

一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器

刘媛媛, 刘唤, 刘坤, 朱路*

华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 根据多尺寸结构特性和阻抗匹配理论,设计一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器。该吸收器由两层不同尺寸的金-半导体薄膜-半导体组成,其可以激发多种谐振模式,实现超宽带的完美吸收。采用时域有限差分法研究和分析吸收器的吸收光谱和电磁场能量分布,以及偏振角和入射角对吸收性能的影响。数值计算结果表明,该吸收器在可见光-中红外范围内的平均吸收率高于 97%,并具有偏振独立性;当入射角度为 60°时,平均吸收率仍高于 90%;宽波段的完美吸收由间隙表面等离子激元、传导表面等离子激元和法布里-珀罗谐振等多种模式的共同作用来实现。

关键词 光学器件; 吸收器; 阻抗匹配; 中红外; 宽波段

中图分类号 O431

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2323001

Ultra-broadband Perfect Absorber with Rectangular Multilayer Structure

Liu Yuanyuan, Liu Huan, Liu Kun, Zhu Lu*

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

Abstract According to the characteristics of the multi-size structure and the impedance matching theory, a perfect ultra-broadband absorber with a rectangular laminated structure is designed. The absorber is composed of two layers of metal-semiconductor films-semiconductors of different sizes, which can excite multiple resonance modes and achieve perfect absorption of ultra-broadband. The finite difference time domain method is used to study and analyze the absorption spectrum and electromagnetic field energy distribution of the absorber, as well as the influence of polarization angle and incident angle on absorption performance. Numerical results show that the average absorptivity of the absorber is higher than 97% in the range of visible light to middle infrared, and it is independent of arbitrary polarization. When the incidence angle is 60°, the average absorption rate is still higher than 90%. The wide band perfect absorption is achieved by the joint action of gap-surface plasmon polaritons, propagation surface plasmon polaritons and Fabry-Perot resonance.

Key words optical device; absorber; impedance matching; mid-infrared; broad band

OCIS codes 230.0250; 160.3918; 300.1030; 240.6680

1 引 言

超材料是一种由人工设计的亚波长结构材料,通过改变超材料结构的形状和尺寸来调节其介电常数和磁导率,这在传感^[1-3]、能量收集^[4-5]、隐身^[6]和滤波^[7-8]等方面具有广阔的应用前景。随着超材料的发展,基于超材料结构的完美吸收器成为了研究热点。完美吸收是指吸收器在特定的波段内对光波具有高吸收的表现,其可分为窄带完美吸收和宽带完美吸收。Landy 等^[9]提出了超材料完美吸收器,

其在太赫兹波段内实现了 96% 的吸收率,但受限于窄带电磁波的吸收,在热发射^[10-11]和太阳能收集^[12]等领域中不能广泛应用。

近年来,为了实现宽带电磁波的有效捕获,研究者设计了不同结构的超材料完美吸收器^[13-27]。文献^[16-21]提出了一种金属-绝缘体-金属的结构,该结构利用金属顶层实现了对宽波段电磁波的有效捕获,但制备顶层所需的光刻技术较为复杂,限制了其重复性制备和大规模应用。研究者提出了由金属-半导体/绝缘体组成的多层结构,而且制备过程中对

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61967007, 61963016)、江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23062)、江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ170360)、江西省重点研发计划(20201BBF61012)

* E-mail: luyuanwanwan@126.com

光刻精度的要求较低^[22]。文献[23]设计了一种 5 层金/硅吸收器,在 400~750 nm 的光谱范围内实现了超过 90% 的吸收率。为了拓宽吸收频带,文献[24]将 44 层金/硅纳米柱与圆环柱结合,在 400~1500 nm 的光谱范围内实现了超过 94% 的平均吸收率。文献[25]提出了一种多尺寸的 10 层金/硅圆盘吸收器,在 480~1480 nm 的光谱范围内实现了 99.2% 的平均吸收率。上述吸收器结构普遍采用贵金属材料来以提高吸收器的吸收率,但使用贵金属材料会增加实际的生产成本。文献[26-27]采用了二氧化硅/钨的层叠结构实现结构与自由空间的阻抗匹配,在较宽波段的平均吸收率超过 95%,但增加了制备难度。文献[13]在钨与砷化镓之间覆盖一层砷化镓薄膜,实现了带宽超过 1300 nm 的完美吸收。文献[22]通过叠加 5 层多尺寸的铬/三氧化二铝,在 400~2100 nm 的光谱范围内实现了完美吸收。上述层叠结构虽然具有较高的吸收率,但仍存在吸收波段窄、使用贵金属材料或层数叠加较多的问题,因此研究一种简单结构、低成本和超宽带的完美吸收器在太阳能捕获等领域具有重要意义。

结合多尺寸结构特性和阻抗匹配理论,本文设

计一种矩形层叠的金属-半导体薄膜-半导体吸收器(MSSA)。该吸收器中的金属材料采用低成本的钛(Ti)和铬(Cr),半导体选用具有类贵金属特性的砷化镓(GaAs),这可以在可见光到中红外波段(440~3500 nm)实现完美吸收。采用时域有限差分(FDTD)法研究矩形层叠吸收器的物理吸收机制,详细讨论结构的几何参数和材料的选取,以及偏振角和入射角对吸收性能的影响。

2 完美吸收器结构与计算方法

超宽带完美吸收器由两层不同尺寸的金属-半导体薄膜-半导体(MMS)组成,结构如图 1 所示。非贵金属 Ti 和 Cr 在室温下的熔点分别为 1668 °C 和 1907 °C,在近红外和中红外波段具有优良的吸收表现,半导体 GaAs 具有与贵金属相似的吸收特性以及较高的介电常数。衬底层和中间层采用的非金属材料分别为 Ti 和 Cr,半导体材料选用 GaAs,金属和半导体材料的介电常数采用 Palik^[28-29]设计的实验值。矩形层叠结构的周期和各层宽度分别为 P 、 w_1 和 w_2 ,各层厚度分别为 h 、 h_1 、 h_2 和 h_3 ,结构的侧视图如图 1(b)所示。

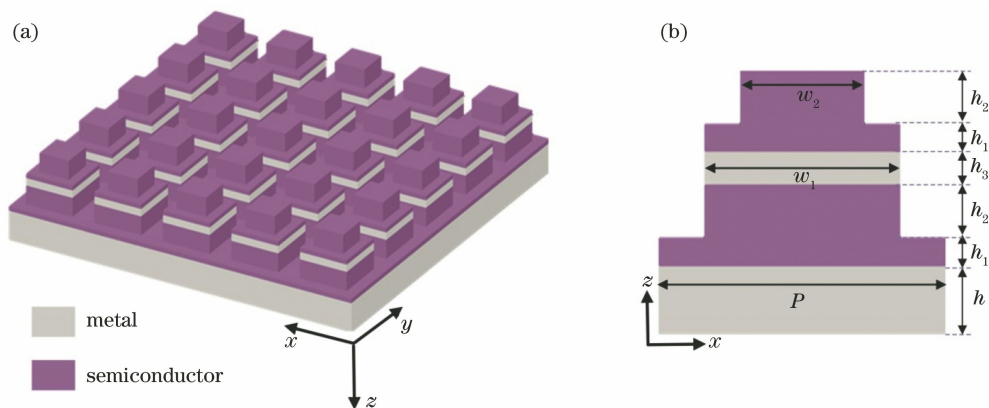


图 1 吸收器结构。(a)阵列结构;(b)单元侧视图

Fig. 1 Absorber structure. (a) Array structure; (b) unit side view

仿真模拟的过程中,在 x 轴和 y 轴的方向上使用周期性边界,在 z 轴的方向上使用完美匹配层(PML),设置的网格步长为 10 nm。使用 FDTD 软件对矩形层叠吸收器的各参数进行扫描分析,得到的最优取值如表 1 所示。衬底 Ti 的厚度 h 优化为 200 nm,其远大于趋肤深度,这可以阻止入射光穿过基底,因此该吸收器中的透射率几乎等于零。当透射率接近零时,吸收率 $A(\lambda)$ 与反射率 $R(\lambda)$ 的关系可以表示为 $A(\lambda) \approx 1 - R(\lambda)$,其中 λ 为入射波长。为了实现吸收器的完美吸收,即 $A(\lambda) > 90%$,

需使反射率尽可能小,因此匹配吸收器结构与自由空间的阻抗是关键。考虑到结构阻抗与金属材料具有紧密的联系,当吸收器采用不同的金属材料时,其结构阻抗不同,因此可采用阻抗变换方法来分析其吸收差异,从而为金属材料的选取提供指导。

表 1 吸收器结构的参数设置

Table 1 Parameter setting of absorber structure

Parameter	P	w_1	w_2	h	h_1	h_2	h_3
Value /nm	440	300	190	200	30	130	50

3 结果与特性分析

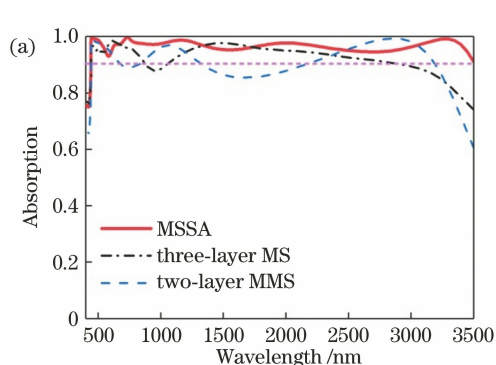
采用 FDTD 方法来计算和分析吸收器的吸收特性、揭示宽带完美吸收的物理机制,以及研究不同的物理参数对吸收器性能的影响。根据阻抗匹配理论对吸收器进行分析,这为超材料宽带完美吸收器的设计提供方法指导。

3.1 矩形层叠吸收器的吸收特性

为了验证设计的吸收器结构的有效性,对比三种相似结构的吸收器在 400~3500 nm 波长范围内的吸收性能,结果如图 2(a)所示。其中金属、薄膜和半导体的厚度分别为 50,30,130 nm,其他参数均采用统一的优化值,如表 1 所示。吸收器的平均吸收率 A_{ave} 可以表示为

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

式中: λ_{max} 和 λ_{min} 分别表示工作波长的最大值和最



小值。当吸收器设计为两层 MMS 结构时,其在 400~3500 nm 波长范围内的平均吸收率可达 90.48%,但在 1331~2157 nm 和大于 3157 nm 的吸收率小于 90%,说明该结构具有相对较窄的完美吸收带宽。当采用三层金属-半导体(MS)结构时,可以实现可见光到近红外的近完美吸收。因此,以 MS 结构为基础,在金属和半导体之间覆盖 GaAs 薄膜,从而形成 MSSA 结构,该结构在 440~3500 nm 的超宽带范围内可以实现完美吸收且平均吸收率超过 97%,其带宽远大于文献[13,24-26]。在 440~3500 nm 的波长范围内,研究入射光的偏振角对 MSSA 吸收性能的影响,结果如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看到,当入射光的偏振角从 0°增加到 90°时,吸收器的宽波段和高吸收率基本不发生改变,表明 MSSA 对入射光具有偏振独立性,原因在于矩形层叠吸收器结构具有对称特性。

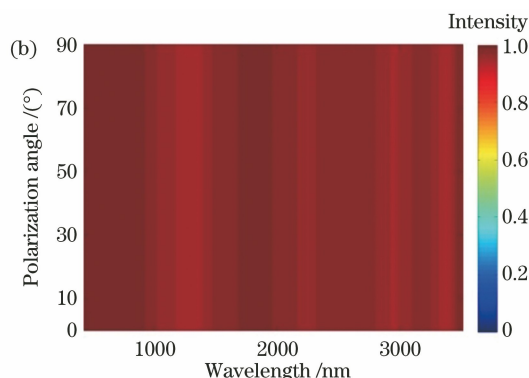


图 2 矩形层叠吸收器的吸收特性。(a)不同结构吸收器的吸收曲线;(b)不同偏振角下 MSSA 结构的吸收光谱

Fig. 2 Absorption characteristics of rectangular multilayer absorber. (a) Absorption curves of absorbers with different structures; (b) absorption spectra of MSSA structures at different polarization angles

3.2 超宽带完美吸收机制的分析

为了揭示超宽带完美吸收器的物理机制,当入射光为横磁(TM)模式时,对吸收峰值处的电场($|E|$)和 z 轴方向的电场实部($E_{z,real}$)的能量进行仿真计算,结果如图 3 所示。从图 3(a)~3(d)可以看到,光可以耦合到气隙中,并且在相邻单元之间的金属角周围分布。由于在纳米结构中,表面等离子激元(SPPs)被激发,从而产生由 SPPs 诱导的光吸收^[30]。GaAs 材料的薄膜厚度小于 SPPs 的衰减长度,导致 GaAs 层中存在的 SPPs 模式发生耦合,进而激发间隙表面等离子极化激元(G-SPPs)模式。G-SPPs 模式的泄漏场在气隙中会相互耦合,并且在纳米柱相邻单元之间的金属角周围分布,从而产生由 G-SPPs 诱导的光吸收。图 3(e)~3(h)为 4 个完美

吸收峰的 $E_{z,real}$,其中正号和负号表示正电荷和负电荷。从图 3(e)~3(h)可以看到,层叠结构中有大小相等的相对电荷。4 个波长处的吸收峰均是由电偶极子共振引起的,并且电偶极子共振主要分布于 GaAs 薄膜层,因此可以证明 GaAs 薄膜作为吸收材料的有效性。同时,随着波长的增大,强电场向结构下方的宽尺寸处移动。因此,叠加多尺寸的矩形结构可以在不同波长处增强电场,从而拓宽吸收器的吸收带宽。

平面磁场 $|H|$ 的分布如图 4 所示。从图 4 可以看到,磁场的能量分布与 $|E|$ 在本质上是不同的。从图 4(a)可以看到,磁场在结构上方区域被增强,即可见光波段的高吸收来源于结构较小尺寸处的局域表面等离子激元(LSPs)共振。从图 4(b)可以看到,

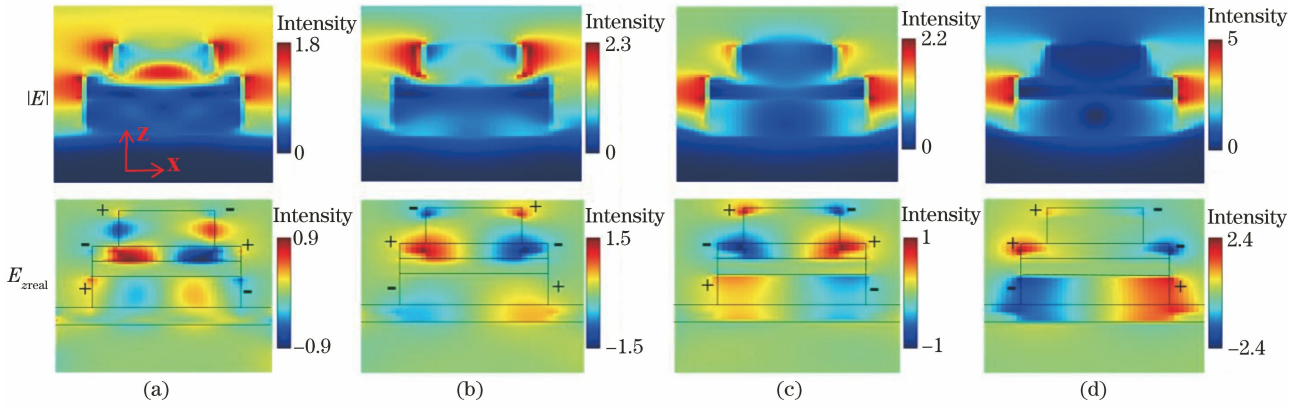


图 3 $|E|$ 和 $E_{z,real}$ 在不同波长处的分布。(a) 730 nm; (b) 1165 nm; (c) 2005 nm; (d) 3295 nm

Fig. 3 Distribution of $|E|$ and $E_{z,real}$ at different wavelengths. (a) 730 nm; (b) 1165 nm; (c) 2005 nm; (d) 3295 nm

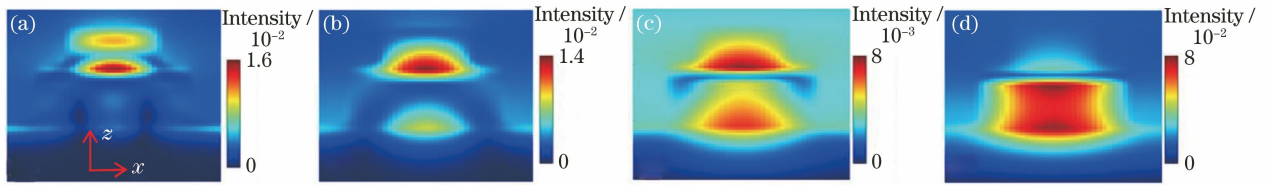


图 4 $|H|$ 在不同波长处的分布。(a) 730 nm; (b) 1165 nm; (c) 2005 nm; (d) 3295 nm

Fig. 4 Distribution of $|H|$ at different wavelengths. (a) 730 nm; (b) 1165 nm; (c) 2005 nm; (d) 3295 nm

磁场被强烈地限制在结构上方的区域,即 Cr 和 GaAs 层,并在结构下方的区域,即 Ti 和 GaAs 层出现较强的磁场,可见入射光通过激发 LSPs 可以将其耦合到结构上方,并在结构下方区域中进一步激发传导表面等离激元 (PSPs)^[31-32],因此 LSPs 共振是增加高吸收的原因,所以激发 PSPs 可进一步增加光吸收。从图 4(d) 可以看到,磁场主要集中在 Cr 层和 Ti 衬底之间的间隙内,因此在长波长处则由 LSPs 共振主导吸收^[30]。由于 Ti 是高损耗金属,而 LSPs 共振的品质因子 Q 很低,这会进一步扩大吸收带宽。另一方面,入射光穿过薄的金属 Cr 层,在金属 Ti 层上发生反射,这两层金属与 GaAs 一起形成具有低 Q 值的有损 F-P (Fabry-Perot) 谐振腔^[33-34]。当入射光垂直照射时,谐振波长 λ_r 满足

$$\omega \frac{2\pi}{\lambda_r} n_{eff} = k\pi - \phi, \quad (2)$$

$$\sqrt{\epsilon_s - n_{eff}^2} k_0 d = n\pi + 2\arctan\left(\frac{\epsilon_s \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\epsilon_s - n_{eff}^2}}\right), \quad (3)$$

式中: ω 表示 F-P 谐振器的平均宽度; ϕ 表示谐振器终端处的反射相移; n_{eff} 表示谐振腔的有效折射率; k 表示谐振阶数,此处只考虑低阶谐振,取 $k=1$; k_0 表示入射波的波数; d 表示谐振腔的厚度; n 表示正整数; ϵ_m 和 ϵ_s 分别表示导体和金属的介电常数。

由(2)式计算可得 F-P 谐振腔的波长为 3290 nm,与 FDTD 仿真计算结果较为一致,说明在此波长附近的高吸收是由 F-P 谐振激发所产生的。因此,在 2005 nm 波长处的强吸收来源于 PSPs 和 LSPs 与 F-P 谐振的杂化耦合。

3.3 物理参数对吸收特性的影响

为了研究吸收性能与吸收器材料的关系,结合阻抗匹配理论进行分析。吸收器结构的阻抗 Z 和自由空间的阻抗 $Z_0(\lambda)$ ^[35-36] 分别表示为

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (4)$$

$$Z_0(\lambda) = \sqrt{\frac{\mu(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}}, \quad (5)$$

式中: $\mu(\lambda)$ 和 $\epsilon(\lambda)$ 分别表示结构在波长 λ 下的磁导率和介电常数; S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 和 S_{22} 表示 S 参数分量, S 参数可根据有效介质理论求出^[36]。当吸收器完全吸收入射光时,吸收器的反射率为 0, Z 值与 $Z_0(\lambda)$ 值相等,即满足 $Z = Z_0(\lambda) = 1$ 。因此,当 Z 值接近于 1 时,可以达到高吸收的目的。采用不同金属组合的吸收器,其吸收性能和结构阻抗如图 5 所示。从图 5(a) 可以看到,当采用金属 Ti 或 Cr 时,90% 以上的吸收带宽大于 2360 nm,说明吸收器可以表现出优异的吸光性能,具有超宽带完美吸收的表现;当使用金属钨 W 时,虽然只在 440~1919 nm

波段获得一个相对较窄的完美吸收带宽,但其与多层金属-绝缘体/半导体结构^[13,22,27]获得的波段相当。由阻抗匹配理论可知,当 Z 值接近于1时,吸收器可达到接近100%的吸收。通过(4)式计算可得 Z 与入射波长的关系,结果如图5(b)所示。当吸收器的金属材料采用Ti和Cr时,在440~3500 nm波段的 Z 值几乎等于1,这与图5(a)中宽波段完美吸收的表现具有很好的一致性。当吸收器的金属材料只采用Ti或Cr时,虽然 Z 值在长波段(波长大于3000 nm)略有增大,但在整个工作波段, Z 值基本趋于1,因此这两类吸收器仍具有波段较宽的完美吸收。当吸收器的金属材料只采用W时, Z 值从波长为1936 nm开始不断增大,表明这类吸收器在

440~1936 nm波段可以获得较好的阻抗匹配,在可见光-近红外范围内实现强吸收。当选用不同的金属材料时,吸收器在可见光到中红外波段具有动态可调性。此外,当吸收器中的非金属材料采用GaAs、Si、SiO₂或Al₂O₃时,在400~3500 nm波段的吸收情况如图6所示。从图6可以看到,对于由介电常数较高的半导体组成的结构,其吸收强度和频带宽度大于由介电常数较低的绝缘体材料组成的结构,因此当非金属材料采用半导体GaAs或Si时,结构表现出更好的吸收效果,尤其是采用与贵金属特性类似的GaAs,其在可见光范围内达到更优的吸收效果,实现可见光到中红外波段(440~3500 nm)的完美吸收。

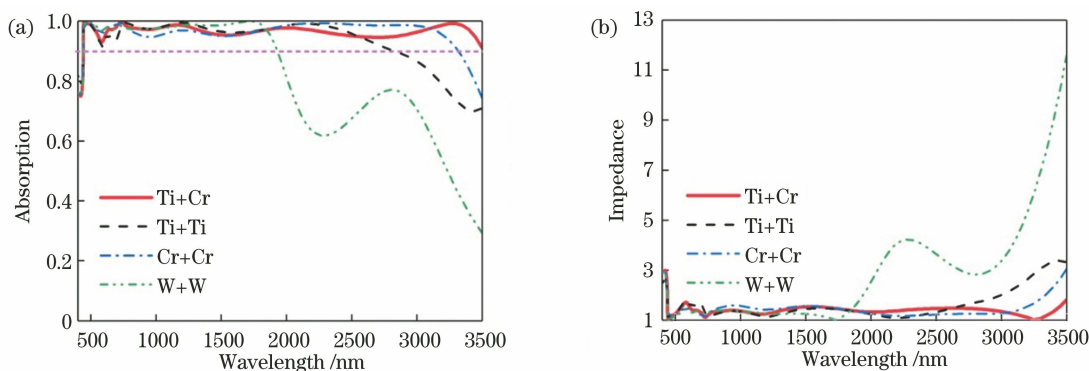


图5 不同金属材料的性能曲线。(a)吸收率;(b)结构阻抗

Fig. 5 Performance curves of different metal materials. (a) Absorption rate; (b) structural impedance

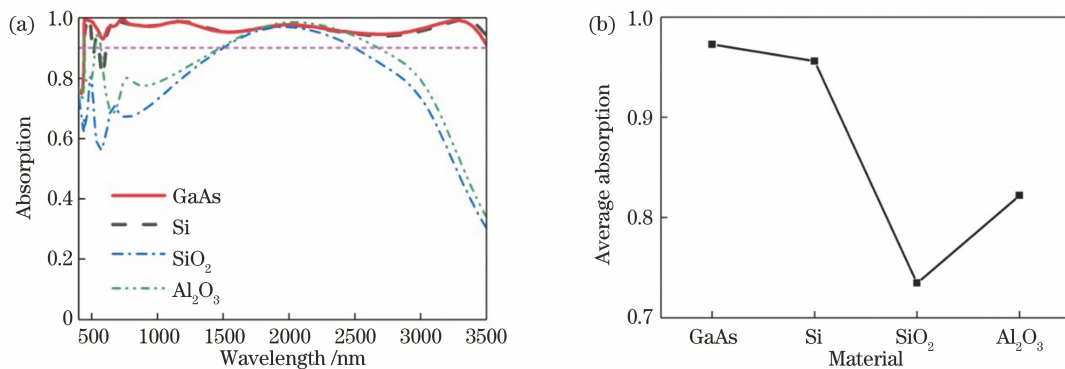


图6 不同非金属材料的性能曲线。(a)吸收率;(b)平均吸收率

Fig. 6 Performance curves of different non-metallic materials. (a) Absorption rate; (b) average absorption rate

进一步分析结构的几何参数 P 、 ω_1 、 ω_2 、 h_1 和 h_2 对吸收特性的影响,结果如图7所示。调整 P 值从400 nm增加到480 nm,步长为20 nm,其他参数均保持不变,MSSA的吸收情况如图7(a)所示。从图7(a)可以看到,当 P 值在400~440 nm范围内时,随着 P 值的增加,吸收器在440~3500 nm区域的平均吸收率逐渐增加;当 P 值为420 nm和440 nm时,两者的平均吸收率均达到97%以上,但

当 P 值为420 nm时,在2639~2874 nm波段范围内的吸收率低于90%;当 P 值超过440 nm时,吸收器的平均吸收性能逐渐降低,这是由于 P 值大于入射波长,所以光在分界面处易发生散射,减少对电磁波的吸收。总体而言, P 值的变化对吸收器的吸收性能影响较小,这对制备工艺的精度降低要求,增强吸收器结构的可复制性。图7(b)和7(c)分别为宽度 ω_1 和 ω_2 对吸收器吸收性能的影响。从

图 7(b)和图 7(c)可以看到,当填充因子(w_1/P 或 w_2/P)较大时,该结构接近一个连续宽度的矩形,这会出现吸收带宽拓宽和吸收率降低的情况;相反,当填充因子较小时,结构表现出较强的 SPPs 共振,增加对入射光的吸收,但代价是带宽的牺牲,因此 w_1 和 w_2 的最优值分别为 300 nm 和 190 nm。图 7(d)和 7(e)分别为厚度 h_1 和 h_2 对吸收器吸收性能的影响。图 7(d)中 h_1 从 10 nm 增加到 50 nm,步长为 10 nm,其他参数均保持不变。从图 7(d)可以看

到,随着 h_1 值的增加,吸收带逐渐红移,平均吸收率呈现先增大后减小的趋势,这主要是因为有效腔的相应增加^[30],当 GaAs 薄膜厚度 h_1 为 30 nm 时,吸收器的吸收效果最好。图 7(e)中 h_2 从 110 nm 增加到 150 nm,步长为 10 nm。从图 7(e)可以看到,当 GaAs 的厚度较薄时,结构有较少的损耗;当 GaAs 的厚度较厚时,会降低结构之间的耦合;因此当 $h_2=130$ nm 或 140 nm 时,可以获得最佳的吸收效果。

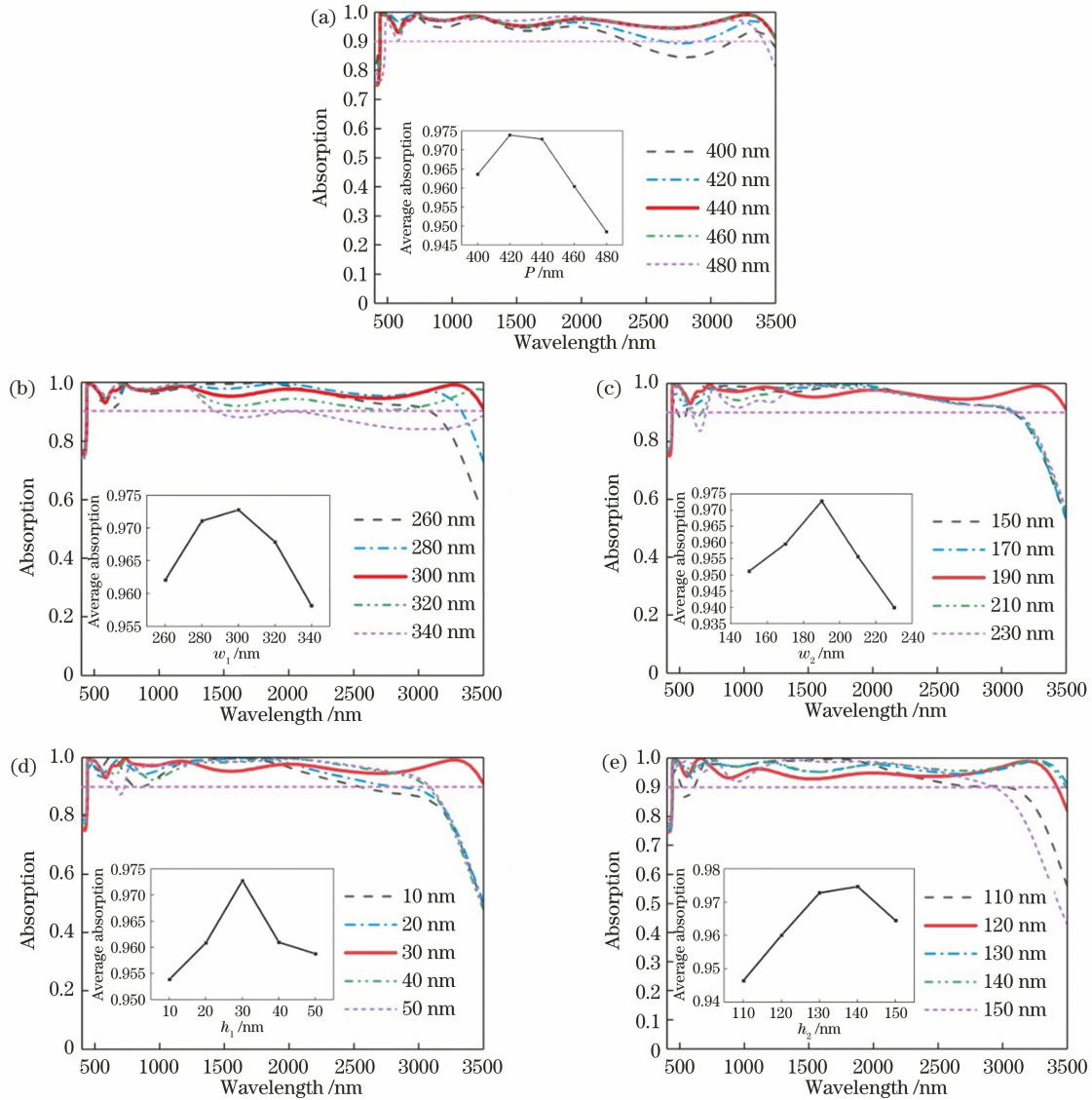


图 7 不同参数对吸收器吸收性能的影响及其平均吸收率。(a) P ; (b) w_1 ; (c) w_2 ; (d) h_1 ; (e) h_2

Fig. 7 Influence of different parameters on absorption performance of absorber and its average absorption rate.

(a) P ; (b) w_1 ; (c) w_2 ; (d) h_1 ; (e) h_2

3.4 入射角度对吸收特性的影响

在复杂的外部环境中,吸收器对入射光的角度不敏感这一特性具有重要意义。因此,在 TM 模式和横电(TE)模式下,不同入射角度对吸收性能的影响,

结果如图 8 所示。从图 8(a)和图 8(c)可以看到,在 TM 模式下,当入射角度小于 50° 时,吸收器的吸收率几乎保持不变;当入射角度达到 60° 时,吸收器在整个工作波长范围内(400~3500 nm)的平

均吸收率仍高达 95% 以上,但长波段的吸收率有所下降,这是由于入射角度的不断增大使电场切向分量逐渐减小,导致电偶极子谐振不能被激发。从图 8(b)和图 8(d)可以看到,在 TE 模式下,当入射角度小于 30°时,吸收器的平均吸收率超过 95%;当入射角度不断增加,磁场的 x 分量不断减小,导致入射波的吸收率降低;当入射角度增加到 60°时,在 400~3500 nm 的波长范围内,平均吸收率仍能保持 90%。实验结果表明,设计的吸收器具有广角吸收的特性,可以在复杂的电磁环境中提供理想的光吸收。

在吸收器的吸收性能与是否使用贵金属材料的方面,提出的矩形层叠吸收器与先前报道的吸收器

的对比结果如表 2 所示。相对吸收带宽为吸收器的完美吸收带宽(BW)可表示为 $B_{BW} = 2(\lambda_u - \lambda_d) / (\lambda_u + \lambda_d)$,其中 λ_u 和 λ_d 分别为工作波长的最大值和最小值,并且在此范围内的吸收率都大于 90%。从表 2 可以看到,所提结构在 440~3500 nm 范围内可以实现 97% 以上的平均吸收率,相对吸收带宽达到 155%,与先前的研究相比,大大拓宽完美吸收的频带。尽管文献[26]的平均吸收率高达 98.9%,但其吸收波段被局限在 260~1280 nm 的较窄范围内,限制其在太阳能收集和热辐射等领域的应用。此外,实验设计的吸收器采用非贵金属材料,与使用贵金属材料的吸收器相比,其可以降低加工制造的成本,为设备的大规模生产提供可能。

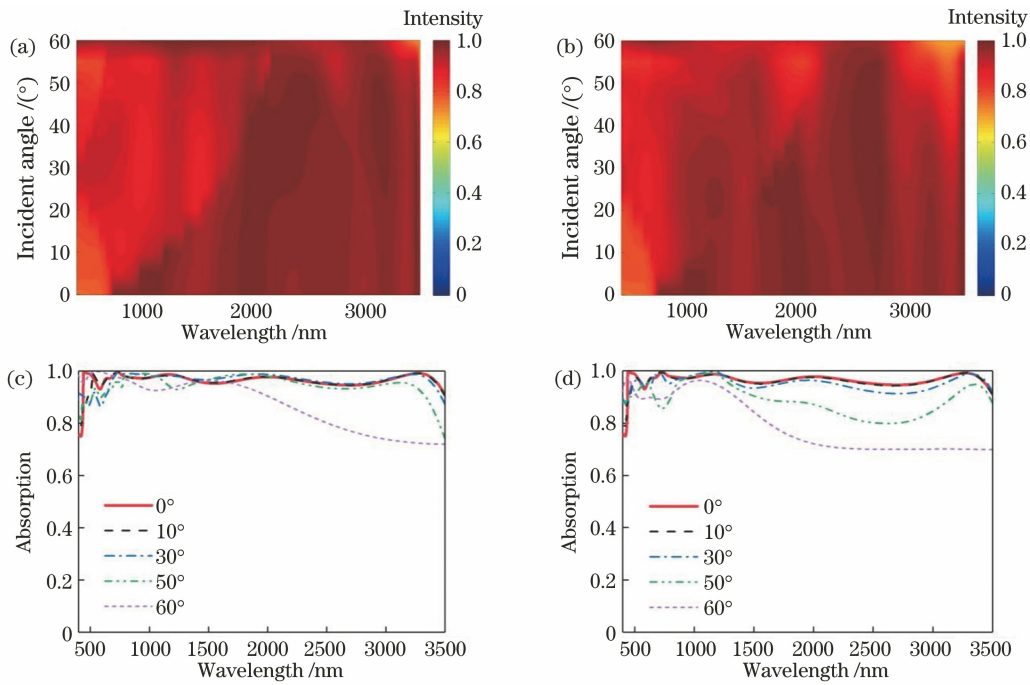


图 8 不同偏振模式下入射角度对吸收器吸收率的影响。TM 模式(a)吸收光谱,(c)吸收曲线; TE 模式(b)吸收光谱,(d)吸收曲线

Fig. 8 Influence of incident angle on absorber absorption rate under different polarization modes. TM mode (a) absorption spectrum, (c) absorption curves; TE mode (b) absorption spectrum, (d) absorption curves

表 2 不同吸收器的吸收性能对比

Table 2 Comparison of absorption performance of different metal materials

Structure	Wavelength /nm	Bandwidth /%	Average absorption /%	Polarization insensitive	Noble metal
Ref. [23]	400-750	61	95.0	/	Yes
Ref. [26]	260-1280	132	98.9	Yes	No
Ref. [27]	400-2000	133	95.0	Yes	No
Ref. [37]	516-2696	136	/	Yes	Yes
Ref. [38]	570-3539	145	97.0	Yes	No
Ref. [39]	400-1400	/	95.0	Yes	Yes
Proposed	440-3500	155	97.3	Yes	No

4 结 论

设计一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器,采用 FDTD 方法来研究不同的几何参数对吸收性能的影响。当选取最优参数时,吸收器的相对吸收带宽达到 155%,平均吸收率高于 97%。由电磁场能量分布和阻抗匹配理论可知,多尺寸矩形材料的叠加和所选材料的固有特性是实现超宽带吸收的重要原因,同时吸收器的高吸收率来源于多种谐振的协同作用,即 G-SPPs、PSPs、LSPs 和类 F-P。该吸收器具有偏振独立和广角吸收的优良特性,这归因于所设计结构具有对称性。相比于传统的吸收器,所提的吸收器具有覆盖波段宽、吸收率高和成本低的优点,并且与目前的沉积和光刻等纳米加工技术兼容。随着纳米制备工艺的不断发展,与所提吸收器相似的多层吸收器结构^[37,40]已被加工测试,这为所提吸收器的制备提供可能,也为太阳能收集、隐身和磁记录领域打开新的视角。

参 考 文 献

- [1] Cong L, Tan S, Yahiaoui R, et al. Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: a comparison with the metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031107.
- [2] Tan S Y, Yan F P, Wang W, et al. Ultrasensitive sensing with three-dimensional terahertz metamaterial absorber [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(5): 055101.
- [3] Gao E D, Liu Z M, Li H J, et al. Dynamically tunable dual plasmon-induced transparency and absorption based on a single-layer patterned graphene metamaterial[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13884-13894.
- [4] Li M L, Muneer B, Yi Z X, et al. A broadband compatible multispectral metamaterial absorber for visible, near-infrared, and microwave bands [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(9): 1701238.
- [5] Cao S, Yu W, Wang T, et al. Two-dimensional subwavelength meta-nanopillar array for efficient visible light absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(16): 161109.
- [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] Chen Y F, Xue W R, Zhao C, et al. Grating-type mid-infrared absorber based on hexagonal boron nitride material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1005001.
陈岳飞, 薛文瑞, 赵晨, 等. 基于六方氮化硼材料的光栅型中红外线吸收器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1005001.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [10] Zhou Y, Liang Z Z, Qin Z, et al. Small-sized long wavelength infrared absorber with perfect ultra-broadband absorptivity [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1279-1290.
- [11] Abbas M N, Cheng C W, Chang Y, et al. Angle and polarization independent narrow-band thermal emitter made of metallic disk on SiO₂ [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(12): 121116.
- [12] 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.
- [13] Li Y Y, Chen Q Q, Wu B, et al. Broadband perfect metamaterial absorber based on the gallium arsenide grating complex structure [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102760.
- [14] 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.
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.
- [15] 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.
黄雅琴, 李毅, 李政鹏, 等. W/VO₂ 方形纳米柱阵列可调中红外宽频吸收器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0316001.
- [16] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 517.
- [17] Hu D, Wang H Y, Zhu Q F. Design of an ultra-broadband and polarization-insensitive solar absorber using a circular-shaped ring resonator [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2016, 10(2): 026021.
- [18] Ghobadi A, Hajian H, Gokbayrak M, et al. Visible light nearly perfect absorber: an optimum unit cell

- arrangement for near absolute polarization insensitivity [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (22): 27624-27634.
- [19] Liu Y Y, Xiong G, Wang Y, et al. Design of multi resonant U shaped slots nano-antenna and their absorption properties [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2155-2164.
刘媛媛, 熊广, 王杨, 等. 多谐振 U 形缝隙纳米天线设计及吸收特性[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(8): 2155-2164.
- [20] Fang Z Y, Fan L R, Lin C F, et al. Plasmonic coupling of bow tie antennas with Ag nanowire [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4): 1676-1680.
- [21] Fang Z, Zhen Y R, Fan L, et al. Tunable wide-angle plasmonic perfect absorber at visible frequencies [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(24): 245401.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhu L, Wang Y, Xiong G, et al. Design and absorption characteristics of broadband nano-metamaterial solar absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0923001.
朱路, 王杨, 熊广, 等. 宽波段纳米超材料太阳能吸收器的设计及其吸收特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0923001.
- [25] 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.
- [26] Wu D, Liu C, Liu Y, 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.
- [27] Kan Y, Zhao C, Fang X, et al. Designing ultrabroadband absorbers based on Bloch theorem and optical topological transition [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1879-1882.
- [28] Palik E D. Preface [M]//Palik E D. *Handbook of optical constants of solids*. Amsterdam: Elsevier, 1985: xvii-xviii.
- [29] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids II* [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1997.
- [30] 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.
- [31] Wu D, Liu C, Liu Y M, et al. Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 450-453.
- [32] Liu J Q, Wang L L, He M D, et al. A wide bandgap plasmonic Bragg reflector [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4888-4894.
- [33] Bozhevolnyi S I, Søndergaard T. General properties of slow-plasmon resonant nanostructures: nano-antennas and resonators [J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10869-10877.
- [34] Jung J, Søndergaard T, Bozhevolnyi S I. Gap plasmon-polariton nanoresonators: scattering enhancement and launching of surface plasmon polaritons [J]. *Physical Review B*, 2009, 79 (3): 035401.
- [35] Smith D R, McCall S L, Platzman P M, 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.
- [36] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.
- [37] 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.
- [38] Li Y Y, Liu Z Q, Zhang H J, et al. Ultra-broadband perfect absorber utilizing refractory materials in metal-insulator composite multilayer stacks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11809-11818.
- [39] Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Multilayer rectangular broadband metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1523001.
王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 多层矩形宽波段超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1523001.
- [40] 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.