

文章编号: 1000-7032(2023)05-0881-08

Pt/ β -Ga₂O₃深紫外肖特基光电二极管的 界面载流子注入和自驱动特性

胡 继¹, 刘 增^{1,2*}, 唐为华^{1,2*}

(1. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院, 氧化镓半导体创新中心, 江苏 南京 210023;
2. 南京邮电大学 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 采用金属有机化学气相沉积技术在 *c* 面蓝宝石衬底上生长氧化镓薄膜, 再通过光刻、剥离、电子束蒸镀技术在氧化镓薄膜的表面制作非对称叉指电极, 其中 Pt/Au 作为肖特基电极, Ti/Al/Ni/Au 作为欧姆电极; 为实现良好的欧姆接触, 提升界面载流子的注入效率, 对沉积 Ti/Al/Ni/Au 后的样品进行退火处理。相关结果表明, 该 Pt/ β -Ga₂O₃ 肖特基光电二极管具有良好的深紫外探测水平。在 -5 V 偏压下, 响应度和外量子效率分别为 3.4 A/W 和 1.66×10³%。探测器的探测度高达 10¹³ Jones, 表明其具有优异的弱信号探测能力。同时, 响应度和外量子效率整体都随着光强增大而减小, 这是由于较高的光生载流子浓度提高了电子-空穴对的复合机率。在自驱动模式下, 该 Pt/ β -Ga₂O₃ 肖特基光电二极管展现出较快的响应速度, 响应度为 2.69 mA/W。此外, 探测器在 -100 V 和 +100 V 的高压下仍然能够稳定运行, 说明该探测器具有较好的耐高压稳定性。

关键词: 氧化镓; 肖特基光电二极管; 紫外探测; 自驱动

中图分类号: O484.4; TN312 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220420

Comprehensive Investigation of Pt/ β -Ga₂O₃ Deep-UV Schottky Photodiode Highlighting Effective Carriers Injection and Self-powered Operation

HU Ji¹, LIU Zeng^{1,2*}, TANG Weihua^{1,2*}

(1. *Innovation Center of Gallium Oxide Semiconductor(IC-GAO), College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;*
2. *National and Local Joint Engineering Laboratory for RF Integration and Micro-Assembly Technologies, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)*
* *Corresponding Authors, E-mail: zengliu@njupt.edu.cn; whtang@njupt.edu.cn*

Abstract: In this paper, Ga₂O₃ thin film was grown on *c*-plane sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD), and then asymmetric electrodes were fabricated on the surface of Ga₂O₃ thin film by photolithography, lift-off, and electron beam evaporation. Pt/Au was used as the Schottky electrode, and Ti/Al/Ni/Au was used as the Ohmic electrode. In order to achieve good Ohmic contact and improve the injection efficiency of interface carriers, the corresponding annealing treatment is carried out. The relevant results show that the Pt/ β -Ga₂O₃ Schottky photodiode has a good level of deep ultraviolet detection. At -5 V bias, the responsivity and external quantum efficiency was 3.4 A/W and 1.66×10³%, respectively. The detectivity was up to 10¹³ Jones, indicating that it has excellent weak signal detection capability. At the same time, the responsivity and external quantum efficiency decrease with the increase of light intensity, which is due to the higher concentration of photogenerated carriers which

收稿日期: 2022-12-19; 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(62204125); 国家重点研发计划(2022YFB3605404); 南京邮电大学引进人才科研启动基金项目(自然科学)(XK1060921115, XK1060921002)

Supported by Young Scientists Fund of The National Natural Science Foundation of China(62204125); The National Key R&D Program of China(2022YFB3605404); The Natural Science Research Startup Foundation of Recurring Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications(XK1060921115, XK1060921002)

improves the recombination probability of electron-hole pairs. In self-powered mode, the Pt/ β -Ga₂O₃ Schottky photodiode exhibited a fast responsivity of 2.69 mA/W. In addition, the detector can still operate stably under high voltage of -100 V and +100 V, indicating that the detector has good stability against high voltage operation.

Key words: Ga₂O₃; Schottky photodiode; UV detection; self-driven

1 引 言

紫外探测器是用来实现光学成像、光纤通讯、火灾警报、时域距离测量以及环境监测等功能的重要元器件^[1-2]。由于平流层中的臭氧与分子氧的强吸收作用,波长小于 280 nm 的深紫外光几乎难以到达地表,这类探测器遭受的环境干扰极少^[3]。因此,深紫外光电探测器具有很低的噪声以及很高的灵敏度。近十余年,氧化镓(Ga₂O₃)作为一种宽禁带半导体,其禁带宽度高达 4.9 eV,恰能响应深紫外波段的辐射^[4-7],所以在深紫外探测领域,Ga₂O₃受到了越来越广泛的关注。

就目前而言,研究人员已经从不同的角度去提升探测器的性能。其中,探测器的器件结构对光响应特性有着本质上的影响。Ga₂O₃金属-半导体-金属^[4,8]、光晶体管^[9-10]、异质结^[11]以及肖特基二极管^[12-19]等结构的紫外探测器已经有所报道。其中,肖特基光电二极管具有非对称的界面势垒,能够在空间电荷区形成内建电场($E_{\text{built-in}}$)来有效地分离光生电子-空穴对,这对于提升探测器的光响应以及自驱动探测的实现都是有利的。相比于具有同样效应的异质结探测器,肖特基光电二极管结构简单易制备,且同样可以获取低的暗电流(I_{dark})与快速的光响应^[20]。比如,Chen 等^[15]报道了 Au/ β -Ga₂O₃ 日盲紫外探测器,其 I_{dark} 为 10 pA,响应时间为 64 μ s。Liu 等^[16]制备了 Ni/ β -Ga₂O₃ 肖特基光电二极管,获得了 144.46 A/W 的高光响应度 (Responsivity, R) 和 7.29×10^{14} Jones 的探测度 (Detectivity, D^*)。最近, Ji 等^[19]利用非晶 Ga₂O₃ 薄膜制备的光二极管更是实现了 10^{16} Jones 的超高 D^* , 在探测超低辐照信号方面展现出了巨大的潜力。

金属和半导体的接触是电子、光电子器件中的关键因素,它会直接影响载流子的输运特性,进而决定器件的输出性能^[21-22]。一般地,肖特基结的内建电场较小,载流子浓度和界面态都会对内建电场造成影响,这种影响通常可以通过退火、薄膜表面钝化、以及选取合适材料提高肖特基势垒的方法加以改善。本实验采用拥有较高功函数的

金属 Pt 作为肖特基接触电极,以提高肖特基势垒,从而实现良好的自驱动特性。因此,构建良好的欧姆接触降低接触电阻,提升载流子界面注入效率^[23];以及通过构建良好的肖特基势垒,形成空间电荷区促使自驱动探测的实现都显得尤为重要。故而,鉴于肖特基光电二极管的优势,本文将构筑 Pt/ β -Ga₂O₃ 肖特基光电二极管,并从界面载流子注入和自驱动运行的角度来深入分析其性能与机理。

2 实 验

利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方式在 c 面蓝宝石衬底上生长 β -Ga₂O₃ 薄膜,衬底温度为 800 °C,腔室气压为 3 280 Pa (24.6 torr)。薄膜的晶体质量通过 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和紫外-可见光吸收光谱 (UV-Vis absorbance spectrum) 验证。然后,利用所制备的 Ga₂O₃ 薄膜,借助紫外光刻、剥离和电子束蒸镀技术完成探测器的精细加工。鉴于 Pt 拥有大的功函数,理论上 Pt 与 Ga₂O₃ 接触时会形成相对较厚的耗尽层,并且金属 Pt 的稳定性好,因此选择双层的 Pt/Au (20 nm/60 nm) 电极用作肖特基接触电极;多层的 Ti/Al/Ni/Au (10 nm/5 nm/5 nm/60 nm) 电极用作欧姆接触电极。为了实现良好的欧姆接触,以降低器件运行时的接触电阻,对多层欧姆电极在 N₂ 氛围和 400 °C 条件下加以快速热处理 (Rapid thermal processing, RTP) 60 s。此外,在沉积电极之前,对 Ga₂O₃ 薄膜表面进行了持续 60 s 的 O₂ 等离子体处理,以保证金属电极与 Ga₂O₃ 薄膜的良好接触。

在完成器件制备之后,要对其进行紫外光电响应性能检验。利用 Agilent B1505A 半导体分析测试设备在室温空气环境中对探测器进行电流-电压 (I - V) 特性和瞬时光响应 (I - t) 特性的测试,时间精度为 0.2 s。一只可以发射 254 nm 波长光的灯被用作辐照光源;通过改变探测器与光源距离调制其光强,并通过传感器与数字源表记录。

3 结果与讨论

图1(a)为 β -Ga₂O₃薄膜的XRD谱,根据JCPDS卡片(JCPDS #43-1012)可知,出现的($\bar{2}01$)、($\bar{4}02$)和($\bar{6}03$)3个衍射峰对应 β -Ga₂O₃,其中尖锐的(0006)晶面来自所使用的蓝宝石衬底。图1(b)所示为 β -Ga₂O₃薄膜的紫外-可见光吸收光谱,从中可以看出该薄膜在深紫外波段的吸收强度远高于可见光波段。图1(b)的内插图为人射

光子能($h\nu$)与 $(\alpha h\nu)^2$ 的函数关系,通过拟合这个Tauc关系曲线 $((\alpha h\nu)^2=C(h\nu-E_g))$,其中 C 为常数, α 为吸收系数,可以获得 β -Ga₂O₃薄膜的光学带隙为4.79 eV。图1(c)为利用所生长的 β -Ga₂O₃薄膜制备的Ga₂O₃肖特基光电二极管结构示意图。图1(d)为其光学显微镜示意图,金属电极制备完整且界限清晰,实际电极间距为10.03 μm ,与光刻模板(10 μm 间距)仅有微小的偏差。

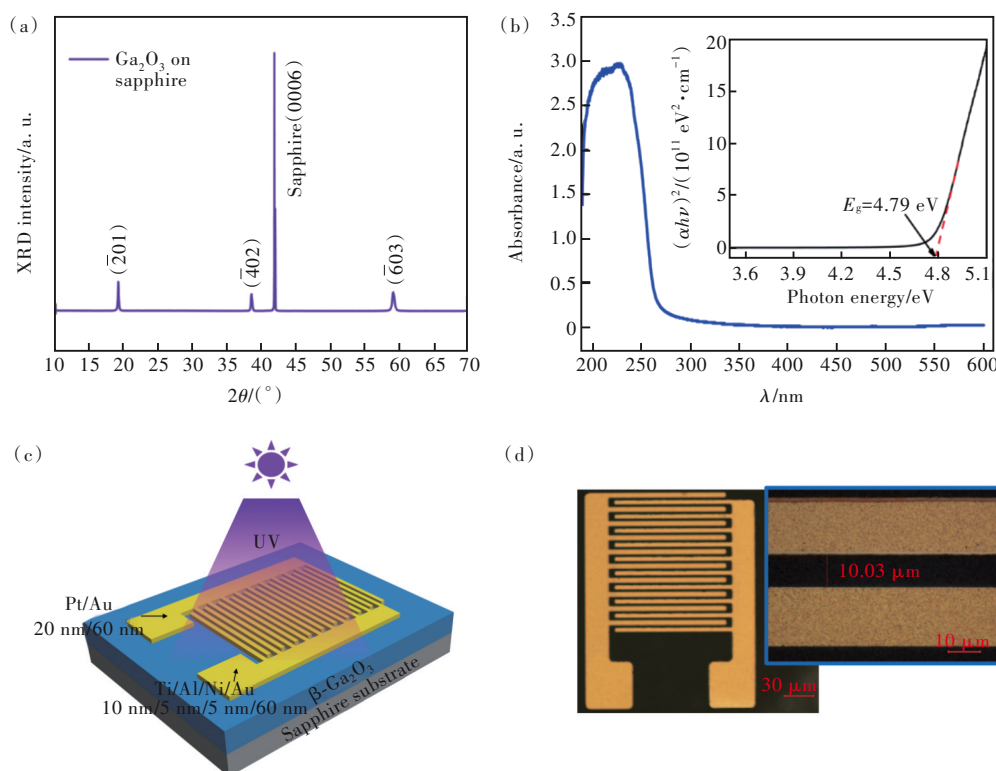


图1 β -Ga₂O₃薄膜的X射线衍射谱(a)、紫外-可见光吸收光谱(b); β -Ga₂O₃光电二极管的结构示意图(c)、平面光学显微镜图(d)。

Fig.1 The XRD pattern(a) and UV-Vis absorbance spectrum(b) of the β -Ga₂O₃ thin film. The schematic diagram(c) and optical image(d) of the β -Ga₂O₃ Schottky photodiode.

图2(a)所示为在暗条件和光照条件下的 I - V 曲线,从其插图中可以看出这里制备的 β -Ga₂O₃肖特基二极管由于Pt电极与 β -Ga₂O₃为肖特基接触而具有一定的整流特性^[24]。并且,其开路电压为0.24 V,是由于内建电场的存在而产生的。因此,该光电探测器可以自驱动运行。值得注意的是,光电探测器在正偏压下和负偏压下均表现出了良好的光响应特性。在正偏压下,光电探测器工作在光电导模式,由于其外加电场与内建电场方向相反,其内建电场被削弱乃至抵消,因此光电探测器可被视为光敏电阻,其电流输运以电子隧穿形式为主导。在负偏压下,光电探测器工作在耗尽

模式,电子需要一定动能才能越过界面势垒。耗尽模式下,载流子输运行为通常可以采用热电子发射理论(Thermionic emission theory,TE theory)描述^[20]:

$$I = I \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$I_0 = AA^* \exp\left(-\frac{B}{kT}\right), \quad (2)$$

$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right), \quad (3)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}, \quad (4)$$

其中, I_0 为饱和电流, A 为肖特基电极接触面积, A^* 为理查德森常数 (Richardson's constant), m^* 为有效电子质量, k 为玻尔兹曼常数 (Boltzmann constant), φ_B 为肖特基势垒。在 -5 V 和 5 V 偏压下, 其 I_{dark} 分别为 -2.6×10^{-10} A 和 7.8×10^{-10} A。当使用波长为 254 nm 的紫外光辐照探测器, 在光强密度为 $84.8, 106.8, 153.1, 232.1, 305.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, -5 V 偏压驱动下光电流 (I_{photo}) 分别为 $-2.95 \times 10^{-7}, -3.79 \times 10^{-7}, -5.395 \times 10^{-7}, -7.3 \times 10^{-7}, -9.63 \times 10^{-7}$ A; 5 V 偏压驱动下, 光电流 (I_{photo}) 分别为 $5.02 \times 10^{-7}, 6.45 \times 10^{-7}, 9.1 \times 10^{-7}, 1.22 \times 10^{-6}, 1.59 \times 10^{-6}$ A。相应地, 在 -5 V/5 V 偏压和 $305.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强的光照下, 探测器的光/暗电流比 (Photo-to-dark current ratio, PDCCR) 达到了 $3.7 \times 10^3 / 2.03 \times 10^3$, 说明这里报道的 Ga_2O_3 肖特基二极管光探测器具有良好的紫外光 (254 nm) 响应特性, Ga_2O_3 薄膜半导体对 254 nm 入射紫外光有着很好的吸收, 激发了大量的电子-空穴对^[25-28]。 R 和外量子效率 (External quantum efficiency, EQE) η_{EQE} 常被用来描述探测器的光响应性能, 一般表示为^[29]:

$$R = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{PS}, \quad (5)$$

和

$$\eta_{\text{EQE}} = \frac{hcR}{e\lambda} \times 100\%, \quad (6)$$

其中, P 是入射的紫外光光强, S 是 Ga_2O_3 肖特基光电二极管的有效辐照面积 ($1.054 \times 10^{-3} \text{cm}^2$), h 是普朗克常数, c 是光速, e 是电子电荷, λ 是入射光波长。在 $106.8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强照射下, -5 V 偏压下, R 和 EQE 分别为 $3.4 \text{A}/\text{W}$ 和 $1.66 \times 10^3\%$; 5 V 偏压下, R 和 EQE 分别为 $5.77 \text{A}/\text{W}$ 和 $2.8 \times 10^3\%$ 。这一结果优于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{NSTO}$ 异质结^[30]、 $\text{Ni}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电二极管^[31]、 $\text{PEDOT:PSS}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 有机无机混杂异质结^[32]、 $\text{CuZnS}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结^[33] 以及表面改性的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器^[34] 的紫外探测结果。并且, 无论是在正偏压还是负偏压驱动下, R 和 EQE 都会随着电压绝对值的增大而上升, 这是由于更大驱动电压使得载流子获得了更高的漂移动能, 进而输出更高的 I_{photo} 的缘故。此外, 在 -5 V 和 5 V 偏压下, R 和 EQE 随入射光光强的变化规律如图 2(c) 所示, 整体上 R 和 EQE 随光强的提高而减小^[9], 这是由于高光生载流子密度提高了电子-空穴对的

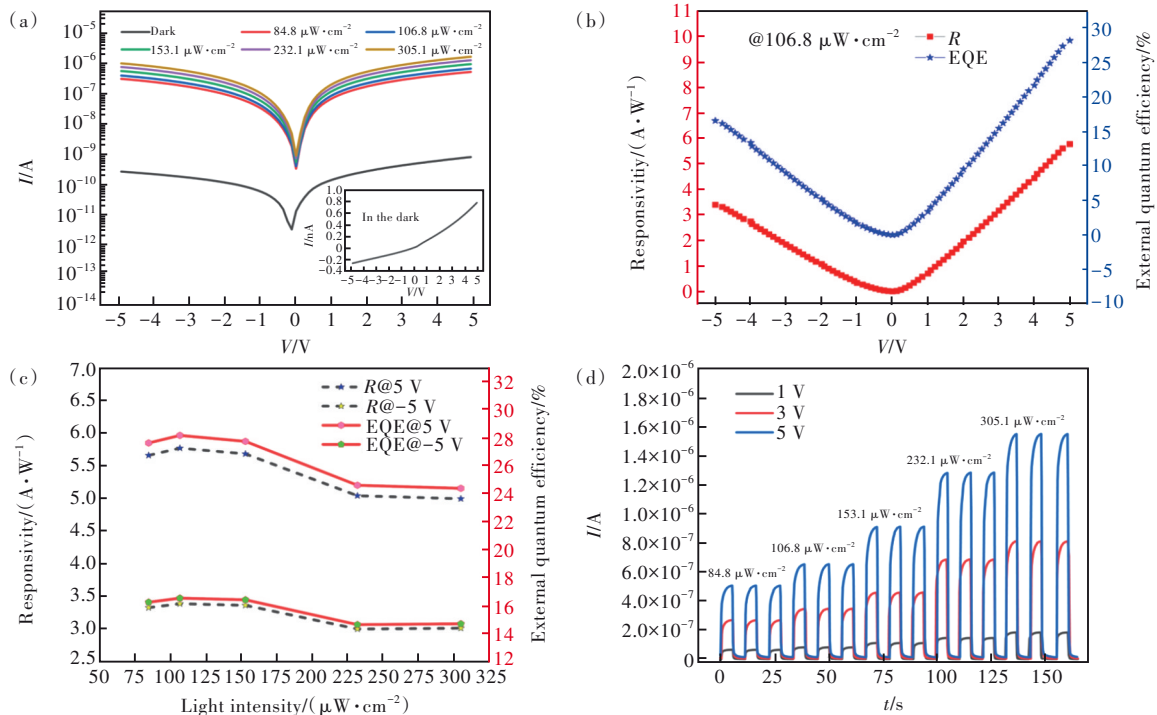


图 2 Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基光电二极管: (a) 暗条件及不同光强辐照下的电流-电压特性曲线; 光响应度与外量子效率随电压 (b) 和光强 (c) 的变化关系; (d) 不同电压及不同光强下的瞬时光响应特性曲线。

Fig. 2 (a) The current-voltage curves in the dark and under illuminations with different intensities. Voltage-dependent (b) and intensity-dependent (c) responsivity and external quantum efficiency. (d) The transient photo response at various voltages under illuminations with various intensities of Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky photodiode.

复合机率。此外, D^* 是衡量探测器探测最小辐射信号能力的物理量, 表达式为^[29]:

$$D^* = \frac{R\sqrt{S}}{\sqrt{2eI_{\text{dark}}}}, \quad (7)$$

这里我们将 I_{dark} 作为探测器噪声的主要来源, 所以 -5 V/5 V 偏压下的 D^* 为 1.2×10^{13} Jones/ 1.18×10^{13} Jones。如图 2(d) 为 Ga₂O₃ 肖特基二极管光探测器在不同偏压和不同光强下的瞬时响应, 某一光强密度测试的起始以前一个光强密度辐照后为基础, 整个阶段没有出现明显的持续光电导现象; 光照停止后, 光生电子-空穴对迅速复合, 因此前一个光照强度辐照并不会对接下来的光响应造成明显的影响, 展现了良好的可重复性和稳定性。

如图 3(a) 所示, 其为 0 V 偏压下的瞬时紫外光响应特性展现了稳定的光开关特性, 更高的光强能够产生更大的 I_{photo} 。该 Ga₂O₃ 肖特基光电二极管具有一定的自驱动运行特性, 即在无外加偏压的情况下也可以正常运行。图 3(b) 显示了 0 V 偏压下 I_{photo} 与光强良好的线性关系。依据公式 (5)~(7), 在 $305.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强的照射下, 光电流和暗电流分别为 8.72×10^{-10} A 和 1.27×10^{-11} A, 自

驱动的 Ga₂O₃ 肖特基光电二极管的 R 、EQE 和 D^* 分别为 $2.69 \text{ mA}/\text{W}$ 、 1.316% 和 4.31×10^{10} Jones。从图 3(a) 可以看出其输出的电流为负值, 这与图 2(d) 中偏压驱动的结果不同。如图 4(a) 所示, 这里自驱动探测的实现得益于肖特基界面处空间电荷区内内建电场 ($E_{\text{built-in}}$) 的作用; $E_{\text{built-in}}$ 的方向与外加电场的方向相反, 由于内建电场的形成, 在无外加偏压的情况下, 光生载流子可以被内建电场迅速分开, 形成光电流; 随着光强的增加, 更多位于价带的电子被激发至导带形成电子-空穴对, 光电流随之增加, 这与图 3(a) 观察到的结果一致。得益于良好的光伏效应, 该光电探测器展示了良好的自驱动特性。Pt 的功函数 (ϕ_{Pt}) 为 5.65 eV ^[35], Ga₂O₃ 的电子亲和势 (χ) 为 $(4.00 \pm 0.05) \text{ eV}$ ^[36]; 依据肖特基-莫特 (Schottky-Mott) 理论, Pt 与 Ga₂O₃ 接触的界面势垒理论上约为 1.65 eV 左右, 相较于广泛报道的 Au 与 β -Ga₂O₃ 所形成的肖特基结, Pt 与其所形成的肖特基结界面势垒由 Au 的 1.10 eV 提高至 1.65 eV , 更易提高自驱动性能。在紧密接触前, 由于 β -Ga₂O₃ 的费米能级高于金属 Pt, 因此部分电子会从 Ga₂O₃ 一侧流向 Pt 电极一侧, 导致 Ga₂O₃ 表面电势升高, 能带向上弯曲。

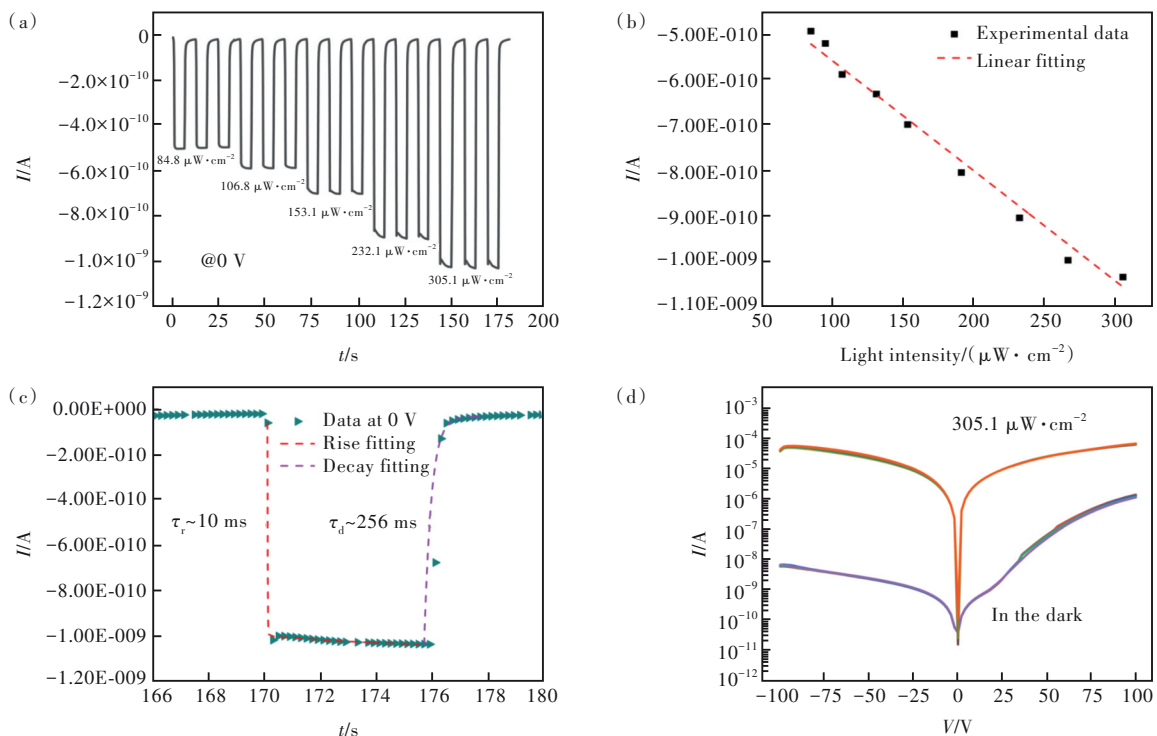


图 3 零偏压下, (a)瞬时光响应特性曲线, (b)光电流对光强的依赖关系, (c)响应时间; (d)高压下的电流-电压特性曲线。

Fig.3 Transient photo response (a), the light intensity-dependent photocurrent (b), and the response time (c) at zero bias. (d) The current-voltage curves at high voltages from -100 V to 100 V.

因此,界面处将形成空间电荷区(Space charge region),其 $E_{\text{built-in}}$ 的方向为电势降低的方向,与上述所使用的外加电场方向相反。这是实现肖特基光电二极管自驱动探测的基础条件。而Ti的功函数(φ_{Ti})为4.33 eV,其与 χ 的微小差别将使得Ti与 Ga_2O_3 的接触势垒很小。本文制备了多层Ti/Al/Ni/Au电极,经退火处理,能够具有很好的欧姆接触,具体如图4(b)所示。Ti金属电极中的自由电子会注入到 Ga_2O_3 一侧,导致 Ga_2O_3 表面电势降低,能带稍微向下弯曲;得益于良好的欧姆接触,这种界面载流子注入效应(Carrier rejection effect)在很大程度上也为电极收集的信号做出了贡献。如图3(c)所示为 Ga_2O_3 肖特基光电二极管的瞬时响应特性,对于响应时间一般采用一阶拟合或者二阶拟合。其二阶拟合 τ_1 代表光激发电子空穴对被电极接收的时间, τ_2 由界面态对载流子的俘

获和释放造成。根据 $I-t$ 图,探测器并未发生严重的持续光电导效应,并且光照结束后,其光电流基本可以迅速恢复至暗电流水平,因此采用一阶拟合。根据典型的一阶指数弛豫方程^[37]:

$$I = I_0 + Ae^{-t/\tau}, \quad (8)$$

其中 I_0 表示饱和态下的 I_{photo} , A 是常数, τ 表示松弛时间常数, τ_r 和 τ_d 是时间常数的上升和下降沿。 Ga_2O_3 肖特基光电二极管 τ_r 和 τ_d 分别为10 ms和256 ms,表明具有较快的光生和复合速率。与金属-半导体-金属结构的器件相比^[38],有更快的响应速度。图3(d)为-100~100 V的高压测试结果,探测器仍然能够稳定运行,说明器件有良好的耐压稳定性,这也是作为宽禁带半导体 Ga_2O_3 的材料优势特性之一。在100 V偏压驱动、 $305.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强的照射下, R 、 D^+ 和EQE分别为215.6 A/W、 1.03×10^{13} Jones和 $1.05 \times 10^5\%$ 。

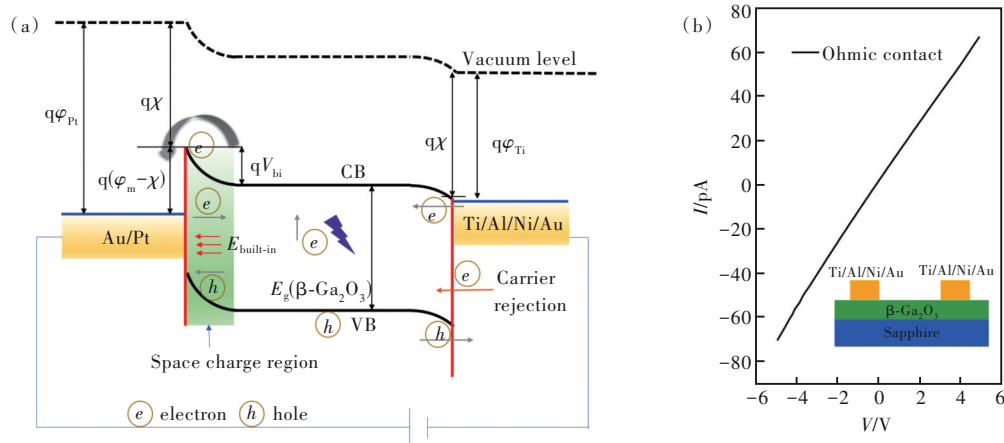


图4 Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基光电二极管能带结构示意图

Fig.4 The energy-band diagram of the Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky photodiode

4 结 论

本文构筑了Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基光电二极管,双层金属Pt/Au作为肖特基电极,多层金属Ti/Al/Ni/Au作为欧姆接触。结果表明,该肖特基光电二极管存在一定的整流与自驱动特性,在零偏压下能够稳定运行,并且获得了很快的响应速度。在肖特基势垒作用下,其内建电场的形成有利于分离光生电子-空穴对;同时其良好的欧姆接触降低

了接触电阻,提升了载流子界面注入效率。另外,从界面载流子输运、自驱动探测机理以及相关光响应特性的角度也做了一定的分析。本工作所制备的Pt/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基光电二极管具有良好的深紫外探测以及耐高压特性。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220420>.

参 考 文 献:

- [1] CHEN H Y, LIU K W, HU L F, *et al.* New concept ultraviolet photodetectors [J]. *Mater. Today*, 2015, 18(9): 493-502.

- [2] SANG L W, LIAO M Y, SUMIYA M. A comprehensive review of semiconductor ultraviolet photodetectors: from thin film to one-dimensional nanostructures [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 10482-10518.
- [3] RAZEGHI M. Short-wavelength solar-blind detectors-status, prospects, and markets [J]. *Proc. IEEE*, 2002, 90(6): 1006-1014.
- [4] CHEN X H, REN F F, GU S L, *et al.* Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(4): 381-415.
- [5] XU J J, ZHENG W, HUANG F. Gallium oxide solar-blind ultraviolet photodetectors: a review [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(29): 8753-8770.
- [6] 徐士杰. 宽禁带半导体微结构与光电器件光学表征 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022.
XU S J. *Optical Characterization of Microstructures and Optoelectronic Devices Based on Wide Bandgap Semiconductors* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2022. (in Chinese)
- [7] 乔宝石. 氧化镓基光电器件的制备及内部机制研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
QIAO B S. *The Fabrication and Internal Mechanism of Photodetector Based on Ga₂O₃* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).
- [8] LIU Z, DU L, ZHANG S H, *et al.* Synergetic effect of photoconductive gain and persistent photocurrent in a high-photoreponse Ga₂O₃ deep-ultraviolet photodetector [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(10): 5595-5602.
- [9] QI X H, YUE J Y, JI X Q, *et al.* A deep-ultraviolet photodetector of a β -Ga₂O₃/CuBiI₄ heterojunction highlighting ultra-high sensitivity and responsivity [J]. *Thin Solid Films*, 2022, 757: 139397.
- [10] LIU Z, ZHANG M L, YANG L L, *et al.* Enhancement-mode normally-off β -Ga₂O₃:Si metal-semiconductor field-effect deep-ultraviolet phototransistor [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2022, 37(1): 015001-1-7.
- [11] HAN Z Y, LIANG H L, HUO W X, *et al.* Boosted UV photodetection performance in chemically etched amorphous Ga₂O₃ thin-film transistors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(8): 1901833-1-8.
- [12] CHU X L, LIU Z, ZHI Y S, *et al.* Self-powered solar-blind photodiodes based on EFG-grown (100)-dominant β -Ga₂O₃ substrate [J]. *Chin. Phys. B*, 2021, 30(1): 017302.
- [13] SUZUKI R, NAKAGOMI S, KOKUBUN Y, *et al.* Enhancement of responsivity in solar-blind β -Ga₂O₃ photodiodes with a Au Schottky contact fabricated on single crystal substrates by annealing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(22): 222102-1-3.
- [14] LIU X Z, YUE C, XIA C T, *et al.* Characterization of vertical Au/ β -Ga₂O₃ single-crystal Schottky photodiodes with MBE-grown high-resistivity epitaxial layer [J]. *Chin. Phys. B*, 2016, 25(1): 017201-1-5.
- [15] CHEN X, LIU K W, ZHANG Z Z, *et al.* Self-Powered solar-blind photodetector with fast response based on Au/ β -Ga₂O₃ nanowires array film Schottky junction [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(6): 4185-4191.
- [16] LIU Z, WANG X, LIU Y Y, *et al.* A high-performance ultraviolet solar-blind photodetector based on a β -Ga₂O₃ Schottky photodiode [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(44): 13920-13929.
- [17] XU Y, CHEN X H, ZHANG Y F, *et al.* Fast speed Ga₂O₃ solar-blind Schottky photodiodes with large sensitive area [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2020, 41(7): 997-1000.
- [18] LI Z, CHENG Y N, XU Y, *et al.* High-performance β -Ga₂O₃ solar-blind Schottky barrier photodiode with record detectivity and ultrahigh gain via carrier multiplication process [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2020, 41(12): 1794-1797.
- [19] JI X Q, YIN X M, YUAN Y Z, *et al.* Amorphous Ga₂O₃ Schottky photodiodes with high-responsivity and photo-to-dark current ratio [J]. *J. Alloys Compd.*, 2023, 933: 167735.
- [20] 刘增. 氧化镓薄膜基日盲光二极管与光晶体管的制备与性能研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
LIU Z. *Fabrication and Characterization of Ga₂O₃ Film-based Solar-blind Photodiodes and Phototransistors* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)
- [21] SHEORAN H, KUMAR V, SINGH R. A comprehensive review on recent developments in Ohmic and Schottky contacts on Ga₂O₃ for device applications [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2022, 4(6): 2589-2628.
- [22] LU C, JI X Q, LIU Z, *et al.* A review of metal-semiconductor contacts for β -Ga₂O₃ [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, 55(46): 463002.
- [23] CHEN J X, LI X X, MA H P, *et al.* Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Ti/Al/Ni/Au contacts to β -Ga₂O₃ nanobelt field-effect transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(35): 32127-32134.
- [24] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学 [M]. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2011.

- LIU E K, ZHU B S, LUO J S. *The Physics of Semiconductors* [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [25] O'ROURKE R C. Absorption of light by trapped electrons [J]. *Phys. Rev.*, 1953, 91(2): 265-270.
- [26] 赖黎, 莫慧兰, 符思婕, 等. 氧化镓微晶薄膜制备及其日盲深紫外探测器 [J]. *发光学报*, 2020, 41(9): 1165-1171.
LAI L, MO H L, FU S J, *et al.* Preparation of gallium oxide microcrystalline thin films and its solar blind DUV photodetector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(9): 1165-1171. (in Chinese)
- [27] 冯秋菊, 李芳, 李彤彤, 等. 外电场辅助化学气相沉积方法制备网格状 β -Ga₂O₃纳米线及其特性研究 [J]. *物理学报*, 2018, 67(21): 218101-1-6.
FENG Q J, LI F, LI T T, *et al.* Growth and characterization of grid-like β -Ga₂O₃ nanowires by electric field assisted chemical vapor deposition method [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2018, 67(21): 218101-1-6. (in Chinese)
- [28] 冯秋菊, 解金珠, 董增杰, 等. 单根磷掺杂 β -Ga₂O₃微米线日盲紫外探测器性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(11): 1653-1660.
FENG Q J, XIE J Z, DONG Z J, *et al.* Performance of a single phosphorus-doped β -Ga₂O₃ microwire solar-blind ultraviolet photodetector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(11): 1653-1660. (in Chinese)
- [29] HOU Y N, MEI Z X, DU X L. Semiconductor ultraviolet photodetectors based on ZnO and Mg_{1-x}Zn_xO [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, 47(28): 283001.
- [30] GUO D Y, LIU H, LI P G, *et al.* Zero-power-consumption solar-blind photodetector based on β -Ga₂O₃/NSTO heterojunction [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(2): 1619-1628.
- [31] OH S, KIM H W, KIM J. High gain β -Ga₂O₃ solar-blind Schottky barrier photodiodes *via* carrier multiplication process [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2018, 7(11): Q196-Q200.
- [32] ZHENG Z H, WANG W, WU F, *et al.* Flexible assembly of the PEDOT:PSS/exfoliated β -Ga₂O₃ microwire hybrid heterojunction for high-performance self-powered solar-blind photodetector [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(12): 21822-21832.
- [33] LV Z X, YAN S Q, MU W X, *et al.* A high responsivity and photosensitivity self-powered UV photodetector constructed by the CuZnS/Ga₂O₃ Heterojunction [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2023, 10(5): 2202130-1-9.
- [34] YU J G, LOU J S, WANG Z, *et al.* Surface modification of β -Ga₂O₃ layer using Pt nanoparticles for improved deep UV photodetector performance [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 872: 159508-1-9.
- [35] MICHAELSON H B. The work function of the elements and its periodicity [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48(11): 4729-4733.
- [36] MOHAMED M, IRMSCHER K, JANOWITZ C, *et al.* Schottky barrier height of Au on the transparent semiconducting oxide β -Ga₂O₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(13): 132106-1-5.
- [37] LIU N S, FANG G J, ZENG W, *et al.* Direct growth of lateral ZnO nanorod UV photodetectors with Schottky contact by a single-step hydrothermal reaction [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, 2(7): 1973-1979.
- [38] 刘浩, 邓宏, 韦敏, 等. 氧化镓薄膜的制备及其日盲紫外探测性能研究 [J]. *发光学报*, 2015, 36(8): 906-911.
LIU H, DENG H, WEI M, *et al.* Preparation and ultraviolet detection performance of Ga₂O₃ thin films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(8): 906-911. (in Chinese)



胡继(1998-),男,四川广元人,硕士研究生,2021年于西华大学获得学士学位,主要从事氧化镓肖特基光电二极管的研究。

E-mail: 1221025328@njupt.edu.cn



唐为华(1965-),男,江苏盐城人,博士,教授,博士生导师,1994年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带半导体氧化镓材料与器件的研究。

E-mail: whtang@njupt.edu.cn



刘增(1990-),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,硕士生导师,2021年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体光电器件的研究。

E-mail: zengliu@njupt.edu.cn