

空间与频率双性能的薄膜光学滤波器^{*}

梁冠全 韩 鹏 汪河洲[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2003 年 7 月 18 日收到, 2003 年 12 月 12 日收到修改稿)

通过耦合两个掺杂的一维光子晶体, 提出了同时兼具频率和空间光学滤波双性能的一维光子晶体异质结构. 在一个宽的频带范围内, 该结构只允许法向入射的确定的一种中心频率光透过, 偏离法向此中心频率光全反射; 而在这宽频带范围内其他频率所有的光在任何角方向都全反射.

关键词: 一维光子晶体, 光学滤波器, 光学薄膜, 光通信

PACC: 4270Q, 4280C, 4280B, 7865

1. 引 言

光学滤光器是最重要最常用的光学元器件之一, 包括频率滤光器和空间滤光器. 频率滤光器根据其用途或结构可分许多类, 其中最典型的两类是吸收型滤光片和多层薄膜干涉滤光片^[1]. 有广泛用途的窄带通滤光片通常为 Fabry-Perot (F-P) 型薄膜结构^[2,3], 它是通过调整 F-P 间隔层的几何厚度或改变入射角度实现透射频率的选择性^[3-5]. 此机理决定了 F-P 滤光片不能在仅透射所需角度入射的信号光的同时阻挡其他角方向入射的满足透射条件的光. 空间滤波器则是用于隔离非信号光角度入射的空间其他方向的光噪声. 双共焦透镜在焦点置一针孔系统是最典型的空间滤波器. 但是这种结构有很多缺点, 当光束通过滤波小孔时, 输入光场原有的空间频率的高频成分可能被阻挡, 引起输出光场偏离原有光场的分布; 而且系统体积大, 不利于集成. 有报道利用硅材料的三维周期性结构形成角度滤光器^[6], 但角度选择性不明显且三维结构制作复杂. 还有报道利用倾斜柱状结构的金属膜进行角度滤波^[7,8], 但两种偏振的透射率都不高, 且不同角度的透射率没有明显突变. 总之, 已报道的各种空间光学滤波器各有欠缺, 更未见频率滤光和空间滤光两种功能同时具备的器件的报道.

近年, 随着光子晶体研究的迅猛发展, 许多崭新的微型化的新型光子晶体器件相继问世, 如一维光子晶体宽带全角反射镜^[9]等.

本文在一维光子晶体掺杂结构物理特性研究的基础上, 提出了兼具频率和空间光学滤波性能的一维光子晶体结构. 该滤光片由两个掺杂一维光子晶体按理论推导的参数构成. 该结构使频率滤光和空间滤光两种功能合一成为可能, 有广泛的应用前景, 而且是薄膜型稳定可靠, 体积小、重量轻.

2. 理论模型

基于一维光子晶体的全介质掺杂结构可表示为 $(LH)C_1(HL)^s$ 或 $(HL)C_2(LH)^s$, 其中 $C_1 = \alpha L$, $C_2 = \beta H$; H, L 为折射率 (均取正实数) 分别为 n_H, n_L 的法向光学厚度为 $1/4$ 中心波长 $\lambda_0/4$ 的各向同性介质膜层 (相应于中心波长 λ_0 的是中心频率 $\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$). C_1, C_2 为缺陷层, 其光学厚度可分别由参数 α 和 β 进行调节; s 为周期结构的周期数. 选取出射介质与入射介质相同使得两边的反射结构对称, 从而理论上的缺陷模处的透射率可达 100%. 所选用的折射率使结构不存在 Brewster 角. 为了便于获得较宽的全角禁带, 本文选取大折射率差的材料 $n_H = 3.4$ (Si), $n_L = 1.45$ (SiO₂). 为了得到较窄的缺陷模线宽, 选 $s = 7$. 用传输矩阵法^[10]计算不同缺陷厚度所

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 19934002 和 10274108) 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2003AA311022) 及广东省自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: stshwhz@zsu.edu.cn

对应的法向透射谱,以 $(LH)C_1(HL)$ 为例,如图 1 所示.由图 1 可见,不同缺陷厚度对应不同的法向缺陷模频率,而法向带隙基本不变.当 $\beta = \alpha$ 时, $(HL)C_2(LH)$ 的法向缺陷模和带隙与 $(LH)C_1(HL)$ 的几乎一致.

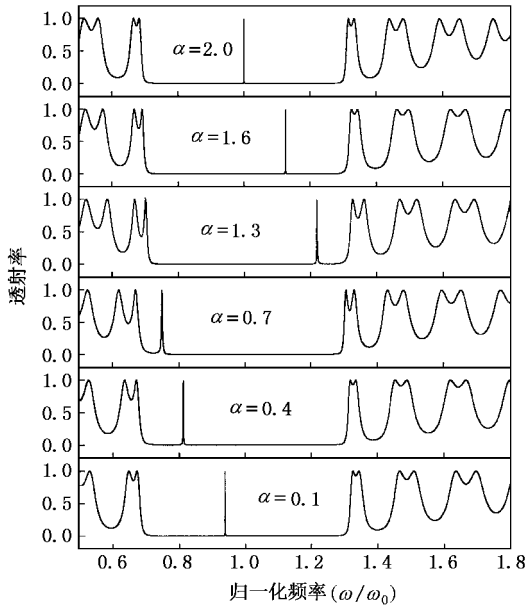


图 1 调节前,即结构 $(LH)C_1(HL)$ 不同缺陷厚度对应不同的法向缺陷模频率,法向带隙基本不变 $n_H = 3.4, n_L = 1.45, s = 7$

如果两个掺杂一维光子晶体对于法向具有相同的缺陷模频率 ω_0 ,而对任何斜入射的情况具有不同频率的缺陷模,且斜入射时相邻两者的缺陷模都落在对方的带隙内及两者的带隙满足异质结构成全角高反的条件,则把这样的两个掺杂结构耦合起来就只有以法向入射频率为 ω_0 的光能透射,而以其他角度入射的光则被反射.这样的耦合结构就兼具了频域与空域滤波能力.

要使两个具有不同缺陷结构一维光子晶体对法向具有相同的缺陷模(本文定为中心频率 ω_0),可以通过统一调节结构中每一膜层的厚度实现.这一调节操作记为 $f[(LH)C_1(HL)]$ 或 $g[(HL)C_2(LH)]$,参数 f 和 g 为调节因子,其取值为调节前,即结构 $(LH)C_1(HL)$ 或 $(HL)C_2(LH)$ 对法向的归一化缺陷模频率 ω/ω_0 ,即图 1 缺陷模所在的横坐标值,调节结果如图 2 所示.

下面通过传输矩阵法用数值计算方法考察斜入射时经过调节的掺杂结构的缺陷模和禁带边对入射角的依赖关系.举例以 $\alpha = 1.6$ 和 $\beta = 0.1$ 相应的掺

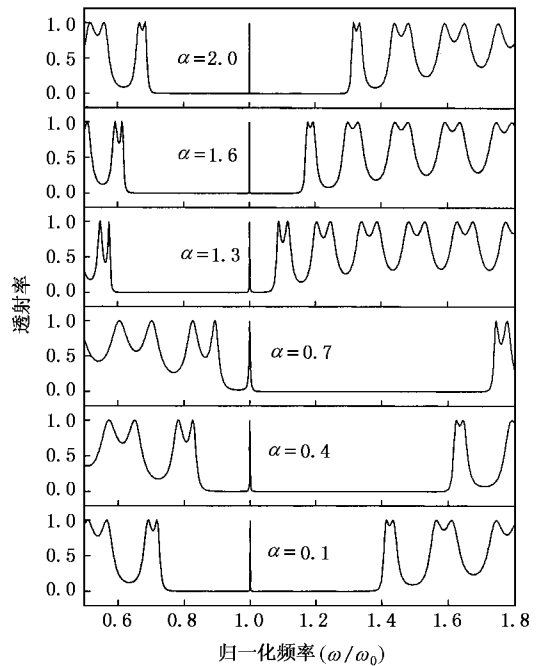


图 2 调节后,即结构 $f[(LH)C_1(HL)]$ 不同缺陷厚度对应不同的法向缺陷模频率,法向带隙发生相应的移动,从而导致全角带隙的移动 参数同图 1

杂结构为考察对象,相互正交的 p 和 s 偏振的缺陷模峰值频率和禁带边对入射角的依赖关系如图 3 所示.对相同的偏振,显然在入射角较大时,缺陷模频率不同,且相差很大;但在入射角很小时(小于 5°),缺陷模靠得很近,若缺陷模线宽较大,则耦合时相应于斜入射的缺陷模的重叠会导致对斜入射的透射峰的出现,所以要选取缺陷模线宽窄的结构作耦合.理论上可通过增加周期结构的周期数收窄缺陷模线宽.另外, p 偏振的禁带边即为对两偏振的禁带边,所以图 3 只给出 p 偏振的禁带边.

取 $\alpha = 1.6$ 的原因如下:对未加调节的掺杂结构 $(LH)C_1(HL)$ 或 $(HL)C_2(LH)$,禁带仅由周期结构决定,其中的高低折射率比越大,禁带越宽^[11];在归一化坐标中,其法向禁带相对中心频率是对称的,而全角禁带则不对称.以结构 $(LH)C_1(HL)$ 为例,取 $n_H = 3.4, n_L = 1.45$,根据文献[11]式,其全角禁带的低频边为 $0.97\omega_0$;若取 $C = 1.6L$,经把缺陷模频率调为中心频率后,全角禁带的低频边为 $0.87\omega_0$.因此缺陷厚度的适当选取可以拓宽全角禁带的低频部分(中心频率以低的频段).

由掺杂结构耦合的异质结形成全角高反,考虑的不单单是全角禁带边的重叠,还要考虑到对每一

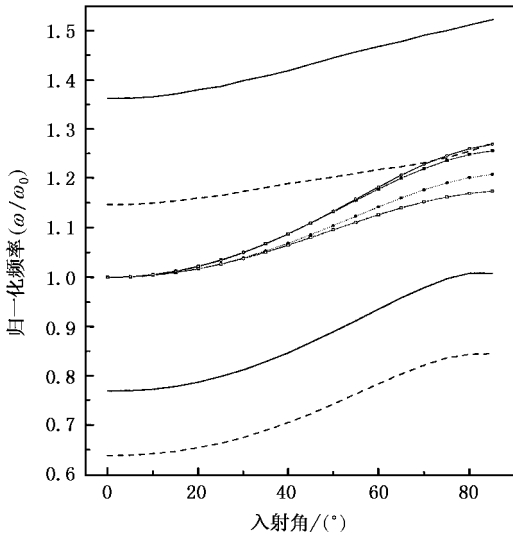


图3 $\alpha = 1.6$ 和 $\beta = 0.1$ 相应的不同掺杂结构缺陷模峰值频率和禁带边对入射角依赖关系的数值模拟结果 $n_H = 3.4, n_L = 1.45, s = 7$. \square : $\alpha = 1.6, p$ 偏振; \circ : $\alpha = 1.6, s$ 偏振; \blacksquare : $\beta = 0.1, p$ 偏振; \bullet : $\beta = 0.1, s$ 偏振. p 偏振的禁带边: --- 为 $\alpha = 1.6$, — 为 $\beta = 0.1$

个斜入射角度是否能形成禁带,即两耦合结构各自的缺陷模是否落在对方的禁带内.如图3所示,若仅考虑 $\beta = 0.1$ 对应的全角禁带低频边为 $1.03\omega_0$,不能得出耦合以后的全角禁带低频边.此外,由于入射角大于 70° 后, $\alpha = 1.6$ 的禁带边与 $\beta = 0.1$ 的 p 偏振的缺陷模几乎重合,又由于 p 偏振缺陷模线宽随角度增大会增宽,故实际上 $\alpha = 1.6$ 的禁带不能完全覆盖 $\beta = 0.1$ 的 p 偏振的缺陷模,所以耦合结构的全角反射带高频边只能达到 $1.2\omega_0$.

3. 计算详例

通过上述讨论,给出结构 $f[(LH)_\alpha L(HL)_\beta]g[(HL)_\beta H(LH)_\alpha]$ 的一个计算详例.忽略材料色散和吸收的影响,取 $n_H = 3.4(\text{Si}), n_L = 1.45(\text{SiO}_2), s = 7, \alpha = 1.6$ 和 $\beta = 0.1$,相应的调节因子为 $f = 1.1257368, g = 0.9378195$.其光谱响应如图4所示.在 $0.87\omega_0 - 1.2\omega_0$ 范围内,通光角度限制在 $0^\circ \pm 3^\circ$,透射频率限制在 $(1 \pm 0.0005)\omega_0$.其他频率及其他角度入射的光都被反射.

需要说明的是,以上计算都只是从举例说明原理的角度出发,可以肯定这不是具有最锐通光角度及频率选择性的、最宽全角反射带的参数组合,因为起码理论上可以通过增加反射膜的周期数达到收窄

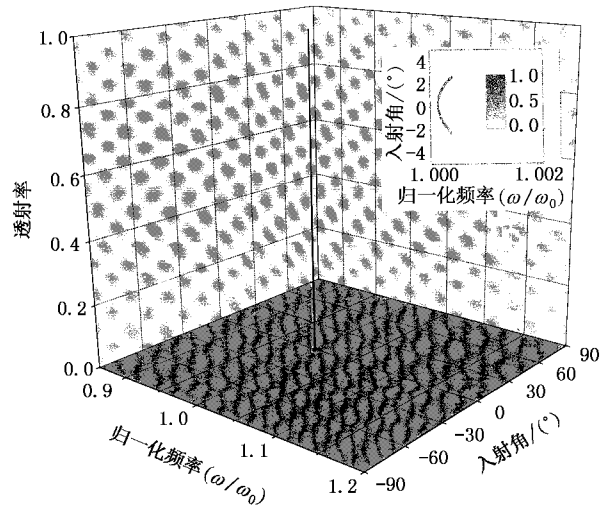


图4 $1.1257368[(LH)_\alpha L(HL)_\beta]0.9378195[(HL)_\beta H(LH)_\alpha]$, $n_H = 3.4, n_L = 1.45$ 的透射谱

缺陷模线宽的目的,从而使通光角度更窄,还可以调节 α 和/或 β 增宽全角反射带;另外,如何恰当地组合不同的掺杂结构从而获得更锐的角度和频率选择性也有待探讨.

众所周知,所有通光频率很锐和透过率很高的薄膜,一定要求膜层厚度的精度很高.这是薄膜型窄带滤光片在制作方面的困难和局限性.本文的新薄膜如果同时要求通光频率很锐,通光角度很窄而且透过率很高,如果不考虑补偿方法,则膜层厚度的精度要求高到现有光学镀膜方法无法完成.为解决此问题,我们通过对膜系逐层生长过程的模拟,发现每层膜的光学厚度相对于规整膜都有 $1\% - 20\%$ 偏离的情况下,只要第二个掺杂结构的最后几层膜起补偿作用,还可获较理想的结果.补偿方法如下:实验中,采用光电极值法(具有补偿效应)和石英振荡膜厚仪同时监控:前者监控设计波长的透射率,并根据透射率的变化和补偿的要求通过后者很好地控制最后几层的厚度,就能实现角度和频率滤光的性能.

4. 结 论

本文提出用两个掺杂一维光子晶体 $f[(LH)_\alpha C_1(HL)_\beta]$ 和 $g[(HL)_\beta C_2(LH)_\alpha]$ 耦合成 $f[(LH)_\alpha C_1(HL)_\beta]g[(HL)_\beta C_2(LH)_\alpha]$ 结构.通过恰当地选择结构参数,此结构成为频率和空间光学滤波性能兼具的滤光片.这种滤光片在较宽的频率和

入射角范围内,只允许入射光中法向中心频率成分以超过 99% 的透过率透过,而偏离法向的中心频率被完全反射,而且在一个宽的频带内其他频率的光全部被完全反射,亦即这种结构的膜片既具有非常窄的透光角度的空间光学滤波性能,还具有非常窄频带的频率光学滤波性能,是一种同时兼具频域和

空域滤光两种性能的一维光子晶体薄膜型滤光片结构.该结构特别适用于增强探测器灵敏度及信噪比和需要抗干扰的场合,如大气光通信、太空光通信和制导武器抗干扰等.比起已有的空间角度滤光的方法,该光子晶体结构具有角度滤光性能突出、体积小、重量轻、集成度高(薄膜型)等优点.

- [1] Macleod H A 1969 *Thin-Film Optical Filters*(London : Adam Hilger Ltd.) p154
- [2] Ünlu M S and Strite S 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 607
- [3] Hunt N E J , Schubert E F and Zydzik G J 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 391
- [4] Lee H Y and Yao T 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 819
- [5] Song Q H , Liu L Y , Ling T , Xu L and Wang W C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2939
- [6] Sigalas M M , McCalmont J S , Ho K M and Tuttle G 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 3526
- [7] Smith G B 1990 *Appl. Opt.* **29** 3685
- [8] Ditchburn R J and Smith G B 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 3769
- [9] Dong J W , Han P and Wang H Z 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1963
- [10] Wang H and Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 [王 辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [11] Fink Y , Winn J N , Fan S H , Chen C P , Michel J , Joannopoulos J D and Thomas E L 1998 *Science* **282** 1679

Thin-film optical filters with both functions of incident angle and frequency^{*}

Liang Guan-Quan Han Peng Wang He-Zhou[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

(Received 18 July 2003 ; revised manuscript received 12 December 2003)

Abstract

By coupling two doped one-dimensional photonic crystals , a novel photonic crystal film heterostructure with both functions of frequency and spatial filters is proposed. In a broad frequency range , this optical film filter only transmits light of a selective frequency at normal direction and reflects light of this selective frequency at all other directions ; while all other frequencies within the broad frequency range are reflected in any directions.

Keywords : one-dimensional photonic crystal , optical filters , optical thin film , light communication

PACC : 4270Q , 4280C , 4280B , 7865

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19934002 and 10274108) , the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA311022) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China.

[†] Corresponding author. E-mail : stswzh@zsu.edu.cn