

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0158-05

# 一维光子晶体偏振滤波器通道数的影响因素研究

石建平 黄 圆 董可秀 屈 军

(安徽师范大学物理与电子信息学院,安徽 芜湖 241000)

**摘要** 光子晶体偏振滤波器是利用光子晶体带隙特性来控制信号光偏振状态的一种新型滤波器,在光纤通信、光学传感测量、光学信息处理等领域均有重要应用。通道数多少是偏振滤波器设计的重要指标,通道越多则信息容量越大,越有利于系统的小型化微型化。利用光学传输矩阵法研究了影响一维光子晶体偏振滤波器通道数目的因素,研究表明:(1)光子晶体缺陷层厚度是影响滤波器通道数目的关键因素,通道数  $N$  与厚度  $D$  近似满足线性关系,在  $500 \sim 650 \text{ nm}$  波段函数关系为  $N = 0.0035D + 0.159$ ;(2)缺陷层折射率  $n_c$  的变化也会导致通道数改变,折射率越大通道数越多;(3)光子晶体单元层数和单元厚度改变不会影响滤波通道数,但可以调节通道中心波长位置,同时对偏振度和分离度也有影响。

**关键词** 多通道偏振滤波器;光子晶体滤波器;光学传输矩阵法;一维光子晶体

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0158

## Influence Factors on Channel Number of 1D PC Polarization Filter

Shi Jianping Huang Yuan Dong Kexiu Qu Jun

(College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

**Abstract** Photonic crystal (PC) polarization filter is a new kind of filter that can control the polarization state of the signal light by using the photonic band gap. It has important applications in optical fiber communication, optical sensing measurements, optical information processing and other fields. The channel number is an important parameter for polarization filter design. The more the channel number is, the greater the information capacity is. So it is conducive to system miniaturization. The influenced factors on channel number of 1D PC polarization filter are studied by using the optical transmission matrix method, the results show that: (1) The defect layer thickness is the key factor in affecting the channel number, and channel number  $N$  is a approximate linear function of the thickness  $D$ . In the wavelength band from  $500 \text{ nm}$  to  $650 \text{ nm}$  the function is  $N = 0.0035 D + 0.159$ ; (2) The change of refractive index in defect layer also leads to the change of channel number, and the greater the refractive index is, the more the channel number is. (3) The changes of the numbers and the thickness of photonic crystal periodic layer cannot affect the channel number, however it can regulate the central wavelength of filter channels and influence the polarization degree and separation degree of polarization.

**Key words** multi-channel polarization filter; photonic crystal filter; transmission matrix method; 1D photonic crystals

## 1 引 言

光子晶体偏振滤波器是利用光子晶体带隙特性来控制信号光偏振状态的一种新型滤波器,具有设计灵活、性能优良、利于集成等诸多优点,在长距离

光纤通信、相干传感与测量、光学信息

存储与显示等领域均有重要应用<sup>[1~3]</sup>。光子晶体可以分为三大类:一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体。一维光子晶体是由介电常数不同的

**基金项目:** 国家自然科学基金(10805001)、安徽省教育厅自然科学研究项目(2006kj262B)和安徽师范大学博士科研启动项目资助课题。

**作者简介:** 石建平(1976—),男,教授,硕士生导师,主要从事光子晶体、亚波长光学方面的研究。

E-mail: shi\_jian\_ping@hotmail.com.

两种介质交互重叠而成,二维光子晶体是由介质柱周期排列而成,三维光子晶体由球形或六面体形晶胞按面心立方、体心立方或其他方式排列而成。其中一维光子晶体结构简单、制作方便、禁带计算较之二维、三维光子晶体容易很多,目前光子晶体滤波器设计和应用多采用一维结构<sup>[4]</sup>。

近年来,已有较多文献对一维光子晶体偏振滤波器进行了研究,设计出了针对不同波段的偏振滤波器,讨论了全角度偏振滤波器的设计,也分析了光子晶体带隙结构对偏振态的角度和波长响应等等<sup>[5~7]</sup>,不过研究的偏振滤波器以单通道和两通道为主,通道数目偏少。滤波器通道数的多少决定其所能携带的信息量,在日益追求系统小型化、微型化的今天,对单元系统承载的信息容量要求越来越高,在满足偏振度和分离度指标的前提下偏振滤波器的通道数应尽量增多。本文将首先给出滤波器的基本模型和理论公式,然后讨论影响通道数目的因素。

## 2 多通道偏振滤波器的基本模型和理论分析方法

本文所采用一维光子晶体偏振滤波器的基本模型如图 1 所示,由两块光子晶体和中间的缺陷层构成,型如  $(AB)_mC(BA)_m$ ,其基本原理是通过在光子晶体中引入缺陷,使原有的周期性受到破坏,就会在光子禁带中引入新的电磁波局域化模式,通过改变光子晶体结构参数来控制禁带的位置、宽度和禁带中缺陷模的形式而实现滤波<sup>[8~10]</sup>;同时由薄膜光学理论可知,当光波入射到两种介质分界面时,p 偏振波( $E$  平行于入射面)和 s 偏振波( $E$  垂直于入射面)对入射角的响应并不相同,因此可以调节入射波和光子晶体的相对角度实现偏振。已有研究表明当入射角度大于 0.75 时,能够实现在透射波中只有 p 偏振波,s 偏振波被滤<sup>[7,11]</sup>。

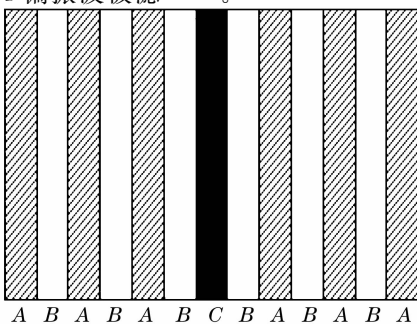


图 1 一维光子晶体偏振滤波器模型

Fig. 1 Model of 1D PC polarization Filter

该结构中的电磁波传播特性计算可以采用传输矩阵方法(TMM)<sup>[12]</sup>,总的传输矩阵为

$$M(z_N) = M_1(z_1)M_2(z_2 - z_1) \cdots M_N(z_N - z_{N-1}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $M(z) = \begin{pmatrix} \cos \beta & - (i/p) \sin \beta \\ - i p \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$ ,  $\beta = 2\pi n d \cos \theta / \lambda$ ,  $\lambda$  为入射波的波长,  $\theta$  为每层介质的相对入射角,  $n$  是介质折射率,  $d$  是介质厚度。

反射系数和透射系数分别为

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_l) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_l)}{(m_{11} + m_{12} p_l) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_l)}, \quad (2)$$

$$t = \frac{2 p_1}{(m_{11} + m_{12} p_l) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_l)}, \quad (3)$$

进而可得反射率和透射比为

$$R = |r|^2, T = (p_l/p_1) |t|^2. \quad (4)$$

通过对连续波段电磁波进行采样后,利用(4)式逐点计算出对应波长的透射比或者反射率,就可以得到一维光子晶体偏振滤波器的滤波特性曲线。

## 3 通道数的影响因素分析

### 3.1 缺陷层厚度对通道数的影响

在研究缺陷层厚度对通道数的影响时,滤波器中心波长取  $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ ,入射波变化范围从 500 ~ 650 nm,入射角度取布鲁斯特角以保证偏振分离度<sup>[12]</sup>。光子晶体的单元周期重复数  $m = 7$ ,介质 A 为 ZnS(折射率为  $n_A = 2.35$ ), B 为  $\text{MgF}_2$ (折射率为  $n_B = 1.38$ ), A、B 层厚度取  $\lambda_0/4n_A, \lambda_0/4n_B$ 。缺陷层 C 取 Si(折射率为  $n_C = 3.78$ ),厚度从 500 nm 开始以 0.625 nm 为步长逐步增加到 3000 nm,利用(4)式计算出对应的透射比灰度图,如图 2 所示,图

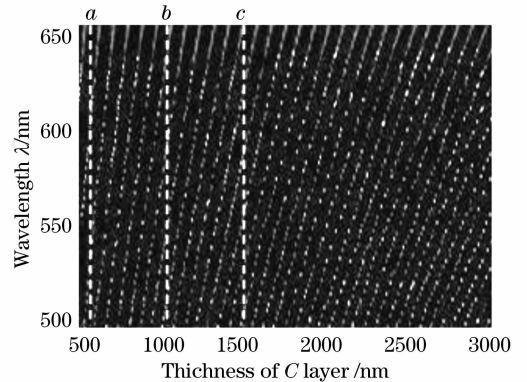


图 2 缺陷层厚度对通道数的影响

Fig. 2 The influence of defect layer thickness on channel number

中灰度等级越高,即亮度越大,表示透射比越高。可见随  $C$  层厚度变化,形成了一系列的透射峰带,每一个透射峰即对应一个偏振滤波通道,不同的缺陷层厚度所获得的滤波通道数目并不相同。为更加清晰地看到这种变化,把图 2 的  $a, b, c$  三个缺陷层厚度 500 nm、1000 nm 以及 1500 nm 对应的透射比截面绘于图 3 中。

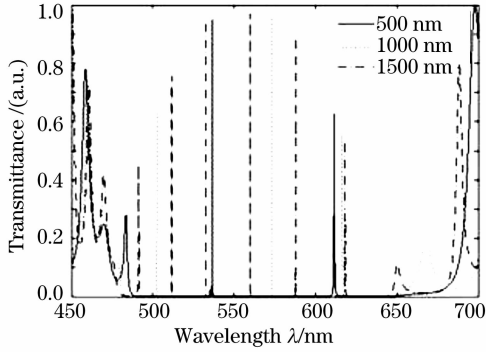


图 3 不同缺陷层厚度对应的滤波通道  
Fig. 3 Filtering channel of the different defect layer thickness

从图 3 可以看出,在  $a$  处即缺陷层厚度为 500 nm 时,存在两个滤波通道,中心波长分别位于 537 nm 和 610 nm 处;在  $b$  处有四个滤波通道,即 505 nm、535 nm、575 nm、615 nm 处;在  $c$  处有五个滤波通道,即 510 nm、534 nm、560 nm、585 nm、620 nm 处。需要说明的是图 2 中得到均是  $p$  波通道数, $s$  波由于入射角度较大已经全部滤掉。

由此可见随缺陷层厚度增加, $p$  波缺陷模通道数明显变多,经反复数字试验发现通道数和缺陷层厚度间存在一定的线性关系如图 4 所示,拟合得到的函数关系

$$N = 0.0035D + 0.159, \quad (5)$$

式中  $N$  为  $p$  波透射峰个数, $D$  为缺陷层  $c$  的厚度,

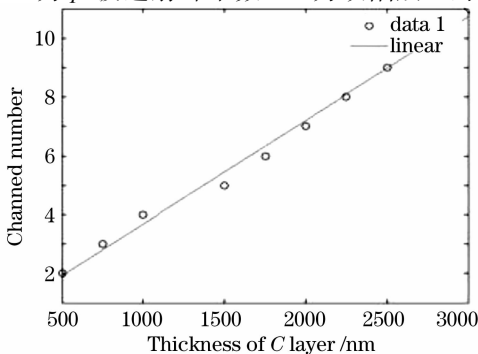


图 4 通道数与  $C$  层厚度关系

Fig. 4 Relationship of the channel number and the  $C$  layer thickness

单位取 nm,这对于多通道偏振滤波器的设计十分有利,可以在不进行数值计算的情况下直接预测通道数目。另外从图 3 可看出透射比在禁带边缘较低,中间较高,成抛物线分布,且通道分布均匀。

### 3.2 缺陷层折射率对通道数的影响

为了研究缺陷层折射率  $n_c$  对通道数的影响,取  $(AB)_m$  的单元周期重复数  $m = 7$ ,介质  $A$  仍为 ZnS (折射率为  $n_A = 2.35$ ),  $B$  仍为  $MgF_2$  (折射率为  $n_B = 1.38$ ),  $A, B$  层厚度分别为  $\lambda_0/4n_A, \lambda_0/4n_B$ , 其中滤波器中心波长  $\lambda_0 = 600$  nm,  $C$  层厚度为 1000 nm, 在入射波长 500 ~ 650 nm 范围内,  $C$  层折射率从  $n_c = 1$  开始以 0.00075 为步长逐步增加到  $n_c = 4$ , 利用 (4) 式计算出对应  $p$  波的透射比灰度图,如图 5,其中  $s$  波由于大角度入射已滤掉。

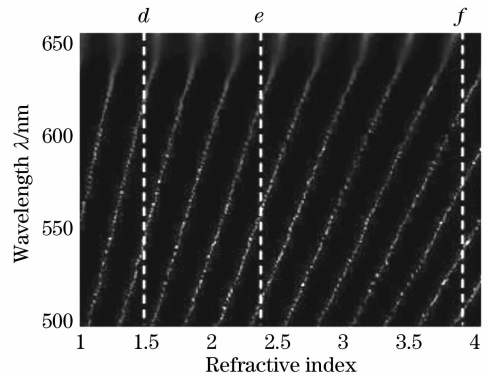


图 5 折射率对通道数的影响

Fig. 5 Influence of refractive index on channel number

图 5 中灰度等级越高,即亮度越大,表示透射比越高。可以看出:对于  $p$  波,在缺陷层折射率  $n_c > 1$  时,随着其折射率的变化,形成了一系列的偏振滤波通道,不同的折射率所对应的滤波通道数目不相同。把图 5 的  $d, e, f$  三个缺陷层折射率 1.38、2.318、3.78 所对应的透射比截面绘于图 6 中,可以清楚地看到:在 500 ~ 650 nm 范围内,在  $d$  处即缺陷层折射率为 1.38

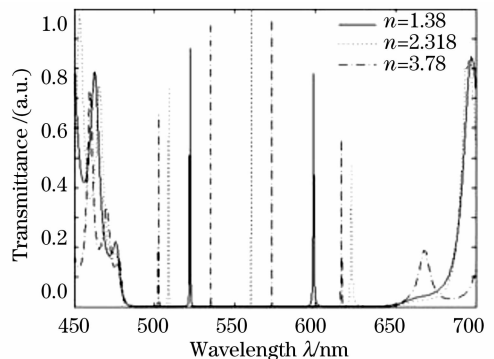


图 6 不同折射率对应的滤波通道

Fig. 6 Filtering channel of the different refractive index

时,存在两个滤波通道,中心波长分别位于 520 nm 和 600 nm 处;而在 *e* 处有三个滤波通道,中心波长分别位于 510 nm,560 nm 和 625 nm 处;在 *f* 处有四个滤波通道,中心波长分别位于 505 nm、535 nm、575nm 和 615 nm 处;对应每一个折射率,通道几乎均匀分布。利用这一特性,可以调节 *C* 层折射率改变其通道数目,以满足实际应用的需要。

### 3.3 单元周期层对通道数的影响

除了光子晶体缺陷层参数对滤波器有影响外,单元周期层也是影响滤波性能的重要因素。在研究周期层对滤波通道的影响时,考虑到便于调节和实用性等因素,主要从周期层厚度和单元周期数 *m* 两方面加以分析。

研究周期层厚度对通道数的影响时,光子晶体结构中中介质 *A*、*B*、*C* 分别为 ZnS(折射率为  $n_c = 2.35$ ),MgF<sub>2</sub>(折射率为  $n_c = 1.38$ )和 Si(折射率为  $n_c = 3.78$ ),单元周期数 *m* 取 7,同样采用大角度入射以滤掉 *s* 波,*C* 层厚度保持 1000 nm 不变,*A*、*B* 介质层厚度分别为  $\lambda_0/4n_A$ 、 $\lambda_0/4n_B$ ,从  $\lambda_0 = 600$  nm 开始以 0.15 nm 为步长逐步增加到  $\lambda_0 = 660$  nm,在入射波长 500 ~ 650 nm 范围内,利用(4)式计算出对应的透射比灰度图,如图 7 所示,其中灰度等级越高,即亮度越大,表示透射比越高。

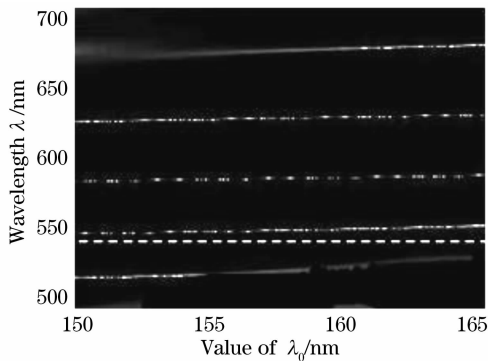


图 7 单元层厚度对通道中心波长的影响

Fig. 7 Influence of periodic layer thickness on the central wavelength of filter channels

可以看出当单元周期层厚度增加时,通道中心波长红移,红端开始出现高分离度 *p* 偏振模,当厚度减小时,蓝端开始出现高分离度 *p* 偏振模,但总的通道数保持 4 个不变,如图 7 所示。这种现象的物理解释是:在周期层厚度增加的同时增加入射波的波长,波动方程解的形式不变,这是电磁场的 Maxwell 方程的特性决定的。另外可以看出滤波波长和单元厚度大致相当,但二者之间并无明显线性关系。

图 8 是  $\lambda_0 = 600$  nm 时 *p* 波的滤波特性曲线,禁

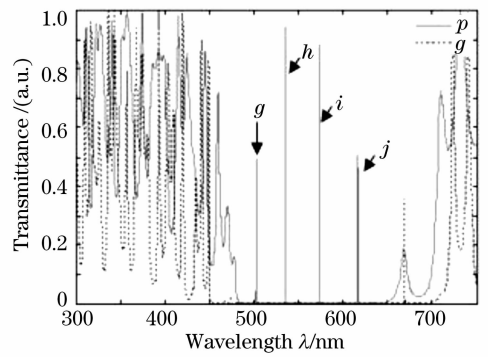


图 8 *m* 取 7 时 *p* 波的滤波特性

Fig. 8 *p*-wave filtering characteristics while *m* = 7

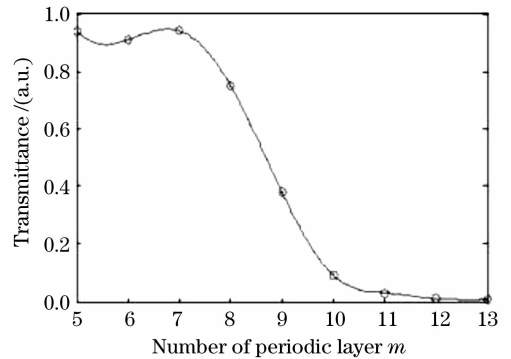


图 9 透射比与单元周期数的关系

Fig. 9 Relationship of transmittance and the numbers of periodic layer

带中出现 4 条通道 *g*、*h*、*i*、*j*。保持介质 *A*、*B*、*C* 的折射率和厚度不变,选取通道 *g* 来考察周期数 *m* 对滤波通道影响,经过反复验证,周期数的改变并不影响通道数,但对透射比有较大的影响,如图 9,即:当 *m* 小于 8 或大于 11 时透射比都趋向常数,且 *m* 较小时,透射比较大,但其偏振分离度和偏振度将会下降,如图 10 和图 11。因此在设计具体的光子晶体滤波器时需要综合考虑以确定 *m* 数。

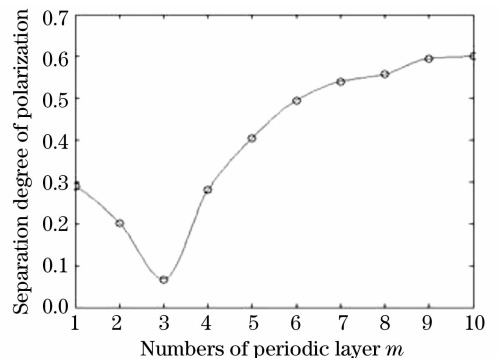


图 10 单元周期数 *m* 对偏振分离度的影响

Fig. 10 Influence of the numbers of periodic layer on the separation degree of polarization

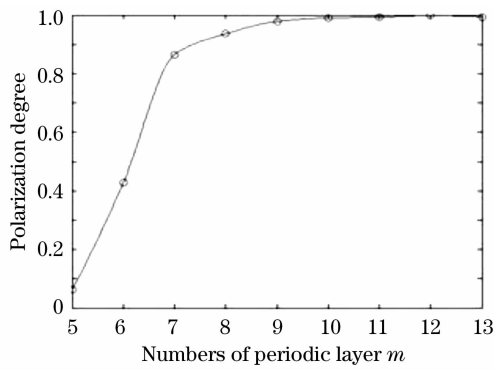


图 11 单元周期数  $m$  对偏振度的影响

Fig. 11 Influence of the numbers of periodic layer on the polarization degree

可见,周期层厚度和单元周期数  $m$  并不影响通道的数目,但可以调节通道中心波长位置、透射比、分离度和偏振度等,因此在设计具体的光子晶体滤波器时需要综合考虑以确定周期层厚度和单元周期数  $m$ ,以达到实用目的。

## 4 结 论

利用 TMM 方法对可见光区一维光子晶体偏振滤波器通道数的影响因素研究进行了数值计算和分析,得出其通道数的变化特征:(1)当单元周期层参数保持不变时,随着缺陷层折射率增加,p 波通道数明显增多;当缺陷层厚度增加,通道数也明显增多。(2)当缺陷层参数保持不变时,改变单元周期数和单元厚度时,只影响通道中心波长位置、透射比、分离度和偏振度等,对通道数并没有影响。

## 参 考 文 献

- Shi Jianping, Chen Xunan, Zhang Xiaoyu *et al.*. Photonic crystals: A new manmade band gap material [J]. *Materials Review*, 2003, **37**(9):164~168  
石建平,陈旭南,张小玉等.光子晶体:一种新型人工带隙材料[J].材料导报,2003, **17**(9):164~168
- Shi Jianping, Chen Xunan, Zhang Xiaoyu *et al.*. Progress and future of photonic crystal devices[J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2004, **32**(1): 10~14  
石建平,陈旭南,张小玉等.光子晶体器件的研究进展及前景[J].纳米器件与技术,2004, **32**(1): 10~14

- Wang Huiqin, Liu Zhengdong, Xie Yingmao. A kind of photonic crystal narrow filter used in DWDM [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2006, **17**(1):20~25  
王慧琴,刘正东,谢应茂.用于DWDM的一类光子晶体滤波器[J].光子·激光,2006, **17**(1):20~25
- Huang Yuan, Wang Liya, Dong Kexiu *et al.*. Influence factors on characters of 1D PCs filter [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2008, **31**(3):247~251  
黄圆,王丽亚,董可秀等.一维光子晶体滤波器滤波性能的影响因素研究[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2008, **31**(3):247~251
- Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):728~734  
顾国昌,李宏强,陈洪涛等.一维光子晶体材料中的光学传输特性[J].光学学报,2000, **20**(6):728~734
- Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1557~1560  
方云团,沈廷根,谭锡林.一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J].光学学报,2004, **24**(11):1557~1560
- Liu Qineng. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(1): 84~87  
刘启能.光子晶体双通道可调偏振滤波器的设计[J].激光技术,2008, **32**(1):84~87
- Chen Zheng, Wang Tao. Study on the polarization properties of the defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2244~2247  
陈征,王涛.一维光子晶体缺陷模的偏振特性研究[J].光子学报,2007, **36**(12):2244~2247
- Tang Bingshu. Design of polarization band-pass filter of one-dimensional photonic crystal nanometer film in the range of visible light [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 33~37  
汤炳书.可见光区一维光子晶体纳米膜偏振带通滤波器的设计[J].光电工程,2007, **34**(5):33~37
- Liu Lili, Tang Bingshu. Investigation of polarization filter properties of one-dimensional dual photonic crystal nanometer film in visible region [J]. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)*, 2007, **28**(5): 56~59  
刘丽丽,汤炳书.偏振滤波一维二元光子晶体的实现[J].吉首大学学报(自然科学版),2007, **28**(5): 56~59
- Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin *et al.*. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(8): 2520~2525  
李蓉,任坤,任晓斌等.一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J].物理学报,2004, **53**(8): 2520~2525
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 82~100  
玻恩,沃尔夫.光学原理[M].杨葭孙译.北京:科学出版社,1978. 82~100