

等离子激元增强金属-硅组合微结构近红外吸收

杨柳, 蒋世磊, 孙国斌, 杨鹏飞, 季雪淞, 张锦*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 亚波长光栅结构的光学表面具有减反特性, 这种特性在光电转换效率的应用方面具有重要意义。为了提高硅基光栅结构在近红外波段(0.78~2.50 μm)的吸收率, 采用在硅表面光栅空隙处加入金属 Ag 纳米颗粒和 Al_2O_3 介质层的方法, 利用 FDTD 软件仿真研究不同的组合结构及颗粒的直径对光吸收率的影响, 分析不同的工作波长下组合结构中特征截面的光强分布。实验结果表明, 当光栅线/间比为 1:1、周期为 1 μm 、周期凹槽内放置两层直径为 0.25 μm 的金属 Ag 颗粒、且凹槽内金属颗粒上方填充覆盖 Al_2O_3 介质层时, 该组合微结构在近红外波段范围内的平均吸收率理论上可达到 0.463, 实现吸收增强的效果。在光电转换器件的应用方面, 金属颗粒-硅光栅-介质层组合微结构可以增强光吸收, 进而提高光电转换效率。

关键词 表面光学; 光吸收增强; 近红外吸收; 金属-硅栅-匹配介质层组合结构; 表面等离子激元

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2124003

Plasmonic Enhanced Near-Infrared Absorption of Metal-Silicon Composite Microstructure

Yang Liu, Jiang Shilei, Sun Guobin, Yang Pengfei, Ji Xuesong, Zhang Jin*

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract The optical surface of sub-wavelength grating structures has anti-reflection characteristics, which are of great significance for the application of photoelectric conversion efficiency. In order to improve the absorptivity of silicon-based grating structures in the near-infrared band (0.78–2.50 μm), we add Ag nanoparticles and an Al_2O_3 dielectric layer to the gap of the silicon surface grating. Furthermore, the FDTD software is employed to investigate the influence of different composite structures and particle diameters on the light absorptivity and analyze the light intensity distribution of the characteristic section in the composite structure at different working wavelengths. The experimental results show that in the context of a line/space ratio of 1:1 and a period of 1 μm for the grating, as well as two-layer Ag particles (diameter of 0.25 μm) cover with an Al_2O_3 dielectric layer in the periodic groove, the average absorptivity of the composite microstructure in the near-infrared band can theoretically reach 0.463, achieving absorption enhancement. It follows that the metal-silicon grating-dielectric layer composite structure can enhance light absorption, in the application of photoelectric conversion devices, thereby improving photoelectric conversion efficiency.

Key words optics at surfaces; light absorption enhancement; near-infrared absorption; metal-silicon grating-dielectric layer composite structure; surface plasmon polaritons

OCIS codes 240.6680; 040.5160; 260.2110

1 引 言

硅材料具有储量丰富、成本较低和光学性能优异的优点, 而且随着微电子工艺技术的发展, 硅基器件具有制造工艺成熟、结构简单和抗环境干扰能力

强等众多非硅基器件无法比拟的优点, 并广泛应用于光伏电池、光通信和光电探测等领域。微光学结构既可以灵活地设计其结构参数以实现任意大小的等效折射率, 又可以在基底材料表面直接蚀刻光栅, 且制作过程简单, 故硅基光栅结构可以实现抗反射、

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-06-24; 录用日期: 2020-07-17

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)、陕西省科技厅重点实验室项目(2013SZS14-P01)、西安工业大学基金(XAGDXJ15001)、西安工业大学光电学院基金(15GDYJY03)

* E-mail: zhangjin@xatu.edu.cn

偏振分光和相位延迟等功能。研究设计发现,基于二维硅基光栅微结构在可见光波段可以通过改变周期、占空比和高度等结构参数来实现抗反射的功能,从而实现了 90% 以上的光吸收。但是在近红外波段,由于硅材料本身的固有属性,使其对光的吸收率极低,这限制了硅基光栅结构在近红外波段的应用,因此如何提升二维硅基光栅微结构对近红外波段的光吸收是很有必要的。为了提高光能利用率,专业研究人员提出了表面等离子激元(SPPs)结构、双光子吸收和陷阱辅助光吸收等方法。其中基于 SPPs 的硅基结构在光电探测领域有着重要的意义,如覆盖金膜的周期性腔体结构^[1]、覆盖金膜的硅基纳米线阵列结构^[2]和光栅型金属-半导体-金属^[3]等结构被应用在可见光波段,可以实现光电探测器结构的优化。在红外探测器方面,硅基金属微纳结构^[4]在 1.2~2.5 μm 波段内实现了超宽带的吸收效果;金属-绝缘体-金属夹层(MIM)式的宽带红外超表面吸收器^[5]在 6.3~14.8 μm 波段内的平均吸收率超过 90%;布拉格光栅/石墨烯/金属薄膜光学结构^[6]实现了高性能的石墨烯探测器。综上所述,通过各种夹层式的复合金属结构可以实现不同波长范围内的吸收效果。在光伏电池方面,不同研究者引入了金或银纳米颗粒^[7]、合成金四面体形状的纳米粒子^[8]、级联型金属光栅结构^[9]、Ag 纳米粒子阵列结构-硅基底-Ag 反射膜^[10]、双层 Ag 栅条微纳结构^[11]和锥状 GaAs 纳米线阵列^[12]等来提高太阳能电池的光电转换效率。以上结果表明,在不同结构中的金属粒子可以通过共振效应来达到增加吸收率的目的,然而鲜有报道二维硅基矩形光栅结构如何在宽波段近红外区域增加吸收率的研究。

针对二维硅基光栅微结构具有近红外光吸收率极低的特点,本文提出一种金属颗粒-硅光栅-介质的组合结构。该结构由硅基光栅微结构和金属 Ag 纳米颗粒以及 Al₂O₃ 介质组合而成,通过自由设计光栅的结构参数来确定硅栅的周期结构和金属纳米颗粒的大小,通过折射率匹配材料来减少光的反射损失,利用 SPPs 效应可以灵活并有针对性地制备具体结构,从而获得所需的工作特性,为在硅光栅红外器件方面的研究和发展提供一种新方法。采用基于电磁场麦克斯韦方程的时域有限差分法(FDTD)对该组合微结构在近红外波段的吸收情况进行计算和分析,给出能够有效增加光吸收率的结构参数的理论计算结果。

2 基本原理

2.1 金属纳米颗粒的等离子激元理论

在某些特殊的条件下,当特定波长的光入射到金属与介质的界面处时,电磁波与金属表面的自由电子相互作用所引起的一种电磁模式即为 SPPs。根据 SPPs 色散关系的研究,SPPs 的波矢总是大于入射光,因此入射光不能直接激发 SPPs,只有当入射光的波矢与 SPPs 相匹配时才能实现。目前,SPPs 的激发可以通过多种方式来实现,比如常见的棱镜耦合、光栅耦合、针尖耦合、缺陷散射耦合、近场激发和强聚焦光束激发等。

图 1 为所提的硅光栅结构。考虑到光栅耦合的方式,实现 SPPs 激发的条件是在金属-介质表面引入周期性起伏的光栅结构,可以解决 SPPs 的传播常数与光在介质中的传播常数不匹配的问题,从而实现波矢的匹配。现考虑最简单的一维光栅,如图 2 所示,设光栅常数为 a ,则满足波矢匹配的条件^[4]

$$\beta(k_{\text{SPPs}}) = k \sin \theta \pm 2\pi n/a, \quad (1)$$

即可激发 SPPs。式中: $\beta(k_{\text{SPPs}})$ 为 SPPs 的传播常数; θ 为入射光的入射角; k 为入射光的波矢大小,则平行于交界面的波矢分量为 $k \sin \theta$; $n = 1, 2, 3, \dots$ 。若此结构的反射光出现消光现象,则说明成功

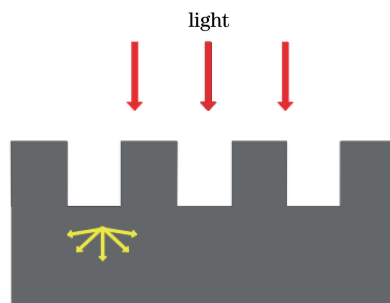


图 1 光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic of grating structure

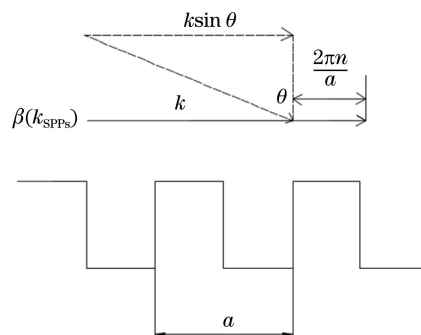


图 2 光栅结构激发 SPPs 示意图

Fig. 2 Schematic of grating structure excited SPPs

激发了 SPPs。

2.2 设计模型

增强吸收型微结构是在硅柱上方以一定厚度的介质 Al_2O_3 覆盖金属纳米颗粒。图 3(a) 为实验设计的硅光栅-金属颗粒-介质层的三维结构, 该结构由上向下依次为 Al_2O_3 介质层、Si 光栅结构(柱高为 H_2)、Ag 纳米颗粒(直径为 D) 和 Si 基底, 取图 3(a) 中的一个周期性单元来建立三维数值模型, 该模型在 x - z 平面内的截面如图 3(b) 所示。仿真模拟过程中, 在垂直于入射光传播方向的 x 轴和 y 轴上应用周期(periodic)边界条件, 沿入射光传播方向(z 轴负方向)应用完全匹配层(PML)边界条件, 该匹配层具有波阻抗与相邻介质完全匹配的特点。当运用麦克斯韦方程计算光的传播过程时, 入射波在计算区域的边界(非实体边界)可以无反射地进入该区域。

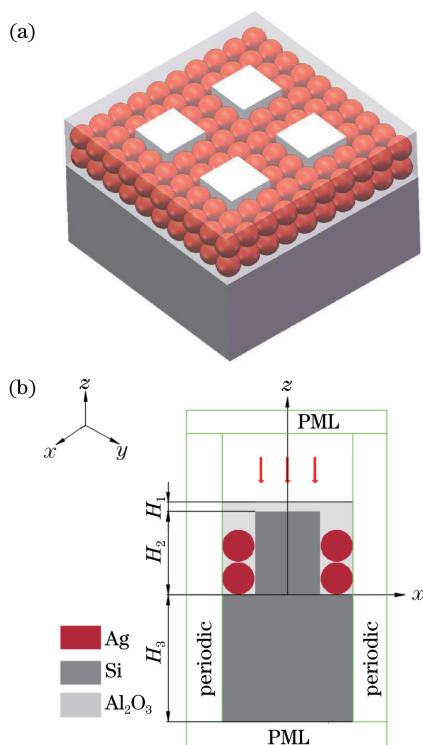


图 3 表面组合结构示意图。(a) 硅光栅-金属颗粒-介质层的三维结构; (b) 数值模拟结构

Fig. 3 Schematic of surface combination structure.

(a) Three-dimensional structure of silicon grating-metal particles-dielectric layer; (b) numerical simulation structure

在硅基光栅结构中加入 Ag 纳米颗粒和 Al_2O_3 , 其中将介质 Al_2O_3 作为折射率匹配材料, 目的是减少光的反射损失。如果材料的折射率不匹配会导致大量的光在界面处被反射, 如果折射率匹配

会使反射损失降低。将 Ag 纳米颗粒加入硅柱的间隙中, 可以起到增强光吸收的作用, 从而进一步提高器件的光捕获能力。将 Ag 纳米颗粒和 Al_2O_3 集成在同一个结构单元中, 在折射率匹配的前提下, 使表面产生等离激元增强效应。通过改变表面组合结构中金属颗粒的尺寸和排布方式等参数, 可以改变光传播特性, 进而实现入射光波和 SPPs 波的强烈耦合, 提高光吸收能力。

3 分析与讨论

该组合微结构采用平面波垂直入射的方式, 使用 FDTD 软件计算整个空间域内的电磁场信息, 可以得到反射率(R)和透射率(T), 吸收率(A)则通过 $A=1-R-T$ 来计算。为了满足计算精度且减少计算时间, 选取包含组合光栅结构在内的有限计算范围, 则介质层上方的介质层高度 $H_1=0.1\ \mu\text{m}$, 光栅下方硅基底的厚度 H_3 为 $2.0\ \mu\text{m}$ 。为了实现结果的精确性, 检查并修改金属颗粒 Ag、硅和 Al_2O_3 的拟合特性, 使数据点和模拟曲线达到最好的匹配状态。

利用 FDTD 软件来模拟计算未加光栅时平整硅材料的吸收率, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看到, 在可见光波段, 材料的吸收率在 0.2 以上; 在近红外波段, 吸收率下降迅速; 波长大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 后, 吸收率几乎可以忽略不计; 入射光除了在硅表面被反射以外, 其余的大部分光全部透射, 光能利用率约为 0。由于硅材料的折射率与空气差异较大, 根据菲涅耳公式以及模拟结果可知约有 30% 的入射光被反射。与光学材料手册中硅的光谱曲线^[13]相比, 在波长为 $1.2\ \mu\text{m}$ 处有些许差异, 但与近红外波段范围内的透射率和反射率变化趋势相同。图 5 为在近红外波段范围内平整硅材料的吸收率 A_1 、反射率 R_1 及透射率 T_1 与加入光栅结构后的吸收率 A_2 、反射率 R_2 及透射率 T_2 。从图 5 可以看到, 加入硅微结构可以实现抗反射, 但是吸收率仍然接近于 0, 反而整个结构的透射率被大大提高, 此时减少反射率并未提高结构的吸收率, 而实验的主要目标是增强吸收率, 故对硅栅结构进行改进, 加入金属颗粒和折射率匹配材料, 可以实现组合微结构的吸收率增强。

考虑到不同的组合微结构对光能吸收的影响, 分别计算模拟三种情况: ①硅基光栅凹槽中仅加入一层 Ag 颗粒且不添加其他折射率匹配材料; ②硅基光栅凹槽中加入一层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质; ③硅基光栅凹槽中加入两层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质。假设将入射光的总能

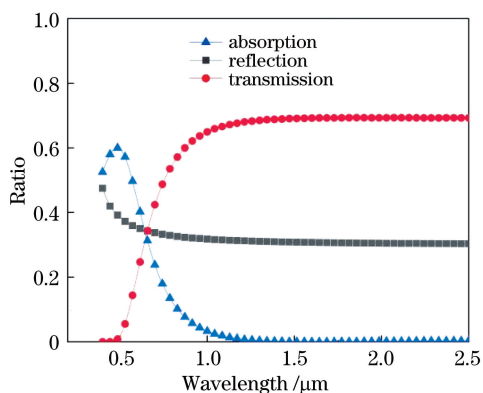


图 4 未加光栅的光谱特性

Fig. 4 Spectral characteristics without grating

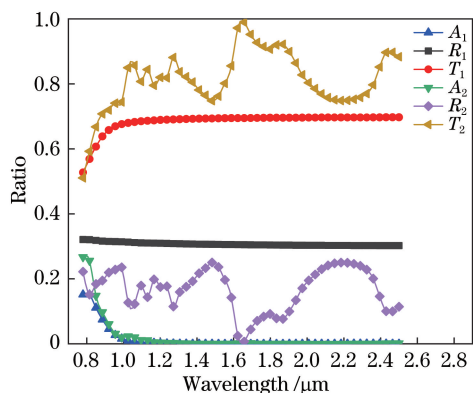


图 5 加入光栅的光谱特性

Fig. 5 Spectral characteristics with grating

量归一化为 1, 当 Ag 颗粒的直径为 $0.25 \mu\text{m}$ 、光栅线/间比为 1:1(光栅硅柱宽与光栅间隙宽的比)、周期为 $1 \mu\text{m}$ 、光栅柱高 $H_2 = 1.0 \mu\text{m}$ 、光栅上方的介质层高度 $H_1 = 0.1 \mu\text{m}$ 且光栅下方的基底厚度 $|H_3| = 2.0 \mu\text{m}$ 时, 上述三种不同的组合结构随着波长变化的吸收率, 如图 6 所示。三种不同的组合微结构在 $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 波长范围内的平均吸收率, 如图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看到, 硅柱的间隙中加入 Ag 纳米颗粒, 在 $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 波段范围内的平均吸收率可以提高到 0.190, 在原本吸收率极低的波长范围($1.40 \sim 2.50 \mu\text{m}$)内, 组合微结构的吸收率均达到 0.055 以上; 在硅基光栅凹槽中加入一层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质, 与仅加入一层 Ag 颗粒不添加其他折射率匹配材料相比, 其吸收效果大幅度增加, 在 $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 波段范围内的平均吸收率理论上可提高到 0.408, 这说明组合结构的光学吸收特性受到折射率匹配材料和金属纳米颗粒共同的影响; 硅基光栅凹槽中加入两层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质, 在 $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 波段范围内的平均吸收率可进一步提高到

0.463 , 比加入一层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质的光能吸收效果更好。与未加光栅硅材料相比, 组合微结构加入两层 Ag 颗粒并在表面覆盖 Al_2O_3 介质在 $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 的波段范围内, 可以实现增强吸收率的良好效果。之所以产生这种现象的原因, 一是加入折射率适中的介质使得折射率匹配, 从而减少光的反射损失, 同时将 Ag 纳米颗粒加入硅柱的间隙中, 借助 SPPs 模式对入射光场的局域增强作用, 使得入射的电磁波能量局域在硅柱间隙中的金属粒子附近, 这有利于硅微结构对光的吸收。

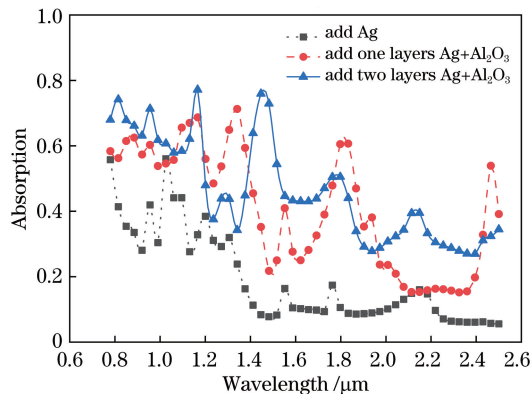


图 6 不同组合结构随波长变化的吸收率

Fig. 6 Absorption rate of different combined structures with wavelength

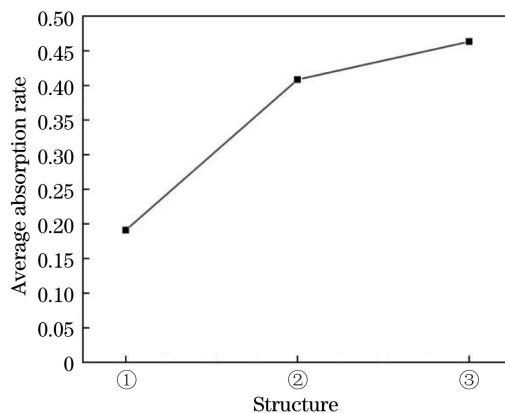


图 7 不同组合结构的平均吸收率

Fig. 7 Average absorption rate of different combination structures

金属纳米颗粒的尺寸会对光吸收特性产生一定的影响, 考虑到目前加工的问题, 计算组合结构中纳米颗粒的直径分别为 $0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 \mu\text{m}$ 的吸收情况, 如图 8 所示。从图 8 可以看到, 当光栅上方的介质层高度 $H_1 = 0.1 \mu\text{m}$, 光栅柱高 H_2 为 $1 \mu\text{m}$, 光栅线/间比为 1:1 时, 硅柱间隙尺寸随着内嵌金属颗粒所需尺寸的变化而变化; 当在光栅凹槽中加入两层且每层含有两个 Ag 颗粒, 并

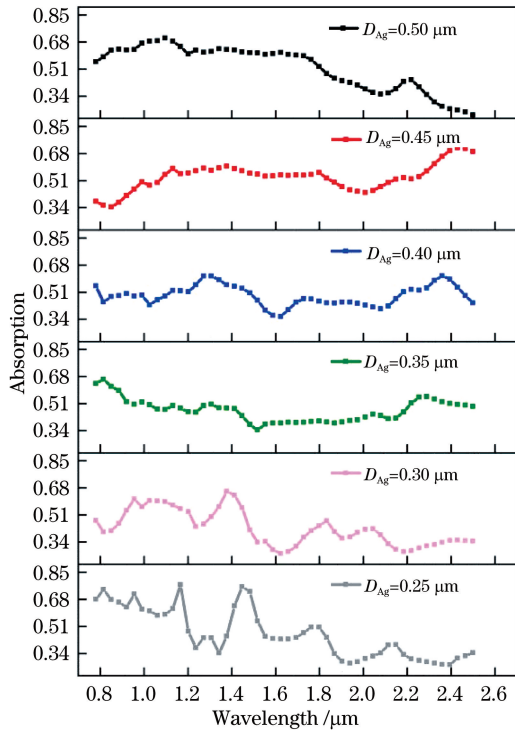


图 8 纳米颗粒的直径对吸收率的影响

Fig. 8 Effect of nanoparticle diameter on absorption rate in surface covered Al_2O_3 medium, the absorption rate of the combined grating structure changes with the change of wavelength. No matter how the diameter of the particles changes, the absorption rate is more than 0.22 in the wavelength range of $0.78 \sim 2.50 \mu\text{m}$, compared with the silicon material without the grating structure.

现吸收增强的效果,当颗粒的直径为 $0.25 \mu\text{m}$ 时,产生的增强吸收效果最明显。在 $1.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的波段范围内,平均吸收率为 0.398,最高吸收率可达到 0.759,最低为 0.269。关于硅柱的高度,通过仿真计算可知,硅柱高度的变化对吸收率的影响较小。在一定范围内,随着硅柱高度的增加,吸收率略微增加,而这种微小变化对整个组合微结构来说可以忽略不计。

图 9 为不同波长的光正入射进入该组合微结构后,在 $x-z$ 截面的光强能量分布。从图 9 可以看到,该组合微结构形成一个较强的局域化场,其是由周期性的微纳结构与金属纳米颗粒组成系统激发电磁模式引起的。当 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$ 时,光强度在 Ag 纳米颗粒和硅柱中都有所增强,这是由纳米颗粒与光栅界面处激发 SPPs 效应引起的,近场区域的光强度沿着入射光波的传播方向逐渐增强,但是当光波经过光栅结构继续向硅基底传播时,表现出倏逝场的一般特征,即呈指数形式衰减,如图 9(a) 所示。当 $\lambda = 1.00 \mu\text{m}$ 时,光场的吸收位置与图 9(a) 相比,较集中在组合微结构的硅柱内,硅柱外光强度变弱,如图 9(b) 所示。从图 9(c) 和图 9(d) 的光强度分布可以看到,由于 SPPs 效应的激发会引起光强集中区域变大,但是光强随着波长的增加逐渐减弱。总之,采用金属-硅栅组合微结构在近红外波段范围($0.78 \sim$

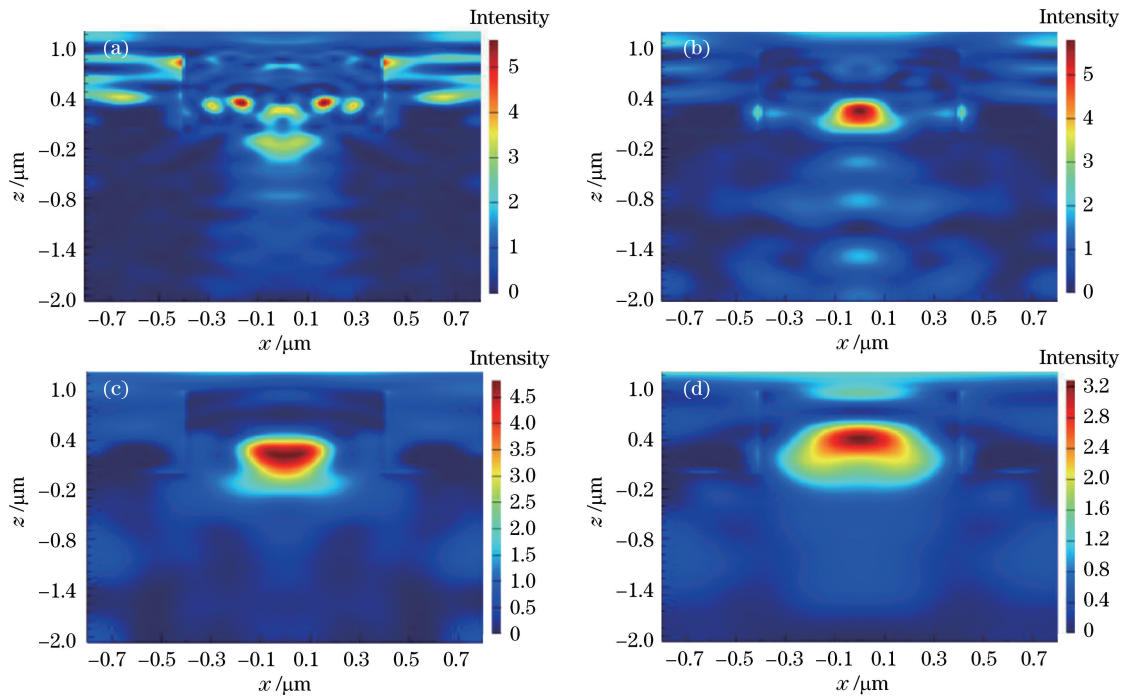


图 9 不同波长的光在组合微结构 $x-z$ 截面内的光强分布。(a) $0.78 \mu\text{m}$; (b) $1.00 \mu\text{m}$; (c) $1.44 \mu\text{m}$; (d) $2.50 \mu\text{m}$

Fig. 9 Light intensity distribution of different wavelengths of light in $x-z$ section of combined microstructure.

(a) $0.78 \mu\text{m}$; (b) $1.00 \mu\text{m}$; (c) $1.44 \mu\text{m}$; (d) $2.50 \mu\text{m}$

1.50 μm)内,由于激发 SPPs 可以有效地将入射光束束缚在组合结构的内部,减少透射光的传播从而达到增强吸收率的目的。

通过对比模拟数据可知,两层金属小球的平均吸收率相比一层提高了 5.5%,若选择一层金属颗粒,在 0.78~2.50 μm 波段范围内的平均吸收率达 0.408,能够实现明显的吸收增强效果,而图 3 的两层颗粒结构是上述三种组合形式中吸收率最好的一种情况。考虑到加工的可行性,给出一层金属颗粒并覆盖介质层的实验加工方法。首先采用反应离子刻蚀的方法制备硅光栅阵列结构,在此过程中,可以通过控制工艺参数在硅样品内部适量掺杂其他元素(如 S 元素)^[14],这有助于提高硅材料对红外光的吸收。然后加入金属颗粒,对于一层金属纳米颗粒的结构形式,可以采用两种实验加工方案:一种是在硅光栅结构的表面上镀 Ag 膜,采用高温退火^[4]的方法制备 Ag 纳米粒子;另一种是采用化学试剂还原法制备 Ag 纳米粒子,再利用自组装的方法^[15]实现对金属 Ag 纳米粒子组装形貌的精准调控。最后利用电子束蒸发和磁控溅射等方式将介质均匀沉积在微结构的表面上。

4 结 论

提出一种基于硅光栅-金属 Ag 纳米颗粒- Al_2O_3 介质层的组合微结构。在硅栅凹槽中加入 Ag 纳米颗粒并填充覆盖 Al_2O_3 介质层,可以提高在近红外波段的吸收率。当光栅周期为 1 μm 、柱高 H_2 为 1 μm 、光栅线/间比为 1:1、光栅凹槽内填充两层直径为 0.25 μm 的金属 Ag 纳米颗粒并覆盖 Al_2O_3 介质层时,组合微结构在该波段范围内的平均吸收率可达到 0.463。由组合结构纵向截面内的光强分布可以看到,一部分光能量被局限于硅基组合结构的内部,可以有效减少透过损失。考虑到实验加工的可行性,选择只有一层金属颗粒的形式,在 0.78~2.50 μm 的波段范围内,单层金属-硅栅-介质组合微结构的平均吸收率达到 0.408,可以实现吸收增强的效果。该结构具有的良好吸收性能主要取决于硅栅间隙中嵌入的金属纳米颗粒和介质层,在波矢与频率相匹配的前提下,由于 SPPs 效应的激发,最终使组合微结构在近红外波段可以减少反射损耗及透过损失,则吸收率得到显著提高,有利于扩大硅栅组合微结构在近红外波段的应用范围,为在光伏电池和红外探测等领域提高光能利用率提供一种新方法。

参 考 文 献

- [1] Yang Z, Liu M, Liang S H, et al. Hybrid modes in plasmonic cavity array for enhanced hot-electron photodetection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20268-20273.
- [2] Qin L L, Zhang C, Li R F, et al. Silicon-gold core-shell nanowire array for an optically and electrically characterized refractive index sensor based on plasmonic resonance and Schottky junction[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1225-1228.
- [3] Qiao J, Xie S, Mao L H, et al. Optimum design of silicon-based metal-semiconductor-metal photodetector with subwavelength metal grating[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(3): 363-368.
乔静, 谢生, 毛陆虹, 等. 吸收增强的光栅型金属-半导体-金属光电探测器的优化设计[J]. *发光学报*, 2018, 39(3): 363-368.
- [4] Liu X Y. Investigations on infrared optical characteristics of silicon-based material based upon surface plasmon[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
刘小翼. 基于表面等离激元的硅基微结构材料红外光学特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [5] Luo Y. The research of design of long wavelength infrared metasurface absorber based on sandwich structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
罗奕. 基于夹层结构的长波红外超表面吸收器设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [6] Li Z W, Lu H, Li Y W, et al. Near-infrared light absorption enhancement in graphene induced by the Tamm state in optical thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0131001.
黎志文, 陆华, 李扬武, 等. 光学薄膜塔姆态诱导石墨烯近红外光吸收增强[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0131001.
- [7] Cheng P P. Metal nanoparticles induced surface plasmon enhancement on polymer solar cells[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.
程盼盼. 基于金属纳米颗粒调控的表面等离子增强有机太阳能电池研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [8] Li X, Wang L, Xiong J Q, et al. Enhanced light absorption and device performances of organic photovoltaic devices with Au tetrahedra nanoparticles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(24): 247201.
李雪, 王亮, 熊建桥, 等. 金纳米四面体增强有机太阳能电池光吸收及光伏性能研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(24): 247201.
- [9] Wang D, Liu X, Yang Y B, et al. Broadband absorption enhancement of organic solar cells based on cascaded

- metallic gratings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2019, 30(6): 580-587.
- 王丹, 刘欣, 杨毅彪, 等. 基于级联金属光栅结构的有机太阳能电池宽谱吸收增强[J]. *光电子 • 激光*, 2019, 30(6): 580-587.
- [10] Jiang X, Su W A, Yin C. Enhancement of absorption of solar cells by plasmon resonance based on Ag nanoparticle[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(1): 20-26, 69.
- 蒋旭, 苏未安, 殷超. Ag 纳米粒子等离子体共振增强太阳能电池吸收[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(1): 20-26, 69.
- [11] Wang Y Y. Silicon based thin film solar cells' interface micro and nano structure design and optoelectrical performance analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- 汪园园. 硅基薄膜太阳能电池界面微纳结构设计及光电性能分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [12] Wang S J, Zhang C, Yan X, et al. Research on the photovoltaic performance of the tapered GaAs nanowire array solar cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s222004.
- 王思佳, 张辰, 颜鑫, 等. 锥状 GaAs 纳米线阵列太阳能电池的光伏特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s222004.
- [13] Wakaki M, Kudo K, Shibuya T. Physical properties and data of optical materials[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 339-344.
- Wakaki M, Kudo K, Shibuya T. 光学材料手册[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2010: 339-343.
- [14] Wang Y C. Microstructure silicon-based near-infrared materials and its optics, photoelectric characteristics research [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- 王延超. 微结构硅基近红外材料及其光电特性研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [15] Qin Y. Theoretical study on the structure and formation mechanism of interfacial molecular self-assembly[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- 秦圆. 界面分子自组装结构和形成机制的理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.