

文章编号: 0253-2239(2007)09-1695-5

# 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器<sup>\*</sup>

张文富<sup>1</sup> 方 强<sup>1</sup> 程益华<sup>1</sup> 刘继红<sup>1</sup> 夏贵进<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安邮电学院电子与信息工程系, 西安 710061  
<sup>2</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要:** 利用传输矩阵法计算了正负折射率交替一维光子晶体的带隙特性。结果表明这种光子晶体具有宽而平坦的禁带, 窄而尖锐的通带。这种带隙特性是受到布拉格散射、法布里-珀罗谐振和  $\bar{n} = 0$  禁带共同影响的结果, 通带位置决定于法布里-珀罗谐振。在理论分析基础上设计出密集波分复用窄带梳状滤波器, 给出信道间隔为 0.8 nm 的梳状滤波器的仿真结果。仿真结果表明这种梳状滤波器具有信道间隔窄、禁带平坦、通带极窄的特点。信道间隔可以通过改变一维光子晶体单元周期光学厚度调节。

**关键词:** 光电子学; 梳状滤波器; 传输矩阵; 光子晶体; 负折射率介质; 正负折射率交替

中图分类号: TB851<sup>+</sup>.7 文献标识码: A

## Narrow Band Interleaver Based on One-Dimensional Photonic Crystal with Positive-Negative Index Alternant Multilayer

Zhang Wenfu<sup>1</sup> Fang Qiang<sup>1</sup> Cheng Yihua<sup>1</sup> Liu Jihong<sup>1</sup> Xia Guijin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electronic and Information Engineering, Xian Institute of Post and Telecommunication, Xian 710061  
<sup>2</sup> Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

**Abstract:** The transmission spectrum of one-dimensional (1D) photonic crystal (PC) with positive-negative index alternant multilayer is studied with transfer-matrix method. The result reveals that this type of 1D PC has broad-flat forbidden band and narrow-sharp transmitted band. The transmission-spectrum character is affected by Bragg scattering, Fabry-Pérot resonating and the  $\bar{n} = 0$  forbidden band. The position of transmitted band is determined by Fabry-Pérot resonating. A new narrow-band interleaver applied to dense wavelength division multiplexing (DWDM) system is designed by this type of one-dimensional photonic crystal. The simulation result of 0.8 nm channel spacing interleaver is presented. It is shown that this new interleaver has narrow channel spacing, flat forbidden band and narrow transmitted band. The channel spacing can be adjusted by change of the unit period optical thickness of one-dimensional photonic crystal.

**Key words:** optoelectronics; interleaver; transfer matrix; photonic crystal; negative-index material; positive-negative index alternation

## 1 引 言

负折射率材料, 又称为左手材料。2000 年 Smith<sup>[1]</sup> 合成了介电常量与磁导率同时小于 0 的负折射率材料。2001 年他们在实验上验证了由这种材料做成的棱镜具有负折射率的性质<sup>[2]</sup>。在负折射率材料中, 波矢方向与能流方向(坡印廷矢量方向)相反, 这样引起相位随着波的传播而减小。负折

射率材料的奇异特性弥补了很多传统材料(正折射率材料或者右手材料)的不足, 如可以产生反向多普勒(Doppler)频移和逆切伦科夫(Cerenkov)效应等<sup>[3]</sup>。

光子晶体是一种介电常量周期性变化的材料, 根据介质介电常量周期性变化的维度光子晶体可以分为一维、二维和三维光子晶体。基于一维光子晶体的应用有很多, 典型的有一维光子晶体全反射

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60677005)和陕西省自然科学基金(2006 F17)资助课题。

作者简介: 张文富(1982-), 男, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事光子晶体和光无源器件等方面的研究。

E-mail: wfu.zhang@gmail.com

导师简介: 方 强(1963-), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术、光纤通信、测量技术等方面的研究。

E-mail: qfang@xxyou.edu.cn

收稿日期: 2006-10-19; 收到修改稿日期: 2007-04-20

镜<sup>[4]</sup>,基于一维光子晶体的空心光纤<sup>[5]</sup>和一维光子晶体滤波器<sup>[6~8]</sup>等。

光学梳状滤波器(Interleaver)是指频谱类梳状的透射或反射式光学信号通路元件。在光电子学领域和光纤通信领域,光学梳状滤波器具有很多重要的应用<sup>[9,10]</sup>。以超连续谱宽带光源为基础,利用光学梳状滤波器输出满足 ITU-T 规定信道间隔的多个窄带光源,经光放大器可以获得密集波分复用(DWDM)用信号源<sup>[9]</sup>。光学梳状滤波器也可用于波分复用系统的接收端,实现光信号的解复用<sup>[10]</sup>。目前光学梳状滤波器的主要类型<sup>[11]</sup>有晶体双折射型、马赫-曾德尔干涉仪型、光纤布拉格(Bragg)光栅型和法布里-珀罗(F-P)干涉滤光片型。它们都在一定范围内取得了应用,但都存在各自的缺点,因此人们还在寻找光学梳状滤波器新的实现方法。鉴于光子晶体理论与实验的成功,人们开始探索用光子晶体制作性能良好的梳状滤波器(或多峰滤波器)<sup>[6~8]</sup>。目前通过一维光子晶体实现多通道滤波已有一定研究,主要是通过插入各种缺陷实现<sup>[6]</sup>。也有人报道了通过叠层结构一维光子晶体级联实现波分复用梳状滤波器<sup>[7,8]</sup>。但这些方法同样存在一些问题,多缺陷一维光子晶体由于缺陷模之间的相互作用很难实现足够多的通道,因此很难在整个通信波段(例如 C 波段)实现窄信道间隔(例如 50 GHz)的梳状滤波器。级联型光子晶体受每个独立光子晶体透射谱的限制,各级光子晶体通带没有重合的部分,因此光信号通过第一级光子晶体后无法通过其它级光子晶体,可行性有待继续论证。由于负折射率介质研究的发展,在光子晶体掺杂负折射率材料缺陷已有一定研究<sup>[12,13]</sup>。在此基础上,本文提出用正负折射率交替一维光子晶体实现全 C 波段光梳状滤波器。数值仿真结果表明这种梳状滤波器具有信道间隔小、通带窄、禁带平整的特点。

## 2 正负折射率交替一维光子晶体模型与传输矩阵法

### 2.1 物理模型

将折射率为  $n_1$  ( $n_1 > 0$ )、厚度为  $d_1$  的正折射率介质层(记为 R)和折射率为  $n_2$  ( $n_2 < 0$ )、厚度为  $d_2$  的负折射率介质层(记为 L)交替排列构成一维光子晶体。取介质膜光学厚度相等,即有  $|n_1 d_1| = |n_2 d_2|$ ,周期为  $N$ ,即一维光子晶体周期性结构为  $(RL)^N$ ,模型如图 1 所示。

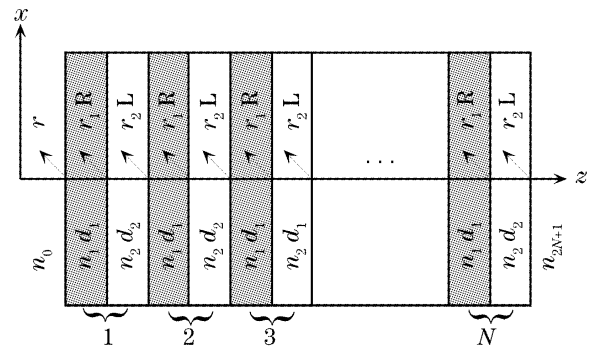


图 1 正负折射率交替一维光子晶体模型

Fig. 1 Model of one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer

### 2.2 传输矩阵法

对于含有  $2N$  层介质的一维光子晶体总的传输矩阵可以表示为  $M^{2N}$ ,可以写为单层介质传输矩阵级乘的形式:

$$M^{2N} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{2N} M_i, \quad (1)$$

其中  $M_i$  为第  $i$  介质层的传输矩阵,可以写为

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & j \sin \delta_i / \eta_i \\ -j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $\delta_i = (2\pi/\lambda)n_i d_i \cos \theta_i$ ,为第  $i$  层的相位厚度; $\eta_i$  是第  $i$  层 s 偏振光和 p 偏振光的等效导纳  $\eta_{si}$  或  $\eta_{pi}$ ,并且有

$$\begin{cases} \eta_s = \delta n \cos \theta, & (\text{s 偏振}) \\ \eta_p = \delta n / \cos \theta. & (\text{p 偏振}) \end{cases} \quad (3)$$

当  $\epsilon > 0, \mu > 0$  时,  $n = \sqrt{\epsilon \mu}, \delta = 1$ ; 当  $\epsilon < 0, \mu < 0$  时,  $n = -\sqrt{\epsilon \mu}, \delta = -1$ 。

通过计算,可得  $2N$  层介质一维光子晶体反射系数为

$$r = \frac{\eta_0 - (m_{21} + m_{22} \eta_{2N+1}) / (m_{11} + m_{12} \eta_{2N+1})}{\eta_0 + (m_{21} + m_{22} \eta_{2N+1}) / (m_{11} + m_{12} \eta_{2N+1})}. \quad (4)$$

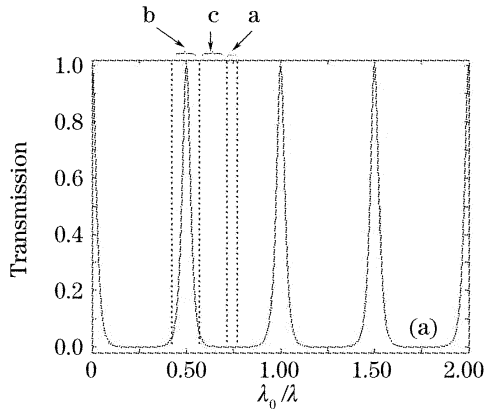
反射率  $R = |r|^2$ ,透射比  $T = 1 - R$ 。

### 3 正负折射率交替一维光子晶体带隙特性

对于图 1 所示的正负折射率交替一维光子晶体,取基本结构光子晶体为光学厚度  $n_1 d_1 = -n_2 d_2 = \lambda_0$ ,正负折射率材料均为各向同性,无耗非磁非色散介质。其中正折射率介质取普通的玻璃材料,折射率为  $n_1 = 1.5$ ,负折射率介质折射率取为,  $n_2 = -2.4, \lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 。光束正入射到光子晶体上,p 偏振光和 s 偏振光传输矩阵相同,因此反射谱相同。

通过传输矩阵法计算基本一维光子晶体结构的透射谱如图 2(a)所示,光子晶体周期数  $N$  取 10。

从图 2(a)可以看出,对于基本结构正负折射率



交替一维光子晶体存在多个平整的禁带,在相邻禁带之间有一个很窄的通带。通带对应的中心波长  $\lambda = 2\lambda_0/m, m = 1, 2, \dots$ 。

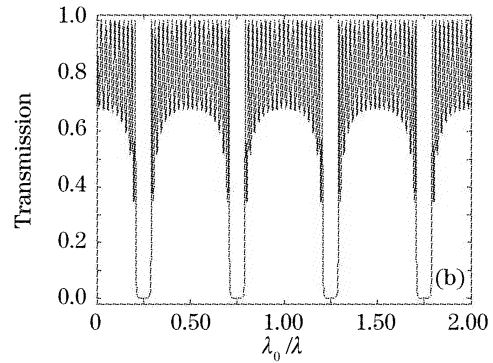


图 2 一维光子晶体透射谱。(a)正负折射率交替一维光子晶体,(b)传统一维光子晶体

Fig. 2 Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal. (a) One-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer, (b) conventional one-dimensional photonic crystal

#### 4 正负折射率交替一维光子晶体带隙特性物理解释

为了研究正负折射率交替一维光子晶体独特的带隙特性的产生机理,有必要与传统的由单一正折射率介质组成的一维光子晶体(后面简称传统一维光子晶体)带隙作比较。用传输矩阵法计算  $n_1 = 1.5, n_2 = 2.4$  的基本结构传统一维光子晶体正入射时的透射谱如图 2(b)所示,光子晶体的周期数  $N$  同样取 10。从图 2 可以看出,两种结构的光子晶体的带隙存在很大不同。对于传统一维光子晶体,其带隙结构受布拉格散射和法布里-珀罗谐振的共同影响。其中布拉格条件为

$$\psi_{\text{Bragg}} = (2\pi/\lambda)(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2) = p\pi, \quad (p = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (5)$$

法布里-珀罗谐振条件为

$$\psi_{\text{F-P}} = (2\pi/\lambda)n_1 d_1 \cos \theta_1 = q\pi. \quad (q = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

在正入射条件下布拉格散射和法布里-珀罗谐振的条件变为

$$\psi_{\text{Bragg}} = (2\pi/\lambda)(n_1 d_1 + n_2 d_2) = p\pi, \quad (p = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (7)$$

和

$$\psi_{\text{F-P}} = (2\pi/\lambda)n_1 d_1 = q\pi. \quad (q = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

对于如图 1 所示的一维光子晶体结构,如果表示的是传统一维光子晶体,则从图中可以看出,一维光子晶体内部存在两种交界面: $n_1 \rightarrow n_2$ (界面 1)和  $n_2 \rightarrow n_1$ (界面 2)。根据菲涅耳公式,正入射时光在

这两种交界面上的反射系数分别为  $r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$  和

$r_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}$ , 因此有  $r_1 = -r_2$ 。在单纯满足布拉格

条件的波长附近[对应图 2(b)中  $\lambda_0/\lambda = 0.25, 0.75, 1.25, \dots$  等位置],传统一维光子晶体会出现较为平坦的高反射带。布拉格高反带可以解释为:从  $n_0 \rightarrow n_1$  界面入射进来的光被所有的界面 2 反射后到达界面  $n_0 \rightarrow n_1$  时,相位相差为  $(2\pi/\lambda)2m(n_1 d_1 + n_2 d_2) = 2mp\pi$  ( $p = \pm 1, \pm 2, \dots; m = 1, 2, \dots$ ),因此在界面  $n_0 \rightarrow n_1$  上产生相长干涉,因此随着光子晶体周期数的增加会产生很大的反射率。但是,对于同时满足布拉格散射条件和法布里-珀罗谐振条件的波长[对应图 2(b)中  $\lambda_0/\lambda = 0.5, 1.0, 1.5, \dots$  等位置],却有截然相反的透射特性,出现高透射带。法布里-珀罗谐振波长的高透射特性可以解释为:由于满足了布拉格散射条件,因此从  $n_0 \rightarrow n_1$  界面入射进来的光被所有的界面 2 反射后到达界面  $n_0 \rightarrow n_1$  时的相位相差为  $2\pi$  的整数倍,与此同时,由所有界面 1 反射回来的光波相位差也是  $2\pi$  的整数倍,但是由于界面 1 和界面 2 的反射系数的关系为  $r_1 = -r_2$ ,因此界面 1 和界面 2 反射回来的反射光在入射界面上是反相的,产生相消干涉,最终表现为对满足法布里-珀罗谐振条件波长的光波透明传输。当波长偏离法布里-珀罗谐振波长,光子晶体对光波的传输特性则为布拉格散射和法布里-珀罗谐振作用竞争的结果,至于哪种效应占主导地位要看波长偏离量对两种效应产生条件的改变量。假设波数的改变量为一个较小

值  $\delta$ , 那么从(5)式、(6)式或(7)式、(8)式可以看出, 布拉格散射和法布里-珀罗谐振的改变量分别为  $\Delta\psi_{\text{Bragg}} = \delta p\pi$  和  $\Delta\psi_{\text{F-P}} = \delta q\pi$ , 这样,  $p > q$ , 于是有  $\Delta\psi_{\text{Bragg}} > \Delta\psi_{\text{F-P}}$ , 因此当波长偏离法布里-珀罗谐振条件时, 波长的改变量对法布里-珀罗谐振条件的影响较小, 因此在这种情况下法布里-珀罗谐振占据了主导地位, 一维光子晶体仍然呈现较高的透射率, 但是由于布拉格散射的影响, 在高透射带内会产生震荡, 这些都可以从图 2(b)中看到。比较图 2(a)、图 2(b), 可以看到正负折射率交替一维光子晶体的传输特性与传统一维光子晶体有很大不同, 对于正负折射率交替一维光子晶体, 除了受布拉格散射和法布里-珀罗谐振的影响外, 还受到  $\bar{n} = 0$  禁带的影响<sup>[11]</sup>, 其中  $\bar{n}$  为单元周期内的有效折射率。文中涉及的光子晶体结构中  $n_1 d_1 = -n_2 d_2$ , 因此在所有条件下均满足  $\bar{n} = 0$ 。同样用前面的分析方法解释  $\bar{n} = 0$  禁带对一维光子晶体传输特性的影响。对于正负折射率交替一维光子晶体, 布拉格散射和法布里-珀罗谐振的影响与传统一维光子晶体相同, 但是由于  $n_1 d_1 = -n_2 d_2$ , 从(7)式表示的布拉格散射条件可以看出  $\psi_{\bar{n}=0} = (2\pi/\lambda)(n_1 d_1 + n_2 d_2) = 0$ 。这样类似于布拉格散射的影响,  $\bar{n} = 0$  条件对整个光子晶体的传输特性的影响也是在入射面  $n_0 \rightarrow n_1$  产生相长干涉, 而且在偏离法布里-珀罗谐振波长后的竞争关系也有所变化: 对于很小的波数的改变量  $\delta$ , 对  $\psi_{\bar{n}=0}$  的影响  $\Delta\psi_{\bar{n}=0} = 0$ , 因此在偏离法布里-珀罗谐振波长后,  $\bar{n} = 0$  禁带迅速占据主导地位, 表现为平整的高反带, 这些都在图 2(a)中有所体现。因此, 正负折射率交替一维光子晶体的带隙在一个周期内可以分为三个区域  $a, b, c$ 。在  $b$  区, 法布里-珀罗谐振占主导地位, 出现尖锐的透射峰; 当频率分量偏离  $b$  区进入  $c$  区后, 受  $\bar{n} = 0$  禁带的影响, 透射率迅速下降,  $c$  区出现平整的禁带; 在  $a$  区, 受布拉格散射与  $\bar{n} = 0$  禁带的影响仍然为平坦的禁带。可见在布拉格散射、法布里-珀罗谐振与  $\bar{n} = 0$  禁带的共同影响下, 正负折射率交替一维光子晶体出现了与传统一维光子晶体不同的带隙结构, 在法布里-珀罗谐振频率附近出现极窄的通带, 而不像传统一维光子晶体通带出现振荡, 并且带隙也较宽; 在偏离法布里-珀罗谐振频率的其他频率分量上均出现平整的禁带。这点在设计梳状滤波器上是十分重要的。

## 5 全 C 波段窄带梳状滤波器

正负折射率交替光子晶体透射峰的位置只受法

布里-珀罗谐振的影响, 根据(6)式, 透射中心波长可以由(9)式写出

$$\lambda_0 = 2n_1 d_1 / m, \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

透射峰的间隔为

$$\Delta\lambda = 2n_1 d_1 / [m(m+1)]. \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

由(7)式、(8)式可求出光子晶体单层膜光程:

$$n_1 d_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} - \lambda_0 \right). \quad (11)$$

以基本结构 ( $n_{10} d_{10} = -n_{20} d_{20} = \lambda_0$ ) 光子晶体为参考, 引入厚度调谐因子  $\kappa$ , 光子晶体膜层实际光学厚度  $n_1 d_1 = \kappa n_{10} d_{10} = \kappa \lambda_0$ , 根据(11)式求出  $\kappa = (\lambda_0 / \Delta\lambda - 1) / 2$ 。

对应 ITU-T 规定的 12.5 GHz、25 GHz、50 GHz 和 100 GHz 系统的信道间隔分别为 0.1 nm、0.2 nm、0.4 nm 和 0.8 nm, 取中心波长  $\lambda_0 = 1550$  nm, 对应  $\kappa$  的值分别为 7749.5、3874.5、1937、968。图 3 给出全 C 波段(1530~1565 nm)信道间隔为 0.8 nm 的正负折射率交替一维光子晶体梳状滤波器的透射谱图。图 4 是局部放大图。其中  $n_1 = 1.5, n_2 = -2.4$ , 周期数  $N$  取 25。

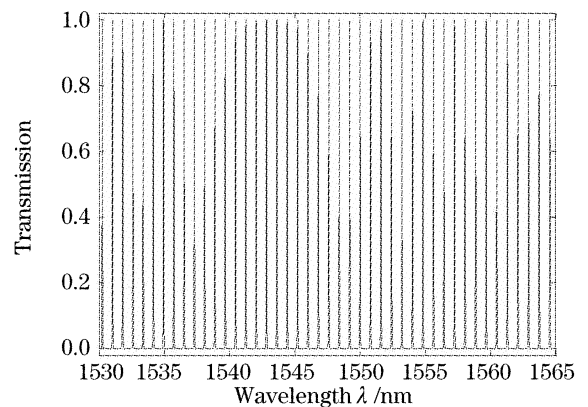


图 3 梳状滤波器透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of interleave filter

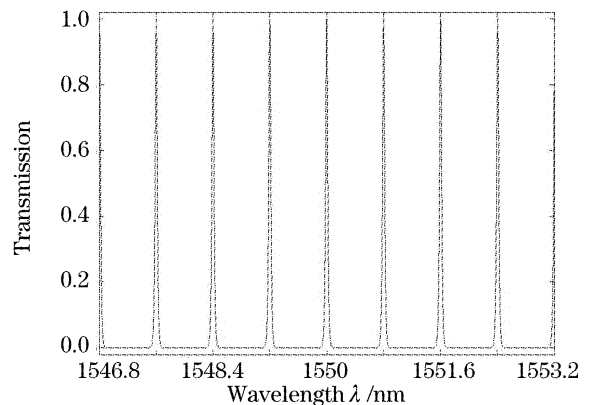


图 4 梳状滤波器 1550 nm 附近透射谱局部放大图

Fig. 4 Magnified part of transmission spectrum of the interleave filter near 1550 nm

从图 3、图 4 可以看出,基于正负折射率交替一维光子晶体的梳状滤波器透射谱具有通带窄,禁带平坦的特点。对于文中设计的 0.8 nm 信道间隔的梳状滤波器,各个通带的最大 3 dB 带宽为 0.0324 nm,最小为 0.0321 nm;25 dB 截至带宽约为 0.148 nm。如果作为反射式梳状滤波器用,则 3 dB 带宽最小可达 0.7655 nm,达到信道间隔的 96%,信道间隔误差不超过 0.001 nm。

## 6 结 论

研究了正负折射率交替一维光子晶体的带隙特性。研究表明这种新的一维光子晶体结构存在与传统一维光子晶体不同的带隙特点:通带位置决定于法布里-珀罗谐振条件,偏离通带的频率由于受  $\bar{n}=0$  禁带和布拉格散射的影响透射率急剧下降。应用这种结构设计了波分复用梳状滤波器,数值模拟表明这种梳状滤波器具有通带极窄,禁带平整的特点。有希望在波分复用系统光源、光谱分析仪、信道监测等方面得到应用。也有希望做成反射式波分复用的解复用器,带宽基本可以达到信道带宽的 90% 以上,具有良好的性能。

## 参 考 文 献

- 1 David R. Smith, Norman Kroll. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14): 2933~2936
- 2 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 3 Xu Xuming, Fang Ligang, Liu Nianhua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1676~1681 (in Chinese)

徐旭明,方利广,刘念华. 含负折射率层的多层体系的反常光子隧穿[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1676~1681

- 4 Li Mingyu, Gu Peifu, Li Yiyu *et al.*. Omnidirectional photonic crystal reflector used in ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1554~1557 (in Chinese)
- 李明宇,顾培夫,厉以宇等. 紫外区全角度光子晶体反射镜[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1554~1557
- 5 Burak Temelkuran, Shandon Hart, Gilles Benoit *et al.*. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO<sub>2</sub> laser transmission[J]. *Nature*, 2002, **420**: 650~653
- 6 Kunyuan Xu, Xiguang Zheng, Cailian Li *et al.*. Design of omnidirectional and multiple channeled filters using one-dimensional photonic crystals containing a defect layer with a negative refractive index [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(6): 066604-1~066604-11
- 7 Liu Haishan, Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen *et al.*. Photonic crystal WDM filters [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(2): 145~149 (in Chinese)
- 刘海山,欧阳征标,李景镇等. 用于波分复用的光子晶体滤波器[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(2): 145~149
- 8 Wang Huiqin, Liu Zhengdong, Xie Yingmao. A kind of photonic crystal narrow filter used in DWDM [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(1): 20~23 (in Chinese)
- 王慧琴,刘正东,谢应茂. 用于 DWDM 的一类光子晶体滤波器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(1): 20~23
- 9 T. Morioka. Supercontinuum lightwave optical sources for large capacity transmission [C]. *Proc. ECOC*, Brussels, 1995, **2**: 821~828
- 10 Kuangyi Wu, Jianyu Liu. Method and apparatus for wavelength multiplexing/demultiplexing [P]. United States Patent, US6163393, Dec. 19, 2000
- 11 Chen Haixing, Gu Peifu, Li Haifeng *et al.*. Design of interleaver with cascaded thin film filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 62~64 (in Chinese)
- 陈海星,顾培夫,李海峰等. 薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 62~64
- 12 Jensen Li, Lei Zhou, C. T. Chan *et al.*. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 083901-1~083901-4
- 13 Kunyuan Xu, Xiguang Zheng, Weilong She. Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals containing a defect layer with a negative refractive index [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(25): 6089~6091