

基于纳米金属阵列天线的石墨烯/硅近红外探测器*

张逸飞 刘媛 梅家栋 王军转† 王肖沐 施毅

(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210046)

(2023 年 10 月 17 日收到; 2023 年 12 月 11 日收到修改稿)

金属纳米颗粒低聚体不仅具有等离激元共振效应实现光场亚波长范围内的局域化和增强, 还可以通过泄漏光场相互干涉实现法诺共振和连续态中的束缚态, 从而使得电磁场更强的局域和增强. 本文采用金纳米低聚体超构表面作为石墨烯/硅近红外探测器的天线, 实现了光响应度 2 倍的增强; 通过调节纳米金属低聚体间夹角, 发现当该夹角为 40° 时, 光电流达到最大值, 对应法诺共振最大的透射率, 此时天线不仅汇聚光场能量还定向发射给探测器; 当该夹角为 20° 时, 光电流出现一个低谷, 此时能量局域于低聚体内, 金属损耗减弱了等离激元增强效果. 该工作通过时域有限差分法仿真和实验相结合研究了低聚体超构表面光电耦合效率的动态过程, 为提高光电探测效率提供了一种重要的途径.

关键词: 纳米天线, 等离激元, 硅近红外探测器, 石墨烯**PACS:** 42.79.Pw, 42.50.Nn, 61.46.+w, 78.67.Bf**DOI:** 10.7498/aps.73.20231657

1 引言

超构表面是一种采用金属或者介质材料在平面上制备出亚波长尺度的人工纳米天线实现对光的强度、相位和偏振等参量进行调控的一种新型光学元件^[1-4]. 其出现了诸如等离激元共振^[5]、法诺共振 (Fano resonance)^[6-8]、连续域束缚态^[9-11](bound state in continuum, BIC) 等效应, 极大地增强了光的局域化和光谱多维度分析能力, 这些效应在探测器、激光器、成像和生物传感等领域有重要应用并取得了长足进展, 促进了仪器微型化和光电芯片集成化进程^[12]. 根据 Drude 模型, 纳米结构与光的相互作用允许一些光子被吸收, 一些被散射, 这种局域表面等离激元谐振会使纳米颗粒具有很高的吸收摩尔消光系数转变为纳米颗粒的热能, 与此同时, 瑞利散射得到大大增强, 尤其是达到等离激元共振时, 散射截面增大几个数量级, 因此提高天线

散射到探测介质的效率, 尽量减少热损耗, 可以大大提高探测效率^[13].

近些年, 成像技术的随着微加工技术进步不断在高像素、宽光谱多维度方向发展^[14-16]. 在这种趋势下, 近红外光谱的重要作用在一些领域中日益彰显, 在通信以及非可见光波段的应用场景越来越多^[17,18]. 由于硅基 CMOS 的工艺非常成熟, 在 850 nm 工作波段的光纤通信探测和近红外图像传感器, 常使用硅作为感光材料, 与可见光相比, 硅对近红外的吸收系数较低. 因此, 为实现充分的光电转换, 近红外需要更厚的硅, 以增大近红外与硅的作用距离, 提高光电转换的效果. 但是, 硅厚度的增大会加剧像素间串扰问题, 大大降低成像质量. 为解决这一问题, 业内多采取制作像素间隔槽的方式来抑制串扰. 但是高质量隔离槽的制造工艺具有挑战性^[19]. 另外, 在大功率近红外补光灯的照射下, 隔离槽的抑制作用并不理想. 所以本文采用 $1\ \mu\text{m}$ 厚度的硅 (silicon on insulator, SOI) 作为衬底, 制备

* 国家自然科学基金 (批准号: 61974064, 61934004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangjz@nju.edu.cn

石墨烯/硅肖特基结的探测器, 在感光硅上制备人工光学微纳结构, 利用其局域表面等离激元效应实现增强硅基的光吸收. 这里使用石墨烯/硅的结构, 主要由于石墨烯厚度在原子层量级, 光生载流子容易被肖特基结区分离和收集, 提高器件响应速率. 我们知道当纳米颗粒相互靠近, 偶极子相互耦合, 光场相互干涉时, 形成法诺共振进而出现 (bound state in continuum, BIC) 现象, 实现对更窄频率范围内能量局域, 尤其是像低聚体 (如 dimer, hexamer, septamer, ……), 多个纳米结构之间相互作用杂化产生多个等离激元振荡模式和耦合 [6,20,21], 出现了电磁场诱导透射增强现象 [22], 可以将更多的能量传递给颗粒下层的探测工作物质, 从而增强探测性能.

基于前期工作结果 [23] 可知, 边长为 250 nm, 厚度为 50 nm 的正方形金颗粒对于器件在 850 nm 探测光增强效果最明显. 因此本文采用的纳米结构低聚体是由 4 个边长为 250 nm, 厚度为 50 nm 的正方形金颗粒组成, 两个方块一组相隔 40 nm 两组之间构成一个夹角 θ , 这样的低聚体阵列作为石墨烯/硅近红外探测器的天线, 设计夹角 θ 从 0° 到 90° 变化, 周期分别为 1.75 和 1.2 μm . 通过光电流扫描, 发现有纳米颗粒区域光响应度实现 2 倍以上的增强; 通过调节该夹角, 发现当 θ 为 40° 时, 光电流达到最大值, 通过 Lumerical 时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 仿真发现

此时对应法诺共振最大的透射率; 当 θ 为 20° 时, 光电流出现一个低谷, 仿真结果表明此时金属热损耗最大, 能量局域于低聚体内, 金属损耗减弱了等离激元增强效果. 该工作通过仿真和实验相结合研究了该超构表面光电耦合效率的动态过程, 为提高光电探测效率提供了一种重要的途径.

2 器件和纳米结构制备

本文章件制备流程如图 1 所示, 选用厚度为 1 μm 的 n 型轻掺杂 (掺杂原子浓度约 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) SOI 作为衬底, 通过光刻图形化 (photolithography) 和反应耦合等离子体 (inductive coupled plasma, ICP) 刻蚀技术制备出 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的硅岛, 如图 1(a) 所示. 再通过光刻图形化和电子束蒸发技术 (electron beam evaporation, EBE) 在硅岛上做好一对电极 (5 nm Ti/45 nm Au), 如图 1(b) 所示, 其中一个电极和硅岛接触, 另一个电极在绝缘层衬底上与后续转移的石墨烯相接触. 接下来通过电子束曝光的方式 (electron beam lithography, EBL) 图形天线纳米颗粒并采用 EBE 蒸金属 5 nm Ti/45 nm Au 并剥离, 如图 1(c) 所示. 最后将化学气相沉淀方法生长的 (chemical vapor deposition, CVD) 石墨烯通过湿法转移的方法转移到硅岛上面, 并采用刻蚀方法将石墨烯和与硅接触的电极断开, 这样整个石墨烯/硅肖特基器件制备完成, 如图 1(d) 所

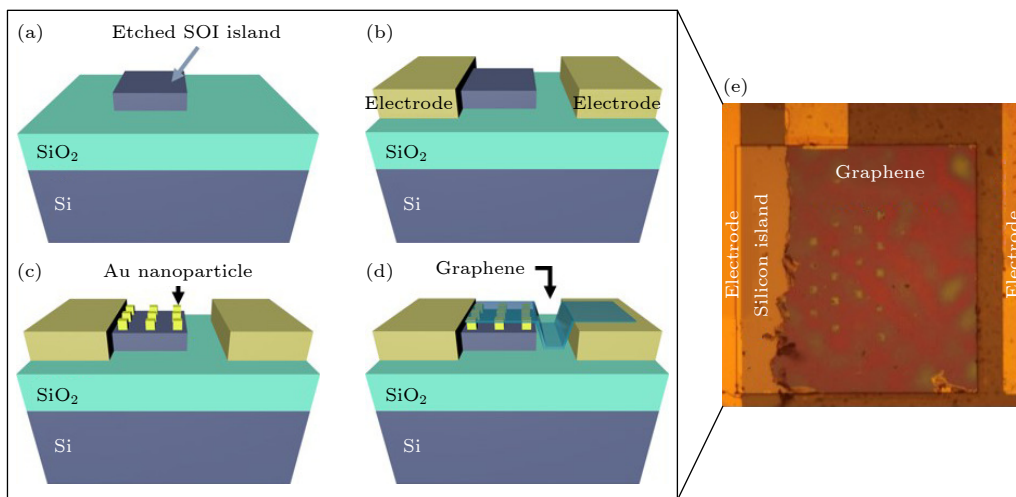


图 1 纳米天线器件制备流程示意图 (a) SOI 上刻蚀出硅岛; (b) 蒸镀金属接触电极; (c) 硅岛上制备纳米天线阵列; (d) 转移石墨烯薄膜; (e) 器件显微镜照片

Fig. 1. Device with antenna fabrication process: (a) Si island fabrication from SOI substrate; (b) electrodes deposition with EBE technique; (c) nano-antenna fabrication by EBL and EBE; (d) transferring of graphene film; (e) optical photo of the device.

示, 器件显微镜照片如图 1(e) 所示, 石墨烯形状完好, 没有破裂. 图 2(a) 为制备的纳米天线阵列示意图, 夹角为 θ , 每个阵列大小约 $10\ \mu\text{m}$, 天线正方形边长为 $250\ \text{nm}$, 周期为 $1750\ \text{nm}$, 图 2(c), (d) 为 $\theta = 0^\circ$ 和 40° 的纳米天线的扫描电子显微镜图片.

3 纳米阵列等离子激元对光电探测增强效果

首先, 对器件进行了微区光电流测试, 测试的光路如图 3(a) 所示, $850\ \text{nm}$ 激光通过 20 倍物镜聚焦照射在器件上, 光斑直径约 $1\ \mu\text{m}$, 通过偏振片调节激光的线偏振方向和纳米结构 x 轴方向一致, 如图 2(a) 所示 x 方向 (与纳米结构中心轴 y 水平垂直). 然后, 测试了器件的暗电流, 有纳米天线和无纳米天线的暗电流基本一致 (如图 3(a)), 可见曲线是典型的背靠背肖特基的电流电压特性曲线, 金和硅以及硅和石墨烯都形成了肖特基接触^[24,25]. 我们挑选纳米天线夹角为 0° 的纳米颗粒阵列研究光电流增强情况, 图 3(d) 给出了有无纳米天线的器件, 在改变激光功率时光电流的变化趋势, 随着功率从 $0.03\ \text{mW}$ 增大到 $1.86\ \text{mW}$, 光电流逐渐增大并趋向饱和达到 $1.05 \times 10^{-4}\ \text{A}$, 而没有天线的石墨烯/硅探测区域光电流为 $5.45 \times 10^{-5}\ \text{A}$, 天线对光电流增强约 2 倍, 有天线时光电流响应度为 $56\ \text{mA/W}$, 相比商用的 PIN 结构硅探测器响应度低近一个数

量级^[17]. 本工作主要关注天线对探测性能提高的影响, 没有在器件结构上做进一步的优化.

图 4(a) 给出了制备出的器件暗场的照片, 为了研究颗粒间距以及周期和夹角对探测效果的影响, 设计了 3 个区域的纳米天线, 分别是周期为 $1.2\ \mu\text{m}$ 、纳米颗粒间距为 $40\ \text{nm}$ 和 $100\ \text{nm}$ 的 I 和 II 区, 周期为 $1.75\ \mu\text{m}$ 、纳米颗粒间距为 $40\ \text{nm}$ 的 III 区, 每一个区域从右到左, 由上到下, 夹角 θ 如图中所标注从 0° 到 90° . 图 4(b) 给出了 $1\ \text{mW}$, $850\ \text{nm}$ 激光辐照下的光电流扫描图, 可见有纳米天线的探测区域光电流明显高于无纳米天线的区域, 周期为 $1.2\ \mu\text{m}$ 、间距为 $100\ \text{nm}$ 的纳米颗粒阵列区域整体上光电流更大一些. 当研究夹角变化对纳米结构天线光电流强度影响规律时, 发现角度增大过程中, 整体上光电流不断增大, 直到 θ 为 40° 达到最大, 随后减小, 最大增幅约为 14% . 然而, 3 种结构中一致地出现当 θ 为 20° 时, 光电流随夹角变化存在一个谷, 而此时光电流大小与夹角为 0° 时相当, 如图 4(c) 所示.

4 夹角对天线效果影响以及仿真结果

为进一步理解光电流随夹角变化这一现象背后的物理过程, 采用 Lumerical 中时域有限差分法 (FDTD) 进行仿真工作, 仿真中选取纳米颗粒边长为 $250\ \text{nm}$ 、厚度为 $50\ \text{nm}$, 纳米颗粒间距为 $40\ \text{nm}$,

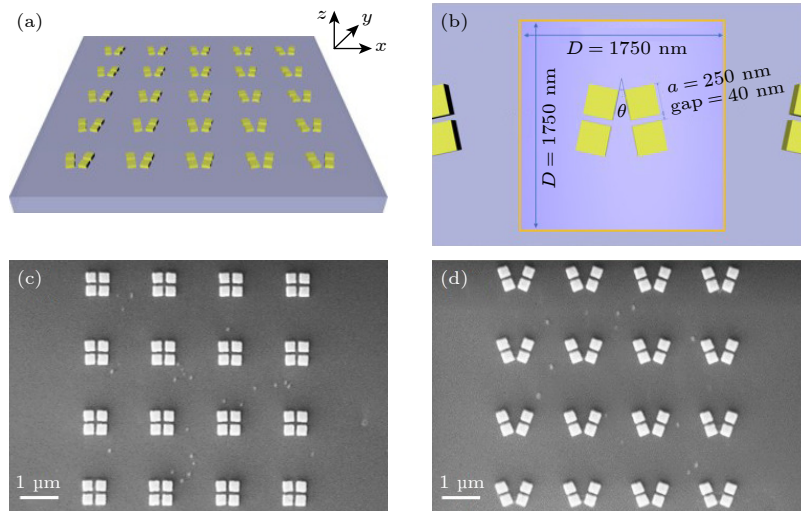


图 2 纳米天线阵列 SEM 表征图 (a) 纳米天线结构示意图; (b) 一个周期单元结构和参数示意图; (c), (d) 纳米天线 SEM 表征图, 阵列的周期 $d = 1750\ \text{nm}$, 同一周期中每个纳米颗粒之间的间距为 $100\ \text{nm}$, θ 分别为 0° 和 40°

Fig. 2. SEM photos of antenna array: (a), (b) Schematic of the antenna array and the related parameters of one unit; (c), (d) SEM images of the gold nano-antenna array, with the values of θ angle are 0° and 40° , respectively, the period d of the array is $1750\ \text{nm}$ and the gap between two nanoparticle is $100\ \text{nm}$.

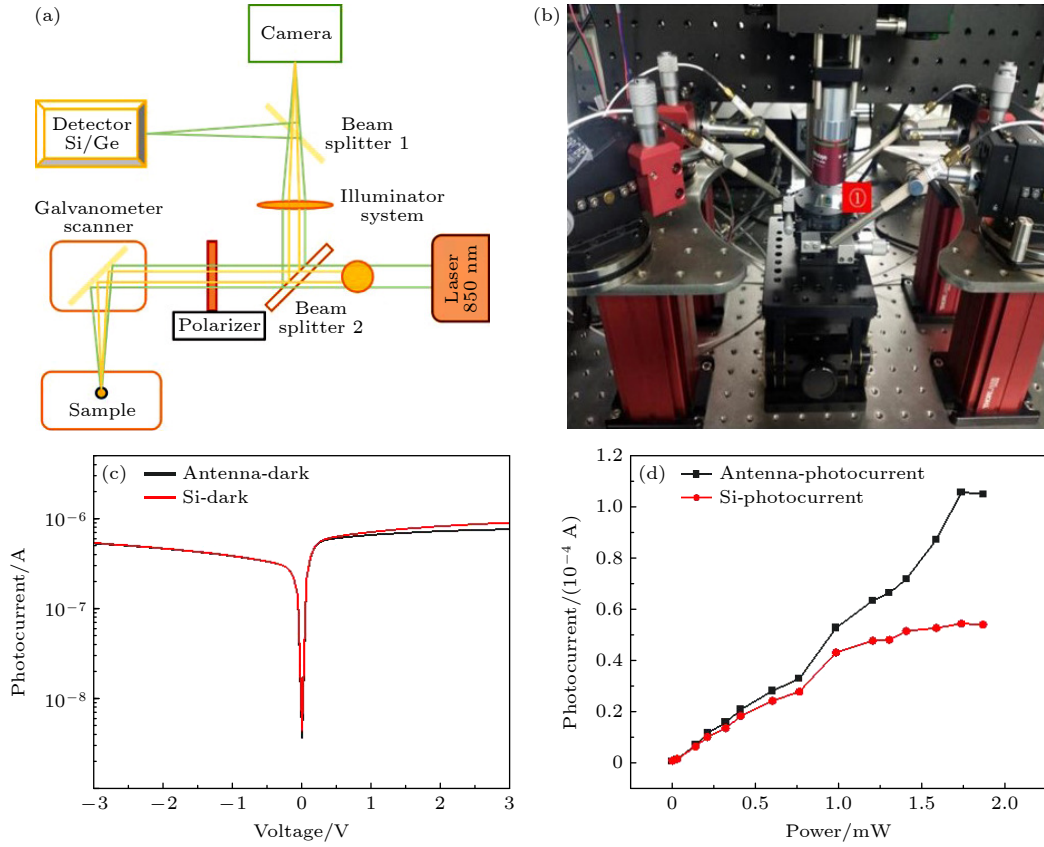


图 3 具有纳米天线结构的器件光电流表征 (a), (b) 分别为光电流测试光路图和测试平台实物图; (c) 有无纳米线天线的石墨烯/硅器件暗电流特性; (d) 具有纳米天线区域与没有纳米天线的区域光电流随 850 nm 激光功率的变化

Fig. 3. Photocurrent characterization of the device: (a), (b) Diagram of the optical path and the real measurement setup; (c) the dark current of the device with and without nano-antenna array; (d) photocurrent vs. laser power with 850 nm line of devices with and without nano-antenna array.

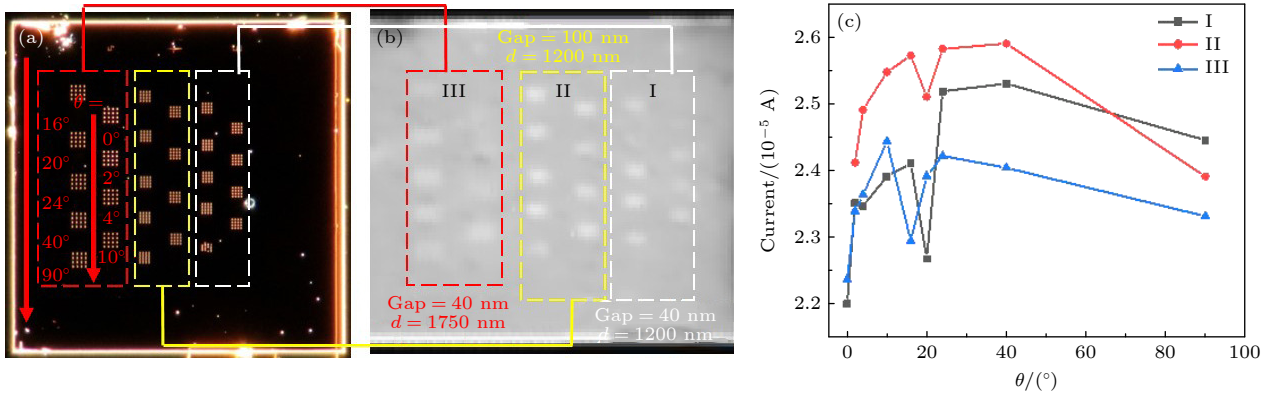


图 4 不同夹角纳米天线阵列的光电流表征 (a) 20 倍物镜显微镜下纳米天线阵列的暗场图, 从右到左分为 3 个区域 I, II 和 III, d 为阵列周期常数, gap 为纳米颗粒间距, 每一个区域的阵列 θ 角从 0° 到 90° ; (b) 1 mW 波长为 850 nm 激光辐照下纳米天线阵列的光电流 mapping 图; (c) 不同区域光电流大小随夹角的变化

Fig. 4. Photocurrent characterization of nano-antenna arrays with different parameters as d , gap and θ . (a) The dark field image of the nanoantenna array under a $20\times$ objective lens microscope is divided into three areas I, II and III from right to left. d is the array periodic constant, gap is the distance between nanoparticles, and the θ angle of each area is from 0° to 90° . (b) The photocurrent mapping of the arrays with 1 mW 850 nm laser. (c) The photocurrent vs. θ curves of the device with different periodic parameters.

周期为 1200 nm, 金属选取 Au (palik), 周围环境为空气, 夹角为以 y 轴为对称轴, 以上面两个纳米颗粒上边靠近点连线中点为转轴左右两支的夹角.

图 5(a) 分别为夹角 $\theta = 0^\circ - 40^\circ$ 时该结构的透射和吸收谱图, 可以看到明显的法诺共振. 当两个纳米颗粒靠近时, 在光场激励下形成两个极化子 (偶

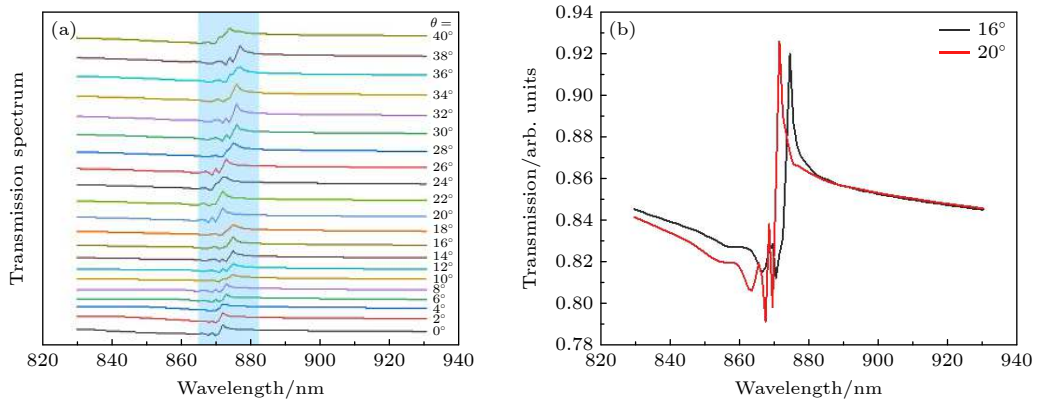


图 5 纳米天线透射光谱和夹角的关系 (a) FDTD 仿真计算的纳米天线阵列的透射光谱随 θ 角的变化图; (b) $\theta = 16^\circ, 20^\circ$ 时的透射全谱

Fig. 5. Transmission spectra with the different θ : (a) Transmission spectra of the nano-antenna array with θ ; (b) the typical transmission spectra of $\theta = 16^\circ$ and 20° simulated by FDTD method.

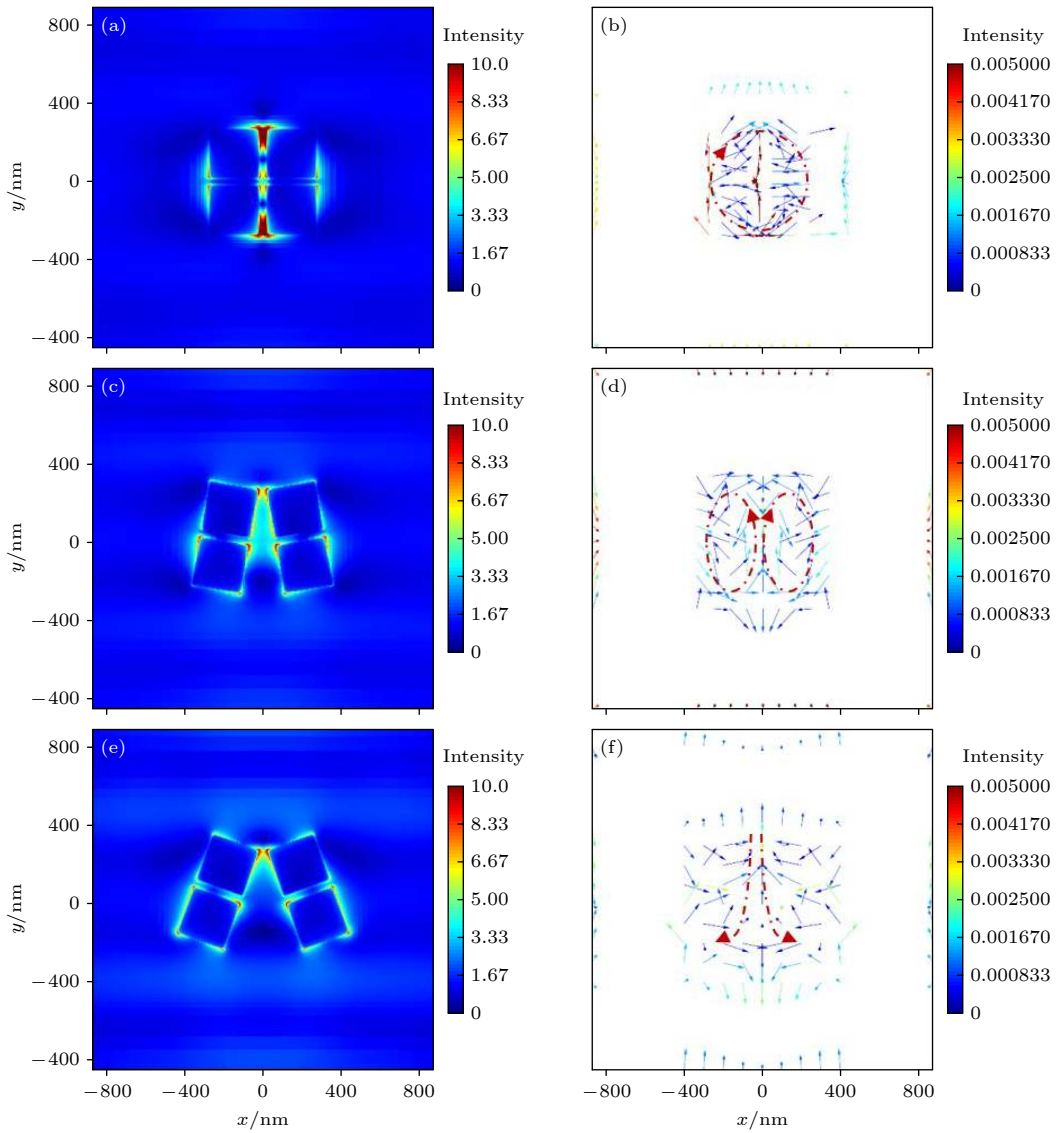


图 6 透射尖峰波长处探测器表面电场和坡印亭矢量分布图, 其中夹角 θ 分别为 (a), (b) 0° ; (c), (d) 20° ; (e), (f) 40°

Fig. 6. Electric field and Poynting vector distribution at the transmission peak wavelength, θ equals to (a), (b) 0° , (c), (d) 20° , (e), (f) 40° .

极子), 类似当氢原子靠近时轨道杂化一样, 两个偶极子进行杂化形成了成键和反成键态^[20], 而多个颗粒就形成了多体耦合结构(多聚体)^[26,27]. 这样强耦合体系向平面泄漏或者辐射光将会产生干涉形成新的分立的泄漏模式, 该模式和纳米颗粒等离激元模式相耦合产生法诺共振. 从仿真结果看, 随着角度增大, 共振峰位以及强度没有明显变化.

图 5(b) 所示为夹角为 16° 和 20° 时的共振谱形, 该谱形具有非对称的结构, 类似法诺共振耦合谱, 主峰附近低能量的振荡峰与多体耦合相关; 夹角为 16° 的透射率更高一些, 说明泄漏出来的光部分越来越多, 当纳米结构角度张开的时候, 电场离开金属一定距离, 能量主要集中在张开的间隙之间^[28,29], 这样就会减小金属本身的热耗散, 这一点也可以从光电流 mapping 的结果得到验证, 纳米颗粒间距为 100 nm 时光电流比间距为 40 nm 的天线阵列对光电流增强效果明显. 与此同时本文中纳米结构低聚体可以看作一对定向张开的天线, 通过天线汇聚的光场朝张角方向辐射. 天线汇聚的光经由石墨烯和硅直接吸收产生载流子, 载流子在电场作用下被快速抽取形成光电流. 入射光为透射共振高峰的电场能量分布图和坡印亭矢量图也验证了这一推论, 图 6(a)–(f) 为夹角 $\theta = 0^\circ, 20^\circ$ 和 40° 时的纳米颗粒底面的电场能量分布图和坡印亭矢量图, 可以看到间隙处有明显的能量分布, 从坡印亭矢量看, θ 为 0° 和 20° 能流多形成漩涡, 从而形成驻波, 由于距离纳米颗粒比较近, 所以金属耗散相对比较大; 而 θ 为 40° 时, 能流离开颗粒, 在平面内流向介质, 容易被探测物质吸收和探测, 因此探测器响应

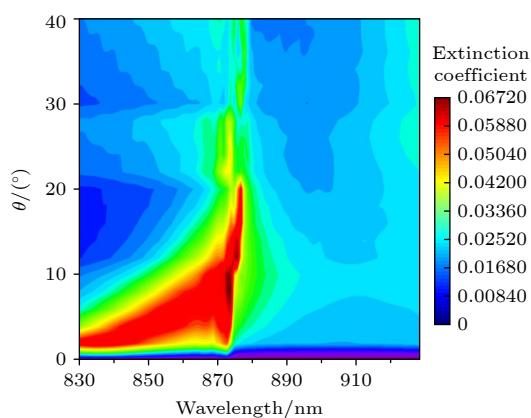


图 7 FDTD 仿真计算的纳米天线阵列的吸收光谱随 θ 角变化的 mapping 图

Fig. 7. Simulation results of the extinction coefficient of the antenna with θ .

度随着夹角增大而增强, 而在 20° 附近出现低谷. 进一步从仿真中提取出纳米颗粒阵列吸收系数随夹角的变化, 结果以 mapping 形式在图 7 中给出. 可以看到, 随着夹角增大, 纳米阵列吸收变得越来越小, 从 20° 开始, 吸收明显减弱. 需要指出的是, 为了简化仿真过程, 没有考虑衬底影响, 所以仿真结果波长比实验波长有红移, 基于前期工作进行了波长校准.

5 结论和讨论

基于石墨烯/硅肖特基探测器研究了金属纳米结构等离激元天线的夹角对光场增强的影响, 整体上天线对光响应度实现了两倍的增强. 当夹角从 0° 到 90° 变化时, 光电流先增大, 后来趋向饱和, 当该夹角为 40° 时, 光电流达到最大值, 对应法诺共振最大的透射率, 此时天线不仅汇聚光场能量还定向发射给探测器; 当该夹角为 20° 时, 光电流出现一个低谷, 此时能量局域于低聚体内, 金属损耗减弱了等离激元增强效果. 可以进一步推测, 泄漏场的干涉有望实现 BIC, 从而辐射能量得以消除, 将能量集中于结构内, 然而由于金属材料损耗比较大, 又由于衬底介电常数以及吸收特性, 无法进一步得到 BIC 现象. 该工作通过时域有限差分法仿真和实验相结合, 研究了多个纳米颗粒组成的多聚体超构表面光电耦合效率的动态过程, 为提高光电探测效率提供了一种重要的途径.

参考文献

- [1] Ijaz S, Rana A S, Ahmad Z, Zubair M, Massoud Y, Mehmood M Q 2022 *Adv. Devices Instrument.* **2022** 9861078
- [2] Zhang L, Cui T J 2021 *Research* **2021** 9802673
- [3] Xing H, Fan J, Lu D, Gao Z, Shum P P, Cong L 2022 *Adv. Devices Instrument.* **2022** 9852503
- [4] Fang M, Tan X, Liu Z, Hu B, Wang X 2021 *Research* **2021** 9794329
- [5] Maier S A 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Berlin, Heidelberg: Springer) pp5–19
- [6] Mirin N A, Bao K, Nordlander P 2009 *J. Phys. Chem. A* **113** 4028
- [7] Gallinet B, Martin O J F 2011 *ACS Nano* **5** 8999
- [8] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, Halas N J, Nordlander P, Giessen H, Chong C T, 2010 *Nat. Mater.* **9** 707
- [9] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, Joannopoulos J D, Soljačić M 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16048
- [10] Liang Y, Koshelev K, Zhang F, Lin H, Lin S, Wu J, Jia B, Kivshar Y 2020 *Nano Lett.* **20** 635
- [11] Yan M, Sun K, Ning T Y, Zhao L N, Ren Y Y, Huo Y Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 044202 (in Chinese) [闫梦, 孙珂, 宁廷

- 银, 赵丽娜, 任莹莹, 霍燕燕 2023 物理学报 **72** 044202]
- [12] Wu N X, Ma H B, Chen H S, Qian H L 2021 *Prog. Electromagn. Res.* **172** 23
- [13] Liu L L, Zhuo L 2022 *Prog. Electromagn. Res.* **173** 93
- [14] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, Wisner R F, Opris I E, Fortune S A, Compston A J, Gondarenko A, Meng F, Che X, Reed G T, Nicolaescu R 2021 *Nature* **590** 256
- [15] Fossum E R 1997 *IEEE T. Electron Dev.* **44** 1689
- [16] Li L Z, Yao X R, Liu X F, Yu W K, Zhai G J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 224201 (in Chinese) [李龙珍, 姚旭日, 刘雪峰, 俞文凯, 翟光杰 2014 物理学报 **63** 224201]
- [17] Wu G A, Luo L B 2018 *Physics* **47** 137 (in Chinese) [吴国安, 罗林保 2018 物理 **47** 137]
- [18] Chen H, Zhang X X, Wang H, Ji Y H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 118101 (in Chinese) [陈浩, 张晓霞, 王鸿, 姬月华 2018 物理学报 **67** 118101]
- [19] Long W, Xu Z J 2015 *Laser Optoelectron. Prog.* **52** 26 (in Chinese) [龙弯, 许中杰 2015 激光与光电子学进展 **52** 26]
- [20] Nordlander P, Oubre C, Prodan E, Li K, Stockman M I 2004 *Nano Lett.* **4** 899
- [21] Wang H, Brandl D W, Nordlander P, Halas N J 2007 *Accounts Chem. Res.* **40** 53
- [22] Tang B, Jia Z, Huang L, Su J, Jiang C 2021 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **27** 1
- [23] Li L F, Wang J Z, Kang L, Liu W, Yu L, Zheng B J, Brongersma M L, Werner D H, Lan S F, Shi Y, Xu Y, Wang X M 2020 *ACS Nano* **14** 16634
- [24] Goykhman I, Sassi U, Desiatov B, Mazurski N, Milana S, Fazio D, Eiden A, Khurgin J, Shappir J, Levy U, Ferrari A C 2016 *Nano Lett.* **16** 3005
- [25] Wang X, Cheng Z, Xu K, Tsang H K, Xu J B 2013 *Nat. Photonics* **7** 888
- [26] Xu S, Sayanskiy A, Kupriianov, Tuz V R, Kapitanova P, Sun H B, Han W, Kivshar Y S 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801166
- [27] Zhang G, Lan C, Gao R, Wen Y, Zhou J 2019 *Adv. Theory Simulat.* **2** 1900123
- [28] Russell K J, Hu E L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 163115
- [29] Wu Z Q, Yang J L, Manjumath N K, Zhang Y J, Feng S R, Lu Y H, Wu J H, Zhao W W, Qiu C Y, Li J F, Lin S S 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706527

Quaternary nanoparticle array antenna for graphene/silicon near-infrared detector*

Zhang Yi-Fei Liu Yuan Mei Jia-Dong Wang Jun-Zhuan †
Wang Xiao-Mu Shi Yi

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

(Received 17 October 2023; revised manuscript received 11 December 2023)

Abstract

Infrared imaging chips are crucial for a broad range of military, medicine and biology applications. Although silicon detectors' on-chip integration technology is matured, their low absorption in near-infrared light results in poor infrared photocurrent response. To increase the photodetector absorption efficiency, antenna-like metal nanoparticles have been widely adopted due to their plasmon resonance effects. Oligomer nanoparticles, including quaternary nanoparticles, exhibit plasmon resonance effects that localize and enhance the light field in a sub-wavelength range. Furthermore, they can interfere with each other to achieve Fano resonance and bound state in continuity, resulting in a stronger localization and enhancement of the electromagnetic field. In this study an array of gold quaternary nanoparticle oligomers is used as the antenna for a graphene/SOI (with 1 μm silicon) heterojunction near-infrared detector. Each oligomer consists of four gold squares, each with a size of 250 nm, forming two pairs of dipoles similar to the orbital hybridization of hydrogen atoms. This thus results in a multi-body coupling structure with bonding state and anti-bonding state. The antenna array parameters, such as the periodic constant, gap between nanoparticles, and angle (θ) between the oligomers, are meticulously adjusted. The optimized device is characterized by using photocurrent and photocurrent mapping, achieving a 2-fold enhancement in photoresponsivity with the maximum value at $\theta \sim 40^\circ$. Notably, a consistent dip in photocurrents is observed for different periods or gap arrays when the angle theta is 20° . The simulation is conducted by using finite-difference time-domain (FDTD), revealing the emergence of Fano-like resonance in the transmittance spectra of the array at approximately 850 nm. The interference caused by the strongly coupling system to the plane coupled leakage field and the nanoparticle plasmon mode results in the formation of a new discrete leakage mode, i.e. the Fano-like resonance. The antenna helps to concentrate and emit the light field energy directionally to the detector, while there is a trade-off between the loss caused by nanoparticles absorption and the leakage energy. The photocurrent reaches a minimal point at a theta angle of 20° . At this point, the energy is localized in the oligomers, and the metal absorption loss weakens the plasmon enhancement effect. These findings are further supported by the simulation results of electric field and Poynting vector distribution. These findings indicate an important and promising way to enhance the photo detection efficiency via nanostructured plasmonic antenna.

Keywords: nano-antenna, plasmonic, silicon infrared photodetector, graphene

PACS: 42.79.Pw, 42.50.Nn, 61.46.+w, 78.67.Bf

DOI: [10.7498/aps.73.20231657](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231657)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61974064, 61934004).

† Corresponding author. E-mail: wangjz@nju.edu.cn



基于纳米金属阵列天线的石墨烯/硅近红外探测器

张逸飞 刘媛 梅家栋 王军转 王肖沐 施毅

Quaternary nanoparticle array antenna for graphene/silicon near-infrared detector

Zhang Yi-Fei Liu Yuan Mei Jia-Dong Wang Jun-Zhuan Wang Xiao-Mu Shi Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 064202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231657

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231657>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯等离激元增强红外光谱

Graphene plasmon enhanced infrared spectroscopy

物理学报. 2019, 68(14): 148103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190903>

基于磁激元效应的石墨烯-金属纳米结构近红外吸收研究

Near-infrared absorption of graphene-metal nanostructure based on magnetic polaritons

物理学报. 2018, 67(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180196>

等离激元增强的石墨烯光吸收

Enhanced optical absorption of graphene by plasmon

物理学报. 2020, 69(6): 067801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191645>

基于纳米金属-石墨烯耦合的多频段等离激元诱导透明

Multiband plasmon-induced transparency based on nanometals-graphene hybrid model

物理学报. 2020, 69(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200200>

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

物理学报. 2018, 67(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

基于太赫兹石墨烯等离激元的多参数相位可调谐结构及其应用

Multi-parameter tunable phase transition based terahertz graphene plasmons and its application

物理学报. 2021, 70(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210445>