

宽波段高吸收的多层齿轮形超材料吸收器设计

王杨¹, 轩雪飞¹, 朱路², 朱家兵^{1*}, 沈晓波^{1**}, 吴琰¹, 高强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 基于多尺度特征结构堆叠与法布里-珀罗共振原理,设计了一种宽波段高吸收的多层齿轮形超材料吸收器,该吸收器由两层不同尺度的介质-金属堆叠组成。采用时域有限差分方法分析其吸收特性,数值仿真结果表明,该吸收器在 300~4000 nm 的波长范围内的吸收率均在 89% 以上,平均吸收率可达 94%,呈现一定的偏振不敏感特性,在 60°大角度斜入射时,平均吸收率仍能保持 93%。通过对谐振波长处的电磁场分布进行分析,可以得出,该吸收器的宽波段高吸收特性主要由法布里-珀罗共振、表面等离子体共振、局域表面等离子体共振以及多种共振相互间的杂化耦合作用决定。这种宽波段高吸收、大角度吸收、偏振不敏感的吸收器在光伏电池、隐形设备等领域具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 超材料; 吸收器; 宽波段; 高吸收率

中图分类号 O431

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1823001

Design of Multi-Layer Gear-Shaped Metamaterial Absorber with Broadband and High Absorption

Wang Yang¹, Xuan Xuefei¹, Zhu Lu², Zhu Jiabing^{1*}, Shen Xiaobo^{1**},
Wu Yan¹, Gao Qiang¹¹ School of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China;² School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract A multi-layer gear-shaped metamaterial absorber with broadband and high absorption is designed based on multi-scale feature structure stacking and Fabry-Perot resonance theory. The absorber is composed of two layers of media-metal gear-shaped stacks with different sizes and the finite difference time domain method is used to analyze the absorption characteristics. Numerical results reveal that the absorptivity of this absorber in the 300–4000 nm band is above 89%, the average absorptivity can reach 94%, and the absorber shows certain polarization insensitivity. In addition, under 60° oblique incidence, it can still maintain an average absorbance of 93%. From the electromagnetic field distribution at the resonance wavelength, one can see that the broadband and high absorption characteristic of this absorber is mainly attributed to Fabry-Perot resonance, surface plasmon resonance, localized surface plasmon resonance as well as hybrid coupling among them. The proposed absorber has potential application value in photovoltaic cells, invisible devices, and other fields, due to broadband and high absorption, large-angle absorption, and polarization insensitivity.

Key words optical devices; metamaterial; absorber; broadband; high absorptivity

OCIS codes 230.0250; 160.3918; 350.2450; 250.5403; 300.1030

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-02-06; 录用日期: 2021-04-08

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(6142113180101)、教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH150)、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)、淮南师范学院校级科研项目(2020XJYB005, 2019XJYB06)

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

1 引言

电磁超材料是亚波长单元呈周期性或非周期性排布的人工结构^[1],其物理特性主要取决于几何结构。通过材料选择与结构设计,研究者可以实现对电磁波反射、吸收、传输等特性的灵活调控^[2-6]。电磁超材料现已被广泛应用于光伏电池、生物传感、隐形设备、滤波器等领域^[7-11]。超材料吸收器的发展较为完备,其原理是通过在亚波长结构表面产生反向感应电流,实现入射电磁波在介质层中的吸收。2008年,Landy等^[12]首次提出超材料吸收器,实现了在 THz 频段特定频率的 100% 吸收率。随着超材料吸收器研究的不断深入,多频谐振与可调谐振的吸收器被相继提出。李达民等^[13]设计了类方环结构超材料吸收器,实现了单频/双频/三频的高吸收。Shen等^[14]设计了调谐超材料吸收器,实现了单频上的完美吸收,并获得了太赫兹共振吸收频率的大范围动态调谐。然而,这些窄带吸收器较窄的吸收带宽限制了它们在太阳能、热发射等领域中的应用^[15-18]。

研究人员主要通过复合水平方向结构与垂直方向结构来拓展吸收器的吸收带宽。一方面,将不同结构按同一单元水平进行复合,利用结构间的电磁响应耦合作用来实现宽波段吸收。文献[19]基于金属方环和金属矩形设计的双频吸收器在 0.987 THz 和 1.767 THz 处呈现出吸收率分别为 96.13% 和 99.14% 的双频吸收。文献[20]利用 4 个不同结构的开口圆环,在同一单元的耦合作用下实现了 355.6~737.7 THz 频段的超 90% 的吸收率。文献[21]基于石墨烯、金属和介质材料,利用两个不同尺寸的十字结构,在水平面上复合设计了超材料吸收器,该吸收器在 1.55~3.15 THz 波段内实现了吸收率超 90% 的完美吸收。然而,水平方向上的复合结构,其单位面积内的有效结构较小,受结构硬度的限制,吸收波段仍然不宽。另一方面,通过将相同或不同形状、材质的特征结构在垂直方向上进行堆叠以形成组合波导结构,利用各层间激发的表面等离子体激元、慢波效应、法布里-珀罗共振等特殊电磁响应及其相互作用拓展吸收带宽。文献[22]与文献[23]设计的 5 层和 10 层金-硅材料堆叠吸收器,分别在 400~750 nm 波段与 480~1480 nm 波段内(可见光到近红外区域)实现了超过 90% 的完美吸收,但其结构层数较多,且对太阳能的吸收波段仍不宽。上述结构虽然利用贵金属与多层堆叠结构拓展了吸收率,但层叠较多、结构相对复杂且材料多为贵

金属,增加了成本负担。为了解决这一问题,文献[24]利用二氧化硅-钨层堆叠设计的纳米多孔双曲超材料吸收器,在 260~1580 nm 波段处的平均吸收率超过 98.9%,但其结构较为复杂。文献[25]利用 Ti-SiO₂ 三层结构实现了带宽(吸收率超过 90% 的波段范围)为 712 nm 的超材料吸收器设计,但其吸收波段仍不宽。文献[26]与文献[27]分别利用多层结构堆叠的相互耦合作用设计的吸收器,在 400~2100 nm 波段与 295~2500 nm 波段范围内的吸收率超过 90%,但吸收波段也只覆盖至近红外波段。虽然上述结构在一定范围内实现了高吸收率,但仍存在吸收波段不宽、结构复杂、垂直叠加层数多等问题。研究表明,可见光和红外波段的能量占太阳辐射地面能量的 97%。为了充分吸收太阳能,需要设计可以覆盖可见光与红外光波段的宽波段高效率吸收器,且由太阳辐射特性可知,吸收器应同时具有偏振独立和广角吸收特性。然而,为了扩展吸收波段范围,需在水平或垂直方向复合更多的复杂结构,复杂结构的设计使得偏振独立性下降,给加工生产带来不小的挑战。因此,对于太阳能收集与利用,设计一种结构简单、偏振独立、广角吸收的宽波段吸收器具有重要意义。

本文基于法布里-珀罗共振与多尺度特征堆叠结构,设计了一种多层齿轮形超材料吸收器(MGMA),该吸收器的吸收波段为 300~4000 nm,覆盖可见光、近红外与远红外波段。采用时域有限差分(FDTD)方法研究了多层齿轮形超材料的宽波段高吸收率及偏振与斜入射状态下的吸收特性,分析了其高吸收的物理机理。

2 结构与设计

多层齿轮形超材料吸收器的结构示意图如图 1(a)所示,其中 E 、 H 、 k 分别表示入射波的电场、磁场与波矢方向。多层齿轮形单元结构在钛(Ti)和硅(Si)的基底上按照周期 p 排列,如图 1(b)所示。如图 1(c)所示,多层齿轮形单元结构由介质-金属-介质-金属 4 层堆叠而成,其材料分别选用 SiO₂(介质)和 Ti(金属),介质层与金属层高度自上而下分别表示为 h_4 、 h_3 、 h_2 和 h_1 ,堆叠层数表示为 n 。单元的齿轮形结构如图 1(d)所示,其外半径相同,统一表示为 R_0 ,内半径表示为 R_i ,且 $R_i = R_0 - 3 \times (i - 1)$ ($1 < i < n$), i 为堆叠层编号,齿轮结构的齿数为 S 。单元结构衬底分别选用 Ti 和 Si。优化后的结构参数如表 1 所示。

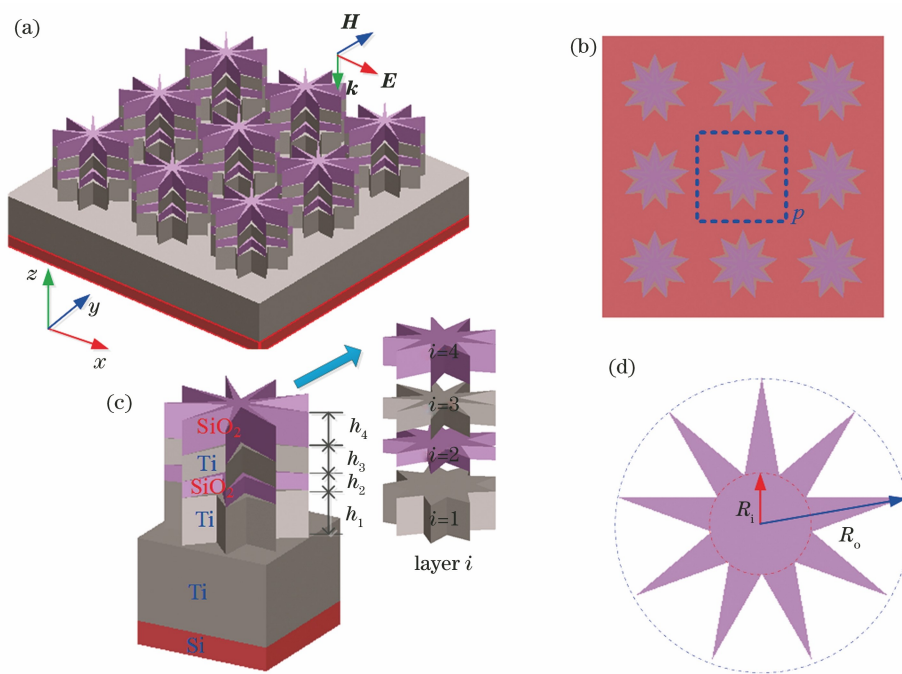


图 1 所提吸收器的结构示意图。(a) 阵列结构；(b) 阵列周期；(c) 吸收器单元结构；(d) 齿轮形结构

Fig. 1 Structural diagrams of proposed absorber. (a) Structure of array; (b) array period; (c) structure of absorber unit; (d) gear-shaped structure

表 1 多层齿轮形超材料吸收器的结构参数

Table 1 Structural parameters of multi-layer gear-shaped metamaterial absorber

Parameter	R_o/nm	R_1/nm	h_4/nm	h_3/nm	h_2/nm	h_1/nm	p/nm	S
Value	200	120	150	110	70	200	400	9

吸收器的吸收率由反射率与透射率决定,其表达式^[28]为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

式中: $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 、 $T(\omega)$ 分别表示为吸收器的吸收率、反射率和透射率; ω 为入射光源的频率。由(1)式可以看出,为了提高吸收器的吸收率,可以减少结构中光的透射,即减小透射率。因此,在多层齿轮形单元结构中,采用 Ti 作为衬底,其厚度为 200 nm,该厚度大于光在 Ti 衬底上的趋肤深度,可以阻止光穿透结构,其透射率接近为 0。在 Ti 衬底下方放置高度为 100 nm 的 Si 基底。当透射率 $T(\omega)$ 接近为 0 时,吸收率 $A(\omega) \approx 1 - R(\omega)$ 。此时,吸收率主要由反射率所决定。由阻抗匹配理论^[29]可知

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

式中: $Z(\omega)$ 为吸收器的结构阻抗; Z_0 为自由空间阻抗。为了降低反射率,实现多层齿轮形超材料吸收器的完美吸收 $[A(\omega) > 90\%]$,需使得吸收器的结构阻抗与自由空间阻抗相等,即实现阻抗匹配。由于超材料吸收器的结构阻抗取决于结构形状、尺寸等

参数,因此可通过结构形状设计与尺寸参数优化实现阻抗匹配,拓宽吸收带宽,提高吸收率。

3 结果与讨论

采用 FDTD 方法分析多层齿轮形超材料吸收器的吸收特性,研究其宽波段、高吸收的物理机制,探究物理参数对 MGMA 吸收性能的影响。计算时将 x, y 方向设为周期边界以模拟阵列结构,在 z 方向上设置完美匹配层(PML)。金属 Ti 及衬底介质 Si 的介电常数采用 Palik^[30]的实验值。

3.1 多层齿轮形吸收器的吸收特性

为了分析多层齿轮形超材料吸收器的吸收特性,设置表 1 所示的参数。光源采用波长为 300~4000 nm 的平面波,电场沿 x 方向偏振[横磁(TM)波],垂直入射至超材料吸收器结构中。多层齿轮形超材料吸收器在 300~4000 nm 波段内的吸收光谱曲线如图 2 所示,可以看出,多层齿轮形超材料吸收器在 300~4000 nm 范围内的多个频率点处发生谐振并相互叠加,有效地拓展了吸收波段。吸收带宽

(吸收率大于 90% 的波长范围) 为 3600 nm。吸收器在整个波段内的平均吸收率^[31]可定义为

$$A_{ave} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} A(\lambda) d\lambda}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}, \quad (3)$$

式中: A_{ave} 为平均吸收率; λ_{max} 、 λ_{min} 分别为入射波长的最大值与最小值; $A(\lambda)$ 为吸收率; λ 为入射波长。计算可得吸收器在整个波段内的平均吸收率可以达到 94%。进一步验证多层齿轮形吸收器结构的优势, 计算层数 $n=0\sim 4$ 时的吸收光谱与平均吸收光

谱, 结果分别如图 2(a)、(b) 所示。当层数为 0 时(只存在基底), 吸收器在整个波段内的吸收率均在 60% 以下。当层数为 1 时, 即采用单层金属层, 整个波段内的吸收率基本在 90% 以下, 平均吸收率为 77%。当层数为 2 时, 即采用金属-介质结构, 可以发现其吸收率的增加并不明显。当层数为 3 时, 即金属-介质-金属结构, 其平均吸收率为 93.6%, 但其完美吸收波段主要集中在远红外区域, 这不利于太阳能的吸收。对比发现, 多层齿轮形超材料吸收器的吸收波段与吸收率较为优秀, 最低点处的吸收率为 89.7%。

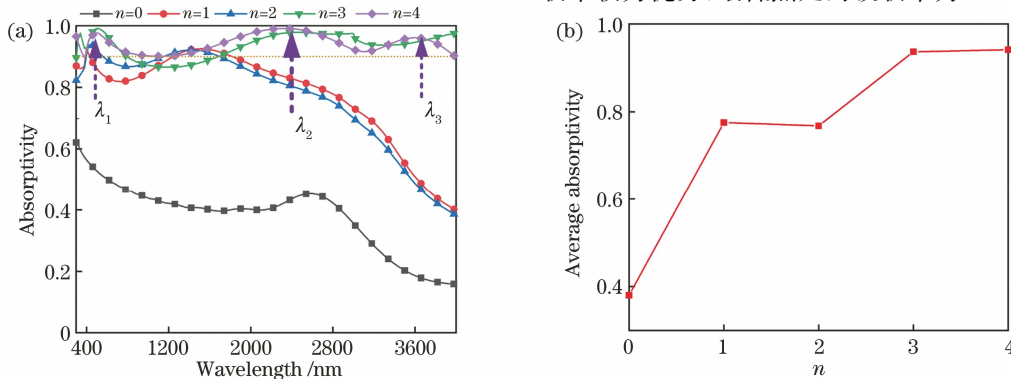


图 2 多层齿轮形超材料吸收器的吸收光谱及平均吸收率与层数的关系。(a) 吸收光谱; (b) 平均吸收率随层数的关系
Fig. 2 Absorption spectra of multi-layer gear-shaped metamaterial absorber and average absorptivity versus layer number.
(a) Absorption spectra; (b) average absorptivity versus layer number

吸收器在实际应用如光伏太阳能、热力发电和黑体热辐射器等领域中, 存在极化角度敏感和入射角度敏感等问题, 这降低了其应用范围。分析入射光的偏振角度对多层齿轮形超材料吸收器在 300~4000 nm 波段的吸收特性的影响。保持表 1 中的参数不变, 计算不同偏振角度下的吸收光谱, 结果如图 3(a) 所示。可以看出, 在 300~4000 nm 波段内, 随着偏振角度的增加, 多层齿轮形超材料吸收器的吸收率有大幅度下降。当偏振角度增加至 90° 时, 该

吸收器的吸收率虽在近红外波段(800~1600 nm)内有所下降, 但在整个波段内的变化幅度较小, 具有偏振不敏感特性, 其在整个波段内的平均吸收率仍高达 93%。吸收器的齿轮在各个偏振方向上并不完全对称, 其齿轮在各方向上形成的腔体形状也有所不同。因此, 各方向上由入射光激发的腔体谐振模式(级数)以及腔体间的耦合形式是有所差别的, 从吸收谱图上可以看出, 吸收谱并不完全相同, 但在整个波段内的差别不大。另外, 为了探究斜入射角

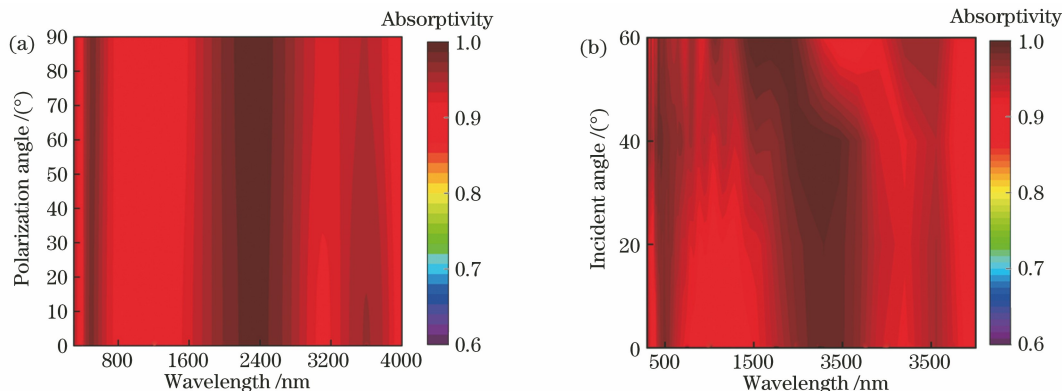


图 3 不同条件下多层齿轮形超材料吸收器的吸收光谱。(a) 不同偏振角度; (b) 不同入射角度
Fig. 3 Absorption spectra of multi-layer gear-shaped metamaterial absorber under different conditions.
(a) Different polarization angles; (b) different incident angles

度对吸收率的影响,保持物理参数不变,研究了 TM 波斜入射条件下的吸收光谱,如图 3(b)所示。可以发现,红外波段受入射角度的影响较大。这是由于随着角度的增加, x 方向上的电场分量逐渐减小,入射光激发的金属表面等离子体共振及耦合作用减弱。因此,吸收光谱在不同斜入射角度条件下略有差别。当入射角度为 60° 时,多层齿轮形超材料吸收器的平均吸收率为 93% ,呈现一定的斜入射角度不敏感特性。

3.2 宽波段高吸收机理分析

当入射光垂直入射至吸收器结构表面时,采用阻抗匹配理论分析多层齿轮形超材料吸收器在 $300\sim 4000$ nm 波段内的高吸收率机理。吸收器的相对阻抗 Z_r [32] 可表示为

$$Z_r = \frac{Z}{Z_0} = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (4)$$

式中: S_{11} 与 S_{21} 分别为结构的反射系数与透射系数。由(2)、(4)式可知,当吸收器的结构阻抗和自由

空间阻抗相等(即 $Z_r=1$)时,二者匹配,反射系数最小。利用优化后的结构参数,计算出多层齿轮形超材料吸收器的相对阻抗,结果如图 4(a)所示,其中 $\text{Re}(\cdot)$ 表示实部, $\text{Im}(\cdot)$ 表示虚部。可以看出,在 $300\sim 4000$ nm 波段内,该吸收器的相对阻抗的实部接近于 1,虚部接近于 0。吸收器的相对阻抗越接近 1,其结构阻抗与自由空间阻抗的匹配越好,反射系数越低,吸收效果越好。因此, MGMA 在整个波段内具有较为完美的吸收特性。然而,当波长为 374 nm 时,其相对阻抗 $Z_r=4.59-0.4i$,此时阻抗匹配效果较差,吸收率为 89.7% ,与图 2(a)所示的吸收光谱也较为吻合。为了进一步探究阻抗匹配的过程,计算得出吸收器层数 $n=0\sim 3$ 时的阻抗 $Z_{r0}\sim Z_{r3}$,如图 4(b)所示。可以看出,吸收器层数越大,阻抗的实部越接近于 1,阻抗匹配效果越好,吸收率越高。因此,介质-金属层堆叠导致吸收器结构发生改变,进而改变超材料的电磁参数,使得结构阻抗与空间阻抗匹配,反射率减小,光吸收增强。

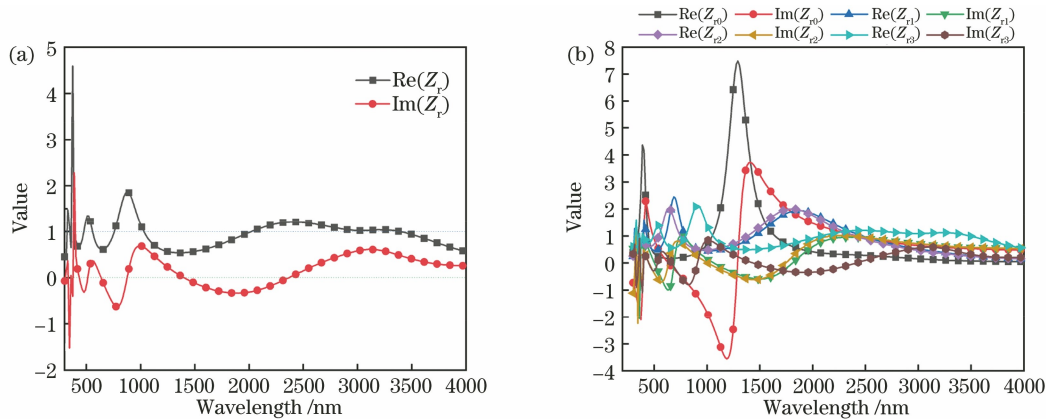


图 4 不同结构的相对阻抗。(a)所提 MGMA;(b)不同层数的吸收器

Fig. 4 Relative impedances of different structures. (a) Proposed MGMA; (b) absorbers with different layer numbers

为了进一步探究宽波段高吸收机理,分别提取第 4 层介质层与第 3 层金属层顶端表面电场 $|E|$ 在谐振点 ($500, 2340, 3600$ nm) 处的分布,如图 5 所示。图 5(a)~(c)为 TM 波垂直入射时第 4 层 ($i=4$) 介质层顶部的电场 $|E|$ 分布,可以看出,电场增强区域主要集中在齿轮间的缝隙处,两个齿轮单元之间形成了类腔体结构,即在齿轮缝隙处形成了腔膜共振。图 5(d)~(e)为 TM 波垂直入射时第三层 ($i=3$) 金属层顶部的电场 $|E|$ 分布,可以发现,在谐振波长 500 nm 处,吸收器的电场增强区域不仅存在于齿轮间的缝隙处,还存在于齿轮上(热点);而当谐振波长分别为 2340 nm 和 3600 nm 时,吸收器的场增强区域主要集中在吸收器的齿轮结构上。这是

由于在介质与金属的交界面处, TM 波激发产生了表面等离子体共振,同时在齿轮上也激发产生了局域表面等离子体共振。两种共振分别激发的表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 与局域表面等离子体激元 (localized surface plasmon polaritons, LSPs) 及齿轮间的相互耦合作用使得能量局域在金属结构表面以及齿轮间的缝隙处,从而在金属结构表面(齿轮尖)与缝隙腔体内出现光陷效应 [33], 能量被束缚,反射减小,光的吸收得到进一步的增加。同时,不同波长下各齿轮上的电场强度的增强程度不同,即激发表面等离子体共振的主次模式不同。不同模式的表面等离子体共振与齿轮腔体内不同级数的腔膜共同作用,形成了杂化耦合,进一

步拓宽了吸收波段。对比介质 SiO₂ 层与金属 Ti 层顶部的电场,可以发现,表面等离子体共振在金属与

介质的交界面处被激发,光的吸收增加,形成较为优秀的吸收特性。

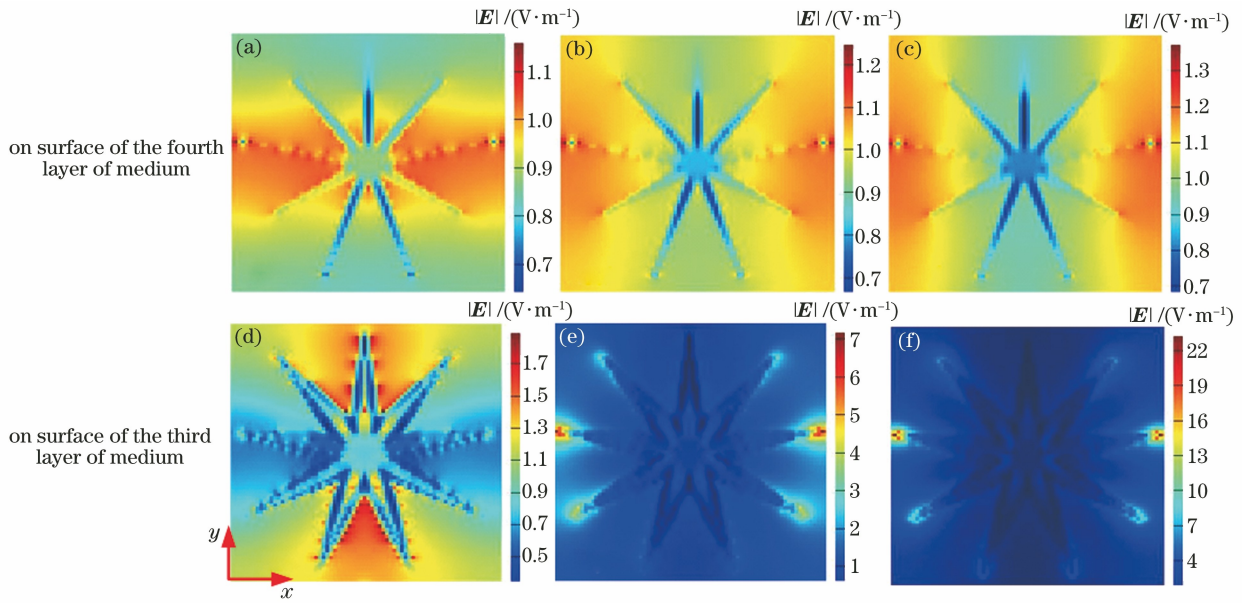


图 5 不同谐振点处电场 $|E|$ 的分布。(a)(d) $\lambda=500\text{ nm}$; (b)(e) $\lambda=2340\text{ nm}$; (c)(f) $\lambda=3600\text{ nm}$
 Fig. 5 Electric field $|E|$ distributions at different resonance points. (a)(d) $\lambda=500\text{ nm}$;
 (b)(e) $\lambda=2340\text{ nm}$; (c)(f) $\lambda=3600\text{ nm}$

齿轮缝隙间的场增强区域主要由腔膜共振产生。为了进一步探索腔膜共振产生的机理,计算两齿轮单元之间的电场 $|E|$ 与磁场 $|H|$ 分布,结果如图 6 所示。图 6(a)~(c)为 TM 波入射时两齿轮单元间的缝隙在谐振点(500, 2340, 3600 nm)处 xoz 面($y=0$ 平面)上的电场 $|E|$ 分布。如图 6(a)所示,当波长为 500 nm 时,场增强区域主要集中在两个齿轮单元之间的缝隙处以及齿轮单元结构上。对比金属层表面电场分布[图 5(e)],可以发现,在短波(可见光)范围内,高吸收率主要是表面等离子体激发与腔膜共振共同作用引起的。图 6(b)与图 6(c)分别为 2340 nm 与 3600 nm 谐振点处的齿轮单元结构之间的电场 $|E|$ 分布,可以看出,当共振波长为 2340 nm 与 3600 nm 时,电场强度增强区域主要集中在两个单元结构齿轮之间的腔体内以及金属层的角落处。从电场分布角度分析,在入射光的激励下,两个齿轮单元之间的腔体内形成了驻波,这种驻波与法布里-珀罗(F-P)共振^[34]产生的驻波类似。在 TM 波垂直入射条件下,两个齿轮单元侧壁等同于具有有限反射率两个反射镜,其谐振波长 λ_p ^[35-37] 满足

$$\lambda_p = \frac{n_{\text{eff}} h}{m + 1/4}, \quad (5)$$

$$\sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2} k_0 d = n' \pi + 2 \arctan \left(\frac{\epsilon_d \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2}} \right), \quad (6)$$

式中: m 为腔膜级数; n' 为正整数; h 为吸收器单元所形成腔体的高度; n_{eff} 为波导结构的有效折射率; k_0 为自由空间波数; d 为波导宽度; ϵ_m 与 ϵ_d 分别为金属和介质的介电常数。由(5)式可计算得 F-P 的谐振波长为 505 nm,与图 2(a)所示吸收光谱和图 6(a)所示电场分布结果也较为吻合。因此,当波长为 500 nm 时, F-P 共振在谐振腔内产生驻波,增加了光与结构的作用时间,有利于光的吸收。对比相同谐振波长处的磁场 $|H|$ 分布,当谐振波长为 2340 nm 与 3600 nm 时, F-P 共振的两级腔膜被激发,能量被高度局域在腔体内,形成谐振峰。分析图 6(d)~(f)谐振波长处的磁场分布可知,在谐振波长处,磁场增强区域除了集中在两个齿轮单元形成的谐振腔内,同时分布在金属(Ti)与介质(SiO₂)层内。原因是在入射光的作用下,金属层产生的磁偶极子共振与电偶极子共振相互作用,激发产生了局域表面等离子体激发元,能量被束缚在结构表面,反射率减小。如图 6(e)所示,激发产生的 LSPs 被耦合到上层的结构中,且在下层 Ti 层处传导表面等离子激发元(propagating surface plasmon polaritons, PSPs)被激发^[15]。由此可见, LSPs 与 PSPs 的产生使得吸收率提高,二者的耦合作用又加强了光的吸收。综合分析可知, MGMA 的高吸收率主要归因于表面等离子体激发元、局域表面等离子体激发元、传导表面等离

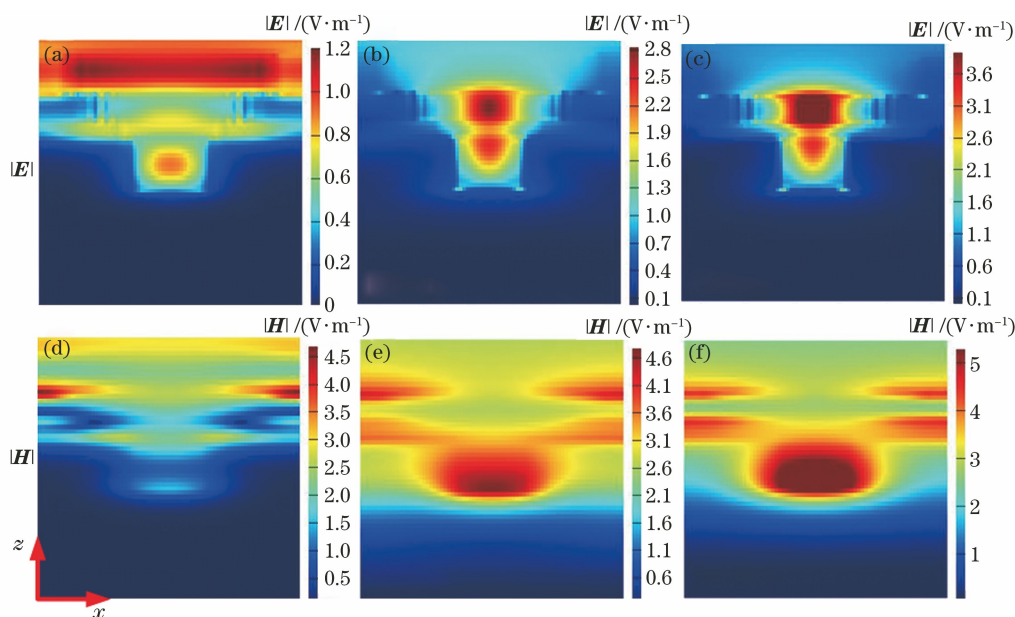


图 6 不同谐振点处 $y=0$ 平面上的电场 $|E|$ 与磁场 $|H|$ 的分布。(a)(d) $\lambda=500$ nm; (b)(e) $\lambda=2340$ nm; (c)(f) $\lambda=3600$ nm
Fig. 6 Electric field $|E|$ and magnetic field $|H|$ distributions in $y=0$ plane at different resonance points.

(a)(d) $\lambda=500$ nm; (b)(e) $\lambda=2340$ nm; (c)(f) $\lambda=3600$ nm

激元与法布里-珀罗共振。此外,它们之间所形成的杂化耦合作用进一步增强了光的吸收并拓展了吸收带宽。

3.3 物理参数对 MGMA 吸收特性的影响

首先,探究齿轮形结构的外半径尺寸对多层齿轮形超材料吸收器的吸收特性的影响。保持其他物理参数与吸收器结构不变,计算 TM 波垂直入射条件下不同 R_o 时的吸收光谱,结果如图 7 所示。图 7(a)所示为吸收光谱随 R_o 的变化趋势,可以发

现,随着 R_o 的增加,吸收器的吸收光谱在 $300 \sim 4000$ nm 波段内呈上升的趋势,在远红外波段上升较为明显,平均吸收率随 R_o 的增加也逐渐提高。原因是当周期固定时, R_o 小于半周期长度,齿轮形单元结构之间的距离较远,无法形成类腔体结构。由 3.2 节分析可知,在远红外波段内,类腔体结构中形成的 F-P 共振是高吸收率产生的主要原因。因此,在较小的 R_o 下,吸收效果较差,随着 R_o 的增加,类腔体结构逐渐形成,吸收器呈现较好的吸收特性。

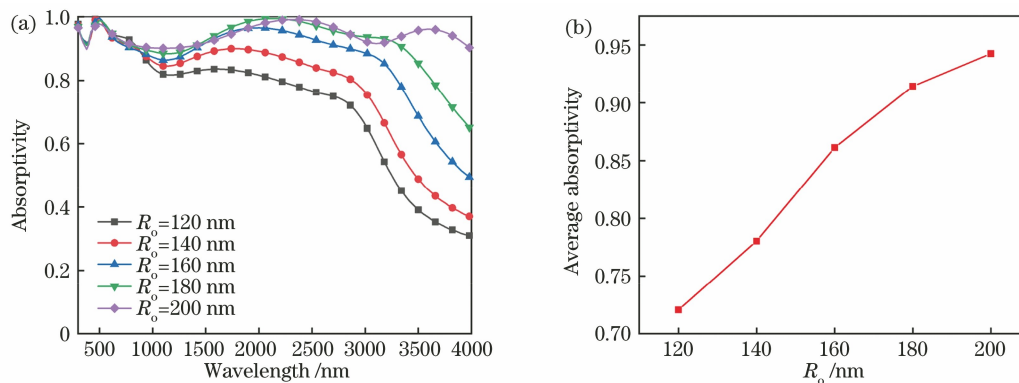


图 7 R_o 对吸收光谱和平均吸收率的影响。(a)吸收光谱;(b)平均吸收率

Fig. 7 Influences of R_o on absorption spectra and average absorptivity. (a) Absorption spectra; (b) average absorptivity

其次,分析周期 p 对多层齿轮形超材料吸收器的吸收特性的影响,保持其他物理参数不变,计算 TM 波垂直入射条件下不同周期 p 时的吸收光谱,结果如图 8 所示。图 8(a)为不同周期时吸收率的变化趋势。当周期为 240 nm 与 300 nm 时,吸收器单元

的外直径($2R_o$)大于周期 p ,相当于齿轮结构的轮齿被截断,两个齿轮单元之间的缝隙较小,无法形成 F-P 共振,因此吸收率也较低。当周期为 500 nm 与 600 nm 时,吸收器单元结构之间的距离过大,无法形成类腔体结构,因此在远红外区域,吸收率较低。当

周期为 400 nm 时,吸收器单元的外直径($2R_0$)等于周期 p ,多层齿轮形超材料吸收器的两个单元结构相邻,轮齿之间形成类腔体结构,并激发产生腔膜共振,

吸收率在整个波段内达到 90% 以上。从平均吸收率曲线[图 8(b)]可以看出,当周期为 400 nm 时,吸收器的平均吸收率最高,可以达到 94%。

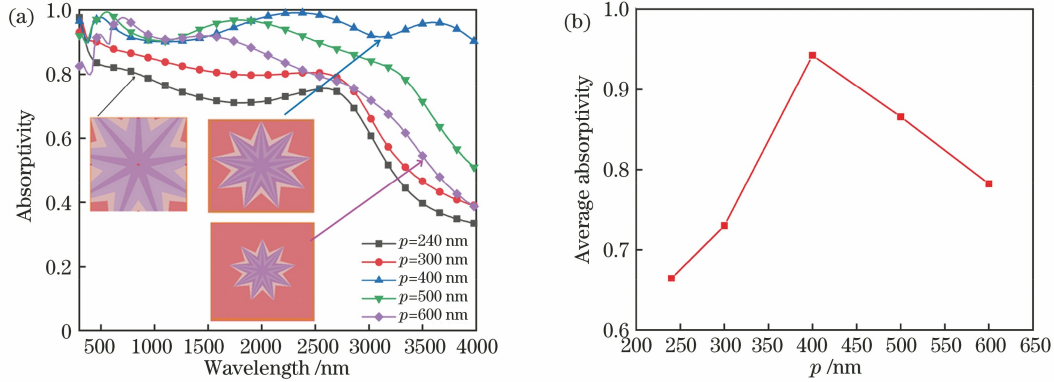


图 8 p 对吸收光谱和平均吸收率的影响。(a)吸收光谱;(b)平均吸收率

Fig. 8 Influences of p on absorption spectra and average absorptivity. (a) Absorption spectra; (b) average absorptivity

最后,探究吸收器单元齿轮的齿数 S 对多层齿轮形超材料吸收器的吸收特性的影响。保持其他物理参数不变,计算 TM 波垂直入射条件下不同轮齿数时的吸收光谱,结果如图 9 所示。不同轮齿数时吸收率的变化趋势如图 9(a)所示,可以看出,当轮齿数为 4 时,因轮齿数较少,齿轮相互之间形成的腔体结构较少且宽度较大,腔体之间的耦合作用也较弱。当轮齿数分别为 14 与 19 时,300~1000 nm 波段的吸收光谱大致相同,其原因是短波范围内的吸收率主要由表面等离子体共振主导,而两种结构的内半径相同,因此吸收光谱几乎无差别。然而,在

2000~4000 nm 的远红外波段,随着轮齿数的增加,吸收率呈下降趋势。原因是远红外波段的吸收率由 F-P 共振主导,随着轮齿数的增多,形成的腔体结构变窄,激发产生的 F-P 模式发生改变,导致吸收率降低。同时,从阻抗匹配角度分析,结构的改变导致阻抗匹配效果减弱,导致吸收率下降。图 9(b)所示为不同轮齿数时的平均吸收率变化趋势,可以看出,当轮齿数分别为 9 与 14 时,平均吸收率较为接近,但齿数增加为加工制造带来困难,因此优化后的轮齿数为 9。

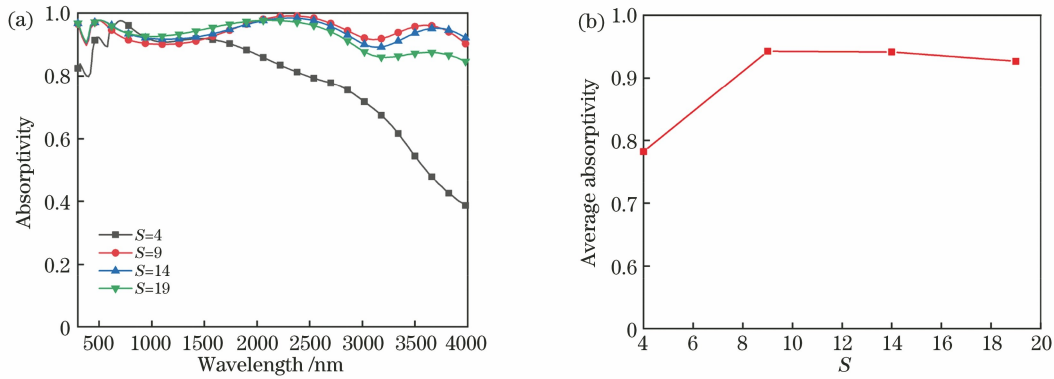


图 9 S 对吸收光谱和平均吸收率的影响。(a)吸收光谱;(b)平均吸收率

Fig. 9 Influences of S on absorption spectra and average absorptivity. (a) Absorption spectra; (b) average absorptivity

4 结 论

基于多尺度特征结构堆叠,设计了一种多层齿轮形超材料吸收器,并研究了其吸收特性。吸收器在 300~4000 nm 波长内的吸收率可保持在 89% 以上,平均吸收率为 94%。采用 FDTD 方法分析了吸

收特性,结果表明,该吸收器具有偏振不敏感和广角吸收特性,在 60° 广角斜入射条件下,其平均吸收率仍可保持在 93%。结合阻抗匹配与电磁分布,分析可知,多尺度特征结构堆叠具有一定的优越性,可实现宽波段高吸收。宽波段高吸收归因于齿轮缝隙中产生的 F-P 共振、金属与介质交界面的表面等离子

体共振、齿轮结构上的局域表面等离子体共振以及多种谐振之间的杂化耦合作用。随着沉积、光刻等纳米加工技术的发展,类似的多层结构吸收器相继被制备^[38-39],这为所提吸收器的制备提供了可能。研究结论对吸收器、隐形设备、光伏电池的设计具有一定的参考价值,为太阳能的高效吸收提供了解决思路。

参 考 文 献

- [1] Cui T J. Electromagnetic metamaterials: from effective media to field programmable systems [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(10): 1427-1461.
崔铁军. 电磁超材料: 从等效媒质到现场可编程系统 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1427-1461.
- [2] Xiao S Y, Wang T, Liu T T, et al. Active metamaterials and metadevices: a review [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(50): 503002.
- [3] Zhang Y B, Yi Z, Wang X Y, et al. Dual band visible metamaterial absorbers based on four identical ring patches [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 127: 114526.
- [4] Chu Q H, Yang M S, Chen J, et al. Characteristics of tunable terahertz multi-band absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1214003.
初启航, 杨茂生, 陈俊, 等. 可调控的太赫兹多频带吸收器特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1214003.
- [5] Wang H S, Han K, Sun W, et al. Design and experimental investigation of triple-band metamaterial broadband bandpass filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623001.
王昊深, 韩奎, 孙威, 等. 三波段超材料宽带带通滤波器设计及实验研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623001.
- [6] Chu P X, Chen J X, Xiong Z G, et al. Controllable frequency conversion in the coupled time-modulated cavities with phase delay [J]. *Optics Communications*, 2020, 476: 126338.
- [7] 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.
- [8] 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.
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.
- [9] Liu J, Chen W, Ma W Z, et al. Ultra-broadband infrared absorbers using iron thin layers [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 43407-43412.
- [10] Qin Z, Meng D J, Yang F M, et al. Broadband long-wave infrared metamaterial absorber based on single-sized cut-wire resonators [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20275-20285.
- [11] 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.
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.
- [12] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [13] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [14] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9401-9407.
- [15] Liu Y Y, Liu H, Liu K, et al. Ultra-broadband perfect absorber with rectangular multilayer structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2323001.
刘媛媛, 刘唤, 刘坤, 等. 一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2323001.
- [16] 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.
- [17] Abbas M N, Cheng C W, Chang Y C, et al. Angle and polarization independent narrow-band thermal emitter made of metallic disk on SiO₂ [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(12): 121116.
- [18] 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.
- [19] Yang S, Yuan S, Wang J Y. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0216001.
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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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): 1-8.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Li J K, Chen X F, Yi Z, et al. Broadband solar energy absorber based on monolayer molybdenum disulfide using tungsten elliptical arrays [J]. *Materials Today Energy*, 2020, 16: 100390.
- [29] 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.
- [30] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids II* [M]. Washington, D. C.: Academic Press, Inc., 1985.
- [31] 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.
- [32] Ding F, Dai J, Chen Y T, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39445.
- [33] 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.
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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Vece M D, Kuang Y H, van Duren S N F, et al. Plasmonic nano-antenna a-Si: H solar cell[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27327-27336.