

偏振无关高吸收效率宽吸收带宽超材料吸收器

王超素¹, 江达飞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 324000;

²北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 基于表面等离子体慢光波导原理, 利用介质硅(介质层)和金属金(金属层)设计出在整个近红外波段有高吸收效率的超材料吸收器。经过模拟计算发现设计的超材料吸收器在金属层厚度和介质层厚度分别为 $0.04\ \mu\text{m}$ 和 $0.02\ \mu\text{m}$ 时光吸收带宽最大, 且波导层宽度和吸收器层数对吸收带宽也有较大影响。在 TM 偏振态下, 光入射角小于 40° 时, 计算得出超材料吸收器在整个近红外波段可以保持 90% 以上的吸收效率, 而且在垂直入射条件下对 TE 和 TM 偏振具有相同的吸收效率, 这体现了设计的超材料吸收器具有偏振无关的特性。

关键词 材料; 超材料; 吸收器; 近红外; 偏振无关

中图分类号 TN304

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031601

Polarization Independent High Absorption Efficiency Wide Absorption Bandwidth Metamaterial Absorber

Wang Chaosu¹, Jiang Dafei¹, Jiang Xiaowei^{1,2*}

¹College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

²Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Based on the principle of surface plasmon slow optical waveguide, a metamaterial absorber with high absorption efficiency in the whole near infrared band is designed by using dielectric silicon (dielectric layer) and Au (metal layer). The simulation results show that the bandwidth of the absorber is the largest when the thicknesses of the metal layer and the dielectric layer are $0.04\ \mu\text{m}$ and $0.02\ \mu\text{m}$, respectively. It is also found that the width of the waveguide layer and the number of absorber layers have great influence on the absorption bandwidth. Finally, it is calculated that the absorption efficiency of the metamaterial absorber can be maintained over 90% in the whole near infrared band when the incident angle of light is below 40° under TM polarization. Moreover, the absorption efficiency for TE and TM polarizations is equal at normal incidence, which shows that the metamaterial absorber designed in this paper is polarization independent.

Key words materials; metamaterial; absorber; near infrared; polarization independent property

OCIS codes 160.3380; 230.7370

1 引言

超材料是人造材料,能够实现自然界材料无法实现的功能,如负折射率^[1]、隐身斗篷^[2]、近零介电常数^[3]、超快调制^[4]和高灵敏度传感器^[5]等。目前对于超材料的研究更多地集中在如何通过人工剪裁实现所需要的介电常数和磁导率^[6],并减少超材料

对能量的吸收。然而增加超材料对能量的吸收有助于其在一些器件上的应用,如高灵敏度探测器^[7]和太阳能电池^[8]等。

自 2008 年 Landy 等^[9]设计出第一款能够在太赫兹 (THz) 波段实现单峰高吸收效率的超材料吸收器后,许多科研团队纷纷投入该领域研究,并设计出不同类型的超材料吸收器。2015 年西北工业大学

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-14; 录用日期: 2019-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61575008, 61650404)、2019 年衢州市指导性项目(2019008)

* E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

利用氟化镁和石墨烯设计出能够在 THz 波段双峰吸收的超材料吸收器,而且通过调节石墨烯的化学势,可以调谐吸收峰波长^[10]。2016 年华中科技大学利用金为衬底、二氧化硅为介质层,结合椭圆形石墨烯设计出双峰吸收的超材料吸收器,双峰吸收波长分别为 40 μm 和 60 μm ^[11]。然而,上述超材料吸收器仅能在单个或者两个波长处有高吸收效率,无法在某个波段有高吸收效率,这限制了其在某些领域的应用,因此一些科研团队希望设计出宽吸收带宽超材料吸收器。

2019 年越南荣市大学利用硅和金设计出圆台型的超材料吸收器,该吸收器可在可见光和近红外波段实现 1000 nm 的吸收带宽^[12];2018 年重庆大学吴颖波团队^[13]利用石墨烯、金和介质层设计出在 THz 波段的宽带超材料吸收器;2017 年西安电子科技大学提出在电介质基片上制作具有集总电阻的金属带,在 7~14 GHz 范围内实现 90% 以上的吸收效率^[14];2013 年浙江大学何赛灵科研团队^[15]利用石墨烯和金设计了金字塔型的超材料吸收器,该吸收器利用慢光波导原理成功实现在 10~100 THz 范围内 90% 以上的高吸收效率。

虽然许多科研团队设计出了高吸收效率宽带超材料吸收器,但是这些超材料吸收器多集中在 THz 波段,在可见光和近红外波段的研究非常稀少;另外这些超材料吸收器大多数只对某一偏振有效,当偏振方向发生变化时,超材料吸收器无法实现高吸收效率,这也会限制其应用。为此,本文集中解决上述超材料吸收器的缺点,利用硅和金属金材料设计出了在整个近红外波段偏振无关的高吸收效率超材料吸收器。设计的超材料吸收器可以在入射光倾斜照射下实现高吸收,更加有利于其在太阳能电池和高灵敏度探测器上的应用。

2 等离子体慢光波导原理

表面等离子体效应是在金属表面自由振动的电子与光子相互作用产生的沿着金属表面传播的电磁表面波,电磁波分布在金属表面附近,能量被高度局域化。另外金属具有欧姆热效应,因此电磁波会发生能量损耗,所以其传输距离有限,一般为纳米量级^[16]。

由于表面等离子体效应能够限制光的表面传输特性,所以利用表面等离子体效应形成慢光波导是可能的^[17]。由金属-电介质-金属构成的光波导如图 1 所示。其群速度 v_g 的表达式为

$$v_g = \frac{c}{n + \omega(dn/d\omega)}, \quad (1)$$

式中: n 为波导的等效折射率; ω 为入射光角频率。当入射光照射波导发生强烈色散时, $\omega(dn/d\omega)$ 会变大,导致 v_g 大幅度下降,从而使图 1 的波导结构实现慢光效应。目前,慢光波导能够应用于光缓存和光交换等领域。

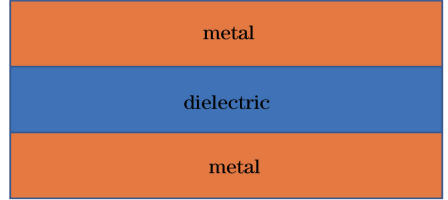


图 1 金属-电介质-金属慢光波导

Fig. 1 Metal-dielectric-metal slow optical waveguide

3 吸收器结构

基于表面等离子体慢光波导,设计了偏振无关高吸收效率宽吸收带宽超材料吸收器(PHWA),该吸收器是使用金属金(Au)和介质硅交替堆砌成金字塔形状的周期性结构,如图 2 所示。图 2(a)是吸收器的三维图,由多个相同的金字塔结构按照一定周期排列而成,整个周期性结构生长在金衬底之上,金衬底的厚度(0.1 μm)大于近红外光的趋肤深度,以保证光的透射率为零。图 2(b)是吸收器单个金字塔结构的平面图,其中: P 为超材料吸收器周期; T 为金字塔厚度; W_b 为金字塔底端宽度; W_t 为金字塔顶端宽度; t_m 和 t_d 分别为金属(金属层)和硅(介质层)的厚度,且 $T = N(t_m + t_d)$, N 为金和硅的对数。

使用 Drude 模型,金的相对介电常数表达式为^[18]

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

式中: $\omega_p = 1.367 \times 10^{16}$ rad/s 为等离子体频率; $\gamma = 1.256 \times 10^{14}$ rad/s 为衰减速率。硅在物理模型中的折射率设为 3.48。

4 结果与讨论

利用时域有限差分法(FDTD)建立 PHWA 模型,如图 3 所示。在模型中 t_m 和 t_d 分别为 0.015 μm 和 0.04 μm , W_b 和 W_t 分别为 0.19 μm 和 0.0475 μm , $N=20$, $T=1.1$ μm , P 为 0.2 μm , x, y 方向上使用周期作为边界, z 方向上使用完美匹配层(PML)作为边界,用于解决仿真区域上的反射问题。

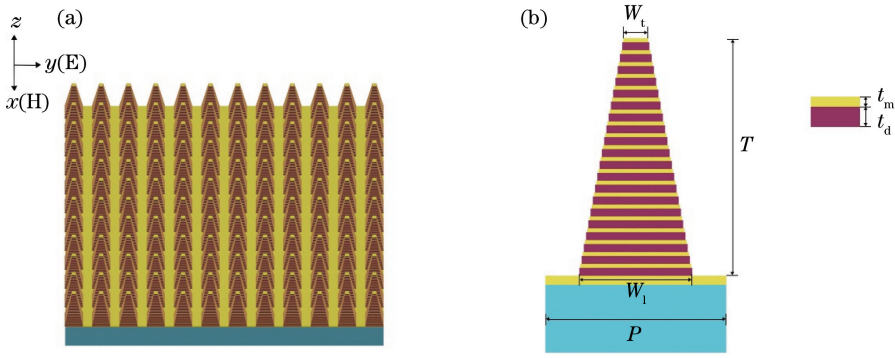


图 2 超材料吸收器结构模型示意图。(a)三维结构图;(b)结构单元平面图

Fig. 2 Schematic of metamaterial absorber structure model. (a) Three-dimensional structure; (b) plane diagram of structural elements

在入射光垂直照射下(TM 偏振态),PHWA 可以在波长 $0.747 \mu\text{m}$ 和 $2.665 \mu\text{m}$ 之间保持 90% 以上的吸收效率,吸收带宽为 $1.918 \mu\text{m}$,具体结果如图 4(a)所示。从图 4(a)可以看到 PHWA 的光透射率几乎为零,主要是 PHWA 的反射率在影响其吸收效率。而且经过计算发现,建立的 PHWA 在 xy 平面上是正方形即旋转对称,因此入射光为 TE 偏振态时其吸收效率与 TM 偏振态时完全相同,如图 4(b)所示。

PHWA 之所以对入射光有高效率,是因为硅和金构成慢光波导,慢光波导可以使光速降低甚至降到零,这有助于波导对光束的吸收。研究发现不同宽度的慢光波导可以令不同波长的光降速,使被降速的光限制在波导层,所以将不同宽度的慢光

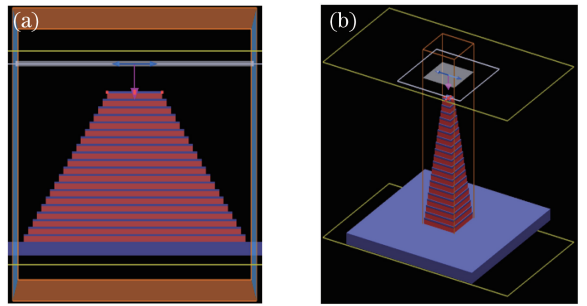


图 3 FDTD 中的 PHWA 模型。(a) PHWA 平面图; (b) PHWA 立体图

Fig. 3 PHWA model in FDTD. (a) PHWA plan; (b) PHWA three-dimensional picture

波导堆砌成金字塔形状,可以使 PHWA 具有较大的光吸收带宽^[19-20]。

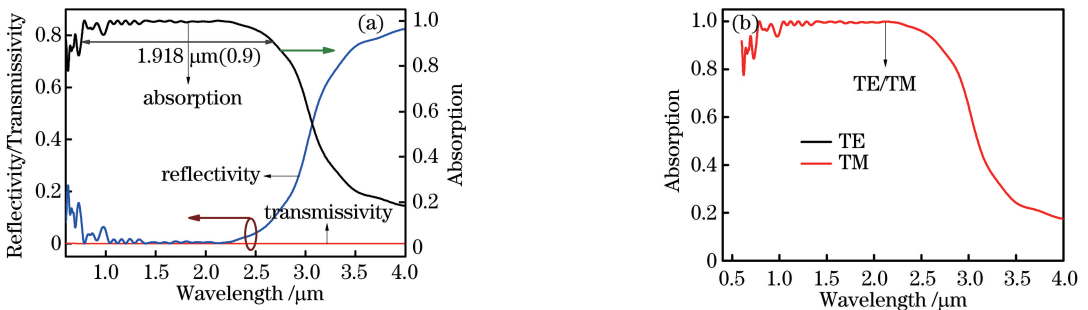


图 4 不同偏振态下 PHWA 的光吸收效率。(a) TM 偏振下 PHWA 的光吸收、反射和透射;(b) TE 和 TM 偏振态下 PHWA 对光的吸收

Fig. 4 Optical absorption efficiency of PHWA under different polarization states. (a) Light absorption, reflection, and transmission of PHWA under TM polarization; (b) light absorption of PHWA under TE and TM polarizations

图 5 所示为金属层厚度和介质层厚度对 PHWA 吸收带宽的影响,从图中可以发现存在最优金属层/介质层厚度使 PHWA 吸收带宽达到最大值。图 5(a)是当介质层厚度 t_d 为 $0.04 \mu\text{m}$ 时,金属层厚度 t_m 对 PHWA 吸收带宽的影响,从图中可知

当 t_m 为 $0.02 \mu\text{m}$ 时,PHWA 的吸收带宽最大,可达 $1.966 \mu\text{m}$ 。图 5(b)是当 t_m 为 $0.02 \mu\text{m}$ 时, t_d 对 PHWA 吸收带宽的影响,从图中可知当 t_d 为 $0.04 \mu\text{m}$ 时,PHWA 的吸收带宽最大,吸收带宽为 $1.966 \mu\text{m}$ 。

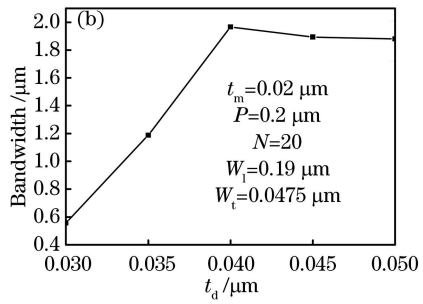
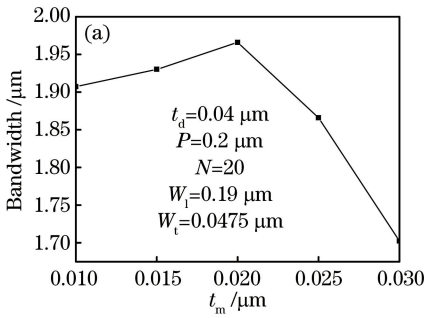


图5 材料厚度对吸收带宽的影响。(a)金属层厚度;(b)介质层厚度

Fig. 5 Influence of material thickness on absorption bandwidth. (a) Metal layer thickness; (b) dielectric layer thickness

经过计算发现 PHWA 的金属/介质层对数 N 对其吸收带宽也有较大影响,如图 6 所示。由图中可以发现在 N 从 20 对增加到 22 对(增加的对数是在金字塔最上端往上垒, W_l 逐渐变窄)的过程中, PHWA 的吸收带宽在增加,从原先的 $1.9671 \mu\text{m}$ 增加到 $2.0830 \mu\text{m}$ 。随着 N 的增加,最右端的波长一直都维持在 $2.683 \mu\text{m}$,但是最左端的波长会从 $0.7159 \mu\text{m}$ 蓝移到 $0.6 \mu\text{m}$,这是因为宽度较窄的慢光波导只能降低短波长的速度,所以随着在 PHWA 上垒加更窄的金属层/介质层,就会吸收更短的入射光波。

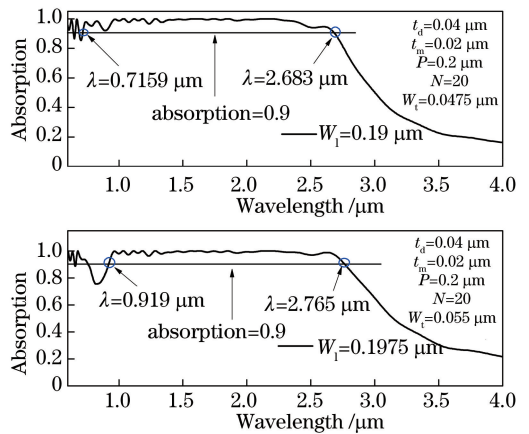


图7 波导层宽度对吸收带宽的影响

Fig. 7 Effect of waveguide layer width on absorption bandwidth

加到 $0.055 \mu\text{m}$),因此其最小的吸收波长会从 $0.7159 \mu\text{m}$ 红移到 $0.919 \mu\text{m}$ 。

图 8 是 PHWA 在不同波长下的磁场分布,此时 t_d 和 t_m 分别为 $0.04 \mu\text{m}$ 和 $0.02 \mu\text{m}$, W_l 和 W_r 分别为 $0.19 \mu\text{m}$ 和 $0.0475 \mu\text{m}$, $N = 20$ 。从图 8 可以发现在不同波长下 PHWA 能量聚集中心不同,并且随着波长的增加,能量聚集中心会逐渐从上往下移动。当入射波长为 $1 \mu\text{m}$ 时,能量聚集在宽度为 $0.0565 \mu\text{m}$ 的慢光波导层上;当入射波长为 $2 \mu\text{m}$ 时,能量聚集在宽度为 $0.1475 \mu\text{m}$ 的慢光波导层上。这是因为窄的慢光波导层只能降低短波长光速,而宽的慢光波导层只能降低长波长光速。因为光速被降低,所以对应波长的光会聚集在对应的慢光波导层上,从而出现能量聚集中心。

目前已经有相关文献报道利用超材料吸收器提高太阳能电池的光转换效率,由于太阳光从不同角度照射到太阳能电池上,所以需要超材料吸收器能够在入射光以不同的角度入射时保持较高的吸收效率^[21-22]。图 9 是 PHWA 在不同入射角下对光的吸

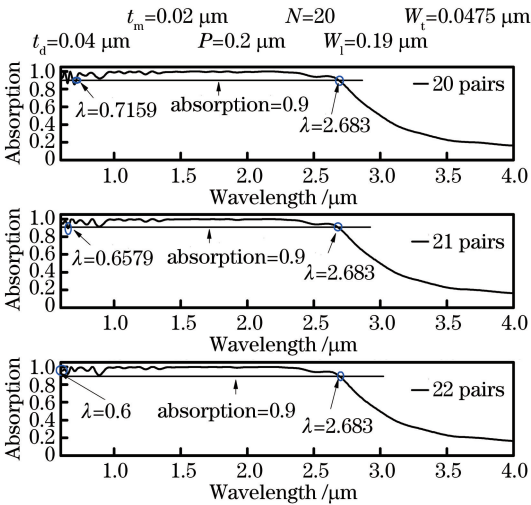


图6 N 对吸收带宽的影响

Fig. 6 Effect of N on absorption bandwidth

N 值相同时,不同的波导层宽度对 PHWA 吸收带宽的影响也不同,如图 7 所示。图 7 所示为 $N = 20$, W_l 分别为 $0.19 \mu\text{m}$ 和 $0.1975 \mu\text{m}$, W_r 分别为 $0.0475 \mu\text{m}$ 和 $0.055 \mu\text{m}$ 时 PHWA 的吸收带宽。从图 7 可以发现随着 W_l 增大,最大的吸收波长会从 $2.683 \mu\text{m}$ 红移到 $2.765 \mu\text{m}$;但是当 W_l 增大,为了让 N 保持 20,则其 W_r 势必也要增大(从 $0.0475 \mu\text{m}$ 增

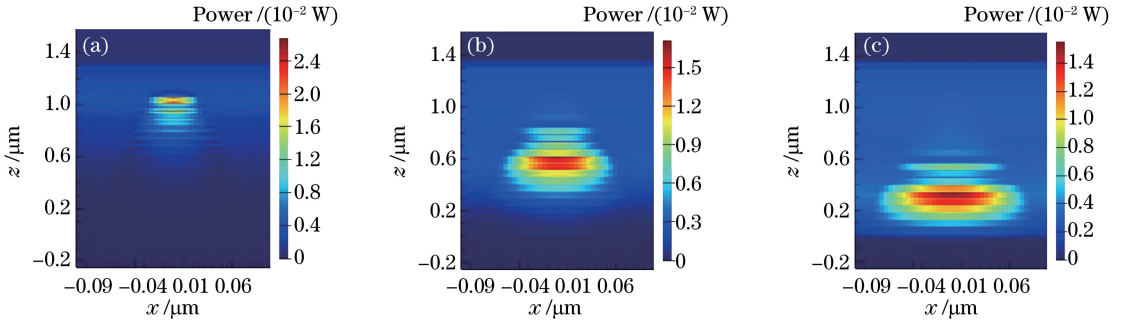


图8 不同波长下 PHWA 磁场分布。(a) $1\ \mu\text{m}$; (b) $1.5\ \mu\text{m}$; (c) $2\ \mu\text{m}$

Fig. 8 PHWA magnetic field distribution at different wavelengths. (a) $1\ \mu\text{m}$; (b) $1.5\ \mu\text{m}$; (c) $2\ \mu\text{m}$

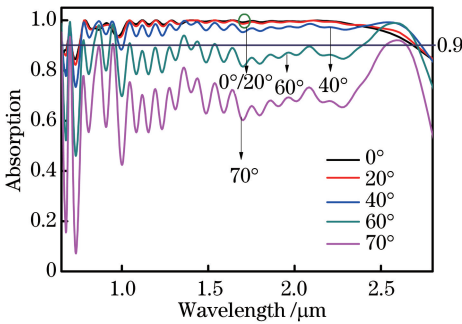


图9 不同入射角对 PHWA 吸收效率的影响

Fig. 9 Effect of different incident angles on PHWA absorption efficiency

收效率(TM 偏振态下, t_d 和 t_m 分别为 $0.04\ \mu\text{m}$ 和 $0.015\ \mu\text{m}$, W_1 和 W_2 分别为 $0.19\ \mu\text{m}$ 和 $0.0475\ \mu\text{m}$, $N=20$), 从图中可以发现, 当光入射角在 40° 内变化时, PHWA 在波长 $0.747\sim 2.665\ \mu\text{m}$ 范围内依然保持 90% 以上的光吸收效率, 甚至当入射角度达到 60° 时, PHWA 的光吸收效率依然可以达到 80%。因此本文提出的超材料吸收器如若应用在太阳能电池上, 将会显著提高太阳能光转换效率。

5 结 论

基于 FDTD 模拟计算了由硅和金构成的旋转对称金字塔形 PHWA, 通过模拟计算发现在垂直入射条件下, PHWA 的吸收效率与偏振无关, 即 TE/TM 偏振态下吸收效率完全相同。当 $t_m = 0.02\ \mu\text{m}$, $t_d = 0.04\ \mu\text{m}$ 时 PHWA 具有最大吸收带宽, 其吸收带宽随着 N 的增加而增加, 而且慢光波导的底端宽度增加会使吸收波长往长波长方向扩展。另外在 TM 偏振状态下, PHWA 在大的光入射角条件下依然可以保持较高的光吸收效率, 当入射角小于 40° 时, PHWA 的光吸收效率在整个近红外波段可维持在 90% 以上。

参 考 文 献

- [1] Zhou Y G, Li M Q, Pan X. Broadband absorber based on metamaterials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121602.
周永光, 李民权, 潘旭. 基于超材料的宽频带吸液体[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121602.
- [2] Dash R K, Sahu S K, Mishra C S, et al. Realization of 'non-linear invisibility cloak' using meta-material[J]. Optik, 2016, 127(20): 9635-9639.
- [3] Alù A, Silveirinha M G, Salandrino A, et al. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: tailoring the radiation phase pattern[J]. Physical Review B, 2007, 75(15): 155410.
- [4] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 148-151.
- [5] Ebrahimi A, Withayachumnankul W, Al-Sarawi S, et al. High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5): 1345-1351.
- [6] Smith D R, Pendry J B. Homogenization of metamaterials by field averaging (invited paper)[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(3): 391-403.
- [7] Shrekenhamer D, Xu W R, Venkatesh S, et al. Experimental realization of a metamaterial detector focal plane array[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(17): 177401.
- [8] Dincer F, Akgol O, Karaaslan M, et al. Polarization angle independent perfect metamaterial absorbers for solar cell applications in the microwave, infrared, and visible regime [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2014, 144: 93-101.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters,

- 2008, 100(20): 207402.
- [10] Su Z X, Yin J B, Zhao X P. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF₂ multilayer structures[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1679-1690.
- [11] Yao G, Ling F R, Yue J, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [12] Hoa N T Q, Lam P H, Tung P D, et al. Numerical study of a wide-angle and polarization-insensitive ultrabroadband metamaterial absorber in visible and near-infrared region [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 4600208.
- [13] Xiong H, Wu Y B, Dong J, et al. Ultra-thin and broadband tunable metamaterial graphene absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1681-1688.
- [14] Shi Y, Li Y C, Hao T, et al. A design of ultrabroadband metamaterial absorber [J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2017, 27(2): 381-391.
- [15] He S L, Chen T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(6): 757-763.
- [16] Cui H N. Graphene based photonic crystal slow light waveguide [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 17-20.
崔海娜. 基于石墨烯的光子晶体慢光波导[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 17-20.
- [17] Jia X Y. Theoretical research of slow-light based on surface plasmon polaritons [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015: 18-35.
贾晓宇. 基于表面等离子体的慢光研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 18-35.
- [18] Gao J, Sang T, Li J L, et al. Double-channel absorption enhancement of graphene using narrow groove metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184210.
高健, 桑田, 李俊浪, 等. 利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道吸收增强[J]. *物理学报*, 2018, 67(18): 184210.
- [19] 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.
- [20] Zhou Z H, Chen K, Zhao J M, et al. Metasurface Salisbury screen: achieving ultra-wideband microwave absorption [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30241-30252.
- [21] 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.
- [22] Rufangura P, Sabah C. Polarization angle insensitive dual-band perfect metamaterial absorber for solar cell applications[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2015, 12(9/10/11): 1241-1245.