

# 基于薄膜光子晶体超晶格理论的偏振带通滤波器<sup>\*</sup>

顾培夫<sup>†</sup> 陈海星 秦小芸 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2004 年 4 月 14 日收到, 2004 年 5 月 15 日收到修改稿)

偏振带通滤波器在光通讯波分复用技术中有着特殊的应用. 利用薄膜一维光子晶体超晶格概念, 提出了两种新的偏振带通滤波器的设计方法. 第一种是基于两个一维光子晶体叠加的偏振带通滤波器; 第二种是在第一个光子晶体的中间插进第二个光子晶体, 形成三个一维光子晶体叠加的偏振带通滤波器. 设计了性能优良的 p 偏振分量透射而 s 偏振分量反射的新型带通滤波器. 讨论了这种滤波器的通带特性和截止宽度.

关键词: 薄膜光子晶体, 超晶格, 偏振带通滤波器, 波分复用系统

PACC: 4270Q, 4280X, 4280S

## 1. 引 言

在光通讯波分复用(WDM)系统中, 常常采用薄膜滤光片来满足各种各样的性能要求, 其中包括偏振带通滤波器来消除光纤偏振模色散的影响<sup>[1]</sup>.

所谓偏振带通滤波器, 就是指其中一个偏振分量透射而另一个偏振分量反射的带通滤波器. 用我们熟悉的法布里-珀罗(F-P)带通滤波器<sup>[2]</sup>, 即使在倾斜入射光中使用, 由于常常伴随着两个偏振分量的透射带, 因而不适用的. 虽然当通带变窄, 且入射角较大时, 两个偏振分量会出现两个非重叠的透射带, 但这同样不满足截止带宽度.

这种偏振带通滤波器的设计需要创建一种新的方法, 为此, 本文利用薄膜一维光子晶体超晶格的概念, 提出了两种新的设计方法, 并设计了两种新的偏振带通滤波器. 第一种是基于两个一维光子晶体(1D PC)叠加的偏振带通滤波器; 第二种是在第一个光子晶体的中间插进第二个光子晶体, 形成三个一维光子晶体叠加的偏振带通滤波器. 这两种带通滤波器都可视为基本周期为反射镜的 1D PC 超晶格的叠加, 其设计原理与 F-P 型带通滤波器完全不同, 因而其通带特性也不相同.

从原理上讲, 偏振带通滤波器可以设计成 s 偏振分量透射而 p 偏振分量反射, 这时在获得相同半

宽度的情况下, 可以大大减少膜层数. 遗憾的是, 此时 p 偏振分量的截止度往往很差, 且截止宽度很窄, 故需设计成 p 偏振分量透射而 s 偏振分量反射的偏振带通滤波器.

本文介绍了这种偏振带通滤波器的设计原理, 设计了性能优良的 p 偏振分量透射而 s 偏振分量反射的两种偏振带通滤波器, 讨论了这种偏振带通滤波器的通带特性和截止宽度.

## 2. 设计原理

利用光子带隙结构可以设计各种不同的滤波器<sup>[3-5]</sup>. 基于薄膜一维光子带隙超晶格概念设计的偏振带通滤波器与典型的 F-P 型带通滤波器完全不同.

在半导体能带工程中, 超晶格是一个很重要的概念, 于上世纪 60 年代末由 Esaki 等人<sup>[6]</sup>提出. 用不同带隙的两种材料交替的超薄层可以实现一维周期势结构, 由于不同周期的超薄层能改变晶格势场, 从而使其载流子传输行为与三维半导体材料全然不同. 当晶格的垒宽较窄时, 由于相邻势阱的波函数互相交叠, 使载流子可以通过隧道效应而穿过势垒, 这种结构称为超晶格; 反之, 当垒宽较宽时, 相邻势阱的波函数互相独立, 使载流子完全被限制在独立的势阱中, 这种结构称为量子阱.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60078001, 60478038)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: gupeifu@zju.edu.cn

通过选择适当的材料和参数,不同带宽的半导体晶体可以构成超晶格或者量子阱,可以通过对超晶格的能带折叠来实现对能带结构的调整.光子晶体的重要特征之一就是当电磁波在其中传播时由于布拉格散射,电磁波会受到调制而形成能带结构,而光子晶体研究的核心内容之一是能带结构的调整,可以把半导体的超晶格概念引入光子晶体<sup>[7]</sup>,以不同的光子晶体组成光子晶体超晶格实现对其能带结构的调整.最近已有研究涉及到光子晶体超晶格和量子阱结构的理论和应用等<sup>[8-13]</sup>.

与不同能带宽度的半导体晶体构成超晶格一样,可以把不同的 1D PC 构成光子晶体超晶格,并用 1D PC 超晶格的概念来得到隧穿光子禁带而形成通带的频率.当 1D PC 用于倾斜入射光时,由于两种偏振分量会呈现明显不同的通带特性,因而可望获得 p 偏振光透射而 s 偏振光反射的偏振带通滤波器.这种方法的设计步骤,首先,根据要求选择高、低折射率两种材料,设定光线入射角和参考波长等参数;然后计算 1D PC 的光子禁带(截止带)和通带(透射带)适当调节 1D PC 的基本周期数和参考波长等参数,以满足偏振带通滤波器的峰值波长、半宽度、截止宽度和截止深度等要求,最后计算偏振带通滤波器的光谱特性.在计算光子禁带和通带的光谱特性时,最直观的方法还是采用传输矩阵法,故可用薄膜光学的设计软件进行计算<sup>[14]</sup>.

## 2.1. 用两个光子晶体构建偏振带通滤波器

设薄膜 1D PC 超晶格的结构为  $(HL)^x(hl)^y$ , 其中 H、L 和 h、l 分别表示两个 1D PC 的高、低介电常数的两种材料;  $p$  和  $q$  为两种 1D PC 的基本周期数. 物理厚度  $d_H = \lambda_0/4n_H$ ,  $d_L = \lambda_0/4n_L$ ,  $d_h = \lambda_0/4n_h$ ,  $d_l = \lambda_0/4n_l$  为超晶格的周期. 为简单起见, 设两个 1D PC 的两种介质材料具有相同的介电常数, 即相同的折射率  $n_H = n_h$ ,  $n_L = n_l$ , 但是不同的厚度比, 可以表示成  $(HL)^x(xHyL)^y$ , 然后以  $(HL)^x(xHyL)^y$  作为基本周期重复  $s$  次, 即

$$[(HL)^x(xHyL)^y]^s$$

图 1 表示对  $x = y = 0.3695$ ,  $p = q = 15$ , 且参考波长  $\lambda_R$  为 1960nm 和空气中的入射角  $\theta_0$  为  $45^\circ$  时的计算结果. 计算中, 取膜层材料为  $TiO_2$  和  $SiO_2$ , 在波长 1550nm 的折射率分别为  $n_H = 2.28$  和  $n_L = 1.425$ , 基板折射率为  $n_C = 1.5$ . 图 1(a)(b)(c) 分别表示  $s = 1, 2, 3$  时 p 和 s 偏振分量的分光透射曲线. 当  $s =$

1 时, 两个不同频率的 1D PC 构成两个光子禁带, 而 1550nm 是 1D PC  $(HL)^5$  的中心波长, 因而它是一个反射镜, 不产生偏振带通滤波器的透射带. 当  $s = 3$  时, 产生双透射带的偏振带通滤波器,  $s$  越大, 透射带越多, 其个数可简单地表示为  $s - 1$ <sup>[8]</sup>. 只有当  $s = 2$  时, 才出现我们所需要的单透射带的偏振滤波器, 如图 1(b) 所示. 该滤波器 p 偏振分量的透射峰中心波长为 1550nm, 半宽度为 1nm, 最大理论透射率为 100%, 截止宽度为 170nm, 截止深度约 -35dB; 而 s 偏振分量的截止宽度为 770nm, 截止深度大于 -180dB.

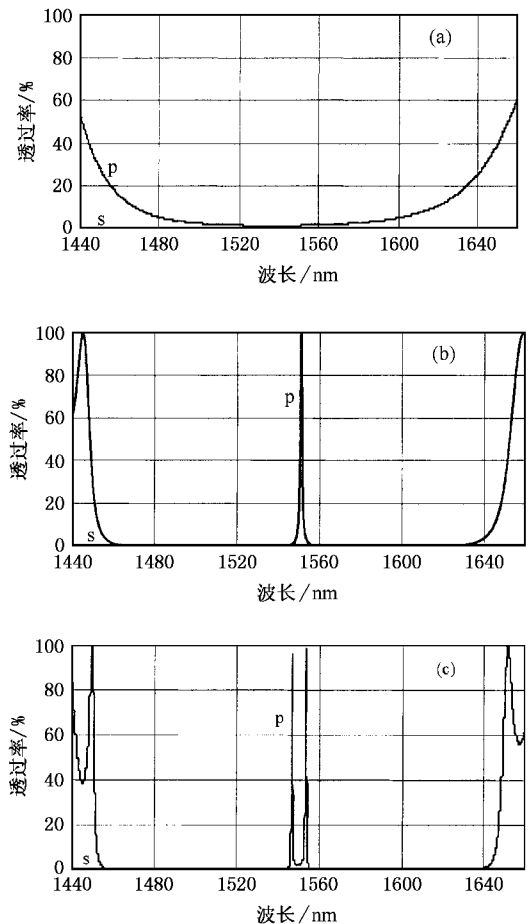


图 1 对  $G[(HL)^5(0.3695H0.3695L)^5]^s$  计算的 p 和 s 偏振分量的透射率曲线(—p 偏振; - -s 偏振) (a)  $s = 1$  (b)  $s = 2$  (c)  $s = 3$

同样, 用  $G[(HL)^5(0.5025H0.5025L)^5]^s$  或  $G[(HL)^5(0.7H0.7L)^5]^s$  也可得到类似的特性, 这说明有多个解可以满足设计要求. 一般地说, 选择  $x, y$  较小的“薄解”既有利于增加截止区宽度, 又有利于减小膜层总厚度.

这种偏振带通滤波器是由两个不同频率的

1D PC构成的.只要  $x, y < 1$ , 即存在两个 1D PC, 且  $s = 2$  时就出现一个 p 偏振分量的透射峰, 适当调节  $x, y, p, q$ , 就可满足偏振滤波器的各项技术指标. 周期  $p$  主要影响偏振滤波器的半宽度和截止深度. 随着  $p$  的增大, 半宽度减小, 截止度增加;  $q$  主要影响滤波器的中心波长, 随着  $q$  增大, 峰值波长会长移;  $s$  表征着透射带的数目, 对单透射带的偏振带通滤波器, 要求  $s = 2$ .

## 2.2. 用三个光子晶体构建偏振带通滤波器

三个 1D PC  $(HL)^p(hl)^q(HL)^p$  可视在  $(HL)^p$  中央插入一个  $(hl)^q$ . 为简单起见, 同样取两种 1D PC 的两种介质材料具有相同的折射率, 即  $n_H = n_h, n_L = n_l$ , 但是不同的厚度比, 所以类似地可表示成

$$[(HL)^x(HyL)^y(HL)^z].$$

图 2 表示对  $x = y = 0.354, p = 15, q = 10$ , 且  $\lambda_R = 1968\text{nm}$  和空气中的入射角  $\theta_0 = 45^\circ$  时的计算结果. 计算中, 仍取膜层材料在  $1550\text{nm}$  的折射率分别为  $n_H = 2.28$  和  $n_L = 1.425$ , 基板折射率为  $n_G = 1.5$ . 图 2(a)(b) 分别表示  $s = 1, 2$  时 p 和 s 偏振分量的分光透射曲线. 当  $s = 1$  时, 滤波器 p 偏振分量的透射峰中心波长为  $1550\text{nm}$ , 半宽度为  $1.3\text{nm}$ , 最大理论透射率为  $99.2\%$ , 截止宽度为  $160\text{nm}$ , 截止深度约  $-30\text{dB}$ , 而 s 偏振分量的截止宽度为  $750\text{nm}$ , 截止深度大于  $-180\text{dB}$ . 与两个 1D PC 的结构相比, 三个 1D PC 结构具有可以重复的优点, 而不像两个 1D PC 结构那样, 当  $s > 2$  时便产生多个透射带, 因而可得到陡度陡、峰顶平的优良偏振滤波特性. 图 2(b) 表示  $s = 2$  时偏振滤波器的特性, 在截止带宽不变的前提下, p 偏振分量和 s 偏振分量的截止度分别提高到  $-70\text{dB}$  和  $-400\text{dB}$ . 为了比较透射峰陡度和峰顶的特性, 图 3 表示出图 1(b) 和图 2(b) 即  $s = 2$  时主透射峰的情况, 可见, 后者的偏振通带特性得到了显著改善. 继续增加周期  $s$ , p 偏振通带会非常接近矩形, 截止度也非常高, 只是层数嫌太多了.

三个 1D PC 构成的偏振带通滤波器也存在多解, 仍选择  $x, y$  较小的“薄解”, 以增加截止区宽度和减少膜层总厚度. 适当选择  $x, y$  和周期  $p, q$ , 就可得到满意的偏振带通滤波器, 其中  $p$  主要影响滤波器的半宽度和截止深度,  $q$  是影响中心波长的敏感因子, 周期  $s$  是透射峰陡度、峰顶平度和截止深度非常灵敏的影响因子.

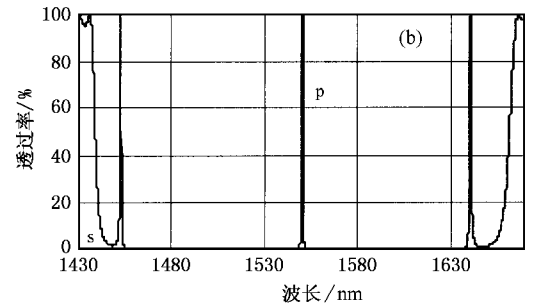
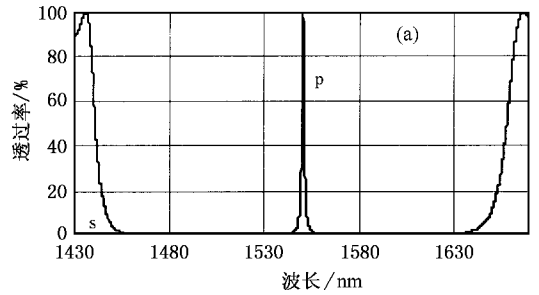


图 2 对  $G[(HL)^5(0.354H0.354L)^0(HL)^5]_1^s$  计算的 p 和 s 偏振分量的透射率曲线(—p 偏振; -s 偏振) (a)  $s = 1$  (b)  $s = 2$

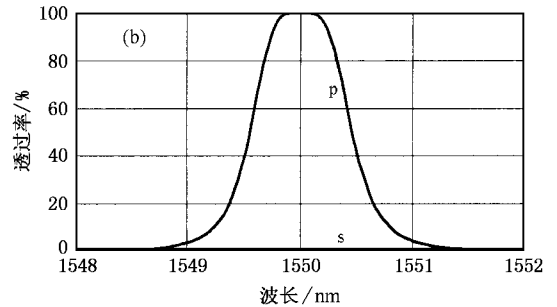
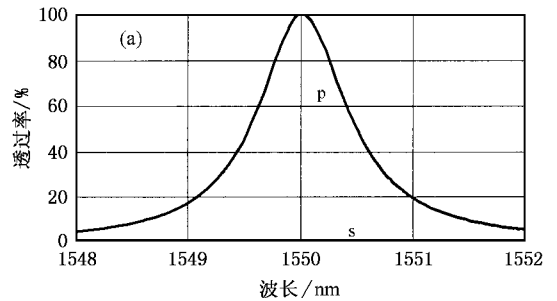


图 3 对 (a) 两个 1D PC  $G[(HL)^5(0.37H0.37L)^5]_1^s$  和 (b) 三个 1D PC  $G[(HL)^5(0.354H0.354L)^0(HL)^5]_1^s$  计算的 p 和 s 偏振分量的透射率曲线(—p 偏振; -s 偏振)

## 3. 结 论

利用薄膜一维光子晶体超晶格概念设计的偏振带通滤波器与典型的 F-P 型滤波器不同, 从而为设

计新型的偏振带通滤波器提供了一种新的方法. 借助于超晶格概念, 提出了两种新的设计方法, 设计了两种新的偏振带通滤波器. 第一种是基于两个 1D PC 叠加并重复两个周期的偏振带通滤波器; 第二种是在第一个 1D PC 的中间插进第二个 1D PC, 形成三个 1D PC 叠加的偏振带通滤波器. 这两种偏振带通滤波器, 特别是第二种滤波器由于可以重复叠加, 因而具有优良的性能, 不仅通带特性陡峭, 而且截止很

深. 对重复一次的三个 1D PC 的偏振带通滤波器,  $p$  和  $s$  偏振分量的截止度分别约为  $-70\text{dB}$  和  $-400\text{dB}$ .

这种偏振带通滤波器的设计简单, 制备可行, 膜厚监控容易. 由于中心波长定位精度主要取决于  $x = y < 1$  的 1D PC, 故膜厚控制时要适当修正  $x, y$  值. 倘若制备的中心波长有一定偏离, 可以通过入射角微调对准, 不致造成太大的困难.

- [ 1 ] Wang M G, Li T J and Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2818 (in Chinese) 【王目光、李唐军、简水生 2003 物理学报 **52** 2818】
- [ 2 ] Tang J F and Zheng J 1986 *Applied Thin-Film Optics* (Shanghai: Science and Technology Press) p244 (in Chinese) [唐晋发、郑权 1986 应用薄膜光学(上海:上海科学技术出版社)第 244 页]
- [ 3 ] Liu H W *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3082 (in Chinese) 【刘海文等 2003 物理学报 **52** 3082】
- [ 4 ] Mao H B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2205 (in Chinese) 【茅惠兵 2004 物理学报 **53** 2205】
- [ 5 ] Liang G Q, Han P and Wang H Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2200 (in Chinese) 【梁冠全、韩鹏、汪河洲 2004 物理学报 **53** 2200】
- [ 6 ] Esaki L and Tsu R 1969 IBM Research Note RC 2418
- [ 7 ] Lidorikis E *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1405
- [ 8 ] Gu P F *et al* 2004 *Optical Instruments* **26**(2) 58 (in Chinese) 【顾培夫等 2004 光学仪器 **26**(2) 58】
- [ 9 ] Song J F *et al* 2002 *Journal of Optoelectronics · Laser* **13** 703 (in Chinese) 【宋俊峰等 2002 光电子·激光 **13** 703】
- [ 10 ] Zi J, Wan J and Zhang C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2084
- [ 11 ] Zhang C, Qiao F, Wan J and Zi J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3174
- [ 12 ] Qiao F, Zhang C, Wan J and Zi J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3698
- [ 13 ] Qin Q *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4654
- [ 14 ] Wang H and Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) 【王辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172】

## Design of polarization band-pass filters based on the theory of thin-film photonic crystal superlattice\*

Gu Pei-Fu Chen Hai-Xing Qin Xiao-Yun Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 14 April 2004; revised manuscript received 15 May 2004)

### Abstract

The principle of design of polarization band-pass filters used for wavelength division multiplexing systems is presented. The design method is based on the concept of thin-film photonic crystal superlattice. Two kinds of design are put forward. One of them is to construct by superposition of two photonic crystals; and the other is to insert a new photonic crystal into the middle of a photonic crystal, so that there are in effect three photonic crystals. Such band-pass filters have excellent optical properties with  $p$ -polarization transmittance and  $s$ -polarization reflectance. The characteristics of the filters, including peak transmittance, half-band width and rejection are discussed.

**Keywords:** thin-film photonic crystal, super-lattice, polarization band-pass filter, wavelength division multiplexing system

**PACC:** 4270Q, 4280X, 4280S

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60078001, 60478038).