

## 基于黑色层纳米薄膜的可重构可见光滤波器

张金英<sup>1,2\*</sup>, 王瑞<sup>1,2\*\*</sup>, 王炳楠<sup>1,2</sup>, 郝凯子<sup>1,2</sup>, 李德芳<sup>1,2</sup>, 李卓<sup>1,2</sup>, 王欣<sup>1,2</sup>, 杨苏辉<sup>1,2</sup><sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;<sup>2</sup>精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

**摘要** 基于铁电材料的介电可调特性,提出一种新颖的基于黑色层纳米薄膜的可重构可见光滤波器,并比较了它与一维光子晶体滤波器反射光谱的可重构特性。实验结果表明,利用黑色层吸收非相干散射光可显著提高反射颜色对比度。当钛酸钡(BTO)薄膜的厚度从 100 nm 变为 140 nm 时,反射光谱的峰值波长由 383.7 nm 移动至 501.2 nm,纳米薄膜的反射颜色从紫色变为蓝绿色。反射光谱的测试结果与有限元的模拟结果一致性良好。计算结果表明,当 BTO 薄膜的厚度为 170 nm 时,在 21.8 V 直流驱动电压下,其折射率由 2.4 变化至 2.0,反射峰值波长由 595.3 nm 移动至 513.9 nm。

**关键词** 薄膜; 可见光滤波器; 可重构; 一维光子晶体; 钛酸钡; 黑色层

中图分类号 TN202

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2231001

## A Reconfigurable Visible Light Filter Based on Nanofilms with a Black Layer

Zhang Jinying<sup>1,2\*</sup>, Wang Rui<sup>1,2\*\*</sup>, Wang Bingnan<sup>1,2</sup>, Hao Kaizi<sup>1,2</sup>, Li Defang<sup>1,2</sup>,  
Li Zhuo<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>, Yang Suhui<sup>1,2</sup><sup>1</sup> School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;<sup>2</sup> Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** A novel reconfigurable visible light filter based on nanofilms with a black layer was proposed in view of the tunable dielectric properties of ferroelectric materials. The reconfigurable performance of its reflection spectrum was compared with that of the one-dimensional photonic crystal filter. The experimental results demonstrate that the reflection color contrast is significantly improved by the black layer that absorbs the incoherent scattered light. When the thickness of the barium titanate (BTO) film changes from 100 nm to 140 nm, the peak wavelength of the reflection spectrum shifts from 383.7 nm to 501.2 nm, and the reflection color turns from purple to turquoise. The test results of the reflection spectra are in good agreement with the finite element simulation outcomes. According to the numerical results, when the BTO film is 170 nm thick, its refractive index decreases from 2.4 to 2.0 under 21.8 V direct-current (DC) driving voltage. Consequently, the peak wavelength of the reflection spectrum shifts from 595.3 nm to 513.9 nm.

**Key words** thin films; visible light filter; reconfigurability; one-dimensional photonic crystal; barium titanate; black layer

**OCIS codes** 310.6628; 310.6845; 230.7408

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-09; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018AAA0100301, 2018YFF01010304)、国家自然科学基金(61704166, 61875011)、北京理工大学学术启动计划(201904006)、中国博士后科学基金(2020TQ0036)

通信作者: \*jy Zhang@bit.edu.cn; \*\*3120190641@bit.edu.cn

## 1 引言

具有可重构功能的可见光滤波器在光学隐身、伪装及动态显示等领域具有良好的应用前景<sup>[1-5]</sup>。纳米结构色是一种实现可见光滤波的重要手段<sup>[6]</sup>，它可以通过多层纳米薄膜<sup>[7]</sup>以及二维或三维的纳米结构对反射光谱进行调控来实现。通过二维或三维的纳米结构来调控反射光谱主要是利用金属超表面(表面等离子体)、全电介质超表面(电和磁共振)以及超结构等<sup>[8-11]</sup>，这些方法虽然可以产生鲜艳的色彩，但由于缺乏大面积的纳米图案制备技术，它们在实际应用中受到了很大限制<sup>[12]</sup>。多层纳米薄膜不需要昂贵的纳米图案制备装置就能够产生鲜艳的色彩，因而在实际应用中具有更大的潜力。

目前主要有三种实现可重构纳米结构色的方法:机械拉伸<sup>[13-14]</sup>、相变材料<sup>[15-17]</sup>、电调谐<sup>[18-20]</sup>。机械拉伸通过柔性基板上的多层纳米薄膜或纳米结构来实现,其缺点是机械磨损大,可重复使用次数受限<sup>[21]</sup>。多个研究小组尝试利用相变材料实现纳米结构色<sup>[15, 22-23]</sup>。常用的相变材料有 VO<sub>2</sub>、GST (Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>)等,当温度变化时,相变材料可实现非晶态和结晶态之间的转换,从而实现折射率的大幅变化,对于波长为 500 nm 的可见光,其折射率变化范围为 3.2~3.6<sup>[22]</sup>,可实现颜色的大范围变化,但一方面温度变化缓慢导致调谐速度受到极大限制<sup>[19]</sup>,另一方面仅有结晶态和非晶态两个状态,颜色的可重构能力有限。电调谐方法具有调谐速度快、结构简单等优点,主要通过载流子注入、电光效应等方式实现可重构结构色。例如,在直流驱动电压下 ITO(氧化铟锡)的折射率因载流子注入可实现大幅变化,500 nm 波长的可见光的折射率变化范围为 1.7~2.1,但是载流子浓度大幅变化的深度仅为 5 nm 左右<sup>[24]</sup>,使得其对可见光反射光谱的调控作用极其有限。电光效应主要包括线性克尔(Kerr)效应和非线性普克尔(Pockels)效应。对于大多数电光材料来说,基于 Kerr 效应的折射率变化  $\Delta n_{\text{Kerr}}$  为  $10^{-2} \sim 10^{-6}$ ,基于 Pockels 效应的折射率变化  $\Delta n_{\text{Pockels}}$  为  $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ,调谐范围均很有限。因此,如何实现大范围调谐和快速调谐,是研究人员需要解决的重要问题。钛酸钡(BTO)是一种重要的铁电材料,其几个晶向具有较高的电光系数( $r$ )<sup>[25]</sup>,例如其  $r_{15}$  在可见光波段达到 1300 pm/V 以上,且调控速度可达微秒量级及以下,从而在大范围、快速的可重构可见光滤波器方面具有巨大的应用潜力。

本文基于铁电材料在可见光波段显著的介电可调特性(电光效应),提出一种新颖的基于黑色层纳米薄膜结构的可重构可见光滤波器,并将其与一维光子晶体(1DPC)结构滤波器的反射光谱可重构特性进行了比较。所提出的新颖结构在白光入射时,仅反射某个波段的可见光,且能够通过施加电压调控反射光谱的通带,从而构成具有可重构特性的可见光滤波器。该新颖结构具有结构简单、制备方便、调谐速度快等显著优势,在变色变谱等应用中具有巨大潜力。对于一维光子晶体结构,采用传输矩阵法<sup>[26-28]</sup>研究了反射光谱的调谐特性;对于所提出的基于黑色层的纳米薄膜结构,采用有限元法研究了反射光谱的调谐特性。此外,比较了二者的颜色变化特性,发现实验制备的基于黑色层的纳米薄膜结构样品呈现出与理论设计一致的反射光谱和颜色。

## 2 一维光子晶体结构的反射光谱可重构特性

### 2.1 计算一维光子晶体结构反射光谱的传输矩阵法

一维光子晶体的反射光谱特性可采用传输矩阵法计算。当光入射到一维光子晶体,用传输矩阵来描述每层介质入射面和出射面的电场和磁场的关系。第  $k$  层的传输矩阵表示为

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \delta_k & -\frac{i}{\eta_k} \sin \delta_k \\ -i\eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\eta_k$  为第  $k$  层介质的阻抗; $\delta_k$  为第  $k$  层介质的相移。

$$\begin{cases} \delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_k d_k}{\cos \theta_k} \\ \eta_k = \frac{\sqrt{\epsilon_k / \mu_k}}{\cos \theta_{\text{TM}-k}} \\ \eta_k = \sqrt{\epsilon_k / \mu_k} \cos \theta_{\text{TE}-k} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $n_k$  为第  $k$  层介质的折射率; $d_k$  为第  $k$  层介质的厚度; $\epsilon_k$  和  $\mu_k$  分别为第  $k$  层介质的介电常数和磁导率;折射角  $\theta_k$  可根据斯奈尔定律计算

$$n_k \sin \theta_k = n_{k-1} \sin \theta_{k-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0. \quad (3)$$

对于由  $m$  层介质构成的一维光子晶体,可看作  $m$  个传输矩阵的级联。即将每一层对应的传输矩阵相乘,得到  $m$  层介质的等效传输矩阵,即由  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{21}$ 、 $m_{22}$  组成的矩阵。 $m$  层介质的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^m \mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

基于该传输矩阵,可得到  $m$  层介质入射面和出射面的电场和磁场的对应关系:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1} \\ H_{m+1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则入射电磁波的反射系数由以下关系式导出:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_m) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_m)}{(m_{11} + m_{12} p_m) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_m)}, \quad (6)$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \cos \theta_1, \quad (7)$$

$$p_m = \sqrt{\frac{\epsilon_m}{\mu_m}} \cos \theta_m. \quad (8)$$

根据反射系数可求得一维光子晶体的反射光谱:

$$R = |r|^2. \quad (9)$$

## 2.2 一维光子晶体结构的反射光谱可重构特性

为使一维光子晶体结构具有灵活的反射光谱可重构特性,需要周期性结构中两种介质层均具有介电可调特性. 钛酸锶钡作为一种典型的铁电材料,在可见光波段也具有良好的介电可调性,因此通过选择不同组分的钛酸锶钡可获得一维光子晶体所需的两种折射率不同但均具有介电可调特性的介质层. 假定这两种介质层的厚度分别为  $d_H =$

62.5 nm,  $d_L = 68.2$  nm, 初始折射率分别为  $n_H = 2.4$  和  $n_L = 2.2$ . 如果在施加直流驱动电压后,两种介质层的折射率分别变为  $n_H = 2.2$  和  $n_L = 2.0$ .

在一维光子晶体中,当周期数为无限大时,一维光子晶体的带隙  $\Delta\omega$  与折射率  $n_1, n_2$  及中心频率  $\omega_C$  有关. 当周期数不满足无限大时,周期数及介质层的排布方式也对带隙有重要影响. 本文以透明的玻璃为基底,计算了 4 种排布方式的反射光谱,分别是  $(HL)^N, L(HL)^N, (LH)^N$  和  $H(LH)^N$ , 其中  $N$  表示光子晶体的周期数, H 表示高折射率的材料, L 表示低折射率的材料. 计算结果表明,当周期数  $N$  为 40 时,如图 1 所示,此时 4 种排布方式具有基本相同的反射光谱特性,表明周期数和排布方式对反射光谱几乎没有影响. 而当周期数  $N$  为 5 时,如图 2 所示,4 种排布方式的反射光谱特性差异很大,其中  $H(LH)^5$  排布在设计反射波长处具有显著的反射单峰,可控性高,效果最佳. 这证明了当周期数有限时,周期数和排布方式都对反射光谱有重要影响. 对比图 1(a)和图 2(a)可以看出,在同一种排布方式下,随着周期数的增加,反射峰的幅值增加而带宽减小. 因此需根据不同的应用需求合理选择周期数及设计排布方式.

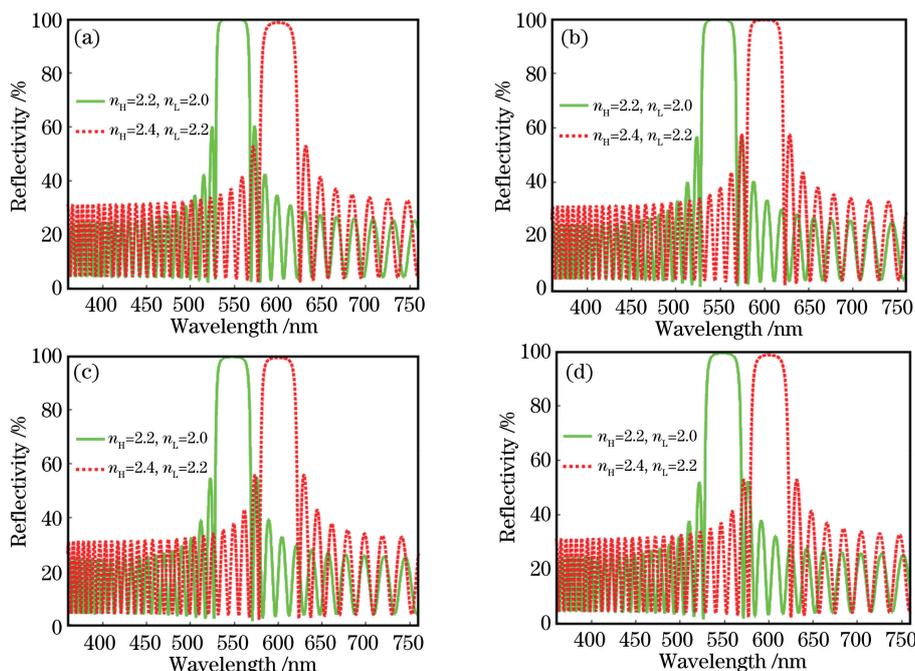


图 1 计算的 360~760 nm 波段、周期数  $N=40$  时一维光子晶体结构的 4 种排布方式下的反射光谱。

(a)  $H(LH)^{40}$ ; (b)  $(LH)^{40}$ ; (c)  $(HL)^{40}$ ; (d)  $L(HL)^{40}$

Fig. 1 Calculated reflection spectra of 1DPC with period of  $N=40$  in four arrangements in the range of

360 nm to 760 nm. (a)  $H(LH)^{40}$ ; (b)  $(LH)^{40}$ ; (c)  $(HL)^{40}$ ; (d)  $L(HL)^{40}$

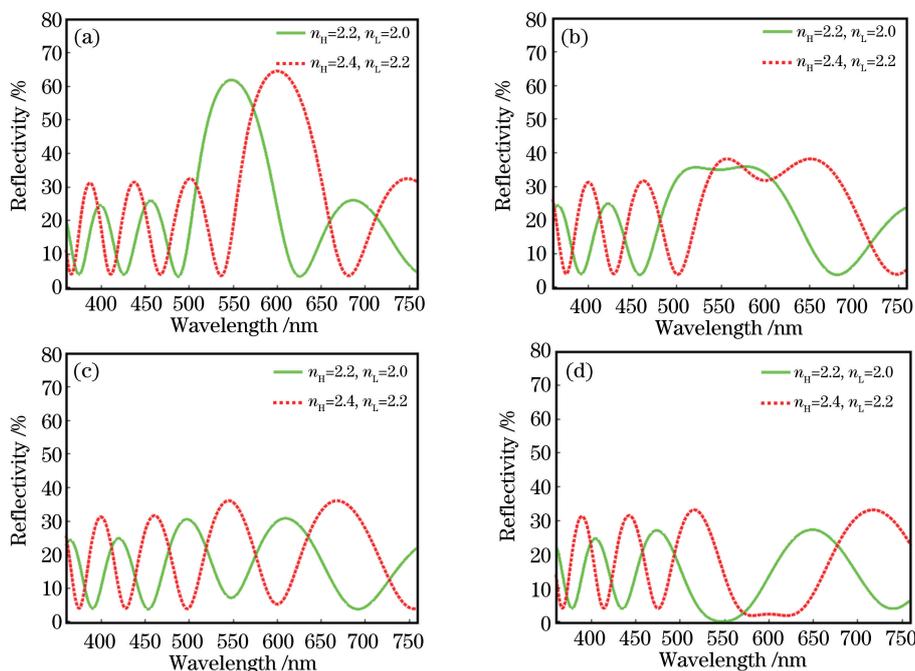


图 2 计算的 360~760 nm 波段、周期数  $N=5$  时一维光子晶体结构的 4 种排布方式下的反射光谱。

(a)  $H(LH)^5$ ; (b)  $(LH)^5$ ; (c)  $(HL)^5$ ; (d)  $L(HL)^5$

Fig. 2 Calculated reflection spectra of 1DPC with period of  $N=5$  in four arrangements in the range of 360 nm to 760 nm. (a)  $H(LH)^5$ ; (b)  $(LH)^5$ ; (c)  $(HL)^5$ ; (d)  $L(HL)^5$

如图 1(a)和图 2(a)所示,反射光谱中反射峰的中心波长均从 600.6 nm 移动至 549.0 nm。基于周期数  $N=5$  的反射光谱,在 D65 光源  $2^\circ$  视场下计算其反射颜色,并在 CIE 1931 颜色空间色度图上标注折射率变化前后的反射颜色,结果如图 3 所示。可以看出,加驱动电压后反射颜色由红色变为绿色。

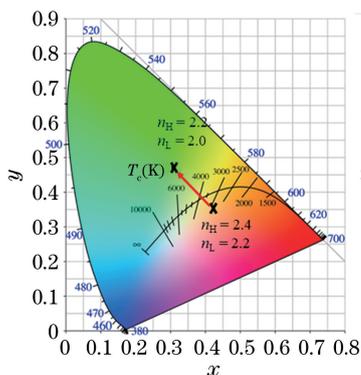


图 3  $H(LH)^5$  型一维光子晶体结构的反射光谱对应应在 CIE 1931 标准色度图的输出

Fig. 3 The corresponding color outputs mapped in the CIE 1931 for  $H(LH)^5$  1DPC structure

### 3 黑色层纳米薄膜结构的反射光谱可重构特性

本文提出一种新颖的基于黑色层纳米薄膜结构

的可重构可见光滤波器。为了分析其反射光谱的调谐特性、颜色可重构特性及结构方面的特性与优势,将基于黑色层纳米薄膜结构与一维光子晶体结构进行了比较研究。

在前述一维光子晶体结构中,实现反射光谱的大幅变化需要每层介质层的折射率均发生变化,例如在  $H(LH)^5$  结构中,六层高折射率膜的折射率从 2.4 变化至 2.2,同时五层低折射率膜的折射率从 2.2 变化至 2.0,才可实现反射峰的中心波长由 600.6 nm 变化至 549.0 nm。要实现电调谐功能,每层介质膜的上下两个表面都需增加电极层,这在实际加工中难度极大。所提出的基于黑色层的纳米薄膜结构可以实现可重构的可见光滤波器,该结构仅需一层具有介电可调特性的薄膜,因此可选用钛酸钡(BTO)薄膜作为介质层。如图 4 所示,该结构由黑色层、透明玻璃基板和夹在两层 ITO 薄膜之间的 BTO 薄膜构成。利用黑色层吸收非相干散射光以提高反射光谱的对比度。ITO 导电薄膜用于提供驱动电压,BTO 薄膜用作功能材料实现折射率的电调控。当在两层 ITO 薄膜上施加驱动电压时,BTO 薄膜的折射率发生大幅变化。由于光的薄膜干涉效应,该结构可呈现与自然界色彩相近的颜色。ITO 薄膜和 BTO 薄膜的厚度分别为  $t_m$  和  $d_c$ 。

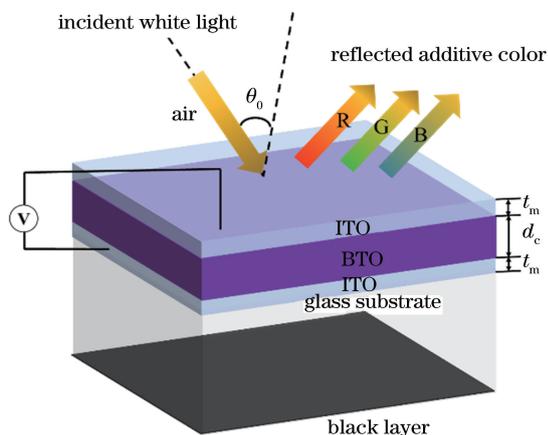


图 4 基于黑色层的 ITO/BTO/ITO 纳米薄膜结构示意图  
Fig. 4 Schematic of ITO/BTO/ITO nanofilms based on a black layer

### 3.1 纳米薄膜结构的有限元模型

采用有限元法 (FEM) 计算黑色层纳米薄膜结构的反射光谱特性。有限元法的基本思想是将求解域离散化, 并对每个子域进行求解后得到整个求解域的近似解。这类根据变分原理求解数学物理边值问题的算法在热传导、流体力学、电磁学等学科领域应用广泛。本文在 COMSOL Multiphysics 软件中建立有限元计算模型, 设置恰当的边界条件表达实验测试条件, 求解偏微分方程 (组) 获得对特定波长入射光的场分布特性和反射光谱特性。计算模型如图 5 所示, 为节省计算开销, 将求解域左、右两侧设置为周期性边界条件; 对于所提的黑色层纳米薄膜结构, 模型底部采用完美匹配层来模拟黑色层对入射光和背景杂散光的吸收特性 [图 5(a)]; 对于白色层纳米薄膜结构, 模型底部采用完美电导体模拟白色层的反射特性 [图 5(b)]; 模型上边界设置为端口边界条件以计算反射光谱。

### 3.2 纳米薄膜结构的反射光谱可重构特性

在透明石英玻璃基底上采用磁控溅射法生长厚度为 30 nm 的 ITO 薄膜, 直流功率为 150 W, 氩气和氧气的流速分别为 50 mL/min 和 2 mL/min。在 280 °C 下退火 2 h, ITO 薄膜变得更加透明, 且电导率提高了 72%。采用磁控溅射法在 ITO 薄膜上生长 BTO 薄膜, 射频功率为 120 W, 氩气和氧气的流速分别为 50 mL/min 和 10 mL/min。继续采用磁控溅射法生长厚度为 30 nm 的 ITO 薄膜, 并在 280 °C 下退火 2 h。图 6 所示为具有不同厚度的 BTO 膜样品。在图 6(a)~(c) 中, BTO 膜的厚度  $d_c$  为 100 nm; 在图 6(d)~(f) 中, BTO 膜的厚度  $d_c$  为 140 nm。在图 6(a)、(d) 中, 将所制备的样品放

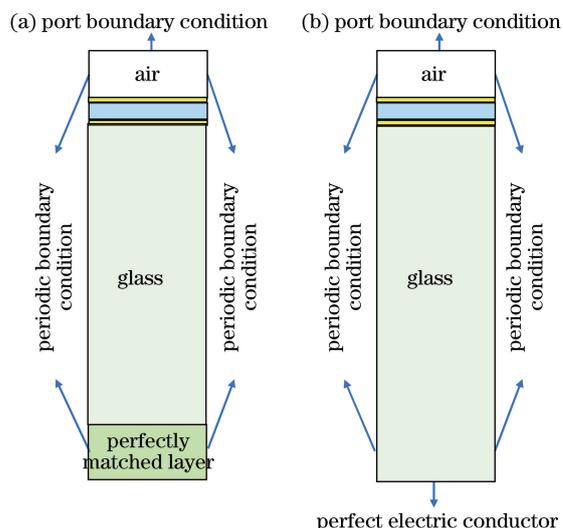


图 5 有限元模型。(a) 基于黑色层纳米薄膜的有限元模型; (b) 基于白色层纳米薄膜的有限元模型  
Fig. 5 FEM model. (a) FEM model of nanofilms based on a black layer; (b) FEM model of nanofilms based on a white layer

置在白色背景下。在图 9(c)、(f) 中, 将所制备的样品放置在黑色背景下。图 6(b)、(e) 显示了白色和黑色背景下颜色的对比情况: 1) 在白色背景下, 具有不同厚度的 BTO 膜样品均呈现透明并显示与白色层相同的颜色; 2) 在黑色背景下, 具有不同厚度的 BTO 膜样品均不再透明并显示不同的颜色, BTO 厚度为 100 nm 时显示紫色, 厚度为 140 nm 时显示蓝绿色; 3) 同一样品在白色背景和黑色背景下表现出显著的不同, 仅在黑色背景下呈现明显的颜色。

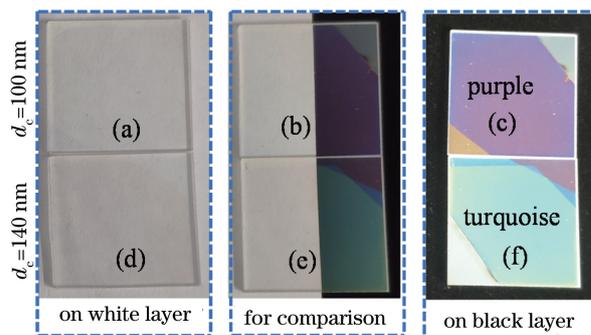


图 6 白色或黑色背景下具有不同厚度的 ITO/BTO/ITO 纳米薄膜样品的照片  
Fig. 6 Photos of the fabricated samples of ITO/BTO/ITO nanofilms with different thickness on white or black layers

采用有限元法计算了基于黑色层的纳米薄膜结构的反射光谱特性, 包括入射光照射下的能量分布和反射光谱。图 7 所示为 BTO 膜厚度为 140 nm 时样品在波长为 600.6 nm 的入射光照射下的能量分布。该结构因具有黑色层, 吸收了背景杂散光, 反

射光谱仅受到表面薄膜干涉的影响,样品的颜色仅与表面反射特性有关。因此,BTO 薄膜的厚度及折射率均可用于调控样品呈现的颜色。

基于黑色层的纳米薄膜结构在 360~760 nm 波长范围内的反射光谱如图 8(a)所示,实线为测量结果,虚线为有限元仿真计算结果。可以看到,实测结果与仿真结果吻合得较好。反射峰的位置受到 BTO 膜厚度的影响,反射峰的中心波长随 BTO 膜厚度的增加而红移。例如,厚度为 100 nm 的 BTO 膜反射峰中心波长位于 383.7 nm,厚度为 140 nm 的 BTO 膜反射峰中心波长位于 501.2 nm。根据该反射谱计算色度值,可确定其在 CIE 图中的位置,如图 9 所示,计算的颜色与图 6(c)、(f)中样品的颜色一致。图 8(b)所示为通过有限元计算得到的基于白色层的纳米薄膜结构的反射光谱,其在 360~760 nm 范围内的反射率接近 100%,因此呈现白色,与图 6(a)、(d)中样品的颜色一致。

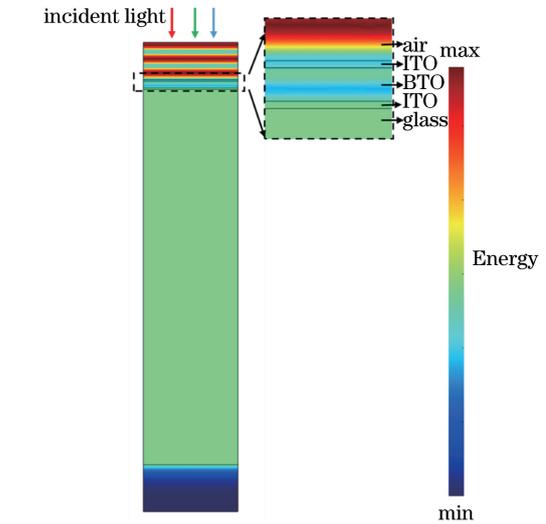
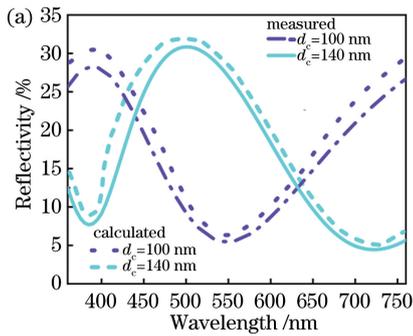


图 7 BTO 膜厚度为 140 nm 时样品在波长为 600.6 nm 入射光照下的能量分布

Fig. 7 Simulated energy distribution of the sample with BTO nanofilms of 140 nm thick at the wavelength of 600.6 nm

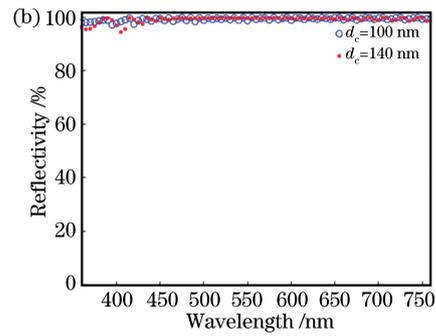


图 8 反射光谱结果。(a)具有黑色层样品的测量和仿真反射光谱;(b)具有白色层样品的仿真反射光谱

Fig. 8 Results of reflected spectra. (a) Simulated and measured reflected spectra of the samples with a black layer; (b) simulated reflected spectra of the samples with a white layer

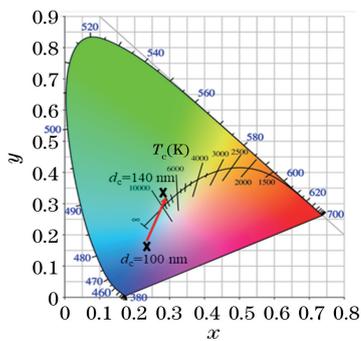


图 9 基于黑色层纳米薄膜结构的反射光谱对应于 CIE 1931 标准色度图的输出

Fig. 9 Corresponding color outputs mapped in the CIE 1931 for the proposed novel nano-film structure based on a black layer

BTO 是典型的铁电材料,从低频至高频甚至光频都具有显著的介电可调特性,在可见光波段其晶

体结构中的电光系数  $r_{15}$  约为 1300 pm/V。当 BTO 膜的厚度为 170 nm 并由 21.8 V 的直流电压驱动时,其折射率将从 2.4 变为 2.0。图 10 所示为采用有限元法仿真计算得到的不同折射率 BTO 薄

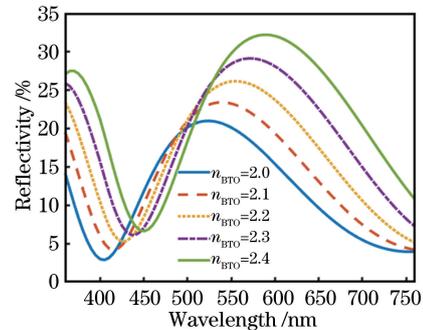


图 10 具有不同折射率 170 nm 厚的 BTO 薄膜的模拟反射光谱  
Fig. 10 Simulated reflection spectra of BTO thin films with different refractive indexes and 170 nm thick

膜的反射光谱。当其折射率从 2.4 变化至 2.0 时, 反射峰中心波长从 595.3 nm 变到 513.9 nm。这种光谱调控方式基于简单的单层 BTO 薄膜结构, 而不是复杂的数十层薄膜结构, 制备和调控的难度相较于传统一维光子晶体结构都明显降低, 且调控范围没有受到影响, 在未来的变色变谱、伪装隐身等领域具有良好的应用前景。

## 4 结 论

针对变色变谱、伪装隐身等应用需求, 提出一种基于黑色层纳米薄膜结构的可重构可见光滤波器。与传统一维光子晶体结构滤波器相比, 基于黑色层的纳米薄膜结构具有结构简单、制备方便等显著优势, 且调谐速度快, 具有巨大的应用潜力。采用传输矩阵法和有限元法研究了一维光子晶体结构的反射光谱调谐特性。采用有限元法研究了基于黑色层纳米薄膜结构的反射光谱调谐特性。在 CIE 1931 标准色度图中比较了二者的颜色变化特性。实验制备的基于黑色层的纳米薄膜结构样品呈现与理论设计一致的反射光谱和颜色, 该黑色层对于提高反射光谱的对比度具有重要作用。采用磁控溅射法制备了 BTO 薄膜, 尚未获得  $r_{15}$  取向的晶体结构薄膜, 下一步的研究工作应解决晶体结构 BTO 薄膜的制备问题, 且将  $r_{15}$  等具有高电光系数取向的薄膜作为调控目标, 以期能够实现在可见光波段的大范围、快速变色。

## 参 考 文 献

- [1] Kim Y, Jung K, Cho J, et al. Realizing vibrant and high-contrast reflective structural colors from lossy metals supporting dielectric gratings[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 10717-10726.
- [2] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [3] Liu F, Shi H, Zhu X, et al. Tunable reflective color filters based on asymmetric Fabry-Perot cavities employing ultrathin  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  as a broadband absorber[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9040-9045.
- [4] Yang Z M, Wang Y S, Zhu X P, et al. Periodic planar Fabry-Perot nanocavities with tunable interference colors based on filling density effects[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(3): 551-557.
- [5] Ji C G, Lee K T, Xu T, et al. Engineering light at the nanoscale: structural color filters and broadband

- perfect absorbers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(20): 1700368.
- [6] Chen Q, Wen L, Yang X G, et al. Structural color technology for high pixel density image sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823010.  
陈沁, 文龙, 杨先光, 等. 面向高像素密度图像传感器的结构色技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823010.
- [7] Zhao Y J, Xie Z Y, Gu H C, et al. Bio-inspired variable structural color materials [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(8): 3297-3317.
- [8] Song M W, Wang D, Peana S, et al. Colors with plasmonic nanostructures: a full-spectrum review[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(4): 041308.
- [9] Yang W, Xiao S, Song Q, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1864.
- [10] Yang B, Cheng H, Chen S Q, et al. Structural colors in metasurfaces: principle, design and applications [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2019, 3(5): 750-761.
- [11] Pan H N, Chen Y H. Research progress in structural colors of nano resonant cell arrays[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2019, 31(1): 11-18.  
潘海宁, 陈溢杭. 纳米共振单元阵列的结构色研究进展[J]. *光散射学报*, 2019, 31(1): 11-18.
- [12] Højlund-Nielsen E, Clausen J, Mäkelä T, et al. Plasmonic colors: toward mass production of metasurfaces[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2016, 1(7): 1600054.
- [13] Pryce I M, Aydin K, Kelaita Y A, et al. Highly strained compliant optical metamaterials with large frequency tunability [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4222-4227.
- [14] Tseng M L, Yang J, Semmlinger M, et al. Two-dimensional active tuning of an aluminum plasmonic array for full-spectrum response[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6034-6039.
- [15] Yoo S, Gwon T, Eom T, et al. Multicolor changeable optical coating by adopting multiple layers of ultrathin phase change material film [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7): 1265-1270.
- [16] Hosseini P, Wright C D, Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films[J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 206-211.
- [17] Shu F Z, Yu F F, Peng R W, et al. Dynamic plasmonic color generation based on phase transition of vanadium dioxide[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1700939.
- [18] Franklin D, Chen Y, Vazquez-Guardado A, et al.

- Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7337.
- [19] Kim I, Yun J, Badloe T, et al. Structural color switching with a doped indium-gallium-zinc-oxide semiconductor[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1409-1415.
- [20] Lee Y, Park M-K, Kim S, et al. Electrical broad tuning of plasmonic color filter employing an asymmetric-lattice nanohole array of metasurface controlled by polarization rotator [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(8): 1954-1966.
- [21] Yoon G, So S, Kim M, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies [J]. *Nano Convergence*, 2017, 4(1): 1-5.
- [22] Dong W L, Liu H L, Behera J K, et al. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(6): 1806181.
- [23] Zhang H F, Zhong A P, Wu Z M, et al. Research progress on the thermochromic properties of vanadium dioxide thin films for smart windows. [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(15): 1500002.  
张化福, 周爱萍, 吴志明, 等. 智能窗用二氧化钒薄膜热色性能的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 1500002.
- [24] Feigenbaum E, Diest K, Atwater H A. Unity-order index change in transparent conducting oxides at visible frequencies [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2111-2116.
- [25] Yin K J. Research on the optical properties of PLZT and BST ferroelectric thin films [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.  
尹开锯. PLZT、BST 铁电薄膜光学特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [26] Liu B, Shi J M, Lü X Y, et al. Application of photonic crystalline infrared stealth films on surface of vehicle engine compartments [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(1): 0150003.  
刘彪, 时家明, 吕相银, 等. 光子晶体红外隐身薄膜在车辆引擎舱表面应用研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(1): 0150003.
- [27] Qi D, Wang X, Cheng Y Z, et al. Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications [J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 52-56.
- [28] Wang Z X, Cheng Y Z, Nie Y, et al. Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(5): 054905.