

一维金属/介质光子晶体用于 BaF₂ 晶体 闪烁光谱修饰*

吴永刚^{1,2} 林小燕^{1,2} 顾春时^{1,2} 顾 壮¹ 马晓辉¹ 魏军明^{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 利用一维金属/介质光子晶体对 BaF₂ 晶体闪烁光谱进行修饰. 以 Al₂O₃/MgF₂/Al/ MgF₂ 为周期构成光子晶体, 讨论了周期数、金属层的厚度以及在低折射率层中的相对位置、入射角度等与光子晶体能带特性的关系及其对 BaF₂ 晶体闪烁光谱进行修饰的效果. 结果表明, 在所考虑的发射角范围, 光子晶体对快成分的衰减小于 5 倍, 对慢成分的相对抑制比超过 20 倍, 采用合适的探测角度, 可使对慢成分的相对抑制比提高到 100 以上.

关键词 光子晶体; BaF₂ 闪烁晶体; 光谱修饰

中图分类号 O484. 41; TL812. 1

文献标识码 A

0 引言

BaF₂ 晶体具有波长分别为 195 nm 和 220 nm, 衰减时间均小于 1 ns 的快闪烁成分, 是现已发现的最快的无机闪烁体^[1]. 但是 BaF₂ 晶体中还存在慢闪烁成分, 在高计数测量时会引起严重的信号堆积. 慢闪烁成分的中心波长在 310 nm, 衰减时间为 620 ns, 强度则为快成分的 4 ~ 6 倍^[2,3], 如能对其充分抑制, 将极大地拓展 BaF₂ 晶体在超快 γ 辐射探测领域的应用范围. 目前抑制 BaF₂ 晶体慢闪烁成分的主要方法有对 BaF₂ 晶体进行掺镧、采用对波长为 310 nm 闪烁光不敏感的光阴极、在探测器输出端用电子学快成形方法等^[4].

光子晶体是一种高低折射率材料交替排列的周期性结构, 它首先在信息通讯领域具有巨大的应用前景. 对适用于该领域的光子晶体的大量研究表明, 由于位移场的重新分布, 包含有金属成分的光子晶体可呈现出非常宽的截止带^[5], 以及良好的全方向反射特性^[6], 由金属所引起的吸收损耗则可通过共振隧穿效应而得到有效降低^[7]. 以高折射/低折射/金属/低折射材料为周期的光子晶体结构, 由于将金属层的总厚度分解至各周期之中, 可以在高频区出现有趣的增加透射的现象^[8], 同时在低频区仍保持优良的反射特性. 对应相同的能带结构, 采用金属/介质结构的光子晶体还可使总的层数小于全介质结构, 以降低工艺制备要求. 本文提出了利用金属/介质光子晶体对 BaF₂ 晶体闪烁光谱进行修饰, 通过在 BaF₂ 晶体表面制备具有合适能隙结构的光子晶体, 使其在快成分位置形成较强的透射能带, 在慢成分位置则形成宽的截止能带, 从而有效地提

高闪烁光快慢成分的相对比例.

1 光谱修饰方式及膜系材料参数选择

利用光子晶体对 BaF₂ 晶体的闪烁光谱进行修饰, 其方法是将光子晶体制备于 BaF₂ 晶体的出光表面. 当利用这样的器件进行 γ 射线强度的测量时, 首先是 γ 射线辐照 BaF₂ 晶体, 激发其发射出波长范围在 180 ~ 400 nm 的闪烁光, 当这些闪烁光通过制备于 BaF₂ 晶体表面的光子晶体时, 其中慢成分基本被滤除, 而快成分则较顺利地通过, 并被信号探测器接收, 从而实现 γ 射线的超快探测.

光子晶体的能带计算借助于传统的传输矩阵方法, 其表达式为

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中矩阵 $\begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix}$ 是光子晶体中所有膜层的特征矩阵按序相乘后得到的结果. 由于闪烁光发射是由 BaF₂ 晶体通过光子晶体再到达空气, 因此 η_i 对应于空气的折射率. 光子晶体的反射和透射光谱则表示为

$$R = \left(\frac{\eta_0 \alpha - \beta}{\eta_0 + \beta} \right) \left(\frac{\eta_0 \alpha - \beta}{\eta_0 + \beta} \right)^* \quad (2)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_i}{(\eta_0 + \beta)(\eta_0 + \beta)^*} \quad (3)$$

式中 η_0 是 BaF₂ 晶体的折射率.

考虑到 MgF₂ 和 Al₂O₃ 在真空紫外区均具有良好的透射特性, 而 Al 介电常数具有很大的虚部与实部之比, 因此在光子晶体设计和计算中, 分别选取 Al₂O₃、MgF₂ 和 Al 作为高低折射率材料和金属材料. 以 Al₂O₃/MgF₂ 作为光子晶体的基本周期, 然后在低折射率介质 MgF₂ 层中央插入金属 Al 层, 构成以 Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂ 为周期的金属/介质光子晶体.

*国家自然科学基金资助项目(10175049)

Tel: 021-65984321 Email: ygwu@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2003-10-11

光子晶体与 BaF₂ 晶体接触的一面是 Al₂O₃.

由于在紫外波段,一般的材料都具有较大的色散,因此计算前先由文献查得上述材料的光学参数,然后进行拟合,得出色散曲线,接着再应用于光子晶体的能谱计算. 在本文所讨论的 180 ~ 400 nm 波长范围, Al₂O₃ 和 MgF₂ 的折射率分别为 1.95 ~ 1.78 和 1.45 ~ 1.39, 消光系数分别为 10⁻² 和 10⁻⁶[9,10]; Al 的折射率为 0.10 ~ 0.49, 消光系数为 2.02 ~ 4.86^[11]; BaF₂ 的折射率则在 1.48 和 1.53 之间. 由于 BaF₂ 晶体位于闪烁光对光子晶体的输入端,因此忽略其消光系数对计算的影响. 开始计算时 Al₂O₃ 和 MgF₂ 相应于 λ/4 波长厚度的数值分别取 47.1 nm 和 62.0 nm.

2 周期数

图 1(a) 显示了周期数由 1.5 至 5.5 的光子晶体的垂直透射光谱,其中每周期中的 Al 厚度为 10 nm. 由图可见,周期数的变化基本上不影响透射和截止带的位置和宽度,但增加周期数能有效地增加截止区的深度. 利用这种光子晶体对纯 BaF₂ 晶体的发射光谱进行修饰后,得到新的 BaF₂ 晶体的发射光谱见图 1(b) 所示,可以发现,当周期数大于 2.5 时,晶体的发射光谱已经以快成分为主. 将 BaF₂ 晶体在 180 ~ 240 nm 波长之间的发射作为快成分,在 240 ~ 400 nm 之间的发射作为慢成分,对快慢成分分别进行积分,计算得到修饰后与修饰前的快成分强度之比 I_{ab},以及修饰后慢成分与快成分的抑制倍数之比 R_{sr}见图 2 所示. 图中表明,增加周期数能有效地提

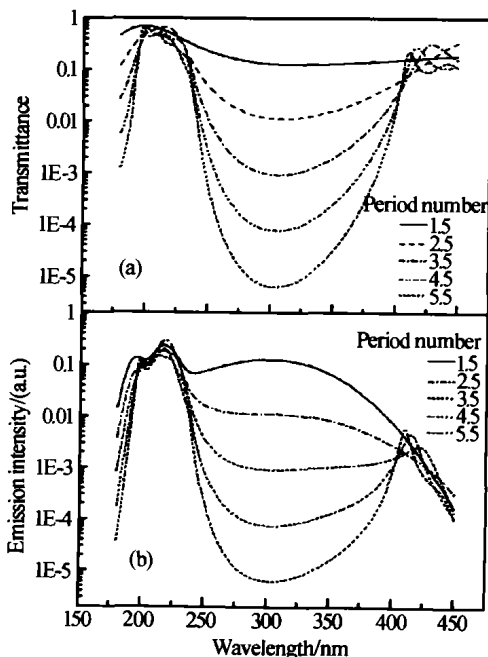


图 1 周期数为 1.5 至 5.5 的光子晶体的透射光谱(a)及相应的 BaF₂ 晶体的发射光谱(b)

Fig. 1 Transmittance spectrum of the photonic crystal with periods from 1.5 to 5.5(a) and relevant emission spectrum of BaF₂ crystal(b)

高光子晶体对 BaF₂ 晶体慢成分的抑制能力,而对快成分仅产生有限的衰减.

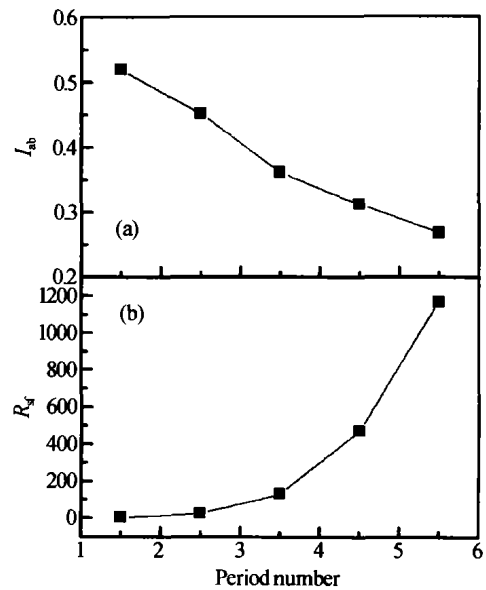


图 2 快成分衰减(a)及慢成分抑制能力(b)随周期数的变化

Fig. 2 Attenuation of the fast component(a) and the restraint of the slow component(b) with relation to the period number

3 金属层在低折射率材料中的位置及其厚度

相应于周期为 3.5, 每周期中 Al 层厚度为 10 nm 的光子晶体, 计算了高低折射率层的相对光学厚度对光子晶体能带的影响. 如以 x 和 (1-x) 分别表示高、低折射率材料相对于 λ/2 的光学厚度, 则计算结果表明, 当 x 在 0.5 附近, 即高、低折射率层均为 λ/4 厚度时, 光子晶体材料具有最宽的能隙. 图 3 给出了 2.5 周期至 5.5 周期的光子晶体在不同的相对高、低折射率厚度时的 I_{ab} 及 R_{sr}. 由图可知, 虽然高、低折射率层的相对厚度变化对快成分的影响并不大, 但对慢成分的影响却相当大. 在整个厚度变化范围, 快成分的变化仅为 10% 左右, 然而当相对光学厚度 x 偏离 0.5 约 20% 时, 相对抑制比 R_{sr} 却下降了约 50%, 偏离约 40% 时, 下降更达 90% 之多. 显然, 随着相对厚度 x 偏离 0.5, 截止带的宽度变窄, 深度变浅, 从而使对慢成分的抑制特性变差.

相应于周期数为 3.5 的光子晶体, 计算了每周期中金属层厚度对光子晶体能谱特性的影响. 结果表明, 金属层厚度的变化不仅影响透射带和截止带的高度和深度, 而且影响两个能带的位置及其宽度. 金属层的厚度太小, 则截止带的深度不理想, 而且带的宽度变窄; 厚度增大, 虽可增加截止带的宽度, 但透射带的透射特性不理想. 对应不同的周期, 计算得到 I_{ab} 和 R_{sr} 见图 4 所示. 可以看出, 通过选择合适的周期数或改变金属层的厚度, 可达到所需要的快

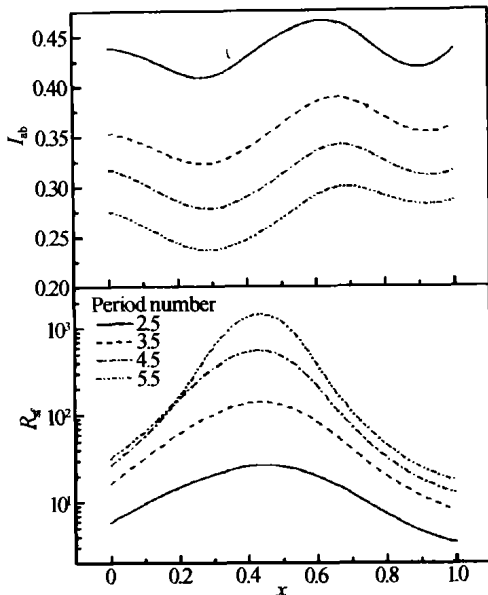


图3 快成分衰减(a)及慢成分抑制能力(b)随高低折射率膜层的相对光学厚度的变化

Fig.3 Influence of the relative thickness of the high and low refractive index layers on the fast component of the photonic crystal(a) and the emission spectrum of the BaF₂ crystal(b)

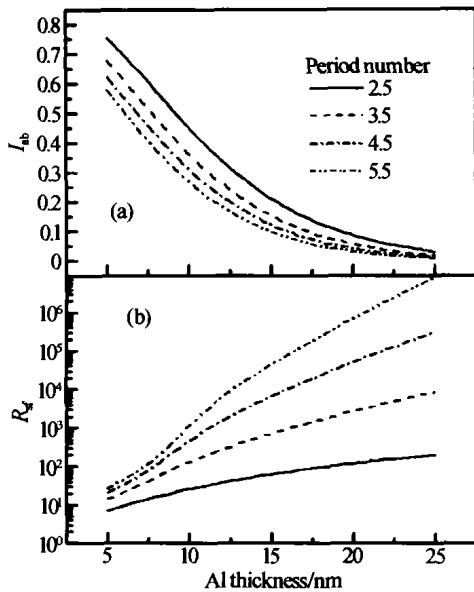


图4 快成分衰减(a)及慢成分抑制能力(b)随金属层厚度的变化

Fig.4 Influence of the metallic layer thickness on the fast component of the photonic crystal(a) and the emission spectrum of the BaF₂ crystal(b)

慢成分强度比。在增加周期的同时,减少每周期中金属层的厚度,可使光子晶体的快慢成分抑制比具有更大的数值。因此在可能的条件下,应尽量增加周期数,减少每周期中的金属层厚度。当然,随着金属层厚度的减小,会引起薄膜的不连续性,由此使金属层的光学参量发生改变,进而导致整个光子晶体特性的劣化,因此金属层的厚度也不宜太小。

4 发射角

在实际测量中, BaF₂ 晶体所产生的闪烁光是由

晶体内部向外部发射,即闪烁光是由高折射率材料向低折射率材料发射,因此晶体表面对光的发射存在一个全反射角,当发射角度大于该角度时,发射光被全部反射。在此所考虑的情况中,对应的全反射角约为 41°,因此计算时只需考虑光子晶体在 0 ~ 41°之间的性质。相应于不同角度入射的光子晶体的能带计算结果表明,随着角度的增加,光子晶体的整个能谱向短波长方向移动,透射带的高度降低,截止带的深度变浅,而且透射带和截止带的宽度也减小。相应于周期数为 3.5 的光子晶体,计算了在不同发射角度时对 BaF₂ 晶体的发射光谱的修饰作用。结果表明,随着入射角度的增加,截止带的宽度及深度均逐渐减小,这和全介质光子晶体的现象相类似^[12],光子晶体对 BaF₂ 晶体慢闪烁成分的抑制特性则逐渐变差。图 5 表示了在不同的发射角度范围内得到的 I_{ab} 和 R_{σ} ,由图可见,所有讨论的光子晶体在 41°范围内对快成分的衰减均小于 5 倍;对应周期数大于 3.5 的光子晶体,当发射角度在 41°以内时, R_{σ} 仅为 20 左右,然而,若将发射角度范围缩小至 20°以内时, R_{σ} 快速上升至 100 以上,能很好地满足实际探测的要求。如为提高抑制比,还可进一步在光子晶体设计中引入无序,进行优化等方法^[13,14],在不影响快成分强度的情况下,能很好地改善光子晶体对慢成分抑制的角度特性。

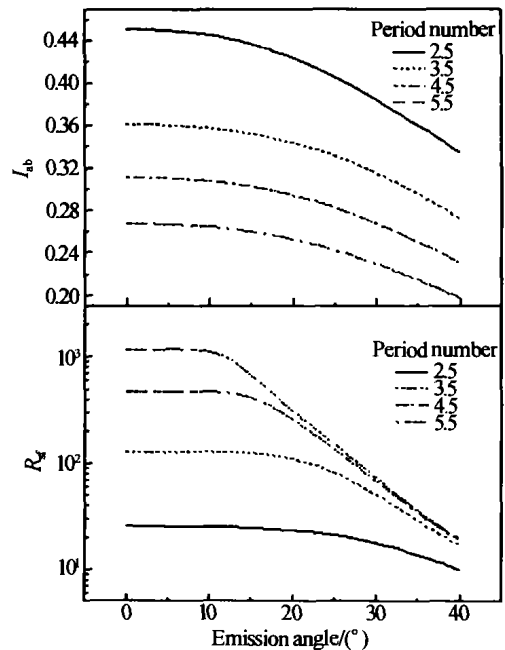


图5 快成分衰减(a)及慢成分抑制能力(b)随发射角度的变化

Fig.5 Change of the fast component of the photonic crystal (a) and the emission spectrum of the BaF₂ crystal (b) with relation to the emission angle

5 结论

利用光子晶体方法抑制 BaF₂ 晶体的闪烁光慢成

分,可对 BaF₂ 晶体的发射光谱进行很好的修饰. 所设计的金属/介质光子晶体在紫外-真空紫外区具有在短波范围高的透射带,在长波范围深的截止带,而且在透射带和截止带的过渡区可以具有陡峭的边缘. 通过选择不同的光子晶体的设计参量,如周期数,金属层的厚度等,可使快成分的衰减小于 5 倍,对慢成分的相对抑制比大于 20 倍. 采用适当的探测角度范围,可进一步使相对抑制比提高到 100 以上.

参考文献

- Schotanus P, Van Eijk C W E, Hollander R W, et al. Photoelectron production in BaF₂-TAME detectors. *Nucl Instr and Meth*, 1987, **A259**:586 ~ 588
- Laval M, Moszynski M, Allemand R, et al. Barium fluoride-inorganic scintillator for subnanosecond timing. *Nucl Instr and Meth*, 1983, **206**:169 ~ 176
- Ershov N N, Zakharov N G, Rodnyi P A. Spectral-kinetic study of the intrinsic-luminescence characteristics of a fluorite-type crystal. *Opt Spectrosc*, 1982, **53**(1):51 ~ 54
- 陈玲燕, 顾牡, 黎青, 等. 新型超快探测器性能研究. *强激光与粒子束*, 1996, **8**(3):362 ~ 366
Chen L Y, Gu M, Li Q, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(3):362 ~ 366
- Jin C, Cheng B, Man B, et al. Two-dimensional metallodielectric photonic crystal with a large band gap. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(9):1201 ~ 1203
- Ye Yonghong, Bader G, Vo-Van Truong. Low-loss one-dimensional metallodielectric photonic crystal fabricated by metallic insertions in a multilayer dielectric structure. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(2):235 ~ 237
- Scalora M, Bloemer M, Pethel A. et al. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures. *J Appl Phys*, 1998, **83**(5):2377
- Bloemer M J, Scalora M. Transmissive properties of Ag/MgF₂ photonic band gaps. *Appl Phys Lett*, 1998, **72**(14):1676 ~ 1678
- Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids. San Diego, Calif. Academic Press, 1991, Vol. 2
- Fischel D N, Crawford H B, Douglas D A, et al. American Institute of Physics Handbook. 3rd edition, Colonial Press Inc. 1972
- Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids. Orlando, Fla. Academic Press, 1985
- 卜涛, 陈慰宗, 冯宇, 等. 一维光子晶体带隙随偏振光入射角的改变. *光子学报*, 2002, **31**(9):1128 ~ 1131
Bo T, Chen W Z, Feng Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9):1128-1131
- Hongqiang Li, Guochang Gu, Hong Chen, et al. Disordered dielectric high reflectors with broadband from visible to infrared. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(22):3260 ~ 3262
- 段晓峰, 牛燕雄, 张雏, 等. 一维光子晶体的光学传输特性分析. *光子学报*, 2003, **32**(9):1086 ~ 1089
Duan X F, Niu Y X, Zhang C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1086 ~ 1089

One Dimensional Photonic Crystal Applied for the Spectrum Modification of BaF₂ Scintillation Crystal

Wu Yonggang^{1,2}, Lin Xiaoyan^{1,2}, Gu Chunshi^{1,2}, Gu Mu¹, Ma Xiaohui¹, Wei Junming^{1,2}, Chen Lingyan^{1,2}

¹ Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092

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

Received date:2003-10-11

Abstract One dimensional photonic crystal was proposed to modify the emission spectrum of BaF₂ scintillation crystal. The photonic crystal was composed of the basic unit, Al₂O₃/MgF₂/Al/MgF₂. The transmittance spectrum of the photonic crystal and the relevant emission spectrum of the BaF₂ were discussed with relation to period number, metallic layer thickness and its position in the low refractive index material, emission angle etc. Results show that the attenuation of the fast component is less than 5 times and the relative restraint ratio of the slow component is larger than 20 with the designed photonic crystal. The relative restraint ratio of the slow component can be larger than 100 by selecting appropriate detect angle range.

Keywords Photonic crystal; BaF₂ scintillation crystal; Spectral modification



Wu Yonggang Ph. D., Professor, graduated from the physics department of Fudan University in 1982 and Graduate School of Tongji University in 1987, his main research fields include low-dimensional photonic band gap material, omni-directional reflection material, dielectric material and electro-chromic material.