

超薄介质插层调制的氧化铟锡/锗肖特基光电探测器

赵一默 黄志伟 彭仁苗 徐鹏鹏 吴强 毛亦琛 余春雨 黄巍 汪建元 陈松岩 李成

Indium tin oxid/germanium Schottky photodetectors modulated by ultra-thin dielectric intercalation

Zhao Yi-Mo Huang Zhi-Wei Peng Ren-Miao Xu Peng-Peng Wu Qiang Mao Yi-Chen Yu Chun-Yu
Huang Wei Wang Jian-Yuan Chen Song-Yan Li Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 178506 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210138

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210138>

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

基于二维材料二硒化锡场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on two dimensional SnSe₂

物理学报. 2020, 69(13): 137801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191960>

具有光电倍增的宽光谱三相体异质结有机彩色探测器

Organic color photodetectors based on tri-phase bulk heterojunction with wide spectrum and photoelectronic multiplication

物理学报. 2018, 67(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180502>

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>

高性能SOI基GePIN波导光电探测器的制备及特性研究

Fabrication and characteristics of high performance SOI-based Ge PIN waveguide photodetector

物理学报. 2017, 66(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198502>

毫秒脉冲激光致硅光电二极管电学损伤的有限元分析及实验研究

Finite element analysis and experimental study on electrical damage of silicon photodiode induced by millisecond pulse laser

物理学报. 2017, 66(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104203>

氮化物子带跃迁探测器材料结构对器件效率的影响

Effects of material structure on device efficiency of III-nitride intersubband photodetectors

物理学报. 2019, 68(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190722>

超薄介质插层调制的氧化铟锡/锗肖特基光电探测器*

赵一默¹⁾ 黄志伟²⁾ 彭仁苗³⁾ 徐鹏鹏¹⁾ 吴强¹⁾ 毛亦琛¹⁾
余春雨¹⁾ 黄巍¹⁾ 汪建元¹⁾ 陈松岩¹⁾ 李成^{1)†}

1) (厦门大学物理科学与技术学院, 厦门 361005)

2) (闽南师范大学物理与信息工程学院, 漳州 363000)

3) (厦门大学电子科学与技术学院, 厦门 361005)

(2021年1月21日收到; 2021年2月11日收到修改稿)

本文通过在氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 透明电极和锗 (germanium, Ge) 之间引入超薄氧化物介质层以调节其接触势垒高度, 制备出低暗电流、高响应度的锗肖特基光电探测器. 比较研究了采用不同种类介质 Al_2O_3 和 MoO_3 , 以及不同掺杂浓度的锗和硅衬底上外延锗材料制作的 ITO/Ge 肖特基二极管特性. 发现 2 nm 厚的 Al_2O_3 插层可有效提高 ITO 与 n-Ge 和 i-Ge 的接触势垒高度, 而 MoO_3 插层对 ITO 与不同 Ge 材料的接触势垒高度影响不明显. ITO/ Al_2O_3 /i-Ge 探测器由于其增大的势垒高度表现出性能最佳, 暗电流 (-4 V) 密度低至 5.91 mA/cm², 1310 nm 波长处光响应度高达 4.11 A/W. 而基于硅基外延锗 (500 nm) 材料制作的 ITO/ Al_2O_3 /Ge-epi 光电探测器的暗电流 (-4 V) 密度为 226.70 mA/cm², 1310 nm 处光响应度为 0.38 A/W. 最后, 使用二维位移平台对 ITO/ Al_2O_3 /i-Ge 光电探测器进行了单点成像实验, 在 1310 nm, 1550 nm 两个波段得到了清晰可辨的二维成像图.

关键词: 光电探测器, 接触势垒, 响应度, 介质插层

PACS: 85.60.Gz, 85.30.De, 81.15.Gh, 68.55.-a

DOI: 10.7498/aps.70.20210138

1 引言

信息时代对于信息传输、可视化信息处理的要求越来越高, 而硅基光电子芯片以其极具潜能的紧凑型结构, 将光子和电子器件集成于同一芯片上, 从而大大提高集成回路性能^[1,2]. 锗与硅同属于 IV 族材料, 其直接带隙宽度约 0.8 eV, 响应波长刚好对应于 1550 nm 光通信波段. 且具备较易外延于硅衬底上, 与标准硅互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 兼容性好等优点, 使其成为硅基光电子集成回路重要的候选材料之一^[3,4]. 而且锗材料以其

高载流子迁移率和在光通信波段较大的光学吸收系数, 一直被视为高灵敏度近红外探测器的优质材料^[5-7], 锗材料在光通信、红外夜视仪, 医疗传感、环境监测等化学、生物、军事多跨度领域都可以得到广泛的应用^[3,8,9].

虽然锗和硅基锗光电探测器经过几十年的发展, 已经取得了很大的进展^[10]. 然而由于锗材料高的表面态密度和较窄的禁带宽度, 锗光电探测器往往有着较高的暗电流, 探测率等性能受到一定影响^[11]. 报道较多的 P-本征-N (P-intrinsic-N, PIN) 型和金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 型锗光电探测器暗电流密度一般在 $10-10^2$ mA/cm² 范围内^[12-17]. 锗雪崩型光电探测

* 国家自然科学基金 (批准号: 62074134) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lich@xmu.edu.cn

器虽然由于其具有内部增益而具有高的响应度,但制作工艺复杂,且需要在高压下工作^[18].因此,寻求简单又有效的方法减小锗探测器暗电流、提高其探测率仍具重要的意义.金属-绝缘体-半导体结构之前已经被证实可以提升探测器性能,其使用较厚(60 nm)的MgO作为介质插层,增益表现为绝缘层中碰撞离化导致的载流子倍增^[19,20].而近期,笔者课题组提出采用极薄(1—3 nm)金属氧化物介质层调制ITO与锗接触势垒高度的方法,研制出具有较低暗电流和高响应度的锗肖特基结光电探测器^[21].本文工作是前期工作的延续和拓展,使用两种不同掺杂浓度的锗,以及硅基外延锗材料制作肖特基结光电探测器,分别比较了2 nm厚Al₂O₃和MoO₃介质层作为插入层对锗肖特基光电探测器性能的影响,并讨论了其作用机理.

2 实验与表征方法

实验中采用了3种不同的锗材料,分别是掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的n型Ge(100),本征Ge(100)

(i-Ge,弱n型,掺杂浓度约 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)以及硅衬底上外延的500 nm厚的锗薄膜.使用型号为Picosun R200的原子层沉积设备生长超薄介质材料,如2 nm厚的Al₂O₃和MoO₃.其中沉积Al₂O₃的生长温度为200 °C,采用Al(CH₃)₃为前驱体,H₂O为其氧源.沉积MoO₃的生长温度为155 °C,采用Mo(CO)₆前驱体,等离子体氧为其氧源.ITO电极以及Al背电极则是使用磁控溅射系统进行生长的,其中100 nm厚的ITO薄膜电极的溅射功率为33 W,生长速率为0.08 nm/s,溅射时间为21 min,生长时表面覆盖孔径为300 μm的金属掩膜版.300 nm厚的Al背电极的溅射功率则为112 W,生长速率为0.17 nm/s,溅射时间为30 min.

采用原子力显微镜测试样品的表面形貌和粗糙度.图1分别给出了i-Ge衬底及在其上沉积了2 nm厚的Al₂O₃, MoO₃的原子力显微镜图以及肖特基光电探测器结构示意图.介质层厚度选取2 nm是考虑其对势垒高度调制作用和引入串联电阻等因素后优化的结果^[19].图1(a)—(c)分别为本

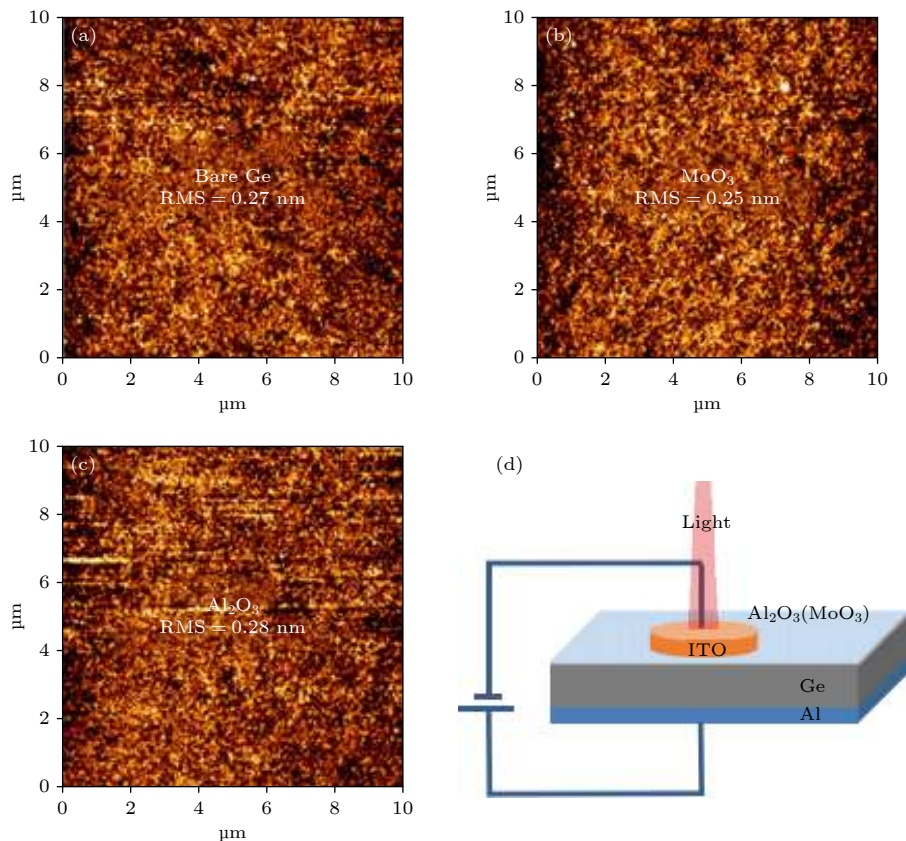


图1 10 μm × 10 μm 原子力显微镜图 (a) 本征锗表面; (b) MoO₃(2 nm)/i-Ge; (c) Al₂O₃(2 nm)/i-Ge; (d) ITO/介质层/Ge 光电探测器结构示意图

Fig. 1. AFM images with a scanned area of 10 μm × 10 μm: (a) Bare i-Ge; (b) MoO₃ (2 nm)/i-Ge; (c) Al₂O₃(2 nm)/i-Ge; (d) schematic illustration of the ITO/dielectric-layer/Ge photodetector.

征锆及其上沉积 2 nm 厚 MoO_3 和 Al_2O_3 原子力显微镜图, 表面粗糙度分别为 0.27, 0.25 和 0.28 nm, 表明制备的氧化层表面平整光滑. 图 1(d) 为 ITO/ Al_2O_3 (或 MoO_3)/Ge 肖特基光电探测器结构示意图. 采用透明导电电极 ITO 是为了避免使用金属电极对入射光的反射和吸收损失, 提高器件的响应度. ITO 作为一种透明导电薄膜, 拥有很高的可见光和近红外光透光率, 且其透光率与生长条件和厚度有关^[22], 本实验室利用磁控溅射生长的 110 nm 的 ITO 薄膜在 1310 nm 及 1550 nm 波段透光率达到 80% 以上^[23]. 为了对比超薄介质层对器件的影响, 还制备了未生长介质插层的 ITO/Ge 光电探测器.

采用 Keithley 2635B 作为源表测试了探测器的伏安 (I - V) 特性. 光电测试则是采用了波长分别为 1310 nm 和 1550 nm 的两种功率可调激光器作为光源. 光源经光纤耦合引入显微镜, 再聚焦到器件的电极表面. 同时, 使用 261 标准探测器对所用

到的激光光源都进行了功率校准. 在单点成像方面, 利用水平方向的 xy 轴平移平台, 以一个器件直径 (金相显微镜下测量器件直径约为 350 μm) 为步长做机械移动, 进行了共计 25 个像素点的光电测试.

3 测试结果与讨论

图 2 给出室温条件下所测试的 ITO/ Al_2O_3 /Ge、ITO/ MoO_3 /Ge 及 ITO/Ge 三类结构肖特基结光电探测器的 I - V 特性曲线和 1310 nm 激光照射情况下的光电流响应, 电压测试范围从 -4 V 到 4 V, 入射光功率从 3.8 mW 到 10.2 mW. 从图 2 可以看出, ITO 与锆直接接触均表现出整流特性, 整流比对不同的 n-Ge, i-Ge 和外延 Ge 材料略有不同. ITO/n-Ge 整流比最大, 约为 10^2 . 对于不同类型的锆材料, 插入 2 nm 厚度的 Al_2O_3 后, 与没有介质插层的探测器比较时, ITO/ Al_2O_3 /Ge 探测

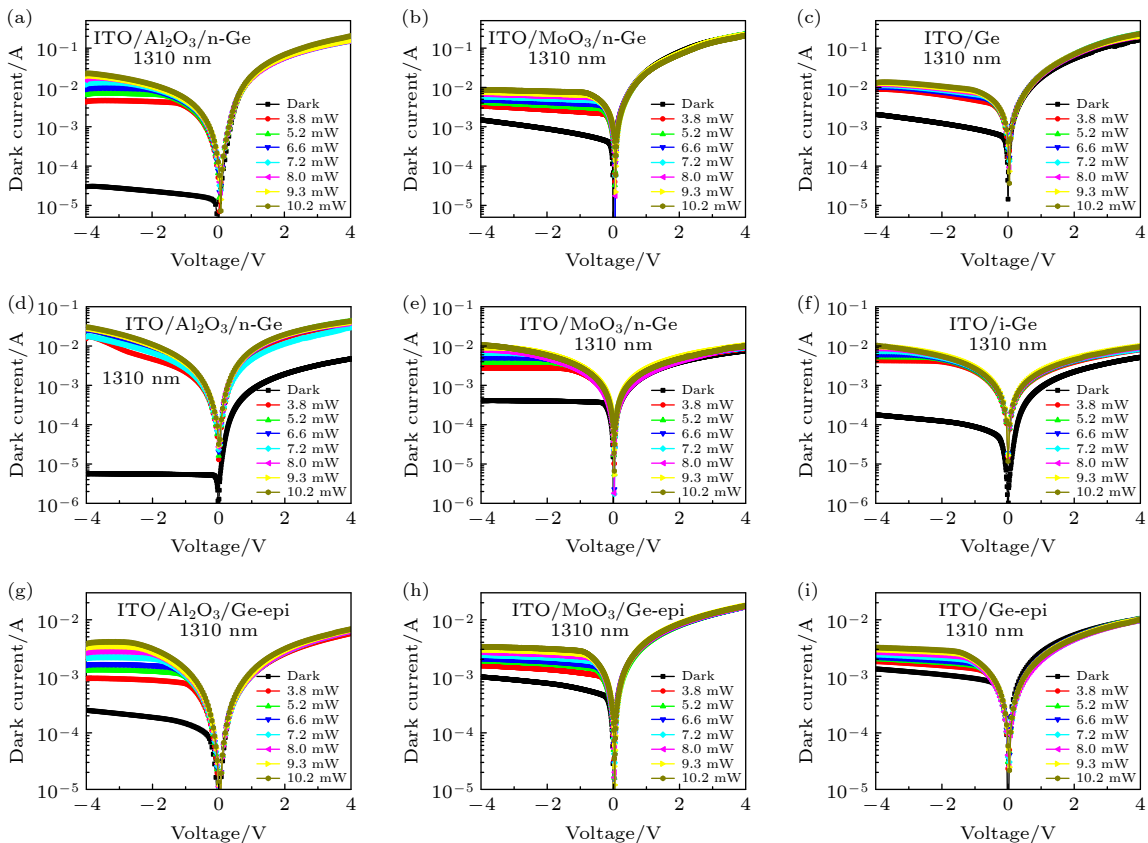


图 2 探测器在不同激光功率 (1310 nm) 照射下的 I - V 曲线与暗电流曲线对比 (a) ITO/ Al_2O_3 /n-Ge; (b) ITO/ MoO_3 /n-Ge; (c) ITO/n-Ge; (d) ITO/ Al_2O_3 /i-Ge; (e) ITO/ MoO_3 /i-Ge; (f) ITO/i-Ge; (g) ITO/ Al_2O_3 /Ge-epi; (h) ITO/ MoO_3 /Ge-epi; (i) ITO/Ge-epi

Fig. 2. Photocurrent and dark current of the detectors measured under illumination by a 1310 nm laser at different powers: (a) ITO/ Al_2O_3 /n-Ge; (b) ITO/ MoO_3 /n-Ge; (c) ITO/n-Ge; (d) ITO/ Al_2O_3 /i-Ge; (e) ITO/ MoO_3 /i-Ge; (f) ITO/i-Ge; (g) ITO/ Al_2O_3 /Ge-epi; (h) ITO/ MoO_3 /Ge-epi; (i) ITO/Ge-epi.

器反向暗电流均急骤下降, 最大降幅达 2 个数量级, 整流比显著提高. 对于用 n-Ge 材料制备的探测器, 整流比达到 10^5 . ITO/ Al_2O_3 /i-Ge 的暗电流最小, 达到 5.68×10^{-6} A (即暗电流密度 5.91 mA/cm^2). 探测器正向最大电流则随掺杂浓度而不同, n-Ge 探测器的正向电流最大, 而 i-Ge 和外延 Ge 探测器正向电流比 n-Ge 探测器约小 1 个数量级, 同时由于本征光电导效应, ITO/ Al_2O_3 /i-Ge 的正向电流有 1 个数量级上升, 而 ITO/i-Ge 的正向电流也有小幅度的上升. 对于用硅衬底上外延锗材料制备的光电探测器, 暗电流相对较大, 但是在引入 Al_2O_3 插层后, 暗电流仍降低近 1 个数量级. 对所有类型的 Ge 材料而言, 在 ITO/Ge 中插入 MoO_3 介质层的探测器, 与没有插层的器件相比, 其伏安特性变化不大, 特别是反向暗电流对不同的材料略有下降或上升. 对比插入 MoO_3 和 Al_2O_3 探测器的

伏安特性表明插入超薄介质层引入的串联电阻效应可忽略, 而对 ITO/Ge 接触势垒高度的调制主导其伏安特性.

使用波长 1310 nm 的可变功率激光器对探测器进行了光电流测试, 在不同激光功率照射下, 各类探测器的光电流均随着光功率的增强而增大. 对比每一组不同类型锗光电探测器光电流的大小, 可以看到, 虽然插入 Al_2O_3 介质层后暗电流有显著降低, 但是其光电流没有任何的减小, 反而有显著的增大. 而插入 MoO_3 介质层的探测器光电流与没有插层的器件相比较没有明显的变化. 这再次证明插入超薄介质层并未以增大器件串联电阻为代价而降低暗电流.

图 3 给出所有器件在波长 1310 nm 激光垂直光照下的响应度随入射光功率的变化关系. 可以看出, 所有光电探测器的响应度随着外加偏压的增大

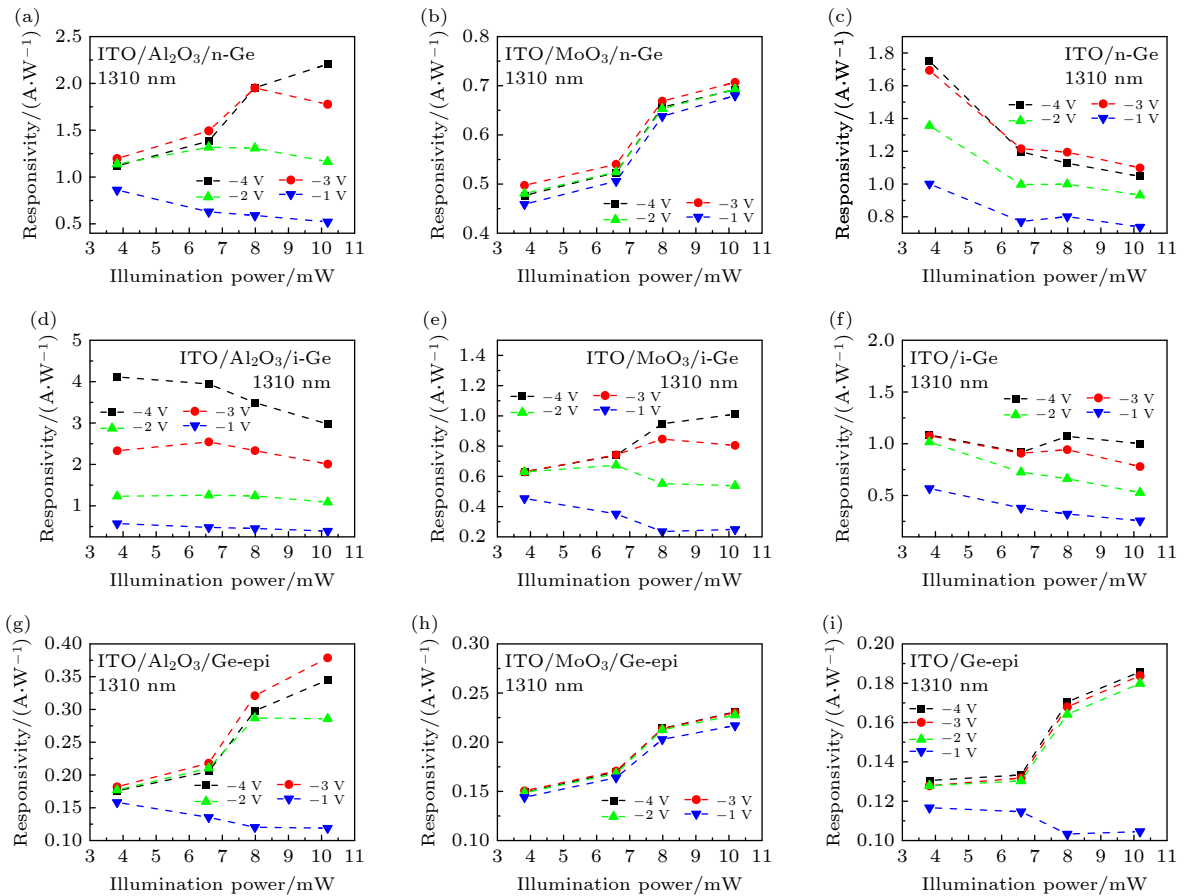


图 3 探测器在偏压为 -1, -2, -3, -4 V、不同激光功率 (1310 nm) 照射下的响应度变化曲线 (a) ITO/ Al_2O_3 /n-Ge; (b) ITO/ MoO_3 /n-Ge; (c) ITO/n-Ge; (d) ITO/ Al_2O_3 /i-Ge; (e) ITO/ MoO_3 /i-Ge; (f) ITO/i-Ge; (g) ITO/ Al_2O_3 /Ge-epi; (h) ITO/ MoO_3 /Ge-epi; (i) ITO/Ge-epi

Fig. 3. Responsivities of the photodetectors measured at -1, -2, -3 and -4 V reverse bias under illumination by a 1310 nm laser at various powers: (a) ITO/ Al_2O_3 /n-Ge; (b) ITO/ MoO_3 /n-Ge; (c) ITO/n-Ge; (d) ITO/ Al_2O_3 /i-Ge; (e) ITO/ MoO_3 /i-Ge; (f) ITO/i-Ge; (g) ITO/ Al_2O_3 /Ge-epi; (h) ITO/ MoO_3 /Ge-epi; (i) ITO/Ge-epi.

表 1 超薄介质插层调制的 ITO/Ge 肖特基光电探测器与文献报道的器件性能对比
Table 1. A comparison of the performance of our works with those from other groups.

年份	暗电流大小(密度)	响应度	结构类型	文献
2006	40 mA/cm ² @1 V	0.28 A/W@1550 nm	NI PIN	[17]
2010	90 μA@1 V	0.14 A/W@1550 nm	WG MSM	[24]
2010	0.2 mA@-0.5 V	0.7 A/W@1550 nm	WG PIN	[25]
2011	40 mA/cm ² @1 V	0.8 A/W@1500 nm	WG Photodiode	[26]
2013	412 μA@5 V	1.76 A/W@1550 nm	WG MSM	[27]
2015	3 nA@-1 V	1.0 A/W@1567 nm	WG PIN	[28]
2017	75 mA/cm ² @1 V	0.58 A/W@1550 nm	WG PIN	[29]
2021	5.91 mA/cm ² @-4 V	0.46 A/W@1550 nm 4.11 A/W@1310 nm	NI MS	本文

均有不同程度的增大, 其中 i-Ge 组肖特基光电探测器及 ITO/Al₂O₃/n-Ge 肖特基光电探测器的在 高光功率下响应度随偏压的增大呈现出明显的线性增大的趋势, 其他类型的光电探测器在继续增大偏压后, 器件的光响应度增速则减缓或稍有降低. 但是不同结构和不同类型锗材料制备的光电探测器响应度随入射光功率的变化规律并不完全一致. 从图 3 明显看到, 具有 2 nm 厚 Al₂O₃ 插层的所有类型 Ge 光电探测器响应度最大. 而同一种 Ge 材料响应度最大的分别为: ITO/Al₂O₃/i-Ge 探测器在 -4 V 偏压, 功率 3.82 mW 的激光照射下, 光响应度高达 4.11 A/W; ITO/Al₂O₃/n-Ge 探测器在 -4 V 偏压, 功率 10.2 mW 的激光照射下, 光响应度达到了 2.21 A/W; ITO/Al₂O₃/Ge-epi 探测器则能够在 -3 V 偏压, 功率 10.2 mW 的激光照射下, 光响应度达到了 0.38 A/W. 相较而言, i-Ge 组光电探测器响应度在不同偏压下均与入射光功率相关性并不明显. ITO/Al₂O₃/i-Ge 探测器的响应度在低功率下几乎不变, 并在功率达到 6.6 mW 后略有下降, 说明此组光电探测器性能更加稳定. 而引入 MoO₃ 插层的三种光电探测器, 其光电响应度略低于没有插层的 ITO/Ge 光电探测器. 同时, 还使用 1550 nm 激光器对加入了 Al₂O₃ 插层的器件进行了相同的光电测试, ITO/Al₂O₃/i-Ge 探测器在 -4 V 偏压, 光响应度为 0.46 A/W; ITO/Al₂O₃/n-Ge 探测器的光响应度为 0.26 A/W; 而 ITO/Al₂O₃/Ge-epi 探测器在 1550 nm 波长处的光响应则比较微弱.

将制备得到的 ITO/Al₂O₃/i-Ge 肖特基光电探测器与文献报道的 Ge 光电探测器性能进行了对比, 如表 1 所示.

为了定量理解 Al₂O₃ 和 MoO₃ 插层对势垒高

度的调制作用, 对所有的器件进行变温伏安特性测试, 以提取其有效接触势垒高度. 图 4 给出典型的 ITO/Al₂O₃/i-Ge 探测器在 293—373 K (间隔为 20 K) 下的无光照变温 *I-V* 特性曲线及所有 9 种光电探测器根据变温 *I-V* 特性画出的 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/(kT)$ 的关系图. 相对应的肖特基势垒高度从变温 *I-V* 特性曲线中提取, 根据热电子发射模型^[30]:

$$\ln\left(\frac{I_R}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_b}{kT}, \quad (1)$$

I_R 表示反向饱和电流, A 表示探测器上电极 (ITO) 的面积, A^* 表示有效理查森常数 (143 A/(cm²·K²)), Φ_b 表示肖特基有效势垒, q 为电子电荷, T 为测试温度. 从变温曲线中提取到每种器件的有效接触势垒高度列于表 2 中, 并画出了势垒高度与器件类型的关系 (图 5). 从表 2 可以看到之前响应度表现最好的 3 种器件正是同类材料下有效接触势垒高度最大的器件, 最大的有效接触势垒高度为 0.56 eV (ITO/Al₂O₃/i-Ge), 而 ITO/Al₂O₃/n-Ge 的有效接触势垒高度为 0.55 eV. 对外延 Ge 材料而言, 插入介质层对有效接触势垒高度影响不大, 分析其原因一方面是由于硅上外延锗材料的 Si/Ge 界面存在较高的位错密度, 在引入 Al₂O₃ 插层后, 虽然可有效降低暗电流近一个数量级 (图 2(g) 与图 2(i)), 但相比起使用体锗材料制作的同类结构光电探测器来说暗电流仍然相对较大, 掩盖了其势垒高度的

表 2 不同结构的有效肖特基势垒高度
Table 2. Effective Schottky barrier heights of different structures.

结构类型	i-Ge	n-Ge	Ge-epi
ITO	0.34 eV	0.24 eV	0.29 eV
2 nm Al ₂ O ₃ + ITO	0.55 eV	0.56 eV	0.30 eV
2 nm MoO ₃ + ITO	0.39 eV	0.22 eV	0.25 eV

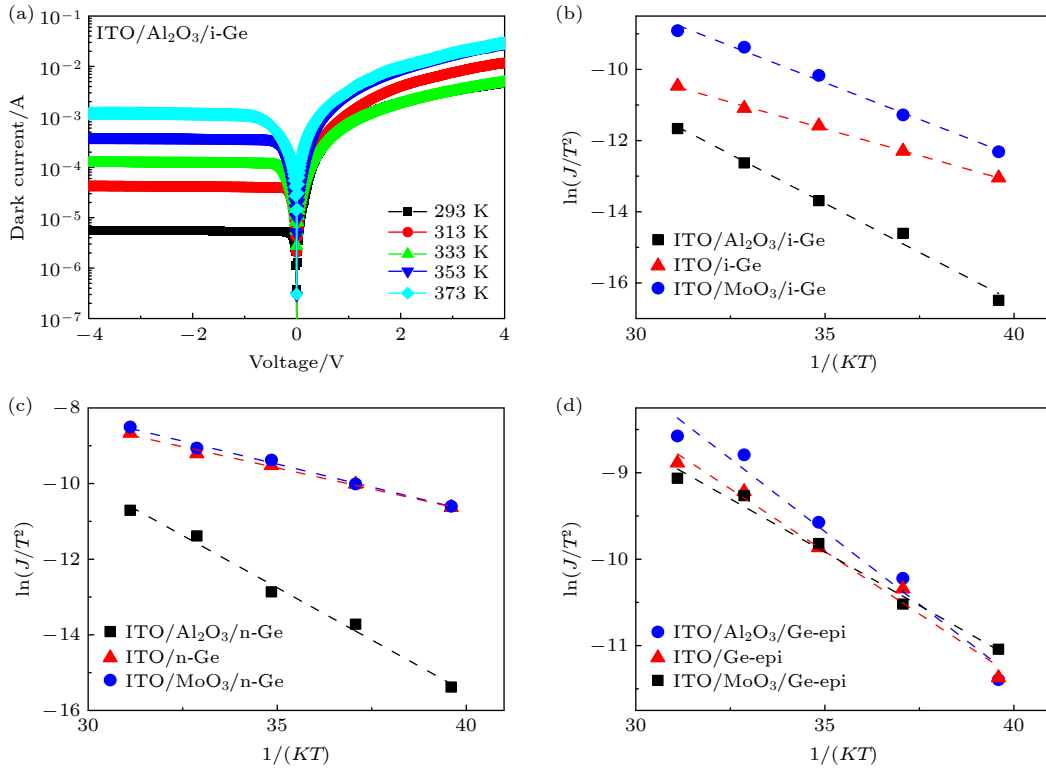


图 4 (a) ITO/Al₂O₃/i-Ge 变温 *I-V* 曲线; (b) i-Ge 组件 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/(kT)$ 拟合结果; (c) n-Ge 组件 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/(kT)$ 拟合结果; (d) Ge-epi 组件 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/(kT)$ 拟合结果

Fig. 4. (a) Temperature dependent *I-V* characteristics of ITO/Al₂O₃/i-Ge detector; (b) $\ln(J/T^2)$ versus $1/(kT)$ for i-Ge detectors; (c) $\ln(J/T^2)$ versus $1/(kT)$ for n-Ge detectors; (d) $\ln(J/T^2)$ versus $1/(kT)$ for Ge-epi detectors.

变化. 另一方面则是由于外延生长 Ge 的厚度较薄, 仅 500 nm, 对入射光不能充分吸收, 响应度相对较小; 针对以上原因, 为了进一步提高外延锗材料的光电探测器得响应度, 可以采取增大外延层厚度的方法或者使用绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 衬底代替硅衬底引入谐振腔增强光吸收的方法; 此外需提高材料外延质量, 降低界面位错密度.

化物电极, 能够起到解除半导体表面的费米钉扎效应的作用^[31], 与 Ge 之间仅有很小的接触势垒, 且对不同类型的 Ge 略有差别, 其有效接触势垒在 0.24—0.34 eV 之间. 但当 ITO 与 Ge 之间插入 2 nm 厚的 Al₂O₃ 之后, 伏安特性中反向暗电流显著下降, 整流比提高. 相比较而言, 插入 MoO₃ 介质层对 ITO/Ge 接触势垒高度的影响不大.

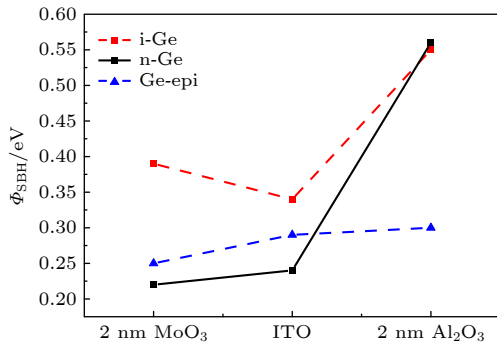


图 5 有效肖特基势垒高度与器件类型关系图

Fig. 5. Diagram of effective Schottky barrier heights with device types.

而由于半导体 Ge 表面存在大量表面态, 导致强烈的费米钉扎效应^[11], ITO 作为一种高掺杂的氧

为了更好地理解不同结构光电探测器暗电流和光电特性, 图 6 展示了 ITO/Al₂O₃/Ge, ITO/MoO₃/Ge 和 ITO/Ge 能带和载流子输运示意图. 在反向偏压下, 内建电场增大, 光生载流子主要发生在空间电荷层, 但由于 ITO 的电子填充水平较高, 光生空穴可以顺利输运到 ITO 表面, 因此不存在载流子被限制的情况^[7], 而在 ITO 和 Ge 之间加入了 Al₂O₃ 插层后, 由于 Al₂O₃ 电子亲和能很小, 约为 1.0 eV^[32], 而带隙很大, 达到 10.7 eV^[33], 使得光生空穴透穿的几率减小, 被限制在界面以及介质层中缺陷能级上, 产生光电流增益, 因此在 ITO/Al₂O₃/Ge 类光电探测器中得到高的响应度. 对 ITO/MoO₃/Ge 类光电探测器, 插入 MoO₃ 介质层, 其接触势垒高度变化很小, 在误差范围内可以

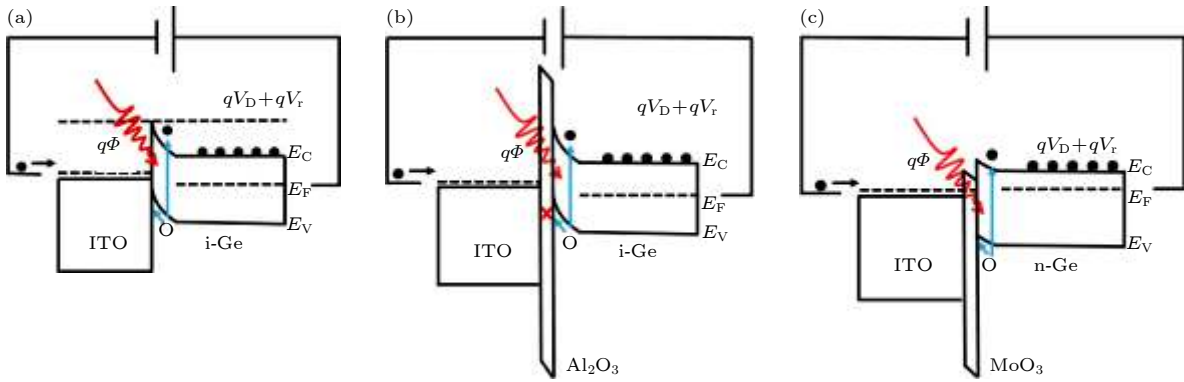


图 6 光照下探测器的能带结构图以及载流子输运示意图 (a) ITO/i-Ge; (b) ITO/Al₂O₃/i-Ge; (c) ITO/MoO₃/n-Ge
 Fig. 6. Energy band and carrier transport diagram of detectors under light illumination: (a) ITO/i-Ge; (b) ITO/Al₂O₃/i-Ge; (c) ITO/MoO₃/n-Ge.

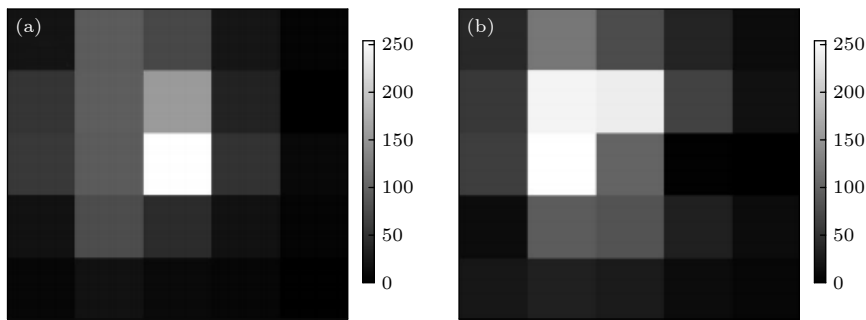


图 7 ITO/Al₂O₃/i-Ge 二维成像图 (a) 1310 nm 波长; (b) 1550 nm 波长
 Fig. 7. Two dimensional image obtained from the ITO/Al₂O₃/i-Ge detector: (a) 1310 nm laser; (b) 1550 nm laser.

忽略不计. MoO₃ 薄膜的电子亲和能较大, 约为 5.22 eV, 而其带隙约为 3.19 eV^[34]. 由于 MoO₃ 的电子亲和能远大于 Ge 的电子亲和能, MoO₃ 插层对 ITO/Ge 接触电子势垒高度影响不大. 另一方面, MoO₃ 可以作为空穴传输层用于太阳能电池中^[35], 对光生空穴没有明显的限制作用. 对比 Al₂O₃ 和 MoO₃ 两种介质插层对 ITO/Ge 光电探测器性能的调制, 进一步明确了 Al₂O₃ 介质插层对 ITO/Ge 势垒高度的调制以及限制空穴的作用是降低探测器暗电流和提高光电响应度的主要原因.

室温工作短波红外焦平面成像在微光夜视或雾霾气象条件下无人驾驶等领域具有重要的应用前景. 使用二维位移平台对制备的响应度最高的肖特基光电探测器 (ITO/Al₂O₃/i-Ge) 进行了单点成像实验. 分别在 X 方向和 Y 方向都移动了 5 个器件直径的距离, 即整个测试图像面积为 1750 μm × 1750 μm. 使用波长 1310 nm 和 1550 nm 的激光器, 激光光斑的大小约为 100 μm. 通过测试不同位置时光电探测器的光电流 (电压), 与对应位置坐标利用 MATLAB 灰度图进行成像, 即得到激光光斑

所在位置的图像, 如图 7 所示. 考虑到不同波长 (1310 nm, 1550 nm) 激光光斑是独立耦合所得, 在更换光纤后光斑位置会出现一定程度的偏差, 虽然如此, 图中可以看到最亮光斑的移动不会超过 350 μm. 因此可认为所制备的探测器及其成像系统仍然具有很高的保真特性, 证明了制备的红外光电探测器可以应用于红外光电成像系统中.

4 结 论

本文分别使用不同类型的锗材料制备了 ITO/Ge 肖特基光电探测器, 比较研究了在电极和锗之间插入超薄 Al₂O₃ 和 MoO₃ 介质层, 对势垒高度的调制作用和光电探测器性能的影响. 从实验上证实插入 2 nm 厚的 Al₂O₃ 介质层可有效提高 ITO/Ge 肖特基势垒高度, 降低探测器暗电流, 提高光电响应度. 而插入 MoO₃ 介质层对 ITO/Ge 光电探测器的性能影响不大. 结果表明引入 Al₂O₃ 介质插层一方面提高 ITO/Ge 接触势垒高度, 另一方面对在锗中产生的光生空穴有限制作用, 导致器件光电流

增益的产生, 大幅提高探测器的响应度. 最后, 使用制备的 ITO/Al₂O₃/i-Ge 肖特基光电探测器进行了单点成像实验, 对波长 1310 nm 和 1550 nm 激光光斑成像得到可分辨的图案. 表明本文提出的制备高性能 Ge 肖特基光电探测器的方法可应用于低成本短波红外成像系统.

参考文献

- [1] Vivien L, Rouvière M, Fédéli J M, Marris-Morini D, Damlencourt J F, Mangeney J, Crozat P, Melhaoui L E, Cassan E, Le Roux X, Pascal D, Laval S 2007 *Opt. Express* **15** 9843
- [2] Eng P C, Song S, Ping B 2015 *Nanophotonics-Berlin* **4** 277
- [3] Soref R 1993 *P. IEEE* **81** 1687
- [4] Soref R 2010 *Nat. Photonics* **4** 495
- [5] Eng P C, Song S, Ping B 2010 *Nat. Photonics* **4** 527
- [6] Wang J A, Lee S 2011 *Sensors* **11** 696
- [7] Ahn D, Hong C Y, Liu F, Giziewicz W, Beals M, Kimerling L C, Michel J, Chen J, Kartner F X 2007 *Opt. Express* **15** 3916
- [8] Kumar S, Chatterjee A, Selvaraja S K, Avasthi S 2020 *IEEE Sens. J.* **20** 4660
- [9] Wang X J, Su Z T, Zhou Z P 2015 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **1** 15 (in Chinese) [王兴军, 苏昭棠, 周治平 2015 中国科学: 物理学 力学 天文学 **1** 15]
- [10] Rogalski A 2003 *Prog. Quant. Electron* **27** 59
- [11] Yu C Y, Huang Z W, Lin G Y, Mao Y C, Hong H Y, Zhang L, Zhao Y M, Wang J Y, Huang W, Chen S Y, Li C 2020 *J. Phys. D* **53** 125103
- [12] Cui J S, Li T T, Yang F H, Cui W J, Chen H M 2021 *Opt. Commun.* **480** 126467
- [13] Vivien L, Osmond J, Fedeli J M, Marris-Morini D, Crozat P, Damlencourt J F, Cassan E, Lecunff Y, Laval S 2009 *Opt. Express* **17** 6252
- [14] Li X L, Liu Z, Peng L Z, Liu X Q, Wang N, Zhao Y, Zhen J, Zuo Y H, Xue C L, Cheng B W 2020 *Chinese Phys. Lett.* **37** 038503
- [15] Fama S, Colace L, Masini G, Assanto G, Luan H C 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 586
- [16] Liu J F, Michel J, Giziewicz W, Pan D, Wada K, Cannon D, Jongthammanurak S, Danielson D T, Kimerling L C, Chen J, Ilday F O, Kartner F X, Yasaitis J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 103501
- [17] Huang Z H, Kong N, Guo X Y, Liu M G, Duan N, Beck A L, Banerjee S K, Campbell J C 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** 1450
- [18] Kang Y M, Liu H D, Morse M, Paniccia M J, Zadka M, Litski S, Sarid G, Pauchard A, Kuo Y H, Chen H W, Zaoui W S, Bowers J E, Beling A, McIntosh D C, Zheng X G, Campbell J C 2009 *Nat. Photonics* **3** 59
- [19] Zhu H, Shan C X, Wang L K, Zheng J, Zhang J Y, Yao B, Shen D Z 2010 *J. Phys. Chem. C* **114** 7169
- [20] Yu J, Shan C X, Qiao Q, Xie X H, Wang S P, Zhang Z Z, Shen D Z 2012 *Sensors* **12** 1280
- [21] Huang Z W, Yu C Y, Chang A L, Zhao Y M, Huang W, Chen S Y, Li C 2020 *J. Mater. Sci.* **55** 8630
- [22] Mazur M, Pastuszek R, Wojcieszak D, Kaczmarek D, Lubanska A <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/CW-11-2019-0170/full/html> [2020-12-07]
- [23] Huang Z W, Mao Y C, Lin G Y, Yi X H, Chang A L, Li C, Chen S Y, Huang W, Wang J Y 2018 *Opt. Express* **26** 5827
- [24] Assefa S, Fengnian X, Vlasov Y A 2010 In *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference* Los Angeles, CA USA, March 21–25, 2010 p1
- [25] Feng N N, Dong P, Zheng D W, Liao S R, Liang H, Shafiqi R, Feng D Z, Li G L, Cunningham J E, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2010 *Opt. Express* **18** 96
- [26] DeRose C T, Trotter D C, Zortman W A, Starbuck A L, Fisher M, Watts M R, Davids P S 2011 *Opt. Express* **19** 24897
- [27] Harris N C, Baehr-Jones T, Lim A E J, Liow T Y, Lo G Q, Hochberg M 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 23
- [28] Chen H T, Verheyen P, De Heyn P, Lepage G, De Coster J, Absil P, Roelkens G, Van Campenhout J 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 820
- [29] Wang C, Xu Y H, Li C, Lin H J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 198502 (in Chinese) [王尘, 许怡红, 李成, 林海军 2017 物理学报 **66** 198502]
- [30] Tong Y, Liu B, Lim P S Y, Yeo Y C 2012 *IEEE Electron Device Lett.* **33** 773
- [31] Manik P P, Lodha S 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 051302
- [32] Robertson J 2000 *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 1785
- [33] Zheng S, Yang W, Sun Q Q, Chen L, Zhou P, Wang P F, Zhang D W, Xiao F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 261602
- [34] Irfan I, Turinske A J, Bao Z N, Gao Y L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 093305
- [35] Han B C, Gao M, Chen D Y, Song W L, Song X M, Xu F, Zhao L, Ma Z Q, Zhang Z H, Mo J H 2017 *Summary of the First National Symposium on Functional Films and Coatings and International Forums* Kun Ming, China, July 23, 2017 p2 (in Chinese) [韩百超, 高明, 陈东运, 宋文磊, 宋晓敏, 徐飞, 赵磊, 马忠权, 张志恒, 莫镜辉 2017 第一届全国功能薄膜与涂层学术研讨会暨国际论坛 中国昆明 2017-07-23 p2]

Indium tin oxid/germanium Schottky photodetectors modulated by ultra-thin dielectric intercalation*

Zhao Yi-Mo¹⁾ Huang Zhi-Wei²⁾ Peng Ren-Miao³⁾ Xu Peng-Peng¹⁾
 Wu Qiang¹⁾ Mao Yi-Chen¹⁾ Yu Chun-Yu¹⁾ Huang Wei¹⁾
 Wang Jian-Yuan¹⁾ Chen Song-Yan¹⁾ Li Cheng^{1)†}

1) (*College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

2) (*College of Physics Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China*)

3) (*School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(Received 21 January 2021; revised manuscript received 11 February 2021)

Abstract

Germanium (Ge) photodetector has been considered as one of the promising optoelectronic devices for optoelectronic integration. So far, most of reported Ge photodetectors with bulk Ge show high dark currents and low responsivities. In this paper, ultra-thin dielectric interlayer-modulated indium tin oxid (ITO)/Ge Schottky photodetectors with high responsivities and low dark currents are investigated, in which the ultra-thin dielectric interlayers are deposited through atomic layer deposition. The characteristics of ITO/Al₂O₃ (or MoO₃)/Ge Schottky photodiodes fabricated on bulk Ge wafers with various doping concentrations and Ge epilayer on silicon substrates are comparatively studied. It is found that the 2-nm-thick Al₂O₃ intercalation between ITO transparent electrode and Ge can effectively enhance the Schottky barrier heights of the photodetectors and trap holes at interface states, rendering their dark currents low and responsivities high. The effective Schottky barrier heights increase from 0.34 eV (ITO/i-Ge) to 0.55 eV (ITO/Al₂O₃/i-Ge), and from 0.24 eV (ITO/n-Ge) to 0.56 eV (ITO/Al₂O₃/n-Ge). While MoO₃ intercalation between ITO and Ge has no significant effect on the characteristics of all of the photodetectors due to its large electron affinity. The best performance is realized on the ITO/Al₂O₃/i-Ge photodetector with a low dark current of 5.91 mA/cm² at -4 V, sharply dropping by two orders of magnitude, compared with that of the ITO/i-Ge photodetector without the Al₂O₃ interlayer, and the responsivity is significantly improved to 4.11 A/W at 1310 nm. The ITO/Al₂O₃/epi-Ge photodetector fabricated on 500 nm Ge epilayer on a silicon substrate also shows the improved performance with a dark current density of 226.70 mA/cm² at -3 V and a responsivity of 0.38 A/W at 1310 nm, compared with ITO/epi-Ge photodetector. Finally, experiment studies of single-point infrared images at 1310 nm and 1550 nm are carried out with the ITO/Al₂O₃/i-Ge photodetector on a two-dimensional XY displacement platform, which contains 25 pixels and a total detection size of 1750 μm × 1750 μm. The clear and distinguishable images of the infrared spot position are obtained. Consequently, these results suggest that the dielectric interlayer-modulated Schottky photodetectors are competitive in low power consumption and high responsivity, and have great potential applications in the civil field of short wave infrared imaging.

Keywords: photodetector, contact barrier, responsivity, dielectric intercalation

PACS: 85.60.Gz, 85.30.De, 81.15.Gh, 68.55.-a

DOI: 10.7498/aps.70.20210138

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62074134).

† Corresponding author. E-mail: lich@xmu.edu.cn