

# 激光与光电子学进展

## 用于 1550 nm 吸收增强的微纳阵列 复合结构设计

季雪淞, 张锦\*, 杨鹏飞, 孙国斌, 蒋世磊, 杨柳

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 为了增强通信系统中光电探测器件对波长为 1550 nm 的光的吸收, 提出一种包含硅栅、纳米银球和缓冲层的微纳复合结构。借助金属表面等离子激元共振局域场增强效应, 以及硅栅的陷光效应和耦合作用, 可以提高复合微纳阵列结构对光的吸收。利用时域有限差分法计算仿真光经过填充银纳米球和氧化铝的硅栅复合微结构阵列后的光场分布, 分析硅柱阵列占空比、硅柱边长、高度以及填充物等对吸收性能的影响。仿真结果表明, 当硅栅等线或等间隔、硅柱边长为 800~1000 nm、硅柱间隙内填充纳米银球的直径为间隙宽度的一半且铺满间隙底部并覆盖氧化铝时, 复合结构的吸收率随着硅柱阵列周期和柱高的不同能够达到 0.2288~0.5753, 对波长为 1550 nm 的近红外光具有显著增强吸收的作用。

**关键词** 光栅; 近红外吸收; 表面等离子激元共振; 场增强; 金属-硅栅复合微结构

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0705001

## Design of Composite Micro-Nanoscale Array Structure for 1550 nm Absorption Enhancement

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

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

**Abstract** To enhance the absorption of light using a wavelength of 1550 nm using a photodetector device in a communication system, we propose a composite micro-nanoscale structure including a silicon grid, nanoscale silver balls, and a buffer layer. The light absorption of the composite micro-nano array can be improved by means of the local field enhancement effect of surface plasmon resonance on metal and the trapping effect and coupling effect of silicon gate. The finite difference time domain method is used to calculate the light field distribution of the simulated light passing through the silicon grid composite micro-structure array filled with silver nanospheres and alumina. Then, the effect of the silicon column array duty ratio, the silicon column side length, the silicon column height and the filler on the absorption performance are analyzed. The simulation results show that when the silicon gate line or interval, silicon column length is 800–1000 nm, the diameter of the silicon column gap filling nanometer arguably is half of gap width and covered with clearance and covered in alumina, at the bottom of the composite structure of the absorption rate with high silica column array cycle and the column of different can reach 0.2288–0.5753, the near-infrared wavelength of 1550 nm have significantly enhanced absorption effects.

**Key words** gratings; near infrared absorption; surface plasmon resonance; field enhancement; metal silicon gate composite microstructure

**OCIS codes** 050.6624; 240.6680; 260.2110

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-05; 录用日期: 2020-09-08

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(XAGDXJJ15001)、西安工业大学光电工程学院基金(15GDYJY03)

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

## 1 引言

光电探测器是光通信系统的重要器件之一,该器件需要高效且快速地接收光纤传输的光信号并将其转换为电信号,这是实现光电信息转换的重要环节之一。光通信系统中,波长为 1550 nm 的近红外波因自身具有低损耗特性,成为光通信系统中重要的传输窗口之一。硅材料凭借其特有的光电属性被广泛应用在光电探测器中,但本征硅是一种间接带隙半导体材料,并且在近红外波段具有高穿透性,使其对近红外入射光的吸收几乎为零,这极大地限制了硅材料在近红外光电探测领域的应用。因此,增强硅材料对波长为 1550 nm 的近红外光的吸收是光通信领域亟需解决的问题之一。

为了解决硅材料对近红外光的吸收问题,新方法和新技术不断涌现。科研人员多采用真空镀膜、溅射和沉积法在基底的表面上制备金银薄膜<sup>[1]</sup>,或采用化学腐蚀的方法在表面上制备 V 型槽和金字塔状等绒面结构来增强对光的吸收,为此近年来许多人工超材料和新型光学功能结构得到迅速发展。在基底的表面上制备微纳结构来改变光的传播特性以此来增加光吸收,成为近十年来的发展趋势之一<sup>[2-3]</sup>。由于增强红外吸收的现象存在于贵金属、过渡金属和半导体材料中,以及具有透射、衰减全反射、外反射和漫反射等多种红外光谱模式的多种微纳结构中<sup>[4]</sup>,因此各种组合结构不断涌现,如沉积双层金膜的纳米阵列结构<sup>[5]</sup>、覆盖随机分布的金属纳米颗粒的黑硅结构<sup>[6]</sup>、锥状纳米线阵列结构<sup>[7]</sup>、亚波长金属狭缝凹槽结构<sup>[8]</sup>、布拉格光栅-石墨烯-金属薄膜光学结构<sup>[9]</sup>和金属-半导体-金属亚波长光栅结构<sup>[10]</sup>等。通过将薄膜和微纳结构结合,或者利用金属表面等离子激元共振局域场增强效应,可以有效提高了材料的吸收性能,从而提高探测器件的光电转换效率,但近红外探测器的响应度低,制备成本高,仍是目前存在的问题。

硅材料对波长 1550 nm 的近红外光具有高透过和低吸收的特性,这是制约工作波长为 1550 nm 的光电探测器件光电转换效率的主要原因之一。为增强对波长 1550 nm 的近红外光的吸收,本文研究一种由硅栅、纳米银球和折射率匹配介质层组成的微纳阵列复合结构。由于该复合结构属于微纳质量级结构,则量衍射理论的近似条件不再适用。鉴于此,本文采用基于麦克斯韦方程求解电磁场的

数值计算方法,即时域有限差分(FDTD)法讨论分析阵列结构的周期、占空比、高度以及银纳米球直径等不同参数对微纳结构吸收性能的影响,为微纳阵列复合结构的设计与制作提供一种参考。

## 2 理论模型

### 2.1 结构模型

微纳阵列复合结构包括硅基底、微纳硅柱阵列以及在硅柱间隙中的填充物,填充物由银纳米球和覆盖于其上的介质缓冲层组成,其中介质缓冲层用于实现折射率匹配。当光入射到微纳结构的表面时,部分光会在微纳结构中相邻的硅柱间发生多次反射,这可以进一步延长光的传播路径,从而增加结构对光的吸收。由于金属纳米球的填充,在金属表面发生等离子激元共振局域场增强效应,从而有利于提高复合结构对光的吸收。图 1 为微纳阵列复合结构,设坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴分别沿着二维阵列结构的周期性变化方向, $z$  轴沿着柱高方向,其中微纳结构阵列中硅柱的边长为  $L$ ,硅柱之间的间隙为  $G$ ,占空比  $f=L/(L+G)$ ,硅柱高度为  $H$ ,银纳米球的直径为  $D$ ,入射光为 1550 nm 波长的平面波。图 2 为金属纳米球的等离子体振荡原理<sup>[11]</sup>。

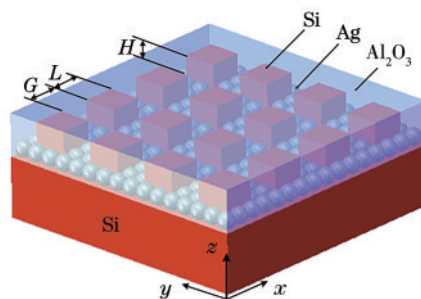


图 1 单晶硅的微纳阵列复合结构

Fig. 1 Micronano array composite structure of monocrystalline silicon

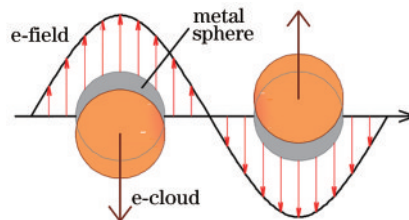


图 2 金属纳米球的等离子激元振荡原理<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Plasma plasmon oscillation principle of metal nanospheres<sup>[11]</sup>

当微纳结构的尺寸小于入射光的波长时,金属银纳米球表面的自由电子在入射光的作用下会发

生集体振荡,从而产生表面等离子体;当入射光的频率与自由电荷集体振荡的频率相同时,就会产生共振,则局域在金属表面的电磁场得到增强<sup>[6]</sup>。当入射光垂直入射到微纳阵列复合结构的表面时,若在金属银球的表面产生金属表面等离子激发,必须采用适当的波矢匹配方式,为此采用光栅耦合的方式来达到一定的波矢匹配的目的,则入射场的波矢匹配的条件需满足<sup>[12]</sup>

$$k_g = 2\pi f_0 \sin \theta / c \pm 2\pi\eta / p = 2\pi \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)} / [\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)] / \lambda, \quad (1)$$

式中: $k_g$ 为表面等离子激元的波矢; $p$ 为微结构硅栅的周期; $f_0$ 为共振频率; $\eta$ 为整数,取 $1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ 分别为光栅和材料银的介电常数; $\lambda$ 为入射光的波长; $c$ 为光在真空中的传播速度; $\theta$ 为光的入射角; $\omega$ 为入射光的角频率。当入射光垂直于微纳阵列复合结构的表面入射时,即 $\theta=0^\circ$ ,则(1)式可简化为

$$k_g = 2\pi\eta / p. \quad (2)$$

金属等离子激元在宏观上具有散射和吸收特性,散射系数和吸收系数分别为 $C_{sca}$ 和 $C_{abs}$ <sup>[13]</sup>,表达式为

$$C_{sca} = \frac{k^4}{6\pi} |\alpha|^2 = \frac{8\pi}{3} k^4 a^6 \left| \frac{\epsilon_d - \epsilon_m}{\epsilon_d + 2\epsilon_m} \right|^2, \quad (3)$$

$$C_{abs} = k \text{Im}(\alpha) = 4\pi k a^3 \text{Im} \left( \frac{\epsilon_d - \epsilon_m}{\epsilon_d + 2\epsilon_m} \right), \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 为极化率; $\epsilon_d$ 和 $\epsilon_m$ 分别为金属和金属周围介质的介电系数; $k$ 为波数, $k=2\pi/\lambda$ ;  $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚部; $a$ 为金属纳米颗粒的半径。当金属纳米颗粒的半径 $a$ 远小于波长时,吸收率将会远大于散射率,因此可以通过调整金属银纳米球的参数来改变金属等离子激元共振的频率,进而改变组合结构的光吸收,从而提高吸收率。

## 2.2 FDTD 法

采用FDTD法对微纳阵列复合结构的吸收特性进行研究,该方法将空间和时间网格化,其核心Yee元胞网络模型如图3所示。对麦克斯韦方程组进行二阶差分求解,在直角坐标系中可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_e E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_e E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma_e E_z \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma_m H_z \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $E_x$ 、 $E_y$ 和 $E_z$ 分别为电场强度的三个分量; $H_x$ 、 $H_y$ 和 $H_z$ 分别为磁场强度的三个分量; $\epsilon$ 为相对介电常数; $\sigma_e$ 为等效磁阻率; $\sigma$ 为电导率; $t$ 为时刻。给定电磁场的初始值和边界条件,便能够逐步得到各个时刻空间各点的电磁场<sup>[14]</sup>。

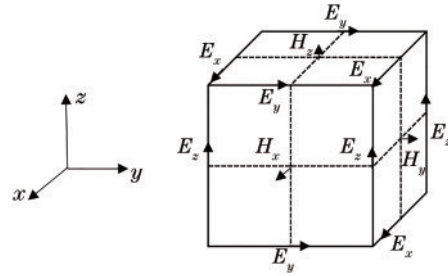


图3 Yee元胞网络模型

Fig. 3 Yee cellular network model

当仿真计算时,考虑到阵列结构所具有的周期性,为减少运算时间,以及避免因限制计算区域而人为引入虚拟边界,采用FDTD法来计算仿真结构的单个单元区域。将垂直于入射光的传播方向的平面( $x$ 轴和 $y$ 轴方向)设为周期性边界条件(PBC),将平行于入射光的传播方向的平面( $z$ 轴方向)设为完美匹配层(PML)吸收边界条件。在微纳结构上方的入射光源设为平面波且垂直入射,光源的上方区域放置反射监视器,用来获得复合微纳结构的反射率。在微纳结构的下方放置透射监视器,用来获得复合微纳结构的透过率。在平行于光振动方向的 $x$ - $z$ 截面和垂直于光振动方向的 $y$ - $z$ 截面的内部放置功率监视器,分别得到硅栅复合阵列结构内部的光强分布情况。考虑到计算精度并兼顾计算内存的大小,经过大量试验后,选用的网格尺寸为 $70.45 \text{ nm} \times 70.45 \text{ nm} \times 70.45 \text{ nm}$ 。

## 3 数值模拟与分析

对未添加任何材料的硅柱阵列结构、添加银纳米球的硅柱阵列结构和添加银纳米球并覆盖氧化铝的硅柱阵列结构的吸收性能进行研究,使用 $L$ 、 $G$ 、 $f$ 、 $H$ 和 $D$ 等参数对复合结构的近红外光吸收的影响进行分析,以此找到合适的参数,从而实现近

红外光的增强吸收。当入射波长为 1550 nm 时, Si、Ag 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的折射率分别为 3.480、0.400 和 1.746, 采用 FDTD 法仿真计算得到反射率  $R$  和透过率  $T$ , 再通过  $A=1-R-T$  可得到复合微结构的吸收率。

### 3.1 硅柱阵列结构的吸收率分析

将波长为 1550 nm 的入射光垂直入射到硅基底材料的表面,  $L$  和  $G$  分别从 500 nm 向 1000 nm 递增, 递增步长为 100 nm,  $H$  在 600~2000 nm 之间以 100 nm

的步长递增。计算结果表明, 当微纳硅柱阵列未添加任何辅助材料时, 对于入射波长为 1550 nm 的近红外光, 无论  $H$  取何值, 随着  $L$  值和  $G$  值的增大, 微纳结构整体对入射光并无强烈的吸收, 吸收率约为 0.001~0.010。当  $H$  值分别为 800 nm 和 1100 nm 时, 吸收率随  $L$  和  $G$  变化的等高线图如图 4 所示。从图 4 可以看到, 当未添加任何辅助材料时, 硅材料对该波长的光几乎呈透明状态。

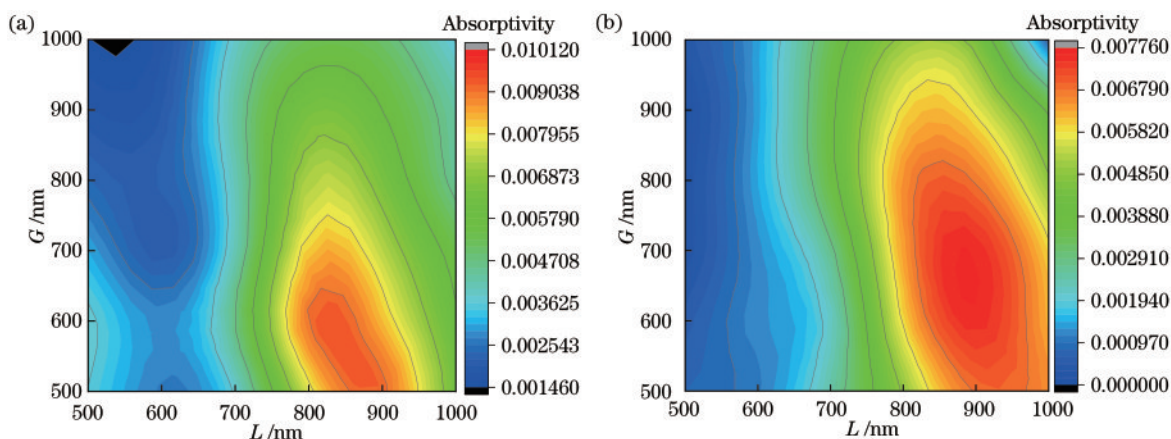


图 4 硅柱阵列结构在不同  $H$  值下的吸收率随  $L$  和  $G$  变化的等高线。(a) 800 nm; (b) 1100 nm

Fig. 4 Contour lines of absorptivity of silicon column array structure changing with  $L$  and  $G$  at different  $H$  values. (a) 800 nm; (b) 1100 nm

### 3.2 添加金属银纳米球对吸收率的影响

Au、Ag 和 Cu 等金属纳米材料能够诱发局域表面等离子激元共振, 其中 Ag 在近红外波段的吸收损耗最小<sup>[15]</sup>, 所以在微纳阵列结构中填充金属银纳米球来实现局域表面等离子激元共振效应。银纳米球的直径根据阵列结构中硅柱的间隙来选取, 应使金属银纳米球刚好铺满相邻硅柱间的空隙中。当  $G$  值分别为 500, 600, 700, 800, 900, 1000 nm 时,  $D$  值分别为 250, 300, 350, 400, 450, 500 nm。当  $L$  与  $L+G$  之比为 0.5, 即柱宽与间隙相等时, 令  $L$  和  $G$  在 500~1000 nm 之间递增, 递增步长为 100 nm,  $H$  在 600~2000 nm 之间以 50 nm 的步长递增, 分别仿真计算入射光经过该硅栅复合结构后的光场分布, 得到不同  $L$  值下的吸收率与  $H$  的关系, 如图 5 所示。从图 5 可以看到, 在硅柱的间隙中添加金属银纳米球材料, 相比于仅有硅栅格而未添加任何辅助材料的情况, 复合微纳结构对光的吸收有非常显著的增强效果, 在等线或等间隔的情况下, 吸收率随着  $L$  值和  $H$  值的增大, 波动范围为 0.0705~0.2938; 当  $L=G=1000$  nm 且  $D=500$  nm 时, 随着  $H$  值的增大, 其整体的吸收率有较显著并且较为平稳的增强,

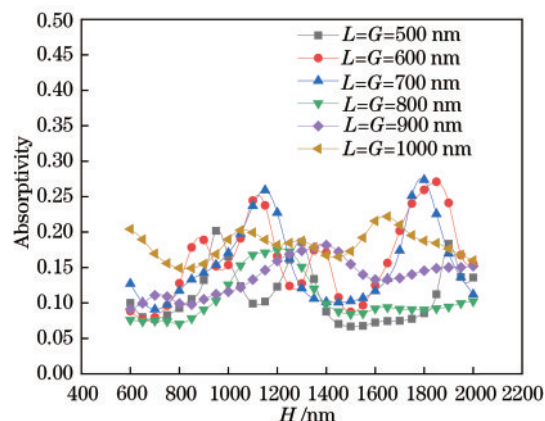


图 5 硅栅复合结构添加银纳米球后的吸收率与硅栅参数的关系

Fig. 5 Relationship between absorptivity of silicon gate composite structure after adding Ag nanospheres and silicon gate parameters

当  $H$  值在 600~2000 nm 之间时, 吸收率范围为 0.1490~0.2290; 当  $L=G=600$  nm 和  $L=G=700$  nm 时,  $D$  值分别为 300 nm 和 350 nm, 随着  $H$  值的增大, 其吸收率波动较大, 波动范围分别为 0.0766~0.2709 和 0.0910~0.2938; 当  $L=G=700$  nm 且  $H$  值为 1800 nm 时, 复合微纳结构的增强吸收效果最好, 吸

收率可达 0.2938。金属银纳米球的填充,可以使硅柱间隙内的金属表面发生等离子激元共振,从而提高复合微纳阵列结构对光的吸收。

### 3.3 同时添加氧化铝和银纳米球对吸收率的影响

当光线从一种介质进入另一种介质中时,若获得较低的界面反射率,需要使两者的折射率尽可能接近,或者在这两层介质中间加入折射率匹配物质以作为缓冲层,用来实现两个介质之间的折射率匹配,从而减少光在介质分界面的反射。在该结构中添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  并将其作为缓冲介质层,使  $L$  值分别取 500, 600, 700, 800, 900, 1000 nm,  $f$  值分别取 0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 和 0.65。此时,除了  $f$  值为 0.50 以外,其余  $f$  值均表明  $L$  值和  $G$  值不相等,即非等线或非等间隔的情况。将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  覆盖于含有银纳米球的硅栅复合结构表面,厚度为 200 nm。采用 FDTD 法计算复

合结构的光吸收率随微纳结构几何参数的变化情况,不同  $H$  值下的吸收率随  $f$  和  $L$  的关系如图 6 所示。从图 6 可以看到,在等线或等间隔的情况下,当  $L=1000$  nm,即  $f=0.5$  和  $H=600$  nm 时,吸收率较高,值为 0.4680,当  $H=1000$  nm 时,吸收率也可达到 0.4346,当  $H=1800$  nm 时,吸收率相对来说最高,可达 0.5753;在非等线或非等间隔的情况下,当  $f=0.45$ 、 $L=600$  nm 和  $H=1400$  nm 时,吸收率相对较高,值为 0.4712。由此可见,表面等离子激元共振可以很好地增强金属纳米球表面附近的电场强度,这有利于复合结构对入射光的吸收;缓冲层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的加入可实现硅、金属和空气不同介质之间的折射率匹配,这有利于减少光的反射损失。在硅栅中添加金属银纳米球和折射率匹配的介质氧化铝,微纳阵列复合结构对入射光的吸收显著增强,并具有良好的光吸收能力。

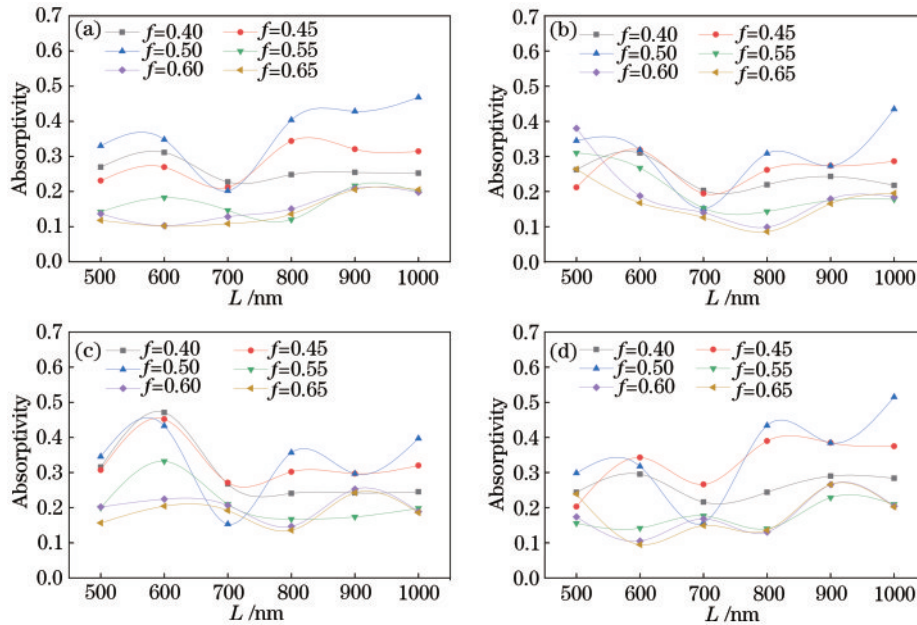


图 6 硅栅复合结构添加银纳米球和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  缓冲层后的吸收率与  $H$  的关系。(a)  $H=600$  nm; (b)  $H=1000$  nm; (c)  $H=1400$  nm; (d)  $H=1800$  nm

Fig. 6 Relationship between absorptivity of silicon gate composite structure after adding Ag nanospheres and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  buffer layer and  $H$ . (a)  $H=600$  nm; (b)  $H=1000$  nm; (c)  $H=1400$  nm; (d)  $H=1800$  nm

计算结果表明,当  $f$  值为 0.50 时,复合微纳结构的整体吸收效果最好。当  $L=G=500, 600, 700, 800, 900, 1000$  nm, 即  $f$  值为 0.5 时,进一步分析比较硅柱阵列的间隙中仅添加银纳米球、硅栅中既添加银纳米球又覆盖  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对吸收率的影响,这两种结构的吸收率与硅栅参数的关系如图 7 所示。从图 7 可以看到,当硅栅间隙内金属球的直径为间隙尺寸的一半时,既添加金属银纳米球又覆盖  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的微纳阵列复合结构,吸收率的波动范围为 0.2288~0.5753,

相比于硅栅中仅添加银纳米球的复合微纳结构,吸收率又进一步得到提高;对于  $L=G=500, 600, 700$  nm 的微纳结构,在添加银纳米球与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合材料的情况下,复合微纳结构的吸收率随着  $H$  值的变化波动范围较大;当  $L=G=600$  nm 和  $H=1150$  nm 时,吸收率达到最高,值为 0.5250;对于  $L=G=800, 900, 1000$  nm 的复合微纳结构,吸收率随着  $H$  值的变化波动较为平缓,当  $L=G=1000$  nm 时,吸收率相对较高,并且当  $H=1800$  nm 时,吸收率可达

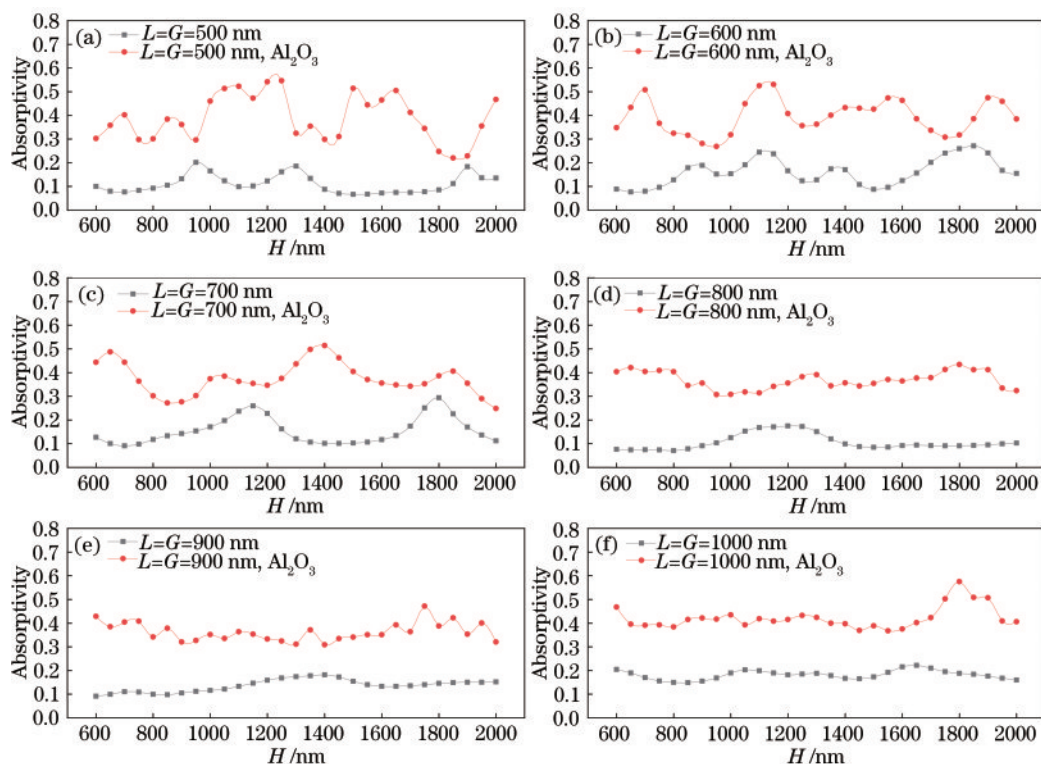


图 7 复合微结构在不同组合形式下的吸收率与  $L$  和  $G$  的关系。(a) 500 nm; (b) 600 nm; (c) 700 nm; (d) 800 nm; (e) 900 nm; (f) 1000 nm

Fig. 7 Relationship between absorptivity of composite microstructures and  $L$  and  $G$  in different combination forms. (a) 500 nm; (b) 600 nm; (c) 700 nm; (d) 800 nm; (e) 900 nm; (f) 1000 nm

0.5753。由此可见,金属银纳米球和缓冲层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的添加,可以提高复合微纳结构对入射光的吸收率。

### 3.4 微纳阵列复合结构内的光强分布

当硅栅的  $L=G=800, 900, 1000$  nm 时,对于波长为 1550 nm 的光,上述三种结构的吸收率受  $H$  值的影响较小,整体上相对较好。为了便于加工,选用横向特征尺寸较大的结构,即选用  $L=G=1000$  nm,在这种情况下,当  $H=1800$  nm 时,吸收率最高。采用 FDTD 法计算模拟波长为 1550 nm 的光正入射进微纳复合阵列结构内部后的光场分布。

图 8 为硅平板、添加金属银球和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的硅栅复合阵列结构内的光强分布。等线或等间隔的硅栅周期为  $2 \mu\text{m}$ ,柱高为 1800 nm,基底的厚度为 1000 nm。硅栅内纳米银球的直径为 500 nm,表面覆盖的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度为 200 nm,入射光的振动方向与  $x$  轴平行。作为对比,厚度为 2800 nm 的硅平板内的光强分布如图 8(a) 所示。从图 8(a) 可以看到,平整表面的硅平板对近红外光几乎呈透明状态。图 8(b) 为垂直于光振动方向的  $y-z$  截面内的光强分布,图 8(c) 为平行于光振动方向的  $x-z$  截面内的光强分

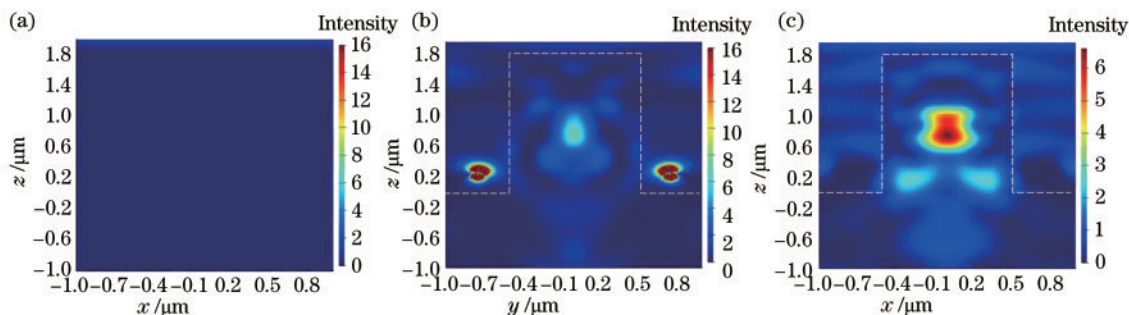


图 8 在不同纵截面处的光强分布。(a) 硅平板内; (b)  $y-z$  截面; (c)  $x-z$  截面

Fig. 8 Intensity distribution at different longitudinal sections. (a) In silicon plate; (b)  $y-z$  cross section; (c)  $x-z$  cross section

布,其中虚线为硅柱轮廓。从图 8(b)可以看到,金属银纳米球的边缘和硅柱内均有明显的光场增强现象,原因在于金属银球的表面发生等离子激元共振效应,可以实现在亚波长尺度下的光场调控和场增强,从而进一步增强复合微纳结构对光的吸收。从图 8(c)可以看到,硅柱结构内部相比于硅平板有一定的光场增强。综上所述,利用金属银纳米球可以将入射光局域在复合微纳结构的内部,再有折射率匹配材料  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的辅助,可以减少透射和反射的损失,从而增强复合微纳结构对入射光的吸收。考虑到复合微纳结构加工的可能性,可以通过刻蚀技术与热蒸发或者沉积的方式制备该结构。首先使用光刻技术和反应离子刻蚀技术<sup>[16]</sup>制备硅栅结构,若在加工过程中掺杂一些元素,如 S 元素可以提高硅材料对近红外入射光的吸收;然后通过热蒸发或者沉积的方式制备一层银膜<sup>[17]</sup>,高温退火工艺后可以生成许多银纳米颗粒,从而提高复合微纳结构对入射光的吸收增强。

## 4 结 论

在硅柱间隙中同时添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和银纳米球,借助微纳结构的陷光效应、金属表面等离子激元共振以及不同折射率匹配的共同作用,相比于平整的硅表面和仅有硅栅无任何辅助材料的情况,微纳复合结构的光吸收率得到显著增强。对于入射波长为 1550 nm 的近红外光,当硅柱边长为 500~1000 nm、硅柱高度为 600~2000 nm、硅柱间隙内银纳米球的直径为间隙尺寸的一半和复合结构表面覆盖  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度为 200 nm 时,在正入射的情况下,吸收率的波动范围为 0.2288~0.5753;当硅柱边长和间隔均为 1000 nm、柱高为 1800 nm 和硅柱间隙内银纳米球的直径为 500 nm 时,吸收率达到最大值,可达 0.5753。对于金属-硅栅-缓冲介质复合微纳阵列结构,金属纳米球和缓冲介质层的添加可以实现表面等离子激元共振效应和不同介质的折射率匹配,从而减少界面的反射,这有利于增强对光的吸收,为增强近红外光吸收提供一种新的方法。

## 参 考 文 献

- [1] Fang Q, Jia L X, Song J F, et al. Demonstration of a vertical pin Ge-on-Si photo-detector on a wet-etched Si recess [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23325-23330.
- [2] Xiayiding Y, Paerhatjiang T, Wu P P. Optimization

of light absorption and scattering properties of gold nanospheroids [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0429001.

夏伊丁·亚库普,帕尔哈提江·吐尔孙,武盼盼. 金纳米旋转椭球的光吸收和散射特性优化 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0429001.

- [3] Ke X Z, Zhou R. Light absorption characteristics of plasmonic photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202415.  
柯熙政,周茹. 等离子激元光电探测器的光吸收特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202415.
- [4] Bao W J. Surface enhanced infrared absorption spectroscopy and its applications [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.  
包文晶. 表面增强红外吸收光谱技术及其应用的研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [5] Cui W L. Research on micro-nano composite structured optical surface plasmonic devices and their multi-characteristic integration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.  
崔文丽. 微纳复合结构光学表面等离子激元器件及其多特性融合研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [6] Song Y J. Study on the technology of broadening the absorption spectrum range of black silicon [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.  
宋铁佶. 拓宽黑硅吸收光谱范围技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] 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(z2): 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(z2): s222004.
- [8] Sun X D, Zhang S W, Wu F, et al. Surface electromagnetic field enhancement of sub-wavelength metallic groove array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1113001.  
孙晓东,张斯文,吴峰,等. 亚波长金属槽阵列表面电磁场增强 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1113001.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Willets K A, van Duyne R P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing [J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2007, 58: 267-297.
- [12] Li Z Q, Zhang M, Peng T, et al. Improvement of the local characteristics of graphene surface plasmon based on guided-mode resonance effect [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 105201.  
李志全, 张明, 彭涛, 等. 基于导模共振效应提高石墨烯表面等离子体的局域特性[J]. 物理学报, 2016, 65(10): 105201.
- [13] Li H. Far-infrared enhanced absorption structure design based on surface plasmon [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.  
李辉. 基于表面等离激元的远红外增强吸收结构设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [14] Ge D B, Yan Y B. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves [M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2011.  
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [15] West P R, Ishii S, Naik G V, et al. Searching for better plasmonic materials [J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, 4(6): 795-808.
- [16] 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.
- [17] 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.