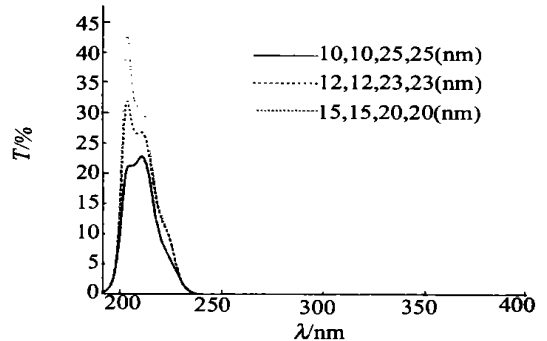


图 3 不同 Al 层厚度分布对应的透射谱

Fig. 3 Transmittance spectra of different Al layer thickness distribution

(3) 在相同 Al 的总厚度情况下, 4 层 Al 的厚度分布不同时, 膜系的透射谱有很大不同。图 3 为计算得到的 Al 不同厚度分布透射谱的比较。显然, 通过 Al 层厚度分布的优化调整, 可以获得更理想的透射光谱。

3 装置和实验

采用电子束蒸发光学多层镀膜机制备所设计的膜系。蒸发材料为纯度为 99.99% 的 Al 丝和纯度为 99.99% 的压片状 MgF_2 , Al_2O_3 为颗粒状。基片分别是直径为 30 mm、厚度为 2 mm 的抛光紫外熔石英玻璃和直径分别为 30 mm 及 40 mm 的 BaF_2 晶体, 基片表面使用清洁剂进行预处理。基片的温度为室温, 真空室的预真空为 4.0×10^{-4} Pa, 基片至蒸发源的距离为 105 mm。每种材料蒸镀之前用外控挡板挡住蒸发源, 先进行预蒸发, 以保证比较均匀的沉积速度。预先对三种材料进行定标后, 用石英晶振法控制薄膜的厚度和沉积速率。实验中 Al 薄膜的沉积速率约为 30 nm/min, MgF_2 的沉积速率约为 35 nm/min, Al_2O_3 的沉积速率约为 15 nm/min。制备后的样品均在垂直入射的情况下用 ACR VM-505 型紫外可见分光光度计测量其透射率。

实验所制备的样品的测试结果和分析讨论如下:

(1) 膜系中金属 Al 层总厚度的误差对透射谱的影响。

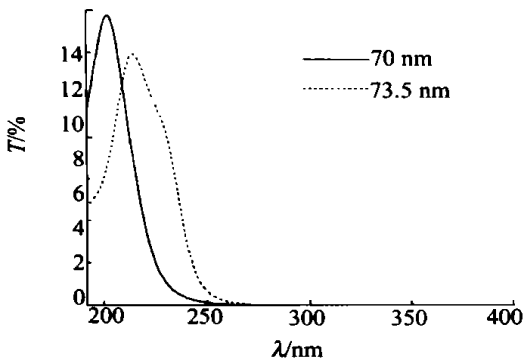


图 4 Al 层总厚度对应的透射谱

Fig. 4 Transmittance spectrum of Al layer total thickness

由于要保证一定的高频区的高透射、低频区的深截止, 故金属层厚度的选择有一定的范围。在当前的实验条件下, 为保证抑制比和快成分透射率满足一定的要求, 得到合适的 Al 层总厚度为 70 nm 左右。

(2) 膜系中金属 Al 厚度分布不同时对透射谱的影响。

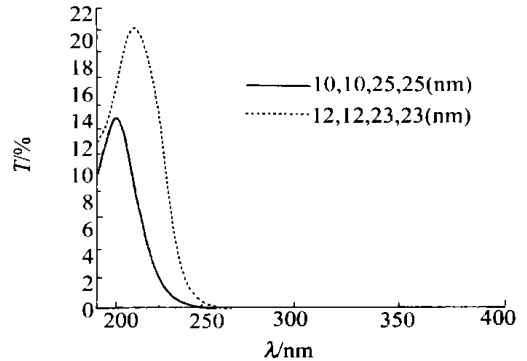


图 5 不同 Al 厚度分布对应的透射谱

Fig. 5 Transmittance spectra of different Al layer thickness distribution

由图 5 可以看出, 当 Al 层的厚度分布为 12 nm, 12 nm, 23 nm, 23 nm 时, 膜系具有很好的抑制比和快成分透射率。

4 结 论

通过设计计算和实验制备测试表明: (1) 本文讨论的膜系结构中 Al 层的总厚度对透射谱有很大的影响, 从而直接影响了透射谱的形状。通过选择合适的金属层总厚度, 可使膜系在慢成分范围具有很好的截止深度, 同时在快成分范围又具有较好的透射特性。(2) 在同样的 Al 层总厚度情况下, Al 层的厚度分布对膜系有很大影响。寻找了最佳的 Al 层分布结果, 并通过实验获得了验证。(3) 膜系中介质层的随机误差在试验可以控制的范围内对峰值透射率和透射峰的位置影响不大, 在控制好 Al 层厚度的前提下, 膜系具有很好的可重复性。

参考文献:

- [1] TAVERNIER S, BRUYNDONCKX P, ZHANG SH P. A fully 3D small PET scanner [J] . *Phys Med Biol*, 1992, 37: 635-643.
- [2] GRODZINS L, Photons in photons out: non destructive inspection of containers using X-ray and gamma ray techniques [C]. *Proc of First International Symposium on Explosive Detection Technology*, 1991, 20F-211.
- [3] WU Y G, GU M, CAO E H, *et al* . Design of a one dimensional photonic crystal for the modification of BaF₂ scintillation spectrum [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, 496: 129-137.
- [4] 刘颖, 李福田. 紫外-真空紫外波段的 Al⁺MgF₂ 膜 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9 (2): 165-168.
LIU Y, LI F T . MgF₂ overcoated aluminium films for ultraviolet and vacuum violet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (2): 165-168. (in Chinese)
- [5] SCALORA M, BLOEMER M J, PETHEL A S, *et al* . , Transparent metallo dielectric one dimensional photonic band gap structures [J]. *J Appl Phys*, 1998, 83: 2377-2383.
- [6] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
TANG J F, ZHENG Q. *Applied thin film optics* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing Company, 1984. (in Chinese)
- [7] 王占山. 膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11 (2): 136-138.
WANG ZH S. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11 (2): 136-138. (in Chinese)

作者简介: 魏军明 (1979-), 男, 广东韶关人, 同济大学物理系硕士研究生, 主要研究方向为光学薄膜。E-mail: dreamingwill@hotmail. com