

# 矩孔光子晶体可见光谱段窄带偏振陷波研究

朱启凡<sup>1,2\*\*</sup>, 付跃刚<sup>1,2\*</sup>, 刘智颖<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 提出一种可见光谱段内窄带偏振陷波滤波的矩孔光子晶体结构。通过建立矩孔光子晶体模型,将矩孔光子晶体结构等效为介质层-光栅层-介质层周期结构,利用 Rugate 滤波理论对矩孔光子晶体结构进行分析,结合等效介质理论(EMT)和传输矩阵方法(TMM)对结构模型的入射光 s 偏振、p 偏振的透过率进行仿真。另外讨论了矩孔光子晶体纵向周期数  $m$ 、光栅层填充比  $f$ 、厚度  $d$  等参数对偏振陷波的中心波长、带宽以及截止带透过率的影响。针对 417, 497, 582, 685 nm 中心波长,设计带宽为 10 nm 的 p 偏振窄带陷波结构,并用时域有限差分方法(FDTD)进行仿真验证,结果表明,矩孔阵列结构可以实现可见光谱段内窄带偏振陷波滤波。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 陷波滤波; 等效介质理论; 传输矩阵; 偏振; 窄带滤波

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1223001

## Narrow-Band Polarization Notch Filtering of Visible Light Spectra Based on Photonic Crystal with Periodic Rectangular Holes

Zhu Qifan<sup>1,2\*\*</sup>, Fu Yuegang<sup>1,2\*</sup>, Liu Zhiying<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>School of Opto-Electronic, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** A novel photonic crystal (PC) structure with periodic rectangular holes is proposed to realize the narrow-band polarization notch filtering of visible lights. This PC structure is equivalent to a periodic structure with a dielectric-grating-dielectric layer in the PC structure model. The PC structure is first analyzed by the Rugate filtering theory and then the equivalent medium theory (EMT) and the transmission matrix method (TMM) are combined to simulate the transmittances of lights with s and p polarizations. The effects of the parameters, such as longitudinal period number  $m$ , filling ratio of grating layers  $f$  and thickness  $d$  of this PC structure, on the central wavelength, band width and transmittance in the cut-off zone for polarization notch filtering are also discussed. As for the central wavelengths of 417, 497, 582, 685 nm, a p-polarization notch filtering structure with a band width of 10 nm is designed, which is tested by the simulation with the finite difference time domain (FDTD) method. The results show that the PC structure with periodic rectangular holes can be used to realize the narrow-band polarization notch filtering of visible lights.

**Key words** optical devices; photonic crystal; notch filtering; equivalent medium theory; transmission matrix; polarization; narrow-band filtering

**OCIS codes** 230.7408; 310.5448; 230.6298

## 1 引 言

陷波滤波片<sup>[1]</sup>又称负滤波片<sup>[2]</sup>,可以将波段内特定波带去除,使其透过率截止,广泛应用于对抗激光威胁、光通信、伪装与仿伪装等系统<sup>[3]</sup>。将陷

波滤波片与偏振相结合<sup>[4-5]</sup>,可进一步实现窄带偏振反射、透射特性,使光学系统同时获得光谱与偏振信息,扩展了光学系统功能,因此逐渐成为研究热点。

陷波滤波片的设计通常采用薄膜形式,可以实

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-07-21; 录用日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)、吉林省自然科学基金(2013101032JC)

\* E-mail: fuyg@cust.edu.cn; \*\* E-mail: 18584369262@163.com

现单窗口<sup>[6]</sup>或多窗口的陷波滤波<sup>[7]</sup>;采用 Rugate 理论设计<sup>[8-9]</sup>的陷波滤波膜系,减小了折射率的突变,增加了通带的透过率;可通过等离子增强化学气相沉积技术(PECVD)实现 Rugate 膜系的制备<sup>[10-11]</sup>。然而,采用不同的材料薄膜构成膜系,材料的选择及膜厚控制难度比较大,且常见薄膜材料各向同性,在正入射的情况下,s 偏振和 p 偏振陷波滤波谱段相同,难以实现偏振特性。另一方面,现有的偏振元件<sup>[12-13]</sup>,虽可以很好地实现高消光比偏振透过<sup>[14-15]</sup>、偏振分光<sup>[16-17]</sup>等特性,并将偏振元件结构微型化<sup>[18-19]</sup>,但尚未实现窄带偏振滤波。

由于其材料等效折射率的两向异性,光子晶体可以实现偏振分光<sup>[20-21]</sup>,其光子禁带特性使其同时具有光谱特性<sup>[22]</sup>。因此,本文提出了矩孔光子晶体结构,光子晶体可以等效为多层膜的形式<sup>[23-24]</sup>,将偏振特性与陷波特性和相结合。光子晶体的周期性结构使其具有对特定光谱截止的特性<sup>[25-26]</sup>,为窄带偏振陷波特性和提供了可能。将矩孔光子晶体等效为 Rugate 膜系结构,微结构材料与空气在不同结构下可以产生不同的折射率,且折射率随波长稳定变化,在 s 偏振和 p 偏振方向上等等效折射率不同,使 s 偏

振方向与 p 偏振方向的 Rugate 膜系结构不同,为偏振陷波提供了可能。根据 Rugate 理论分析矩孔光子晶体结构,以及 s 偏振光和 p 偏振光经过该结构后的陷波滤波特性,设计了窄带偏振陷波滤波,并利用时域有限差分方法(FDTD)进行仿真验证。

## 2 基本原理

### 2.1 矩孔光子晶体

矩孔光子晶体模型如图 1 所示。图 1(a)为矩孔光子晶体三维结构,矩孔阵列沿  $x$  方向与  $y$  方向周期性排列,背景材料为空气,折射率  $n_1 = 1$ ,光子晶体材料为  $\text{SiO}_2$ ,由于  $\text{SiO}_2$  材料在可见光谱段内折射率变化较小,所以取其折射率  $n_2 = 1.52$ ,认为其不随波长的变化而改变,以简化计算。图 1(b)为矩孔光子晶体在  $x$ - $y$  平面的结构示意图,光子晶体沿  $y$  方向共  $m$  层矩孔阵列,沿  $x$  方向存在  $k$  个周期,入射光沿  $y$  轴负方向入射至光子晶体中,p 偏振平行于  $x$  轴,s 偏振垂直于  $x$ - $y$  平面(平行于  $z$  轴)。由于  $z$  方向的长度远大于光栅层光栅周期, $z$  方向矩孔长度对仿真计算的影响可以忽略不计,所以本研究仅对  $x$ - $y$  平面进行二维仿真运算。

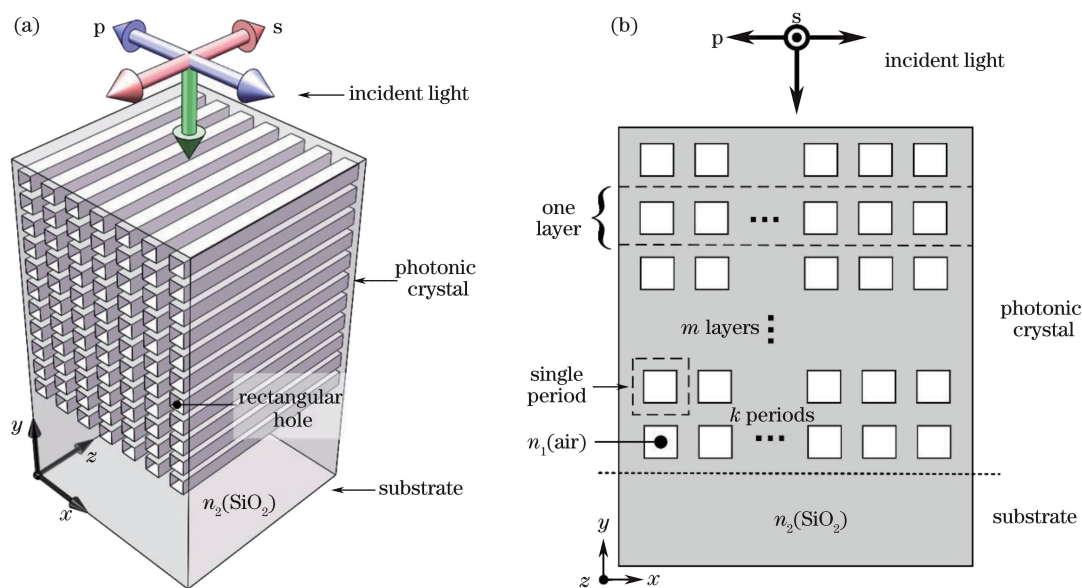


图 1 矩孔光子晶体结构示意图。(a)三维模型; (b)  $x$ - $y$  平面二维示意图

Fig. 1 Schematic of photonic crystal with periodic rectangular holes. (a) Three-dimensional model; (b) two-dimensional model in  $x$ - $y$  plane

### 2.2 等效模型构建

图 2(a)为单层矩孔阵列中的单位周期结构,由两个等厚的  $\text{SiO}_2$  介质层以及中间  $\text{SiO}_2$ -air 光栅层构成;图 2(b)为等效层结构,对  $\text{SiO}_2$ -air 光栅层进行等效。光栅厚度为  $d_1$ ,  $\text{SiO}_2$  膜厚度为  $d$ ,其中

$d_1 = 2d$ 。为了表述方便,后面用  $d$  表示厚度这一几何参量;光栅周期为  $\Lambda_{\text{grating}}$ ,其中空气在单位周期内宽度为  $a$ ,因此  $\text{SiO}_2$  填充比为  $f = 1 - \frac{a}{\Lambda_{\text{grating}}}$ 。

由于设计的光栅周期  $\Lambda_{\text{grating}}$  远小于波长,所以

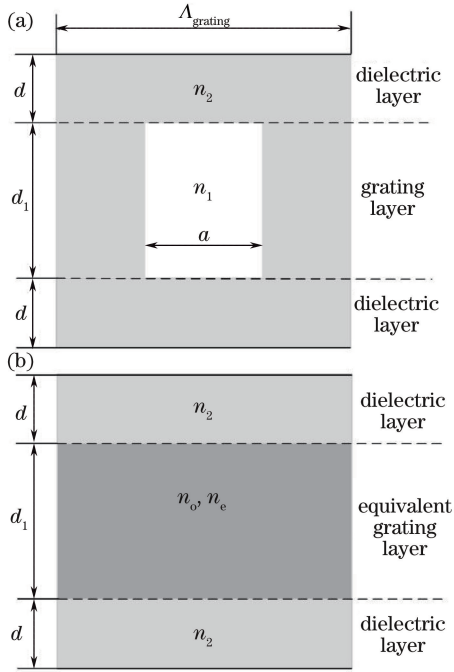


图2 模型示意图。(a)单周期结构；(b)等效层结构  
Fig. 2 Schematic of model. (a) Singly periodic structure; (b) equivalent layered structure

忽略光栅的衍射特性。根据等效介质理论<sup>[27-28]</sup>，可以得到平行于光栅方向的等效折射率  $n_o$  与垂直于光栅方向的等效折射率  $n_e$ ：

$$n_o = [fn_2^2 + (1-f)n_1^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$n_e = \left[ \frac{f}{n_2^2} + \frac{(1-f)}{n_1^2} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

如图3所示，s, p 偏振仅在  $f=0$  或者 1 的时候相等 ( $n_o=n_e$ )，在  $0 < f < 1$  时，光栅层可以等效为双折射材料层，平行于 s 偏振方向的折射率为  $n_o$ ，平行于 p 偏振方向的折射率为  $n_e$ ，且  $n_o > n_e$  对应不同材料的两个膜系，使偏振陷波特性的成为可能。

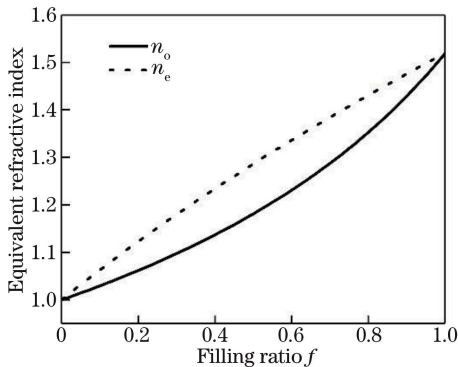


图3 等效折射率随光栅层填充比  $f$  的变化曲线  
Fig. 3 Equivalent refractive index versus filling ratio  $f$  of grating layer

### 2.3 Rugate 理论分析

单位周期内，如图2(b)所示，对应 s 偏振的折射率分布可以表示为  $n_2 - n_o - n_2$ ，对应 p 偏振的折射率分布可以表示为  $n_2 - n_e - n_2$ ，均满足 Rugate 理论<sup>[8-9]</sup>

$$n(x) = n_a + \frac{n_p}{2} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0} x\right), \quad (3)$$

式中： $n(x)$  为折射率随光学厚度的变化； $n_a$  为一个纵向周期中的平均折射率； $n_p$  为一个纵向周期中的折射率变化幅值； $\lambda_0$  为陷波滤波的中心波长，与光程  $P$  有关，可以表示为

$$\lambda_0 = n_a P. \quad (4)$$

s 偏振与 p 偏振的中心波长分别为

$$\lambda_{0s} = 2(n_2 + n_o)d, \quad (5)$$

$$\lambda_{0p} = 2(n_2 + n_e)d. \quad (6)$$

陷波滤波的截止带宽也是偏振陷波特性的主要因素，对于 Rugate 结构，截止带带宽可以表示为

$$B = \lambda_0 \left| \frac{n_p}{n_a} \right|, \quad (7)$$

对于该模型，s 偏振与 p 偏振的截止带带宽  $B_s, B_p$  分别为

$$B_s = \lambda_{0s} \left| \frac{n_o - n_2}{n_o + n_2} \right|, \quad (8)$$

$$B_p = \lambda_{0p} \left| \frac{n_e - n_2}{n_e + n_2} \right|. \quad (9)$$

### 2.4 仿真模拟方法

利用介质传输矩阵<sup>[29]</sup>对矩孔光子晶体结构后 s 与 p 偏振透过率进行计算。SiO<sub>2</sub> 膜层为介质膜层，由于入射光为正入射，忽略入射角影响，可以得到 s 与 p 偏振的特征矩阵  $M_{\text{SiO}_2}$  相同：

$$M_{\text{SiO}_2} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{n_2} \sin \delta_1 \\ in_2 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_1$ 。单位光栅周期 p 偏振与 s 偏振

的传输矩阵  $M_{\text{unit}_p}$  和  $M_{\text{unit}_s}$  分别为

$$M_{\text{unit}_p} = \begin{bmatrix} \cos \delta_p & \frac{i}{n_e} \sin \delta_p \\ in_e \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M_{\text{unit}_s} = \begin{bmatrix} \cos \delta_s & \frac{i}{n_o} \sin \delta_s \\ in_o \sin \delta_s & \cos \delta_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中： $\delta_p = \frac{2\pi}{\lambda} n_e d_1$ ， $\delta_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_o d_1$ ，可以得到单层矩孔阵列的特征矩阵  $M_{\Lambda p}$  与  $M_{\Lambda s}$  为

$$\mathbf{M}_{\Delta p} = \mathbf{M}_{\text{SiO}_2} \mathbf{M}_{\text{unit}_p} \mathbf{M}_{\text{SiO}_2}, \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_{\Delta s} = \mathbf{M}_{\text{SiO}_2} \mathbf{M}_{\text{unit}_s} \mathbf{M}_{\text{SiO}_2}. \quad (14)$$

对于整个光子晶体模型,纵向周期数为  $m$ , p 偏振方向与 s 偏振方向的传输矩阵  $\mathbf{M}_p$  与  $\mathbf{M}_s$  为

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{M}_{\Delta p}^m, \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_s = \mathbf{M}_{\Delta s}^m. \quad (16)$$

通过传输矩阵(15)、(16)式可以算出 p 偏振方向与 s 偏振方向在谱段 400~700 nm 内的透过率曲线。

### 3 仿真与分析

#### 3.1 中心波长

由(5)、(6)式可知,陷波中心波长  $\lambda_{0s}$  与  $\lambda_{0p}$  并不相同,导致 s 偏振为截止带时 p 偏振为通带, p 偏振为截止带时 s 偏振为通带,从而实现偏振陷波特性的。分别分析填充比  $f$  以及厚度参数  $d$  对 s 偏振、p 偏振中心波长的影响,以及对应的偏振陷波特性的。

##### 3.1.1 填充比

在厚度  $d = 0.5 \mu\text{m}$ , 纵向周期层数  $m = 200$  的条件下,使填充比  $f$  在 0~1 之间变化,仿真得到的陷波滤波特性见图 4(a)、(b)。填充比  $f$  对 s, p 偏振中心波长的调节范围仅为 500~600 nm, 受材料折射率变化幅度限制,调节能力有限。填充比  $f = 0$

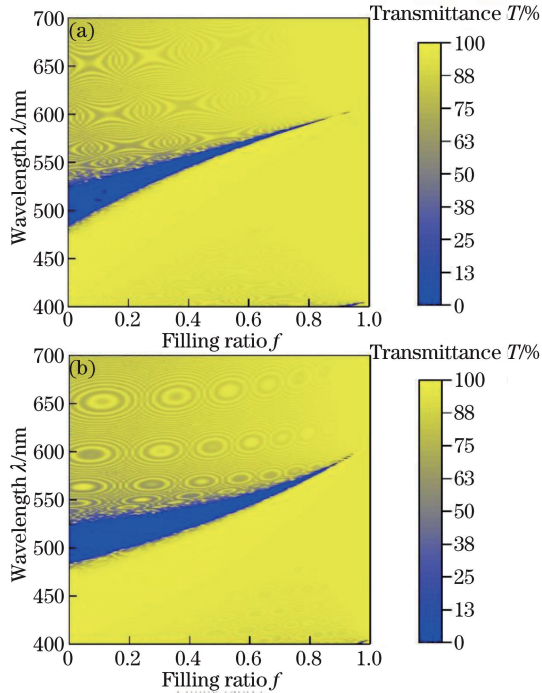


图 4 可见光谱段内陷波滤波特性随光栅层填充比  $f$  和波长的变化。(a) s 偏振; (b) p 偏振

Fig. 4 Notch filtering features of visible light spectra versus filling ratio  $f$  of grating layer and wavelength. (a) s polarization; (b) p polarization

时,  $\lambda_{0s}$  与  $\lambda_{0p}$  相同, s 偏振与 p 偏振截止带完全重合, 无偏振特性; 当填充比  $f$  在 0~0.37 之间时, 虽然两个偏振方向上的陷波中心波长不同, 但 s 偏振与 p 偏振截止带会有重合区域, 也不能完全实现偏振陷波; 填充比  $f > 0.9$  时, 虽然 s 偏振与 p 偏振截止带不重合, 但截止带透过率上升, 影响陷波截止能力, 当填充比  $f > 0.92$  时, s 偏振和 p 偏振截止带消失。因此, 只有在  $0.37 < f < 0.9$  时, 可以实现偏振陷波, 且截止带透过率为 0。综上所述, 仅改变填充比  $f$ , 可以调节 s 偏振和 p 偏振中心波长, 但调节能力差; 且填充比  $f$  对 s, p 偏振的陷波带宽影响大, 不能很好地实现偏振陷波设计。

##### 3.1.2 厚度

将填充比  $f$  固定为 0.6, 纵向周期层数保持不变 ( $m = 200$ ), 使厚度  $d$  在 70~130 nm 之间变化, 仿真得到的陷波滤波特性见图 5(a)、(b)。可见, 厚度  $d$  在 70~130 nm 之间时, s 偏振与 p 偏振均可以实现中心波长 400~700 nm 的变化, 且随厚度  $d$  的增加, 中心波长向长波方向偏移。对比图 5(a) 与 (b) 可见, s 偏振中心波长始终大于 p 偏振中心波长, 且中心波长间距为  $(n_o - n_e)d$ , 因此波长间距与厚度成正比。改变厚度  $d$ , s 偏振与 p 偏振的

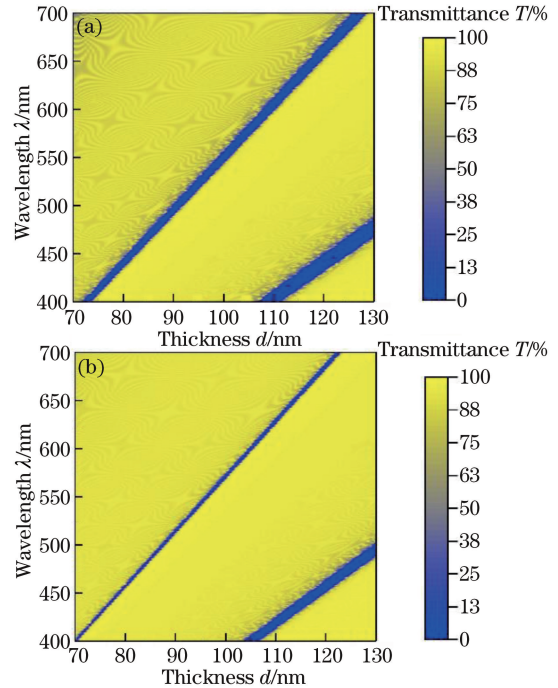


图 5 可见光谱段内陷波滤波特性随厚度  $d$  和波长的变化:(a) p 偏振; (b) s 偏振

Fig. 5 Notch filtering features of visible light spectra versus thickness  $d$  and wavelength. (a) p polarization; (b) s polarization

带宽变化较小,但随着设计的中心波长增加,截止带宽均有增加。综上分析,通过对厚度  $d$  的调节,可以获得可见光谱段任意位置的中心波长,且在  $400\sim 700\text{ nm}$  内,保持 s 偏振、p 偏振半峰全宽相对稳定,对偏振陷波的破坏产生的影响比较小。若综合调节厚度  $d$  与填充比  $f$ ,可以更好地实现窄带偏振陷波。

### 3.2 陷波带宽

对特定波长下不同填充比情况下的陷波带宽特性进行研究。对于结构确定的矩孔阵列光子晶体,其等效折射率  $n_o$  与  $n_e$  也确定。为保持中心波长不变,对于特定中心波长  $\lambda_o$ ,填充比  $f$  与厚度  $d$  满足

$$d = \frac{\lambda_o}{2(n_1 + n_2)} \quad (17)$$

由于  $n_o > n_e$ , p 偏振截止带宽始终大于 s 偏振,所以 p 偏振具有更广的带宽调节范围,更容易实现带宽的控制。因此针对 p 偏振为偏振陷波进行研究,保持 p 偏振陷波中心波长、厚度、层数不变,选中心波长  $435, 485, 535, 585, 635, 685\text{ nm}$  进行仿真分析。

透过率  $T < 10^{-3}$  的区域为截止区域。在以上中

心波长下,截止区域的陷波滤波特性与不同填充比  $f$  的关系如图 6 所示,图 6 中纵坐标表示填充比变化,横坐标为波长,每个中心波长的横坐标范围为  $(\lambda_o - 35) \sim (\lambda_o + 35)\text{ nm}$ ,淡蓝色区域为 p 偏振截止区域,黄色区域为 s 偏振截止区域,红色区域为 s 偏振与 p 偏振同时实现截止的区域。可见随着填充比的增加,s 偏振与 p 偏振截止带宽均逐渐减小。当填充比为 0 时,光栅层变为均质层,s 偏振与 p 偏振带宽相同,中心波长也相同。同时,当填充比  $f < 0.37$  时,s 偏振与 p 偏振截止带具有重合区域,而当  $f > 0.37$  时,s 偏振与 p 偏振不存在截止区域重叠,而且临界点填充比  $f = 0.37$  不随中心波长的变化而变化。表 1 为不同填充比以及中心波长下的陷波带宽,可以看出在填充比相同的情况下,s 偏振与 p 偏振的带宽会随着中心波长的增加而增加,且填充比增加时,带宽减小。随着填充比的增加,带宽逐渐减小,当填充比  $f > 0.9$  时,s 偏振截止带消失,当填充比  $f > 0.97$  时,p 偏振截止带消失。综上所述,在特定波长下,填充比  $f$  对带宽的影响很大,综合调节  $f$  与  $d$ ,可以实现特定带宽的 p 偏振的偏振陷波特性,并且带宽的大小也会影响陷波带的截止能力。

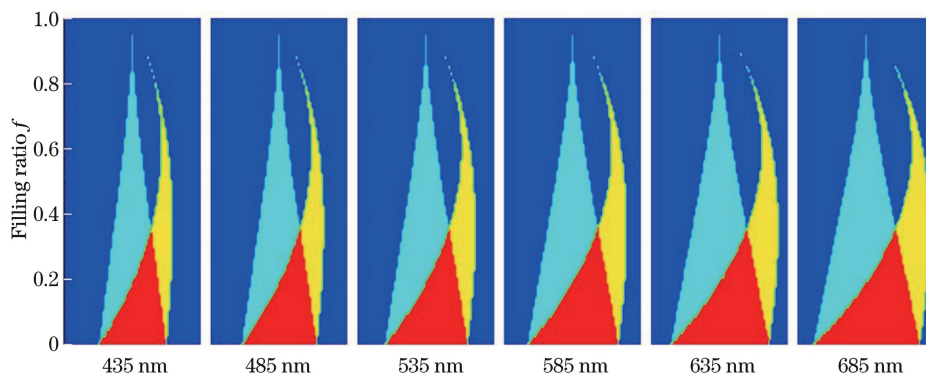


图 6 陷波滤波特性在不同陷波中心波长(435, 485, 535, 585, 635, 685 nm)的情况下随填充比  $f$  的变化关系

Fig. 6 Notch filtering features of visible light spectra with central wavelengths of 435, 485, 535, 585, 635, 685 nm versus filling ratio  $f$

表 1 不同中心波长下, p 偏振与 s 偏振在填充比  $f = 0.37, 0.5, 0.75$  时的陷波带宽

Table 1 Notch filtering band widths for p polarization and s polarization when filling ratios  $f$  are 0.37, 0.5, 0.75 and central wavelengths are different nm

$\lambda_o$	$f = 0.37$		$f = 0.5$		$f = 0.75$	
	$B_p$	$B_s$	$B_p$	$B_s$	$B_p$	$B_s$
435	19	11	13	7	5	1
485	21	12	15	8	5	2
535	24	13	17	7	5	2
585	26	14	18	8	7	2
635	28	16	19	9	7	2
685	30	17	21	10	7	3

### 3.3 纵向周期数

上述仿真中,纵向周期层数均为 200,而在同一中心波长的情况下,随着半峰全宽的减小,截止区域透过率逐渐增加。下面讨论不同周期层数下中心波长处透过率与半峰全宽的关系。由于同一波长下,半峰全宽与折射率差有关,因此填充比与折射率差有直接关系,仿真得到不同填充比下,中心波长处透过率与周期层数的关系曲线,见图 7。

图 7(a)、(b)分别为 p 偏振与 s 偏振在填充比 0.1~0.9 的情况下,透过率与周期层数的关系曲线。

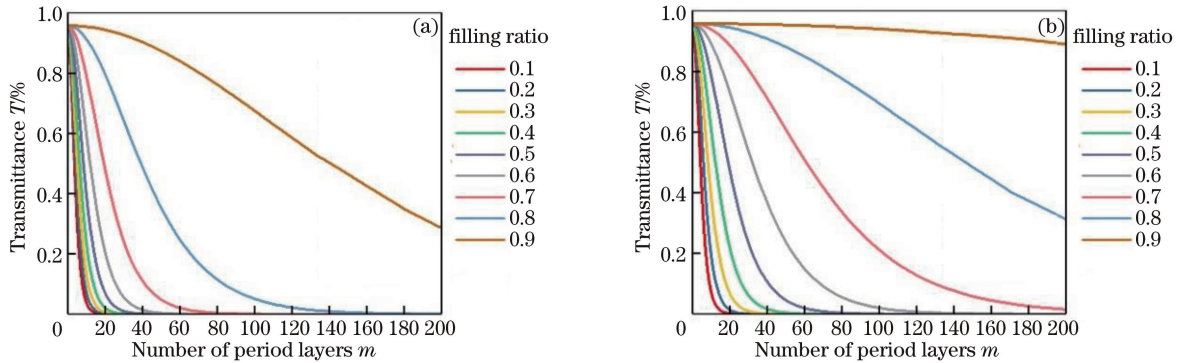


图 7 填充比分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 时,中心波长处透过率与周期层数  $m$  的关系曲线。  
(a) p 偏振; (b) s 偏振

Fig. 7 Transmittance at central wavelength versus periodic layer number  $m$  when filling ratios are 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. (a) p polarization; (b) s polarization

表 2 不同填充比下,s 偏振与 p 偏振的透过截止的周期层数、截止带宽  $B$  以及最小透过率  $T_{\min}$

Table 2 Layer number, notch band width  $B$  and minimum transmittance  $T_{\min}$  for p polarization and s polarization under different filling ratios

$f$	p polarization			s polarization		
	$m$	$B$ /nm	$T_{\min}$	$m$	$B$ /nm	$T_{\min}$
0.1	29	31	0	34	28	0
0.2	34	28	0	47	20	0
0.3	41	23	0	66	14	0
0.4	51	18	0	96	10	0
0.5	66	14	0	149	6	0
0.6	94	10	0	200	3	0
0.7	150	6	0	200	1	0
0.8	200	1	0	200	—	0.3071
0.9	200	—	0.2864	200	—	0.9478

### 3.4 设计实例

综上所述,利用对填充比  $f$  以及厚度  $d$  的调控,设计 400~700 nm 间的偏振窄带陷波滤波结构,针对 417,497,582,685 nm 的中心波长,设计了带宽为 10 nm 的偏振窄带陷波滤波结构,其纵向周期数为 200。分别在填充比为 0.51, 0.56, 0.59, 0.62 以及厚度为 0.077, 0.091, 0.106, 0.124  $\mu\text{m}$  时仿真得到图 8,并利用 FDTD 进行仿真验证。

图 8(a)、(b)、(c)、(d)分别为陷波中心波长为

p 偏振与 s 偏振均随层数的增加而逐渐减小。图 7(a)为 p 偏振的关系曲线,可以看出,填充比越小,半峰全宽越大,其截止速度越快,陷波带截止能力越强。当填充比小于 0.5 时,在层数  $m=25$  之前,中心波长的透过率为 0。同时得到表 2,当填充比较小时,折射率幅值大,较少的纵向周期数即可获得截止区域;当填充比增加,一个周期内折射率幅值减小;当幅值很小,纵向周期数  $m=200$  时,截止区域不为 0,且随着幅值的减小,截止区域透过率逐渐上升。

417,497,582,685 nm 的陷波滤波特性在波长 400~700 nm 之间的透过率关系曲线。图 8 中,p 与 s 曲线表示利用传输矩阵仿真得到的计算结果, $p_0$  与  $s_0$  曲线表示 FDTD 仿真结果。可以看出传输矩阵仿真结果与 FDTD 仿真结果基本一致,p 偏振陷波波段内,p 偏振透过率为 0,而 s 偏振透过率大于 90%,且截止带宽为  $(10 \pm 1)$  nm,其余谱段,p 偏振和 s 偏振透过率均大于 80%。仿真结果表明,对于矩孔光子晶体结构,通过调节厚度  $d$  以及光栅层填

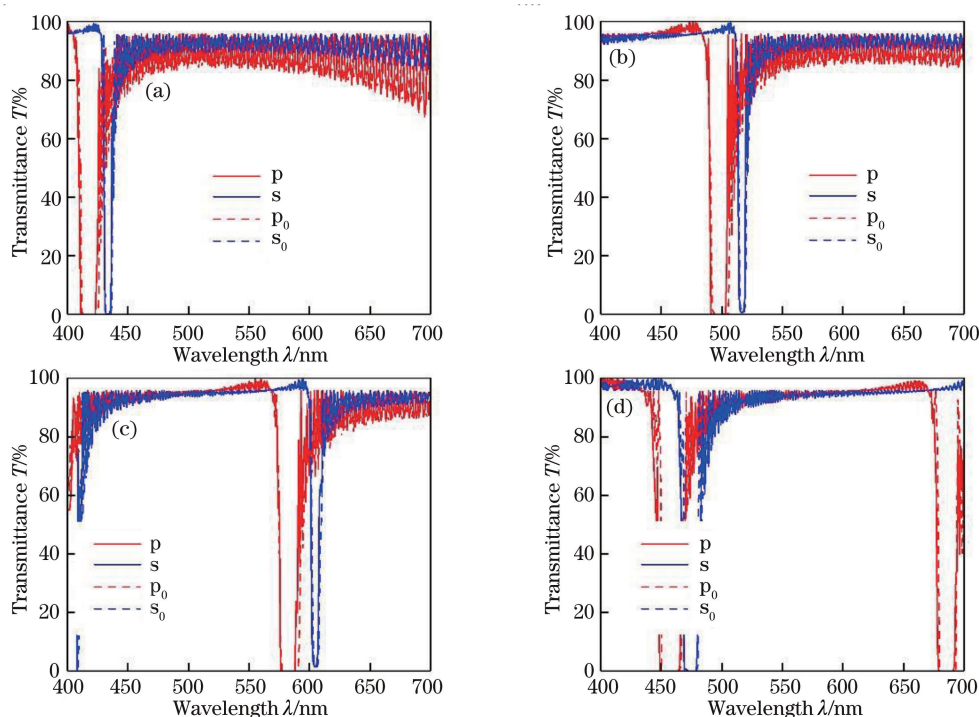


图 8 不同中心波长下可见光谱段内陷波滤波特性曲线。(a) 417 nm; (b) 497 nm; (c) 582 nm; (d) 685 nm

Fig. 8 Notch filtering features of visible light spectra under different central wavelengths.

(a) 417 nm; (b) 497 nm; (c) 582 nm; (d) 685 nm

充比,可以获得可见光谱段内的窄带偏振陷波特性。

## 4 结 论

通过理论分析及仿真模拟发现,调节矩孔光子晶体的光栅层填充比  $f$ 、厚度  $d$  以及纵向周期数  $m$ , 可以实现对  $s$ 、 $p$  偏振的陷波中心波长、陷波带宽以及陷波截止带透过率的控制,从而实现窄带偏振陷波滤波。并针对可见光谱段中,417, 497, 582, 685 nm 四个波段,设计了  $p$  偏振窄带陷波,在陷波波段, $p$  偏振透过率为 0,  $s$  偏振透过率大于 90%, 带宽为 10 nm, 误差为  $\pm 1$  nm。矩孔阵列光子晶体结构相比于传统薄膜材料,可以通过常用材料实现陷波滤波;相比于一般的材料,可以通过调节填充比满足更多的折射率需求。同时,将偏振特性加入到陷波滤波元件中,为矩孔光子晶体偏振陷波的进一步设计与制造提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Gong X, Hang L X, Huang F B. Preparation technology of 1550 nm notch filter[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 118-123.  
龚勋, 杭凌侠, 黄发彬. 1550 nm 陷波滤光片制备工艺技术研究[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 118-123.
- [2] Liu F Y, Wu X M, Zhang Y S, *et al.* Film coating

for narrow-band negative filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s2): 188-190.

刘凤玉, 吴晓鸣, 张元生, 等. 窄带负滤光片膜层的制备[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s2): 188-190.

- [3] Gao P, Yin X J, Zhao S F, *et al.* Notch filter designed by a quasi-rugate method[J]. Optical Instruments, 2013, 35(6): 82-90.

高鹏, 阴晓俊, 赵帅锋, 等. 陷波滤光片的类褶皱设计[J]. 光学仪器, 2013, 35(6): 82-90.

- [4] Xue P, Wang Z B, Zhang R, *et al.* Highly efficient measurement technology based on hyperspectropolarimetric imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0811001.

薛鹏, 王志斌, 张瑞, 等. 高光谱全偏振成像快捷测量技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0811001.

- [5] Wang X L, Wang F, Liu X, *et al.* Hyperspectral polarization characteristics of typical camouflage target under desert background[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 0511011.

王小龙, 王峰, 刘晓, 等. 荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 0511011.

- [6] Wu Z H, Sun M S, Wang Q, *et al.* Photoacoustic microscopy image resolution enhancement via directional total variation regularization[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 121701-121705.

- [7] Kraus J, Lyngnes O. Design of optical notch filters

- using apodized thickness modulation[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): A21-A26.
- [8] Bovard B G. Rugate filter theory: an overview [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(28): 5427-5442.
- [9] Aguayo-Ríos F, Villa-Villa F, Gaspar-Armenta J A. Dichroic rugate filters[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(3): 495-500.
- [10] Huang H, Winchester K J, Suvorova A, *et al.* Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 435(6): 453-459.
- [11] Swart P L, Bulkin P V, Lacquet B M. Rugate filter manufacturing by electron cyclotron resonance plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiN<sub>x</sub> [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(4): 1214-1219.
- [12] Zhu H F, Song L K, Zheng C H, *et al.* Study of light intensity transmission of crystal polarizing prisms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 204-207.  
朱化凤, 宋连科, 郑春红, 等. 晶体偏光棱镜光强透射比研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(2): 204-207.
- [13] Zhang Z G, Dong F L, Zhang Q C, *et al.* Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184204.  
张志刚, 董凤良, 张青川, 等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184204.
- [14] Gruev V, Perkins R, York T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.
- [15] Kim J H, Cho Y T, Jung Y G. Selection of absorptive materials for non-reflective wire grid polarizers[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(7): 903-908.
- [16] Li M Y, Gu P F. Optimal design of two-dimensional photonic crystal polarization splitters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2358-2363.  
李明宇, 顾培夫. 光子晶体偏振分光镜的优化设计[J]. *物理学报*, 2005, 54(5): 2358-2363.
- [17] Luo J, Liu D, Xu P T, *et al.* High-precision polarizing beam splitting system based on polarizing beam splitter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1210001.  
罗敬, 刘东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1210001.
- [18] Gruev V, Ortu A, Lazarus N, *et al.* Fabrication of a dual-tier thin film micropolarization array[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4994-5007.
- [19] Kulkarni M, Gruev V. Integrated spectral-polarization imaging sensor with aluminum nanowire polarization filters [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 22997-23012.
- [20] Zhang X X, Chen H M. Design and performance analysis of photonic crystal polarizing beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011301.  
张信祥, 陈鹤鸣. 光子晶体偏振分束器的设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011301.
- [21] Lin M, Qiu W B, Xi X, *et al.* Polarization selective power splitters for TE and TM waves based on two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1223001.  
林密, 邱文标, 郗翔, 等. 基于二维光子晶体的偏振选择 TE/TM 波功率分配器[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1223001.
- [22] Zhang J K, Zhao D P, Wang J C, *et al.* Thermal infrared pattern painting based on photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1216001.  
张继魁, 赵大鹏, 汪家春, 等. 基于光子晶体的热红外迷彩[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1216001.
- [23] Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [24] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S H. Photonic crystals: putting a new twist on light[J]. *Nature*, 1997, 386(6621): 143-149.
- [25] Michael A, Hafiz A A, Puzzer T, *et al.* Deposition and characterization of thick graded index Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub> films with low stress[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 178(4): 110-117.
- [26] Lalanne P. Effective medium theory applied to photonic crystals composed of cubic or square cylinders[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(27): 5369-5380.
- [27] Lalanne P, Lemercler-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(10): 2063-2085.
- [28] Campbell G, Kostuk R K. Effective-medium theory of sinusoidally modulated volume holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1113-1117.
- [29] Wang Q Y, Qi H J, He H B, *et al.* Design and manufacture of birefringent non-polarizing thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2154-2158.  
王晴云, 齐红基, 贺洪波, 等. 双折射消偏振膜的设计和制备[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2154-2158.