

## 双通道窄带宽超材料吸收器

江孝伟<sup>1,3</sup>, 武华<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000;<sup>2</sup>赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000;<sup>3</sup>北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

**摘要** 超材料吸收器(MA)是近年来非常热门的研究课题,但是如何在近红外波段实现双波长高吸收的同时还保持窄带宽是一个难题。本文提出了一种结构简单、紧凑的双通道窄带宽 MA,该 MA 由 SiO<sub>2</sub> 衬底、金薄层以及非对称周期金属光栅构成。经模拟计算发现,MA 在波长  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$  和  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$  处具有高吸收效率,且线宽分别只有 0.21 nm 和 3 nm。对 MA 的磁场分布进行分析后可知,MA 在波长  $\lambda_1$  处实现窄带宽高吸收主要是由于表面等离子极化(SPP)共振,在波长  $\lambda_2$  处实现窄带宽高吸收则是 SPP 共振和法布里-珀罗(FP)腔共振的共同作用。最后研究了 MA 结构参数对其吸收特性的影响,结果发现改变 MA 参数能够实现 MA 吸收波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的调谐。

**关键词** 材料; 双通道; 窄带宽; 半峰全宽

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1416002

## Dual-Channel Narrow Bandwidth Metamaterial Absorber

Jiang Xiaowei<sup>1,3</sup>, Wu Hua<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup> College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;<sup>2</sup> College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;<sup>3</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Technology Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** Metamaterial absorber (MA) is a hot research topic recently. To our best knowledge, it is difficult to achieve dual-wavelength high absorption and narrow bandwidth in the near-infrared band at the same time. In this paper, we propose a dual-channel narrow bandwidth MA with a simple structure, which is composed of three layers: a silica substrate, an Au thin layer, and an asymmetric periodic metal grating. Finite-difference time-domain simulations show that the proposed MA has high absorption efficiency at wavelengths  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$  and  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$ , and the full width at half maximum (FWHM) is only 0.21 nm and 3 nm, respectively. After analyzing the magnetic field distributions of MA, we find that the narrow bandwidth and high absorption at  $\lambda_1$  are mainly attributed to surface plasmon polariton (SPP) resonance; at  $\lambda_2$ , both SPP resonance and Fabry-Pérot (FP) resonance take effect. Finally, the influence of structural parameters of the MA on its absorption characteristics is assessed, and it is found that the change in MA parameters can achieve the tuning of  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ .

**Key words** materials; dual channel; narrow bandwidth; full width at half maximum**OCIS codes** 160.3918; 350.2770; 300.1030

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-01-28; 录用日期: 2021-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61575008, 61650404)、江西省自然科学基金(20171BAB202037)、江西省教育厅科技项目(GJJ170819)、浙江省基础公益研究计划资助项目(LGC21E050002)、浙江省教育厅科研项目(Y201941404)、衢州市科技计划项目(2019K20)

通信作者: \* wh1125@126.com

## 1 引言

2008 年, Landy 等<sup>[1]</sup>通过对超材料吸收器(MA)的纳米结构进行特殊设计,实现了 MA 对电磁波的近乎完美吸收,并由此使 MA 进入人们的视野。随着研究的不断深入,不同类型的 MA 逐渐被人们设计、制造出来,并被广泛应用于太阳能电池<sup>[2-3]</sup>、热发射器<sup>[4-5]</sup>、光探测器<sup>[6-7]</sup>等中。目前,按光频可将 MA 分为可见光 MA、红外波 MA、太赫兹 MA<sup>[8-11]</sup>;按照构造材料可分为介质材料 MA、非介质材料 MA<sup>[12-13]</sup>;按带宽可分为窄带宽 MA、宽带宽 MA<sup>[12,14-15]</sup>。

宽带宽 MA 之所以被人所重视,是因为它可以显著提高超窄脉冲产生器、热发射器、光伏发电设备等的工作效率<sup>[16-18]</sup>。为此,不同的课题组提出了不同类型的宽带宽 MA。Duan 等<sup>[19]</sup>利用克尔介质作为金属纳米阵列和金属衬底之间的过渡层,设计出了对近红外波段具有高吸收且吸收波长可调的 MA。Lei 等<sup>[20]</sup>将金属钛构成的正方体阵列置于铝衬底上,并用二氧化硅作为它们之间的间隔层,设计了一种 MA;对其进行模拟计算后发现,该 MA 对可见光波段和近红外波段都具有高吸收,且吸收带宽可达 712 nm。Ding 等<sup>[21]</sup>将钛金属构成的纳米柱阵列置于金衬底之上,设计并制备出了具有 925 nm 吸收带宽的 MA。但近几年人们发现:具有窄带宽的 MA 在热发射器和传感探测器上相比宽带宽 MA 更能显著提高它们的工作性能<sup>[22-23]</sup>;在光调制、热辐射剪裁和光探测等应用中,只有窄带宽 MA 才能满足要求<sup>[24-25]</sup>。因此,窄带宽 MA 逐渐成为现阶段的研究热点。

为了使 MA 对电磁波实现高效的窄带光吸收,人们提出了不同类型的窄带宽 MA。Polyakov 等<sup>[26]</sup>利用亚波长沟槽构成的纳米腔实现了窄带宽吸收,但吸收带宽仍然较大,线宽(半峰全宽, FWHM)达到了 33 nm。为了降低 MA 的 FWHM, Meng 等<sup>[27]</sup>直接在金属衬底上刻蚀了只有 200 nm 厚的光栅层,最终利用金属与空气之间形成的表面等离子极化(SPP)共振将窄带宽 MA 的 FWHM 降到 0.4 nm。香港大学的 Feng 等<sup>[28]</sup>在金属衬底上的单个周期内浅刻蚀出了两个宽度不同的光栅,并将二氧化硅作为衬底和光栅的中介质层,制备了一种 MA;基于 SPP 共振,该 MA 对光通信波段具有较高的吸收效率,而且 FWHM 减小到了 0.28 nm。与利用浅刻蚀金属光栅实现 MA 窄带宽吸收不同, Liao 等<sup>[29]</sup>直接在金属衬底上制备了一层介质光栅,

利用介质光栅条之间形成的法布里珀罗(FP)腔,使 MA 对红外波段具有高的吸收效率,并且 FWHM 也只有 0.38 nm。

从上述实现 MA 窄带宽吸收的研究中可以发现,虽然窄带宽 MA 的 FWHM 可以减小到亚纳米级,但目前在可见光和红外波段,MA 都只是单通道窄带宽吸收,较少涉及双通道或者多通道窄带宽吸收,即使有 MA 在可见光或者近红外波段实现了双通道吸收,其吸收线宽 FWHM 也非常大,达不到纳米或者亚纳米级别<sup>[30]</sup>,这会严重限制窄带宽单波长吸收的 MA 在太阳能电池、光谱探测器中的应用。相比单通道窄带宽 MA,多通道(波长)吸收的 MA 可以更显著提高热发射器、热成像仪和光谱探测器的工作效率<sup>[31-32]</sup>。

本文提出了一种由介质衬底、金属薄膜、非对称周期金属光栅构成的双通道窄带宽 MA,并利用时域有限差分(FDTD)法对该 MA 进行设计和优化。经模拟计算发现,本文提出的窄带宽 MA 在两个不同的近红外波长处具有高的吸收效率,吸收效率最高可达 100%,而且该 MA 的 FWHM 最小只有 0.21 nm,其对应的品质因子(FOM)可达  $5238 \text{ RIU}^{-1}$ 。本文结果可为太阳能电池、光探测器中的高质量双通道窄带宽 MA 的设计提供参考。

## 2 器件结构

本文提出的双通道窄带宽 MA 的结构如图 1 所示。从图 1 中可以看到,窄带宽 MA 由下而上分别为  $\text{SiO}_2$  衬底、金(Au)薄层、金属材料构成的非对称周期光栅。MA 被折射率为  $n$  的气体包围,如无特殊说明  $n$  都为 1。可以发现,窄带宽 MA 的一个周期  $P$  中有两个同高度( $t$ )但不同宽度的光栅条,它们的宽度分别为  $w_1$  和  $w_2$ ,两个光栅条之间的距离为  $d$ 。当入射光从光栅上以一定角度  $\theta$  入射到窄带宽 MA 上时,MA 的吸收效率  $A$  可表示为  $A = 1 - R - T$ ,其中  $R$  为 MA 的反射率, $T$  为 MA 的透射率。但由于金薄层的厚度  $h$  为  $0.3 \mu\text{m}$ ,远大于近红外光的趋肤深度,因此  $T = 0$ ,所以窄带宽 MA 的吸收效率  $A = 1 - R$ 。

金的介电常数可以用 Drude 模型表示,即

$$\epsilon_{\text{Au}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中: $\omega_p$  是等离子体频率; $\gamma$  是阻尼系数; $\omega$  是入射光的角频率。根据文献<sup>[33]</sup>, $\omega_p = 1.32 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ , $\gamma = 1.2 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 。另外,衬底  $\text{SiO}_2$  的折射率为

1.45。本文提出的窄带宽 MA 的制备比较简单,只需先通过外延设备在 SiO<sub>2</sub> 衬底上生长一层金薄层,然后利用电子束光刻和干法刻蚀技术在金薄层上刻蚀出周期光栅即可<sup>[21]</sup>。

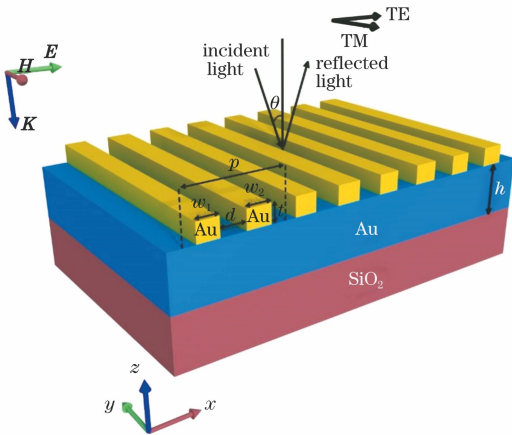


图 1 双通道窄带宽 MA 的结构

Fig. 1 Structure of dual-channel narrow bandwidth MA

### 3 结果与讨论

#### 3.1 双通道窄带宽 MA 的实现

首先利用 FDTD 软件建立含有双通道窄带宽 MA 一个单元的二维 ( $x-z$ ) 模型,  $y$  方向设为无限长, 具体参数如下,  $w_1=0.2 \mu\text{m}$ ,  $w_2=0.3 \mu\text{m}$ ,  $d=0.2 \mu\text{m}$ ,  $t=0.055 \mu\text{m}$ ,  $P=1.1 \mu\text{m}$ , 后文若无特殊说明, 所有参数均保持不变。然后在  $x$  方向添加周期性边界条件 (periodic), 在  $z$  方向添加完美匹配层边界条件 (PML)。最后将入射光偏振设为 TM 偏振, 入射角  $\theta=0^\circ$ 。

双通道窄带宽 MA 的 FDTD 模拟结果如图 2 所示。由图 2 可知本文所提 MA 在波长  $\lambda_1=1.1005 \mu\text{m}$  和  $\lambda_2=1.19024 \mu\text{m}$  处具有高的吸收效率, 吸收效率分别为 100% 和 98%。另外, 从图中可以发现双通道窄带宽 MA 的 FWHM 分别为 0.21 nm 和 3 nm, 相比文献[27-29], 所提 MA 在  $\lambda_1$  处的 FWHM 显著下降。双通道窄带宽 MA 之所以在  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处具有高的吸收效率, 是因为在这两个波长处 MA 的有效阻抗  $Z$  刚好与自由空间的阻抗匹配, 即  $Z$  的实部接近 1, 虚部接近 0<sup>[21,34]</sup>, 这可有效抑制 MA 在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处的反射, 进而提高了 MA 在这两波长处的吸收效率。

MA 的有效阻抗  $Z$  的计算公式为<sup>[34-35]</sup>

$$Z = \frac{\sqrt{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}}{\sqrt{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}, \quad (2)$$

式中:  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别是 TM 偏振光垂直照射下反

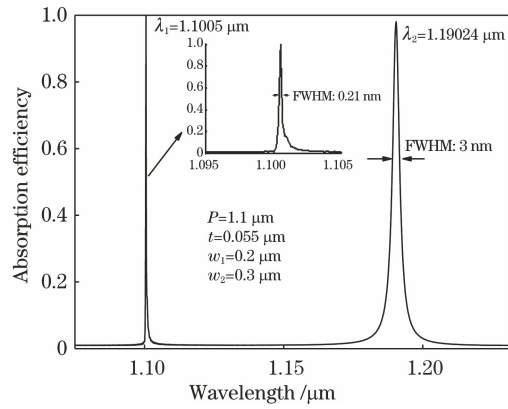


图 2 双通道窄带宽 MA 的吸收效率

Fig. 2 Absorption efficiency of dual-channel narrow bandwidth MA

射和透射的散射矩阵系数, 它们与  $R$ 、 $T$  的关系可分别表示为  $R=(S_{11})^2$  和  $T=(S_{21})^2$ 。因为  $T=0$ , 所以  $S_{21}=0$ 。图 3 是由 (2) 式计算得到的 MA 的有效阻抗 ( $S_{11}$  由 FDTD 计算得到)。从图 3(a) 可知阻抗的实部  $Z_{\text{real}}$  在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处接近 1, 从图 3(b) 可以发现阻抗的虚部  $Z_{\text{imag}}$  在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处接近 0。

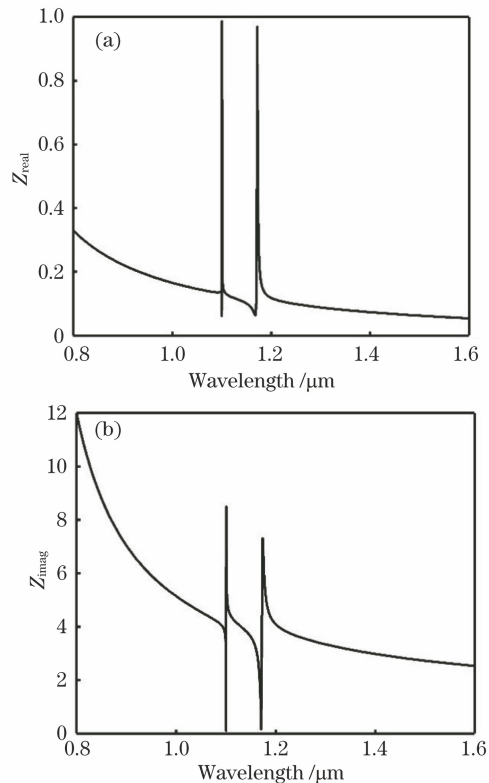


图 3 MA 的有效阻抗。(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 3 Effective impedance of MA. (a) Real part; (b) imaginary part

为了探究 MA 实现窄带宽高吸收的内在物理机制, 本文分析了 MA 在  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  波长处的电场和

磁场分布,具体如图 4 所示。由图 4(a)、(c)所示的电场和磁场分布可以判断,MA 在波长  $\lambda_1$  处能够实现高吸收主要是由空气与金属形成的 SPP 共振引起的<sup>[27-28]</sup>。SPP 共振波长的表达式为<sup>[36]</sup>

$$\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{spp}}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta + \frac{2\pi}{P} m, \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\text{spp}}$  是 SPP 共振波长; $\lambda_0$  是自由空间波长; $m$  是整数; $n_{\text{eff}}$  是非对称金属光栅中等离子激元的有效折射率。由于本文中的光是垂直入射,所以  $\theta = 0^\circ$ ,而且此时  $n_{\text{eff}}$  约为 1<sup>[36]</sup>,故当  $m = 1$  时, $\lambda_{\text{spp}} = P = 1.1 \mu\text{m}$ ,这与 MA 在  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$  处的吸收波长极为接近。由此可判断出 MA 在  $\lambda_1$  处实现高吸收主要是由 SPP 共振引起的。另外,MA 在  $\lambda_1$  处的 FWHM 仅有 0.21 nm 是因为金属光栅上方的磁场衰减得非常缓慢,而且只有极少的一部分能量渗透进金属中,这意味着 MA 整体的电阻率较小,所以在临界耦合条件下的总阻尼率非常小,从而产

生了超窄带宽的完美吸收<sup>[27]</sup>。

图 4(b)、(d)是双通道窄带宽 MA 在波长  $\lambda_2$  处的电场和磁场分布。从图中可以看到 MA 在  $\lambda_2$  处也存在明显的 SPP 共振现象,但比  $\lambda_1$  处的 SPP 共振要弱,并且磁场强度在光栅上方衰减得非常快,这就导致了 MA 整体的电阻率较高,从而使得 MA 在  $\lambda_2$  处的 FWHM 达到 3 nm。由图 2 可以知道  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$ ,与通过(3)式计算得到的 SPP 共振波长相差较多。这主要是因为 MA 在波长  $\lambda_2$  处还存在 FP 腔共振,即一个周期内两个光栅之间的狭缝形成了 FP 腔<sup>[37]</sup>,具体见图 4(d)中的磁场分布以及图 9 和图 10。因为 SPP 在  $\lambda_2$  处较弱,所以 FP 腔共振对 SPP 共振波长的影响较大,从而导致  $\lambda_2$  与  $\lambda_{\text{spp}}$  有较大的偏离。其中 FP 腔的共振条件为

$$2\text{Re}(n_{\text{eq}})t + \Phi\lambda_{\text{FP}} = N\lambda_{\text{FP}}, \quad (4)$$

式中: $n_{\text{eq}}$  是 FP 腔的等效折射率; $\lambda_{\text{FP}}$  是 FP 腔的共振波长; $N$  是整数; $\Phi$  是相位<sup>[37]</sup>。

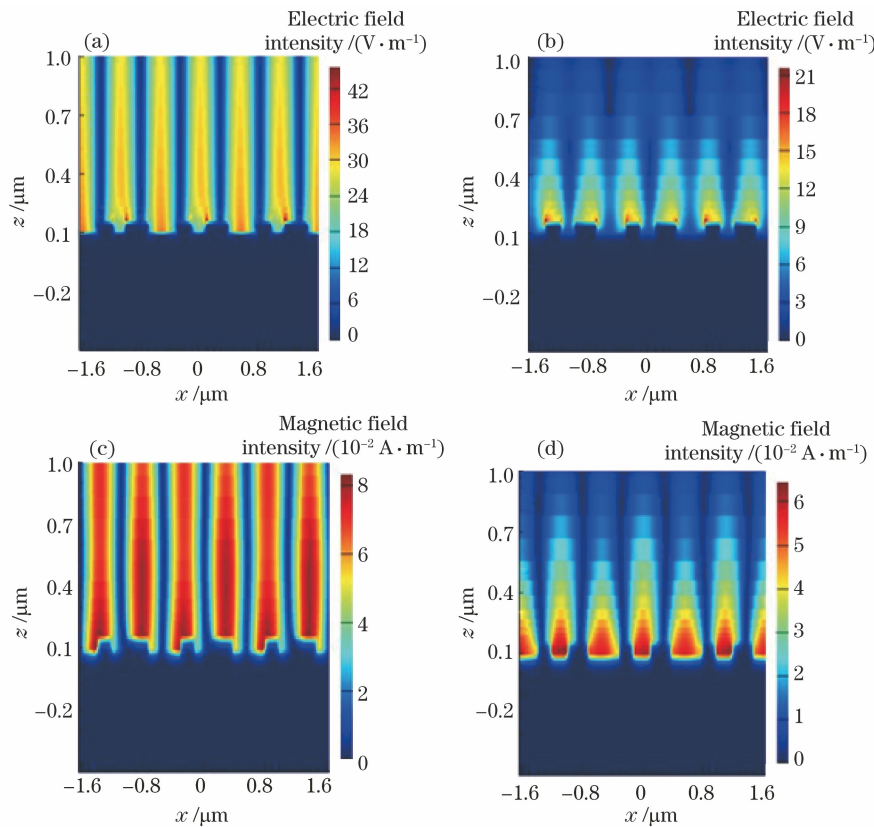


图 4 双通道窄带宽 MA 的电场和磁场分布。(a)(c) MA 在  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$  处的电场和磁场分布;  
(b)(d) MA 在波长  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$  处的电场和磁场分布

Fig. 4 Distributions of electric and magnetic fields in dual-channel narrow bandwidth MA. (a)(c) Electric and magnetic field distributions of MA at wavelength  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$ ; (b)(d) electric field and magnetic distributions of MA at wavelength  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$

### 3.2 结构参数对 MA 的影响

为了能够得到双通道窄带宽 MA 结构参数对

其吸收特性的影响规律,本文基于 FDTD 计算了 MA 结构参数对其吸收特性的影响。图 5 所示的是



周期  $P$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。从图 5(a)中可以发现在其他参数不变的条件下,随着  $P$  从  $1.1 \mu\text{m}$  增加到  $1.2 \mu\text{m}$ ,MA 的吸收波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  都出现了红移现象,但线宽并无明显变化。从图 5(b)中可知,随着  $P$  从  $1.1 \mu\text{m}$  变化到  $1.2 \mu\text{m}$ , $\lambda_1$  从最初的  $1.1005 \mu\text{m}$  红移到了  $1.2015 \mu\text{m}$ ,增加了  $101 \text{ nm}$ 。另外,由图 5(b)还可以发现在不同的  $P$  下, $\lambda_1$  都与所对应的  $P$  更接近。这是因为在  $\lambda_1$  处 SPP 共振很强,占主导作用,因此  $\lambda_1$  的值符合

(3)式。

随着  $P$  从  $1.1 \mu\text{m}$  变化到  $1.2 \mu\text{m}$ , $\lambda_2$  从最初的  $1.19024 \mu\text{m}$  红移到了  $1.267 \mu\text{m}$ ,增加了  $76.76 \text{ nm}$ 。虽然随着  $P$  的增加, $\lambda_2$  也出现了红移现象,但是波长的增加幅度比  $\lambda_1$  的要小。这是因为随着  $P$  的增加,FP 腔的等效折射率  $n_{\text{eq}}$  下降<sup>[36-37]</sup>,因此 FP 腔的共振波长  $\lambda_{\text{FP}}$  会蓝移,从而影响了  $\lambda_2$  的增幅。FP 腔等效折射率  $n_{\text{eq}}$  随周期变大而下降的规律已经在文献[37]中得到了证明。

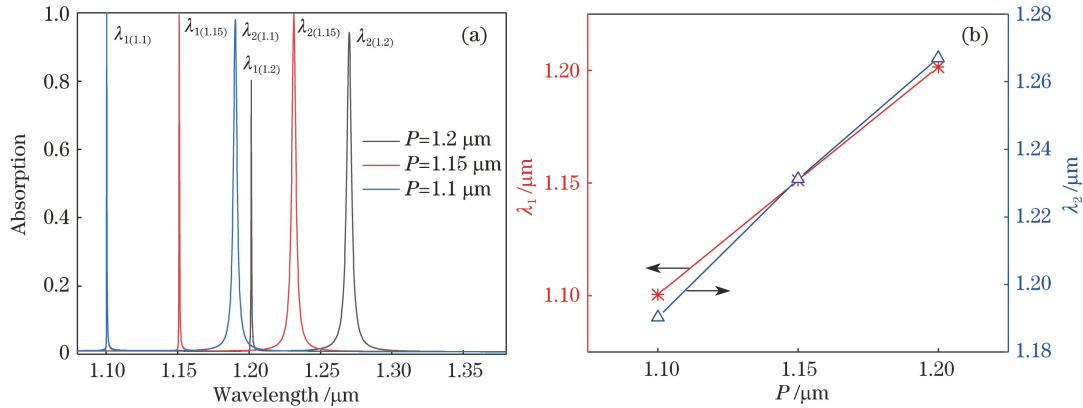


图 5  $P$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。(a)吸收光谱;(b)吸收波长

Fig. 5 Effect of  $P$  on absorption characteristics of dual-channel narrow bandwidth MA.

(a) Absorption spectra; (b) absorption wavelength

窄带宽 MA 的一个重要应用领域就是探测领域,如气体探测、化学探测等<sup>[38]</sup>。判断一个探测设备的性能是否优越,主要看其灵敏度  $S$  和品质因子  $\alpha_{\text{FOM}}$ ,其中  $S = \Delta\lambda/\Delta n$ ,  $\alpha_{\text{FOM}} = S/d_{\text{FWHM}}$ ,  $\Delta\lambda$  和  $\Delta n$  分别是双通道窄带宽 MA 吸收波长的变化量和周围气体折射率  $n$  的变化量<sup>[27,29]</sup>,  $d_{\text{FWHM}}$  为线宽。为了解本文提出的双通道窄带宽 MA 的探测性能,计算了其在不同气体环境下(不同折射率  $n$ )的吸收特

性,计算结果如图 6 所示。由图 6(a)可知,随着  $n$  的增大,MA 的吸收波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  产生了红现象,但 FWHM 并未发生变化。由图 6(b)可知,随着  $n$  从 1 增加到 1.004, $\lambda_1$  从最初的  $1.1005 \mu\text{m}$  红移到了  $1.1049 \mu\text{m}$ ,红移了  $4.4 \text{ nm}$ 。因此 MA 在  $\lambda_1$  处的  $S$  为  $1100 \text{ nm/RIU}$ ,  $\alpha_{\text{FOM}} = 5238 \text{ RIU}^{-1}$ , FOM 相比文献[27-29]的报道都有明显提高。 $\lambda_2$  从最初的  $1.19024 \mu\text{m}$  红移到了  $1.19504 \mu\text{m}$ ,红移了  $4.8 \text{ nm}$ 。

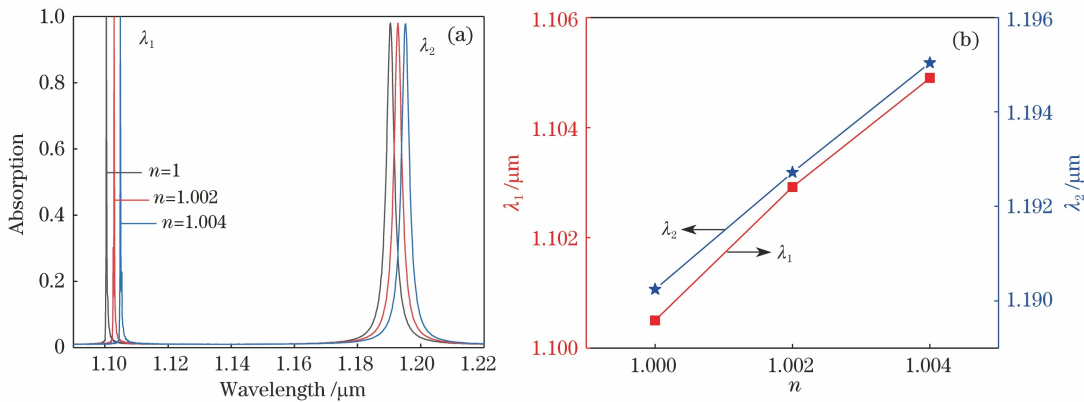


图 6  $n$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。(a)吸收光谱;(b)吸收波长

Fig. 6 Effect of  $n$  on absorption characteristics of dual-channel narrow bandwidth MA.

(a) Absorption spectra; (b) absorption wavelength

因此 MA 在  $\lambda_2$  处的  $S$  为 1200 nm/RIU,  $\alpha_{\text{FOM}} = 400 \text{ RIU}^{-1}$ 。虽然 MA 在  $\lambda_2$  处的 FWHM 较大, 导致 FOM 相对较小, 但  $S$  相比近期报道<sup>[12,27]</sup> 都有明显提高。

图 7 给出在一个周期内两个光栅条之间的间距  $d$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。由

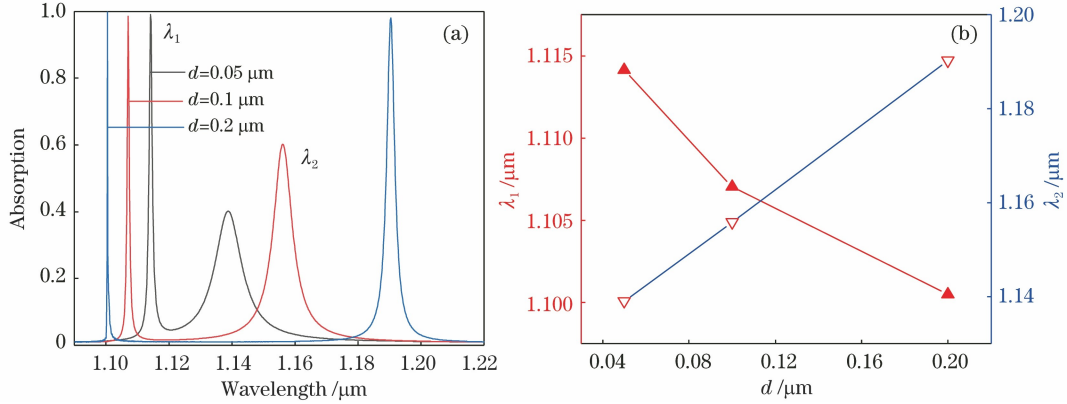


图 7  $d$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。(a)吸收光谱; (b)吸收波长

Fig. 7 Effect of  $d$  on absorption characteristics of dual-channel narrow bandwidth MA.

(a) Absorption spectra; (b) absorption wavelength

MA 的吸收波长  $\lambda_1$  之所以会随着  $d$  的减小出现逐渐红移的现象, 是因为当  $d$  从 0.2  $\mu\text{m}$  减小到 0.05  $\mu\text{m}$  时, 等离子激元的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  会从 1.00045 增大到 1.012, 具体如图 8 所示, 该结果由 (5) 式和 (6) 式计算得到<sup>[39]</sup>。

$$\beta = k_0 \sqrt{\left[ \epsilon_m \tanh\left(\frac{dk_0}{2}\right) / \epsilon_0 \right]^2 + \epsilon_0}, \quad (5)$$

$$n_{\text{eff}} = \beta / k_0, \quad (6)$$

式中:  $\beta$  是表面等离激元的传播常数;  $k_0$  和  $k_m$  分别是光在空气和金中波矢的大小;  $\epsilon_m$  和  $\epsilon_0$  分别是金属和空气的介电常数。由 (3) 式可知, 光栅周期  $P$  和  $n_{\text{eff}}$  都会对 SPP 共振波长  $\lambda_{\text{spp}}$  产生影响。所以, 当  $P$  保持不变时,  $d$  的减小会使 SPP 共振波长  $\lambda_{\text{spp}}$  红移, 最终导致 MA 的吸收波长  $\lambda_1$  红移。

MA 在  $\lambda_2$  处随着  $d$  减小而蓝移的现象可以由图 9 解释。图 9 是不同  $d$  值下, MA 在波长  $\lambda_2$  处的磁场分布。从图 9 中可以发现, 随着  $d$  变小, 周期内两个光栅条之间形成的 FP 腔越来越强 (虚线内大部分磁场强度都聚集在光栅缝隙内), 相对应的 SPP 共振在  $\lambda_2$  处不再占主导地位。因为随着  $d$  变小, FP 腔的有效折射率  $n_{\text{eq}}$  会逐渐减小, 根据 FP 腔共振原理, FP 腔共振波长  $\lambda_{\text{FP}}$  就会减小, 这也是 MA 在  $\lambda_2$  处随着  $d$  变小而蓝移的原因。对于  $d$  的减小会导致 FP 腔等效折射率  $n_{\text{eq}}$  下降, 从而使 MA 的吸收波长  $\lambda_2$  蓝移, 也可从文献 [37] 和 [39-40] 中

图 7(a) 可知, 随着  $d$  逐渐变小, MA 在  $\lambda_1$  处的吸收波长逐渐红移, 但是 MA 在  $\lambda_2$  处的吸收波长却出现蓝移现象。当  $d$  从 0.2  $\mu\text{m}$  减小到 0.05  $\mu\text{m}$  时,  $\lambda_1$  从 1.1005  $\mu\text{m}$  增大到 1.11414  $\mu\text{m}$ , 而  $\lambda_2$  从 1.19024  $\mu\text{m}$  减小到 1.13905  $\mu\text{m}$ , 具体如图 7(b) 所示。

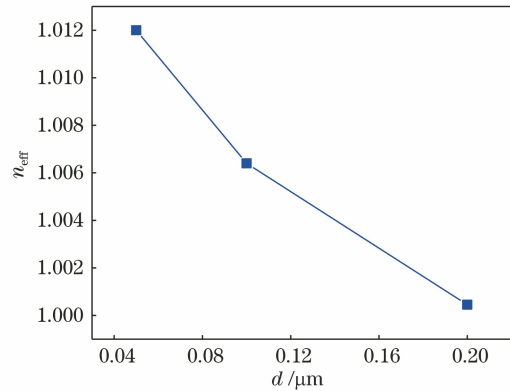


图 8  $d$  对  $n_{\text{eff}}$  的影响

Fig. 8 Effect of  $d$  on  $n_{\text{eff}}$

得到证明。

图 10 是 MA 在  $\lambda_1$  处随着  $d$  变小时的磁场分布。可以发现, 随着  $d$  变小, 光栅条狭缝之间并没有出现磁场积聚现象 (见虚线内)。这说明并没有形成明显的 FP 腔共振, 也证明了 MA 在  $\lambda_1$  处形成窄带宽吸收主要是由 SPP 共振导致的, 因此不会出现在  $\lambda_2$  处的现象。

图 11 给出了不同光栅厚度  $t$  下双通道窄带宽 MA 的吸收特性。由图 11(a) 可知, 在保持其他参数不变的情况下, 随着  $t$  减小, MA 在  $\lambda_1$  处的吸收波长几乎不发生变化, 这可由 (3) 式进行解释。由 (3) 式可知,  $t$  与 SPP 共振波长无关, 所以无论  $t$  怎么变化,  $\lambda_1$  都不会产生偏移, 仅会使 MA 在  $\lambda_1$  处的

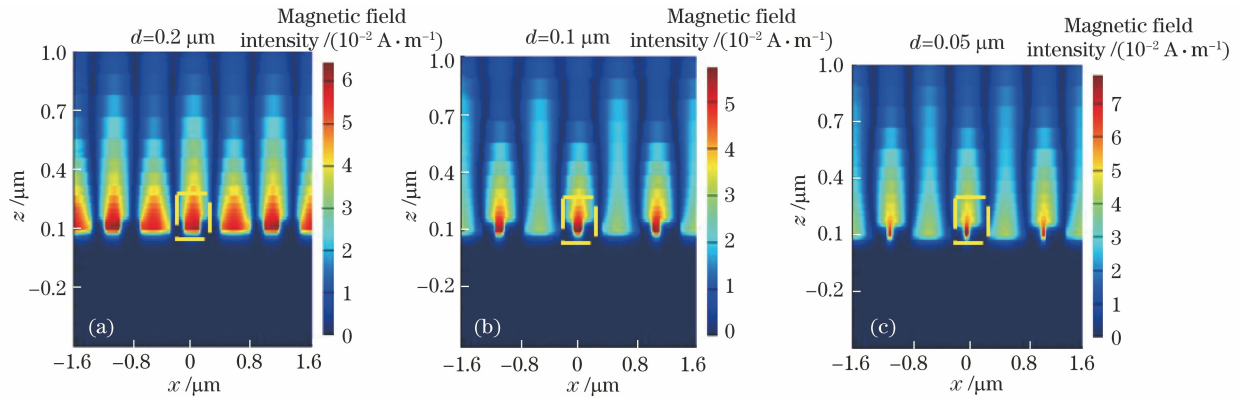


图 9 不同  $d$  下, MA 在  $\lambda_2$  处的磁场分布。(a)  $d=0.2 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=0.1 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=0.05 \mu\text{m}$

Fig. 9 Magnetic field distributions of MA at  $\lambda_2$  under different  $d$  values. (a)  $d=0.2 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=0.1 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=0.05 \mu\text{m}$

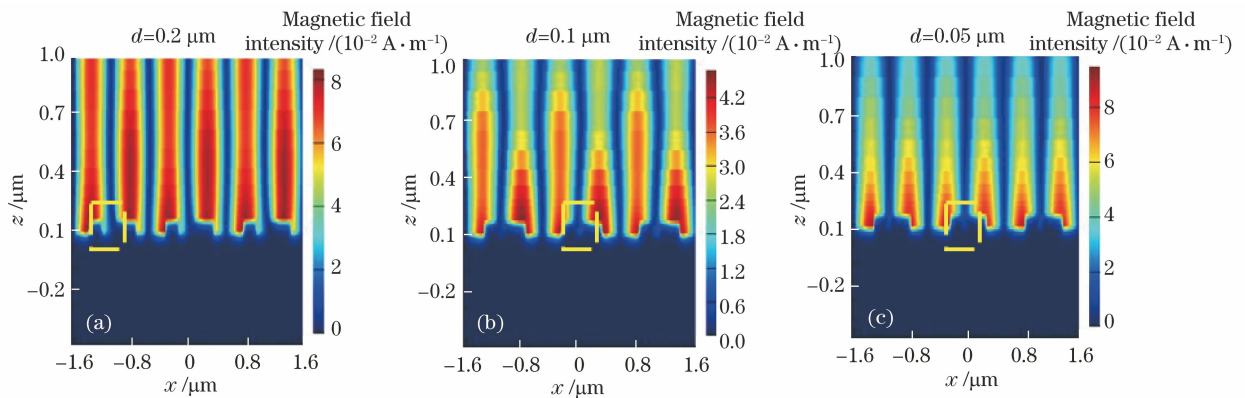


图 10 不同  $d$  下, MA 在  $\lambda_1$  处的磁场分布。(a)  $d=0.2 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=0.1 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=0.05 \mu\text{m}$

Fig. 10 Magnetic field distributions of MA at  $\lambda_1$  under different  $d$  values. (a)  $d=0.2 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=0.1 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=0.05 \mu\text{m}$

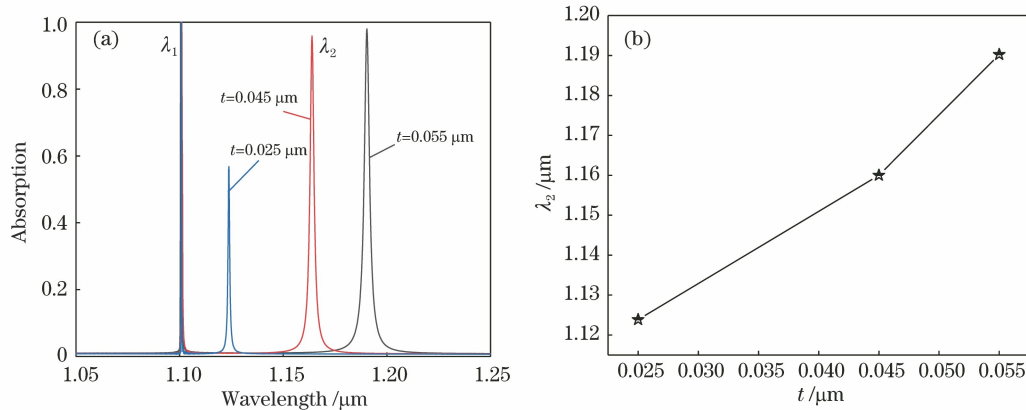


图 11  $t$  对双通道窄带宽 MA 吸收特性的影响。(a) 吸收光谱; (b) 吸收波长

Fig. 11 Effect of  $t$  on absorption characteristics of dual-channel narrow bandwidth MA.

(a) Absorption spectra; (b) absorption wavelength

吸收效率发生波动。但是与  $\lambda_1$  不同, MA 在  $\lambda_2$  处的吸收波长会随着  $t$  的下降而产生蓝移现象, 由图 11(b) 可知随着  $t$  从  $0.055 \mu\text{m}$  下降到  $0.025 \mu\text{m}$ , 波长  $\lambda_2$  从  $1.19024 \mu\text{m}$  下降到  $1.12384 \mu\text{m}$ , 蓝移了

$66.4 \text{ nm}$ 。这主要是因为 MA 在  $\lambda_2$  处还伴随着 FP 共振。由(4)式可知  $t$  减小会导致 FP 共振腔长缩短, 根据 FP 腔共振原理<sup>[36,39]</sup>, FP 的共振波长蓝移, 从而导致 MA 的吸收波长  $\lambda_2$  蓝移。

## 4 结 论

本文提出了一种可在近红外波段实现窄带宽高吸收的 MA, 通过 FDTD 设计和优化, 该 MA 在波长  $\lambda_1 = 1.1005 \mu\text{m}$  和  $\lambda_2 = 1.19024 \mu\text{m}$  处具有高吸收效率, 吸收效率最高可达 100%, FWHM 最低可达到 0.21 nm。对双通道窄带宽 MA 的电场和磁场分布进行分析后发现, MA 在  $\lambda_1$  处实现窄带宽高吸收主要是因为 SPP 共振, 但 MA 在  $\lambda_2$  处实现窄带宽高吸收不仅是因为 SPP 共振, 还因为 FP 腔共振。另外, 该双通道窄带宽 MA 具有超高的灵敏度  $S$  和品质因子 FOM,  $S$  和 FOM 最高分别可达 1200 nm/RIU 和  $5238 \text{ RIU}^{-1}$ 。最后本文探索了双通道窄带宽 MA 结构参数对其吸收特性的影响规律, 结果表明: 光栅厚度  $t$  的变化对 MA 的吸收波长  $\lambda_2$  有影响, 但对  $\lambda_1$  几乎无影响; 无论是周期  $P$  还是周期内的光栅间距  $d$ , 它们的变化均能对 MA 吸收波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  进行调谐。本研究可为将来实现结构紧凑、制备难度低的双通道窄带宽 MA 提供理论指导。

## 参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [2] Wang Y, Sun T Y, Paudel T, et al. Metamaterial-plasmonic absorber structure for high efficiency amorphous silicon solar cells[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(1): 440-445.
- [3] Rufangura P, Sabah C. Design and characterization of a dual-band perfect metamaterial absorber for solar cell applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 671: 43-50.
- [4] Celanovic I, Perreault D, Kassakian J. Resonant-cavity enhanced thermal emission [J]. *Physical Review B*, 2005, 72(7): 075127.
- [5] Mao Q J, Feng C Z. Absorptance properties of nested-ring metamaterial absorbers based on magnetic polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0816001.  
毛前军, 冯春早. 基于磁激元的嵌套环超材料吸波器的吸收特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0816001.
- [6] Sobhani A, Knight M W, Wang Y, et al. Narrowband photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1643.
- [7] Song S C, Ma X L, Pu M B, et al. Tailoring active color rendering and multiband photodetection in a vanadium-dioxide-based metamaterial absorber [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 492-497.
- [8] Ren Z B, Sun Y H, Zhang S Q, et al. Tunable narrow band perfect metamaterial absorber based on guided-mode resonance [J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(16): 1950171.
- [9] Dayal G, Ramakrishna S A. Broadband infrared metamaterial absorber with visible transparency using ITO as ground plane [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15104-15110.
- [10] Hu F R, Qian Y X, Li Z, et al. Design of a tunable terahertz narrowband metamaterial absorber based on an electrostatically actuated MEMS cantilever and split ring resonator array [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055101.
- [11] Su Z X, Yin J B, Zhao X P. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF<sub>2</sub> multilayer structures [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1679-1690.
- [12] Liao Y L, Zhao Y. Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber for sensing based on cavity-coupled phase resonance [J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103072.
- [13] Ren Z B, Sun Y H, Lin Z H, et al. Ultra-narrow band perfect metamaterial absorber based on dielectric-metal periodic configuration [J]. *Optical Materials*, 2019, 89: 308-315.
- [14] Liu C, Qi L M, Zhang X. Broadband graphene-based metamaterial absorbers [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(1): 015301.
- [15] Song Z Y, Wang K, Li J W, et al. Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7148-7154.
- [16] Vora A, Gwamuri J, Pala N, et al. Exchanging Ohmic losses in metamaterial absorbers with useful optical absorption for photovoltaics [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4901.
- [17] Sotor J, Sobon G, Macherzynski W, et al. Black phosphorus saturable absorber for ultrashort pulse generation [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(5): 051108.
- [18] Gong Y, Wang Z, Li K, et al. Highly efficient and broadband mid-infrared metamaterial thermal emitter for optical gas sensing [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4537-4540.
- [19] Duan X Y, Chen S Q, Liu W W, et al. Polarization-insensitive and wide-angle broadband nearly perfect absorber by tunable planar metamaterials in the visible regime [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125107-125113.
- [20] Lei L, Li S, Huang H X, et al. Ultra-broadband



- absorber from visible to near-infrared using plasmonic metamaterial[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5686-5693.
- [21] Ding F, Dai J, Chen Y, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39445.
- [22] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [23] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [24] Lee B J, Wang L P, Zhang Z M. Coherent thermal emission by excitation of magnetic polaritons between periodic strips and a metallic film [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11328-11336.
- [25] Zhu Z H, Evans P G, Haglund R F, et al. Dynamically reconfigurable metadvice employing nanostructured phase-change materials [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 4881-4885.
- [26] Polyakov A, Thompson K F, Dhuey S D, et al. Plasmon resonance tuning in metallic nanocavities [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 933.
- [27] Meng L, Zhao D, Ruan Z, et al. Optimized grating as an ultra-narrow band absorber or plasmonic sensor [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1137-1140.
- [28] Feng A S, Yu Z J, Sun X K. Ultranarrow-band metagrating absorbers for sensing and modulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28197-28205.
- [29] Liao Y L, Zhao Y. Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber with ultra-sparse nanowire grids for sensing applications[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 1480.
- [30] Liu B, Tang C J, Chen J, et al. Dual-band light absorption enhancement of monolayer graphene from surface plasmon polaritons and magnetic dipole resonances in metamaterials [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 12061-12068.
- [31] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, et al. Multiband metamaterial absorber at terahertz frequencies [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(5): 054205.
- [32] Hu F R, Wang L, Quan B G, et al. Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D*, 2013, 46(19): 195103.
- [33] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [34] Huang H L, Xia H, Guo Z B, et al. Design of broadband metamaterial absorbers for permittivity sensitivity and solar cell application [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(11): 117801.
- [35] Li W C, Zhou X, Ying Y, et al. Polarization-insensitive wide-angle multiband metamaterial absorber with a double-layer modified electric ring resonator array [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(6): 067151.
- [36] Wang R. Guided mode resonance and extraordinary transmission in subwavelength metallic gratings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 20-30. 王茹. 亚波长金属光栅的导模共振和异常透射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 20-30.
- [37] Zeng Z W, Liu H T, Zhang S W. Design of extraordinary-optical-transmission refractive-index sensor of subwavelength metallic slit array based on a Fabry-Perot model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(20): 200701. 曾志文, 刘海涛, 张斯文. 基于 Fabry-Perot 模型设计亚波长金属狭缝阵列光学异常透射折射率传感器 [J]. *物理学报*, 2012, 61(20): 200701.
- [38] Zhong M. Design and measurement of a narrow band metamaterial absorber in terahertz range[J]. *Optical Materials*, 2020, 100: 109712.
- [39] Ren Y Z. Research on the optical absorption characteristics based on molybdenum disulfide-grating composite structure[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 15-35. 任永泽. 基于二硫化钼-光栅复合结构的光学吸收特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 15-35.
- [40] Luo L B, Ge C W, Tao Y F, et al. High-efficiency refractive index sensor based on the metallic nanoslit arrays with gain-assisted materials[J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(4): 548-555.