

激光与光电子学进展

双通道偏振无关介质窄带宽超材料吸收器

何胜军¹, 江孝伟^{1,2*}

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324100;

²北京工业大学信息学部光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 为了改善金属完美超材料吸收器(PMA)制造成本高,且存在欧姆损耗的状况,同时为了解决PMA对光的偏振态和入射角较为敏感的问题,本文采用低损耗介质材料设计了双通道偏振无关介质窄带PMA,并利用时域有限差分法进行理论分析和验证。研究发现,所本文设计的偏振无关介质窄带PMA无论在横电(TE)还是横磁(TM)偏振态下,它们的吸收波长、吸收效率和半峰全宽都相同。TM和TE偏振能够在同一波长实现窄带宽超高吸收,是因为PMA结构是旋转对称的。PMA之所以会实现双通道窄带宽,是因为在PMA光栅中分别形成了法布里-珀罗腔共振和导模共振,该研究可为将来制备高质量偏振无关介质窄带宽PMA提供新思路。

关键词 超材料; 吸收效率; 偏振无关; 双通道

中图分类号 TN2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0316005

Dual Channel Polarization Independent Dielectric Narrow Bandwidth Metamaterial Absorber

He Shengjun¹, Jiang Xiaowei^{1,2*}

¹College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324100, China;

²Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In order to avoid the high manufacturing cost and ohmic loss of metal perfect metamaterial absorber (PMA), and to solve the problem that PMA is sensitive to the polarization state and incident angle of light. A dual channel polarization independent dielectric narrow-band PMA is designed by using low loss dielectric materials, and the theoretical analysis and verification are carried out by using the finite-difference time-domain method. It is found that the absorption wavelength, absorption efficiency, and full-width at half-maximum of the polarization independent medium narrow-band PMA designed in this paper are the same no matter in transverse electric(TE) or transverse magnetic (TM) polarization state. TM and TE polarization can achieve narrow bandwidth and ultra-high absorption at the same wavelength because PMA structure is rotationally symmetric. The reason why PMA can achieve dual channel narrow bandwidth is that Fabry-Perot cavity resonance and guided mode resonance are formed in PMA grating respectively. This research can provide theoretical guidance for the preparation of high quality polarization independent medium narrow bandwidth PMA in the future.

Key words metamaterial; absorption efficiency; polarization independent; dual channel

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61575008, 61650404)、江西省自然科学基金(20171BAB202037)、浙江省教育厅一般科研项目(Y201941404)、衢州市科技计划项目(2019K20)

通信作者: *JosephJiangquzhi@126.com

1 引言

完美超材料吸收器(PMA)因其具有近乎完美的吸收、设计灵活、厚度薄等优点而备受关注^[1-3]。目前为止,已经有许多具有不同带宽的PMA被提出,以满足实际应用的需求,如宽带PMA、窄带宽PMA等^[4-5]。宽带PMA已经被证明可显著提升太阳能电池、光探测器等的工作性能^[6-7]。但相比于宽带PMA,窄带宽PMA在热发射器和探测器上具有更多的优势^[8-9],因此窄带宽PMA也逐渐成为研究热点。

目前许多课题组提出了不同类型的窄带宽PMA,按制造材料可分为两种。一种是金属材料窄带宽PMA,通过激发的表面等离子激元共振或形成法布里-珀罗(FP)腔共振降低PMA的带宽, Meng等^[10]在Ag衬底上浅刻蚀出了Ag金属光栅,使窄带宽PMA的半峰全宽(FWHM)下降到了0.4 nm;与此同时, Feng等^[11]在Ag衬底和Ag光栅之间添加了一层二氧化硅介质层,使窄带宽PMA在波长为1550 nm时的FWHM达到了0.28 nm。另一种则是低损耗介质材料窄带宽PMA,基于PMA内部形成的FP腔共振或者导模共振降低PMA的带宽; Ren等^[12]设计制备出由氧化铟锡(ITO)、氮化硅构成的窄带宽PMA,经测试可知该窄带宽PMA的FWHM为2.6 nm; Liao等^[13]直接在金属衬底上刻蚀介质光栅,经模拟计算发现该窄带宽PMA的FWHM可达到0.38 nm,同年他们通过在二氧化硅上制备出由Al₂O₃构成的非对称光栅,更是使窄带宽PMA的FWHM降至0.028 nm^[14]。相比于介质材料构成的窄带宽PMA,金属材料构成的PMA存在加工难题,而且金属材料存在欧姆损耗,会在一定程度上影响PMA的吸收效率,因此利用介质材料构造窄带宽PMA将有更广的应用前景^[15]。

虽然目前介质窄带宽PMA的FWHM已经下降到亚纳米级别,但是从上述的研究可以发现,目前的窄带宽PMA大多是与偏振有关并且是单吸收波长(亚纳米级别带宽),如文献[12-13]的窄带宽PMA仅仅只能在入射光横电(TE)偏振条件下实现单吸收波长窄带宽吸收,若换成横磁(TM)偏振,则PMA无法实现窄带宽高吸收。这将会限制窄带宽PMA的应用范围。另外现如今很多介质窄带宽PMA对于入射角度的变化也非常敏感,当入射光不再垂直入射时,窄带宽PMA的吸收波长和效率都会发生改变。

为了解决目前介质窄带宽PMA对光的偏振和光的入射角较为敏感的问题,本文提出由ITO和二氧化铪(HfO₂)作为窄带宽PMA的材料,并利用上述材料设计出偏振无关双吸收通道的窄带宽PMA。基于时域有限差分法(FDTD)对本文的介质窄带宽PMA优化和分析发现,该PMA在吸收波长 λ_1 和 λ_2 的FWHM分别最低只有1.06 nm和0.56 nm,而且对于TE和TM偏振具有相同的吸收效率和吸收波长,并且即使入射角增加到60°,窄带宽PMA的吸收波长和吸收效率基本保持不变。

2 偏振无关窄带宽PMA结构

图1为偏振无关介质超材料吸收器结构图,自下而上主要有Au衬底、ITO层、HfO₂层和HfO₂构成的介质光栅。从图中可以看到,介质光栅在 x 、 y 方向的周期分别为 Δ_x 、 Δ_y , x 、 y 方向的宽带则都设为 w_1 ,为了保证PMA偏振无关,则必须使 $\Delta_x = \Delta_y$ 。在图1中介质光栅、HfO₂、ITO层的厚度分别是 d_1 、 d_2 、 d_3 。 n_2 和 n_3 分别是HfO₂、ITO层的折射率。另外窄带宽PMA周围气体的折射率 $n=1$,光入射角为 θ 。为了保证窄带宽PMA的高吸收效率,在窄带宽PMA下添加一层金属Au层,并且其厚度将会大于入射光的趋肤深度。窄带宽PMA的吸收效率 $A=1-T-R$,其中 T 、 R 分别为PMA的透射率和反射率,由于Au的厚度大于入射光的趋肤深度,所以 $T=0$,则PMA的吸收效率 $A=1-R$ 。

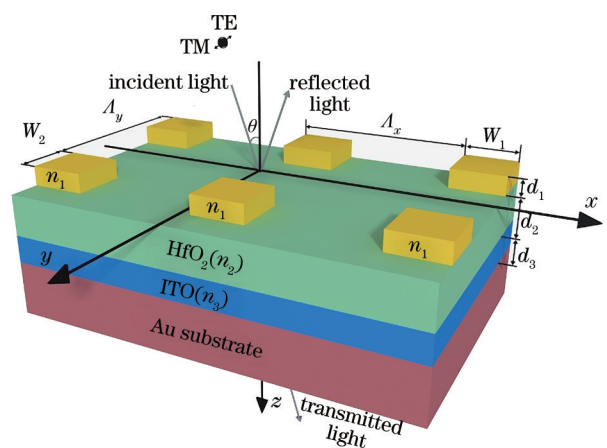


图1 偏振无关介质窄带宽PMA结构图

Fig. 1 Structure diagram of polarization independent dielectric narrow bandwidth PMA

本文提出的偏振无关介质窄带宽超材料吸收器在实际制备过程当中也较为简单。首先基于溅射设备在Au衬底上生长一层ITO,紧接着利用等

离子体增强化学的气相沉积法在 ITO 层上生长一层 HfO₂。最后基于电子束光刻法和干法刻蚀法在 HfO₂ 层上刻蚀出介质光栅^[12,16-17]。

在本文模拟计算中,ITO 的折射率 $n_3=1.81$, HfO₂ 的折射率 $n_2=1.97$ ^[18]。而金属 Au 的介电常数则由 Drude 模型表示,具体表达式为

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

式中: ω_p 、 γ 和 ω 分别是等离子体频率、阻尼系数和入射光角频率。为了保证模拟结果的正确性, ω_p 和 γ 由文献[19]获得, $\omega_p=1.32 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma=1.2 \times 10^{14}$ rad/s。

3 结果与讨论

基于 FDTD 软件建立偏振无关介质窄带宽 PMA 的一个单元结构,并在 x 、 y 方向上添加周期性边界条件,在 z 方向添加完美匹配层边界条件。PMA 上方的光源为平面光源,光源沿 z 方向入射。基于 FDTD 模拟计算发现,无论是 TE 偏振还是 TM 偏振,PMA 在波长 $\lambda_1=0.74765 \mu\text{m}$ 和波长 $\lambda_2=0.7667 \mu\text{m}$ 处均可实现接近完美吸收,具体如图 2 所示。之所以 PMA 在不同偏振态下吸收波长均一样,是因为 PMA 的结构呈旋转对称^[20],即 $\Lambda_x=\Lambda_y$ 。另外通过图 2 可知 PMA 在波长 λ_1 和 λ_2 的吸收效率分别可达到 0.98 和 0.95。而且 PMA 在这两个吸收波长处的 FWHM 分别只有 1.06 nm 和 0.56 nm。这证明了本文提出的 PMA 具有双通道窄带宽且偏振无关。此时 $\Lambda_x=\Lambda_y=600 \text{ nm}$ 、 $w_1=530 \text{ nm}$ 、 $d_1=110 \text{ nm}$ 、 $d_2=190 \text{ nm}$ 、 $d_3=150 \text{ nm}$,若无特殊说明,上述结构参数保持不变。

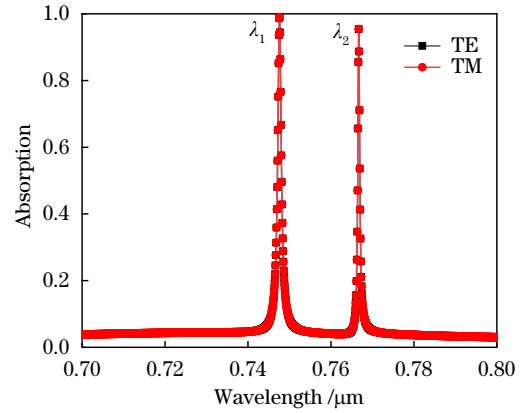


图 2 PMA 吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of PMA

之所以 PMA 在 λ_1 和 λ_2 能够实现接近完美吸收,是因为 PMA 在这两个波长处的等效阻抗 Z 与自由空间阻抗 Z_0 相匹配,即 $Z_{\text{real}} \approx Z_{0\text{-real}}=1$, $Z_{\text{imag}} \approx Z_{0\text{-imag}}=0$ ^[21]。当 PMA 在吸收波长处的等效阻抗与自由空间阻抗相匹配时,即可抑制 PMA 对吸收波长的反射率 R ,使 R 接近于 0,从而提高 PMA 对吸收波长的吸收效率 A 。对于 PMA 在 λ_1 和 λ_2 的等效阻抗 Z 可由下式^[22]计算得到。

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

式中: S_{11} 是反射系数; S_{21} 是透射系数。它们与 R 和 T 的关系分别可表示为 $R=(S_{11})^2$ 和 $T=(S_{21})^2$, 因为 $T=0$, 所以 $S_{21}=0$ 。

为探究 PMA 在 λ_1 和 λ_2 处具有高吸收效率的内在物理机制,模拟计算了 PMA 在 λ_1 和 λ_2 处的电场分布(入射光为 TM 偏振,下同),具体如图 3 所示。图 3(a) 是 PMA 在 λ_1 的电场分布,从图中可以发现,

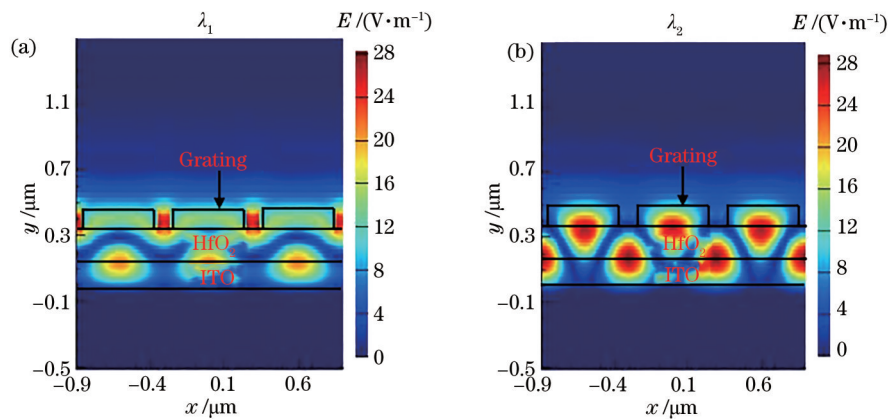


图 3 TM 偏振电场分布。(a) λ_1 ; (b) λ_2

Fig. 3 TM polarization electric field distributions. (a) λ_1 ; (b) λ_2

大部分能量都聚集在介质光栅缝隙当中,少部分能量被限制在 ITO 层当中,由此可知 PMA 能够在 λ_1 处实现高吸收,主要是因为光栅缝隙中形成了 FP 腔共振^[23]。图 3(b)是 PMA 在 λ_2 的电场分布,这是较为典型的光栅导模共振电场分布,由该电场分布可知 PMA 在 λ_2 处实现超高吸收效率是由导模共振引起^[24],所以 PMA 在 λ_2 的 FWHM 要小于 λ_1 。

为掌握 PMA 相关参数对 PMA 吸收特性的影响规律,本文模拟计算了不同参数对 PMA 吸收特性的影响。图 4 是介质光栅宽度 w_1 对 PMA 吸收特性的影响,从图 4 中可以看到当 w_1 从 $0.51 \mu\text{m}$ 增加到 $0.55 \mu\text{m}$ 时,PMA 的 λ_1 和 λ_2 都出现了红移现象。虽然随着 w_1 的增加,PMA 的 λ_1 和 λ_2 都变大,但是它们的内在物理机理是不同的。首先 λ_1 之所以会随着 w_1 增加会红移,是因为根据等效介质原理近似方法可知, w_1 的增加会导致光栅等效折射率 n_{eff} 增加,具体如图 6 所示。而 FP 腔共振波长 λ_{FP} 又与光栅等效折射率 n_{eff} 有关,所以最终 PMA 的 λ_1 红移。 n_{eff} 与 λ_{FP} 的关系可表示为

$$2n_{\text{eff}}d_1 + \Phi\lambda_{\text{FP}} = N\lambda_{\text{FP}}, \quad (3)$$

式中: N 是整数; Φ 是相位^[22]。

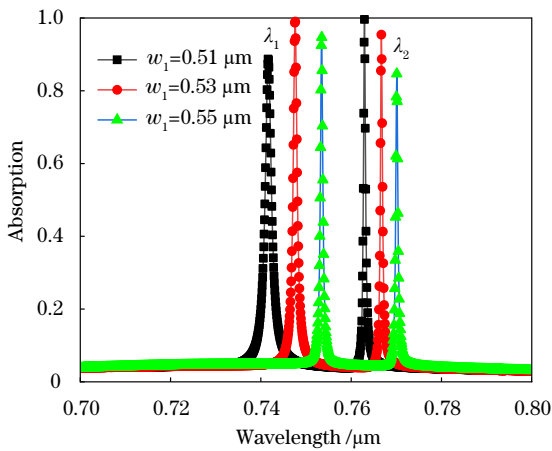


图 4 w_1 对 PMA 吸收特性的影响

Fig. 4 Influence of w_1 on PMA absorption characteristics

关于二维光栅等效折射率 n_{eff} 的计算之所以用等效介质原理的计算方法来估算,是因为等效介质原理只适用一维光栅^[25]。对于二维光栅等效折射率的估算,具体如图 5 所示。首先由图 1 可知,TE 偏振光沿 x 轴方向, TM 偏振光沿 y 轴方向,所以沿 x 轴方向的光栅条, TM 偏振光可以等效为 TE 偏振光,沿 y 轴方向的光栅条, TE 偏振光可等效为 TM 偏振光。依据上述等效,则二维光栅对于不同偏振的等效折射率可由下式得到,

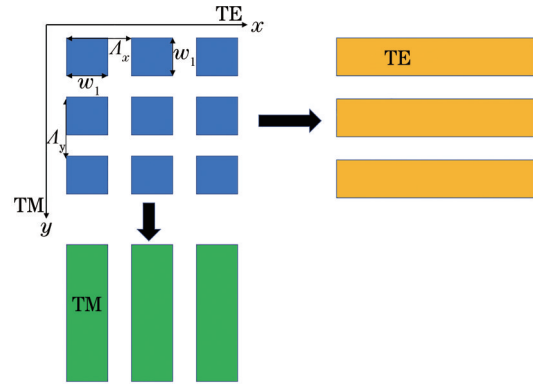


图 5 二维光栅等效

Fig. 5 Two-dimensional grating equivalent

$$n_{\text{eff-TE}} = [(1-f)n^2 + fn_{\text{TM}}^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$n_{\text{eff-TM}} = \left[\frac{n^2 n_{\text{TE}}^2}{(1-f)n_{\text{TE}}^2 + fn^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中: $n_{\text{eff-TE}}$ 和 $n_{\text{eff-TM}}$ 分别是在 TE 和 TM 偏振下二维光栅对应的等效折射率; $f = w_1/\Lambda_x = w_1/\Lambda_y$, 表示二维光栅在 x 、 y 轴方向的光栅占空比; n_{TE} 和 n_{TM} 分别是一维光栅在 TE 和 TM 偏振下的等效折射率。可进一步表示为

$$n_{\text{TE}} = [(1-f)n^2 + fn_2^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$n_{\text{TM}} = \left[\frac{1-f}{n^2} + \frac{f}{n_2^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

由(4)~(7)式就可得到一维光栅和二维光栅在不同占空比下的等效折射率,具体如图 6 所示。从图 6 可以发现,二维光栅无论是 TE 还是 TM 偏振,其等效折射率都是低于一维光栅等效折射率,而且二维光栅的 $n_{\text{eff-TM}}$ 要略低于 $n_{\text{eff-TE}}$ 。由图 6 可知,随着占空比

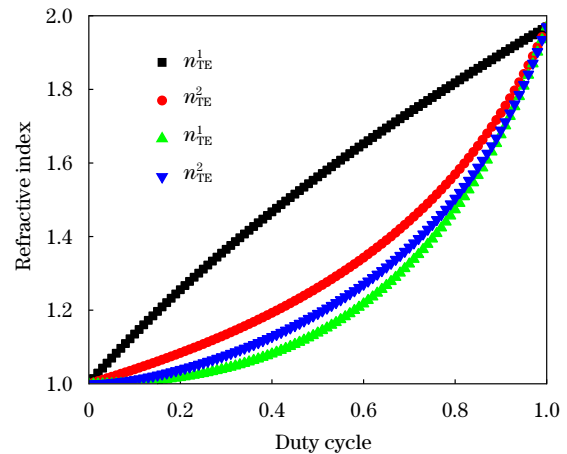


图 6 一维和二维光栅等效折射率

Fig. 6 One-dimensional and two-dimensional grating equivalent refractive index

f 的增加, $n_{\text{eff-TM}}$ 和 $n_{\text{eff-TE}}$ 都会逐渐变大。所以在 ω_1 增大, 而 Δ_x 和 Δ_y 保持不变情况下, FP 腔等效折射率 n_{eff} 将增大从而导致 λ_{FP} 红移, 最终引起 PMA 的 λ_1 发生红移。

由图 4 可知, PMA 在波长 λ_2 处具有超高吸收率是因为入射光在 PMA 的光栅中产生了导模共振效应。根据导模共振相位匹配原理, $\Delta\Phi = n_{\text{eff}}K_{\parallel}\Delta_x = K\pi$, 其中 K 为不同阶次的导模共振, $K=1, 2, 3, \dots$, 而 $K_{\parallel} = K\sin\theta$ 是平行于 x 轴的横向波矢。由图 6 可知, ω_1 增大会导致 n_{eff} 增大, 因此为了满足相位匹配条件, 导模共振峰必须朝长波长方向移动, 这就使 PMA 的 λ_2 发生红移。

图 7 是折射率 n 对 PMA 吸收特性的影响, 从图 7 中可知, 当 n 从 1 增加到 1.2, PMA 吸收波长 λ_1 将从 $0.7416 \mu\text{m}$ 增加到 $0.7547 \mu\text{m}$, 而吸收波长 λ_2 将从 $0.7629 \mu\text{m}$ 增加到 $0.7737 \mu\text{m}$ 。由图 7 可知, PMA 对周围折射率 n 较为敏感, 这说明本文设计的 PMA 可以作为传感器, 如作为生物探测传感器可以探测 DNA 和 RNA, 因为 DNA 的折射率一般在 $1.4\sim 1.6$ 之间, 而 RNA 的折射率一般在 $1.6\sim 2.0$ 之间^[26]。当将不同的探测物放置在 PMA 表面后, PMA 对应的吸收波长将会发生改变, 从而可以根据吸收波长判断出探测物的特征。

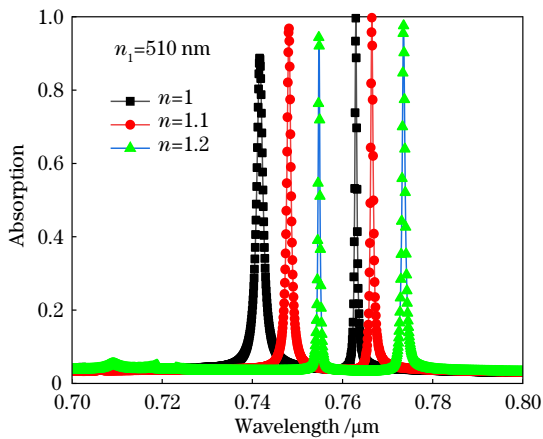


图 7 n 对 PMA 吸收特性的影响

Fig. 7 Influence of n on PMA absorption characteristics

衡量传感器的性能主要看灵敏度 S 和品质因数 (F_{FOM}), $S = \Delta\lambda/\Delta n$ 和 $F_{\text{FOM}} = S/\Delta\lambda_{1/2}$, Δn 是 PMA 周围材料折射率 n 的变化量, 而 $\Delta\lambda$ 是随 n 的变化 PMA 吸收波长的变化量^[10]。由图 5 可知, 本文提出的 PMA 作为传感器, 对于 λ_1 和 λ_2 的灵敏度分别可达 65.5 nm/RIU 和 54 nm/RIU , 相对应地, 它们的 F_{FOM} 分别可达 61.79 RIU^{-1} 和 96.4 RIU^{-1} 。

最后分析了光入射角对 PMA 吸收特性的影响,

具体如图 8 所示。从图中可以发现虽然光入射角 θ 逐渐从 0° 增加到 60° , 但是 PMA 的 λ_1 和 λ_2 的值和吸收效率均基本保持不变, 并且至少在 60° 以内可以保证 PMA 具有较好的双波长吸收特性, 这证明了本文提出的 PMA 的吸收波长与入射角相关性较弱。

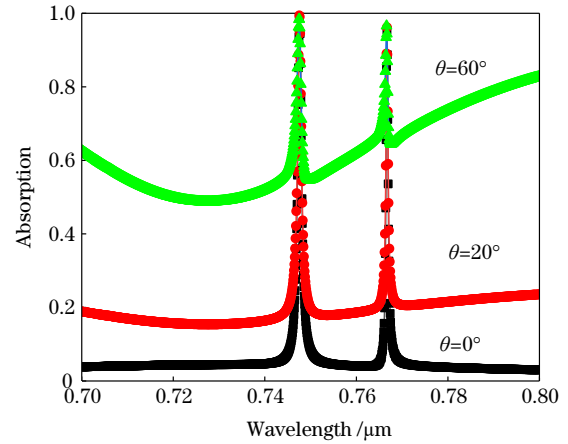


图 8 θ 对 PMA 吸收特性的影响。

Fig. 8 Influence of θ on PMA absorption characteristics.

4 结 论

为了解决目前介质窄带宽 PMA 对入射光和光的偏振态较为敏感的问题, 本文提出了由 HfO_2 、ITO 构成的偏振无关双通道介质窄带宽 PMA。经模拟计算发现, 当 $\Delta_x = \Delta_y = 600 \text{ nm}$ 、 $\omega_1 = 530 \text{ nm}$ 、 $d_1 = 110 \text{ nm}$ 、 $d_2 = 190 \text{ nm}$ 、 $d_3 = 150 \text{ nm}$ 时, 无论是 TE 偏振还是 TM 偏振, PMA 都在 $\lambda_1 = 0.74765 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2 = 0.7667 \mu\text{m}$ 处可实现接近完美吸收, 且 FWHM 分别只有 1.06 nm 和 0.56 nm 。另外当入射光从 0° 变化到 60° 的过程中, PMA 的吸收波长和吸收效率均保持不变。为了探究相关参数对 PMA 吸收特性的影响, 本文模拟计算了介质光栅宽度 ω_1 和空气折射率 n 对 PMA 吸收特性的影响。经计算可知, 随着 ω_1 、 n 增加, PMA 的吸收波长均会红移。

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] Mao Q J, Feng C Z. Absorption 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.
- [3] Quader S, Akram M R, Xiao F J, et al. Graphene

- based ultra-broadband terahertz metamaterial absorber with dual-band tunability[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(9): 095104.
- [4] Kang S, Qian Z Y, Rajaram V, et al. Ultra-narrowband metamaterial absorbers for high spectral resolution infrared spectroscopy[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(2): 1801236.
- [5] Ding F, Dai J, Chen Y, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39445.
- [6] 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.
- [7] Zhou L, Tan Y, Ji D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501227.
- [8] 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.
- [9] Greffet J J, Carminati R, Joulain K, et al. Coherent emission of light by thermal sources[J]. *Nature*, 2002, 416(6876): 61-64.
- [10] 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.
- [11] Feng A, Yu Z, Sun X. Ultranarrow-band metagrating absorbers for sensing and modulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28197-28205.
- [12] 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.
- [13] Liao Y L, Zhao Y. Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber with ultra-sparse nanowire grids for sensing applications[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1480.
- [14] 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.
- [15] Ali M O, Tait N, Gupta S. High-Q all-dielectric thermal emitters for mid-infrared gas-sensing applications [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 35(1): 119-124.
- [16] Carletti L, Malureanu R, Mørk J, et al. High-index-contrast grating reflector with beam steering ability for the transmitted beam[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23567-23572.
- [17] Fang W J. Research on integration of novel subwavelength grating and semiconductor photodetector for optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2017.
房文敬. 光通信系统中新型亚波长光栅与半导体光探测器集成的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [18] Liu W X, Lai Z Q, Guo H, et al. Guided-mode resonance filters with shallow grating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 865-870.
- [19] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [20] Jiang X W. Polarization-independent wavelength-tunable vertical cavity surface emitting laser based on two-dimensional grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0623003.
江孝伟. 基于二维光栅的偏振无关波长可调谐垂直腔面发射激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0623003.
- [21] Jiang X W, Wu H. Dual channel narrow bandwidth metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14):1416002.
江孝伟, 武华, 双通道窄带宽超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2021, 41(14):1416002.
- [22] Li W, 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):4773-2084.
- [23] Jiang X W, Wu H, Yuan S C. Enhancement of graphene three-channel optical absorption based on metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 138101.
江孝伟, 武华, 袁寿财. 基于金属光栅实现石墨烯三通道光吸收增强[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 138101.
- [24] Wang Q. Study on the mechanism and characteristics of guided-mode resonance subwavelength device[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2012.
王琦. 导模共振亚波长器件的机理及特性研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2012.
- [25] Zheng X Y. Theoretical analysis of antireflection structure of photovoltaic cell based on the solar spectrum [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
郑晓云. 基于太阳光谱的光伏电池减反结构的理论分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [26] Chen X, Fan W. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on spoof surface plasmon[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2092.