

文章编号: 1005-5630(2023)03-0087-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.003.012

可见光和近红外区域宽带超材料吸收器的设计

陈龙, 许明珠, 高善虎, 高秀敏, 董祥美, 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 电磁波吸收器是一种能够吸收和湮灭电磁波的装置, 广泛应用于军事、科技和人民生活的各个领域。基于超材料的吸收器由于其强大的吸收电磁波的能力、超薄特性以及设计的灵活性而受到广泛关注。但此类吸收器存在带宽窄的问题, 因此, 设计了一种基于金属-介电-金属(metal-dielectric-metal, MDM)结构的宽带超材料吸收器。对其吸收原理和物理机制进行了分析, 并对其结构参数进行了仿真模拟。结果表明, 超材料吸收器对于490~1790 nm的入射光的吸收率高于80%, 平均吸收率可达90%, 最佳工作角度为30°。此外, 通过修改单元结构的对称性, 可以实现偏振相关调控。所提出的超材料吸收器非常适合于太阳能光伏、光通信、滤波和传感等方面的应用。

关键词: 吸收器设计; 超材料; 多层结构; 宽带吸收; 偏振可调吸收器

中图分类号: O 436.2 **文献标志码:** A

Design of broadband metamaterial absorber in the visible and near-infrared region

CHEN Long, XU Mingzhu, GAO Shanhu, GAO Xiumin, DONG Xiangmei, ZHUANG Songlin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An electromagnetic wave absorber is a device that can absorb and annihilate electromagnetic waves, which is widely used in various fields of military, science and technology, and people's livelihood. Absorbers based on metamaterials have received considerable attention due to their potent ability to absorb electromagnetic waves, ultra-thin characteristics, and design flexibility. In this paper, we design a broadband metamaterial absorber based on metal-dielectric-metal (MDM) structure, and analyze the absorption principle and physical mechanism, and simulate the parameters of the structure. The results show that the metamaterial absorber has an absorption rate higher than 80% for incident light from 490-1790 nm, with an average absorption rate of up to 90% and an optimal operating angle of 30°. In addition, the polarization-dependent tuning can be performed by modifying the symmetry of the cell structure. The proposed broadband metamaterial

收稿日期: 2022-12-13

基金项目: 国家重点研发计划重点专项子课题(2017YFB0503102-3)

第一作者: 陈龙(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超表面功能器件。E-mail: 1329645452@qq.com

通信作者: 董祥美(1977—), 女, 高级实验师, 研究方向为矢量光场调控。E-mail: mmssoap@163.com

absorber is well suited for solar photovoltaic, optical communication, filtering and sensing applications.

Keywords: design of absorber; metamaterial; multilayer structure; broadband absorber; polarization adjustable absorber

引 言

超材料是一种具备特殊物理性质的人工复合材料,在雷达天线^[1-3]、传感^[4-6]、全息^[7-9]和透镜^[10-12]等方面有着广泛的应用前景。而基于超材料的吸收器是指能对位于工作波长的电磁波进行有效吸收的器件,其广泛应用于太阳能光伏^[13-14]、传感^[15-16]、光通信^[17-18]等领域。自从Landy等^[19]提出了第一个超材料完美吸收器以来,大量基于超材料的完美吸收器被模拟和制造出来,吸收频率也从微波波段扩展到太赫兹^[20]、红外和可见光^[21-26]。

可见光到近红外波段的宽带超材料吸收器在能源和传感方面应用广泛,备受关注。例如, Hoa等^[21]提出了一种基于多层视锥体结构的吸收器,覆盖了480~1 480 nm处的可见光和近红外区域,吸收率高于90%。Luo等^[22]演示了一种由两层镍薄膜覆盖的圆柱体阵列吸收器,对于整个可见光区域(400~700 nm)的吸收率高于90%。Hoque等^[23]提出一种由钨和镍制成的吸收器,在478~697 nm波段实现80%以上的吸收。Devendran等^[24]提出一种基于十字形黄金谐振器的宽带太阳能吸收器,在500~3 000 nm波段实现60%以上的吸收。Parmar等^[25]设计了一款基于方形黄金谐振器的太阳能吸收器,在600~1 000 nm波段的平均吸收率达到78%。Surve等^[26]提出基于石墨烯的超表面太阳能吸收器,设计了4种不同的黄金谐振阵列,效果最好的一组在200~800 nm波段的平均吸收率可达92%。上述技术虽然都提升了吸收带宽和吸收率,但不管是多层结构的设计还是黄金和石墨烯的运用都会使其制造和量产受到限制。因此,有必要设计一种配置简单、制造相对容易、宽带吸收完美的吸收器。

本研究设计了一种基于金属-介电-金属(metal-dielectric-metal, MDM)结构的超材料吸

收器,包括钛圆盘层、玻璃介电层和铝衬底层。仿真结果表明,超材料吸收器的有效吸收范围为490~1 790 nm,平均吸收率达到90%。进一步调整光源的入射角度,吸收器在斜入射角为 $\pm 30^\circ$ 时,在476~1 697 nm波长范围内的平均吸收率可达89.9%。所提出的超材料吸收器非常适合于光通信、太阳能光伏、滤波和传感等方面的应用。此外,通过调节结构单元的对称性,还优化出一款单波长的偏振敏感吸收器,非常适合应用于偏振检测。

1 原理与单元结构设计

1.1 原理

本文中超材料吸收器的结构参数小于工作波长,因此在研究其与入射光的相互作用时,可根据等效介质理论^[27]对其进行分析。在等效介质理论中将超材料吸收器视为一种均匀材料,使用 S 参数反演法对其进行表征。电磁波从不同端口入射超材料吸收器得到的散射参数如图1所示:从端口1入射时,可以得到反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} ;从端口2入射时,可以得到反射系数 S_{22} 和透射系数 S_{12} 。

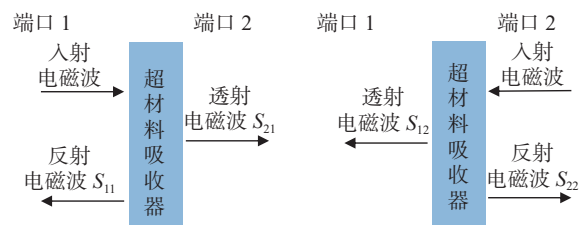


图 1 均匀材料上的 S 参数测量

Fig. 1 S parameter measurements on uniformly media

光波入射到吸收器表面时会发生反射、透射和吸收,所以超材料吸收器的吸收率 $A(\omega)$ 可以表示为^[28]

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2 \quad (1)$$

式中: $R(\omega)$ 为反射率; $T(\omega)$ 为透射率; $S_{11}(\omega)$ 为反射系数; $S_{21}(\omega)$ 为透射系数; ω 为入射光波的角频率。由于透射光谱受到不透明底部金属薄膜的抑制,且金属层的深度远大于趋肤深度,所以超材料吸收器不会发生透射,即 $T(\omega) = S_{21}(\omega) = 0$, 则式(1)可以简化为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 \quad (2)$$

整个超材料吸收器的传输矩阵 T 可以表示为

$$T = \begin{bmatrix} \cos(nkd) & -\frac{z}{k} \sin(nkd) \\ \frac{k}{z} \sin(nkd) & \cos(nkd) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: n 和 z 分别为超材料吸收器的折射率和阻抗; k 为传播波数; d 为超材料吸收器的厚度。其中 n 和 z 与超材料吸收器的等效介电常数 μ 和等效磁导率 ε 之间的关系为

$$\varepsilon = n/z, \quad \mu = nz \quad (4)$$

散射矩阵 S 的各个分量可由传输矩阵 T 表示为

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{T_{11} - T_{22} + (iT_{12} - T_{21}/ik)}{T_{11} + T_{22} + (iT_{12} + T_{21}/ik)} \\ S_{21} = \frac{2}{T_{11} + T_{22} + (iT_{12} + T_{21}/ik)} \\ S_{22} = \frac{T_{22} - T_{11} + (iT_{12} - T_{21}/ik)}{T_{11} + T_{22} + (iT_{12} + T_{21}/ik)} \\ S_{12} = \frac{2\Delta(T)}{T_{11} + T_{22} + (iT_{12} + T_{21}/ik)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{11} 、 T_{12} 、 T_{21} 和 T_{22} 分别为传输矩阵 T 中的各个分量; $\Delta(T)$ 为传输矩阵 T 的行列式; i 为虚数单位。从式(3)中的传输矩阵可知, $T_{11} = T_{22} = T_s$, 且 $\Delta(T) = 1$, 则上式可以简化为

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} = \frac{\frac{1}{2}(T_{21}/ik - ikT_{12})}{T_s + \frac{1}{2}(ikT_{12} + T_{21}/ik)} \\ S_{21} = S_{12} = \frac{1}{T_s + \frac{1}{2}(ikT_{12} + T_{21}/ik)} \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)中传输矩阵 T 的参数带入上式得

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} = \frac{i}{2} \left(\frac{1}{z} - z \right) \sin(nkd) \\ S_{21} = S_{12} = \frac{1}{\cos(nkd) - \frac{i}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \sin(nkd)} \end{cases} \quad (7)$$

由上式中 S_{11} 的表达式可知, 当 $z = 1$ 时, $S_{11} = 0$, 即反射率 $R(\omega)$ 也等于 0, 此时超材料吸收器的吸收率 $A(\omega)$ 接近 1, 从而可以实现完美吸收。

1.2 单元结构设计

图2所示为本研究中的超材料吸收器示意图。该吸收器是具有3个功能层的MDM结构, 每个晶胞都由钛纳米圆盘、玻璃介质层和铝衬底层组成, 玻璃介质层和铝衬底层的厚度分别为 $d_2 = 100 \text{ nm}$ 和 $d_3 = 200 \text{ nm}$, 钛纳米圆盘的半径为 $r = 110 \text{ nm}$, 厚度为 $d_1 = 20 \text{ nm}$, 晶胞周期为 $T_x = T_y = 230 \text{ nm}$ 。

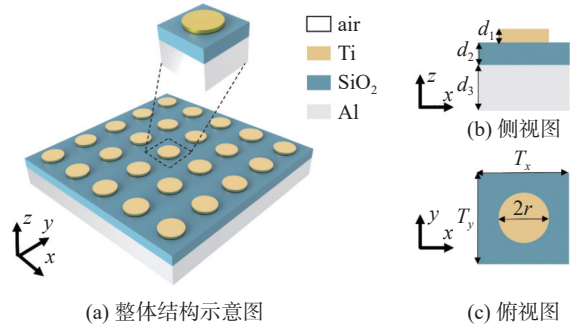


图2 超材料吸收器结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of metamaterial absorber

本文应用有限差分域(finite difference time domain, FDTD)方法对所提出的吸收器进行了数值研究, 分析了该结构在不同尺寸参数下的透射率与反射率。主要优化的尺寸参数为钛纳米圆盘的半径 r 和厚度 d_1 , 以及整个结构的周期 T_x 和 T_y 。入射光的传播方向设置为垂直于 x - y 平面, 在 x 和 y 方向上使用周期性(periodic)边界条件, 在 z 方向上使用完美匹配层(perfect matched layers, PML)边界条件。

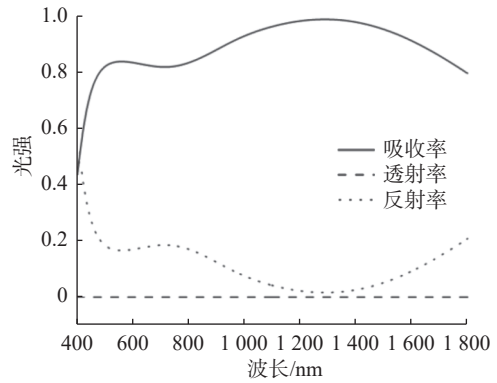
2 结构分析与优化

首先对所提出的超材料吸收器进行了仿真并分析其物理机制, 接着分析该单元结构在不同参

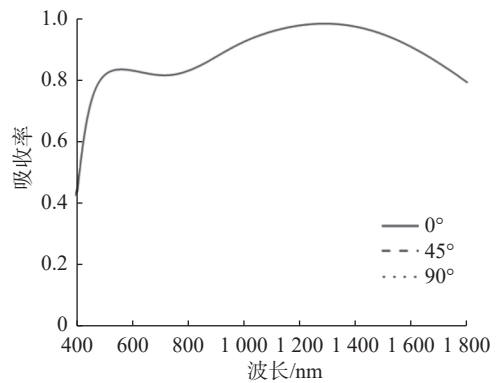
数情况下的吸收情况。

先数值仿真了超材料吸收器，其反射率、透射率和吸收率如图 3(a)所示。吸收率曲线在 554 nm 和 1 290 nm 处各有一个吸收峰，峰值吸收率达到 83.457% 和 98.392%，且两处吸收峰之间的区域的吸收率都在 80% 以上，形成了一个从 490 nm 到 1 790 nm 间的宽带吸收区域。图 3(b)所示为不同偏振方向的入射光在正常入射时的吸收特性。可以看到，由于所研究的超材料吸收器结构具有高度对称性，吸收率曲线并没有随偏振方向的改变而发生变化。

为了说明超材料吸收器的物理机制，研究了不同偏振方向下钛纳米圆盘表面(x-y 平面)的电场和磁场分布，图 4(a)~(h)显示了 1 290 nm 处，0°偏振、30°偏振、60°偏振和 90°偏振入射时的电场和磁场分布。如图 4(a)~(d)所示，1 290 nm 处电场主要集中在上下、左右 4 个端点处，电场的局部增强表面电偶极子发生在钛纳米圆盘上，4 个端点的强弱主要取决于偏振方向。图 4(e)~(h)显示 1 290 nm 处的磁场主要集中在钛纳米圆盘平行于偏振方向的两侧边缘，表示磁二倍体共振。电场和磁场图表明，在顶部金属层



(a) 反射率、透射率和吸收率的模拟结果



(b) 不同偏振方向下的吸收率

图 3 超材料吸收器的模拟吸收谱

Fig. 3 Simulated absorption spectrum of metamaterial absorber

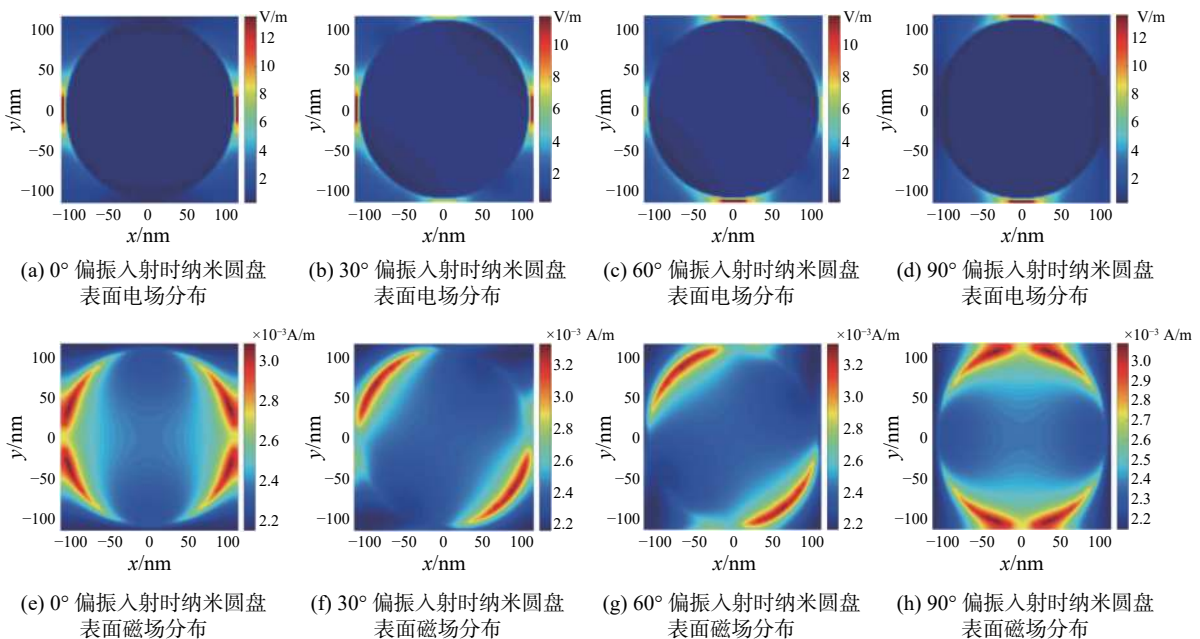


图 4 1 290 nm 的波以不同偏振状态入射时钛纳米圆盘表面的电场和磁场分布

Fig. 4 The electric and magnetic field distributions on the surface of the titanium nanodisk at the incident of different polarized light at 1 290 nm.

中, 电共振和磁共振可以在共振频率下同时被激发, 因此导致入射光波近乎完美的吸收。

接下来进一步研究了超材料吸收器的斜入射特性。图 5(a)和(b)模拟了 0° 和 90° 偏振以 $0^\circ\sim 70^\circ$ 的入射角入射时的吸收光谱, 步长为 10° 。虽然可以选择更小的步长, 但选择较大步长可以显著减少仿真时间和计算负担。从图 5(a)中可以看到, 入射角 θ 的增大会使得第一个吸收峰逐渐升高, 第二个吸收峰覆盖的区域缩减, 并且曲线整体向左侧移动。即使入射角 θ 增加到 70° , 其对于 0° 偏振仍然存在着 872 nm 的吸收带宽 ($329\text{ nm}\sim 1\ 201\text{ nm}$)。 90° 偏振如图 5(b)所示, 入射角 θ 的增大使得吸收曲线整体下降, 且下降速度越来越快。当入射角 θ 增大到 60° 时, 吸收率均在 80% 以下。整体来看, 吸收器的最佳工作角度在 30° , 此时对于 $476\sim 1\ 697\text{ nm}$ 波段的吸收率在 78.3% 以上, 平均吸收率为 89.9% 。当最大工作角度为 50° , 此时对于 $374\sim 1\ 800\text{ nm}$ 波段的吸收率在 60% 以上, 平均吸收率为 83.8% 。

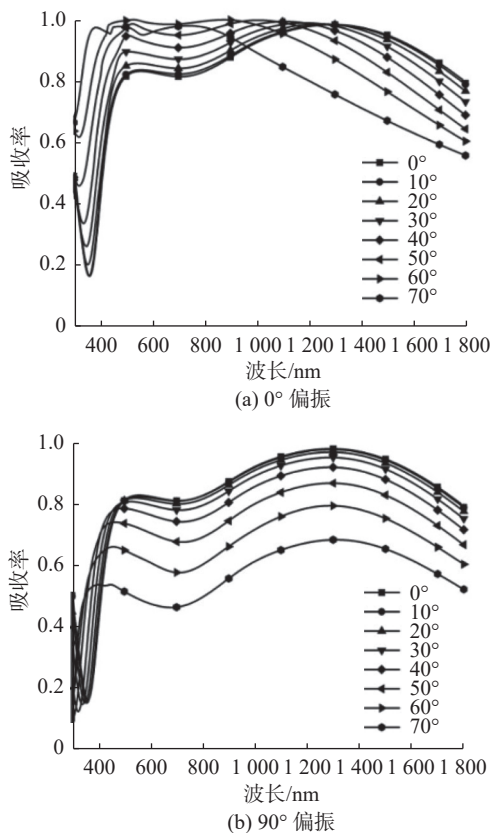


图 5 光波在不同入射角下的吸收光谱
Fig. 5 Absorption spectra of light waves at different incidence angles

接着研究了钛纳米圆盘的结构参数对其吸收率的影响。图 6(a)和(b)显示了不同半径 r ($10\sim 115\text{ nm}$)和不同厚度 d_1 ($1\sim 30\text{ nm}$)的模拟吸收光谱。如图 6(a)所示, 随着半径 r 的增大, 吸收器的吸收率峰值和吸收带宽都随之增长。在半径 r 达到 104 nm 和 113 nm 时, 吸收率峰值和吸收带宽分别达到最大值, 此后开始不断降低。从图 6(b)中可以看到, 随着厚度 d_1 的增加, 吸收率峰值和吸收带宽都会相应增加, 但不同的是在 $d_1 = 5.5\text{ nm}$ 处有一次阶跃式变化, 吸收带宽从 445 nm 突变到 661 nm 。之后吸收带宽不断增加, 直到厚度超过 21 nm 之后, 吸收波段出现了分裂, 形成两段大于 80% 的吸收波段。

随后, 研究了周期参数对于所提出的超材料

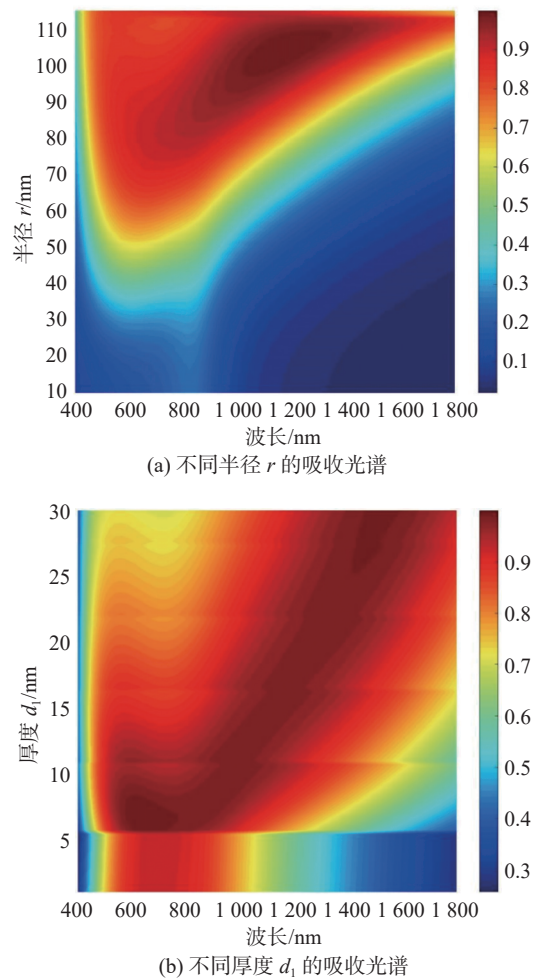


图 6 不同半径 r ($10\sim 115\text{ nm}$)和厚度 d_1 ($1\sim 30\text{ nm}$)的超材料吸收器的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra of metamaterial absorbers with different radii r ($10\sim 115\text{ nm}$)and thicknesses d_1 ($1\sim 30\text{ nm}$)

吸收器吸收率的影响。图 7(a)~(d)显示了不同周期 T ($T_x=T_y=T$) 和 T_y ($T_x=220$ nm) 时吸收器对于 0° 和 90° 偏振的吸收光谱。从图 7(a)和(b)可以看出, 周期 T 的变化对于偏振没有影响, 随着 T 的增长, 吸收器的吸收带宽逐渐减少。而从图 7(c)和(d)来看, 只改变周期 T_y 的值将导

致 0° 和 90° 偏振的吸收出现差别, 0° 和 90° 偏振的吸收带宽都在逐渐减小, 但 0° 偏振的吸收带宽比 90° 偏振吸收带宽的减小速度要慢得多。因此, 可通过调节周期的对称性来实现偏振相关吸收器的调控。

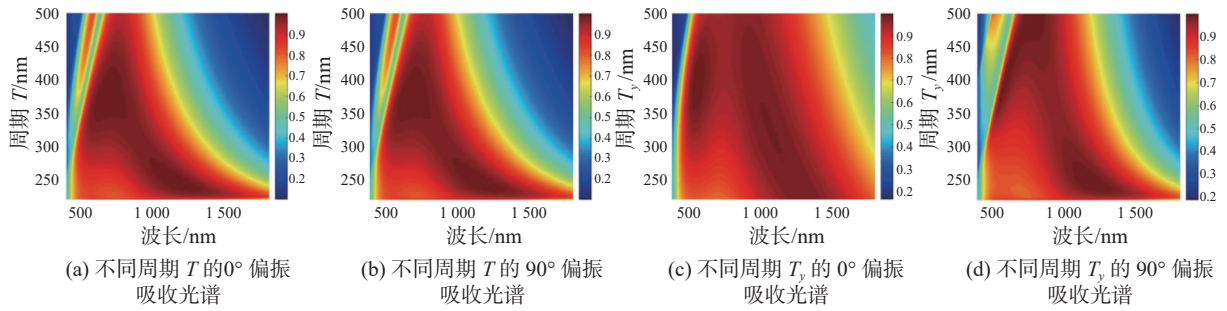


图 7 不同周期 T (220~500 nm) 和不同周期 T_y (220~500 nm) 时 0° 和 90° 偏振的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectra of 0° and 90° polarization at different periods T (220-500 nm) and T_y (220-500 nm)

综上所述, 本研究设计了一个偏振不敏感偏振超材料吸收器, 参数分别为 $r = 110$ nm, $d_1 = 20$ nm, $d_2 = 100$ nm, $d_3 = 200$ nm, $T_x = T_y = 230$ nm。该吸收器有效吸收范围为 490~1 790 nm, 吸收率 80% 以上, 斜入射范围达到

30° 。将其与已有吸收器的吸波性能进行了比较, 从材料构成、带宽和吸收率方面分析了宽带吸收器的特性, 如表 1 所示。综合来看, 所提出的结构工作效果最好, 使用材料也相对便宜, 性价比最高。

表 1 超材料吸收器与已有吸收器的比较

Tab. 1 comparison of the proposed metamaterial absorber and reported absorbers

吸收器	材料	工作带宽/nm	吸收率
文献[21]	金和硅	480~1 480	>90% 斜入射 60° >90%
文献[22]	UV树脂和镍	400~700	>90% 斜入射 60° >80%
文献[23]	钨、交联聚苯乙烯和镍	478~697	>80%
文献[24]	金、氟化镁和钨	500~3 000	>60%
文献[25]	金、氟化镁和钨	600~1 000	平均78%
文献[26]	金、石墨烯和二氧化硅	200~800	平均92%
本文	钛、二氧化硅和铝	490~1 790 476~1 697	>80% 斜入射 30° >78.3%

此外, 还设计出一个偏振敏感吸收器, 优化结构参数为 $d_1 = 33$ nm, $d_2 = 100$ nm, $d_3 = 200$ nm, $r = 90$ nm, $T_x = 240$ nm, $T_y = 500$ nm。该结构的吸收器对于 633 nm 的入射光的吸收曲线如图 8

所示, 对于 0° 偏振的吸收率达到 99.9%, 对于 90° 偏振的吸收率为 52.9%。该结构非常适合用于检测实验室中常见的 633 nm 激光器的线偏振检测, 以及使用该激光器的旋向检测实验。

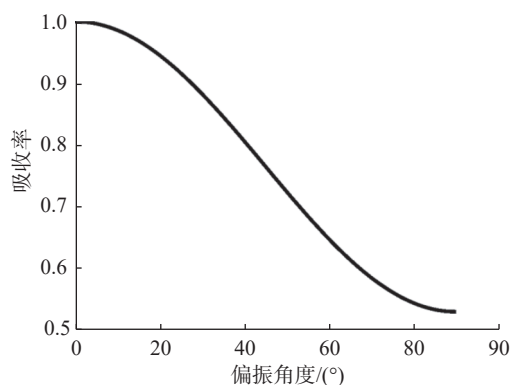


图8 不同偏振角度的吸收曲线

Fig. 8 Absorption curves of different polarization angles

3 结论

综上所述,本文设计了一款MDM结构的超材料吸收器。结果表明,超材料吸收器对于490~1790 nm的入射光的吸收率高于80%,平均吸收率达到90%,在入射角小于30°时,能实现偏振不敏感宽带吸收。此外,通过修改单元结构周期的大小,可以实现偏振敏感和不敏感的调控,并且依此优化出一款单波长的偏振检测吸收器。其对于633 nm的0°偏振的吸收率在99.9%以上,90°偏振的吸收率为52.9%。这些特性证明所提出的完美超材料吸收器非常适合于光通信、偏振检测、滤波和传感应用。

参考文献:

- [1] 潘晨清,周东方,刘起坤,等.基于极化转换超表面的宽带雷达散射截面缝隙天线阵[J].*强激光与粒子束*,2021,33(10):103001.
- [2] DONG J W, ZHANG F B, JIAO Z K, et al. Microwave photonic radar with a fiber-distributed antenna array for three-dimensional imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19113 – 19125.
- [3] SHARMA A, DWARI S, KANAUIA B K, et al. In-band RCS reduction and isolation enhancement of a 24 GHz radar antenna using metamaterial absorber for sensing and automotive radar applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 13086 – 13093.
- [4] 赵静,王加贤,赖丽萍,等.基于全介质超表面高Q的双带太赫兹传感器[J].*激光与光电子学进展*,2022,59(13):1304004.
- [5] 刘嘉玲,熊鑫,邵咏妮.基于太赫兹超材料技术低浓度莠去津的快速检测[J].*光学仪器*,2022,44(1):9 – 14.
- [6] EVERITT H O, TYLER T, CARAWAY B D, et al. Strain sensing with metamaterial composites[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(9): 1801397.
- [7] GAO H, WANG Y X, FAN X H, et al. Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate[J]. *Science Advances*, 2020, 6(28): eaba8595.
- [8] CAIRA N W, SMITH D R. Multispectral metasurface hologram at millimeter wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A19 – A25.
- [9] 徐巍伟,臧小飞.基于超表面的太赫兹复用成像[J].*光学仪器*,2020,42(1):40 – 45.
- [10] WANG A, CHEN Z M, DAN Y P. Planar metalenses in the mid-infrared[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(8): 085327.
- [11] 丁洪贞,臧小飞.基于几何相位的线偏振聚焦超表面器件[J].*光学仪器*,2020,42(1):14 – 19,31.
- [12] 于东,程庆庆.太赫兹宽带消色差偏折器设计[J].*光学仪器*,2019,41(6):54 – 59.
- [13] MANN S A, GARNETT E C. Resonant nanophotonic spectrum splitting for ultrathin multijunction solar cells[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(7): 816 – 821.
- [14] JIANG X Y, ZHOU L M, HU J G, et al. Nanostructured multilayer hyperbolic metamaterials for high efficiency and selective solar absorption[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11504 – 11513.
- [15] ALVES F, GRBOVIC D, KEARNEY B, et al. Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13256 – 13271.
- [16] AMIRI M, ABOLHASAN M, SHARIATI N, et al. Remote water salinity sensor using metamaterial perfect absorber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(8): 6785 – 6794.
- [17] XIE W L, SUN P, WANG J, et al. Polarization-independent dual narrow-band perfect metamaterial absorber for optical communication[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2022, 64(7): 1310 – 1316.
- [18] XOMALIS A, DEMIRTZIOGLOU I, JUNG Y, et al. Cryptography in coherent optical information networks using dissipative metamaterial gates[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(4): 046102.
- [19] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*,

- 2008, 100(20): 207402.
- [20] ZHU H L, WANG K, LIU G Y, et al. Metasurface absorber with ultra-thin thickness designed for a terahertz focal plane array detector[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 15939 – 15950.
- [21] 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.
- [22] LUO M H, SHEN S, ZHOU L, et al. Broadband, wide-angle, and polarization-independent metamaterial absorber for the visible regime[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16715 – 16724.
- [23] HOQUE A, ISLAM M T. Numerical analysis of single negative broadband metamaterial absorber based on tri thin layer material in visible spectrum for solar cell energy harvesting[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(4): 1061 – 1069.
- [24] DEVENDRAN M, BENO A, KANNAN K, et al. Numerical investigation of cross metamaterial shaped ultrawideband solar absorber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(5): 323.
- [25] PARMAR J, PATEL S K, KATRODIYA D, et al. Numerical investigation of gold metasurface based broadband near-infrared and near-visible solar absorber[J]. *Physica B:Condensed Matter*, 2020, 591: 412248.
- [26] SURVE J, PARMAR J, PATEL S K, et al. Comparative analysis of metasurface array-based solar absorber for visible region[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(12): 696.
- [27] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.
- [28] LEE D, HWANG J G, LIM D, et al. Incident angle- and polarization-insensitive metamaterial absorber using circular sectors[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27155.

(编辑: 李晓莉)