

文章编号 1004-924X(2017)08-2155-10

## 多谐振 U 形缝隙纳米天线设计及吸收特性

刘媛媛,熊 广,王 杨,朱 路\*

(华东交通大学,信息工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:** 太阳能收集是解决无线传感器网络能量受限的有效手段。针对传统采用光伏电池收集太阳能的方法易受环境与光照时间限制、吸收波段窄等问题,提出了一种耦合对称 U 形缝隙的多谐振纳米天线阵列用于太阳能收集。该天线的单元结构是在银介质基板上刻蚀 4 个对称的 U 形缝隙,U 形缝隙附近产生的表面等离子激元相互耦合,使其在宽波段内产生多个谐振点,从而提高宽波段的平均吸收率。利用时域有限差分方法分析了多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收特性。仿真结果表明,天线阵列在 400~870 nm,960~1 100 nm 两个波段内吸收率较高,并出现多个吸收峰,吸收峰值最大可以达到 99%。

**关键词:** 能量收集;U 形缝隙纳米天线;表面等离子激元;时域有限差分;吸收特性

**中图分类号:** O431.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172508.2155

## Design of multi resonant U shaped slots nano-antenna and their absorption properties

LIU Yuan-yuan, XIONG Guang, WANG Yang, ZHU Lu\*

(Department of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

\* Corresponding author, E-mail: luyuanwanwan@163.com

**Abstract:** Solar collection is an effective mean to solve the problem that network energy of wireless sensor is limited. A multi-resonant nano-antenna array of coupling and symmetric U-shaped slots was proposed for solar collection, aiming at problems such as that solar collection of traditional photovoltaic battery was easily limited by environment and illumination time as well as problem of narrow absorption bands. 4 symmetric U-shaped slots were etched in silver dielectric substrate to obtain this antenna unit structure, and then the mutual coupling of surface plasmons produced in the vicinity of U-shaped slots to generate many resonance points in broadband, thus increasing average absorptivity of broadband. Absorption feature of nano-antenna array of multi-resonant U-shaped slots was analyzed through finite difference time domain method. Simulation result indicates that absorptivity of antenna array is higher in two bands of 400~870 nm and 960~1 100 nm, and there are many absorption peaks. Absorption value can reach 99% maximally.

**Key words:** energy collection; U-shaped slots nano-antenna; surface plasmon; finite difference time domain; absorption feature

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-04-14.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 31101081, 61162015);江西省科技支撑项目(No. 20151BBE50095);江西省自然科学基金(No. 20161BAB202061)

## 1 引言

太阳能作为可持续使用的绿色能源,其具有能量密度大,分布范围广等优点。太阳能收集被广泛应用于能量受限的无线传感器网络中<sup>[1]</sup>。传统光伏太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应直接将光能转化成电能,仅接收可见光波段能量,且转换效率较低。另外,光伏太阳能电池易受四季、昼夜、阴晴等气象条件影响,尤其在阴暗天气和夜晚,这些电池几乎失去作用。因此需要一种高效率、高带宽的太阳能收集技术,以解决无线传感器网络能量受限的关键问题。

纳米光学天线具有良好的电磁吸收特性,可用于解决传统光伏电池太阳能收集易受环境与光照时间限制、吸收率较低、吸收波段窄等问题。利用纳米天线制备的太阳能吸收器可以收集可见光和红外波段的辐射能量,且具有较高的吸收率。其机理是光照射到金属表面时,金属表面的自由电子发生集体振荡,入射电磁波与金属表面自由电子耦合会形成的一种沿着金属表面传播的近场电磁波,一旦自由电子与入射电磁波发生共振,在共振状态下电磁场的能量被有效地转变为金属表面自由电子的集体振动能,形成了一种特殊的电磁模,即表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)<sup>[2]</sup>。当产生的表面等离子激元被局限在金属纳米结构的亚波长尺寸范围内时<sup>[3]</sup>,就实现了入射场和局域场的相互转换<sup>[4]</sup>,形成局域表面等离子激元(Localized Surface Plasmons, LSPs)<sup>[5]</sup>。局域表面等离子激元的振荡频率由电子的密度、有效质量、纳米粒子的形状和尺寸决定。基于 LSPs 的纳米天线能在可见光和红外波段产生场增强作用<sup>[6]</sup>。因此,利用纳米天线制备的太阳能电池可以突破传统光伏电池受光照时间和气候条件的限制,且能提高吸收率与吸收波段。

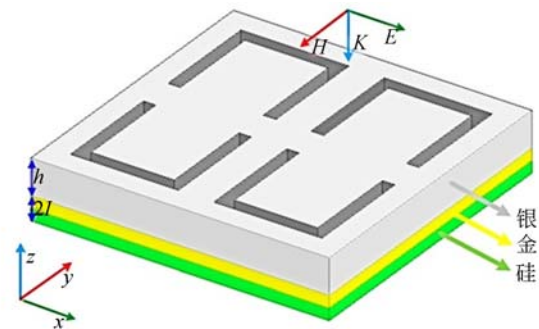
目前研究的金属纳米天线结构主要集中在棒状、球体、圆盘、对称振子和蝶形等<sup>[7-10]</sup>。文献[11]提出了纳米核壳及其二、三、七聚体结构,具有较高的性能,但此结构制作难度大。文献[12]提出等臂 L 形结构,能形成两个谐振峰,谐振峰的强度随着臂长的增加而增加,但吸收波段较窄。文献[13]提出 H 与 U 形结构的纳米天线,其在硅平板上以不同的排列方式放置 H 与 U 形银平

板,此天线结构只有单谐振点,平均吸收率较低。文献[14,15]提出的单缝隙和等臂 L 形缝隙纳米天线在可见光波段具有较好的场增强效应,由于单缝隙不存在缝隙间的耦合作用,平均吸收率较低。

本文针对上述纳米天线吸收率低和吸收波段窄等问题,提出了多谐振 U 形缝隙纳米天线结构。采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法研究了多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收特性。

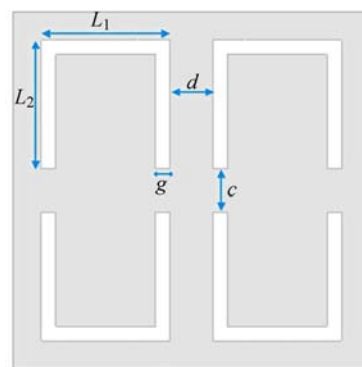
## 2 多谐振 U 形缝隙纳米天线单元结构

多谐振 U 形缝隙纳米天线单元结构如图 1 所示。由于银在可见光波段范围内容易激发表面等离子激元,所以本文选择贵金属银作为天线材料。



(a)单元结构

(a)Element structure



(b)结构尺寸

(b)Structure diameter

图 1 多谐振 U 形缝隙纳米天线单元结构模型和银平板俯视图

Fig. 1 Multi resonant U shaped slot nano-antenna element model and top view of silver plate

银的介电常量采用 palik 模型的实验测定值描述。银平板的长度和宽度为  $L=W=500\text{ nm}$ , 厚度  $h=400\text{ nm}$ 。在银平板下放置金平板可以降低纳米天线的透射率,所以衬底选用贵金属金和硅两种材料,它们的厚度均为  $I=100\text{ nm}$ 。在银平板上刻蚀 4 个相同的 U 形缝隙,U 形缝隙的长度  $L_1=180\text{ nm}$ 、 $L_2=180\text{ nm}$ , 缝隙之间的水平间距  $d=60\text{ nm}$ , 竖直间距  $c=60\text{ nm}$ , 缝隙宽度  $g=20\text{ nm}$ 。

### 3 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收特性

这部分主要分析天线阵列的吸收特性以及物理参数对天线阵列吸收特性的影响。

#### 3.1 天线阵列的吸收特性分析

多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列是将多谐振 U 形缝隙纳米天线单元周期性地排列,阵元之间的距离(周期)  $T=100\text{ nm}$ ,其结构如图 2 所示。本文采用 FDTD 方法计算和分析天线阵列的吸收特性。仿真区域大小设置为  $600\text{ nm}\times 600\text{ nm}\times 8\ 000\text{ nm}$ 。在  $x, y$  方向上设置为周期边界条件,同时,在  $z$  方向上设置成 PML 边界条件。其中,周期边界条件可以模拟天线单元结构沿  $x, y$  方向上周期排列,PML 边界条件可以吸收  $z$  方向上超出区域的辐射。仿真环境背景材料设置为空气(折射率为 1)。网格加密步长设置为  $10\text{ nm}$ 。选择平面波作为入射光源,入射光沿  $z$  轴垂直射入结构且电场沿  $x$  方向偏振,其波长范围为  $400\sim 1\ 400\text{ nm}$ ,电场的幅值设定为  $1\text{ V/m}$ 。

从能量角度描述物体的吸收特性,当光束照射到物体上,光的能量可以分为 3 个部分,即被物体反射的能量、透过物体的能量和被物体所吸收的能量。因此,物体的吸收率可以表示为  $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ <sup>[16]</sup>。其中,  $R$  表示物体表面的反射率、 $T$  表示透射率、 $A$  表示吸收率。平均吸收率定义为:

$$A(\lambda) = (\sum_1^N A(f_i))/N, \quad (1)$$

其中  $A(f_i)$  表示各个频点的吸收率,  $N$  表示整个仿真波段内采样点个数。

为分析多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收特性,采用 FDTD 方法计算天线阵列的吸收率

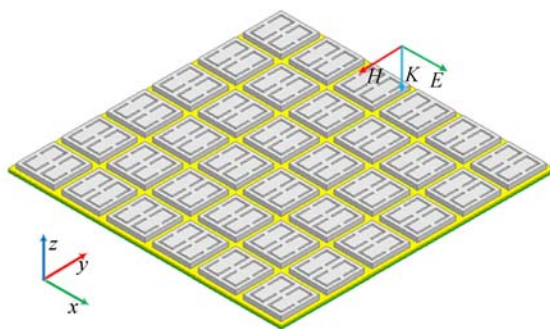
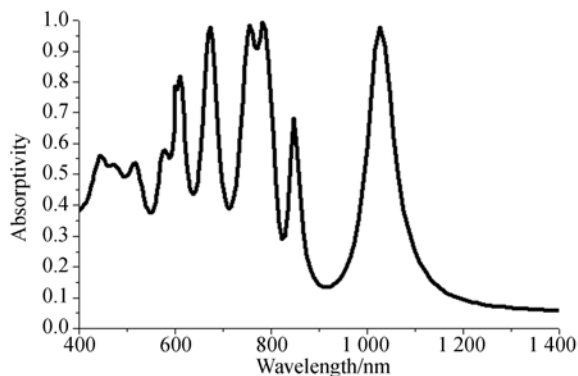


图 2 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列结构模型

Fig.2 Array model of multi resonant U shaped slot nano-antenna

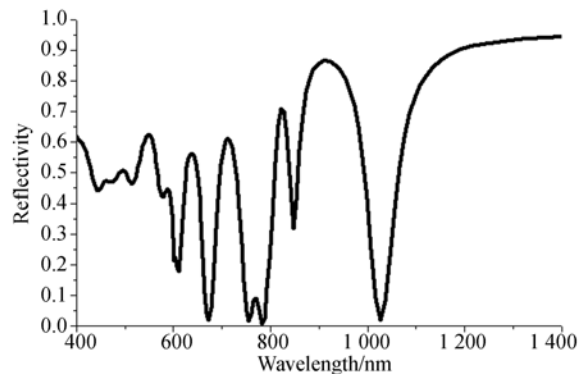
和反射率。天线阵列在  $400\sim 1\ 400\text{ nm}$  波段上吸收率和反射率随波长变化的曲线及天线单元上表面的场强分布如图 2 所示。

图 3(a)、(b)结果表明,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列在  $400\sim 870\text{ nm}$ ,  $960\sim 1\ 100\text{ nm}$  两个波段内吸收率较高,并在  $610, 673, 755, 781, 846, 1\ 026\text{ nm}$  处出现吸收峰,吸收峰值最大可以达到



(a) 天线阵列的吸收率

(a) Absorptivity of nano-antenna array



(b) 天线阵列的反射率

(b) Reflectivity of nano-antenna array

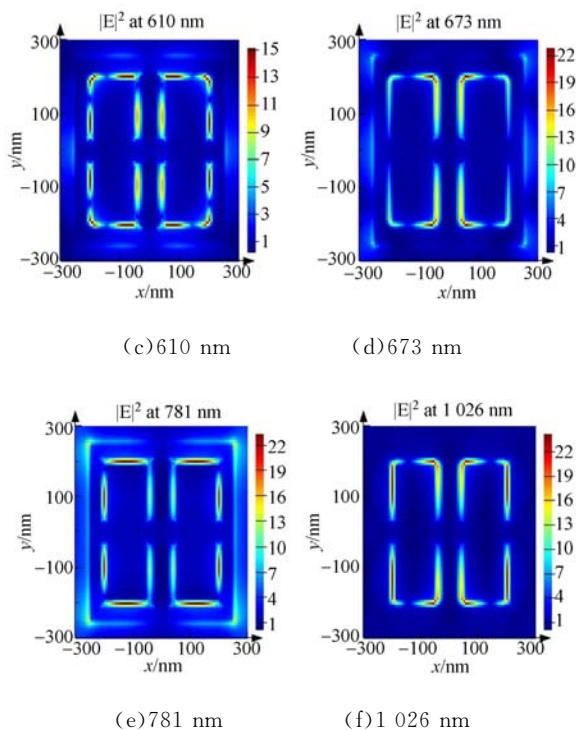


图 3 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率(a)和反射率(b), (c)~(f)多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列在波长 610, 673, 781, 1 026 nm 处天线上表面的电场强度分布  $|E|^2$

Fig. 3 Absorptivity (a) and reflectivity (b) of multi resonant U shaped slot nano-antenna array, (c) ~ (f) Electric-field intensity distribution  $|E|^2$  of antenna top plane with 610, 673, 781 and 1 026 nm band respectively

99%, 平均吸收率超过 50%。为了进一步分析其性能, 将此纳米天线与文献[8, 9, 13, 17, 18, 19]设计的纳米天线进行对比分析。

文献[8, 13, 17]显示, 圆盘纳米天线在 400~1 400 nm 波段的平均吸收率约为 20%; “H”、“U”形纳米天线的吸收波段分别主要集中在 5 260~5 500 nm 与 3 520~3 750 nm 波段, 吸收波段较窄; 偶极子纳米天线中吸收率大于 50% 的波段主要集中在 690~730 nm, 在 400~850 nm 波段内平均吸收率大约为 30% 左右。与上述纳米天线相比, 本文提出的多谐振 U 形缝隙纳米天线具有吸收波段宽, 吸收率高的特点。此外, 本文还分析了文献[9]提出的二阶、三阶阶梯形偶极子纳米天线。二阶阶梯形偶极子纳米天线虽然提高了 400~570 nm 波段的吸收率, 但 570~1 400 nm 波段的吸收率有所下降。三阶阶梯形偶极子纳米天线

也仅提高了 400~600 nm 波段内天线的吸收率, 平均吸收率仅为 40%。文献[18]提出的 Vivaldi 宽带纳米天线, 虽然具有较高的吸收率, 但是 Vivaldi 天线的圆弧形结构会对天线性能产生极大影响, 所以对天线圆弧形结构的精度要求很高, 加工难度大。文献[19]提出的偶极子纳米天线, 其吸收波段主要集中在红外波段, 在可见光波段天线的吸收率较低, 甚至在 400~600 nm 波段内天线的吸收率几乎为零。而本文提出的多谐振 U 形缝隙纳米天线的平均吸收率则超过 50%, 吸收波段为 400~1 400 nm, 吸收波段宽。多谐振 U 形缝隙纳米天线在银纳米板上蚀刻缝隙结构, 改变了金属的物理结构, 进而改变了金属表面自由电子的分布形式, 异性电荷在缝隙边缘处聚集, 与入射波产生共振, 形成多个谐振点, 在纳米天线表面形成 LSPs。同时, 少量光波可以通过缝隙穿透到银平板下表面产生共振形成 LSPs。上下表面的 LSPs 相互耦合, 将能量传递到上表面, 形成更高阶的 LSPs, 从而激发更强的局域电场, 将共振时的能量束缚在表面附近, 减小被天线表面反射的能量, 使得天线表面的能量得到增加<sup>[20]</sup>。

单个周期内天线单元上表面的场强分布如图 3(c)~(f)所示。由图可知, U 形缝隙处的场强明显高于其它部分的场强, 即谐振点处的场强最高。入射光波长的改变使得天线缝隙的谐振模式和天线的场强分布发生变化。谐振模式的多样性和天线缝隙间的相互耦合作用, 改变了 LSPs 模式和表面电场分布, 增加了谐振频率点, 加大了场增强程度。这是由于在天线表面形成了 SPPs, 外界光场被集体振荡的电子俘获, 形成的电磁能量被束缚在金属表面附近, 使天线的反射率降低, 吸收率增加。

### 3.2 物理参数对天线阵列吸收特性的影响

#### 3.2.1 缝隙宽度 $g$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析缝隙宽度  $g$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。缝隙宽度从 10 nm 增加到 40 nm, 其它参数保持不变, 计算分析各个缝隙宽度下天线阵列的吸收率。

图 4(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段, 缝隙宽度  $g$  分别为 10、20、30、40 nm 时, 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。在 400~500 nm 波段, 天线阵列的吸收率随

着缝隙宽度的增加而上升;在 500~900 nm 波段,天线阵列的吸收率随着缝隙宽度的增加产生波动,吸收率呈现先增后减的趋势;然而,在 900~1 400 nm 波段,其吸收率随着缝隙宽度的增加而下降。不同缝隙宽度下自由电子的分布形式和自由电子总量都不同,天线的有效面积也不同。因此,能在天线表面形成不同程度的 LSPs。由于存在不同程度的 LSPs 和缝隙间的相互耦合作用,随着缝隙宽度的变化,吸收曲线有局部波动大和不规则变化的情况出现。综合分析得知,当  $g=20$  nm 时,吸收率比其它缝隙宽度的吸收率更稳定,并且在 400~1 000 nm, 1 000~1 400 nm 都出现了多个吸收峰,平均吸收率最高,吸收波段最宽。此外,随着缝隙宽度的增加,可见光波段的吸收率上升,近红外波段的吸收率下降,因此可以根据不同情况对缝隙宽度进行调节。

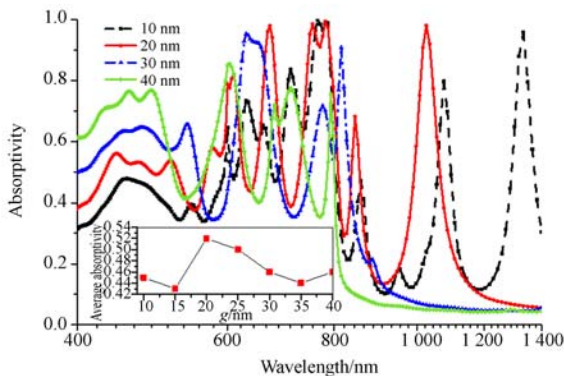


图 4 不同缝隙宽度下多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 4 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different slot widths

### 3.2.2 缝隙水平间距 $d$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析缝隙水平间距  $d$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。缝隙水平间距从 20 nm 增加到 80 nm,其它参数保持不变,计算分析各个缝隙水平间距下天线阵列的吸收率。

图 5(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段,缝隙水平间距  $d$  分别为 20、40、60、80 nm 时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。由图可见,在 400~600 nm 波段,天线阵列的吸收率随着缝隙水平间距的增加而下降;在 600~1 400 nm 波段,天线阵列的吸收率随着缝隙水平间距的增加先上升后降低,当  $d=60$  nm

时,吸收率最高。由于各个缝隙间谐振相互耦合,使得天线的场强分布与 LSPs 的激发变得更为复杂,存在吸收曲线波动大和不规则变化的情况。由图 5 平均吸收率曲线可知,当  $d$  超过 60 nm 时,缝隙之间的耦合作用减弱,天线阵列的平均吸收率大幅下降。综合分析,当  $d=60$  nm 时,吸收率比其它缝隙水平间距的吸收率更稳定,在 400~800 nm 和 800~1 400 nm 两个波段都有多个吸收峰,吸收波段最宽,平均吸收率最高。

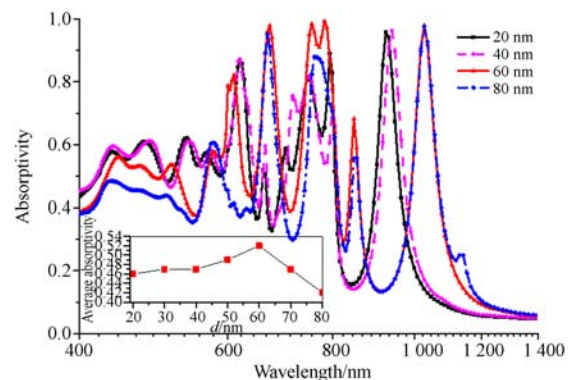


图 5 不同缝隙水平间距时多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 5 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different horizontal slot spaces

### 3.2.3 缝隙垂直间距 $c$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析缝隙垂直间距  $c$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。缝隙垂直间距从 30 nm 增加到 80 nm,其它参数保持不变,计算分析各个缝隙垂直间距天线阵列的吸收率。

图 6(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段,缝隙垂直间距  $c$  分别为 20、40、60、80 nm 时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。可见,当  $c=60$  nm 时,在 400~900 nm 波段,吸收率明显比其它垂直间距的吸收率高。其它缝隙垂直间距天线阵列吸收率的差距较小,偏差主要集中在 700~800 nm 波段。缝隙垂直间距为 60 nm 时天线阵列的平均吸收率明显升高,其它缝隙垂直间距天线阵列的平均吸收率相差较小。综合分析得知,缝隙垂直间距对天线阵列吸收率的影响较小,仅当  $c=60$  nm 时,天线阵列的吸收率较其他情况明显最高,吸收波段最宽。

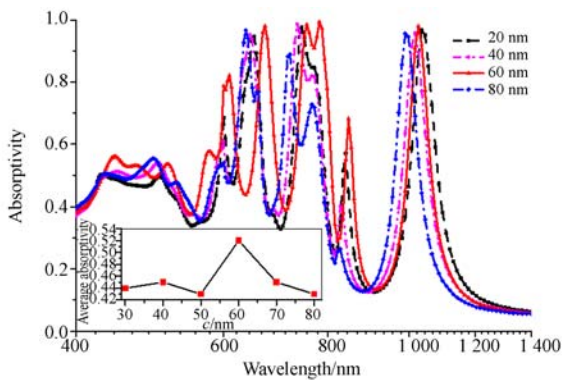


图 6 不同缝隙垂直间距时多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 6 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different vertical slot spaces

### 3.2.4 水平缝隙长度 $L_1$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析水平缝隙长度  $L_1$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。水平缝隙长度从 100 nm 增加到 200 nm, 其它参数保持不变, 计算分析各个水平缝隙长度天线阵列的吸收率。

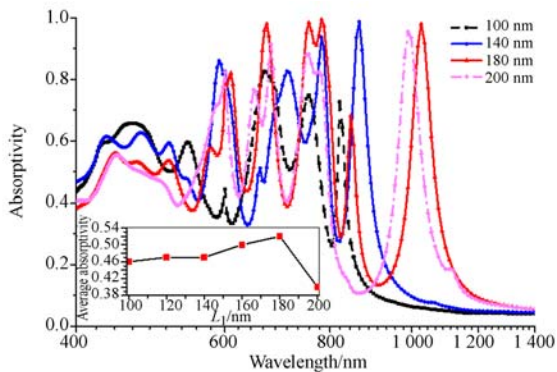


图 7 不同水平缝隙长度时多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 7 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different horizontal slot lengths

图 7(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段, 水平缝隙长度  $L_1$  分别为 100、140、180、200 nm 时, 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。在 550~1 400 nm 波段, 天线阵列的吸收率随着  $L_1$  的增加呈现上升的趋势, 当  $L_1$  超过 180 nm 时, 天线阵列的吸收率开始下降; 在 400~550 nm 波段,  $L_1$  越短天线阵列的吸收率越

高。这是因为改变水平缝隙长度  $L_1$ , 既改变了金属表面自由电子的分布形式, 也改变了电流走势, 最终改变了金属表面激发的 LSPs 的强度。同时, 改变水平缝隙长度  $L_1$ , 会影响光通过缝隙穿透到下表面的量, 也就能影响金属下表面激发 LSPs 强度和上下表面 LSPs 的相互耦合强度。不同的水平缝隙长度能使天线表现出不同的吸收特性。综合分析得出, 当  $L_1 = 180$  nm 时, 虽然在 400~600 nm 波段, 天线阵列的吸收率不高, 但在 600~1 400 nm 波段, 天线阵列的平均吸收率明显高于其它水平缝隙长度的平均吸收率, 即  $L_1 = 800$  nm 时天线阵列的平均吸收率最高, 吸收波段最宽。

### 3.2.5 竖直缝隙长度 $L_2$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析竖直缝隙长度  $L_2$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。竖直缝隙长度从 100 nm 增加到 200 nm, 其它参数保持不变, 计算分析各个竖直缝隙长度天线阵列的吸收率。

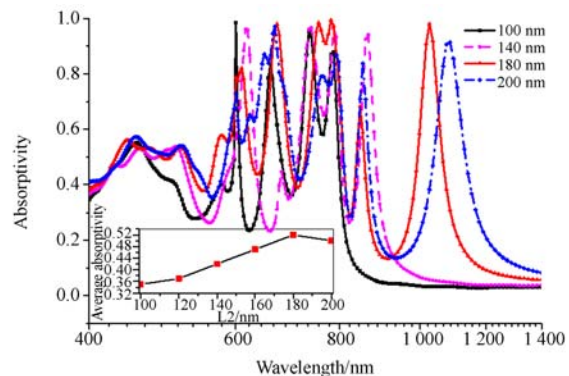


图 8 不同竖直缝隙长度下多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 8 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different vertical slot lengths

图 8(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段, 竖直缝隙长度  $L_2$  分别为 100、140、180、200 nm 时, 多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。当  $L_2$  为 100 nm 或 120 nm 时, 天线阵列吸收率较高的波段主要集中在 400~850 nm 波段。当  $L_2$  大于 120 nm 时, 在 400~550 nm 和 850~1 400 nm 波段, 天线阵列的吸收率随着  $L_2$  的增加呈现上升趋势, 但在 400~550 nm 波段, 各个水平缝隙长度天线阵列的吸收率差距较小;

在 550~850 nm 波段,吸收曲线的跳变比较大,各个水平缝隙长度天线阵列的吸收率差距明显。当  $L_2$  不超过 180 nm 时,天线阵列的吸收率随着  $L_2$  的增加呈现上升趋势,当  $L_2$  超过 180 nm 时,天线阵列的吸收率开始下降。和水平缝隙长度类似,改变竖直缝隙长度也会影响金属表面的自由电子分布形式、上下表面激发的 LSPs 的强度和上下表面 LSPs 的相互耦合强度。此外,由平均吸收率可知,天线阵列的平均吸收率随着  $L_2$  的增加而增加,说明增加  $L_2$  使得缝隙之间的耦合作用加强。综合分析得出,当  $L_2 = 180$  nm 时,天线阵列的平均吸收率最高。

### 3.2.6 银平板厚度 $h$ 对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析银平板厚度  $h$  对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。银平板厚度从 100 nm 增加到 500 nm,其它参数保持不变,计算分析各个银平板厚度天线阵列的吸收率。

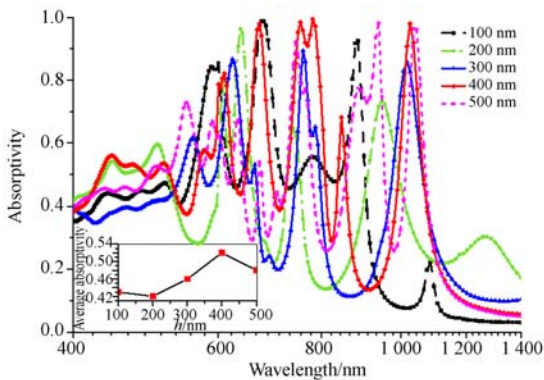


图 9 不同银平板厚度下多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 9 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different thicknesses of silver plate

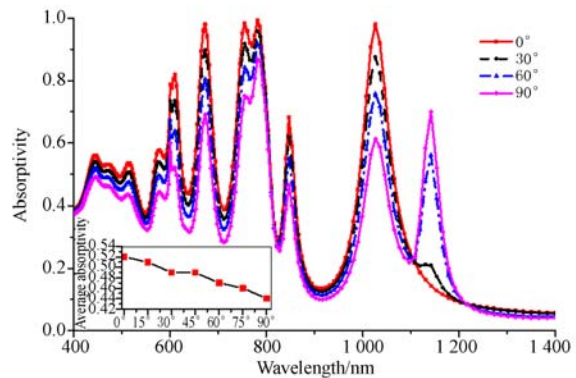
图 9(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段,银平板厚度  $h$  分别为 100、200、300、400、500 nm 时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。当  $h = 100$  nm 时,天线阵列的吸收波段主要集中在 400~900 nm;当  $h$  为 200 nm、300 nm 时,天线阵列的吸收率较低,但在高波段出现了吸收峰;当  $h = 400$  nm 时,在 400~760 nm、800~1 100 nm 波段都有较高的吸收率;当  $h = 500$  nm 时,天线阵列吸收率较高的波段主要集中在 700~1 100 nm,在 400~700 nm 波段,

天线阵列的吸收率较低。分析原因可知,改变银平板的厚度,就改变了天线的反射率和透射率。在相同频率处,银平板的反射率会随着厚度的增加而增加,而相同厚度的银平板的反射率会随着入射光频率的增加而减小;在相同的频率处,银平板的透射率随着平板厚度的增加而减小,并且越来越接近于零<sup>[21]</sup>。综合分析,当  $h = 400$  nm 时,天线阵列的吸收率分布更稳定,平均吸收率最高,吸收波段最宽。

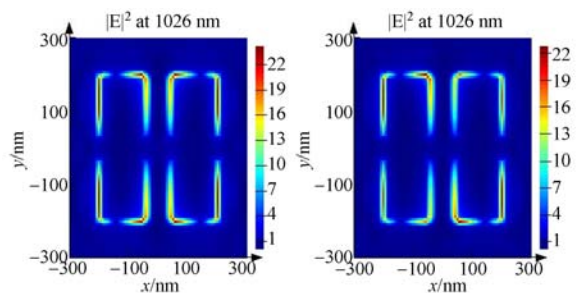
### 3.2.7 光波偏振和斜入射对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响

本小节分析光波偏振和斜入射分别对多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列吸收特性的影响。仿真中,光波偏振角度从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$ ,入射角度从  $0^\circ$  增加到  $60^\circ$ ,其它参数保持不变,分别计算分析各个光波偏振角度和入射角度天线阵列的吸收率。

图 10(a)(彩图见期刊电子版)表示在 400~1 400 nm 波段,入射光波偏振角度分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。可见,在 400~1 100 nm 波段,天线阵列的吸收率随着入射光波偏振角度的增加呈现下降的趋势,而在 1 100~1 400 nm 波段,天线阵列的



(a)



(b)

(c)

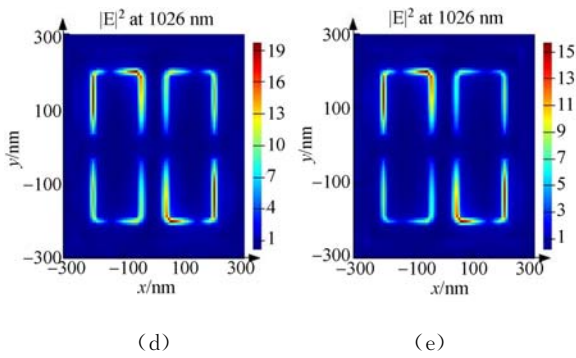


图 10 (a)不同偏振角度下多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率,(b)~(e)光波偏振角度分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列在波长 1026 nm 处天线上表面的电场强度分布  $|E|^2$

Fig. 10 (a) Absorptivity of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different polarization angles, (b)~(e) Electric-field intensity distribution  $|E|^2$  of the antenna top plane with band of 1026 nm polarization angle of the light wave is equal to 0, 45, 60, 90 degrees

吸收率随着入射光波偏振角度的增加而增加。随着入射光偏振角度的增加,平均吸收率有所下降。这是由于 U 形缝隙的存在,在不同方向上银平板的结构不同,导致银平板表面电子分布不同。因此,不同偏振角度的入射光波照射到银平板表面时,就会形成不同模式的 LSPs,而不同模式的 LSPs 对电磁波的束缚能力不同,使得天线表面的反射率发生改变,最终影响天线阵列的吸收特性。

图 10(b)~(e)表示光波偏振角度分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列在波长 1026 nm 处天线上表面的电场强度分布。由图可知,U 形缝隙处的电场强度明显高于其它部分的电场强度,即谐振点处的电场强度最高。入射光波偏振角度为  $0^\circ$  时,4 个 U 形缝隙的电场强度分布基本相同。随着入射光波偏振角度的增加,U 形缝隙的电场强度分布发生改变。其机理是入射偏振角度为  $0^\circ$  时,入射光波电场矢量  $E$  沿 X 轴方向振荡,银表面的自由电荷在 X 轴方向发生瞬时分离,从而产生沿 X 轴方向的表面等离子共振效应;入射光波偏振角度为  $90^\circ$  时,入射光波电场矢量  $E$  沿 Y 轴方向振荡,银表面的自由电荷在 Y 轴方向发生瞬时分离,从而产生沿 Y 轴方向的表面等离子共振效应;入射光波偏振角度

介于  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间时,在银表面会同时激发不同程度的 X、Y 方向振荡,产生两种表面等离子共振效应<sup>[22]</sup>。随着 U 形缝隙电场强度分布的改变,天线在 U 形缝隙处产生的谐振模式也随之改变。所以入射光波偏振会对天线阵列的吸收特性产生影响。

图 11(彩图见期刊电子版)表示在 400 ~ 1400 nm 波段,光波入射角度分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  时,多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率曲线。在 400 ~ 600 nm 波段,随着光波入射角度的增加,天线阵列的吸收率有所上升;在 600 ~ 900 nm 波段,天线阵列的吸收率随着光波入射角度的增加而下降。随着光波入射角度的增加,天线阵列的平均吸收率虽然有所下降,但是在入射角度 ( $\pm 60^\circ$ ) 下天线阵列的平均吸收率仍超过 45%。

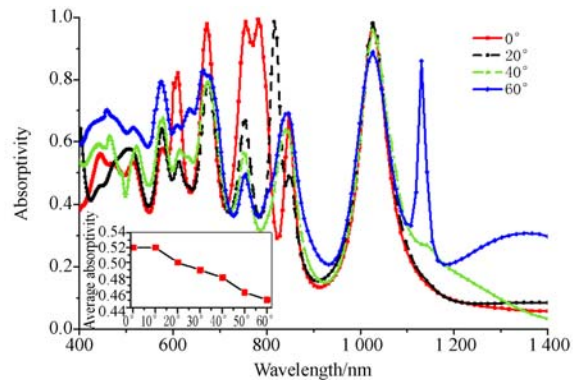


图 11 不同入射角度下多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收率

Fig. 11 Absorptivities of multi resonant U shaped slot nano-antenna array under different incident angles

## 4 结 论

本文提出一种耦合对称 U 形缝隙的多谐振纳米天线单元结构,采用 FDTD 方法研究了多谐振 U 形缝隙纳米天线阵列的吸收特性及物理参数对天线阵列吸收特性的影响。在银纳米板上刻蚀缝隙结构,使得金属的固有结构发生了改变。改变缝隙的长度或宽度,进而改变金属表面的自由电子分布形式、聚集在缝隙边缘的异性电荷的密度和电流走势;改变缝隙间距,会影响缝隙之间的相互耦合作用;改变银平板的厚度,会影响光的

穿透能力。因此,对上述参数的调节会使得天线上下表面形成不同强度的LSPs和相互耦合作用。LSPs和相互耦合作用又会影响天线的场强强度和分布,进而影响天线的吸收特性。所以选择适当的参数能改善天线的性能。仿真结果表明,天线在400 nm~1 400 nm波段具有较高的吸收率,高吸收率主要集中在400~870 nm,960~1 100 nm两个波段,出现多个吸收峰,吸收率最大可以达到99%,平均吸收率超过50%。

### 参考文献:

- [1] LI Y, SHI R. An intelligent solar energy-harvesting system for wireless sensor networks [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1):1-12.
- [2] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950):824.
- [3] 梁秋群. 金属纳米结构表面等离子体杂化和吸收特性的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.  
LIANG Q Q. *Study on plasmon hybridization and optical absorption properties of metallic nanostructures*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [4] 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.  
HUANG Q, WANG M, LI A, *et al.*. Symmetrical long range surface plasmon resonance sensing system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):44-49. (in Chinese)
- [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): 6215-21.
- [6] 熊尚, 罗雪丰, 韩立. 纯金膜表面等离子体增强的旋光效应[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1525-1531.  
XIONG SH, LUO X F, HAN L. Plasmon enhanced magneto-optical effect on surface of pure gold film [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1525-1531. (in Chinese)
- [7] 王冰, 金杰, 侯梓叶. 双蝶形金属纳米光天线的远场特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015(2): 183-188.
- 多谐振U形缝隙纳米天线能吸收可见光和红外波段的能量,降低了环境、地理因素和光照时间对天线吸收特性的影响。因此,多谐振U形缝隙纳米天线可以用于太阳能收集。这些结果为解决无线传感器网络能量受限和传统光伏电池限制问题提供了新的思路。由于在本文分析各个参数对天线吸收特性的影响时是单参数进行的,基于本文提出的多谐振U形缝隙纳米天线实验工作,仍需进一步深入研究。
- WANG B, JIN J, HOU Z Y. Far field characteristics of butterfly shaped metal nano optical antenna [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015(2): 183-188. (in Chinese)
- [8] 李宏光. 银纳米圆盘光天线的远场方向性研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(8): 977-981.  
LI H G. Far-field characteristics of silver nanodisk optical antenna [J]. *Guangzi Xuebao/acta Photonica Sinica*, 2012, 41(8): 977-981. (in Chinese)
- [9] EL-TOUKHY Y M, HUSSEIN M, HAMEED M F, *et al.*. Optimized tapered dipole nanoantenna as efficient energy harvester [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14):A1107-A1122.
- [10] PATEL S K, ARGYROPOULOS C. Plasmonic nanoantennas: enhancing light-matter interactions at the nanoscale [J]. *EPJ Appl. Metamat.*, 2015, 21(4):1-15.
- [11] 杨莹莹, 张永亮, 赵震声, 等. 双金属纳米天线在少周期激光中的宽带超快电磁响应[J]. *物理学报*, 2012, 61(1): 14207-014207.  
YANG Y Y, ZHANG Y L, ZHAO ZH SH, *et al.*. Broad-bandwidth and ultrafast electromagnetic response of coupled bimetal nanoantennas in few-cycle laser applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(1):014207. (in Chinese)
- [12] 郝爱文, 程龙, 李新, 等. 等臂L形银纳米天线的表面等离子体特性研究[J]. *电子科技*, 2014, 27(1): 74-77.  
HAO A W, CHENG L, LI X, *et al.*. Plasma surface characteristics investigation of the L-shaped silver nano-antenna with equal arms[J]. *Electronic Science and Technology*, 2014, 27(1): 74-77. (in Chinese)
- [13] ZARRABI F B. Sub wavelength plasmonic nano-antenna with H and U shape for enhancement of multi resonance [J]. *Optik - International Jour-*

- nal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(10): 4490-4494.
- [14] ZHANG J, ZHANG W, ZHU X, *et al.*. Resonant slot nanoantennas for surface plasmon radiation in optical frequency range [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(24):241115.
- [15] YANG J, ZHOU S, HU C, *et al.*. Broadband spin-controlled surface plasmon polariton launching and radiation via L-shaped optical slot nanoantennas[J]. *Laser & Photonics Review*, 2014, 8(4): 590-595.
- [16] 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.
- LI Y Q, GUO Y J, SU L, *et al.*. Polarization-dependent absorption of rectangular-block metamaterials in infrared region[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2998-3003. (in Chinese)
- [17] HU D, QI C, XIAO Y H E, *et al.*. Power combining technology in three-way terahertz photoconductive antenna[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(12):1500-1505.
- [18] IUZ Z, BOAG A. Wideband dual-vivaldi nano-antenna with high radiation efficiency over the infrared frequency band [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2773-2775.
- [19] VANDENBOSCH G A E, MA Z. Upper bounds for the solar energy harvesting efficiency of nanoantennas [J]. *Nano Energy*, 2012, 1(3): 494-502.
- [20] ONO M, KURAMOCHI E, ZHANG G, *et al.*. Nano wire-nanoantenna coupled system fabricated by nanomanipulation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8):8647-8659.
- [21] 王珩. 光学纳米天线设计及吸收增强特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- WANG H. *Design of optical nanoantennas and Their Optical Absorption Enhancement Properties* [D]. Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 邓燕. 入射光偏振对金纳米棒状颗粒光学性质的影响[J]. *量子电子学报*, 2010, 27(6): 732-736.
- DENG Y. Influence of polarization of light on optical properties of single gold nanorod[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(6): 732-736. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘媛媛 (1978—), 女, 江西永新人, 副教授, 硕士生导师, 2007 年于华东交通大学获得硕士学位, 主要从事能量收集、无线传感器网络, 数据聚合等方面的研究。E-mail: lyy.78@163.com



熊广 (1993—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 2015 年于江西理工大学获得学士学位, 现为华东交通大学硕士研究生, 主要研究方向为天线设计与算法优化。