铝纳米颗粒增强氧化镓日盲光电探测器性能研究

余建刚^{1,3*}, 李强¹, 姚慧珍¹, 李秀源¹, 于淼³, 贾仁需³, 张立春^{2*}

1. 中北大学仪器与电子学院, 动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 鲁东大学物理与光电工程学院, 烟台 264025;

3. 西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071

*联系人, 余建刚, E-mail: yujg@nuc.edu.cn; 张立春, E-mail: zhanglichun@ldu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-07; 接受日期: 2022-03-08; 网络出版日期: 2022-05-11

国家自然科学基金(编号: 62075092, 52003256, 12004257)、山西省基础 Research 计划(编号: 20210302123185)、山西省青年基金(编号: 201901D211245, 201901D211259)和山西省高等学校科技创新(编号: 2020L0315)资助项目

摘要 基于金属纳米等离子体的局域表面等离激元效应(LSPR)能够增强局域电场强度, 并表现出优异的光捕获能力, 可有效提升光电子器件的性能. 本文结合时域有限差分法和磁控溅射技术, 分别从理论和实验方面研究了金属Al纳米等离子体对 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲光电探测器光电特性的影响. 研究发现, 在254 nm日盲紫外光照射下, 半径为30 nm的Al纳米等离子体可以产生LSPR效应. 得益于Al等离子体的LSPR效应, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲光电探测器的光谱响应度和探测率分别提升了4.7倍和6倍, 器件暗电流降为原来的62.5%. 本研究为Al纳米等离子体在日盲波段的应用提供了理论和实验基础, 也为进一步提升日盲光电探测器的光电性能提供了新方法.

关键词 日盲光电探测器, 表面等离激元, 氧化镓, 铝纳米颗粒

PACS: 85.60.Gz, 73.50.Mx, 78.66.Fd, 78.67.Bf

1 引言

工作在200–280 nm深紫外波段的日盲紫外光电探测器因具有背景噪声低、虚警率低、探测灵敏度高、抗辐射能力强等优点, 在导弹制导、气象监测、火灾预警和生物医疗等军事和民生领域具有广泛的应用前景, 近年来受到国内外研究者的广泛关注^[1–3]. 目前, 商用的硅基日盲光电探测器在工作时需添加昂贵的滤光片, 这导致器件成本较高且其探测效率偏低. 随着半导体材料制备技术的发展, 基于新一代超宽禁

带半导体材料($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, 金刚石)的日盲光电探测器吸引了研究者的浓厚兴趣. 目前, 已报道的基于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 材料的日盲紫外光电探测器主要是通过改变Al和Mg元素组分来实现, 而高Al组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 外延层具有较高的位错密度, 高Mg组分的 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 会出现相的分离现象, 这一技术壁垒限制了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 日盲光电探测器性能的进一步提升^[4,5]. 此外, 较大的带隙值无法覆盖整个日盲波段且带隙难以调控以及大面积材料难以制备等问题, 也限制了金刚石日盲紫外光电探测器的

引用格式: 余建刚, 李强, 姚慧珍, 等. 铝纳米颗粒增强氧化镓日盲光电探测器性能研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 297305
Yu J G, Li Q, Yao H Z, et al. The performance of Al plasmon enhanced $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ solar-blind photodetector (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 297305, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0008

应用领域^[6]. 得益于合适的带隙值(4.5–5.0 eV)以及优异的物理化学特性, 氧化镓(β -Ga₂O₃)被认为是日盲光电探测器的最佳天然候选材料^[7]. 目前基于氧化镓材料的日盲光电探测器已受到了研究者的广泛研究且在探测器性能方面取得了较大的进展^[1,8,9]. 在2021年12月发布的《2021研究前沿》中, “基于Ga₂O₃的日盲紫外光电探测器”成为2021年的研究热点和新兴前沿, 这表明研究基于Ga₂O₃的日盲紫外光电探测器对其进一步广泛应用具有重要的意义.

近年来, 研究者在提升 β -Ga₂O₃日盲紫外光电探测器性能方面做了大量研究工作. Cui等人^[10]通过控制氧气气压来优化非晶Ga₂O₃薄膜中的氧空位浓度, 最终实现了 β -Ga₂O₃日盲紫外光电探测器在10 V偏压下暗电流低至0.2 μ A, 光暗电流比大于 10^4 等优异特性. Xu等人^[11]通过优化沉积温度, 改善了 β -Ga₂O₃薄膜质量, 使 β -Ga₂O₃日盲紫外光电探测器在20 V时, 暗电流低至14 pA, 光暗电流比超过了 10^5 , 探测器的光谱响应度达到了150 A/W. 与双端器件相比较, 晶体管固有栅控特性和光电导增益是探测器具有较高光谱响应度的主要原因^[12], Qin等人^[13]制备了基于非晶Ga₂O₃薄膜的晶体管型光电探测器, 通过栅极电压调控, 使探测器的光谱响应度达到了 4.1×10^3 A/W⁻¹. 与单个器件相比, 基于高度集成的探测器阵列在微弱光检测方面具有出色的性能, Liu课题组^[14]制备了16×4的阵列型 β -Ga₂O₃日盲紫外光电探测器, 在10 V偏压下, 探测器的光谱响应度达到了139.56 A/W; 总之, 研究者都是通过改善 β -Ga₂O₃感光层的质量和优化探测器的结构来增强紫外光的吸收, 从而实现高性能探测器的制备. 然而, 这些方法都是通过牺牲探测器光谱响应时间来获得较大的光谱响应度, 并且需要施加较大的偏压从而导致较大的暗电流以及工艺较复杂、器件制作成本较大.

具有亚波长尺寸的金属微纳结构, 在外界光的照射下, 其表面的纳米区域由于局域表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)作用可以极大地提升光能量密度并增强局域电磁场, 因而被广泛应用在太阳能电池、光电探测器等光电子器件中, 用来增强光电子器件对光的吸收^[15–18]; 本课题组^[19]之前研究了金属Pt纳米颗粒(Pt NPs)对 β -Ga₂O₃薄膜表面的修饰, 在不牺牲探测器光谱响应时间的前提下, 使探测器的光谱响应度提升为原来的3倍, 达到了

29.08 A/W. 在紫外波段能够产生LSPR效应的金属主要有Au, Ag, Pt NPs以及Al NPs. 其中, Au和Ag NPs的共振峰主要分布在可见光和紫外波段, 而Al NPs的共振峰峰位分布在日盲波段. 由于更适合应用于日盲紫外光电探测器性能的提升, Qiao等人^[20]研究了基于Al NPs修饰 β -Ga₂O₃薄膜表面的日盲光电探测器性能, 该研究重点侧重于叉指电极间隙宽度对探测器性能的影响, 并没有深入研究Al NPs在紫外光下产生LSPR效应的几何尺寸以及物理机制.

本文通过理论模拟结合实验研究了基于Al NPs表面等离激元效应的 β -Ga₂O₃高性能日盲光电探测器. 借助于时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)对Al NPs在日盲波段产生LSPR效应的几何尺寸进行仿真优化, 我们制备了MSM型Al NPs@ β -Ga₂O₃日盲光电探测器, 并对仿真结果进行了验证. 研究结果表明, 在不牺牲光谱响应时间的前提下, Al NPs可以有效提升探测器光谱响应度(23.2 A/W@15 V)和降低探测器的暗电流(10 nA@15 V).

2 实验方法

本文采用时域有限差分法研究了不同半径的金属Al纳米颗粒产生局域表面等离激元效应(LSPR)的变化规律. 仿真参数具体为: x, y, z 三个方向的边界条件为完美匹配层边界条件(Perfectly Matched Layer, PML), 计算区域大小为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, mesh-accuracy设置值为4, 金属纳米颗粒所在区域的均匀网格精度为0.5 nm, Al纳米颗粒材料的类型为Al-Palisk, 入射光源采用了TFSF光源且设置为平面波, 光源波长范围为200–800 nm. 采用脉冲激光沉积的方法在蓝宝石衬底上制备 β -Ga₂O₃薄膜, 具体的实验参数在文献^[16]中已报道^[16]; 金属铝纳米颗粒主要是通过磁控溅射方法制备: 以金属铝(纯度为99.99%)作靶材, 工作气压为0.3 Pa、功率为60 W, 衬底温度为室温; 通过控制溅射时间(30, 60, 90 s)在 β -Ga₂O₃薄膜表面沉积不同厚度的Al薄膜, 然后再在氩气环境、350°C条件下, 进行5 min快速热退火处理, 快速退火炉的升温和降温速率为10°C/min, 最终形成直径大小不同的Al纳米颗粒(Al NPs), 然后再通过磁控溅射和掩模版制备了Ti/Au叉指电极, 其中叉指电极的指长为3000 μm , 指间距为200 μm , 指宽为300 μm .

3 结果分析

3.1 金属Al NPs仿真以及实验制备

根据Mie理论^[21], 只有当金属纳米颗粒尺寸小于入射光波长时, 才有可能产生表面等离子激元效应, 而金属纳米颗粒大小不同, 产生表面等离子激元效应的波峰位置也不一样. 本文通过借助FDTD方法首先对金属Al NPs在254 nm波长下产生LSPR效应的几何尺寸进行了研究. 图1(a)–(e)为Al NPs半径为10, 20, 30, 40, 50 nm, 入射光波长为254 nm时, 金属纳米颗粒在XY平面产生的电场强度变化规律. 从图中可以看出, 随着金属Al NPs的半径增大, 金属Al NPs周围的局域电场强度呈现出先增强再减弱的趋势; 当半径为30 nm时, 电场强度达最大. 这是因为, 随着金属纳米颗粒的半径增大, 其消光截面和辐射强度也在增大, 但是金属纳米颗粒半径的增大同样会影响共振峰波长位置红移^[22]. 由此可知, 金属Al NPs与254 nm紫外波长发生LSPR效应的最佳半径为30 nm. 为了进一步研究金属Al NPs在紫外波段下的LSPR效应, 给出了不同半径金

属Al NPs的消光光谱与波长之间的关系, 如图1(f)所示. 当金属Al NPs产生LSPR效应时, 部分入射光被消光且金属纳米颗粒中的电子共振越强, 消光越强, 消光光谱最强时所对应的波长即是金属纳米颗粒产生LSPR效应的波长^[23]; 从图1(f)中可以看出, 随着金属Al NPs的半径增大, 消光光谱的峰值波长逐渐发生红移, 当金属Al NPs的半径从10 nm增加到50 nm时, 消光光谱的峰值位置从228 nm红移到356 nm. 峰值红移主要可归因于金属纳米颗粒增大时, 在紫外光照射下, 电子的弛豫时间变长, 由此产生共振所需要的频率变低, 从而导致产生共振波长的峰值红移; 此外, 从图中可以发现, 随着金属Al NPs半径的增大, 共振峰的半峰宽也在变大, 这主要是因为较大的直径下, 由于高阶共振和迟滞效应的出现, 导致能量分布范围展宽. 因而, 共振峰的半峰宽随着金属纳米颗粒半径的增大而增大^[24]. 综上所述可知, 金属Al NPs在254 nm波长下产生LSPR效应的最佳半径为30 nm.

为了从实验上验证金属Al NPs在254 nm波长紫外

图 1 (网络版彩图) (a)–(e) FDTD对不同半径(10–50 nm)的Al NPs在254 nm波长照射下的局域电场强度仿真结果; (f) 不同半径Al NPs的消光谱图

Figure 1 (Color online) FDTD calculated the local electric field when the Al NPs-size was gradually increased from 10 to 50 nm in (a)–(e). The extinction cross-sections were calculated when the Au nanoparticle of radius increased from 10 to 50 nm in (f).

光照射下是否会发生LSPR效应以及其对光电探测器性能的影响,通过磁控溅射技术在 β -Ga₂O₃薄膜表面制备了Al NPs;如图2(a)所示,通过控制溅射金属Al靶材时间,然后在氩气环境中、490°C温度下进行快速热处理(退火保温时间为5 min),最终获得了不同半径的金属Al NPs.图2(b)–(d)是溅射时间分别为30, 60, 90 s所制备的金属Al NPs,插图为不同溅射时间下Al NPs半径大小分布情况统计结果.由图可知,当溅射时间为90 s时,金属Al NPs的半径大部分分布在30 nm左右.即在该条件下可以获得半径为30 nm的金属Al NPs.为了验证Al NPs对基于 β -Ga₂O₃薄膜的日盲紫外光电探测器性能的影响,制备了基于Al NPs半径为30 nm的Al NPs@ β -Ga₂O₃薄膜的MSM型日盲紫外光电探测器,并将其命名为Device A.为了进行对比,同时制备了无金属Al NPs的 β -Ga₂O₃薄膜的MSM型日盲紫外光电探测器,并将其命名为Device B,探测器的具体制备流程如图2(a)所示,制备 β -Ga₂O₃薄膜的实验条件以及相关表征结果已在前期进行了报道^[25].

3.2 探测器光电性能分析

图3(a)为探测器Device A和Device B的光暗电流随电压变化(I - V 曲线)情况图.在正负对称电压下,De-

vice A和Device B的 I - V 曲线具有明显的对称特性,这符合两个背靠背肖特基结的MSM结构光电探测器的 I - V 特性规律.由图可知,经过金属Al NPs的修饰,在15 V的偏压下,Device A的暗电流由Device B的16 nA减小到10 nA,降低为原来的62.5%,这主要归因于部分金属Al NPs表面会被氧化形成一层很薄的Al₂O₃薄膜,对 β -Ga₂O₃薄膜表面起到钝化作用;其次,金属Al NPs与 β -Ga₂O₃薄膜之间会形成肖特基结,增加了载流子耗尽,从而进一步抑制暗电流的增大^[20,26,27].在254 nm波长紫外光照射下,可以看到Device A和Device B的电流都得到了很大的提升,在15 V偏压下光电流分别达到了20和4.24 μ A,这表明两个探测器具有很强的日盲波段光的探测能力;两个探测器的光暗电流比分别达到了2000和253. Device A的光暗比是Device B的7.9倍,这表明在254 nm波长紫外光照射下,金属Al NPs对Device A的光电流的提升起到了很大的作用.

光谱响应度(R)是表征探测器光电转化能力的重要指标,图3(b)为连续光谱下的Device A和Device B的光谱响应度的测试结果.两个探测器在250–255 nm波长附近光谱响应度都达到了最大值,分别为28.78和10.25 A/W,紫外/可见光抑制比分别达到 2.6×10^3 和 2.45×10^2 .这表明两个探测器都具有很好的波长选择

图2 (网络版彩图) (a) 探测器制备流程; 溅射时间分别为30 s (b), 60 s (c), 90 s (d)时对应的Al纳米颗粒SEM图, 插图为对应纳米颗粒半径大小统计结果

Figure 2 (Color online) (a) The preparation process of detector. The SEM images of Al NPs corresponding to the sputtering time of 30 s (b), 60 s (c), and 90 s (d). Inset is the statistical diagram of the radius of the corresponding nanoparticles.

图 3 (网络版彩图) (a) 探测器A和探测器B的光暗电流与电压关系图(254 nm波长光照); (b) 探测器A和探测器B在15 V偏压下的光谱响应度与波长关系图

Figure 3 (Color online) (a) The I - V curves of the Device A and Device B under dark condition and 254 nm light illumination. (b) The responsivity for Device A and Device B as a function of wavelength at 15 V.

特性. 与Device B相比, 经过金属Al NPs修饰后, Device A的光谱响应度提升了2.8倍, 同时紫外/可见光抑制比提升了10.6倍, 此外可以发现, Device A与Device B光谱响应度的峰值位置存在偏差, 这归因于Device A表面的金属纳米等离子体效应, 其可以有效调节探测器光谱响应度的峰值位置即对探测器的波长响应具有选择特性^[28-31].

为了进一步研究金属Al NPs对探测器光电特性的影响, 本文根据公式^[32]计算了Device A和Device B的光谱响应度(R)、探测率(Detectivity)以及线性动态范围(Linear Dynamic Range, LDR)随电压变化情况, 如图4所示. 两个探测器的光谱响应度(R)和探测率随着电压的增大而增大, 在15 V偏压下, Device A的光谱响应度和探测率达到最大值为23.2 A/W和 2×10^{11} Jones, 与Device B比较, 分别提升了4.7倍和6倍, 与图3(b)中连续光照射下相比, 光谱响应度值大小存在差异, 这主要

图 4 (网络版彩图)探测器A和探测器B光谱响应度(a)、探测率(b)、线性动态范围(c)与电压关系图

Figure 4 (Color online) The responsivity (a), detectivity (b) and LDR (c) for Device A and Device B as a function of bias voltage.

归因于两者之间的紫外光源不一样, 紫外光照强度存在差异, 从而引起光电流以及光谱响应度的差别^[33-35]; 动态线性范围随着电压先增大后趋于平稳, 在15 V电压下, Device A的LDR达到66 dB, 是Device B的1.4倍, 较大的线性动态范围表明探测器具有较强的微弱光探测能力, 这表明在金属Al NPs作用下, 探测器对光的吸收和光电转换能力有所提高.

光谱响应速度是表征探测器性能的另一个重要指标, 它反映了探测器对光谱的敏感程度. 图5(a)是Device A在15 V偏压下和光照强度为 0.36 mW/cm^2 下的动态 I - t 特性曲线, 实验中通过多次交替打开与关闭光

图 5 (网络版彩图) 探测器A在15 V偏压下对254 nm光响应的 I - t 特性. (a) 循环曲线; (b) 光响应时间拟合曲线

Figure 5 (Color online) (a) I - t characteristics of Device A under dark and 254 nm light; (b) the exponential curves fitting of the rise (τ_r) and decay (τ_d) time of Device A.

源开关, 记录器件所表现出来的电流变化情况. 由图可知, 经过多次黑暗与光照之间的变换, Device A的光电流与暗电流均具有较好的重复性; 且经过多次循环, 光电流没有明显衰减. 在关闭光源开关后, 电流能够迅速减小到初始位置, 这表明Device A能够快速、准确地追踪254 nm紫外光信号的变化, 具有很强的日盲波段光探测能力. 图5(b)是通过单指数公式^[25]对探测器电流循环曲线的上升沿和下降沿进行拟合来定量分析探测器对254 nm波长紫外光的响应时间. 通过拟合得到Device A的上升时间为 $t_{r1}/t_{r2}=0.46/1.18$ s, 下降时间 $t_{d1}/t_{d2}=0.94/2.08$ s. 这与没有金属Al NPs修饰的探测器响应时间相差不大^[25], 这表明金属Al NPs的存在对探测器光谱响应时间影响不大.

4 讨论和结论

由实验结果可以得到, 经过金属半径为30 nm的Al NPs修饰后, β -Ga₂O₃探测器的光电特性得到了很大提升, 其主要原因是降低了探测器暗电流的同时增加了器件的光电流. 探测器暗电流的降低主要因为部分金属Al NPs的氧化, 在金属颗粒与 β -Ga₂O₃薄膜界面处形成一层Al₂O₃薄膜层, 这对 β -Ga₂O₃薄膜表面起到钝化作用^[14,36]; 其次, 金属Al NPs与 β -Ga₂O₃薄膜之间会形成肖特基结, 耗尽了 β -Ga₂O₃薄膜表面附近的载流子, 两者共同的存在致使暗电流降低. 探测器光电流以及光谱响应度提升的主要原因是: 在254 nm波长紫外光照射下, 半径为30 nm左右的金属Al NPs中的电子会重新进行分布, 从而形成局域电场, 同时这些电子会与入射波长发生集体共振效应即LSPR效应^[15,22,24,25]. 一方面, 金属Al NPs对入射光的散射特性, 增加了光在 β -Ga₂O₃薄膜上的光程长度, 提升了 β -Ga₂O₃薄膜对入射光的捕获能力, 增强了对光的吸收; 另一方面, 局域电场的存在以及LSPR效应使局域电场强度增强, 促进了光生载流子的产生以及分离, 且LSPR效应产生的能量可以通过金属Al NPs直接转移给 β -Ga₂O₃薄膜, 进一步增强了光生载流子的产生^[25,34,37], 最终实现了光电探测器光电特性的提升.

综上所述, 本文采用磁控溅射技术制备金属Al NPs来修饰 β -Ga₂O₃薄膜, 实现了高性能、低成本、工艺简单的基于金属Al NPs等离子激元效应增强 β -Ga₂O₃日盲光电探测器的研制. 通过优化金属Al NPs的几何尺寸, 使其在254 nm紫外光下产生LSPR效应, 从而增强 β -Ga₂O₃薄膜对紫外光的吸收和促进光生载流子的产生与分离, 最终获得光谱响应度和探测率分别为23.2 A/W和 2×10^{11} Jones A/W, 紫外/可见光抑制比为 2.6×10^3 , 线性动态范围为66 dB的高性能日盲光电探测器, 与原器件相比, 分别提升了4.7, 6, 10.6和1.4倍, 同时探测器的暗电流降低为原来的62.5%. 本研究为金属Al NPs在日盲波段光电探测器上的应用提供了理论与实验基础, 为进一步提升日盲紫外光电探测器光电性能提供了新的方法.

参考文献

- Guo D, Guo Q, Chen Z, et al. Review of Ga₂O₃-based optoelectronic devices. *Mater Today Phys*, 2019, 11: 100157
- He T, Zhang X, Ding X, et al. Broadband ultraviolet photodetector based on vertical Ga₂O₃/GaN nanowire array with high responsivity. *Adv Opt*

- Mater*, 2019, 7: 1801563
- 3 Li D, Sun X, Song H, et al. Realization of a high-performance GaN UV detector by nanoplasmonic enhancement. *Adv Mater*, 2012, 24: 845–849
 - 4 Li Z, Jiao T, Li W, et al. Solar-blind ultraviolet photodetectors based on homoepitaxial β -Ga₂O₃ films. *Opt Mater*, 2021, 122: 111665
 - 5 Wu C, Guo D Y, Zhang L Y, et al. Systematic investigation of the growth kinetics of β -Ga₂O₃ epilayer by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Appl Phys Lett*, 2020, 116: 072102
 - 6 Bao G, Li D, Sun X, et al. Enhanced spectral response of an AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetector with Al nanoparticles. *Opt Express*, 2014, 22: 24286–24293
 - 7 Zhang Y C, Li Y F, Wang Z Z, et al. Investigation of β -Ga₂O₃ films and β -Ga₂O₃/GaN heterostructures grown by metal organic chemical vapor deposition. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 117311
 - 8 Xu J, Zheng W, Huang F. Gallium oxide solar-blind ultraviolet photodetectors: A review. *J Mater Chem C*, 2019, 7: 8753–8770
 - 9 Li K, Yang X, Tian Y, et al. Ga₂O₃ solar-blind position-sensitive detectors. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 117312
 - 10 Cui S, Mei Z, Zhang Y, et al. Room-temperature fabricated amorphous Ga₂O₃ high-response-speed solar-blind photodetector on rigid and flexible substrates. *Adv Opt Mater*, 2017, 5: 1700454
 - 11 Xu Y, An Z, Zhang L, et al. Solar blind deep ultraviolet β -Ga₂O₃ photodetectors grown on sapphire by the Mist-CVD method. *Opt Mater Express*, 2018, 8: 2941–2947
 - 12 Wang Y B, Xu W H, You T G, et al. β -Ga₂O₃ MOSFETs on the Si substrate fabricated by the ion-cutting process. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 277311
 - 13 Qin Y, Li L, Zhao X, et al. Metal-semiconductor-metal ϵ -Ga₂O₃ solar-blind photodetectors with a record-high responsivity rejection ratio and their gain mechanism. *ACS Photon*, 2020, 7: 812–820
 - 14 Zhi Y S, Liu Z, Zhang S H, et al. 16×4 linear solar-blind UV photoconductive detector array based on β -Ga₂O₃ film. *IEEE Trans Electron Devices*, 2021, 68: 3435–3438
 - 15 Hu K, Chen H, Jiang M, et al. Broadband photoresponse enhancement of a high-performance *t*-Se microtube photodetector by plasmonic metallic nanoparticles. *Adv Funct Mater*, 2016, 26: 6641–6648
 - 16 Yi M F, Zhu Z S, Li L L. Electric field properties of coupled structure based on silver nanocube and silver film. *Infrared Laser Eng*, 2017, 46: 0720003
 - 17 Wang Y L, Huang X Y, Zhou D, et al. Graphene-on-plasmonic slot waveguide photodetector (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 054204 [王逸伦, 黄鑫宇, 周德, 等. 表面等离子体狭缝波导上的石墨烯光电探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054204]
 - 18 Bai Y, Gao C, Yin Y. Fully alloyed Ag/Au nanorods with tunable surface plasmon resonance and high chemical stability. *Nanoscale*, 2017, 9: 14875–14880
 - 19 Yu J, Yu M, Wang Z, et al. Improved photoresponse performance of self-powered β -Ga₂O₃/NiO heterojunction UV photodetector by surface plasmonic effect of Pt nanoparticles. *IEEE Trans Electron Devices*, 2020, 67: 3199–3204
 - 20 Qiao G, Cai Q, Ma T, et al. Nanoplasmonically enhanced high-performance metastable phase α -Ga₂O₃ solar-blind photodetectors. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 40283–40289
 - 21 West P R, Ishii S, Naik G V, et al. Searching for better plasmonic materials. *Laser Photon Rev*, 2010, 4: 795–808, arXiv: 0911.2737
 - 22 Zheng J, Yang W, Wang J, et al. An ultranarrow SPR linewidth in the UV region for plasmonic sensing. *Nanoscale*, 2019, 11: 4061–4066
 - 23 Yang X C, Liu H X, Li L L, et al. Review on influence factors of surface plasmon resonance for noble metal nanoparticles. *Funct Mater*, 2010, 2: 341–345
 - 24 Martin J, Proust J, Gérard D, et al. Localized surface plasmon resonances in the ultraviolet from large scale nanostructured aluminum films. *Opt Mater Express*, 2013, 3: 954–959
 - 25 Yu J, Lou J, Wang Z, et al. Surface modification of β -Ga₂O₃ layer using Pt nanoparticles for improved deep UV photodetector performance. *J Alloys Compd*, 2021, 872: 159508
 - 26 Sun B, Wang Z, Liu Z, et al. Tailoring of silver nanocubes with optimized localized surface plasmon in a gap mode for a flexible MoS₂ photodetector. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1900541
 - 27 Li J, Nie C, Sun F, et al. Enhancement of the photoresponse of monolayer MoS₂ photodetectors induced by a nanoparticle grating. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 8429–8436
 - 28 Zhang J, Zhang X, Li J, et al. Simultaneous visible and ultraviolet photoresponse improvement of MoS₂/ZnO heterostructure photodetector via

- direct resonant coupling of Au nanoparticles localized surface plasmon resonance. *Opt Mater*, 2022, 124: 111997
- 29 Huang H, Lai J, Lu J, et al. Performance enhancement of ZnO ultraviolet detector by localized surface plasmon resonance of Al nanoparticles. *Appl Phys A*, 2021, 127: 679
 - 30 Hou X, Zhao X, Zhang Y, et al. High-performance harsh-environment-resistant GaO_x solar-blind photodetectors via defect and doping engineering. *Adv Mater*, 2021, 34: 2106923
 - 31 Kang Y, Wang D, Fang S, et al. Coupling plasmonic Pt nanoparticles with AlGa_{0.4}N nanostructures for enhanced broadband photoelectrochemical-detection applications. *ACS Appl Nano Mater*, 2021, 4: 13938–13946
 - 32 Yu J, Dong L, Peng B, et al. Self-powered photodetectors based on β -Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction with ultrahigh current on/off ratio and fast response. *J Alloys Compd*, 2020, 821: 153532
 - 33 Li S, Yue J Y, Wu C, et al. Self-powered ultraviolet photodetector based on β -Ga₂O₃/WO₃ NPs heterojunction with low noise and high visible rejection. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 26724–26730
 - 34 Kaushik S, Karmakar S, Bisht P, et al. Localized surface plasmon resonance-enhanced solar-blind Al_{0.4}Ga_{0.6}N MSM photodetectors exhibiting high-temperature robustness. *Nanotechnology*, 2022, 33: 145202
 - 35 Tan P, Zhao X, Hou X, et al. Balancing the transmittance and carrier-collection ability of Ag nanowire networks for high-performance self-powered Ga₂O₃ Schottky photodiode. *Adv Opt Mater*, 2021, 9: 2100173
 - 36 Liu Z, Wang X, Liu Y, et al. A high-performance ultraviolet solar-blind photodetector based on a β -Ga₂O₃ Schottky photodiode. *J Mater Chem C*, 2019, 7: 13920–13929
 - 37 Guo J, Li S, He Z, et al. Near-infrared photodetector based on few-layer MoS₂ with sensitivity enhanced by localized surface plasmon resonance. *Appl Surf Sci*, 2019, 483: 1037–1043

The performance of Al plasmon enhanced β -Ga₂O₃ solar-blind photodetector

YU JianGang^{1,3*}, LI Qiang¹, YAO HuiZhen¹, LI XiuYuan¹, YU Miao³, JIA RenXu³ & ZHANG LiChun^{2*}

¹ State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;

³ Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

The surface plasmon effect based on metal nanoparticles can enhance the local electric field strength and exhibit excellent light trapping capabilities, which can effectively improve the performance of optoelectronic devices. In this study, combined with the Finite Difference Time Domain (FDTD) method and magnetron sputtering technology, the effects of metallic Al nanoparticles on the photoelectric characteristics of β -Ga₂O₃ solar-blind photodetectors are studied theoretically and experimentally. The results show that Al nanoparticles with a radius of 30 nm can produce an LSPR effect under 254 nm solar-blind ultraviolet light. Due to the LSPR effect of Al NPs, the spectral responsivity and detectivity of the β -Ga₂O₃ solar-blind photodetector have been increased by 4.7 times and 6 times, respectively, and the dark current of the device has been reduced to 62.5% of the original value. This study provides a theoretical and experimental basis for the application of Al NPs in the solar-blind band, and provides a new method for further improving the performance of solar-blind photodetectors.

solar-blind photodetectors, surface plasmons, gallium oxide, Al nanoparticles

PACS: 85.60.Gz, 73.50.Mx, 78.66.Fd, 78.67.Bf

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0008](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0008)