

基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计

贺芝宇^{1,2} 焦宏飞^{1,2*} 程鑫彬^{1,2} 张锦龙^{1,2} 王占山^{1,2}

(¹ 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)
(² 同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要 反射式多通道滤光片在光学通讯、光学成像、遥感高光谱等方面有着重要的应用。利用含缺陷一维光子晶体独特的带隙特性, 依据其相应的能带理论, 设计了一种由金属和介质组成的反射式多通道滤光片。这种滤光片通道的工作范围由光子带隙理论计算得到, 通道个数由“光子晶体”缺陷的周期数决定, 通道的位置利用等效相位厚度的方法确立。相对于传统的以经验为主的反射式多通道滤光片设计方法, 这种基于光子晶体的带隙理论的设计能够从“光子”的角度给出此类反射式滤光元件的设计思路和理论解释。

关键词 薄膜; 反射式滤光片; 光子带隙; 窄带多通道; 金属

中图分类号 O484.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0231002

Design of Reflective Multichannel Filter Based on Characteristics of Photonic Band Gap

He Zhiyu^{1,2} Jiao Hongfei^{1,2} Cheng Xinbin^{1,2} Zhang Jinlong^{1,2} Wang Zhanshan^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)
(² Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Reflection filters have important application in optical communication, optical imaging, and hyperspectral remote sensing. This paper intends to design a reflection multichannel filter consisting of metal and dielectric films on the basis of the unique characteristics of one-dimensional photonic crystals with defects and the corresponding band gap theory. The working frequency range of the multichannel filters can be calculated by photonic band gap theory. The number of channels is determined by the number of periods of the “photonic crystal” defects. The channel positions can be established through the equivalent phase thickness method. Compared with the conventional design method of reflection filters which is mainly based on experiences, this design method based on the photonic band gap theory can find the design idea and theoretical interpretation of the multichannel reflection filter from the point of “photon”.

Key words thin films; reflective filter; photonic band gap; narrowband multichannel; metal

OCIS codes 310.3915; 310.4165; 310.6860

1 引 言

近年来光学薄膜已成为现代光学中不可缺少的一个部分, 几乎涉及到现代光学系统的各个方面^[1]。而其中, 多通道滤光薄膜由于其体积小、集成度高、承载信息量大等优点, 在当今信息通讯、卫星成像、

遥感高光谱等方面拥有很大的应用价值。

常见的光学薄膜滤光片多数是透射型滤光片, 但随着仪器小型化、集成化的需要和技术的不断发展, 同时鉴于反射式滤光片设计形式灵活、结构紧凑等诸多优点, 众多学者对反射式滤光片进行了相关研

收稿日期: 2013-08-30; 收到修改稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61108036, 61235011)

作者简介: 贺芝宇(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事薄膜光学及光子晶体方面的研究。E-mail: 1132160@tongji.edu.cn

导师简介: 王占山(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事极紫外、软 X 射线和 X 射线光学与光学薄膜等方面的研究。

E-mail: wangzs@tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jiaohf@tongji.edu.cn

究^[2-3]。其中,有关单通道的反射滤光片很早就有学者研究, Thelen^[4]早在 1971 年就已利用全介质材料设计了负滤光片即单峰反射滤光片。但由于全介质滤光片自身的局限,金属与介质膜组合而成的高反射滤光片受到更广泛的研究,如 Tan 等^[5]提出的 Sub|Ag_zL(HL)ⁿ(LH)ⁿLCr_x|Air 结构, z 与 x 分别表示金属 Ag 和金属 Cr 的膜层厚度,该膜系会使中心波长处形成一个单通道的反射高峰,而其余波段截止性良好;Shen 等^[6]利用 Sub|H(LH)^{N1}2L(HL)^{N2}M|Air 结构,通过金属膜和介质膜组合设计了一种在某一个特定波长处既有反射高峰也有透射高峰的滤光片。然而随着人们对信息集成化程度需求的不断提高,多峰反射滤光片的研究就显得更加必要,如近期学者提出的 Sub|H(LH)¹⁵(2L2H)³2L(HL)²Cr_{3nm}|Air 结构^[7],反射峰型和截止特性良好,但是峰值的个数和位置无法在设计前就计算出来,而是通过实验规律总结得到,也不能从物理本质上给出合理解释;另外有学者利用两种金属设计的双峰反射滤光片,如 Sub|H(LH)⁴2L(HL)²FeH(LH)⁴2L(HL)²Cr|Air 结构^[8],该膜系形成了中心波长的高透射峰和靠近中心波长两边的反射双峰,但除中心波长处的透射峰可以确定位置外,两边的反射峰的位置同样不能预先确定。

目前,关于单通道和双通道全介质型的滤光片的个数和位置,利用史密斯方法和相位条件可以在任一波长得到高透射率^[9]。然而对于诸多结构构成的多通道的反射式滤光片的个数和位置,设计者通常依据实验所得的一定规律来确定,不能从物理本质上给出合理解释或计算。而“光子晶体”的特性为这种反射式多通道滤光片的物理解释提供了可能性^[10-11]。光子晶体凭借其对光子传播的调控,广泛地应用于光学传播与通信中^[12-15]。由于光子晶体的周期性结构,就会出现光子带隙,类似于固体物理中的电子带隙。频率处于电子带隙里的电磁波是不能通过的,同样,处于光子带隙内波长的光也是无法通过的。

本文基于光子晶体的这种带隙理论和相关特性,结合光学薄膜基本理论,尝试从物理本质上解释出现多个反射峰的机制,并设计出反射峰的位置和个数能够预先理论计算的反射式多通道滤光元件。

2 滤光片的设计

2.1 设计原理

所设计滤光片的基本膜系结构为 Sub|RSM|Air,其中 Sub 为基底,Air 为出射介质空气,它利用中间结构层 S 在所规定波长处获得最大透射率,再利用吸收率高的薄金属膜 M 和高反射层 R 实现所规定波长处的反射峰和除此之外的宽波段截止。自然光从空气侧入射,透过极薄的 M 层,中间结构层 S 后,在 R 层表面被反射,原路返回,最后从 M 层出射。金属 M 的厚度极薄,要获得很高的吸收率,需要其消光系数 k 与折射率 n 接近,使 n 与 k 的乘积较大,当满足 $n \approx k$ 时,可以实现窄带高反的目的^[5]。在所讨论的波长范围内选择金属 Cr,它的 n 与 k 的值在可见光波段范围内几乎相等,这样就能保证窄带高反射的实现。

为了探讨多通道滤光片的特性,用传输矩阵的方法来计算膜系的反射率与透射率。在膜系 Sub|RSM|Air 中,金属的相位厚度可表示为 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n - ik)d$,特征矩阵表示为

$$\mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / (n - ik) \\ i(n - ik) \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由于相对于中心波长 λ 来说, $d \rightarrow 0$,所以 $\delta \rightarrow 0$,对于矩阵 \mathbf{M} 中的 $\cos \delta$ 、 $\sin \delta$ 进行泰勒展开,只取第一项,忽略高次项,且考虑 $n \approx k$,则 \mathbf{M} 的特征矩阵可化为

$$\mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} 1 & i2\pi d / \lambda \\ 4\pi nkd / \lambda & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

整个膜系的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_m \times \mathbf{M}_s \times \mathbf{M}_R \times \mathbf{M}_{\text{sub}},$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & i2\pi d / \lambda \\ 4\pi nkd / \lambda & 1 \end{bmatrix} \times \mathbf{M}_s \times \mathbf{M}_R \times \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设 Sub|RS 的等效导纳为 $Z = X + iY$,则整个膜系 Sub|RSM 的组合导纳为

$$\eta = \frac{4\pi nkd / \lambda + X + iY}{1 - 2\pi dY / \lambda + i2\pi dX / \lambda}. \quad (4)$$

因此对于 Sub|RSM|Air 来说,它的反射率为

$$R = \left(\frac{n_0 - \eta}{n_0 + \eta} \right) \left(\frac{n_0 - \eta}{n_0 + \eta} \right)^* = \frac{\left(n_0 - X - \frac{2\pi}{\lambda} dY n_0 - \frac{4\pi}{\lambda} knd \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} dX n_0 - Y \right)^2}{\left(n_0 + X - \frac{2\pi}{\lambda} dY n_0 + \frac{4\pi}{\lambda} knd \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} dX n_0 + Y \right)^2}. \quad (5)$$

在中心波长处有 $d/\lambda \rightarrow 0$, 则 R 可以简化为

$$R = \frac{(n_0 - X)^2 + Y^2}{(n_0 + X)^2 + Y^2}. \quad (6)$$

由上式可以看出, 如果能够使 $X \rightarrow \infty$ 、 $Y \rightarrow \infty$, 即膜系 Sub|RS 的等效导纳的实部与虚部趋于无穷, 就可得到 $R \rightarrow 1$, 实现中心波长处的高反射, 而与金属的参数无关。此公式为窄带高峰的构建提供了理论依据, 同时解释了金属并不会影响中心波长的高反射率, 而只是抑制边带的反射, 此时的 Z 为最大反射匹配导纳。

2.2 设计思路

2.2.1 确立共振透射峰的个数和位置

给定一个初始膜系 Sub|(HL)ⁿH|Air, 通过加入缺陷的方法在此带宽基础上设计窄带透射峰^[16]。其中高折射率材料 H 选取 TiO₂, 折射率为 2.16, 低折射率材料 L 选取 SiO₂, 折射率为 1.46, H 与 L 是

$\lambda_0/4$ 膜厚, 中心波长取 650 nm。在膜系 Sub|(HL)ⁿH|Air 基础上加入缺陷层 A, 膜系变为 Sub|(HLHA)ⁿ|Air, 令 A 厚为 LH 之和, 膜系变为 Sub|(HLHLH)ⁿ|Air, 为一个中心对称膜系。当 n 取偶数时, 与周期结构之后的 H 连起来, HH 使整个膜系在中心波长处化为虚设层, 在中心波长处有透射峰存在(如后文图 3 的右半部分所示); 当 n 取奇数时, 膜系在中心波长处简化为 LHL, 无透射出现(如后文图 3 的左半部分所示)。

周期性对称膜系 Sub|(HLHLH)ⁿ|Air 的能带图可由图 1 表示, 由图可知其通带部分截止频率 $g = \omega/\omega_0$ 为 0.87 和 1.13。该膜系可看作是一个周期性的光子晶体, 从光子晶体能隙的角度来看, 这两个截止频率决定了该周期所能产生峰值的频率范围, 连续性的通带在 $0.87\lambda_0 \sim 1.13\lambda_0$ 之间。

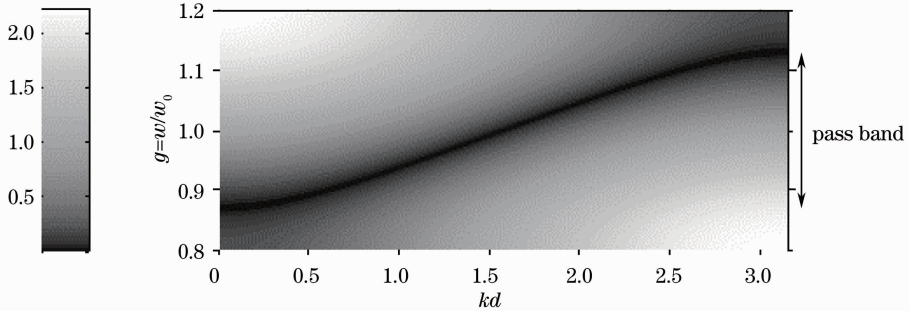


图 1 周期性对称膜系 Sub|(HLHLH)ⁿ|Air 的能带图

Fig. 1 Energy band diagram of periodic symmetric film structure Sub|(HLHLH)ⁿ|Air

基于该周期是对称膜系的情况下, HLHLH 单个基本周期可以用等效单层膜来描述, 而多个周期的情况类似于单个周期的情况^[9]。假定该周期的特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & \frac{i}{E} \sin \Gamma \\ iE \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}. \quad (7)$$

等效相位厚度 Γ 和等效导纳 E 分别为

$$\Gamma = \arccos M_{11}, \quad (8)$$

$$E = \sqrt{M_{21}/M_{12}}. \quad (9)$$

根据(8)式和(9)式可以得到此膜系的等效折射率与等效厚度, 如图 2(a) 所示, 此时截止带所对应的 g 值为 0.87 和 1.13, 等效相位厚度为 $2\pi \sim 3\pi$; HLHLH 膜系 2 个周期的等效导纳和等效相位厚度如图 2(b) 所示, 此时截止带所对应的 g 值为 0.87 和 1.13, 等效相位厚度为 $4\pi \sim 6\pi$, 3~6 个周期以此类推。可以看出, 导纳图中截止带所对应的频率与能带图 1 中的截止频率完全相符, 这说明周期性介

质的能带可以直接确定该周期性对称膜系的透射峰取值范围, 不会随周期的变化而变化; 另外, 等效相位厚度的范围会根据基本膜系的周期数而成倍数增大^[17], 具体的取值如表 1 所示。由图 2 可知, 不同周期情况下, 等效相位厚度与频率之间有一个确定的对应关系, 而且峰值的个数为周期数 $n-1$ 。因此可以通过确定透射峰的相位厚度来确定峰值所处的频率值。这样, 共振透射峰的个数及其位置都可以通过这种方法确定下来。

表 1 给出了不同周期数膜堆的相位厚度和峰值个数及位置的相互对应关系, 以及中心波长为 650 nm 时这些峰值所在的波长位置。不同周期的缺陷层相应的透射峰情况如图 3 所示, 可以看出, 透射峰的个数和位置与之前的理论解释完全相符。随着周期数的增加, 透射峰的个数始终是周期数 $n-1$, 而位置是表 1 中等效相位所对应的位置。然而这些峰都呈尖锥状, 峰形并不理想, 但可以通过加反射镜的方法减小半峰全宽, 以实现更好的滤光特性。

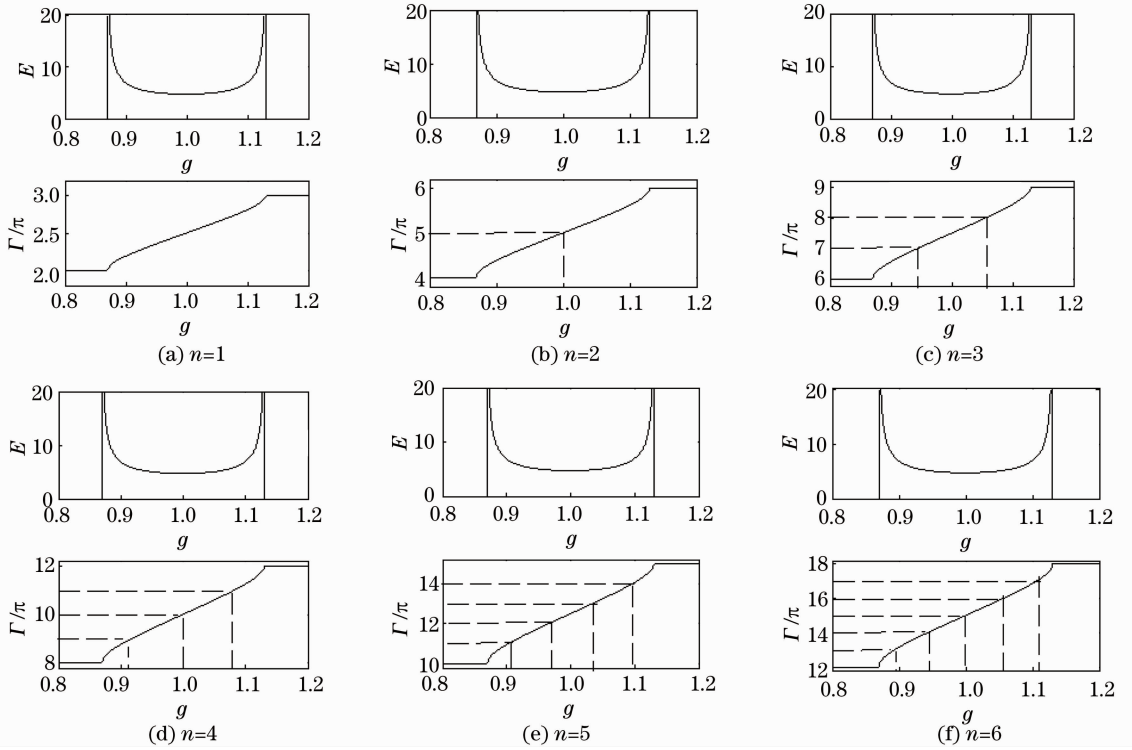


图 2 (a)~(f)分别为(HLHLH)ⁿ中n取1~6时的等效折射率E与等效相位厚度Γ
 Fig. 2 (a)~(f) are the equivalent refractivity E and phase thicknesses Γ of (HLHLH)ⁿ with n from 1 to 6

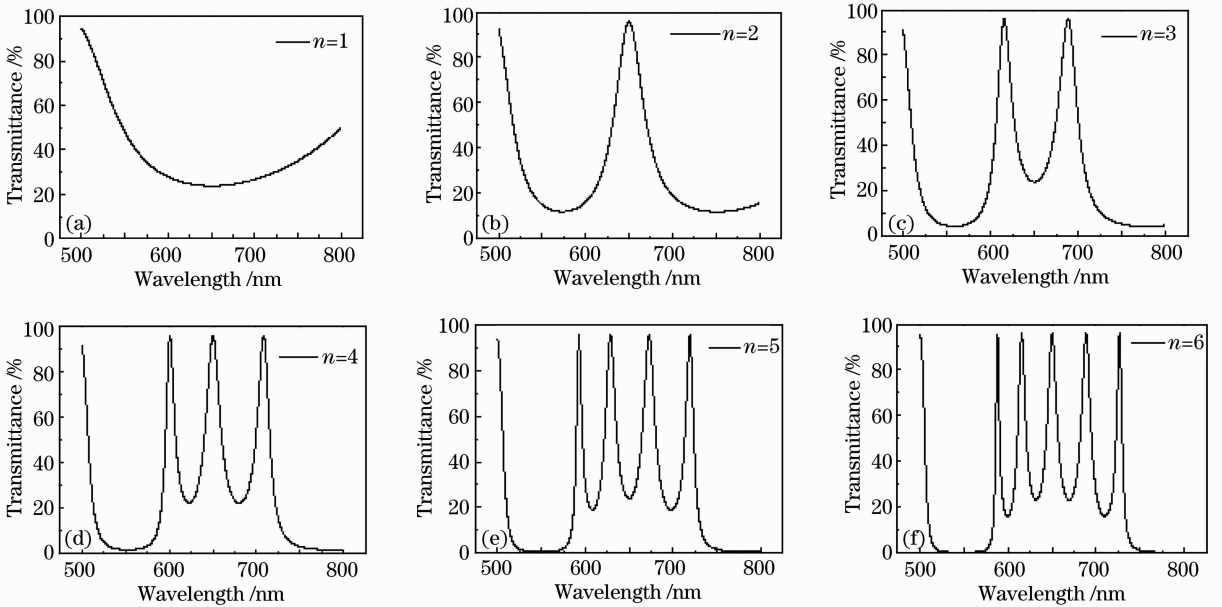


图 3 (HLHLH)ⁿ不同周期的缺陷层的透射峰情况(n取1~6)
 Fig. 3 Transmission peak for different periods of defect layer of (HLHLH)ⁿ (n from 1 to 6)

2.2.2 布拉格反射镜实现窄带透射

在膜系 Sub|(HLHLH)ⁿ|Air 的两侧分别放上两个布拉格反射镜,反射镜能够起到降低透射峰半峰全宽的作用。令所加布拉格反射镜为(HL)ⁿ,即原来膜系中就有的H与L材料,但是首先需要确定

这个布拉格反射镜的波长工作范围。

初始膜系 Sub|(HL)ⁿH|Air 可以给出一个宽反射带,在所得的这个反射带中可以实现所要设计的窄带反射峰。其中高折射率材料H选取TiO₂,折射率为2.16,低折射率材料L选取SiO₂,折射率

表 1 基本膜系(HLHLH)ⁿ 的周期数与对应的峰值位置的关系,及中心波长 650 nm 情况下的峰值位置
 Table 1 Relationship between the number of periods and peak position and at the center wavelength of 650 nm of the basic film structure (HLHLH)ⁿ

Periods	Phase thickness / π	Peak feature		
		Phase / π	g	Peak position at $\lambda_0 = 650$ nm / nm
1	2~3	No peak		
2	4~6	5	1	650
3	6~9	7,8	0.943,1.056	613,686
4	8~12	9,10,11	0.917,1,1.083	596,650,704
5	10~15	11,12,13,14	0.903,0.966,1.034,1.097	587,628,672,713
6	12~18	13,14,15,16,17	0.894,0.943,1,1.057,1.106	581,613,650,687,719

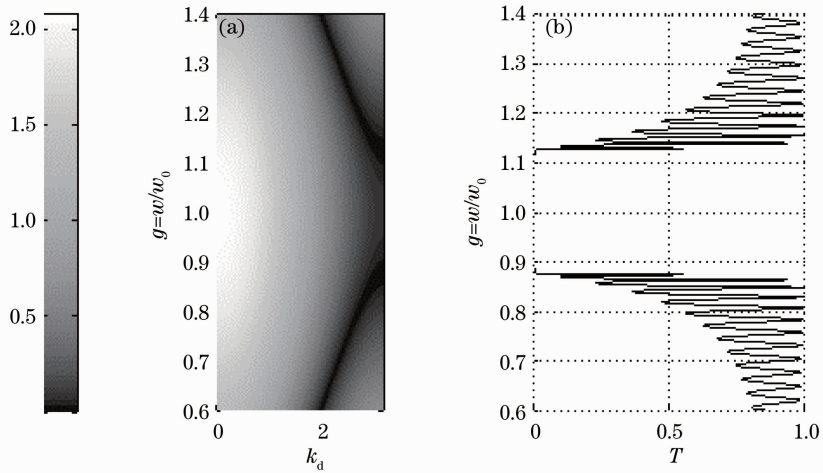


图 4 (a)膜系为 Sub|(HL)³²H|Air 时的能带图及(b)对应的透射曲线

Fig. 4 (a) Energy band diagram for Sub|(HL)³²H|Air and (b) corresponding transmittance curve

为 1.46,观察中心波长 650 nm 时的反射带如图 4(b) 所示。

可以看出, n 取值很大时,截止带的截止深度很大。 n 取 32 时,整个截止带的透射率几乎为 0,且截止带的截止边缘几乎与横坐标轴垂直。用光子晶体带隙的理论来解释,基于布拉格反射腔的原理,当周期性光子晶体(HL)ⁿH 中周期数 n 取无穷大时,左右两边截止带边缘所对应的频率可以用如下方程表示^[18]:

$$\omega_L = 2c \frac{\arccos \rho}{n_H d_H + n_L d_L}, \quad \omega_R = 2c \frac{\arccos(-\rho)}{n_H d_H + n_L d_L}, \quad (10)$$

式中 $\rho = \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}$ 是非涅耳反射系数。对应计算得出的左右带边的波长值分别是 $\lambda_L = 578$ nm, $\lambda_H = 742$ nm,如图 4(b)所示的截止带两边的波长,而对应的 ω/ω_0 关系如图 4(a)所示,禁带处对应该膜系透射率为 0、反射率为 1 的情况,并且边带的值与 ω_H/ω_0 和 ω_L/ω_0 的计算值相符。可以得出,该光子晶体带隙的禁带处的频率可以直接确定膜系反射带宽

的截止频率。

两边的截止频率确立后,可以看出这个频率范围包括了前面所研究窄带透射峰的范围,因此可以用(HL)ⁿ 作为布拉格反射镜放在中间结构层的两侧来实现峰形的优化。则膜系 Sub|(HLHLH)ⁿH|Air 变为 Sub|(HL)^m(HLHLH)ⁿ(LH)^m|Air,取 $m=2, n=5$,窄带透射情况如图 5 可见,在给定高低折射率材料的反射带宽里,透射峰由于两侧添加反射镜的关系,峰值的位置特性被加强了,带边外部的截止特性也被加强了。确定了峰的位置和形状后,可以通过加入特定的金属层,达到窄带反射峰的效果。

2.2.3 金属 Cr 实现窄带反射

在窄带透射峰的基础上再添加一层金属 Cr 层在最外侧,可以得到给定反射带宽度上的窄带多通道反射高峰,此时膜系为 Sub|(HL)¹⁶(HLHLH)⁵(LH)²LCr|Air,Cr 的厚度为 3 nm 时,该膜系的透射光谱和反射光谱如图 6 所示。从图 6 中可以看出,所设计的这种反射性多通道滤光片在所关注的整个光谱范围内,膜系整体的透射率都为零,而在所

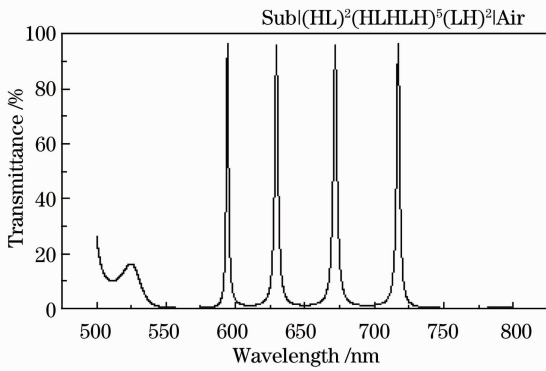


图 5 Sub|(HL)²(HLHLH)⁵(LH)²|Air 的透射曲线
Fig. 5 Transmittance curve for Sub|(HL)²(HLHLH)⁵(LH)²|Air

关注的波长处都存在窄带反射峰,与之前理论计算的峰值位置相符。需要注意的是,Cr 层的左边一定要放 L 层,而不是 H 层,如若放的是 H 层,膜系中间会简化为 Sub|(HL)¹⁴,如果 H 与 L 相差很大,中心波长处导纳会趋向于无穷,因此反射率会降为 0。

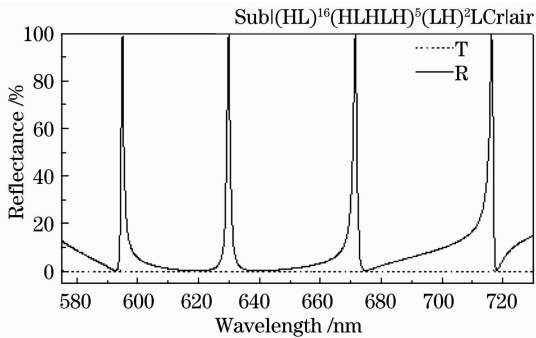


图 6 Sub|(HL)¹⁶(HLHLH)⁵(LH)²LCr|Air 的
反射和透射曲线
Fig. 6 Reflectance and transmittance curve for
Sub|(HL)¹⁶(HLHLH)⁵(LH)²LCr|Air

实际上,所设计的这种简单膜系结构的滤光片,通道位置可以通过调节设计波长和中间层膜系结构做统一的调整,但是多个通道间相对位置还不能完全任意给定。若要设计任意通道位置的多通道滤光元件目前主要是通过间隔层刻蚀或设计阶梯型滤光片来实现^[19-21],但制备过程较为复杂。因此,希望在将来的研究中能够通过膜系设计来实现通道位置的任意获取。

3 结 论

设计了一种反射型多通道滤光片,在光子晶体中加入缺陷层得到多通道的共振透射峰,再通过添加反射层与金属层得到多通道反射滤光片,如图 6

所示,所设计的多通道反射滤光片在特定的位置产生极窄的反射高峰,其余位置有较低的反射率。同时,从理论上计算得到了所设计的滤光片中间层中缺陷层个数与反射峰个数的对应关系,峰值的位置也与等效相位厚度建立了明确的对应关系,并从能带理论给出了相应的解释,为有针对性地设计反射式多通道滤光片提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Fan Zhengxiu. Evloperment and recent progress of optical thin films [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900131. 范正修. 光学薄膜及其进展 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900131.
- 2 Z Knittl. Optics of Thin Films [M]. London: Wiley-Interscience Publication, 1976. 300-320.
- 3 C H Wu, Y S Lin, C H Wang, *et al.*. Novel microstrip coupled-line bandpass filters with shortened coupled sections for stopband extension [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 540-546.
- 4 A Thelen. Design of optical minus filters [J]. JOSA, 1971, 61(3): 365-369.
- 5 M Q Tan, Y C Lin, D Z Zhao. Reflection filter with high reflectivity and narrow bandwidth [J]. Appl Opt, 1997, 36(4): 827-830.
- 6 Shen Weidong, Sun Xuezheng, Zhang Yueguang, *et al.*. Narrow band filters in both transmission and reflection with metal/dielectric thin films [J]. Opt Commun, 2009, 282(2): 242-246.
- 7 Y G Wu, L X Fu, D G Peng, *et al.*. Multiwavelength narrowband high-reflection filters with low-reflection sidebands [J]. JOSA A, 2009, 26(3): 650-657.
- 8 C C Liu, Y H Chang, T J Yang, *et al.*. Narrowband filter in a heterostructured multilayer containing ultrathin metallic films [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, 96: 329-346.
- 9 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006, 43-48, 140-161. 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006, 43-48, 140-161.
- 10 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu, *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2914-2919. 王济洲, 熊玉卿, 王多书, 等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2914-2919.
- 11 Yu Jianli, Shen Hongjun, Ye Song, *et al.*. Design of novel highly efficient photonic crystal multi-channel drop filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106003. 余建立, 沈宏君, 叶松, 等. 一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器的设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106003.
- 12 E Yablonoivitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 13 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 14 J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, *et al.*. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light [M]. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- 15 G Guida, A De Lustrac, A C Priou. An introduction to photonic

- band gap (PBG) materials [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2003, 41: 1–20.
- 16 H T Hsu, M-H Lee, T J Yang, *et al.*. A multichanneled filter in a photonic crystal containing coupled defects [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 117: 379–392.
- 17 E Pelletier, H Macleod. Interference filters with multiple peaks [J]. *JOSA*, 1982, 72(6): 683–687.
- 18 S J Orfanidis. *Electromagnetic Waves and Antennas* [M]. New Jersey: Rutgers University, 2002.
- 19 H F Jiao, Y G Wu, G X Tian, *et al.*. Two-chamber integrated multichannel narrowband filter prepared by a multistep etching method [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(6): 867–871.
- 20 A Piegari, J Bulir. Variable narrowband transmission filters with a wide rejection band for spectrometry [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(16): 3768–3773.
- 21 A Piegari, J Bulir, A K Sytchkova. Variable narrow — band transmission filters for spectrometry from space. 2. Fabrication process [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(13): C151–C156.

栏目编辑：韩 峰