

光子晶体概念在超窄带滤光片中的应用研究

林 炳*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 本文的根本目的针对用于闪电探测的超窄带滤光片的研制。在具体研究中将区别于常规的薄膜光学滤光片的设计原理, 采用光子晶体的新概念发展一种创新性强的新设计方案, 以实现滤光片性能的大幅度提高, 降低对实验设备的要求和提高成品率。通过引入光子晶体这一最新发展起来的科学概念, 优化我国光学元器件水平的创新性工作。

1 常规超窄带滤光片的制备方案

目前, 常规的超窄带通光学薄膜滤光片大多是采用在两个 $1/4\lambda$ 高低折射率层构造的高反射层间夹一间隔层的设计方案制备的^[1]。这一方案可以给出带宽非常窄的滤光片, 但它对每一层薄膜的厚度控制要求非常严格。在实际制备中, 膜层厚度的微小变化会使滤光片的性能明显退化, 或使得高性能的滤光片成品率大大下降。因此, 要实现半高宽窄、透过率高的优质超窄带通滤光片, 往往需要很高的成本和很先进的薄膜制造设备。对于传统光学薄膜设计方案所存在的这些缺点, 人们期望能通过构造一种新的结构予以解决。光子晶体概念的提出为该领域的创新性发展带来了新的机遇。

2 光子晶体概念的提出

1987年, Yablonovitch^[2]在讨论如何抑制自发辐射时提出了光子晶体这一新概念。几乎同

时, John^[3]在讨论光子局域时也提出了这一概念。如果将不同介电常数的介电材料按周期排列, 电磁波在其中传播时由于布拉格散射, 将会受到调制而形成能带结构, 这种能带结构叫做光子能带。光子能带之间可能出现带隙, 即光子带隙 (PBG)。具有光子带隙的周期性介电结构就是光子晶体, 又叫做光子带隙材料, 也有人把它叫做电磁晶体。图 1 所示为光子晶体的结构, 图 2 给出了 Alvaro Blanco 等人用胶体自组织生长获得的三维光子晶体及其光子能带结构^[4], 从中可能看出有一条“光子禁带”出现在 $1.38\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 之间, 也就是意味着这样的三维光子晶体结构将使得光在这一波长范围内被完全反射。

英国格拉斯哥大学的 Andrew L. Reynolds 等人^[5]专门从事光子晶体理论的计算与设计, 我们利用他们编制的计算程序对光子晶体进行研究。在图 3 中, 我们可以看到一维的布喇格膜堆结构图以及不同层数情况下的归一化频率与透



图 1 一维、二维与三维光子晶体结构的示意图

* 2002 级博士研究生

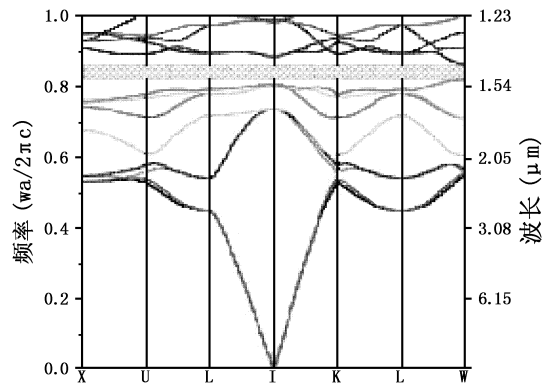
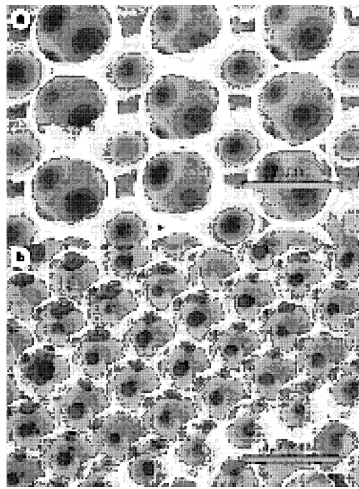


图 2 摘自 Nature, Vol.405, 25 May 2000, P437

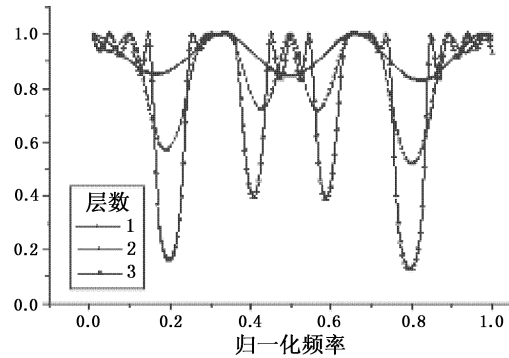
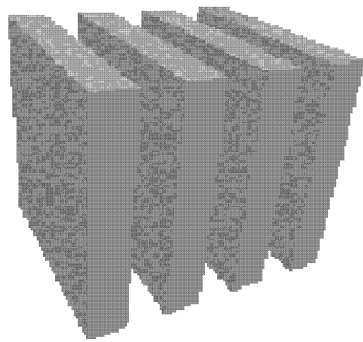


图 3 一维布喇格膜堆结构示意图及其计算透射光谱

射率的关系。从中可以看出，随着我们不断地增加膜堆的周期数，相应频率的透射率快速地趋向于 0，而且这样的“砖块”越薄，所获得的透射禁带的宽度越大。电磁学中的一个重要的关系式 [7] 可以用来说明这一性质，尤其对于光子带隙来说：

$$\omega n = ck \tag{1}$$

式中， ω 为入射光频率， $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ 为折射率， c 为光速， k 为波矢。

通过这一方面的调研，我们发现其实在布喇格膜堆结构也可以视为薄膜光学中最常见的两种材料的周期性结构，也就是说，周期薄膜就是某种意义上的一维光子晶体。图 4(a) 为介电常数 $\epsilon_r = 12.96$ 的块状材料能带结构，这是一般的均匀介质，光在介质中的传播并不会产生什么奇特的现象。图 4(b) 表示，当布喇格膜堆的周期厚度为 a ，介质材料占周期厚度的 90% 时，在能带结构上产生了一些变化，这是指光在正入射时，在

一些频率范围内出现了所谓的“光子禁带”，从图 4(c) 的透射谱中就可以清楚看出，在这些频谱内，其透射率很接近于 0。而对同一结构用传统的薄膜光学计算程序得出的结果与之相比较是一致的，如图 5 所示。

3 光子晶体的理论计算与设计方法

早期的实验工作集中在微波波段，采用机械加工的方法来制作 [6]。由于没有理论指导，实验的制作基本处于炒菜状态。受实验工作的推动，一些理论工作者开始介入。

光在光子晶体中的传播服从 Maxwell 方程组，经过运算可以得到运动方程 [7]

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) \tag{2}$$

式中， $\epsilon(\vec{r})$ 表示材料的介电常数， ω 为入射光频率， c 为光速， $H(\vec{r})$ 为磁感应矢量。

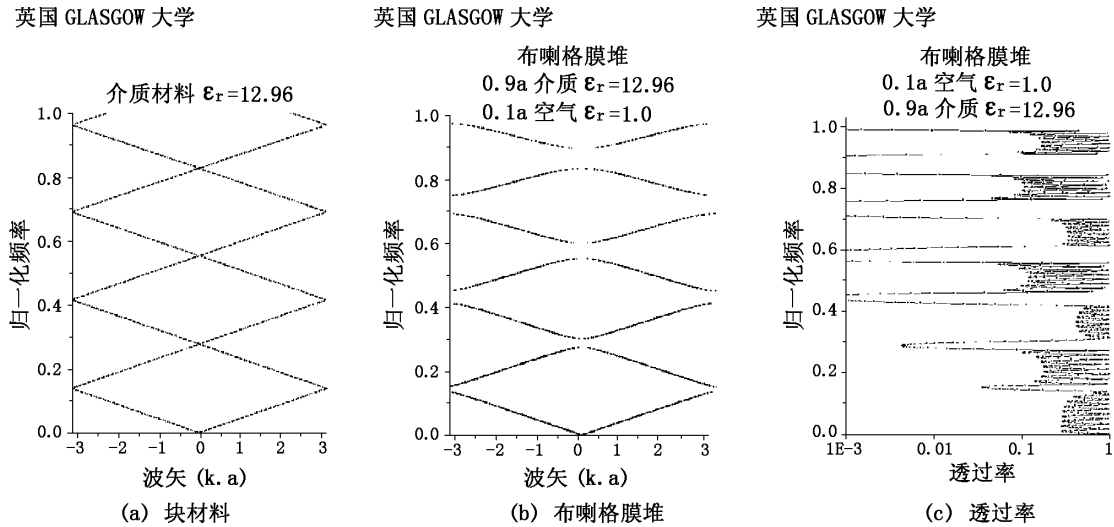


图 4 块状材料与布喇格膜堆结构的能带图及其透射谱
0.9a Dielectric $\epsilon_r = 12.96$, 0.1a Air $\epsilon_r = 1.0$

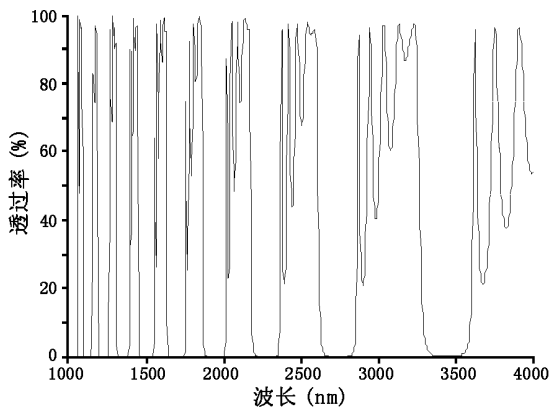


图 5 薄膜计算程序结果

($\epsilon_H = 12.96$, $\epsilon_L = 2.0\mu\text{m}$, 结构 6[12.96H0.4L])

这个方程类似于电子的薛定谔方程(见表 1), 是线性本征值问题, 其解完全由空间变化的介电常数决定。如果介电常数在空间发生周期性变化, 则会形成光子能带。

光子能带计算方法有以下几种:

(1) 常用的是平面波展开的方法^[8-13], 即将介电常数和电场或磁场用平面波展开, 最后得到本征值方程。通过解本征方程, 即可得到光子能带。

(2) 光子晶体的能带计算可以套用电子能带的方法, 如缀加平面波方法^[14]、紧束缚法等^[15]。在处理杂质情况时, 若采用平面波方法, 则要用超原胞, 需要很大数目的平面波。紧束缚法可以克服这个困难。

(3) Pendry 等引入了传输矩阵法^[16], 该传输矩阵法不仅可以计算能带, 而且能得到传输率。这个方法对处理有杂质的情况很有效。

(4) 经常用到的方法还有有限差分域法^[17-19], 它对计算能带和处理杂质问题效果很

表 1 量子力学与电动力学的比较

	量子力学	电动力学
场	$\vec{\psi}(\vec{r}, t) = \vec{\psi}(\vec{r})e^{i\omega t}$	$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r})e^{i\omega t}$
本征值问题	$H\vec{\psi} = E\vec{\psi}$	$\Theta\vec{H} = (\omega/c)^2\vec{H}$
厄米算符	$\vec{H} = \frac{-(g/\pi)^2\nabla^2}{2m} + V(\vec{r})$	$\Theta = \nabla \times (\frac{1}{\epsilon(\vec{r})}\nabla \times)$
离散平移对称	$V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R})$	$\epsilon(\vec{r} + \vec{R})$
对易关系	$[H, T_R] = 0$	$[\Theta, T_R] = 0$
布洛赫定理形式	$\vec{\psi}_{\vec{k}\vec{n}} = u_{\vec{k}\vec{n}}(\vec{r})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r})}$	$\vec{H}_{\vec{k}\vec{n}}(\vec{r}) = u_{\vec{k}\vec{n}}(\vec{r})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r})}$

好。

(5) 对于某些特殊问题, 多重散射法效果也不错^[20-22]。

1990年, 美国 Ames 国家实验室的研究人员第一次从理论上预言具有金刚石结构的光子带隙材料具有全方位的光子带隙存在的光子晶体。Yabnolovitch^[23] 等人很快制作出了第一个在微波波段具有全方位光子带隙的光子晶体材料。

4 光子晶体概念薄膜

从上世纪九十年代中期起, 人们逐渐认识到光子晶体材料的重要性。从此, 光子晶体材料成为一门蓬勃发展的新学科, 它吸引了包括经典电磁学、固体能带论、半导体器件物理、量子光学、纳米微结构、化学和材料科学等领域的科学家。发表的论文数目呈指数增长。各国政府、军方、科研单位、大学以及工业界开始投入大量的人力、物力, 在光子晶体的基础研究和应用方面展开了角逐。

长期以来, 人们一直认为一维光学薄膜不能作为全方位反射镜。但美国 MIT 的研究人员利用光子带隙材料的新概念, 从理论和实验上证实, 只要选择适当的介电材料配比, 即使是一维光学薄膜有全方位反射现象(如图 6 和图 7 所示)^[24,25], 即入射角从 0° 至 90° , 都存在一个高反射频率区(反射率 $> 20\text{dB}$ 就可看做是高反区)。这项工作被《纽约时报》誉为三百年来光学的重要进展之一。

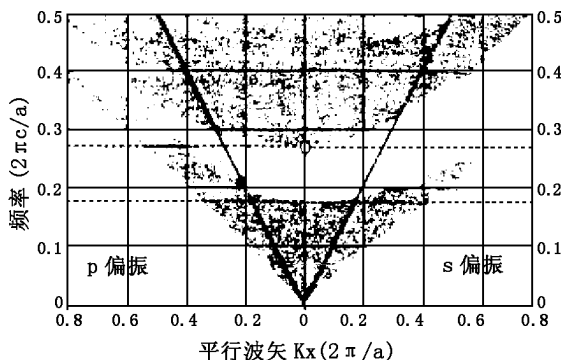


图 6 $n_1 = 1.7$ 与 $n_2 = 3.4$ 两种材料构成的 $\lambda/4$ 膜堆的投影能带结构

图 7 中所求的是图 6 结构的 $\lambda/4$ 膜堆的计算所得到的透射谱, 其中实线为 P 偏振光, 虚线为 S 偏振光。可以看出, 经过仔细设计并予以适当的材料配比, 可以得到全方位反射的多层膜。

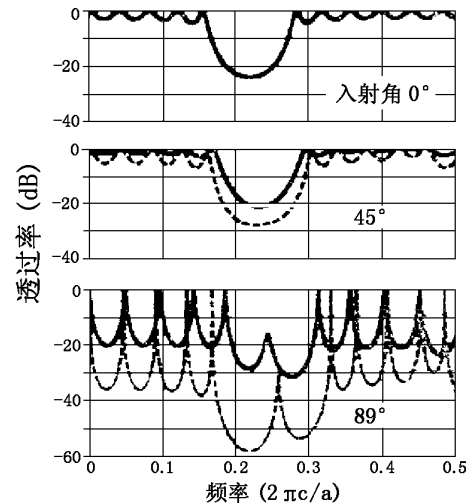


图 7 $n_1 = 1.7$ 与 $n_2 = 3.4$ 两种材料构成的 $\lambda/4$ 膜堆在三个入射角下计算所得的透射率光谱曲线

最近, 美国加州大学圣地亚哥分校的科研人员在金属光子带隙材料中发现, 在一定的频率范围内, 有效折射率为负值^[26], 出现了一系列令人难以想象的反常现象, 如能量传播方向与光波的传播方向相反, 入射光与折射光在相同一边(反常折射现象), 光压与入射光方向相反(负光压)等^[27], 在国际学术界引起了很大的轰动。

5 结束语

本文期望应用国际上提出的这一光子晶体概念, 在薄膜光学中应用类似于电子波函数特性中的 Anderson 局域化与隧穿效应, 在光子波动性上, 实现一种可以缓解由于膜层涨落导致滤光片性能急剧下降的膜系结构, 大大地降低由于膜层涨落导致的滤光片性能下降的幅度, 进而大大地缓解制备超窄带通光学薄膜滤光片的难度或者说是提高膜系的滤光特性, 以满足我国气象卫星应用的需求。

参考文献

- [1] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学, 上海科学出版社. 1980 年.
- [2] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059(1987).
- [3] S. John, Phys. Rev. Lett. 58, 2486(1987).
- [4] Nature, Vol.405, 25 May 2000, 437-439.
- [5] <http://www.elec.gla.ac.uk/groups/opto/photonic-crystal/Welcome.html>
- [6] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter. Phys. Rev. Lett. 63, 1950(1989).
- [7] Photonic Crystals — Molding the Flow of Light, John. D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn. Princeton University Press. 1995.
- [8] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light(Princeton Univ. Press, NJ, 1995).
- [9] Photonic Band Gap Materials , NATO, ASI, edited by C. M. Soukoulis(Kluwer, Dordrecht, 1996).
- [10] Photonic Band Gaps and Localization, NATO ARW, edited by C. M. Soukoulis (Plenum, New York, 1993).
- [11] K. M. Leung and Y. F. Liu. Phys. Rev. Lett. 65, 2646(1990).
- [12] Z. Zhang and S. Satpathy. Phys. Rev. Lett. 65, 2650(1990).
- [13] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis. Phys. Rev. Lett. 65, 3152(1990).
- [14] W. C. Sailor, F. M. Mueller, and P. R. Villeneuve. Phys. Rev B57, 8819(1998).
- [15] E. Lidorikis, M. M. Sigalas, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, Phys. Rev. Lett. 81, 1405(1998).
- [16] J. B. Pendrym and A. MacKinnon. Phys. Rev. Lett. 69, 2772(1992). J. B. Pendry, J. Mod. Optics 41, 209(1993). P. M. Bell, J. B. Pendry, and A. J. Ward, Comp. Phys. Comm. 85, 306(1995).
- [17] K. S. Yee. IEEE Trans. Antennas Proga. 14,302 (1966).
- [18] C. T. Chan, Q. L. Yu, and K. M. Ho. Phys.Rev. B51, 16635(1995).
- [19] A. J. Ward and J. B. Pendry. Phys. Rev. B58, 7252(1998).
- [20] W. H. Butler, Phys. Rev. B14, 468(1976).
- [21] K. M. Leung and Y. Qiu, Phys. Rev. B48, 7767 (1993).
- [22] L. M. Li and Z. Q. Zhang. Phys. Rev. B58, 9587 (1998).
- [23] E. Yablonovitch. J. Opt. Soc. Am. B, Vol.10 No.2, 983(Feb. 1993).
- [24] Joshua N. Winn, Yoel Fink etc. Opt. Lett. Vol.23, No.20, 1573-1575(Oct. 1998).
- [25] I. Abdulhalim. Optics. Communication. Vol.173, 43-50(Jan. 2000).
- [26] J. P. Dowling, C. M. Bowden. J. Mod. Opt, 1994, 42(2): 345-351.
- [27] D. Felbacq, B. Guizal, F. Zolla. J. Opt. A: Pure Appl, Opt 2000, 2:L30-L32.

国外专利介绍

**能在远距离敏感温度的长波
调制焦平面阵列**

美国专利 US6561693

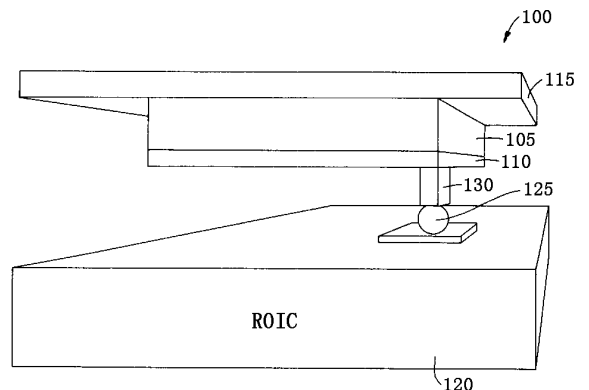
(2003 年 5 月 13 日公布)

多色红外探测技术具有各种各样的用途,例如,在地质测量中,它可以提供有用的信息,在医学方面,它可以提供高质量的人体热图像。按常规,这种多色红外探测是用一个宽带红外探测器和一个附带的旋转机械多色滤光片轮进行的。然而,这种机械多色轮系统也有一些不足之处,如速度慢、笨重、功耗大、使用寿命有限以及光子收集效率较低等。为了克服这些缺点,人们又研制出了能够探测多个谱段的量子阱光电探测器。

本发明提供一种红外光电探测器焦平面阵列,它有许多量子阱层。通过调节每层量子阱层上的偏压,便可

以将该量子阱层的光谱“调节”到与冲击辐射相一致。该阵列的每个探测器都与读出电路相连,读出电路通过对来自各探测器的光电流进行处理,便可确定位于远处的红外源的绝对温度。

本专利文献共 11 页,其中 4 页是插图。



高 编译