



DOI: 10.12086/oe.2018.170728

表面等离子体在氧化镓基紫外探测器中的应用

石雄林, 刘宏宇, 侯爽, 钱凌轩*, 刘兴钊

电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 611731

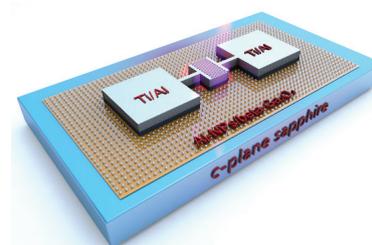
摘要: 局域表面等离子体共振是一种改善光电探测器性能的有效方法。本文为了提高 β -氧化镓(β -Ga₂O₃)薄膜金属-半导体-金属(MSM)日盲紫外探测器的性能, 提出了在 β -氧化镓薄膜表面利用快速热退火的方法形成分散的铝纳米粒子(AI-NPs), 增强薄膜对光的吸收。运用此方法制备的 AI-NPs/ β -Ga₂O₃探测器不仅降低了暗电流, 同时也提升了光响应度和探测率。在波长 254 nm 紫外光照、10 V 偏压下, 该器件的光响应度达到了 2.7 A/W, 探测率达到了 1.35×10^{14} cm·Hz^{1/2}·W⁻¹, 与 β -Ga₂O₃探测器相比, 分别提升了 1.5 倍和 2 倍。

关键词: 局域表面等离子体共振; 铝纳米粒子; β -氧化镓; 日盲紫外探测器

中图分类号: TN23

文献标志码: A

引用格式: 石雄林, 刘宏宇, 侯爽, 等. 表面等离子体在氧化镓基紫外探测器中的应用[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170728



The applications of surface plasmons in Ga₂O₃ ultraviolet photodetector

Shi Xionglin, Liu Hongyu, Hou Shuang, Qian Lingxuan*, Liu Xingzhao

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract: Localized surface plasmon resonance (LSPR) provides an effective approach to further improve the performance of photodetectors. In this work, we introduce the Al nanoparticles (Al-NPs) on the surface of β -Ga₂O₃ thin film by rapid thermal annealing in order to improve the performance of β -Ga₂O₃ solar-blind ultraviolet photodetectors Al nanoparticles arrays, which can not only decrease the dark current but also enhance the responsivity and specific detectivity. As a result, the responsivity of β -Ga₂O₃-based metal-semiconductor-metal (MSM) solar-blind ultraviolet photodetectors with Al-NPs can reach 2.7 A/W, and the specific detectivity can reach 1.35×10^{14} cm·Hz^{1/2}·W⁻¹ under the 254 nm radiation and 10 V bias. Both parameters are more than 1.5 times and 2 times higher than those without Al nanoparticles, respectively.

Keywords: localized surface plasmon resonance (LSPR); Al nanoparticles; β -Ga₂O₃; solar-blind ultraviolet photodetectors

Citation: Shi X L, Liu H Y, Hou S, *et al.* The applications of surface plasmons in Ga₂O₃ ultraviolet photodetector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170728

收稿日期: 2017-12-16; 收到修改稿日期: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61504022)

作者简介: 石雄林(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事电子信息材料与元器件的研究。E-mail: xlshi@std.uestc.edu.cn

通信作者: 钱凌轩(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事半导体材料与器件的研究。E-mail: lxqian@uestc.edu.cn

1 引言

紫外探测技术是光电技术领域中的一个重要分支。近年来,紫外探测器在军事领域与民用领域上得到了广泛的应用,如导弹来袭预警、环境监测、光通信、紫外辐射监控等,引起了学者们越来越浓厚的研究兴趣。紫外光区域的电磁波频谱范围为 10 nm~400 nm,又可分为近紫外(UV-A, 315 nm~400 nm)、中紫外(UV-B, 280 nm~315 nm)和深紫外(UV-C, 10 nm~280 nm)。由于波长小于 280 nm 的紫外光被大气中的臭氧层强烈吸收而难以到达地球表面,因此该波段的紫外光又被称为“日盲紫外”。

制备日盲紫外探测器的材料采用宽禁带半导体,主要包括锌镁氧(ZnMgO)、金刚石、铝镓氮(AlGa_N)、氧化镓(α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε -Ga₂O₃)等。在这些宽禁带半导体材料中, β -Ga₂O₃的直接带隙宽度为 4.9 eV,对可见光、近紫外和中紫外波段具有较高的透射率,同时还具有良好的热稳定性和化学稳定性,因此在日盲紫外探测技术上拥有较大的潜在价值。目前,许多高性能的 β -Ga₂O₃ 薄膜日盲紫外探测器已经被报道。2007 年,日本学者 Oshima^[1]利用等离子体辅助分子束外延在 c 面蓝宝石基片上成功制备了单晶 β -Ga₂O₃ 薄膜,并成功研制了金属-半导体-金属(metal-semiconductor-metal, MSM)型日盲紫外探测器;2014 年,国内学者 Guo 等人^[2]在氧气氛围下对采用激光分子束外延生长的 β -Ga₂O₃ 进行原位退火,从而减少 β -Ga₂O₃ 内部的氧空位,提高了探测器的性能(暗电流小、响应度高、响应时间短);2017 年, Qian 等人^[3]对 c 面蓝宝石基片进行高温预处理,再采用分子束外延生长 β -Ga₂O₃ 薄膜,该方法制备得到了高质量的单晶薄膜材料,较大地提高了日盲紫外探测器的探测率。然而,为了进一步降低探测器的暗电流,提高光响应度和探测率,依然需要进行不断地研究。

最近,局域表面等离子体共振为改善 β -Ga₂O₃ 薄膜日盲紫外探测器性能提供了一种新的方法^[4-5]。研究人员常采用贵金属纳米粒子(金、银、铂)来产生局域表面等离子体共振。例如, An 等人^[6]使用金纳米粒子提升 β -Ga₂O₃ 日盲紫外探测器性能,但金纳米颗粒产生局域表面等离子体共振的激发波段在可见光范围内,对探测器在日盲紫外区域的改善并不理想。铝纳米粒子中的局域表面等离子体被激发的波长范围为 200 nm~800 nm^[7-8],其最大吸收峰所对应的激发波长依赖于纳米粒子的尺寸、形状、间距、介电环境以及

介电性能^[9-12],正因如此,铝纳米粒子能够被日盲紫外光激发产生局域表面等离子体共振,这种效应可被应用在日盲紫外探测技术中。本文研究了铝纳米粒子对 β -Ga₂O₃ 薄膜 MSM 型日盲紫外探测器性能的影响。结果表明,铝纳米粒子的存在能够有效地改善 β -Ga₂O₃ 薄膜 MSM 型日盲紫外探测器性能,为制备高性能的日盲紫外探测器提供了简单、有效的方法。

2 实验内容

首先,将 c 面蓝宝石基片(5 mm×10 mm)依次在丙酮、无水乙醇和去离子水中超声清洗各 3 min 并烘干,通过分子束外延法在清洗后的 c 面蓝宝石基片上生长厚度约为 100 nm 的单晶 β -Ga₂O₃ 薄膜。生长腔室通过液氮冷却,真空度保持在 2.0×10^{-3} Pa 左右,基片温度为 760 °C,蒸发源的温度保持在 940 °C,射频源的输入和反射功率分别为 300 W 和 6 W,氧气流量控制在 2.0 sccm,薄膜的外延生长速率约为 0.8 nm/min。 β -Ga₂O₃ 薄膜外延生长 2 h 后,闭合挡板结束外延,关闭液氮,并停止基片与镓源加热,让衬底温度以 10 °C/min 的速率降到 50 °C 以下,再取出并置于氮气柜中保存。然后,通过电子束蒸发在 β -Ga₂O₃ 薄膜表面沉积厚度 10 nm 的铝层,沉积速率为 0.1 nm/s。沉积完成后,待温度降到室温,取出样品,并放入快速热退火炉中,通入氮气,以 50 °C/s 的速率升温到 500 °C 保持 10 min。完毕后,自然降至室温并放入氮气柜保存。最后,通过光刻技术在覆盖有铝纳米粒子的 β -Ga₂O₃ 薄膜上形成图形化电极,并利用电子束蒸发沉积 20 nm 的 Ti 和 100 nm 的 Al,剥离去胶后形成肖特基接触的叉指电极。叉指长度为 180 μ m,宽度为 10 μ m,间距为 10 μ m,对数为 20 对。为了改善电极接触,将制备好的 Ti/Al 叉指电极在氮气环境下以 400 °C 快速退火 5 min。通过以上过程制备的金属-半导体-金属日盲紫外探测器的结构示意图如图 1 所示。其中,表面无铝纳米粒子的 β -Ga₂O₃ 薄膜制备的探测器称作 β -Ga₂O₃ 探测器,表面存在铝纳米粒子的 β -Ga₂O₃ 薄膜制备的探测器称作 Al-NPs/ β -Ga₂O₃ 探测器。

β -Ga₂O₃ 薄膜和铝纳米粒子的材料表征以及探测器件的性能将通过以下测试方法进行分析。 β -Ga₂O₃ 薄膜表面形态通过场发射扫描电子显微镜(FE-SEM JSM-6490LV)进行观察;吸收光谱由紫外-可见-近红外分光光度计(UV3600 Shimadzu)扫描测试;通过 Agilent 4155B 测试设备测试器件的电流-电压特性和瞬态响应

特性,并用低压汞灯作为紫外光源发射波长为 254 nm 的紫外光;器件光谱响应采用紫外探测器光谱响应系统(Zolix DSR100-X150AUV)进行测试。

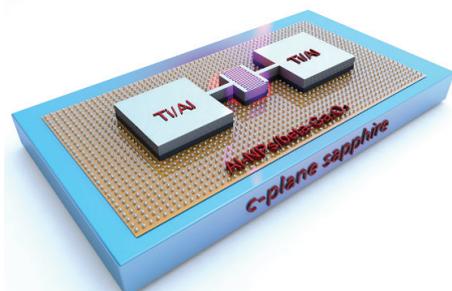


图 1 MSM 日盲紫外探测器结构示意图

Fig. 1 The schematic illustration of the MSM solar-blind ultraviolet photodetector

3 实验结果

在许多研究当中,为了形成金属纳米粒子,研究者们采取快速热退火的方法^[13-15],将几个纳米或几十个纳米厚的金属层进行快速热退火,金属层吸收足够的能量并在衬底表面收缩形成纳米粒子。该方法操作简单方便,成本低。图 2 展示了未沉积铝层的 β - Ga_2O_3 薄膜 SEM 图,以及在 β - Ga_2O_3 薄膜表面沉积 10 nm 厚的铝层在氮气环境下快速热退火后的 SEM 图(插图显示为铝纳米粒子直径分布直方图)。从图 2(a)可以看出,未沉积铝层的 β - Ga_2O_3 薄膜表面光滑平整,而从图 2(b)可以明显地看到,在 β - Ga_2O_3 薄膜表面上沉积厚度 10 nm 的铝层和快速热退火之后,形成了粒子直径呈正态分布的铝纳米粒子。图 2(b)中的直方图表明该粒子直径主要分布在 12 nm 到 40 nm 之间,其中数量最多的粒子直径为 23.0 nm(拟合曲线),粒子的平均直径为 23.4 nm。

图 3 为表面无铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜以及铝纳米粒子覆盖的 β - Ga_2O_3 薄膜的紫外-可见光吸收谱。由图中可看到,表面无铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜光吸收度在波长 270 nm 处出现一个吸收谷,而覆盖有铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜的吸收谷出现在 350 nm 左右,发生了红移,这种现象在其他研究中同样被报道过^[7]。在日盲紫外波段范围内,同表面无铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜相比,表面覆盖铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜的光吸收增强,类似的现象在氮化镓紫外探测器以及对砷化镓太阳能电池的研究中也被观察到^[16-17],这主要是由于铝纳米粒子的存在使入射光在 β - Ga_2O_3 表面散射增强^[18]。另外,铝纳米粒子受到激发,入射

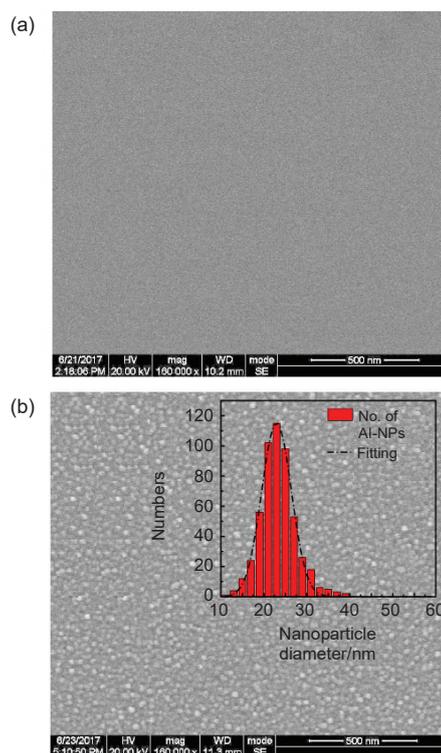


图 2 β - Ga_2O_3 薄膜 SEM 图。(a) 表面无铝纳米粒子的 β - Ga_2O_3 薄膜;(b) 厚度 10 nm 的铝层快速热退火形成的铝纳米粒子以及粒子直径分布直方图(插图)

Fig. 2 Top view FE-SEM images of β - Ga_2O_3 thin film with and without Al-NPs. (a) β - Ga_2O_3 thin film without Al-NPs; (b) β - Ga_2O_3 thin film with Al-NPs arrays fabricated by annealing 10 nm-thickness Al thin film and particle size histogram (inset).

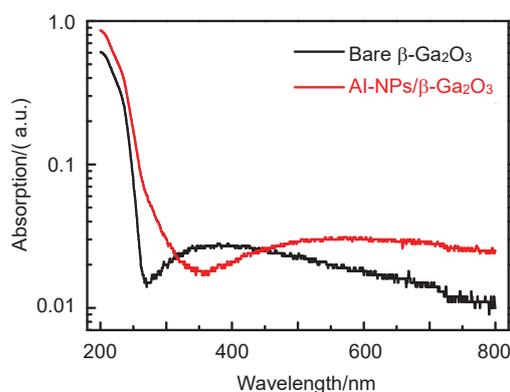


图 3 表面有无铝纳米粒子 β - Ga_2O_3 薄膜的紫外-可见光吸收光谱

Fig. 3 UV/vis absorption spectra of β - Ga_2O_3 with and without Al-NPs

光与铝纳米粒子相互作用而发生局域表面等离子体共振。而在近紫外波段,表面覆盖铝纳米粒子的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的光吸收反而减弱,其中机理还需进一步研究。

图 4(a)、图 4(b)分别为两种 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 紫外探测器在无/有紫外光照下的电流-电压特性曲线,其中紫外光源的波长为 254 nm,光功率密度为 $34 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。由图 4(a)可明显地看到, Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的暗电流 ($0.9 \text{ pA}@10 \text{ V}$)比 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的暗电流 ($2.4 \text{ pA}@10 \text{ V}$) 更小。众所周知,当铝暴露在空气中时,其表面会迅速形成一层致密的超薄氧化铝绝缘层,该绝缘层能够钝化 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面,使得 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 与金属电极间的肖特基势垒增大^[19],从而降低 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的暗电流。从图 4(b)展示的器件在紫外光照下的电流-电压特性曲线中可看到, Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的光电流 ($84.4 \text{ nA}@10 \text{ V}$)比 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的光电流 ($51.8 \text{ nA}@10 \text{ V}$)更大。通过上述对 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的紫外-可见光吸收光谱的分析,表面存在铝纳米粒子的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜对波长 254 nm 的紫外光的吸收比表面无铝纳米粒子的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜更强,从而促使表面存在铝纳米粒子的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜在紫外光照下产生更多的电子-空穴对^[15],使得探测器的光电流增大。另外,当铝表面等离子体受到光照激发,入射光与铝纳米粒子相互作用而发生共振,使纳米粒子附近的电磁场增强^[20],加速了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面电子的跃迁,这也是探测器的光电流增大的另一个重要原因。

为了更加全面地评估 MSM 型日盲紫外探测器的性能,定量计算了探测器的光响应度(R)以及探测率

(D^*),光响应度指的是光电转换器件对施加的光信号的光电转换能力,偏压一定的情况下,其大小为探测器在有效光照面积内单位光强下的光生电流,计算式:

$$R = \frac{I_{\text{ph}} - I_{\text{dark}}}{P_{\lambda} S}, \quad (1)$$

其中: I_{ph} 为探测器件的光电流, P_{λ} 为入射光的光功率密度($P_{\lambda} = 34 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), I_{dark} 为探测器件的暗电流, S 为有效光照面积($S = 7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$),由式(1)计算得,在 10 V 偏压下, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器与 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的光响应度分别为 $1.68 \text{ A}/\text{W}$ 和 $2.74 \text{ A}/\text{W}$ 。

探测率 (D^*)指探测器件在正常工作下探测最小光信号的能力,其计算式:

$$D^* = R \sqrt{\frac{S}{2eI_{\text{dark}}}}, \quad (2)$$

其中 e 为电子电荷量($e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)。由式(1)计算得,在 10 V 偏压下, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器与 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的探测率分别为 $5.04 \times 10^{13} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 $1.35 \times 10^{14} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

图 5 为 10 V 偏压下, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器与 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的瞬态响应特性,测试光源为波长 254 nm,光功率密度 $34 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光,开光时间各 5 s。从图 5(a)中可清楚地看到,器件重复性强,工作稳定。同时,施加紫外光照的情况下, Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的光电流明显地提高,再一次说明铝纳米粒子的存在能够有效增大 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜日盲紫外探测器的光电流。图 5(b)中比较了探测器件的上升时间(最大光电流值的 10% 上升到 90% 所需的时间)

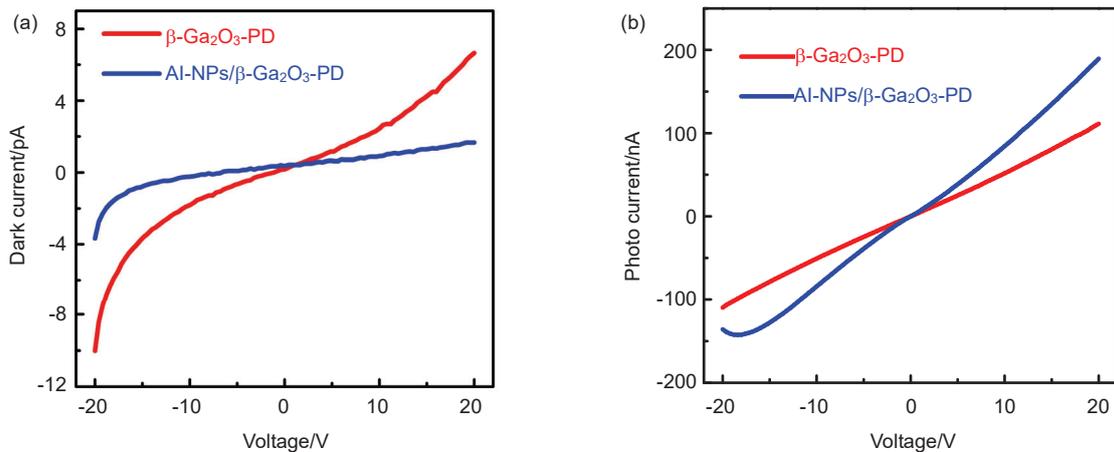


图 4 表面有无铝纳米粒子 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜 MSM 日盲紫外探测器的电流-电压特性曲线。(a) 无紫外光照下的电流-电压特性; (b) 254 nm, $34 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外光照下的电流-电压特性

Fig. 4 The current-voltage (I - V) of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -based MSM solar-blind photodetectors with and without Al-NPs. (a) The dark current characteristics; (b) The photocurrent characteristics (254 nm, $34 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)

和衰减时间(最大光电流值的 90% 衰减到 10% 所需的时间), Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的上升时间(1.6 s)比 β - Ga_2O_3 探测器的上升时间(1.3 s)更长, 其衰减时间(0.65 s)比 β - Ga_2O_3 探测器的衰减时间(0.28 s)也 longer。

为了进一步详细地研究探测器件的瞬态响应, 通过双指数弛豫方程对瞬态响应曲线进行了函数拟合, 拟合方程如下:

$$I = I_0 + A \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (3)$$

式中: I_0 为施加光照或移去光照后电流达到稳定的值, t 为时间变量, A 、 B 为常数, τ_1 、 τ_2 为弛豫时间常数, τ_r 、 τ_d 分别表示上升时间常数和衰减时间常数。如图 5(c)、5(d)所示, β - Ga_2O_3 和 Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的瞬态响应曲线被拟合, 并估算了器件的上升时间常数(τ_{r1}/τ_{r2})以及衰减时间常数(τ_{d1}), β - Ga_2O_3 探测器的上升和衰减时间分别为(0.09 s/1.15 s)、(0.03 s/0.47 s); Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的上升和衰减时间分别为(0.1 s/1.00 s)、(0.04 s/0.57 s)。通过以上分析可知, 铝

纳米粒子的存在导致了 β - Ga_2O_3 薄膜 MSM 日盲紫外探测器的复合时间有所延长。当器件内部增益变大时, 载流子的俘获响应过程也会变慢, 使得器件持续光电导效应加强, 从而导致了 Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的复合时间被延长^[21]。

图 6 展现了 10 V 偏压下, β - Ga_2O_3 与 Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器在对数坐标中的光谱响应特性(插图为线性坐标下的光谱响应)。两种 β - Ga_2O_3 探测器在 240 nm 处达到了光响应度的峰值, Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器在日盲紫外波段的光响应度比 β - Ga_2O_3 探测器的光响应度更大, 而在近、中紫外波段, Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的光响应度与 β - Ga_2O_3 探测器相比反而更小。因此, Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的衰减率(254 nm 处的光响应度与 350 nm 处的光响应度之比)大幅度地提高, 达到了 10^3 , 比 β - Ga_2O_3 探测器的衰减率(10^2)提升了 10 倍, 从而保证了器件对日盲紫外区的光电探测更加精确。如图 6 插图所示, 两种 β - Ga_2O_3 探测器的截止波长都在 250 nm 左右, 与 β - Ga_2O_3 的禁带宽

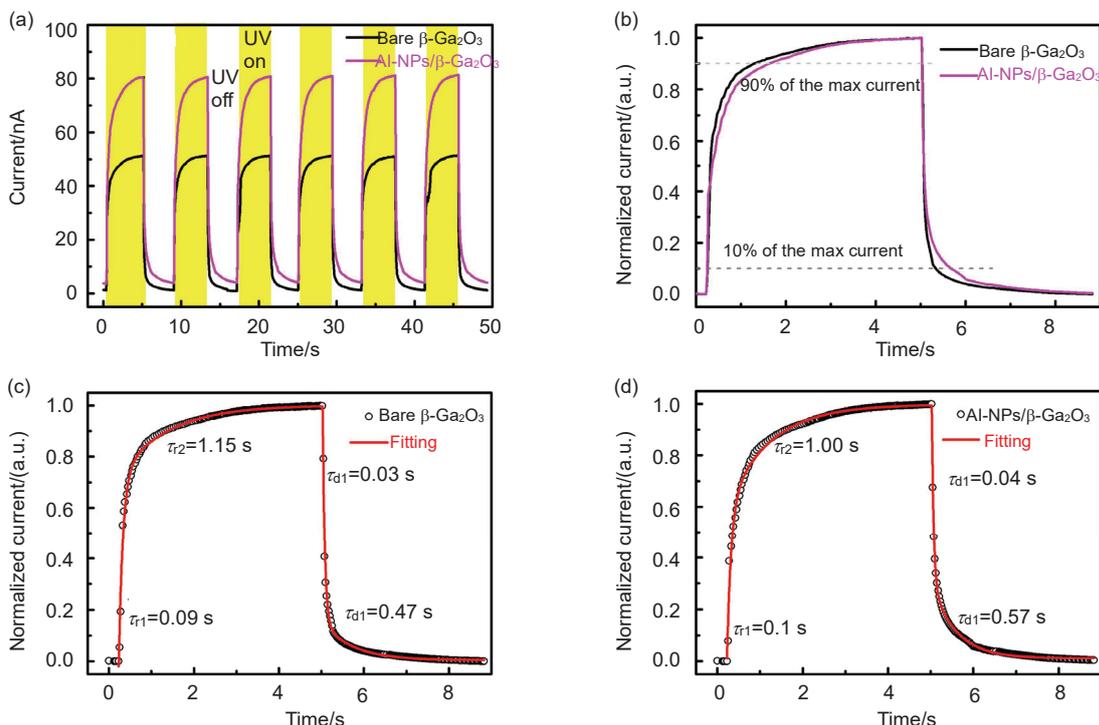


图 5 表面有无铝纳米粒子 β - Ga_2O_3 薄膜 MSM 日盲紫外探测器的瞬态响应特性。(a) 探测器件多个周期瞬态响应; (b) 探测器件单个周期归一化瞬态响应; (c) 器件 β - Ga_2O_3 上升和衰减过程的实验数据和拟合曲线; (d) 器件 Al-NPs/ β - Ga_2O_3 上升和衰减过程的实验数据和拟合曲线

Fig. 5 Transient response of the β - Ga_2O_3 -based MSM Solar-blind photodetectors with and without Al-NPs. (a) Transient response for multicycles; (b) Normalized transient response; (c) Experimental and fitted curves of the rise and decay processes for β - Ga_2O_3 PD; (d) Experimental and fitted curves of the rise and decay processes for Al-NPs/ β - Ga_2O_3 PD

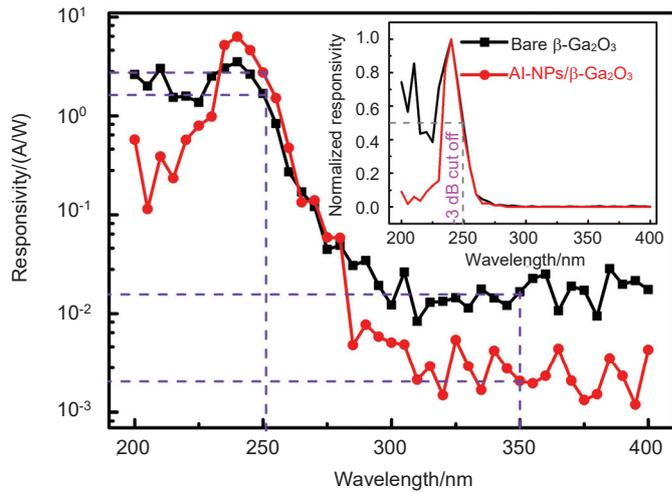


图6 表面有无铝纳米粒子 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜 MSM 日盲紫外探测器在对数坐标下的光谱响应特性和线性坐标下归一化的光谱响应特性(插图)

Fig. 6 Spectral response of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -based MSM Solar-blind photodetectors with and without Al-NPs on a logarithmic scale and normalized spectral response at a linear scale (inset)

度(4.9 eV)所对应的截止波长是相吻合的。

从上面的分析得出, 表面存在铝纳米粒子的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MSM 型日盲紫外探测器存在更高的响应度。从电子转移过程的能带图(图7)进行定性分析, 其响应度增强的原因可能有以下几种: 1) 铝纳米粒子的存在使得入射光在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面的散射增强, 从而使 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜对入射光的吸收增加, 产生更多的光生电子-空穴对, 光响应度也相应地提高(过程 1); 2) 铝纳米粒子周围的电磁场增强促使 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面电子的跃迁(过程 2); 3) 当入射光照射到 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器表面时, 一部分被铝纳米粒子吸收, 吸收的光子使铝纳米粒子内部的电子发生跃迁, 产生热载流子(热电子

和热空穴), 而其中被激发的热电子有足够的能量跃过肖特基势垒进入到 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的导带^[22-24](过程 3), 从而使载流子的浓度增大, 器件的光响应度也增大。

4 结论

在本文介绍的工作中, 利用快速热退火的方法在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面形成了粒子直径呈正态分布的铝纳米粒子, 并成功制备了 Al-NPs/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲紫外探测器。铝纳米粒子的存在不仅降低探测器件的暗电流, 同时也增大了探测器件的光响应度和探测率, 这主要是由于铝纳米粒子氧化后形成的氧化铝钝化了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面, 使得器件暗电流降低; 除此之外, 铝纳

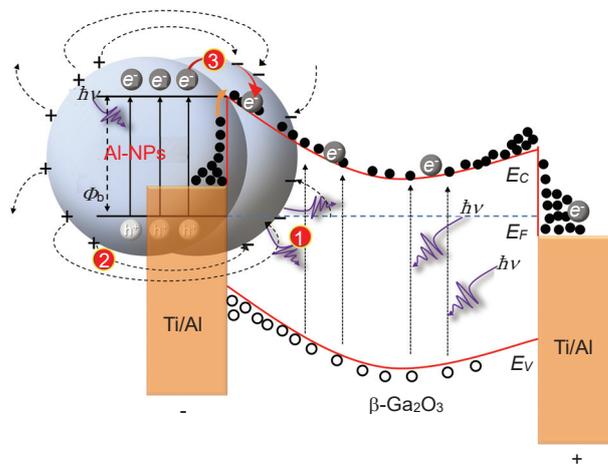


图7 表面有无铝纳米粒子 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜 MSM 日盲紫外探测器在 254 nm 紫外光照下的能带图

Fig. 7 Energy band diagrams of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -based MSM solar-blind photodetectors with Al-NPs under 254 nm UV-light illumination

米粒子增加了 β - Ga_2O_3 薄膜对光的吸收以及铝纳米粒子周围电磁场的增强促使了器件的内部增益变大, 从而导致器件光响应度和探测率增大。10 V 偏压下, Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的光响应度达到了 2.7 A/W, 比 β - Ga_2O_3 探测器的光响应度(1.68 A/W)提升了 1.5 倍; 探测率达到了 $1.35 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 比 β - Ga_2O_3 探测器的探测率($5.04 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)提升了 2 倍; 另外, Al-NPs/ β - Ga_2O_3 探测器的衰减率(10^3)得到大幅提高。然而, 其复合时间(0.65 s)比 β - Ga_2O_3 探测器(0.28 s)更长, 这是由于更高的内部增益往往会导致更强的持续光电导效应。通过以上结果证明, 铝纳米粒子作为在日盲紫外波段产生局域表面等离子体共振的金属材料, 为制备高性能的紫外探测器提供了成本低且有效的方法。

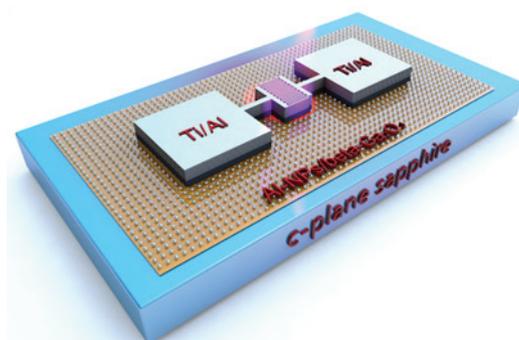
参考文献

- [1] Oshima T, Okuno T, Fujita S. Ga_2O_3 thin film growth on c-plane sapphire substrates by molecular beam epitaxy for deep-ultraviolet photodetectors[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46**(11): 7217–7220.
- [2] Guo D Y, Wu Z P, An Y H, et al. Oxygen vacancy tuned Ohmic-Schottky conversion for enhanced performance in β - Ga_2O_3 solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(2): 023507.
- [3] Qian L X, Zhang H F, LAI P T, et al. High-sensitivity β - Ga_2O_3 solar-blind photodetector on high-temperature pretreated c-plane sapphire substrate[J]. *Optical Materials Express*, 2017, **7**(10): 3643–3653.
- [4] Xu K C, Zhang C T, Lu T H, et al. Hybrid metal-insulator-metal structures on Si nanowires array for surface enhanced Raman scattering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(2): 185–191.
- [5] Zhou R, Li F P. Synthesis of nanoparticles by short pulsed laser ablation and its applications in nonlinear optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(2): 172–184.
周锐, 李峰平. 纳米颗粒的短脉冲激光烧蚀制备及其非线性光学应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(2): 172–184.
- [6] An Y H, Chu X L, Huang Y Q, et al. Au Plasmon enhanced high performance β - Ga_2O_3 solar-blind photo-detector[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2016, **26**(1): 65–68.
- [7] Chan G H, Zhao J, Schatz G C, et al. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of triangular aluminum nanoparticles[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2008, **112**(36): 13958–13963.
- [8] Wang Y, Ge C W, Zou Y F, et al. Plasmonic indium nanoparticle-induced high-performance photoswitch for blue light detection[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(2): 291–296.
- [9] Haynes C L, Van Duyne R P. Plasmon-sampled surface-enhanced Raman excitation spectroscopy[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, **107**(30): 7426–7433.
- [10] Sherry L J, Jin R C, Mirkin C A, et al. Localized surface Plasmon resonance spectroscopy of single silver triangular nanoparticles[J]. *Nano Letters*, 2006, **6**(9): 2060–2065.
- [11] Sherry L J, Chang S H, Schatz G C, et al. Localized surface Plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(10): 2034–2038.
- [12] Huang W Y, Qian W, El-Sayed M A. Coherent vibrational oscillation in gold prismatic monolayer periodic nanoparticle arrays[J]. *Nano Letters*, 2004, **4**(9): 1741–1747.
- [13] Villesen T F, Uhrenfeldt C, Johansen B, et al. Self-assembled Al nanoparticles on Si and fused silica, and their application for Si solar cells[J]. *Nanotechnology*, 2013, **24**(27): 275606.
- [14] Yang J, Luo F F, Kao T S, et al. Design and fabrication of broadband ultralow reflectivity black Si surfaces by laser micro/nanoprocessing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**(7): e185.
- [15] Yang L Y, Li X, Tuo X G, et al. Alloy nanoparticle plasmon resonance for enhancing broadband antireflection of laser-textured silicon surfaces[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(S4): A657–A663.
- [16] Li D B, Sun X J, Song H, et al. Realization of a high-performance GaN UV detector by nanoplasmonic enhancement[J]. *Advance Materials*, 2012, **24**(6): 845–849.
- [17] Nakayama K, Tanabe K, Atwater H A. Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 121904.
- [18] Pryce I M, Koleske D D, Fischer A J, et al. Plasmonic nanoparticle enhanced photocurrent in GaN/InGaN/GaN quantum well solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(15): 153501.
- [19] Zhang W, Xu J, Ye W, et al. High-performance AlGaN metal-semiconductor-metal solar-blind ultraviolet photodetectors by localized surface Plasmon enhancement[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(2): 021112.
- [20] Luo L B, Chen J J, Wang M Z, et al. Near-Infrared light photovoltaic detector based on GaAs nanocone array/monolayer graphene schottky junction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, **24**(19): 2794–2800.
- [21] Qian L X, Wu Z H, Zhang Y Y, et al. Ultrahigh-responsivity, rapid-recovery, solar-blind photodetector based on highly non-stoichiometric amorphous gallium oxide[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(9): 2203–2211.
- [22] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, et al. Photodetection with active optical antennas[J]. *Science*, 2011, **332**(6030): 702–704.
- [23] Wang F M, Melosh N A. Plasmonic energy collection through hot carrier extraction[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(12): 5426–5430.
- [24] White T P, Catchpole K R. Plasmon-enhanced internal photoemission for photovoltaics: theoretical efficiency limits[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(7): 073905.

The applications of surface plasmons in Ga₂O₃ ultraviolet photodetector

Shi Xionglin, Liu Hongyu, Hou Shuang, Qian Lingxuan*, Liu Xingzhao

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China



The schematic illustration of the MSM solar-blind ultraviolet photodetector

Overview: In recent years, Ultraviolet (UV) detectors have wide applications in civil and military areas, such as missile early warning systems, flame detection, environmental monitoring, optical communication and UV radiation calibration and monitoring and so on, so it has attracted considerable an amount of research interests. UV is an electromagnetic radiation with a wavelength from 10 nm to 400 nm. It is commonly subdivided into three regions: UVA (400 nm~315 nm), UVB (315 nm~280 nm) and UVC (280 nm~10 nm). However it is almost completely absorbed by the stratospheric ozone layer and can't reach Earth, and hence UVC is also named as solar-blind UV.

Many kinds of wide bandgap semiconductors, including ZnMgO, diamond, AlGaN, Ga₂O₃ (α , β , γ , δ , ϵ) etc., have been developed and applied on fabrication of solar-blind UV photodetectors. Among these wide bandgap semiconductor, β -Ga₂O₃ is particularly suitable for solar-blind photo-detection due to its wide band gap of 4.9 eV. In addition, β -Ga₂O₃ possesses high chemical and thermal stability. At present, it was reported that lots of high performances β -Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector were prepared. Oshima T et al. successfully realized the growth of mono-crystal β -Ga₂O₃ thin films on c-plane sapphire substrate by MBE and metal-semiconductor-metal (MSM) solar-blind UV photo-detector. Guo et al improved performance of solar-blind UV photo-detector, such as reducing dark current, higher responsivity and sensitivity, by in situ annealing the as-grown film in oxygen atmosphere. Qian et al significantly enhanced the detectivity (D^*) of β -Ga₂O₃ solar-blind UV photo-detector by thermal-annealing pretreatment on c-plane sapphire substrates. However, in order to further reduce dark current and increase responsivity and detectivity, researchers still need to explore and perfect continually.

Recently, localized surface plasmon resonance (LSPR) supported by metal nanoparticles provides a new method to enhance the properties of β -Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector. Noble metal nanoparticles have been widely employed in various optoelectronic devices. For instance, the properties of β -Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector were improved by using gold (Au) nanoparticles, but Au just achieves LSPR in the visible region. Besides, aluminum (Al) can excite LSPR from 200 nm to just below 800 nm and its position of the LSPR excitation maximum is sensitive to the size, shape, inter-particle spacing, dielectric environment and dielectric properties of the nanoparticle. So Al is capable of achieving LSPR in the solar-blind region and being applied to solar-blind UV photo-detector. In this work, it is investigated that the effect on both the Al nanoparticles and the characteristics of related photodetector. It is revealed that the performance of β -Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector with Al nanoparticles is effectively improved.

Citation: Shi X L, Liu H Y, Hou S, *et al.* The applications of surface plasmons in Ga₂O₃ ultraviolet photodetector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170728

Supported by National Natural Science Foundation of China (61504022)

* E-mail: lxqian@uestc.edu.cn