

超宽带高吸收超材料太阳能吸收器设计

王杨¹, 轩雪飞¹, 朱路², 朱家兵^{1*}, 沈晓波^{1**}, 高强¹, 胡昌俊¹¹淮南师范学院电子工程学院, 安徽 淮南 232038;²华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 基于阻抗匹配理论与组合谐振结构特性,设计了一种超宽带超材料太阳能吸收器。该吸收器由栅格结构与金属/介质/金属堆叠结构组合而成,组合结构有效拓展了吸收带宽。采用时域有限差分法分析了吸收器的吸收特性,结果表明:该吸收器在 300~4000 nm 波段内的平均吸收率可达 94.9%,吸收带宽为 3700 nm,可有效覆盖可见光与红外光波段。该吸收器在整个吸收波段范围内具有一定的偏振独立特性,以 60°广角斜入射时,平均吸收率仍可达到 93%。谐振频点处的电磁场分布表明,该吸收器的超宽带高吸收特性主要归因于表面等离子体共振、局域表面等离子体共振、慢波效应、法布里-珀罗共振,以及共振模式间的杂化耦合作用。所提超宽带高吸收太阳能吸收器在许多超材料领域具有潜在的应用价值。

关键词 材料;超材料;太阳能吸收器;高吸收率;超宽带

中图分类号 O431 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.0903001

1 引言

超材料吸收器是通过设计超材料结构形状实现的能够高效吸收特定频率与波段电磁波的超材料器件。自 2008 年 Landy 等^[1]首次提出在特定频率实现 100%吸收的超材料完美吸收器以来,超材料吸收器就受到了广泛关注。吸收器的研究波段已从微波段扩展到太赫兹频段、可见光波段、近红外波段、远红外波段等,超材料吸收器在生物成像、材料探测、医学光谱学、隐形设备、太阳能电池、通信、生物传感等领域发挥着重要作用^[2-11]。研究表明,太阳辐射能量主要集中在可见光和红外光波段。因此,研究吸收波段可以覆盖可见光与红外光波段的超材料完美吸收器对于太阳能的开发利用具有重要意义。

研究人员利用不同材料设计相应的形状实现了

特定波段的完美吸收。研究人员^[12-14]设计的金属矩形、金圆柱形、嵌套金属环形等超材料吸收器在太赫兹波段实现了单频/双频完美吸收,但其吸收波段较窄,限制其在太阳能吸收领域的应用。为拓展吸收器在光波段内的吸收带宽,Cong 等^[15]与 Hoa 等^[16]基于 Au/Si 材料设计了金属/介质多层堆叠吸收器,5 层堆叠结构的吸收波段为 400~750 nm、10 层堆叠结构的吸收波段为 480~1480 nm(可见光到近红外光波段)。然而上述结构的层数较多且吸收波段仍不宽。基于贵金属虽然可以实现宽带吸收,但其成本较高。为进一步展宽吸收波段,Wu 等^[17]利用 W/SiO₂ 设计了双曲超材料吸收器,它可将吸收波段扩展到 260~1580 nm,平均吸收率为 98.9%,但其结构较为复杂。Yi 等^[18]提出了 W/SiO₂ 四层圆盘结构,该结构在 420~1950 nm 波段内实现了吸收率超过 90%的完美吸收。Yu 等^[19]

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-19; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61967007, 61963016)、国防科技重点实验室基金研究项目(6142113180101)、教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH150); 江西省重点研发计划重点项目(20201BBF61012)、安徽省科技重大专项(202003a05020031)、安徽省重点研发计划(202004a05020023)、淮南市科技计划项目(2021A2411)、淮南师范学院校级科研项目(2020XJYB005, 2019XJYB06, 2020XJYB001)

通信作者: *zjb3617@163.com; **shenhnu@163.com

基于 Ti/W/SiO₂ 设计的三层超材料吸收器在 166~1936 nm 波段内实现了 90% 的高吸收。上述超材料吸收器在一定程度上拓展了吸收带宽,但吸收带宽仍然不够宽,不利于太阳能的吸收利用。

本课题组首先基于阻抗匹配理论与多层组合结构特性设计了一种超材料太阳能吸收器(MSA),其吸收波段覆盖可见光与红外光(300~4000 nm);然后采用时域有限差分(FDTD)方法研究了超材料太阳能吸收器的吸收特性,并从阻抗匹配与电磁场分布的角度分析了吸收器的吸收机理;最后,探究了吸收器的物理参数对吸收率的影响。

2 结构设计

吸收器的吸收率可以表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$,其中 $R(\omega)$ 、 $T(\omega)$ 分别表示反射率和透射率, ω 为入射光源的频率。可以看出,减小透射率和反射率,可以提高吸收器的吸收率。因此,选用厚度大于光趋肤深度的金属衬底可以有效减小光

的透射,增加光的吸收。选用厚度为 200 nm 的钛(Ti)衬底放置在硅(Si)基底上,该衬底厚度大于光在金属 Ti 中的趋肤深度,透射率几乎为 0,所以吸收率可进一步表示成 $A(\omega) \approx 1 - R(\omega)$,此时吸收率仅受反射率的影响。为了增加吸收器的吸收率,本课题组通过优化结构来降低反射率。

如图 1(a)所示,在 Ti 衬底和 Si 基底上按照周期排列单元结构组成超材料太阳能吸收器。吸收器单元结构由上层金属-介质栅格结构与下层金属/介质/金属结构组成,如图 1(b)所示,其中金属选用 Ti,介质选用 GaAs。Ti/GaAs/Ti 堆叠结构中金属与介质层的高度均为 100 nm,长度表示为 L_1 ,宽度表示为 W_1 。Ti/GaAs 栅格结构中间 Ti 矩形分支的高度为 T_1 ,两边 Ti 矩形分支的高度为 T_2 ,长度为 L_4 ,宽度均为 40 nm,两个 Ti 矩形间缝隙宽度为 G_2 ;GaAs 矩形分支的高度统一表示为 H ,长度为 L_3 ,宽度为 40 nm, GaAs 矩形间缝隙宽度为 130 nm。优化后的参数如表 1 所示。图 1(d)所示

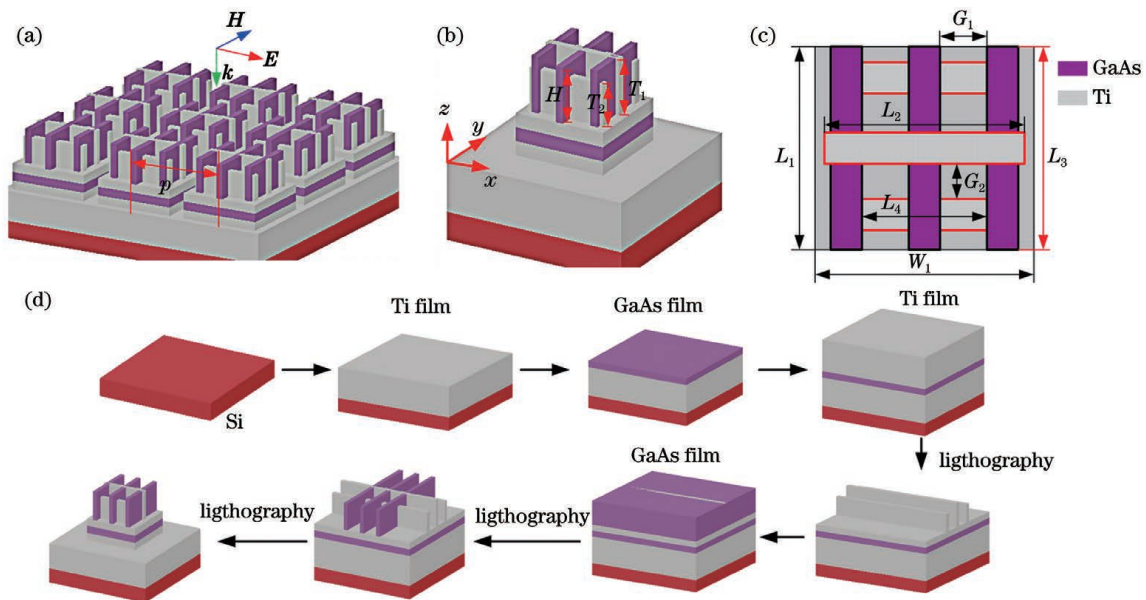


图 1 吸收器示意图。(a)阵列结构;(b)吸收器单元结构;(c)吸收器单元俯视图;(d)制备工艺示意图

Fig. 1 Schematics of absorber. (a) Absorber array; (b) structure schematic of absorber unit cell; (c) top view of absorber unit cell; (d) schematic of preparation process of absorber

表 1 所提吸收器的物理参数

Table 1 Physical parameters of proposed absorber

| Parameter | Value /nm | Parameter | Value /nm |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| H | 400 | L_3 | 500 |
| T_1 | 400 | G_1 | 130 |
| T_2 | 300 | G_2 | 120 |
| L_1 | 500 | p | 600 |
| L_2 | 420 | W_1 | 500 |

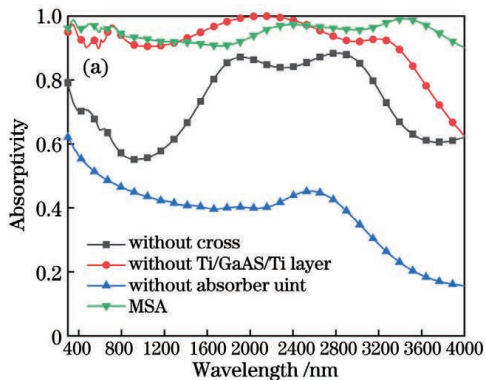
为超材料太阳能吸收器的制备过程示意图。首先,用丙酮和去离子水对硅基底进行超声波清洗,采用磁控溅射沉积 Ti 薄膜、GaAs 薄膜、Ti 薄膜;然后采用光刻和电子束蒸发得到 Ti 矩形金属,再采用磁控溅射沉积 GaAs 薄膜并刻出 GaAs 矩形;最后,光刻出结构,再经过涂覆、预干燥、曝光、开发、硬化、电子束蒸发、剥离光刻(剥离过程)和沉积等工艺制备阵列结构。

3 结果分析

本研究采用 FDTD 方法计算吸收器的吸收特性,进而探究物理参数对吸收性能的影响,并结合阻抗匹配与电磁理论分析超宽带吸收的物理机制,以为超材料吸收器的设计提供理论指导。采用 FDTD 方法计算时, x 、 y 方向上的边界条件为周期边界, z 方向上的边界条件为完美匹配层(PML)。Ti、GaAs、Si 的介电常数参考 Palik 的实验值^[20]。

3.1 吸收特性分析

超材料太阳能吸收器的物理参数设置如表 1 所示,本文主要研究其在 300~4000 nm 波段内的吸收特性。采用电场沿 x 方向偏振(TM 波)、波长范围为 300~4000 nm 的平面波垂直入射吸收器结构表面。超材料太阳能吸收器的吸收率曲线如图 2(a)所示。超材料太阳能吸收器在 300~4000 nm 范围内有多个谐振点,这些谐振点相互叠加形成多个吸收峰,整个波段范围内的吸收率均在 90% 以上,吸收带宽(吸收率大于 90% 的波段范围)为



3700 nm。吸收器的平均吸收率^[21]可定义为

$$A_{\text{aver}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda) d\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}, \quad (1)$$

式中: $A(\lambda)$ 为该波长下的吸收率; λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为最大与最小入射波长。由式(1)计算可得,超材料太阳能吸收器在 300~4000 nm 波段内的平均吸收率为 94.9%。为验证所设计吸收器结构的优越性,计算了不同结构吸收器的吸收率与平均吸收率,如图 2(a)与图 2(b)所示。当吸收器没有上层的十字栅格结构时,其在整个波段内的吸收率均在 90% 以下,尤其是在可见光波段的吸收率较低;当吸收器没有下层的 Ti/GaAs/Ti 堆叠结构时,其在远红外波段(3200~4000 nm)的吸收率较低,平均吸收率为 91%;当吸收器未放置单元结构(即只存在衬底时),吸收率在整个波段内都小于 60%,平均吸收率为 38%。对比发现,所设计的超材料太阳能吸收器的吸收波段最宽,吸收率整体较为优秀。

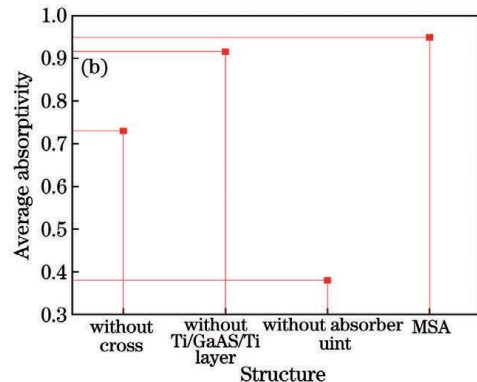


图 2 不同结构吸收器的吸收率和平均吸收率。(a)吸收率;(b)平均吸收率

Fig. 2 Absorptivity and average absorptivity of absorber with different structures. (a) Absorptivity; (b) average absorptivity

偏振敏感性与大角度斜入射吸收特性对于吸收器的实际应用较为重要。为探究入射波偏振角度对吸收率的影响,将偏振角度从 0° 增大到 90° ,其他参数不变,计算得到了吸收光谱,如图 3(a)所示。由图 3(a)可以看出:超材料太阳能吸收器在 300~4000 nm 波段内的吸收率随着偏振角度的增大有所下降,但整体的下降幅度较小;当偏振角度增大到 90° 时,超材料太阳能吸收器在整个波段内的吸收率均在 85% 以上,平均吸收率为 92%。超材料太阳能吸收器的上层为栅格结构,下层为三层矩形堆叠结构,由此结构特点可知其形状沿各偏振方向并不完全对称,因此结构内由入射光源沿各偏振方向所激发的谐振模式(级数)及耦合强度都不同,谐振频点

与电磁场分布也有差别。但从吸收光谱来看,吸收率在整个波段内整体差别不大, 90° 偏振角度下的平均吸收率与 0° 偏振角度下的相差较小(2.9%)。超材料吸收器在可见光与红外光波段具有一定的偏振不敏感特性,有利于太阳能的吸收。

为进一步探究斜入射角度对吸收特性的影响,在 TM 波入射条件保持不变的情况下改变入射角度,计算了吸收器的吸收光谱,如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看出,超材料太阳能吸收器受入射角度的影响较大,尤其是在可见光波段内变化得较快。这是因为表面等离子体激元主要由 TM 波(电场沿 x 方向)激发,而 x 方向上的电场分量随斜入射角度增大而逐渐减小,导致光源激发的金属表面

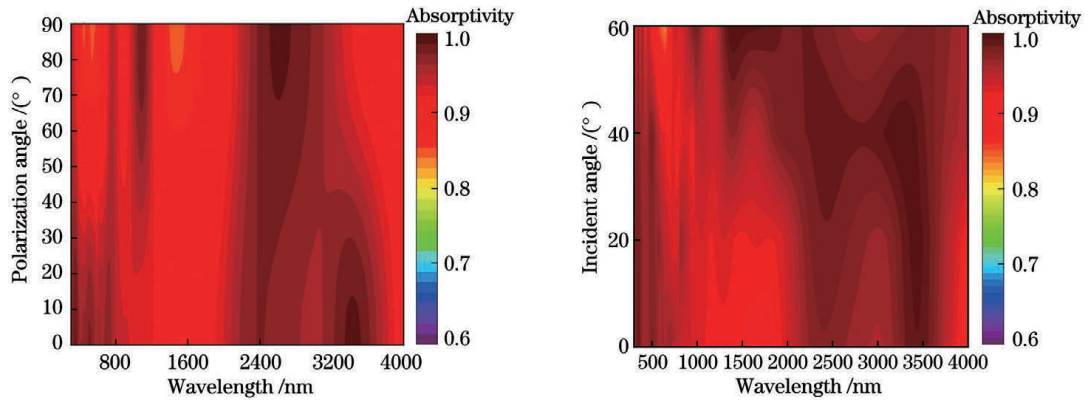


图 3 偏振角度与斜入射角度对吸收光谱的影响。(a)偏振角度的影响;(b)斜入射角度的影响

Fig. 3 Effects of polarization angle and incident angle on absorption spectrum. (a) Effect of polarization angle; (b) effect of incident angle

等离子体共振作用减弱。此外,电场分量的减小导致腔模共振及模式相互间的耦合作用减弱。从图 3(b)所示的吸收光谱可以看到,整个入射波段内各入射角度下的吸收率谱线并不完全重合。光以 60° 广角斜入射时,超材料太阳能吸收器在 300~4000 nm 波段范围内仍能保持较高的吸收率,平均吸收率可达 93%,表现出一定的广角高吸收特性。

超材料太阳能吸收器具有宽波段、高吸收、偏

振不敏感与广角吸收等特性。为验证所提吸收器的性能,本文将其与文献[12,14-16]报道的吸收器的性能进行了对比,对比结果如表 2 所示。相对吸收带宽为吸收器完美吸收带宽,可表示为 $B_w = 2(\lambda_u - \lambda_d) / (\lambda_u + \lambda_d)$,其中 λ_u 、 λ_d 分别表示吸收率大于 90% 波长范围内的波长最大值与最小值。对比后可以发现,所提出的吸收器在 300~4000 nm 波段内的吸收率可达 94.9%,相对带宽可达 172%,吸收性能较为优秀。

表 2 本文所提吸收器与其他太阳能吸收器的对比

Table 2 Comparison of some solar energy absorbers with the absorber proposed in this work

| Absorber | Wavelength / nm | Bandwidth / % | Average absorptivity / % | Polarization insensitivity | Material |
|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------------------|----------|
| Absorber in ref. [12] | 400-750 | 61 | 95 | | Au |
| Absorber in ref. [14] | 260-1280 | 132 | 98.9 | Yes | W |
| Absorber in ref. [15] | 420-1950 | 129 | 92.5 | Yes | Ti |
| Absorber in ref. [16] | 100-2000 | 179 | 92.7 | Yes | Ti |
| Proposed absorber | 300-4000 | 172 | 94.9 | Yes | Ti |

3.2 机理分析

首先,结合阻抗匹配理论分析超材料太阳能吸收器的宽波段高吸收特性。当入射光垂直入射至吸收器结构表面时,吸收器的相对阻抗 Z_r 和反射率^[22-23]可分别表示为

$$Z_r = \frac{Z(\omega)}{Z_0} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (2)$$

$$R(\omega) = \left| \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right|^2, \quad (3)$$

式中: $Z(\cdot)$ 、 Z_0 分别为结构和自由空间的阻抗; S_{11} 、 S_{21} 分别为反射系数与透射系数。由式(2)可知,当吸收器结构阻抗 $Z(\cdot)$ 等于自由空间阻抗 Z_0 时,吸收器的相对阻抗为 1,即二者的阻抗完全匹配。由

式(3)可以看出,当结构阻抗与自由空间阻抗完全匹配时,吸收器的反射率最小(为 0)。另外,当吸收器的衬底厚度大于趋肤深度时,吸收率接近 0。由吸收率计算公式可知,吸收器的吸收率可达到 100% 完美吸收。计算得到的超材料太阳能吸收器的相对阻抗如图 4(a)所示。从图中可以看出,超材料太阳能吸收器在整个波段内相对阻抗的实部 $\text{Re}(Z_r)$ 接近 1,虚部 $\text{Im}(Z_r)$ 接近 0。然而,吸收器的相对阻抗越接近 1,其阻抗匹配效果越好,反射率越小,吸收率越高。因此,超材料太阳能吸收器在 300~4000 nm 波段范围内的阻抗匹配效果较好,吸收特性也较为完美。图 4(b)所示是无栅格结构吸收器相对阻抗的实部和虚部,可以看出,此时吸收器相对

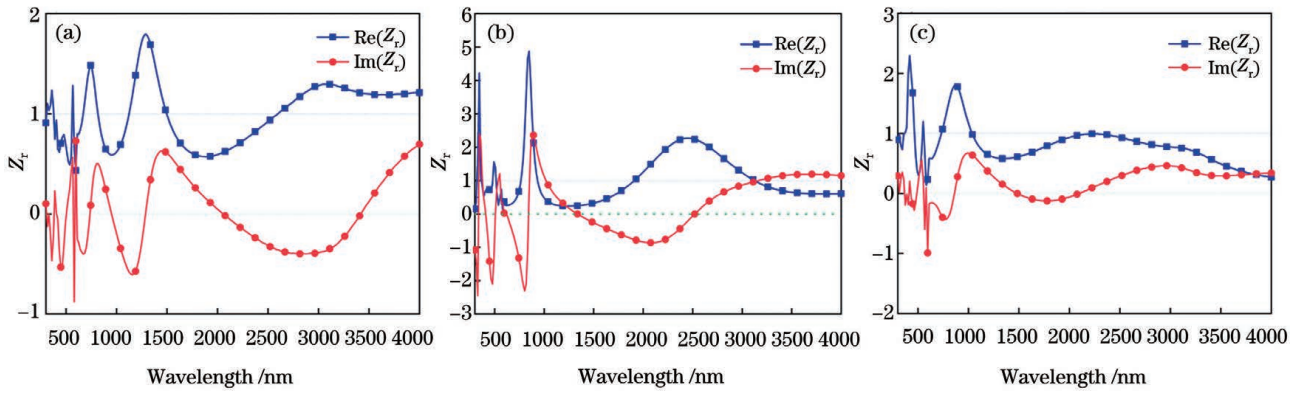


图 4 不同结构的相对阻抗。(a)MSA;(b)无栅格结构;(c)无 Ti/GaAs/Ti 结构

Fig. 4 Relative impedance for different structures. (a) MSA; (b) structure without cross; (b) structure without Ti/GaAs/Ti layer

阻抗的实部和虚部在整个波段内的差距较大,阻抗匹配效果较差。由吸收光谱也可以看出,无栅格结构的吸收器在 300~4000 nm 波段范围内的吸收率均在 90% 以下,与 FDTD 的计算结果较为吻合。图 4(c)是无 Ti/GaAs/Ti 三层堆叠结构吸收器的相对阻抗曲线,可以看出,在 3000~4000 nm 波段内该吸收器的阻抗匹配效果较差,吸收率在该波段内也有所下降。

综合来看,上层栅格结构与下层堆叠结构的组合使得超材料的电磁参数(电导率、磁导率)发生改变,进而促使结构阻抗与空间阻抗匹配,最终导致反射率降低,吸收率增加。

其次,为进一步探究超材料太阳能吸收器宽波段高吸收的物理机制,提取了上层栅格结构中较低金属 Ti 矩形上表面与金属缝隙间的电场强度 $|E|$ 在谐振频率点(360, 720, 3440 nm)处的分布,如图 5 所示。图 5(a)~(c)所示是 TM 波垂直入射时,较低金属 Ti 矩形上表面横截面($z = 300$ nm 平面,以结构中心点为原点,下同)的电场强度分布。当波长为 360 nm 与 720 nm 时,红色“热点”区域(电场增强区域)主要集中在金属矩形表面与矩形分支间的缝隙处;当波长为 3440 nm 时,电场增强区域主要集中在栅格结构的金属边缘处。图 5(d)~(f)所示是 TM 波垂直入射时,金属缝隙纵截面($x = 75$ nm

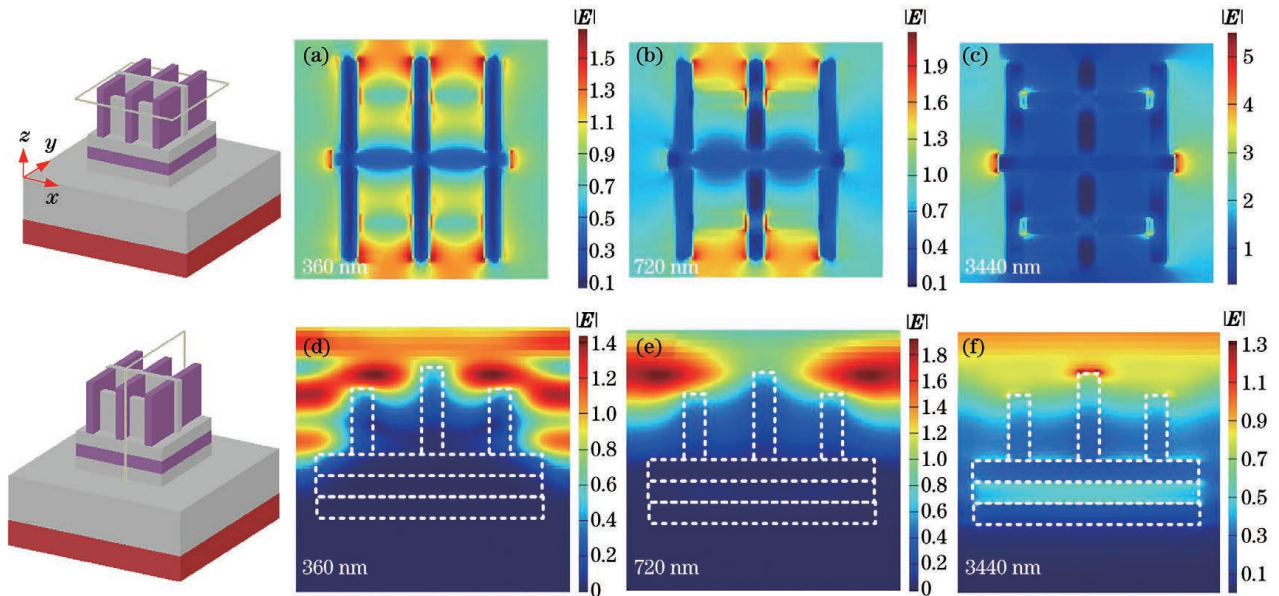


图 5 不同波长下 x 平面与 z 平面上的电场强度 $|E|$ 分布。(a) $\lambda = 360$ nm, z 平面;(b) $\lambda = 720$ nm, z 平面;

(c) $\lambda = 3440$ nm, z 平面;(d) $\lambda = 360$ nm, x 平面;(e) $\lambda = 720$ nm, x 平面;(f) $\lambda = 3440$ nm, x 平面

Fig. 5 Electric field intensity $|E|$ distributions of planes x and y under different wavelengths. (a) $\lambda = 360$ nm, plane z ; (b) $\lambda = 720$ nm, plane z ; (c) $\lambda = 3440$ nm, plane z ; (d) $\lambda = 360$ nm, plane x ; (e) $\lambda = 720$ nm, plane x ; (f) $\lambda = 3440$ nm, plane x

平面)的电场强度分布。从图中可以看出:在谐振波长分别为 360 nm 与 720 nm 时,金属表面与金属之间的缝隙处形成了电场增强区域;当波长为 3440 nm 时,在栅格结构的金属表面处与 Ti/GaAs/Ti 三层堆叠结构的介质层中形成了明显的电场增强。

接下来进一步分析金属表面及缝隙处电场增强的原因。为分析栅格缝隙处的电场增强,对比了图 5(d)~(f)所示的 x 平面与图 5(a)~(c)所示的 z 平面上的电场强度分布,可以发现,缝隙处的电场增强主要是因为栅格结构形成的空气缝隙以及吸收器单元之间的空气缝隙都可以近似看作是腔体结构,在入射光的作用下,腔体内形成了腔膜共振,腔膜共振的产生使得能量被束缚在缝隙腔体内,从而使得腔体内的电场显著增强。

为分析栅格金属表面的电场增强,对比了图 5(a)~(c)谐振点处的电场强度分布,可以发现,在谐振点处金属表面产生了电场增强。表面等离子体共振产生的条件是存在金属与介质的交界面,金属与介质矩形的交叉形成了光栅结构,结构的改变使得交界面两边介质的相对介电常数与磁介常数满足动量匹配要求,激发表面等离子体共振。因此,在 TM 波激发作用下,金属表面的自由电子与入射波发生共振,在介质与金属的交界面处产生表面等离子体共振,并激发产生表面等离子体激元(SPPs),SPPs 与缝隙处的腔膜共振相互作用,使能量局域在金属结构表面以及空气缝隙处,进而使电场增强,光吸收增加。

如图 5(c)所示,在波长为 3440 nm 时,栅格金属拐角处产生了显著的场增强。这是因为在入射光

的激励下,栅格金属表面产生 SPPs,使能量被局域在金属表面,进而在边缘激发产生局域表面等离子体共振,并产生局域表面等离子体激元(LSPs),LSPs 与金属表面的 SPPs、缝隙处的腔膜共振相互作用,使能量局域在金属结构表面以及空气缝隙处,从而在金属结构表面与缝隙腔体内形成陷光效应^[21]。此时结构内的能量被高度局域,反射的能量减小,光吸收进一步增强。

为分析谐振作用间的相互作用,计算了 z 平面在入射波长分别为 600, 650, 700 nm 时的电场强度分布,如图 6 所示。对比不同波长下的电场强度分布可以看出,超材料太阳能吸收器结构表面与缝隙处的电场强度在各谐振波长下不同。当波长为 600 nm 时,电场增强区域主要集中在单元结构之间的缝隙处,如图 6(a)所示,此时的场增强主要由腔膜共振主导。当波长为 700 nm 时,电场增强区域主要集中在上层的栅栏结构与单元间缝隙腔内,如图 6(c)所示,此时的场增强主要由二级腔膜共振主导。当波长为 650 nm 时,电场增强区域主要集中在栅栏结构、金属边缘以及单元间缝隙腔内,如图 6(b)所示,此时单元缝隙腔内的二级腔膜共振被激发,并与下层金属/介质/金属结构中金属表面的 LSPs 耦合;同时,上层栅栏结构的腔膜共振也被激发,并与栅栏结构金属表面的 SPPs 发生杂化耦合。可以看出,因吸收器分支结构的存在,入射波在各金属分支表面激发表面等离子体共振的主次模式以及在空气缝隙处激发的腔膜共振级数都不相同。各模式的表面等离子体共振与各级数的腔膜共振共同作用,在吸收器结构内形成杂化耦合,进一步拓展了吸收器的吸收带宽。

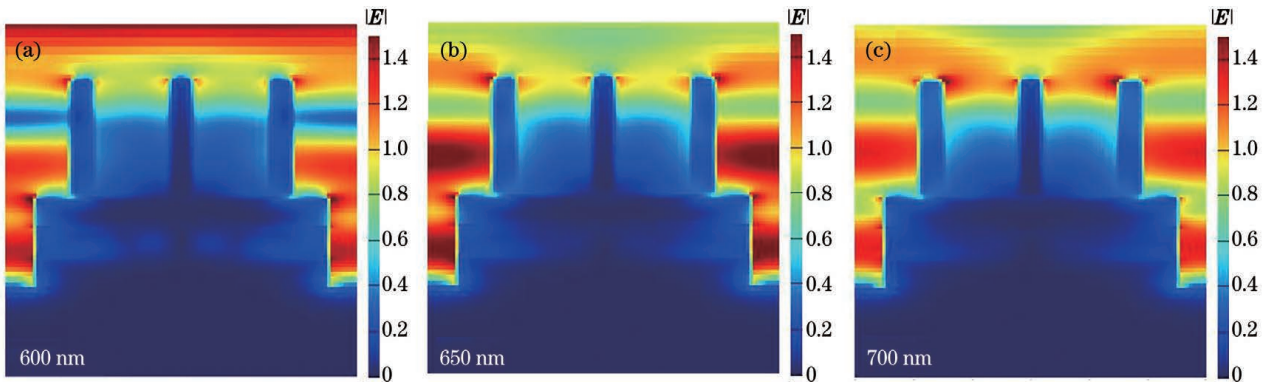


图 6 不同波长下 z 平面的电场强度分布。(a) $\lambda=600$ nm;(b) $\lambda=650$ nm;(c) $\lambda=700$ nm

Fig. 6 Electric field intensity distributions of plane z at different wavelengths. (a) $\lambda=600$ nm; (b) $\lambda=650$ nm; (c) $\lambda=700$ nm

最后,探究了栅格结构与超材料太阳能吸收器单元缝隙处的谐振模式。周期单元内 Ti 矩形结构

缝隙处纵截面($y=70$ nm 平面)的电场强度 $|E|$ 与磁场强度 $|H|$ 分布如图 7 所示。图 7(a)~(c)为

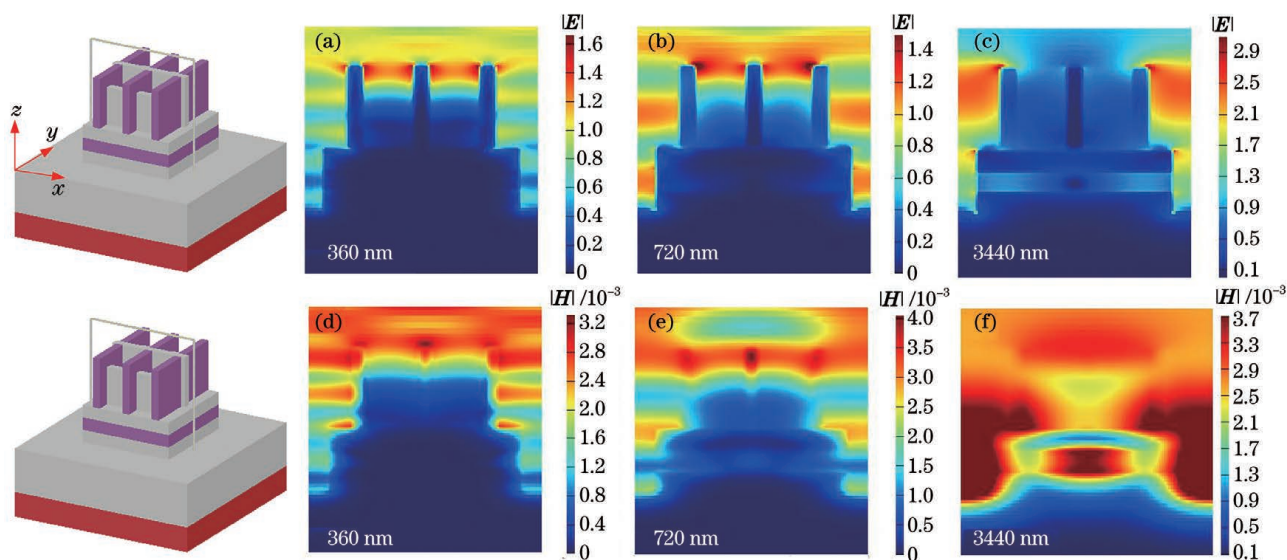


图 7 不同波长下的电场强度与磁场强度分布。(a) $\lambda=360$ nm, 电场强度;(b) $\lambda=720$ nm, 电场强度;(c) $\lambda=3440$ nm, 电场强度;(d) $\lambda=360$ nm, 磁场强度;(e) $\lambda=720$ nm, 磁场强度;(f) $\lambda=3440$ nm, 磁场强度

Fig. 7 Electric field intensity and magnetic field intensity distributions at different wavelengths. (a) Electric field intensity, $\lambda=360$ nm; (b) electric field intensity, $\lambda=720$ nm; (c) electric field intensity, $\lambda=3440$ nm; (d) magnetic field intensity, $\lambda=360$ nm; (e) magnetic field intensity, $\lambda=720$ nm; (f) magnetic field intensity, $\lambda=3440$ nm

TM 波垂直入射下周期单元内 Ti 矩形结构缝隙 (y 平面) 在谐振点处的电场强度分布, 可以看出, GaAs 介质分支之间的缝隙与周期单元之间的缝隙处在入射波激励下出现了明显的电场增强。当入射波长为 360 nm 时, 栅格结构分支缝隙处的电场强度增强, 缝隙腔体内形成了驻波模式, 这与文献[25]提到的法布里-珀罗 (F-P) 共振类似。当存在横磁波垂直入射时, 谐振波长^[26-28] 满足

$$(m + 0.25)\lambda_r = n_{\text{eff}}h, \quad (4)$$

$$\sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2} k_0 d = n\pi + 2\arctan\left(\frac{\epsilon_d \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2}}\right), \quad (5)$$

式中: m 为腔膜级数; n_{eff} 为波导结构的有效折射率, 可由式(5)所示的波导方程求出; h 为吸收器单元所形成的腔体的高度; n 为正整数; ϵ_m 与 ϵ_d 分别表示金属和介质的介电常数。由式(4)计算得到结构内发生法布里-珀罗共振时的谐振波长为 368 nm, 采用 FDTD 方法计算可知波长为 360 nm 时产生吸收峰(98.5%)。理论计算与 FDTD 方法计算结果基本一致, 说明此波长下的高吸收率由法布里-珀罗共振激发产生。法布里-珀罗共振被激发后会在结构腔体内形成驻波, 驻波的产生延长了波与结构的作用时间, 促进了光的吸收。当入射波长为 720 nm 时, 场增强区域主要集中在栅格结构分支缝隙处与单元结构之间的缝隙处, 如图 7(b) 和图 7(e) 所示,

此时结构单元缝隙处的二级腔模被激发, 形成驻波电场增强, 能量被束缚在腔体内, 增加了光的吸收。当入射波长为 3440 nm 时, 场增强区域主要集中在单元结构之间的缝隙处以及下层堆叠结构的金属层边缘处和介质层中, 如图 7(c) 与图 7(f) 所示, 此时单元结构之间缝隙处的电场增强主要是由于周期单元结构之间形成了缝隙空气腔, 并激发产生法布里-珀罗共振, 能量被束缚在腔体内, 反射率减小, 吸收率增加。金属 Ti 层边缘处的电场增强主要是由表面等离子体共振与局域表面等离子体共振产生的。此外, 由图 7(f) 所示的磁场分布可以看出, 除了在单元结构之间的缝隙处产生了磁场增强, 在 Ti/GaAs/Ti 三层堆叠结构的介质层 (GaAs) 处形成了能流漩涡, 这种现象类似于文献[29]提到的慢波效应。慢波效应的产生使得入射波在结构中的传播速度减慢, 延长了入射波穿过结构时与材料作用的过程, 促进了材料对入射波的吸收。

综合分析可知, 超材料太阳能吸收器的高吸收率主要归因于 SPPs、LSPs、慢波效应, 以及法布里-珀罗共振的产生使得能量被高度局域在结构表面与腔体内。此外, 在不同入射波长作用下, 结构内被激发出不同形式的谐振模式与级数, 它们之间形成杂化耦合作用, 进一步增强了光的吸收并有效拓展了吸收带宽。

3.3 吸收器物理参数对吸收特性的影响

由电磁场分布可知,电场与磁场增强区域主要集中在超材料太阳能吸收器上层栅格结构的缝隙处。为探究上层栅格结构中的 Ti 矩形与 GaAs 矩形对超材料太阳能吸收器吸收特性的影响,首先保持其他参数不变,分别计算上层栅格结构只存在 Ti 矩形分支与 GaAs 矩形分支时的吸收光谱,计算结果如图 8(a)所示。从图 8(a)中可以看出:当只存在 GaAs 矩形分支结构时,吸收器的吸收率在整个人射波段范围内较只存在 Ti 矩形分支结构时表现较差,尤其是在近红外波段内的吸收率小于 80%;当上层栅格结构只存在 Ti 矩形分支时,吸收器的吸收

波段变窄,吸收波段主要在 1000~3500 nm 的近红外波段范围内。此种现象与 Ti 的特性有关。相对于 Au 和 Ag 等贵金属,低 Q 谐振金属 Ti 在红外波段可以激发更宽的带宽响应,而且引入金属结构可在金属与介质的交界面处激发表面等离子体共振,局域能量诱导光的吸收。从阻抗匹配角度分析,当上层栅格结构只存在 Ti 矩形分支时,谐振峰处相对阻抗的实部接近 1,虚部接近于 0,如图 8(b)所示,且波段范围较只存在 GaAs 矩形分支结构的波段范围要宽,阻抗匹配效果更好。因此,本文选择将 Ti 矩形分支结构与 GaAs 矩形分支结构结合形成栅格结构,以拓展吸收带宽、提升吸收率。

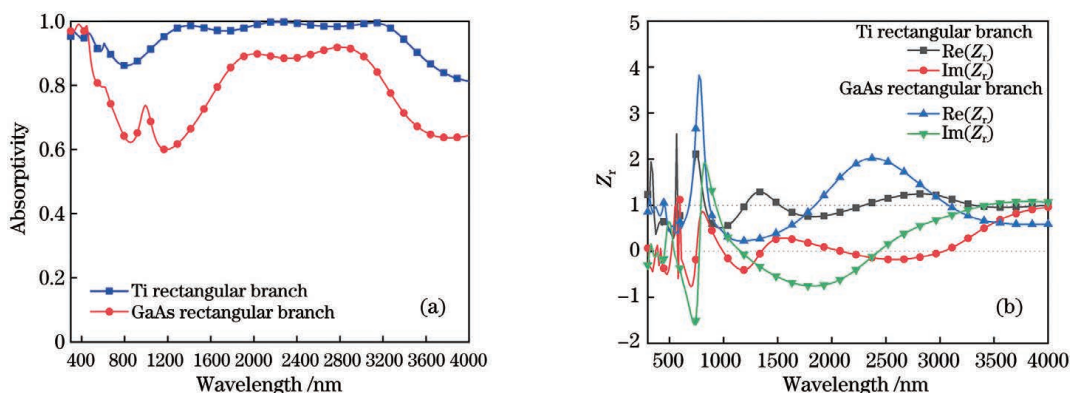


图 8 不同结构的吸收光谱和相对阻抗。(a)吸收光谱;(b)相对阻抗

Fig. 8 Absorption spectra and relative impedance for different structures. (a) Absorption spectra; (b) relative impedance

接着,保持其他参数不变,分析 Ti 矩形分支结构的高度 T_2 对超材料太阳能吸收器吸收的影响。计算得到了在 TM 波垂直入射时各 T_2 下的吸收率与平均吸收率曲线,如图 9(a)和图 9(b)所示。由图 9(b)可以看出,Ti 矩形分支结构的高度对吸收器平均吸收率的影响不大。由图 9(a)所示的吸收率曲线可以看出:在可见光波段范围内,随着 Ti 矩形分支结构高度 T_2 的增加,吸收率呈上升趋势;在红外光波

段范围内,随着 Ti 矩形分支结构高度 T_2 的增加,吸收率曲线呈下降趋势。由前节分析可知,当栅格结构只存在 Ti 矩形分支时,吸收器的谐振波段主要集中在红外波段,因此在红外波段内吸收率受高度的影响较大。综合比较后认为,当 Ti 矩形分支结构高度为 300 nm 时,吸收器的吸收带宽最宽,为 3700 nm。

最后,保持其他参数不变,分析吸收器单元的周期 p 对吸收器吸收特性的影响。计算得到了不同

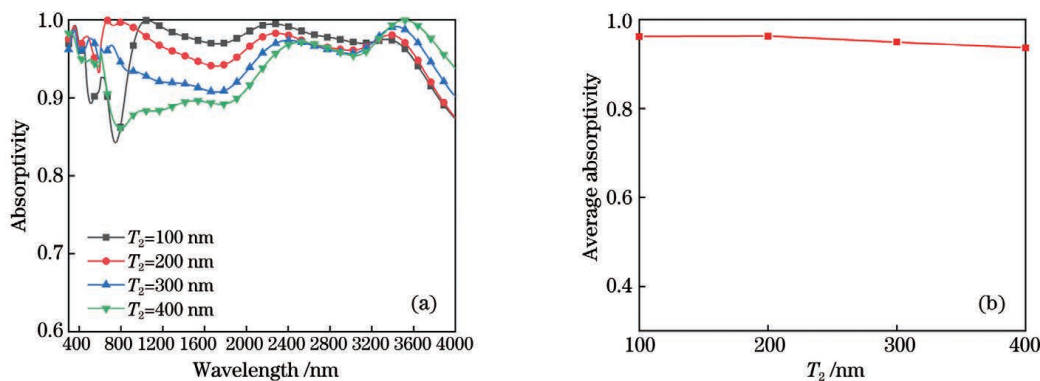


图 9 T_2 对吸收率与平均吸收率的影响。(a)对吸收率的影响;(b)对平均吸收率的影响

Fig. 9 Influences of T_2 values on absorptivity and average absorptivity. (a) Influence on absorptivity; (b) influence on average absorptivity

周期下吸收器的吸收率曲线与平均吸收率曲线,如图 10(a)和图 10(b)所示。当周期为 500 nm,吸收器单元的宽度等于下层堆叠矩形的宽度,在下层的堆叠结构处无法形成腔体结构,法布里-玻罗共振也很难被激发,被束缚的能量减少,吸收率较低。当周期为 800 nm 时,两个吸收器单元的间距较大,结构

间的相互耦合作用减弱,因而吸收器的吸收波段较窄。当周期分别为 600 nm 与 700 nm 时,从图 10(b)所示的平均吸收率曲线看,二者的平均吸收率基本一致,但周期为 700 nm 时,吸收器在近红外波段内的吸收带宽相对较窄,不利于对太阳能的吸收。综合考虑后选择周期为 600 nm。

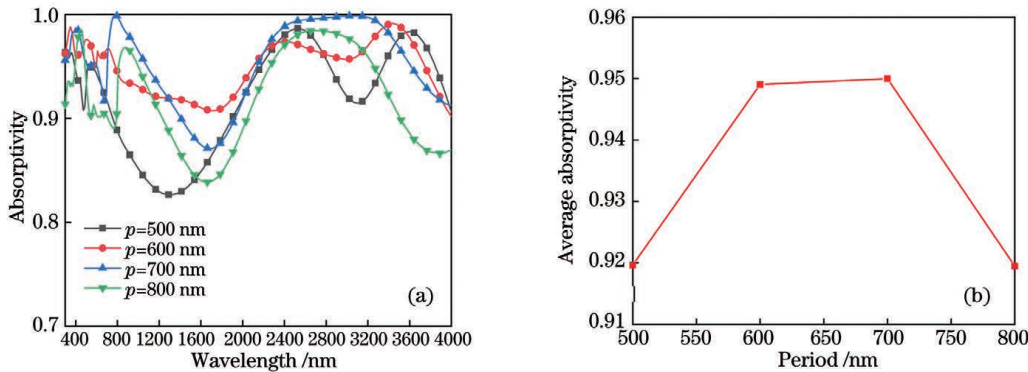


图 10 周期 p 对吸收率与平均吸收率的影响。(a)对吸收率的影响;(b)对平均吸收率的影响

Fig. 10 Influences of period p values on absorptivity and average absorptivity. (a) Influence on absorptivity; (b) influence on average absorptivity

4 结 论

本课题组设计了一种宽波段偏振不敏感的超材料太阳能吸收器,其吸收带宽为 3700 nm,波段范围为 300~4000 nm,平均吸收率可达 94.9%。采用 FDTD 方法分析超材料太阳能吸收器的吸收特性,结果表明,该吸收器在 300~4000 nm 波段范围内具有偏振不敏感与斜入射广角吸收特性,在 60° 广角斜入射时,平均吸收率可以达到 93%。通过电磁场分布与阻抗匹配分析发现,所选材料的电磁响应特性与组合结构设计是实现宽波段高吸收的主要原因。同时,吸收器结构缝隙中产生的法布里-珀罗共振、三层堆叠结构中的慢波效应、金属与介质交界面上产生的表面等离子体共振、边缘处的局域表面等离子体共振及其相互间的杂化耦合作用也是宽波段高吸收产生的重要原因。

在产品制备方面,纳米制备技术与精度的提升为复杂结构纳米器件的制备提供了新的解决方案,现有的类似结构已完成了实物测试^[30-32],为所提吸收器的制备提供了可能。可见光和红外光波段的完美吸收为清洁能源的高效开发和利用提供了新思路。本工作对完美吸收器、热发射器、电磁屏蔽等电磁超材料器件的设计具有一定的参考价值。

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] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, et al. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 154-156.

[3] 魏伟, 赵倩, 石星波. 模板法金纳米簇的制备及其在生物分子检测中的应用[J]. *激光生物学报*, 2019, 28(4): 296-304.

Wei W, Zhao Q, Shi X B. Preparation of gold nanoclusters by template method and applications in biomolecule biosensing [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2019, 28(4): 296-304.

[4] Liu J, Chen W, Ma W Z, et al. Ultra-broadband infrared absorbers using iron thin layers [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 43407-43412.

[5] Liu J, Chen W, Zheng J C, et al. Wide-angle polarization-independent ultra-broadband absorber from visible to infrared[J]. *Nanomaterials*, 2019, 10(1): E27.

[6] Takatori K, Okamoto T, Ishibashi K. Surface-plasmon-induced ultra-broadband light absorber operating in the visible to infrared range[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1342-1350.

[7] Liu Z M, Gao E D, Zhang X, et al. Terahertz electro-optical multi-functional modulator and its coupling mechanisms based on upper-layer double graphene ribbons and lower-layer a graphene strip [J]. *New Journal of Physics*, 2020, 22(5): 053039.

- [8] 李辉, 余江, 陈哲. 基于混合石墨烯-二氧化钒超材料的太赫兹可调宽带吸收器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0903001.
Li H, Yu J, Chen Z. Broadband tunable terahertz absorber based on hybrid graphene-vanadium dioxide metamaterials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0903001.
- [9] 黄雅琴, 李毅, 李政鹏, 等. W/VO₂ 方形纳米柱阵列可调中红外外宽频吸收器[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0316001.
Huang Y Q, Li Y, Li Z P, et al. Tunable mid-infrared broadband absorber based on W/VO₂ square nano-pillar array[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0316001.
- [10] 孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101603.
Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101603.
- [11] 陈曦, 薛文瑞, 赵晨, 等. 基于 LiF 和 NaF 的超宽带红外吸收器[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0123002.
Chen X, Xue W R, Zhao C, et al. Ultra-broadband infrared absorber based on LiF and NaF [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0123002.
- [12] 杨森, 袁苏, 王佳云. 一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0216001.
Yang S, Yuan S, Wang J Y. A light-excited switchable terahertz dual-band metamaterial absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0216001.
- [13] Li C, Xiao Z Y, Ling X Y, et al. Broadband visible metamaterial absorber based on a three-dimensional structure[J]. Waves in Random and Complex Media, 2019, 29(3): 403-412.
- [14] Nejat M, Nozhat N. Design, theory, and circuit model of wideband, tunable and polarization-insensitive terahertz absorber based on graphene[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019, 18: 684-690.
- [15] Cong J W, Zhou Z Q, Yun B F, et al. Broadband visible-light absorber via hybridization of propagating surface plasmon[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 1965-1968.
- [16] 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): 18371499.
- [17] Wu D, Liu C, Liu Y M, et al. Numerical study of a wide-angle polarization-independent ultra-broadband efficient selective metamaterial absorber for near-ideal solar thermal energy conversion[J]. RSC Advances, 2018, 8(38): 21054-21064.
- [18] Yi Z, Li J K, Lin J C, et al. Broadband polarization-insensitive and wide-angle solar energy absorber based on tungsten ring-disc array[J]. Nanoscale, 2020, 12(45): 23077-23083.
- [19] Yu P Q, Yang H, Chen X F, et al. Ultra-wideband solar absorber based on refractory titanium metal[J]. Renewable Energy, 2020, 158: 227-235.
- [20] Palik E D. Handbook of optical constants of solids II [EB/OL]. [2021-02-05]. <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/124810497.PDF>.
- [21] Jiang X, Yuan H, Chen D, et al. Metasurface based on inverse design for maximizing solar spectral absorption[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(19): 2100575.
- [22] Smith D R, Dalichaouch R, Kroll N, et al. Photonic band structure and defects in one and two dimensions [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1993, 10(2): 314-321.
- [23] Ding F, Dai J, Chen Y T, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39445.
- [24] 曹英浩, 张斯文, 孙晓东, 等. 亚波长金属梯形槽阵列光陷效应研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 202416.
Cao Y H, Zhang S W, Sun X D, et al. Light-trapping effect of sub-wavelength metal trapezoidal groove array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 202416.
- [25] Li Z B, Yang Y H, Kong X T, et al. Fabry-Perot resonance in slit and grooves to enhance the transmission through a single subwavelength slit[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 105002.
- [26] Hu S, Yang S Y, Liu Z, et al. Broadband and polarization-insensitive absorption based on a set of multisized Fabry-Perot-like resonators[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(22): 13856-13862.
- [27] Smith D R, Schultz S, Markoš P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. Physical Review B, 2002, 65(19): 195104.
- [28] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [29] Ding F, Jin Y, Li B R, et al. Ultrabroadband strong

- light absorption based on thin multilayered metamaterials [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 946-953.
- [30] Qin F, Chen X F, Yi Z, et al. Ultra-broadband and wide-angle perfect solar absorber based on TiN nanodisk and Ti thin-film structure[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 211: 110535.
- [31] Li Y, Liu Z, Zhang H, et al. Ultra-broadband perfect absorber utilizing refractory materials in metal-insulator composite multilayer stacks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11809-11818.
- [32] di Vece M, Kuang Y H, van Duren S N, et al. Plasmonic nano-antenna a-Si:H solar cell[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27327-27336.

Design of Ultra-Broadband and High-Absorption Metamaterial Solar Absorber

Wang Yang¹, Xuan Xuefei¹, Zhu Lu², Zhu Jiabing^{1*}, Shen Xiaobo^{1**}, Gao Qiang¹,
Hu Changjun¹

¹ School of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232038, Anhui, China;

² School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China

Abstract

Objective The metamaterial absorber is a device that achieves high-efficiency absorption of electromagnetic waves within a specific frequency range by adopting a metamaterial structure. The design of metamaterial absorbers with their perfect absorbance at a specific frequency has attracted widespread attention since it was first proposed by Landy in 2008. The absorption band of the absorber exists within the microwave band, terahertz band, visible light band, near-infrared band, and far-infrared band, etc. Metamaterial absorbers are used in biological imaging, material detection, medical spectroscopy, invisible equipment, solar cells, communications, and other fields that play an important role. According to research, solar radiation energy is mainly concentrated in wavebands, visible light, and infrared light. The study of the perfect metamaterials' absorber that can cover the visible light and infrared light bands is of great significance for the development and utilisation of solar energy. Researchers used metamaterial absorbers designed with metal rectangles, gold cylinders, and nested metal rings to achieve perfect single-frequency/dual-frequency absorption in the THz band. In addition, the multilayer stack structure was also designed to expand the absorption bandwidth, such as metal/medium/metal, dielectric/metal/medium, and combinations of various shapes. However, there are still limitations in the design of metamaterial absorbers such as narrow absorption bandwidth, complex structure, and high metal cost. We hope to design a metamaterial absorber with an absorption band covering the visible and infrared ranges, and understand the physical mechanism of its absorption characteristics, and improve the absorption of solar energy.

Methods Using titanium and gallium arsenide, we designed a metamaterial solar absorber with combined structural characteristics. First, the impedance matching effect of the metal/dielectric/metal multilayer structure was analysed based on the impedance matching theory. Then, the influence of the grid structure on the absorption characteristics was analysed. Finally, the metamaterial solar absorber structure was formed by a combination of a grid structure and a metal/dielectric/metal multilayer structure. The finite difference time domain method was used to calculate the absorption characteristics of the metamaterial solar absorber, and the absorption mechanism was analysed from the perspective of impedance matching and electromagnetic field distribution. In addition, the influence of the physical parameters of the absorber on the absorptivity was also explored to guide the optimisation process of the absorber structure design.

Results and Discussions The proposed metamaterial solar absorber has an average absorptivity of 94.9% in the 300–4000 nm band and an absorption bandwidth of 3700 nm. The absorption spectrum of the metamaterial solar absorber is relatively close to the incident polarisation angle from 0° to 90°. When the polarisation angle is increased to 90°, the absorptivity of the metamaterial solar absorber in the entire waveband was above 85%, and the average absorptivity was 92% [Fig. 3(a)]. The absorber has a wide-angle absorption characteristic, with an average

absorptivity of 93% in the wavelength range of 300–4000 nm [Fig. 3(b)]. Using impedance matching theory to study the structural design process of the absorber, the results show that the combination of grid and metal/dielectric/metal multilayer structure has a better impedance matching effect and excellent absorption performance. By changing the upper grid structure of the absorber and the height of the metal branches, the absorption bandwidth of the absorber can be changed (Figs. 9, 10). The study of the electric and magnetic field distribution shows that the high absorption and ultra-wideband performance of the metamaterial solar absorber are mainly from Fabry-Perot resonance, slow-wave effect, surface plasmon resonance, localised surface plasmon resonance, and hybridisation coupling between multiple resonances.

Conclusions In the present study, a metamaterial solar absorber with ultra-wideband and high absorption is designed based on the characteristics of combined resonant structure and impedance matching theory. The absorber unit cell is composed of a cross-shaped and metal/dielectric/metal stack structure, and the combined resonant structure effectively expands the absorption bandwidth. The finite difference time domain method is used to analyse the absorption characteristics, and numerical results reveal that the absorber has an average absorptivity of 94.9% in the 300–4000 nm band with an absorption bandwidth of 3700 nm, which can effectively cover the visible and infrared regions. The absorber exhibits certain polarisation-independent characteristics over the entire absorption band range and maintains an average absorption of 93% at a large angle of 60° oblique incidence. It can be seen from the electromagnetic field distribution at the resonance wavelength, that the broadband and high-absorption characteristics of the absorber are mainly derived from Fabry-Perot resonance, slow-wave effect, surface plasmon resonance, localised surface plasmon resonance, and hybridisation coupling between multiple resonances. Whereas, with the development of nano-processing technology, other similar metamaterial absorber structures have also been manufactured for the test, which also provides the basis for the fabrication of the proposed absorber structure. This work provides a reference value for the design of invisible equipment and solar cells and provides new ideas for the high-efficiency absorption of solar energy.

Key words materials; metamaterial; solar absorber; high absorption; ultra-broadband