

锗近红外光电探测器制备工艺研究进展

黄志伟¹, 汪建元², 黄巍², 陈松岩², 李成^{2*}

(1. 厦门大学嘉庚学院, 福建漳州 363105;

2. 厦门大学物理科学与技术学院, 福建厦门 361005)

摘要: Ge 材料由于在近红外波段具有较大的吸收系数、高的载流子迁移率、以及与 Si 工艺相兼容等优势而被视为制备近红外光电探测器最理想的材料之一。针对 Ge 光电探测器制备过程中面临的挑战, 文中综述了近年来笔者所在的课题组在 Ge 探测器材料、器件及工艺方面的研究进展。首先介绍了 Si 基 Ge 材料的制备工艺, 利用低温缓冲层生长技术、Ge/Si 键合技术、Ge 浓缩技术等分别制备得到高晶体质量的 Si 基 Ge 材料。研究了 Ge 材料 n 型掺杂工艺, 利用离子注入结合两步退火处理(低温预退火和激光退火)以及利用固态磷旋涂工艺等分别实现 Ge 材料 n 型高掺杂浅结制备。最后探究了金属/Ge 接触势垒高度的调制方法, 结合金属中间层和透明导电电极 ITO 制备得到性能良好的 Ge 肖特基光电探测器。

关键词: Ge 光电探测器; Si 基 Ge 材料; n 型掺杂; 肖特基势垒高度

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103004

Research progress of technologies for germanium near-infrared photodetectors

Huang Zhiwei¹, Wang Jianyuan², Huang Wei², Chen Songyan², Li Cheng^{2*}

(1. Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China;

2. College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Germanium (Ge) is considered as one of the most promising materials for near infrared (NIR) photodetectors, due to its large absorption coefficient at NIR wavelengths, high carrier mobilities, and process compatibility with silicon (Si) architecture. Focusing on the challenges of Ge NIR photodetectors, in this paper, the progress of Ge materials and technologies for photodetectors in our group was reviewed extensively. Firstly, the preparation process of Si-based Ge materials was introduced, in which high crystal quality Si-based Ge materials were fabricated by a two-step epitaxy method, Ge/Si wafer bonding, and Ge condensation techniques, respectively. Then the n-type doping technology of Ge was studied, in which high n-type doping concentrations and shallow junctions of Ge materials were prepared by two-step annealing (low temperature pre-annealing and excimer laser annealing) for phosphorus-implanted Ge substrate and spin-on doping of phosphorus on Ge substrate, respectively. Finally, the modulation of Schottky barrier height of metal/Ge contacts were studied, and a high-performance Ge

收稿日期: 2019-10-30; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61474094, 61474081)

作者简介: 黄志伟(1989-), 男, 讲师, 博士, 主要从事硅基光电探测器方面的研究。Email: 252792371@qq.com

通讯作者: 李成(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事硅基集成光电子材料与器件方面的研究。Email: lich@xmu.edu.cn

Schottky photodetector was prepared by combining ITO transparent electrode and ultra-thin metal film interlayer.

Key words: Ge photodetectors; Si-based Ge materials; n-type doping; Schottky barrier height

0 引言

伴随着当代社会对庞大信息容量和高速信息处理速度的迫切要求,采用硅基光电集成代替传统的电互联的研究逐渐受到人们的广泛关注。硅基光电集成包含有光源、光电调制器和光电探测器等模块,其中光电探测器作为光信号接收器的重要组成部分无疑是极为重要的。光电集成所需的波段主要集中在 1 310、1 550 nm,虽然以 III-V 族作为光吸收材料制备而成的近红外光电探测器已经具备良好的性能,但是利用这些材料制备而成的器件与 Si 材料之间复杂的集成工艺往往导致昂贵的制作成本。Ge 与 Si 材料同属于 IV 族材料,其在 1 310~1 550 nm 波段有较大的吸收系数、高的载流子迁移率、以及与 Si 工艺相兼容等优势;此外,基于应变工程和掺杂工程如掺 Sn,可将其响应波长拓展到短波红外波段,用于红外成像等领域。因此,Ge 光电探测器被视为 Si 基光电集成领域最有潜力的光电子器件之一^[1-2]。

制备性能优异的 Ge 近红外光电探测器,仍然需要克服一些挑战。比如:(1) 受限于 Ge 和 Si 之间 4.2% 的晶格失配,高晶体质量的 Si 基 Ge 材料制备存在困难;(2) 受到 n 型杂质在 Ge 材料中较大的扩散系数以及较低的杂质固溶度的影响,Ge 材料 n 型高掺杂难以制备;(3) Ge 表面态密度高,金属/Ge 接触势垒高度不受金属功函数调制;Ge 材料带隙窄,Ge 基光电探测器的暗电流仍然较大。对这些问题进行深入的研究有助于 Ge 基光电探测器的发展。

文中结合笔者所在的课题组的工作对 Ge 近红外光电探测器研究进展进行了简单的回顾,首先介绍了 Si 基 Ge 材料的制备工艺和性质;回顾了 Ge 材料 n 型高掺杂的制备工艺,研制出的 n+p 结二极管具有极低的暗电流,并且在 1 550 nm 波段具备良好的响应特性;最后回顾了金属/Ge 接触势垒高度的调制方法,探究了金属/Ge 接触势垒高度的调制分别在 PIN 和肖特基结构 Ge 基光电探测器

中的应用。

1 Si 基 Ge 材料的制备

1.1 利用低温缓冲层技术制备 Si 基外延 Ge 材料

将 Ge 光电探测器应用在 Si 基光电集成系统中,晶体质量良好的 Si 基 Ge 材料的制备是首要的前提。但由于 Ge 和 Si 之间 4.2% 的晶格失配,在 Si 衬底上直接外延得到的 Ge 材料存在着穿透位错密度高、表面粗糙度高等问题。为了获得晶体质量良好的 Si 基 Ge 材料,研究人员采取了很多方法,例如组份渐变的 Ge 缓冲层技术^[3]、表面活性剂诱导外延技术^[4]、选区外延技术^[5]、低温缓冲层技术^[6]等。其中,低温缓冲层技术由于具备生长工艺简单且缓冲层薄的优点而成为人们最常用到的生长技术之一。

研究低温缓冲层技术制备 Si 基外延 Ge 材料,在 Si 衬底上利用低温缓冲层技术外延生长了 370 nm 厚的 Ge 材料。为了进一步改善外延 Ge 的晶体质量,采用 KrF 准分子激光器(激光波长为 248 nm),在高纯氮气的气体氛围下以 400~600 mJ/cm² 的激光能量密度对外延 Ge 样品进行激光退火(ELA)处理^[7]。一定能量密度的脉冲激光照射在 Ge 表面,可以使得 Ge 材料急速升温,极高的温度可以使得 Ge 表面迅速发生熔化再结晶的过程,并在热传导的作用下温度向里面迅速传输,从而对外延 Ge 材料起到退火的作用。

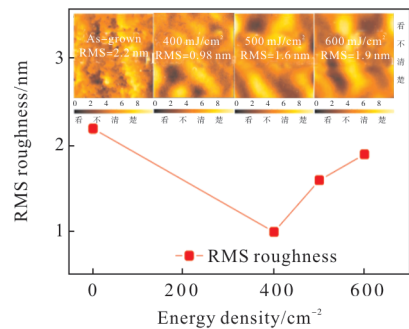


图 1 原子力显微镜测试外延 Ge(370 nm)表面形貌及其粗糙度随激光退火能量密度的变化关系^[7]

Fig.1 RMS and roughness of Ge epilayers (370 nm) measured by AFM as a function of laser energy densities^[7]

图 1 显示了 370 nm 外延 Ge 样品在激光退火处理前后样品表面原子显微镜测试结果。可以看到, 400~600 mJ/cm² 能量密度的激光退火对于外延 Ge 表面平整度均有不同程度的改善, 在 400 mJ/cm² 能量密度下, 样品表面粗糙度 RMS 由 2.2 nm 降低至 0.98 nm。XRD 测试表明, 即使在 600 mJ/cm² 能量密度的激光退火下, 外延 Ge 样品仍然无明显 Ge 和 Si 互扩散现象发生。进一步笔者发现结合激光退火和高温长时间退火可以进一步提高 Si 衬底上外延 Ge 的晶体质量, 在 500 mJ/cm² 能量密度下进行激光退火结合 700 ℃、50 min 高温长时间退火处理后, 370 nm 外延 Ge 样品 XRD 测试 Ge (004) 衍射峰半高宽由未做退火处理时的 630" 降低至 485", 获得结晶质量较高的较薄的 Si 基 Ge 外延材料。

1.2 采用键合的方式制备 Si 基 Ge 薄膜

对于 Si 基 Ge 薄膜, 还可以采用低温 Ge/Si 键合结合 Smart-cut 工艺制备得到。相比于采用外延的方式获得的 Si 基 Ge 薄膜, 采用 Ge/Si 键合工艺的优势在于: (1) 低温键合可以在 300 ℃ 以下的温度进行, 温度远小于直接在 Si 基衬底上外延 Ge 材料时的所需的温度; (2) 可以有效地降低外延 Ge 层的穿透位错密度, 经过低温 Ge/Si 键合结合 Smart-cut 工艺制备得到的 Si 基 Ge 薄膜晶体质量可以接近体 Ge 材料。

课题组首次提出了利用 a-Ge 材料作为 Ge 和 Si 键合的中间层, 在低温(300 ℃)下实现了良好 Ge/Si 键合, 键合强度接近体 Ge 材料^[8]。将键合材料 Ge 层厚度减薄到 1 μm, XRD 测试结果显示 Ge(004) 衍射峰半高宽仅为 34", 这说明此时 Ge 材料结晶质量良好。此外, 键合过程还在 Ge 材料中引入了 0.205% 的张应变, 有益于 Ge 材料的光吸收截止波长的延伸。利用减薄过后的 Ge/Si 键合材料制备成异质结二极管, 二极管光响应性能如图 2 所示^[8]。如图 2(a) 所示, 二极管在 1 310 nm 和 1 550 nm 均有良好的响应特性; 32 μm 和 100 μm 直径台面的探测器在 1 630 nm 的光照下仍具有 94、17 mA/W 的光响应, 如图 2(b) 所示, 验证了张应变对于 Ge 探测器探测波长的延伸作用。

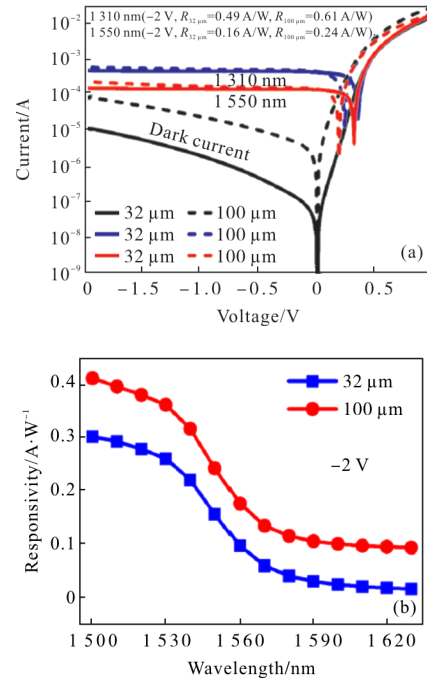


图 2 (a) 不同台面光电二极管的光暗电流; (b) 不同波长光照射下光电二极管响应率变化^[8]

Fig.2 (a) Photocurrents and dark currents of the photodiodes with various mesa diameters; (b) Responsivities of the photodiodes illuminated using various wavelength lights^[8]

1.3 GOI 材料的制备

GOI 材料是另外一种用于制备 Ge 光电探测器的重要 Si 基 Ge 材料, 其独特的全介质隔离结构能够有效地降低寄生电容对探测器性能的不利影响。对于 GOI 材料课题组可以通过键合或者 Ge 浓缩的方式获得。

课题组采用 N₂ 等离子体活化处理结合氨水溶液获得表面亲水性良好的体 Ge 与 SiO₂/Si 晶片, 实现良好的键合, 结合 Smart-cut 工艺制备得到界面平整、清晰的 GOI 材料^[9]。在对 GOI 表面 H 离子注入损伤区进行溶液腐蚀去除后, GOI 材料 XRD 测试显示 Ge(004) 衍射峰半高宽仅为 70.4"。

Ge 浓缩法依靠对绝缘层上 SiGe 材料的不断氧化、退火过程, 在制备超薄 GOI 上有很大的优势。利用 Ge 浓缩工艺可以制备得到 Ge 纳米线, 由于其大的表面积和体积的比以及 Ge 表面氧化物引进的缺陷对于光生空穴的限制作用, 可制备具有大增益的

Ge 纳米线光电导类型的光电探测器^[10]。通过对 Ge 浓缩进行研究,课题组利用两步温度法制备出了 0.67%张应变 GOI 材料^[11]。进一步优化 Ge 浓缩工艺,采用了温度渐变 Ge 浓缩法制备得到高晶体质量的 GOI 材料^[12]。

1.4 GeSn 材料的制备

对于扩展 Ge 材料的响应波长,除了增加 Ge 材料的张应变,还可以通过掺杂工程如掺 Sn 的方式。通过增大 GeSn 合金中 Sn 的组分可以使得 GeSn 的带隙得到缩短;此外,理论研究表明,当 GeSn 材料在完全弛豫的情况下,9%的 Sn 含量可以使 GeSn 合金转变为直接带隙材料。这些特点使得 GeSn 成为制备近红外、短波红外波段光电探测器的理想材料之一。

笔者在 Si 和 Ge 衬底上直接外延了 GeSn 单晶薄膜,Sn 组份达到 10%以上。探索了通过溅射方法沉积 GeSn 薄膜的技术,利用激光退火处理实现高 Sn 组分的多晶 GeSn 薄膜(Sn 含量超过 10%)^[13]。结合磁控溅射和快速热退火处理,在 Ge 衬底上制备得到单晶 GeSn 薄膜^[14]。在绝缘衬底上制备 GeSn 薄膜,利用自组装 Sn 纳米岛上低温沉积 Ge 层最终获得高 Sn 组分 GeSn 纳米晶薄膜^[15]。此外,还将金属扩散诱导晶化和应力限制效应原理结合起来,利用低温 Sn 原子扩散诱导制备得到超高密度 GeSn 量子点^[16]

2 Ge 材料 n 型高掺浅结的制备

2.1 磷离子注入结合激光退火获得 Ge 表面 n 型高掺

对于 Ge 材料,可以采用磷离子注入结合后续退火处理实现 n 型掺杂。其中,在退火过程中需要保证退火的能量足够大以确保杂质得到有效的激活,同时退火时间应该尽量短从而避免杂质扩散过深。相比于其他退火方式,如:传统的管式炉退火、快速热退火、快闪灯照退火等,脉冲激光退火过程可以达到很高的温度以保证 n 型杂质得到激活,同时退火时间仅为几十纳秒级别可以避免杂质扩散过深。对于 Ge 材料 n 型高掺浅结的制备,离子注入结合激光退火是很好的选择。

根据磷离子在 Ge 材料中的扩散行为,笔者提出结合低温预退火和脉冲激光退火的两步退火法,利

用低温预退火初步修复注磷 Ge 衬底的离子注入损伤,接着对样品进行激光退火实现 n 型掺杂^[17]。Ge 衬底经过 30 keV 能量、 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 剂量的磷离子注入后,进行 400 °C、10 min 低温预退火结合 150 mJ/cm^2 激光退火处理,样品的杂质激活浓度达到 $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,而结深仅为 44 nm。利用此方法制备得到整流特性良好的 n⁺/p 结二极管,其 IV 曲线整流比高达 10^7 ,为国际报道的最好水平。如图 3^[18]所示,利用此方法制备而成的 n⁺/p 结二极管在 -1 V 偏压下对应的暗电流低至 7.9 nA(暗电流密度约 $1 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$),二极管在 1 550 nm 具备良好的响应特性,其响应度为 0.48 A/W。

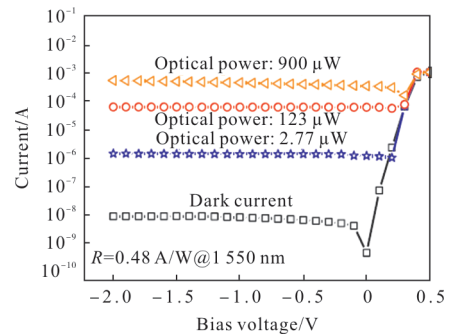


图 3 Ge n⁺/p 光电二极管的光电流和暗电流^[18]

Fig.3 Photocurrent and dark current of an Ge n⁺/p photodiode^[18]

2.2 Ge 材料磷旋涂掺杂研究

实现 Ge 材料的 n 型掺杂,还可以采用固态磷旋涂掺杂的方法,与离子注入的方法相比较,旋涂掺杂具有工艺简单、无晶格损伤和成本低等优势,其在 Si 的掺杂中已得到了广泛的应用^[19]。但由于 Ge 材料化学性质较 Si 更为活泼,旋涂掺杂过程对于环境湿度非常敏感,在普通的洁净室环境下 Ge 表面形貌容易发生严重的恶化现象^[20]。

为了提高旋涂掺杂方法在 Ge 材料掺杂中的有效性,提出在进行 Ge 磷旋涂掺杂之前在 Ge 表面先溅射一层 a-Si 作为旋涂掺杂的保护层的方法^[21]。当未引入 a-Si 保护层时,磷旋涂过后的 Ge 衬底表面在退火过后表面形貌发生严重恶化,在 700 °C 温度的退火下,Ge 表面粗糙度 RMS 甚至高达 38 nm;在 9 nm a-Si 的保护下,磷旋涂过程中 Ge 表面形貌恶化现象得到了显著的抑制,即便退火温度达到 800 °C,Ge 表面粗糙度 RMS 依然小于 1 nm。同时,a-Si 的引入还显著抑制了退火过程磷的扩散;如

图 4 所示,在 Ge 表面引入 9 nm a-Si 后进行磷旋涂,然后进行 800 °C、1 min 的退火扩散,最终实现 Ge 表面高浓度 n 型掺杂,其掺杂结深仅为 40 nm。

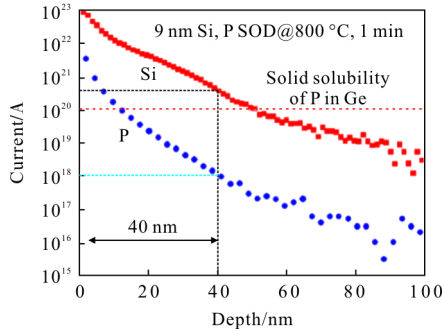


图 4 在 Ge 上沉积 9 nm 厚 Si 盖层,然后旋涂掺杂并进行 800 °C、1 min 退火后磷(P)和硅(Si)的 SIMS 深度分布曲线^[21]
Fig.4 P and Si SIMS profile for the Ge with a 9 nm thick Si cap layer after SOD process and annealing at 800 °C for 1 min^[21]

3 金属/Ge 接触势垒高度调制

3.1 金属/n-Ge 欧姆接触的研究

金属/Ge 接触的研究对于 Ge 光电探测器的性能有着重要的影响。由于 Ge 材料存在高密度的表面态,金属/Ge 接触存在着强烈的费米钉扎效应,金属/n-Ge 接触势垒高度很高(约 0.6 eV),这将导致接触串联电阻增大。对于一些类型,比如 PIN 类型 Ge 光电探测器的响应速率和响应度均造成不利的影

响。为了降低金属/n-Ge 接触势垒高度,笔者提出了在金属和 n-Ge 之间引入超薄的 TaN 中间层。在 TaN 中间层的作用下,金属/n-Ge 接触势垒高度由原先的 0.6 eV 降低至约 0.4 eV^[22]。在此基础上,利用 TaN 作为金属/n-Ge 接触中间层制备 SOI 基 Ge PIN 光电探测器,使得光电探测器暗电流(-1 V 偏压)降低了一个数量级,响应度(1 550 nm)提升了 2 倍,同时 3 dB 响应带宽提高了 4 倍^[23]。

研究金属/n-Ge 接触特性,笔者发现在金属/n-Ge 接触中间引入 TiN_x^[24]、WN_x^[25]、a-Ge^[26]、GeON_x^[27] 或者 GeSnO_x^[28] 介质层均可以有效降低金属/n-Ge 接触势垒高度。为了优化介质层材料,采用了 ITO 作为金属/n-Ge 接触的中间层^[29],ITO 与 Ge 材料之间的导带底差值很小,因而 ITO 的引入对于载流

子的运输影响很小;此外,ITO 本身具有良好的导电能力,只要合理地控制 ITO 中间层的厚度就可以避免引入过大的串联电阻。如图 5(a)所示,ITO 的引入显著增大了 Al/n-Ge 接触的反向暗电流密度,与 Al/n-Ge 相比,Al/ITO(4 nm)/n-Ge 接触 J-V 曲线反向电流密度(-1 V 偏压)增大了约 4 000 倍,意味着 Al 和 n-Ge 之间的肖特基势垒高度得到了有效的降低。此外,Al/ITO/n-Ge 接触 ±0.1 V 偏压下的电流密度(见图 5(b))均随着 ITO 厚度的增加而增加,说明了由 ITO 薄膜引入的串联电阻比较小。

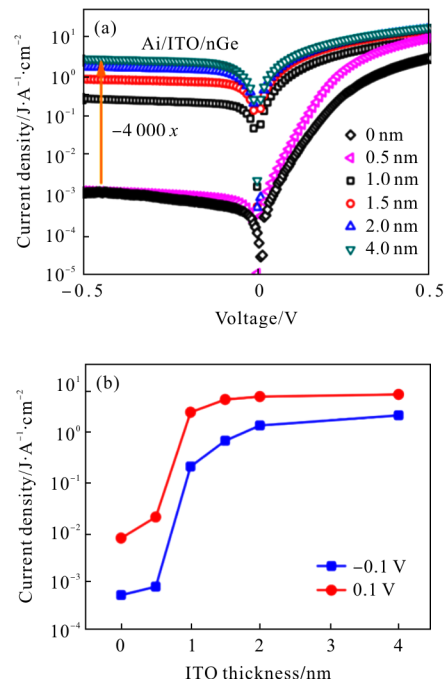


图 5 (a) Al/ITO/n-Ge 接触室温 J-V 特性曲线;(b) Al/ITO/n-Ge 接触±0.1 V 偏压下电流密度随 ITO 厚度的变化曲线^[29]
Fig.5 (a) Room temperature J-V characteristics curves for Al/ITO/n-Ge contacts; (b) Dependence of current densities at ±0.1 V bias for Al/ITO/n-Ge contacts on ITO thickness^[29]

3.2 ITO/Au/n-Ge 肖特基光电二极管的研制

不同于 PIN 光电探测器,对于肖特基光电探测器而言,需要适当增大金属/Ge 的接触势垒高度和宽度来抑制器件暗电流,增大响应度。肖特基光电探测器具有制备工艺简单、光生载流子收集效率高且响应速率快的优点,利用透明导电电极 ITO 代替金属材料与半导体构成光电二极管可以避免金属电极对光严重的反射现象。但对于 ITO/Ge 光电二极管

而言, 需要克服 ITO/Ge 接触势垒高度过低导致的器件暗电流过大、响应度过小的问题。

为了增大 ITO/n-Ge 的接触势垒高度, 笔者提出了在 ITO 和 n-Ge 中间引入超薄的金属薄膜的方法^[30]。其优势在于当金属薄膜在提高接触势垒高度的同时, 当其厚度足够薄时, 金属薄膜对光的透射率仍然较大, 且不会引入过大的串连电阻。如图 6(a) 所示, ITO 与 n-Ge 直接接触构成二极管时, 器件暗电流大, 光电流小, 导致光暗电流基本重合。在引入 3 nm Au 薄膜之后二极管暗电流减小而光电流增大, 二极管光电流和暗电流区分度明显增大(见图 6(b))。比较 Au 薄膜的引入对二极管响应性能的影响, 加入金属 Au 中间层后, 二极管光响应度得到显著增大, ITO/Au(3 nm)/n-Ge 和 ITO/Au(5 nm)/n-Ge 二极管光响应度分别为 0.67 A/W 和 0.62 A/W (见图 6(c))。金属 Au 薄膜的引入增大了二极管响应度的同时抑制了二极管的暗电流, 使得二极管的归一化光电流-暗电流比(NPDR= R/I_{dark})得到明显改善, ITO/Au(5 nm)/n-Ge 二极管的 NPDR 值达到 86 000 W^{-1} , 为 ITO/n-Ge 结构的 2 066 倍(见图 6(c))。最终制备得到的 ITO/Au/n-Ge 光电二极管在 800~1 650 nm 波段均有响应(见图 6(d))。

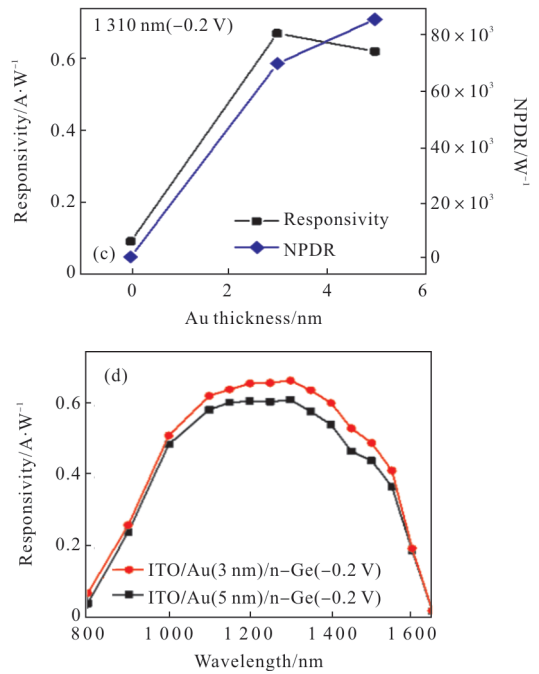
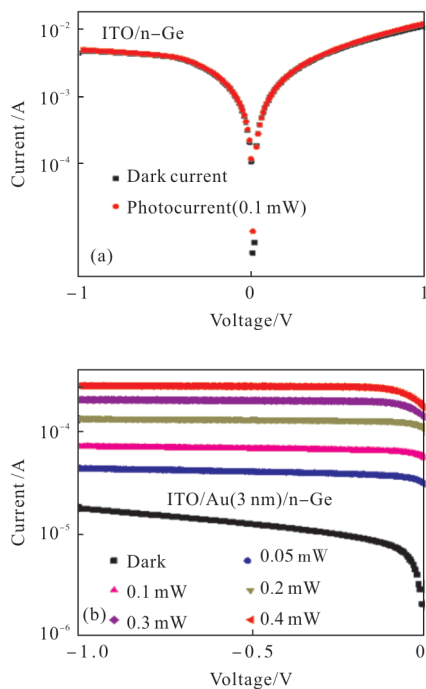


图 6 不同功率 1 310 nm 激光照射下二极管 $I-V$ 曲线图, (a)ITO/n-Ge; (b) ITO/Au(3 nm)/n-Ge; (c) ITO/Au/n-Ge 二极管响应度及 NPDR 值随 Au 薄膜厚度的变化; (d) -0.2 V 偏压下 ITO/Au/n-Ge 二极管光谱响应曲线^[30]

Fig.6 $I-V$ curve of (a) ITO/n-Ge and (b) ITO/Au(3 nm)/n-Ge diodes measured at a wavelength of 1 310 nm with various powers; (c) Dependence of responsivities and NPDRs of ITO/Au/n-Ge diodes on Au thickness; (d) Spectral response curves of ITO/Au/n-Ge diodes measured at -0.2 V bias^[30]

4 结论

文中从 Ge 光电探测器制备过程中面临的挑战出发, 回顾了笔者所在课题组近年来在 Ge 近红外光电探测器材料和器件方面的研究进展。针对高质量 Si 基 Ge 材料的制备、Ge 材料高掺 n 型浅结的获得、金属/Ge 肖特基接触势垒高度调制及其在 Ge 基探测器中的应用方面进行了较为系统的研究, 这些结果有助于高性能的 Ge 基光电探测器的制备, 促进 Ge 探测器在 Si 基光电集成方面的应用。

参考文献:

[1] Lin Y, Lee K H, Bao S, et al. High-efficiency normal-incidence vertical pin photodetectors on a germanium-

- on-insulator platform [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 702-709.
- [2] Dushaq G, Nayfeh A, Rasras M. Metal-germanium-metal photodetector grown on silicon using low temperature RF-PECVD [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 32110-32119.
- [3] Luo G, Yang T H, Chang E Y, et al. Growth of high-quality Ge epitaxial layers on Si (100) [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(5B): L517.
- [4] Wietler T F, Bugiel E, Hofmann K R. Surfactant-mediated epitaxy of relaxed low-doped Ge films on Si (001) with low defect densities [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(18): 182102.
- [5] Park J S, Bai J, Curtin M, et al. Defect reduction of selective Ge epitaxy in trenches on Si (001) substrates using aspect ratio trapping [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(5): 052113.
- [6] Chen D, Xue Z, Wei X, et al. Ultralow temperature ramping rate of LT to HT for the growth of high quality Ge epilayer on Si (1 0 0) by RPCVD [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 299: 1-5
- [7] Huang Z, Mao Y, Yi X, et al. Impacts of excimer laser annealing on Ge epilayer on Si [J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(2): 148.
- [8] Ke S, Ye Y, Wu J, et al. Interface characteristics of different bonded structures fabricated by low-temperature a-Ge wafer bonding and the application of wafer-bonded Ge/Si photoelectric device [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(3): 2406-2416.
- [9] Lai Shumei, Mao Danfeng, Chen Songyan, et al. Fabrication of germanium-on-insulator by smart-cut (TM) technology [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2017, 53(3): 441-449. (in Chinese)
赖淑妹, 毛丹枫, 陈松岩, 等. 智能剥离制备 GOI 材料[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2017, 53(3): 441-449.
- [10] Sett S, Ghatak A, Sharma D, et al. Broad Band Single Germanium Nanowire Photodetectors with Surface Oxide-Controlled High Optical Gain [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(15): 8564-8572.
- [11] Huang S, Lu W, Li C, et al. A CMOS-compatible approach to fabricate an ultra-thin germanium-on-insulator with large tensile strain for Si-based light emission [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 640-646.
- [12] Lin G, Liang D, Wang J, et al. Strain evolution in SiGe-on-insulator fabricated by a modified germanium condensation technique with gradually reduced condensation temperature [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019, 97: 56-61.
- [13] Zhang L, Hong H, Wang Y, et al. Formation of high-Sn content polycrystalline GeSn films by pulsed laser annealing on co-sputtered amorphous GeSn on Ge substrate[J]. *Chinese Physics B*, 2017(11): 60.
- [14] Wang Y, Zhang L, Huang Z, et al. Crystallization of GeSn thin films deposited on Ge (100) substrate by magnetron sputtering [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, 88: 28-34.
- [15] Chen N, Lin G, Zhang L, et al. Low-temperature formation of GeSn nanocrystallite thin films by sputtering Ge on self-assembled Sn nanodots on SiO₂/Si substrate [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(5): 050301.
- [16] Zhang L, Hong H, Li C, et al. High-Sn fraction GeSn quantum dots for Si-based light source at 1.55 μm [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(5): 055504.
- [17] Wang C, Li C, Lin G, et al. Germanium n⁺/p shallow junction with record rectification ratio formed by low-temperature preannealing and excimer laser annealing [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(9): 3060-3065.
- [18] Wang C, Li C, Wei J, et al. High-performance Ge pn photodiode achieved with preannealing and excimer laser annealing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(14): 1485-1488.
- [19] Mathiot D, Lachiq A, Slaoui A, et al. Phosphorus diffusion from a spin-on doped glass (SOD) source during rapid thermal annealing[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 1998, 1(3-4): 231-236.
- [20] Boldrini V, Carturan S, Maggioni G, et al. Optimal process parameters for phosphorus spin-on-doping of germanium [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 392(1): 1173-1180.
- [21] Liang D, Lin G, Huang D, et al. Spin-on doping of phosphorus on Ge with a 9 nm amorphous Si capping layer to achieve n⁺/p shallow junctions through rapid thermal annealing [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(19): 195101.
- [22] Wu Z, Huang W, Li C, et al. Modulation of Schottky barrier height of metal/TaN/n-Ge junctions by varying

- TaN thickness [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2012, 59(9): 1328.
- [23] Wu Zheng, Wang Chen, Yan Guangmin, et al. Improvement on performance of Si-based Ge PIN photodetector with Al/TaN electrode for n-type Ge contact [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 353–358. (in Chinese)
吴政, 王尘, 严光明, 等. 采用 Al/TaN 叠层电极提高 Si 基 Ge PIN 光电探测器的性能 [J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 353–358.
- [24] Wu H, Huang W, Lu W, et al. Ohmic contact to n-type Ge with compositional Ti nitride [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 284: 877–880.
- [25] Wu H, Wang C, Wei J, et al. Ohmic Contact to n-Type Ge with Compositional W Nitride [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 35(12): 1188–1190.
- [26] Liu H, Wang P, Qi D, et al. Ohmic contact formation of metal/amorphous-Ge/n-Ge junctions with an anomalous modulation of Schottky barrier height [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(19): 192103.
- [27] Lai S, Mao D, Ruan Y, et al. Impact of nitrogen plasma passivation on the Al/n-Ge contact [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2016, 211: 178–184.
- [28] Huang Z, Li C, Lin G, et al. Suppressing the formation of GeO_x by doping Sn into Ge to modulate the Schottky barrier height of metal/n-Ge contact [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(2): 021301.
- [29] Huang Z, Mao Y, Lin G, et al. Impacts of ITO interlayer thickness on metal/n-Ge contacts [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, 224: 103–109.
- [30] Huang Z, Mao Y, Chang A, et al. Low-dark-current, high-responsivity indium-doped tin oxide/Au/n-Ge Schottky photodetectors for broadband 800–1650 nm detection [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(10): 102203.