

〈材料与器件〉

## 宽截止窄带滤光片设计

朱华新<sup>1,2</sup>, 高劲松<sup>1</sup>, 王彤彤<sup>1</sup>, 王笑夷<sup>1</sup>, 陈红<sup>1</sup>, 郑宣鸣<sup>1</sup>, 申振锋<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 介绍了一种获得窄带宽截止滤光片的方法, 即具有缺陷的多异质结结构, 这种结构能够展宽光子晶体的禁带同时实现窄通带效应。通带的位置与缺陷的厚度及缺陷的位置有关, 设计的窄带宽截止滤光片在光学领域中具有一定的应用前景。

**关键词:** 光学薄膜; 滤光片; 通带; 禁带

中国分类号: O484

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2010)09-0532-03

## Design of Wide Stop-band and Narrow Pass-band Filters

ZHU Hua-xin<sup>1,2</sup>, GAO Jin-song<sup>1</sup>, WANG Tong-tong<sup>1</sup>, WANG Xiao-yi<sup>1</sup>,

CHEN Hong<sup>1</sup>, ZHEN Xuan-ming<sup>1</sup>, SHEN Zhen-feng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** One proposed approach using multiple heterostructures inserted with defects mode is used to obtain narrow pass-band and wide stop-band filters in this paper. The enlargement of the forbidden band and the realization of narrow pass-band filtering can be reached simultaneously by using this method. The pass-band is related to the thickness and the position of defects. Wide stop-band and narrow pass-band filters obtained by using this method are potential useful in many optical applications.

**Key words:** thin film, filters, pass-band, stop-band

### 引言

窄带滤光片是一种在光学领域中应用较广的光学元件, 比如: 激光反射镜<sup>[1]</sup>, 波分解复用器<sup>[2,3]</sup>, 多谱线装置<sup>[4]</sup>等。常用的窄带滤光片为法布里-珀罗滤光片<sup>[5]</sup>, 是将中间耦合层作为一个 F-P 腔, 实现多光束干涉, 但其截止带宽一般较小, 通常的做法是在短波处用颜色玻璃来实现宽截止的要求<sup>[6]</sup>, 但这样的做法有两个缺陷, 首先是短波处的光是被颜色玻璃所吸收, 而对于需要对短波复用的系统显然不适合, 其次为颜色玻璃一般是掺杂了金属, 在空间光学中, 高能射线的作用会使得颜色玻璃的性能变化, 因此随着近年来光学技术的不断发展, 迫切需要研制具有在所需波长点有高的透过率, 而在其他波长处有宽截止带的

滤光片, 即宽截止窄带滤光片。本文提出了具有缺陷的多异质结的一维光子晶体结构<sup>[7,8]</sup>, 来实现宽截止窄通带的特性。

### 1 基本理论

传输矩阵法适用于一维光子晶体的光学传输特性研究, 介质层与光波的相互作用完全可有其传输特征矩阵<sup>[9]</sup>决定, 单层介质的特征矩阵为:

$$M(z) = \begin{bmatrix} \cos \sigma & -\frac{i \sin \sigma}{\eta} \\ -i \eta \sin \sigma & \cos \sigma \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于 TM 模:

收稿日期: 2010-06-01.

作者简介: 朱华新 (1983), 男, 博士研究生, 主要从事光学薄膜设计、制备及检测方面的研究; E-mail: [zhuhuaxing1312@163.com](mailto:zhuhuaxing1312@163.com).

基金项目: 国家自然科学基金资助, 编号: 60478035.

$$\begin{cases} \sigma = k_0 z \sqrt{\varepsilon} \cos \theta \\ \eta = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

对于 TE 模:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{k_0 z \sqrt{\varepsilon}}{\cos \theta} \\ \eta = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} / \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为光线的入射角;  $\varepsilon$ 、 $\mu$  分别为介质的介电常数和磁导率。对于一维结构, 可以逐层应用特征矩阵(1), 进而得出整个结构的传输矩阵为:

$$M(z) = M_1(z_1) M_2(z_2 - z_1) \cdots M_N(z_N - z_{N-1}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

如以  $HL$  两种材料为周期的二元一维光子晶体, 物理厚度分别为  $a$ 、 $b$ , 总厚度  $d = a + b$ , 在光线正入射情况下 ( $\theta = 0^\circ$ ), 其光子能带模型的色散关系为:

$$\cos(kd) = \cos \sigma_a \cos \sigma_b - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_a}{\eta_b} + \frac{\eta_b}{\eta_a} \right) \sin \sigma_a \sin \sigma_b \quad (5)$$

在光线倾斜入射的情况下, 两种材料的有效厚度分别变为  $a \cos \theta_a$ 、 $b \cos \theta_b$ , 总厚度  $d_{\text{eff}} = a \cos \theta_a + b \cos \theta_b$ ,  $\theta_a$ 、 $\theta_b$  分别为光线在两种材料中的折射角, 对于 TE 和 TM 波的  $\sigma$  分别由式(2)(3)得到。

式(5)中  $k$  是布洛赫矢量,  $k$  为实数时, 则表示该波长的光能在晶体中传播, 也就是经常说的通带, 体现为高透的特征;  $k$  为复数时, 则该波长的光不能在晶体中传播, 也就是经常说的禁带, 体现为高反的特征。

当光子晶体中存在缺陷时, 就构成了光子晶体的缺陷模, 则在禁带中出现缺陷态, 使得禁带中某些波长的光能够顺利通过晶体。

## 2 理论设计

对于具有不同厚度的一维光子晶体, 如果将它们连接起来, 多异质结结构就形成了。假如缺陷被引入到这种多异质结结构中, 那么在光子带隙中将形成相应的缺陷能级, 某些特定频率的光可以在这些缺陷能级中出现, 从而导致通带的产生。光谱特性采用上述的薄膜传输矩阵法计算得到。

图1为多异质结结构透射光谱。这里,  $ABC$  为给定的多异质结结构, 其中,  $A = (HL)_8$ ,  $B = (1.38H1.438)_8$ ,  $C = (1.9H1.9L)_8$ 。这里,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  为膜堆中高低折射率膜层, 折射率分别为  $n_H = 2.3$ ,  $n_L = 1.46$ 。  $1H = 1L = n_H d_H = n_L d_L = \lambda_0/4$ , 它代表  $1/4$  光学厚度。  $d_H$  和  $d_L$  分别为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的物理厚度, 设

计波长  $\lambda_0 = 450 \text{ nm}$ 。入射媒质和基片分别为空气和玻璃 ( $n = 1.52$ ), 入射角为  $0^\circ$ 。从图1中可以看到, 由于光子晶体的禁带交迭效应, 多异质结结构  $ABC$  可以展宽光子禁带。

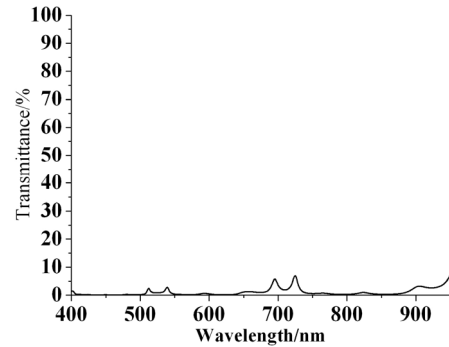


图1 结构  $ABC$  的透过率曲线

Fig.1 The calculated transmission spectra for  $ABC$

从图1中可以看出, 多异质结结构的禁带宽度为  $400 \sim 950 \text{ nm}$ , 平均透过率仅为  $4.42\%$ , 覆盖了整个可见光区和部分近红外的部分, 要想使禁带宽度进一步向长波方向展宽, 只需再连接厚度更厚的异质结结构即可。

$D_1$ 、 $D_2$  为缺陷, 其中,  $D_1 = (2.4H1.6L)$ ,  $D_2 = (2.7H4.2L)$ 。  $AD_1BC$ 、 $ABD_2C$  为引入缺陷后的多异质结结构。引入缺陷后, 多异质结结构不仅不会影响光子禁带宽度, 还能够实现较窄通带的效应。

图2、图3分别为含有  $D_1$ 、 $D_2$  缺陷的透过率曲线, 从图中看出, 掺杂的缺陷层的厚度与位置不一样, 出现的通带位置也不一样。

从图2中看出, 通带中心波长为  $529 \text{ nm}$ , 但透过率稍低一些, 为  $60.13\%$ , 通带相对半宽度为  $2 \text{ nm}$ , 已经很窄, 而图3中的通带中心波长为  $709.8 \text{ nm}$ , 透过率为  $94.83\%$ , 通带相对半宽度仅约为  $4 \text{ nm}$ , 而且两者的截止带宽都很宽, 尤其是图3中, 短波的截止带从  $400 \text{ nm}$  一直延伸到约  $700 \text{ nm}$ , 从而避免了常规的 F-P 型窄带滤光片截止带宽窄的缺点。

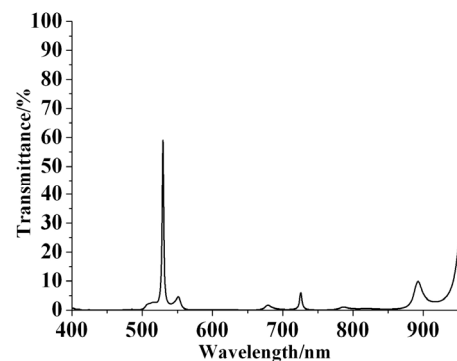


图2 结构  $AD_1BC$  的计算透过率曲线

Fig.2 The calculated transmission spectra for  $AD_1BC$

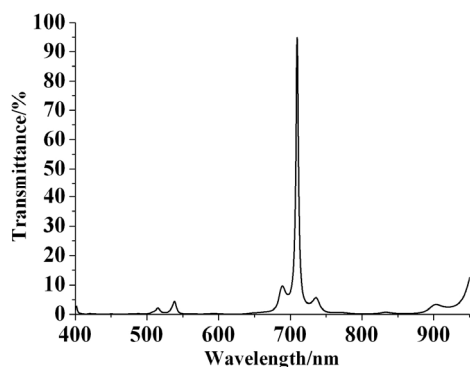


图3 结构  $ABD_2C$  的透过率曲线

Fig.3 The calculated transmission spectra for  $ABD_2C$

上述两种缺陷都实现了窄通带的特性,若以此为初始结构再进行优化,则光谱特性可能会更理想,类似于固体物理中的晶体,不是随意的插入缺陷就能出现缺陷态得到通带,需要通过计算比较才能得到比较理想的通带,缺陷也同样可以出现在各异质结的内部,实现缺陷态高透过。

### 3 结论

以多异质结结构为基础,通过设置缺陷,使得该结构实现缺陷通带,实现窄通带宽截止的特性,理论计算证明缺陷的位置和厚度都对通带的位置有影响。最终结果表明这种方法获得的窄带宽截止滤光片都具有较好的滤光性能,因此,它们在光学领域中具有一定的应用前景。

### 参考文献:

- [1] SANG Tian, WANG Zhan-shan, WANG Li, et al. Resonant excitation analysis of sub-wavelength dielectric grating [J]. *J Opt A-Pure Appl Opt*, 2006, **8**(1): 62-66.
- [2] 鲁法珂, 顾培夫, 张德景. 离子辅助沉积对  $ZnS/MgF_2$  滤光片光谱漂移的影响[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2004, **38**(11): 1511-1514.
- [3] Aziz M, Meissner P, Hermes Th. WDM system integration of micromachined tunable two-chip Fabry-Perot filters [J]. *Opt Commun*, 2002, **208**(1): 61-68.
- [4] Hunkel D, Marso M, Butz R, et al. Integrated photometer with porous silicon interference filters[J]. *Mater Sci Eng*, 2000, **B69-70**: 100-103.
- [5] Sadot D, Boimovich E. Tunable optical filters for dense WDM networks[J]. *IEEE Commun Mag*, 1998, **36**(12): 50-55.
- [6] 程海峰, 门金凤, 刘世利, 陈朝辉. 吸收型近红外滤光片的制备[J]. *红外技术*, 2006, **28**(10): 591~594
- [7] WANG Li, WANG Zhan-shan, WU Yong-gang, et al. Enlargement of the nontransmission frequency range of multiple-channeled filters by the use of heterostructures[J]. *J Appl Phy*, 2004, **95**(2): 424-426.
- [8] 王济州, 熊玉卿, 刘宏开, 等. 一种双通道窄带滤光片的设计与制备[J]. *真空与低温*, 2008, **14**(1): 37-40.
- [9] Macleod H A. *Thin-film optical filters*[M]. Bristol: Institute of Physics, 1989.