

多缝隙蝶形偶极子纳米天线的设计及吸收特性

刘媛媛**, 李康康, 田晓梦, 朱路*

华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 针对单一结构纳米天线吸收率不高和波段较窄的缺点, 结合多缝隙结构和蝶形偶极子, 提出了一种多缝隙蝶形偶极子纳米天线。多缝隙蝶形偶极子是由 Au 纳米蝶形偶极子刻蚀多条缝隙构成的, 该结构能同时实现尖端近场耦合、光栅耦合以及不同介质间的杂化耦合, 这三种耦合的共同作用可以在宽波段内有效提高吸收率。采用时域有限差分方法分析了宽波段下该纳米天线的吸收性能, 数值分析表明: 在 400~1800 nm 波段, 多缝隙蝶形偶极子纳米天线的吸收特性曲线出现多个吸收波峰, 吸收峰值最高可达 98.4%, 平均吸收率为 84.1%。该天线的吸收性能明显优于蝶形偶极子纳米天线, 在不同偏振状态以及不同角度入射光下, 该天线均能在宽波段内保持较好的吸收性能。

关键词 光学器件; 纳米天线; 多缝隙蝶形偶极子; 等离激元; 时域有限差分法; 吸收特性

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0223002

Design and Absorption Characteristics of Multi-Slot Butterfly Dipole Nano-Antenna

Liu Yuanyuan**, Li Kangkang, Tian Xiaomeng, Zhu Lu*

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

Abstract Aiming at the shortcomings of low absorptivity and narrow working band for a single structure nano-antenna, we propose a multi-slot butterfly dipole nano-antenna by the fusion of the multi-slot structure and the butterfly dipole. The multi-slot butterfly dipole is formed from an Au nano-butterfly dipole etched by multiple slots. This structure can simultaneously realize the near-field coupling of tips, the grating coupling, and the hybrid coupling among different media. The coaction of these three couplings can effectively improve the absorptivity in a wide band. The absorption performance of this nano-antenna in a wide band is analyzed by the finite-difference time-domain method. The numerical analyses show that several absorption peaks exist in the absorption characteristic curve of this multi-slot butterfly dipole nano-antenna in the 400-1800 nm band, and the maximum and the average absorptivities are 98.4% and 84.1%, respectively. The absorption performance of the proposed nano-antenna is obviously superior to that of the butterfly dipole nano-antenna. This antenna can keep a stable absorption performance in a wide band under different polarization states and different incident angles of light.

Key words optical devices; nano-antenna; multi-slot butterfly dipole; plasmon; finite-difference time-domain method; absorption characteristics

OCIS codes 230.0250; 160.3918; 350.2450; 250.5403; 300.1030

1 引 言

近年来, 全球能源危机和大气污染问题日益突出, 太阳能作为一种理想的清洁能源受到了许多国家的关注。太阳光辐射到地面能量的光谱主要由紫外(9%)、可见光(46%)和红外(45%)三个波段组

成^[1]。传统的太阳能光伏电池仅能吸收可见光波段的能量, 并且吸收率不高, 这就使得太阳光谱中的能量不能被有效地吸收。同时, 光伏太阳能电池易受四季、昼夜、阴晴等的影响, 尤其是在阴天和夜晚, 这些电池几乎就失去了作用。因此需要一种高吸收率、宽波段的太阳能收集技术, 以较高的效率吸收可

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-08-28; 录用日期: 2018-10-08

基金项目: 江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23062)、江西省自然科学基金(20171BAB204022)、江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ170360)

* E-mail: luyuanwanwan@163.com; ** E-mail: lyy.78@163.com

见光,同时吸收红外光。

最近发展的纳米天线可以克服传统光伏太阳能电池受限于天气条件的缺点。其机理是光照射到金属薄膜表面,金属表面的自由电子在光场作用下产生集体振荡,形成表面等离极化激元(SPPs)^[2],自由电子与电磁波发生共振就会使电磁波被束缚在金属薄膜表面,使得更多的能量被吸收。当产生的表面等离激元被束缚在金属纳米结构的亚波长尺寸范围内时^[3],就可以实现入射光场与局域场的相互转换^[4],形成局域表面等离激元(LSPs)^[5]。基于表面等离激元的纳米天线对电磁波具有较强的吸收能力,将其应用于能量的收集得到了研究人员的广泛关注。Goodarzi等^[6]提出了一种对称偶极子纳米天线阵列,该天线在350~450 nm波段的最高吸收率仅为60%。通过改变蝶形偶极子纳米天线中心间隙的距离可使其在700~1000 nm波段的吸收性能较好,但工作波段较窄,仅有300 nm^[7]。Cakmakyapan等^[8]提出了一种基于蝶形偶极子的分形纳米天线,通过分形结构可以改变蝶形偶极子天线表面的电子分布,使其吸收带宽可控,在近红外波段(1600~2200 nm)有显著的电场增强,吸收带宽具有较强的延展特性,但其工作波段较窄,仅为600 nm。矩形偶极子纳米天线因依靠尖端的耦合作用而具有较高的吸收率,但其工作波段主要集中在400~850 nm波段^[9]。多缝隙结构的纳米天线依靠光栅的耦合作用可以保持较宽的工作波段,缝隙八木纳米天线阵列在400~1500 nm波段内的平均吸收率超过60%^[10];多谐振U型天线结构依靠U形缝隙的特点产生多个共振吸收峰来提高吸收率^[11];螺旋纳米天线在螺旋形馈电间隙作用下,平均吸收率可以达到74.9%,工作波段为400~1600 nm,但其螺旋形的几何结构使其不易被加工生产^[12]。二阶阶梯形天线主要提高了400~570 nm波段的吸收率,但570~1400 nm波段的吸收率有所下降;三阶阶梯形天线的平均吸收率仅为40%^[13]。由石墨烯材料合成的纳米结构吸收器,主要依靠不同介质材料间的杂化耦合形成较好的吸收特性,但有效的吸收波段较窄^[14]。纳米线与蝶形结构组成的天线依靠纳米线材料的杂化耦合,在600~900 nm处具有较好的吸收特性^[15]。综上,表面等离激元的激发受天线结构尺寸、形状和介质材料等因素的影响较大^[16]。目前提出的纳米天线主要为单一结构,其中:多缝隙结构具有较宽的工作波段,但平均吸收率较低;蝶形偶极子结构在尺寸、外形等因

素的调节下可以在延展波段的同时获得较高的吸收率峰值;其他对称偶极子结构具有较好的吸收特性,但工作波段较窄。因此,单一结构仅在较窄的波段内具有较好的吸收特性,并且其电场耦合程度差,使得纳米天线只能对较窄波段内的能量具有吸收作用,不能同时满足宽波段、高吸收率收集能量的要求。

本文针对上述纳米天线吸收率不高、吸收波段窄等问题,考虑多缝隙结构的光栅耦合、不同介质材料间的杂化耦合,以及蝶形偶极子纳米天线在尖端近场耦合作用下具有高吸收率和吸收波峰带宽调节灵活的特性,提出了一种新颖的多缝隙蝶形偶极子纳米天线。该天线能同时高效地吸收可见光与近红外光波段(400~1800 nm)的能量,采用时域有限差分(FDTD)方法研究了多缝隙蝶形偶极子的吸收特性,并分析了天线结构几何参数、斜入射角度以及光波偏振对其吸收特性的影响。

2 多缝隙蝶形偶极子及其特性

2.1 多缝隙蝶形偶极子模型

图1为多缝隙蝶形偶极子模型,其底部衬底为硅板,上部放置两片左右镜像对称的等腰三角形Au薄膜,每片薄膜刻蚀5条缝隙,两片Au薄膜中间放置一根X方向不对称弯折的Ge纳米线,且中部刻蚀一条缝隙。Au的介电常数利用改进Drude色散模型描述^[16]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\gamma}, \quad (1)$$

式中: ϵ_{∞} 为频率接近无穷大时的介电常数; ω_p 为等离子的角频率; ω 为光波长; γ 为振荡的阻尼频率。



图1 多缝隙蝶形偶极子

Fig. 1 Multi-slot butterfly dipole

图2(a)、(b)分别为单元结构的Y-Z、X-Y平面视图及几何参数。天线单元结构的总体尺寸为1020 nm×800 nm×450 nm,采用FDTD Solutions(试用版)对多缝隙蝶形偶极子尺寸参数进行寻优扫描和比较分析后,获得了优化后的各尺寸参数值,如表1所示。

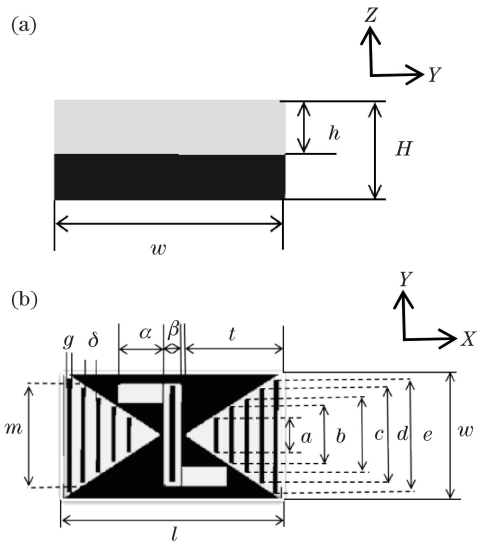


图 2 单元结构视图。(a) Y-Z 视图;(b) X-Y 视图
Fig. 2 Schematics of unit structure. (a) Y-Z view;
(b) X-Y view

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

Parameter	Value /nm
l	1020
w	800
m	750
g	30
h	450
α	240
β	120
t	440
δ	240
H	750
a	200
b	300
c	400
d	550
e	650

2.2 多缝隙蝶形偶极子的特性

本文利用时域有限差分方法计算多缝隙蝶形偶极子的电场分布和吸收特性,并与蝶形偶极子进行比较分析。图 3(a)~(d)分别表示多缝隙蝶形偶极子和蝶形偶极子在波长 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 1200 \text{ nm}$ 处, $z = 0 \text{ nm}$ 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布,其中电场强度 $|E_x|$ 均采用 \lg_{10} 对数归一化处理,红色区域表示电场增强区域;图 3(e)为多缝隙蝶形偶极子与蝶形偶极子在 $400 \sim 1800 \text{ nm}$ 波段内的吸收率特性

曲线。SPPs 在蝶形偶极子表面激发时,诱导的自由电子通过中心间隙被电容耦合的三角形所共享,三角形表面的自由电子与 SPPs 产生共振,进而影响蝶形偶极子的吸收特性。因此,蝶形偶极子的吸收带宽具有调节灵活的特性。由于蝶形偶极子的三角形特征,尖端处易产生避雷针效应,激发高阶 LSPs,从而产生更强的电场增强效果。虽然蝶形偶极子的带宽要高于其他光学偶极子,但通常只有 500 nm 左右,不能覆盖整个太阳能光谱。考虑到蝶形偶极子具有带宽易于调节和延展的特性,结合多种结构的特性,本课题组在蝶形偶极子的基础上提出了多缝隙蝶形偶极子结构。多缝隙蝶形偶极子继承了蝶形偶极子的特性,通过改变蝶形偶极子的中心间隙和表面外观,在提高吸收率的同时可以获得较好的带宽。多缝隙结构在光栅耦合作用下可以保持较宽的工作波段。在蝶形偶极子的表面刻蚀缝隙形成多缝隙与蝶形的复合结构,通过调节中心间隙的距离以及增加介质材料的方法,使天线表面的自由电子与表面等离激元产生剧烈共振。

图 3(a)表明,多缝隙蝶形偶极子在尖端处易聚集浓度较高的自由电子,即在偶极子中心间隙处形成尖端近场耦合,正是由于这种尖端近场耦合使其中心处形成高阶局域等离激元,中间间隙处的场增强明显。分析图 3(a)、(b)与图 3(c)、(d)可知,多缝隙蝶形偶极子电场强度明显强于蝶形偶极子,这是因为缝隙结构可使电磁波被束缚在亚波长的空间中,从而激发 LSPs,缝隙处的自由电子相互耦合形成强电场,这使得其吸收特性在宽波段内显著增强。图 3(e)中多缝隙蝶形偶极子吸收特性曲线在波长 $\lambda = 1200 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 880 \text{ nm}$ 处均出现了较为尖锐的吸收波峰,这进一步说明了多缝隙蝶形偶极子吸收特性明显优于蝶形偶极子,多缝隙结构的光栅耦合与蝶形偶极子结构的尖端近场耦合共同增强了该结构的吸收特性。

保持结构不变,计算多缝隙蝶形偶极子的表面电场分布与缝隙数目之间的关系。缝隙数目 n 分别为 $0, 2, 4, 6, 8, 10$ 时, $z = 0 \text{ nm}$ 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布如图 4 所示,红色区域代表电场增强区域。由电场分布可知,无缝隙时天线表面大部分区域都呈暗场模式,只有尖端处有强电场产生。由图 4(b)~(f)可以看出,随着缝隙数目增加,表面的亮模电场逐渐增强。这是因为多条缝隙之间容易产生光栅耦合作用,使局部电场得到很大程度的提高。图 4 的电场分布显示,在缝隙处有剧烈的亮模电场

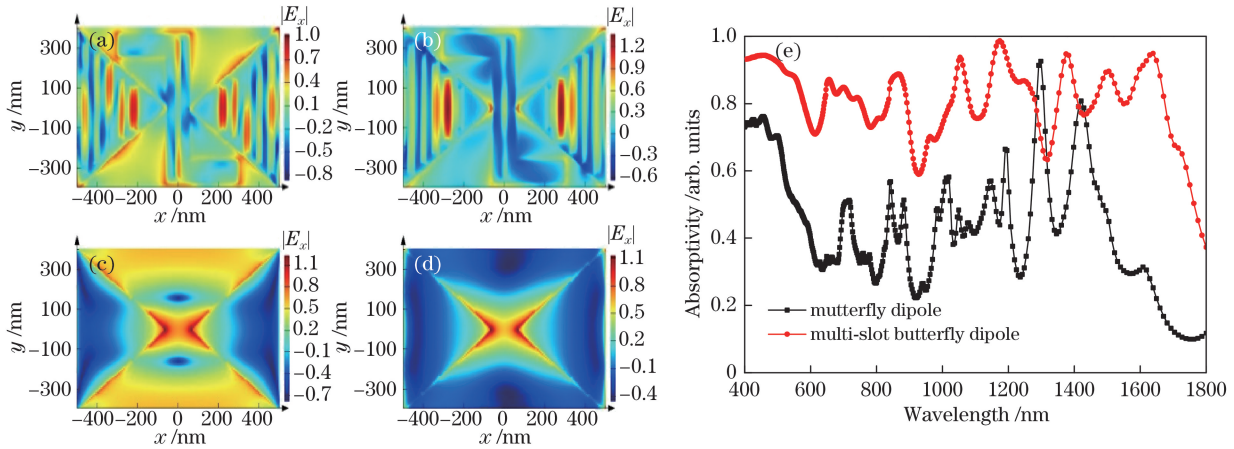


图 3 $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布。(a) $\lambda=880$ nm, 多缝隙蝶形偶极子; (b) $\lambda=1200$ nm, 多缝隙蝶形偶极子; (c) $\lambda=880$ nm, 蝶形偶极子; (d) $\lambda=1200$ nm, 蝶形偶极子; (e) 多缝隙蝶形偶极子与蝶形偶极子的吸收特性
Fig. 3 Electric field $|E_x|$ distributions in plane at $z=0$ nm. (a) $\lambda=880$ nm, multi-slot butterfly dipole; (b) $\lambda=1200$ nm, multi-slot butterfly dipole; (c) $\lambda=880$ nm, butterfly dipole; (d) $\lambda=1200$ nm, butterfly dipole; (e) absorption characteristics of multi-slot butterfly dipole and butterfly dipole

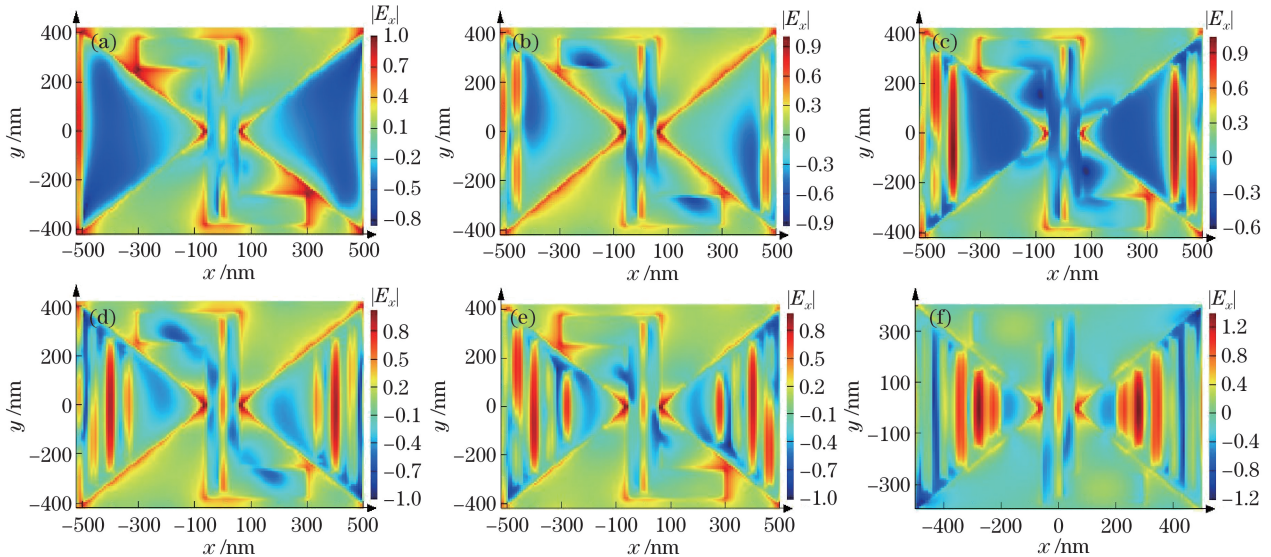


图 4 $\lambda=1000$ nm 时, $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布。(a)无缝隙; (b)缝隙数目 n 为 2; (c)缝隙数目 n 为 4; (d)缝隙数目 n 为 6; (e)缝隙数目 n 为 8; (f)缝隙数目 n 为 10
Fig. 4 Electric field $|E_x|$ distributions in plane at $z=0$ nm for $\lambda=1000$ nm. (a) Seamless; (b) slot number $n=2$; (c) slot number $n=4$; (d) slot number $n=6$; (e) slot number $n=8$; (f) slot number $n=10$

产生,这是因为光照产生的电磁波被束缚在亚波长尺寸范围内,并且与缝隙内汇聚的电子发生共振,形成高阶 LSPs。因此,多条缝隙使得该结构具有较好的吸收特性。

为了进一步调控多缝隙蝶形偶极子的 LSPs,本课题组在该结构的中央增加一条纳米线来增强 LSPs 的激发。下面分析纳米线是否会对电场分布和吸收特性产生影响,其他结构保持不变,仅讨论偶极子中心间隙处纳米线对电场分布与吸收特性的影响。图 5(a)、(b)分别表示该结构中心间隙处无纳

米线、有纳米线时, $z=0$ nm 平面的电场 $|E_x|$ 分布,红色区域代表电场增强区域。由图 3 可以发现,纳米线能显著提高电场强度,这与 SPPs 的传播模式有关。由于金属表面等离子元沿金属表面传播并呈指数衰减,即无纳米线时,天线表面的等离子元传播到中心间隙处时逐渐被抑制而消逝,在图 5(a)所示的多缝隙蝶形偶极子尖端处的场强有所增强,但间隙处出现了暗模电场,表明在中心间隙处 SPPs 出现了抑制效应。然而,当存在纳米线时,该结构 SPPs 的传播突破了中心间隙处的抑制效应^[14],这

是因为两种不同介电常数的材料使得中心间隙处出现了强烈的 LSPs 杂化耦合共振,图 5(b)中心间隙处出现了亮模电场,中心处电场强度显著增强也证实了这一点。图 5(c)为有纳米线和无纳米线这两

种情况下的吸收特性曲线,有纳米线时天线的吸收特性明显优于无纳米线。结果分析表明在中心间隙处增加纳米线可以明显提高吸收特性,这种特性是由不同介质材料的杂化耦合产生的。

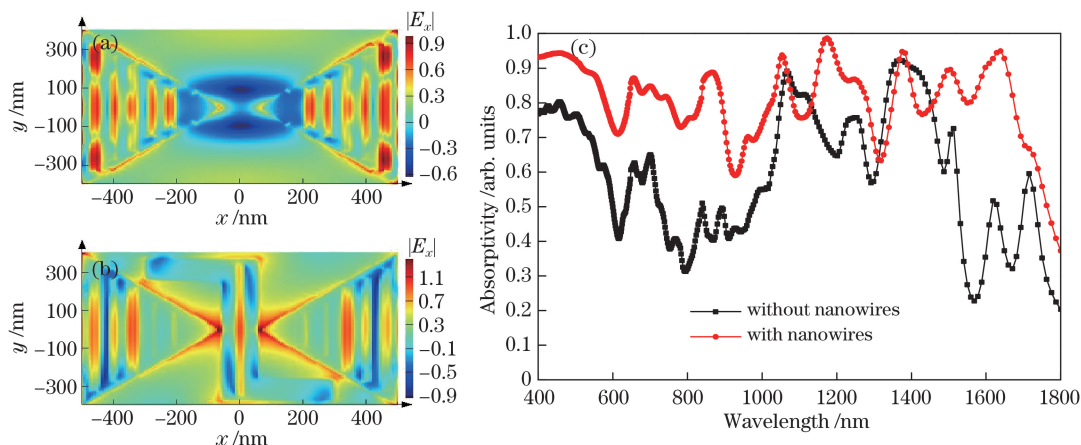


图 5 $\lambda=1450$ nm 时, $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布。(a)无纳米线;(b)有纳米线;(c)两种结构的吸收特性
Fig. 5 Electric field $|E_x|$ distributions in plane at $z=0$ nm for $\lambda=1450$ nm. (a) Without nanowires; (b) with nanowires; (c) absorption characteristics of two classes of structures

考虑到不同材料的纳米线对多缝隙蝶形偶极子吸收特性的影响,保持其尺寸不变,分别使用 Au、Ge、Ag、Al、C、Si 作为中心间隙处的纳米线材料,对其吸收特性进行计算分析。

图 6 为多缝隙蝶形偶极子中心间隙处纳米线采用不同材料时的吸收特性曲线,综合图 6(a)、(b)可知该偶极子的吸收特性受纳米线材料的影响。表面等离激元在沿偶极子表面传播时,纳米线材料的介电常数与三角形 Au 薄膜的介电常数匹配时,将使不同介电常数的材料之间发生杂化耦合。纳米线在这里起到 SPPs 传播负载的作用,SPPs 由一种介质传播到另一种介质时,两种介质接触处的介电常数差会产生类似于电路学原理中的“负载”作用,这种作用可以把更多的等离激元束缚在偶极子中,提高其吸收特性^[13]。图 6(a)、(b)表明 Ge 作为纳米线材料与 Au 介电常数的耦合效果最好。

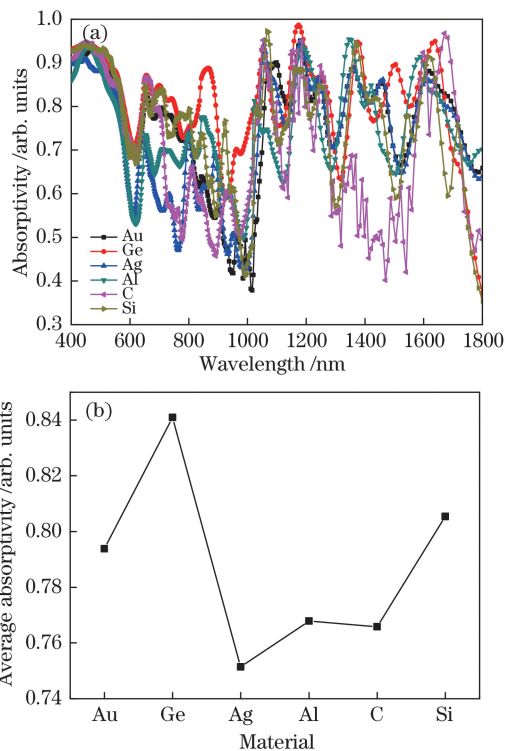


图 6 不同材料的吸收特性。(a)吸收率;(b)平均吸收率
Fig. 6 Absorption characteristics of different materials. (a) Absorptivity; (b) average absorptivity

3 结果与特性分析

3.1 多缝隙蝶形偶极子纳米天线及吸收特性

如图 7 所示,纳米天线是由多缝隙蝶形偶极子以 $T=80$ nm 为周期分别向 X、Y 方向拓展而得的。采用时域有限差分法在 400~1800 nm 波段内对天线进行数值分析,激励光源为 k 方向的平行光源,仿真区域大小设置为 1200 nm \times 1200 nm \times 8000 nm。X、Y 方向上设置为周期边界条件,Z 方向上设置为

理想匹配层(PML)边界条件,周期边界条件可以模拟天线单元结构在 X、Y 方向上周期排列,PML 边界条件可以吸收 Y 方向上超出区域的辐射。仿真的背景介质为空气(折射率为 1)。为保证计算精度,

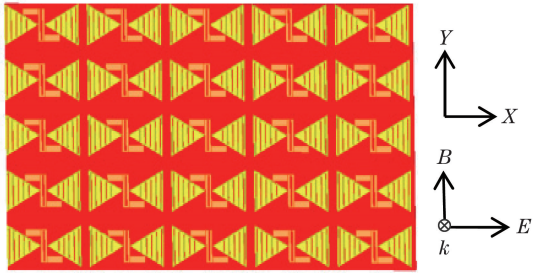


图 7 多缝隙蝶形偶极子纳米天线

Fig. 7 Multi-slot butterfly dipole nano-antenna

网格加密步长设置为 2 nm,入射光沿 Z 轴直射入天线结构,电场沿 X 方向偏振,其波长范围为 400~1800 nm,电场强度幅值设定为 1 V/m。从能量角度描述物体的吸收特性,当光束照射到物体上时,光的能量可以分为三部分:被物体反射的能量、透过物体的能量和被物体吸收的能量,即:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda), \quad (2)$$

式中:R 为物体表面的反射率;T 为透射率;A 为吸收率。平均吸收率定义为

$$A_{\text{avg}}(\lambda) = \left[\sum_1^N A(f_i) \right] / N, \quad (3)$$

式中: $A(f_i)$ 为各个频点的吸收率;N 为整个仿真波段内采样点的个数,此处 N 取 500 个采样点。计算该纳米天线在 400~1800 nm 波段的吸收率和反射率,同时得到纳米天线的吸收率和反射率特性曲线以及纳米天线结构表面的电场强度分布。

如图 8(a)、(b)所示,多缝隙蝶形偶极子纳米天线在 400~1800 nm 内的平均吸收率为 84.1%。该纳米天线在多处光波段出现吸收峰,且在 1200 nm 处出现最高吸收峰,最高峰的吸收率为 98.4%,反射率控制在 20% 以下。该纳米天线的吸收性能优于典型单一结构纳米天线,这些纳米天线的平均吸收率见表 2。图 8(c)~(h)为波长分别是 680,880,1080,1200,1450,1680 nm 时, $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布,红色区域代表电场增强区域。可以看出:纳米天线表面电场强度增强都集中在偶极子的缝隙与尖端处,吸收特性曲线也出现波峰值;在

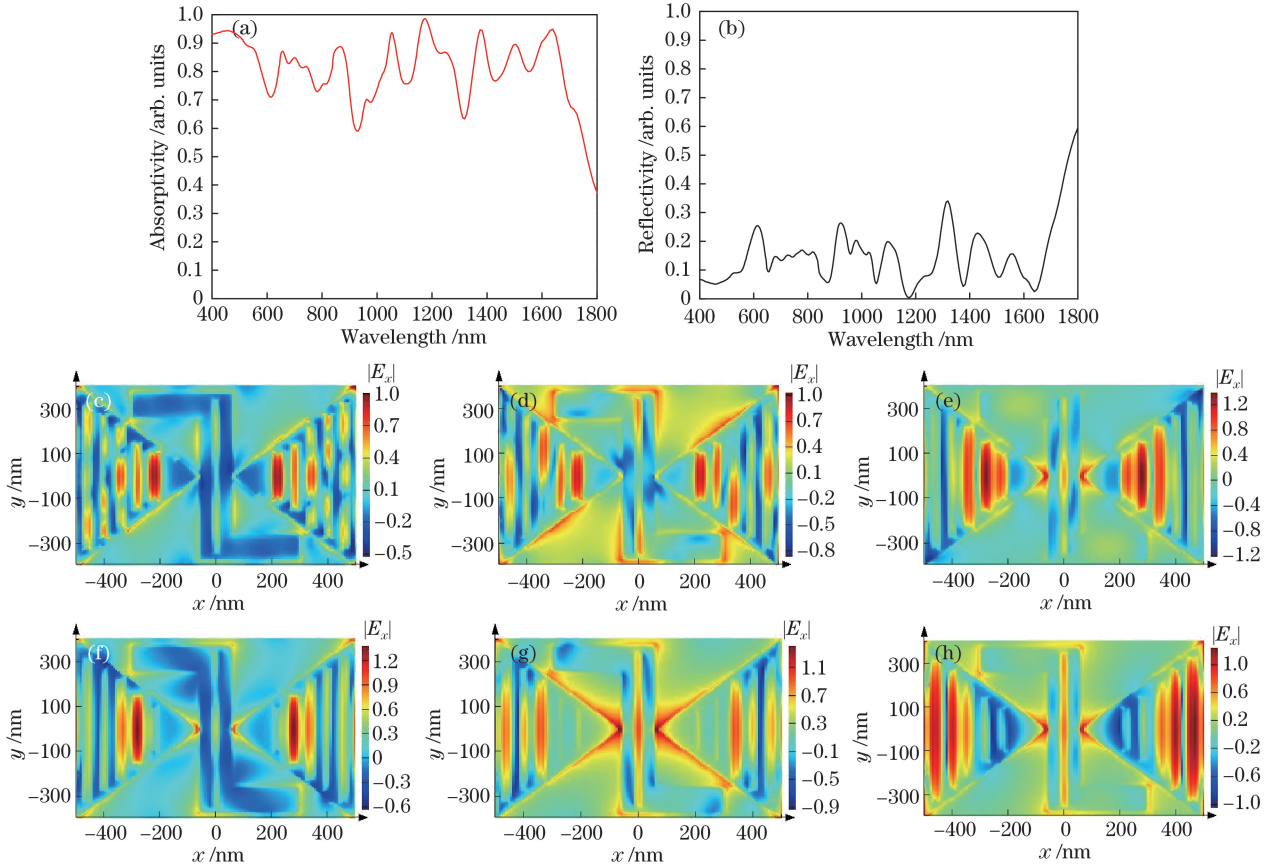


图 8 多缝隙蝶形偶极子纳米天线的(a)吸收光谱和(b)反射光谱;多缝隙蝶形偶极子纳米天线阵列在波长为(c) 680 nm、(d) 880 nm、(e) 1080 nm、(f) 1200 nm、(g) 1450 nm、(h) 1680 nm 时, $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布

Fig. 8 (a) Absorption spectrum and (b) reflectance spectrum of multi-slot butterfly dipole nano-antenna; electric field $|E_x|$ distributions of multi-slot butterfly dipole nano-antenna array in plane at $z=0$ nm plane for (c) $\lambda=680$ nm, (d) 880 nm, (e) 1080 nm, (f) 1200 nm, (g) 1450 nm and (h) 1680 nm

表 2 单一结构纳米天线的吸收率

Table 2 Absorptivity of single structure nano-antenna

Nano-antenna structure	Absorption band /nm	Average absorptivity /%
Spiral nano-antenna ^[12]	400-1600	74.9
Slot Yagi nano-antenna ^[10]	400-1500	60
U shaped nano-antenna ^[11]	400-1400	52
Dipole nano-antenna ^[9]	400-850	30

1680, 1200, 650 nm 处, 由于尖端近场耦合的作用, 蝶形 Au 薄膜结构的尖端处聚集了大量电子, 尖端处的场强急剧增大, 使得尖端处产生了高阶 LSPs, 吸收率显著提高, 图 8(a) 中在 1650, 1200, 650 nm 处形成的吸收波峰也证明了这一点。此外, 该纳米天线具有多条缝隙, 且缝隙之间的馈电间隙较小, 相互之间存在很强的光栅耦合作用, 这使得局部电场得到了很大程度的提高, 天线在强局部电场的作用下将能量束缚在其表面, 形成 LSPs, 天线的透射率与反射率均显著降低。在图 8(c)~(h) 中, 随着光波段变化, 不同的缝隙处均有电场增强, 这表明在较宽的光波段内, 缝隙处的局域电场增强与沿界面传播的 SPPs 相互耦合产生了高阶 LSPs。多缝隙可以将光波束缚在亚波长尺寸范围内, 以获得高阶 LSPs 的激发。在近红外高频波段, 光波长远大于天线的缝隙尺寸, 光波被束缚的程度更深, 高阶 LSPs

的激发更为强烈。因此, 在 1650, 1450, 1200, 800, 650, 520 nm 处均产生了不同程度的等离激元谐振, 这与图 8(a) 多缝隙蝶形偶极子纳米天线吸收特性曲线在 1650, 1450, 1200, 800, 650, 520 nm 处出现吸收峰的结果相吻合。在光栅耦合、尖端近场耦合以及不同介质材料杂化耦合的共同作用下, 多缝隙蝶形偶极子纳米天线能够在宽波段内保持较高的吸收率, 克服了上述纳米天线吸收波段窄、吸收率不高的缺点。

3.2 中心间隙距离 D 对纳米天线吸收特性的影响

本小节主要分析中心间隙距离 D 对纳米天线吸收特性的影响, 保持其结构参数不变, 仅改变天线中心间隙的距离 D , 使距离 D 从 80 nm 增加至 160 nm (步长为 20 nm), 分析其吸收特性。

通过改变纳米天线的中心间隙距离 D , 进行仿真计算得到图 9(a)、(b) 所示的吸收特性曲线, 可知: $D=120$ nm 具有较好的吸收特性。当波长 $\lambda=800$ nm 时, $z=0$ nm 平面的电场强度 $|E_x|$ 的分布如图 10 所示, 红色区域代表电场增强区域。由于纳米天线中心间隙处易产生电场耦合, 故而电场会在纳米线内部产生强烈的电场抑制效应, 这种效应主要是由边界处和尖端处的电流密度具有较大的折射率差引起的^[17]。中心间隙处的耦合电容值被改变, 使得诱导电子汇聚, 突破场抑制, 中心间隙处局域电

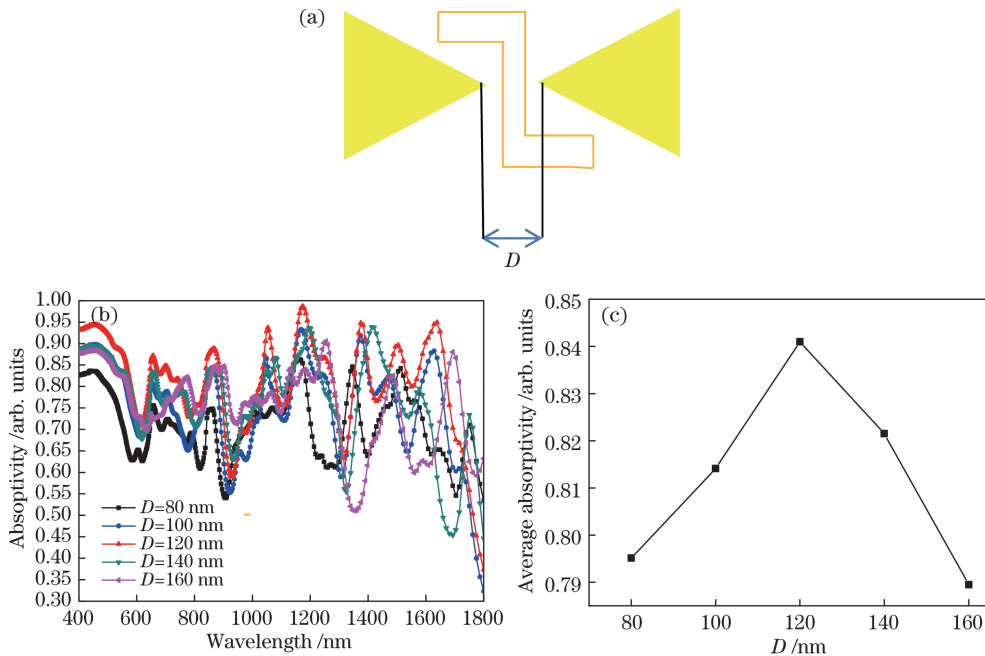


图 9 纳米天线中心间隙距离示意图以及不同距离下的吸收特性。(a) 示意图; (b) 吸收率; (c) 平均吸收率
Fig. 9 Schematic of nano-antenna central gap distance and absorption characteristics under different distances.

(a) Schematic; (b) absorptivity; (c) average absorptivity

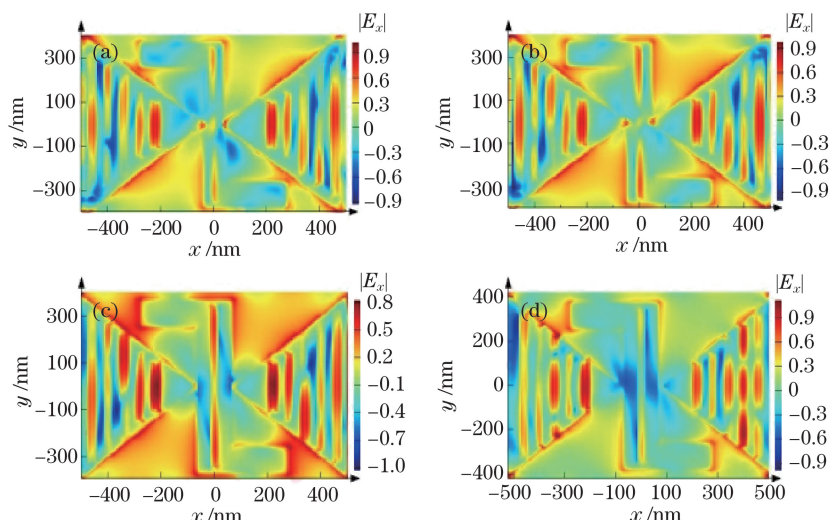


图 10 波长 $\lambda=800\text{ nm}$ 时, $z=0\text{ nm}$ 平面的电场强度 $|E_x|$ 分布。(a) $D=80\text{ nm}$; (b) $D=100\text{ nm}$; (c) $D=120\text{ nm}$; (d) $D=140\text{ nm}$

Fig. 10 Electric field $|E_x|$ distributions in plane at $z=0\text{ nm}$ for $\lambda=800\text{ nm}$. (a) $D=80\text{ nm}$; (b) $D=100\text{ nm}$; (c) $D=120\text{ nm}$; (d) $D=140\text{ nm}$

场显著增强,使天线的吸收率进一步提高。图 10(c)表明 $D=120\text{ nm}$ 时更容易突破这种场抑制,即中心间隙处产生剧烈的场增强,激发表面等离激元,提高纳米天线的吸收率。

3.3 缝隙数目 n 对纳米天线吸收特性的影响

本小节分析 Au 薄膜表面刻蚀的缝隙数目 n 对纳米天线吸收特性的影响。缝隙数目 n 从 0 增加到 12(步长为 2),其他物理参数保持不变,计算和分析不同缝隙数目下的吸收率。图 11(a)表示在 $400\sim 1800\text{ nm}$ 波段三角形 Au 平板表面的缝隙数目 n 分别为 0、2、4、6、8、10、12 时,多缝隙蝶形偶极子天线的吸收率曲线。由图 11(a)可见:在 $400\sim 1200\text{ nm}$ 波段,缝隙数目越多,吸收率越高,但当缝隙数目达到 12 时吸收率下降;在高频波段时,反射率和透射率增强,导致吸收率下降。这是因为缝隙改变了金属薄膜表面电场的分布,缝隙处产生了 LSPs,同时 LSPs 与 Au 薄膜上下表面 SPPs 共同作用产生了更高阶的 LSPs。因此,缝隙数目的大小可以影响 Au 薄膜表面等离激元的激发程度,进而影响纳米天线的吸收特性。当 $n=12$ 时,缝隙数目较多,使得透射率增大,吸收率降低。图 11(b)表示纳米天线在 $400\sim 1800\text{ nm}$ 波段内不同缝隙数目下的平均吸收率。综合以上分析可知,缝隙数目 $n=10$ 时,纳米天线在 $400\sim 1800\text{ nm}$ 波段内的吸收率最高。

3.4 薄膜厚度 h 对纳米天线吸收特性的影响

本小节讨论不同厚度 Au 薄膜对多缝隙蝶形偶极子纳米天线吸收特性的影响。三角形 Au 薄膜厚

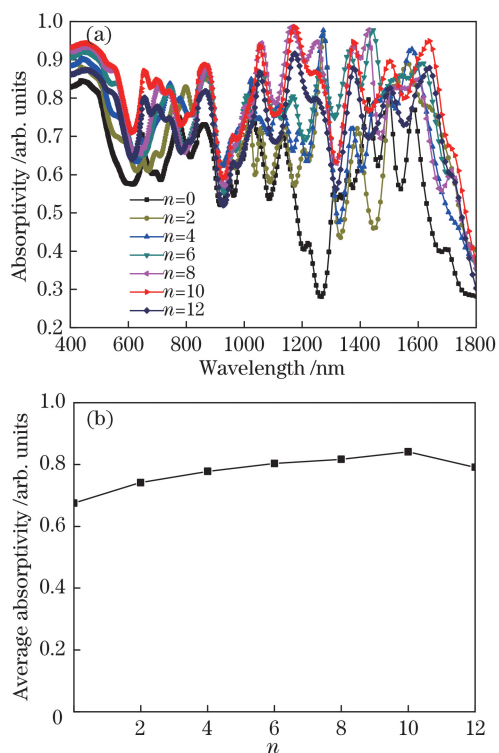


图 11 不同缝隙数目 n 下的吸收特性。(a)吸收率;(b)平均吸收率

Fig. 11 Absorption characteristics under different slot numbers n . (a) Absorptivity; (b) average absorptivity

度 h 从 150 nm 增加到 650 nm (步长为 100 nm),其他参数保持不变,计算和分析 Au 薄膜在不同厚度 h 条件下的吸收率。

图 12 表示在 $400\sim 1800\text{ nm}$ 波段,Au 薄膜厚度 h 分别为 $150, 300, 450, 600\text{ nm}$ 时,多缝隙蝶形

偶极子纳米天线的吸收特性曲线。当 $h = 150 \text{ nm}$ 时,该纳米天线的吸收波段主要为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$; 当 $h = 300 \text{ nm}$ 时,主要吸收波段为 $400 \sim 1200 \text{ nm}$; 当 $h = 450 \text{ nm}$ 时,吸收率在 $400 \sim 1800 \text{ nm}$ 波段内都比较高,然而当 $h = 600 \text{ nm}$ 时,吸收率在 $400 \sim 1800 \text{ nm}$ 波段内显著降低。改变 Au 薄膜厚度会改变纳米天线的透射率和反射率,在相同的波段内, Au 薄膜的反射率会随着厚度 h 的增加而提高,透射率会随着 h 的增加而减小,并且会逐渐减小并趋近于零。综合以上分析可知,当 Au 薄膜厚度 $h = 450 \text{ nm}$ 时,纳米天线在 $400 \sim 1800 \text{ nm}$ 内的反射率较低,平均吸收率最高,吸收波段最宽。

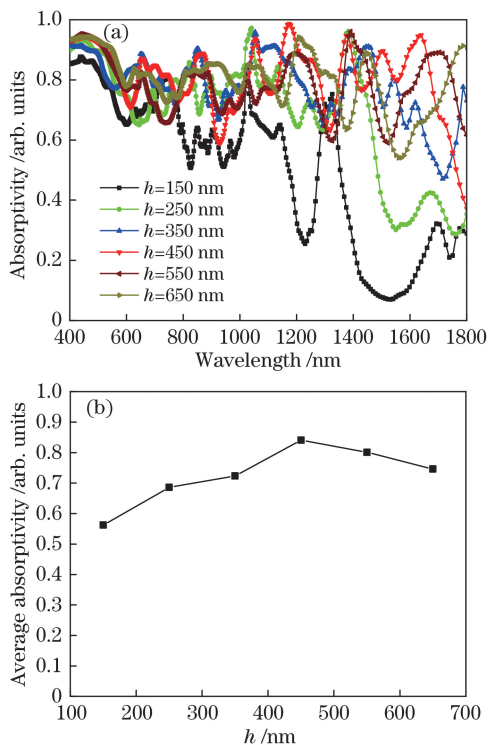


图 12 不同薄膜厚度 h 下的吸收特性。

(a) 吸收率; (b) 平均吸收率

Fig. 12 Absorption characteristics under different film thicknesses h . (a) Absorptivity; (b) average absorptivity

3.5 光波偏振角度和斜入射角度对纳米天线吸收特性的影响

本小节分析光波偏振角度和斜入射分别对多缝隙蝶形偶极子纳米天线吸收特性的影响。在仿真过程中,将光波偏振角度从 0° 增加到 90° (步长为 30°),斜入射角从 0° 增加到 60° (步长为 20°),其他参数保持不变,分别分析并计算在不同光波偏振角度和入射角度时纳米天线的吸收特性。

由图 13(a)可知:在不同的偏振角度下,当波长

小于 1000 nm 时,吸收率随偏振角度的变化较小;当波长大于 1000 nm 时,吸收率随偏振角度的增大而减小,这是因为多缝隙蝶形偶极子纳米天线结构在光波偏振较大时反射率会升高,进而影响其吸收率;当光波偏振角度达到 90° 时,平均吸收率依然可以维持在 60% 左右。由此可知,该纳米天线在光波偏振较高时依然可以获得较高的吸收率。图 13(b)为天线结构在不同斜入射角度下的吸收特性曲线,可见:吸收率随斜入射角度的增大而减小,斜入射角度为 60° 时,平均吸收率依然可达到 54% 。因为光源入射角度倾斜,三角形 Au 薄膜狭缝处与光的接触面减小,使得 LSPs 的激发减弱,该纳米天线对电磁波的束缚能力降低,吸收率下降,表明本实验中的纳米天线在不同偏振角度和斜入射角度下都能对太阳光具有较好的吸收能力。

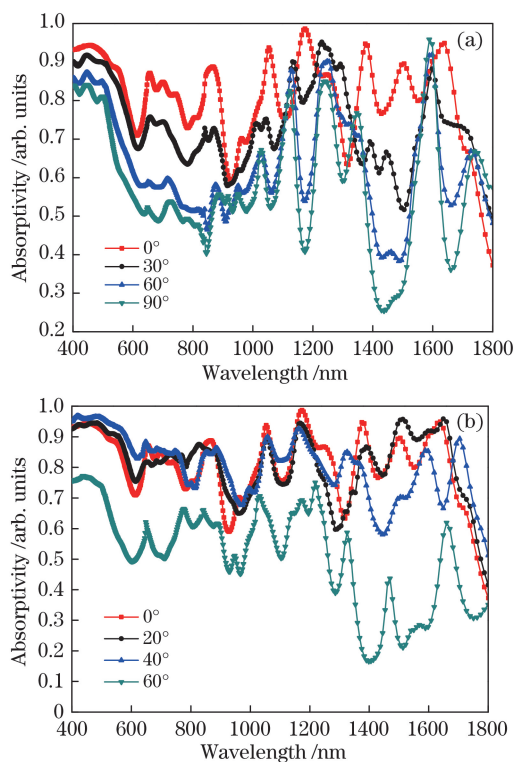


图 13 (a) 偏振角度和 (b) 斜入射角度对吸收特性的影响

Fig. 13 Influences of (a) polarization angle and (b) inclined incidence angle on absorption characteristics

4 结 论

本课题组结合蝶形偶极子和多缝隙结构,提出了一种多缝隙蝶形偶极子,对该偶极子的特性进行分析和研究;并在此基础上设计了纳米天线,用于太阳能吸收。采用时域有限差分法对该纳米天线进行数值计算,分析了相关物理参数对其吸收特性的影响。结果表明,多缝隙蝶形偶极子天线可以在 $400 \sim$

1800 nm 波段范围内保持 84.1% 的平均吸收率, 最高吸收率为 98.4%。所提纳米天线吸收率明显高于先前报道中提出的缝隙八木天线、多谐振 U 形天线和螺旋纳米天线等。该纳米天线吸收波段覆盖太阳可见光频谱, 且具有兼顾太阳光任意偏振的特性。通过分析可知, 该纳米天线在光照下会产生尖端近场耦合和多缝隙光栅耦合以及不同介质之间等离激元的杂化耦合, 这些耦合的共同作用可使纳米天线在较宽的波段内保持较高的吸收率。目前, 该结构的结果是通过数值计算获得的, 下一步工作将从实验角度对该结构的特性进行研究和测试。

参 考 文 献

- [1] Henry C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(8): 4494-4500.
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [3] Liang Q Q. Study on plasmon hybridization and optical absorption properties of metallic nanostructures[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
梁秋群. 金属纳米结构表面等离激元杂化和吸收特性的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [4] Huang Q, Wang M, Li A, *et al.* Symmetrical long range surface plasmon resonance sensing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 44-49.
黄强, 王敏, 李昂, 等. 对称型长程表面等离子体共振分析系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 44-49.
- [5] Eizner E, Avayu O, Ditcovski R, *et al.* Aluminum nanoantenna complexes for strong coupling between excitons and localized surface plasmons[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6215-6221.
- [6] Goodarzi M, Fakharzadeh J A. Shape and size determination of plasmonic nano particles using particle swarm optimization algorithm based absorption coefficient[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 130: 44-49.
- [7] Robak E, Grześkiewicz B, Kotkowiak M. Absorption enhancement in silicon nanowire-optical nanoantenna system for photovoltaic applications[J]. *Optical Materials*, 2014, 37: 104-109.
- [8] Cakmakyapan S, Cinel N A, Cakmak A O, *et al.* Validation of electromagnetic field enhancement in near-infrared through Sierpinski fractal nanoantennas[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19504-19512.
- [9] El-Toukhy Y M, Hussein M, Hameed M F O, *et al.* Optimized tapered dipole nanoantenna as efficient energy harvester[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): A1107-A1122.
- [10] Zhu L, Wang Y, Liu Y Y, *et al.* Design of slot Yagi-Uda nanoantennas and their broadband absorption properties[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(10): 1024002.
朱路, 王杨, 刘媛媛, 等. 缝隙八木纳米天线设计及宽波段吸收特性[J]. *光子学报*, 2016, 45(10): 1024002.
- [11] 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.
- [12] Xu Z C, Li N, Duan B Y. Design of broadband spiral nanoantenna based on solar energy harvesting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0826003.
徐志超, 李娜, 段宝岩. 基于太阳能收集的宽频螺旋纳米天线设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0826003.
- [13] Li Y Q, Guo Y J, Su L, *et al.* Polarization-dependent absorption of rectangular-block metamaterials in infrared region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2998-3003.
黎永前, 郭勇君, 苏磊, 等. 矩形块微纳结构材料在红外波段的偏振光吸收[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2998-3003.
- [14] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [15] Ono M, Kuramochi E, Zhang G Q, *et al.* Nanowire-nanoantenna coupled system fabricated by nanomanipulation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8647-8659.
- [16] Wang Z L. A review on research progress in surface plasmons[J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324.
王振林. 表面等离激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, 29(3): 287-324.
- [17] Wang J F, Gudiksen M S, Duan X F, *et al.* Highly polarized photoluminescence and photodetection from single indium phosphide nanowires[J]. *Science*, 2001, 293(5534): 1455-1457.