材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250310002

锗表面自组装单分子膜的去费米钉扎效应研究

郭玉欣[1,2]，张贵银[1,2]，李云爻[1,2]，高雪娇[1,2]*

（1. 华北电力大学 数理系，河北 保定 071000；2. 河北省物理学与能源技术重点实验室，河北 保定 071000）

摘　要： 为系统研究锗表面自组装单分子膜对费米钉扎效应的调控效果，首先在锗表面形成乙烯基膦酸二乙酯（DVP）的自组装单分子膜，然后从肖特基势垒、表面均匀性、稳定性的角度全面研究去费米钉扎效果。研究结果显示，DVP单分子膜能够有效释放费米钉扎，在p型锗上形成0.50 eV的肖特基势垒；在n型锗上使肖特基势垒由0.52 eV下降至0.44 eV。然而，DVP单分子膜的调控效果不均匀，p型锗上的肖特基势垒存在12.2%的变化量，原因在于表面悬挂键没有被完全钝化。此外，DVP分子膜的去费米钉扎效果维持48 h后迅速退化，此现象归因于锗表面复杂的化学特性引起的不致密分子膜。

关键词： 锗；自组装单分子膜；费米钉扎；均匀性；稳定性

中图分类号： TN304　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0687－06

Investigation of Fermi Level Depinning Effect of Self-Assembled Molecular Monolayers on Germanium Surface

GUO Yuxin[1,2], ZHANG Guiyin[1,2], LI Yunyao[1,2], GAO Xuejiao[1,2]

(1. Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071000, CHN;
2. Hebei Key Laboratory of Physics and Energy Technology, Baoding 071000, CHN)

Abstract: In this study, a self-assembled diethyl vinylphosphonate (DVP) monolayer was grafted onto a germanium surface to investigate the modulation effect of self-assembled molecular monolayers on the Fermi level depinning on a germanium surface. Subsequently, the Fermi level depinning effect was comprehensively studied by analyzing the Schottky barrier height, uniformity, and stability. Experimental results demonstrated that DVP monolayers effectively alleviated the Fermi level pinning effect by forming a Schottky barrier of 0.50 eV on p-type germanium and reducing the Schottky barrier from 0.52 eV to 0.44 eV on n-type germanium. However, the depinning effect of the DVP monolayer resulted in a surface inhomogeneity of 12.2% among the samples of p-type germanium. We attributed this inhomogeneity to the incomplete passivation of the dangling bonds on the germanium surface. Furthermore, the Fermi level depinning effect of the DVP molecular monolayer degraded drastically after 48 h, which was attributed to the non-compact DVP monolayer caused by the complex chemical properties of the germanium surface.

Key words: germanium; self-assembled molecular monolayer; Fermi-level depinning; inhomogeneity; stability

收稿日期：2025－03－10.

基金项目：国家自然科学基金青年项目（62205107）.

* **通信作者：**高雪娇

0 引言

锗(Ge)半导体具有高载流子迁移率、高吸收率、可调控带隙与CMOS工艺相兼容等特点,在高频电子集成、光电集成领域展现出极大的应用潜力[1-2]。然而,Ge表面具有大量的表面态[3],表面态与内部Ge原子的电子发生跃迁,使Ge的费米能级被钉扎在价带附近,从而限制了不同金属与锗之间的电学接触的调节[4]。国内外学者已提出多种方法以消除费米钉扎效应,例如,Zhou等[5]使用0.8~2 nm的Al_2O_3层钝化Ge表面悬挂键,有效降低表面电荷缺陷密度,进而增加金属与p型Ge(p-Ge)接触的势垒高度,降低金属与n型Ge(n-Ge)接触的势垒高度;Liu等[6]使用氟化石墨烯作为界面层抑制金属电子波函数进入n-Ge中,从而有效降低Ti与n-Ge接触的势垒高度,且势垒高度不随偏压的变化而变化;Seo等[7]通过Ti与GeO_2反应形成TiO_x新界面,由于TiO_x和Ge接触界面的导带偏移(CBO)几乎为零,从而实现了金属与n-Ge之间势垒高度的有效调制,并且不增加寄生电阻。

传统方法不易控制插入层的厚度与均匀性,通常需要使用原子层沉积、化学气相沉积等方法[8-10]来获得较好质量的薄插入层。研究发现,锗表面的自组装单分子膜能有效修饰锗的表面态,并且在7天内展现出良好的稳定性[11-14]。鉴于此,Wang等[15]在金属/n-Ge结构中采用化学浴的方法插入有机分子层释放费米能级使势垒高度降低,通过改变有机分子的碳链长度精确控制插入层的厚度。然而,锗表面自组装单分子膜在调控p-Ge表面的费米钉扎效应方面,其调控效果的均匀性与稳定性有待于进一步研究。

本文从肖特基势垒变化、表面均匀性和稳定性的角度系统研究了乙烯基膦酸二乙酯(DVP)单分子膜对半导体锗表面的去费米钉扎效应。通过X射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy,XPS)对锗表面化学成分进行分析,确定DVP单分子膜成功链接到锗表面。电学性能表征结果显示,引入DVP单分子膜会显著影响金属/锗接触界面的肖特基势垒,且不引入额外寄生电阻。在此基础上,以p-Ge为例研究了DVP单分子膜钝化效果的均匀性与稳定性,发现有机单分子膜的调控效果不均匀且只能在48 h内维持较好的稳定性。

1 实验

实验流程如图1所示,主要包括自组装单分子膜(Self-assembled Molecular Monolayer, SAMM)的链接、肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)制备、肖特基势垒二极管的电流-电压(I-V)测试以及SAMM去费米钉扎作用的稳定性分析。

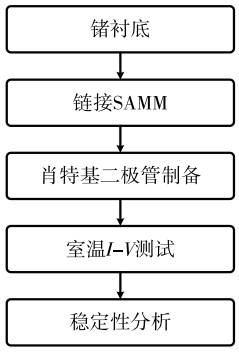


图1 锗表面自组装单分子膜去费米钉扎的实验流程图

实验中用到直拉法制备的p-Ge(100)和n-Ge(100)衬底,电阻率分别为0.1~6 Ω·cm和8~40 Ω·cm;清洗过程中使用CMOS级有机溶剂(丙酮、异丙醇和无水乙醇)、去离子水(电阻率为18±0.25 MΩ·cm)以及HF(49%,Macklin,上海);所用化学试剂包括:乙烯基膦酸二乙酯(>98%,TCI,上海)、苯甲醚(Anisole,99.7%,Merck-sigma,上海)。

1.1 锗表面自组装单分子膜

在锗表面链接DVP分子前,首先将5 mm×7 mm的锗衬底在丙酮、异丙醇、无水乙醇中分别超声清洗5 min,去除表面污染物;再使用大量去离子水冲洗,去除有机溶剂;随后在1% HF中浸泡2 min,再用去离子水冲洗,循环3次,以去除自然氧化层得到Ge-H结尾的表面(图2中Surface 1)。然后将样品浸没在DVP与苯甲醚(V_1 : V_2=1 : 10)的混合溶液中,在干燥的氮气中145℃条件下反应4 h,使得DVP中的碳碳双键(C=C)与Ge—H发生锗化氢烷化反应,进而在锗表面形成自组装单分子膜(图2中Surface 2)。待反应结束后,自然冷却至

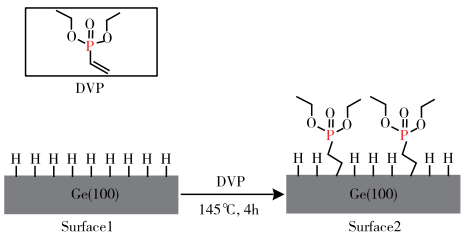
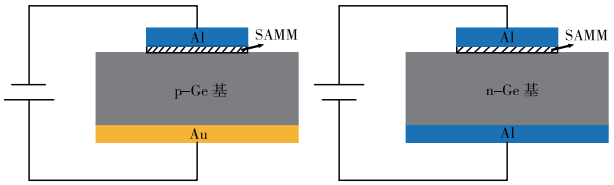


图2 锗表面链接DVP自组装单分子膜的示意图

室温，在丙酮液体中超声清洗 2 min，并使用异丙醇和无水乙醇分别润洗 3 次，以去除表面物理吸附的 DVP 分子。

1.2　肖特基二极管制备

经过表面处理的锗衬底，通过以下工艺制备如图 3 所示的肖特基二极管：首先，将锗衬底固定在基板上，利用金属掩模板定义直径为 0.4 mm 的圆形电极区域；再通过热蒸发镀膜工艺，在衬底正面的 DVP 单分子膜层上沉积一层 100 nm 厚的 Al 电极。在样品背面用钻石笔刻出大量划痕，随后采用 1% HF 擦拭，以避免 HF 刻蚀正面 Al 电极，并有效除去背面的自然氧化层，处理后的区域再蒸镀 80 nm 厚的 Au 背电极，从而完成 p-Ge 基肖特基二极管的制备，其结构如图 3(a)所示；对于 n-Ge 基肖特基二极管，在相同背面处理工艺后，蒸镀 100 nm 厚的 Al 背电极，其结构如图 3(b)所示。



(a)p 型锗　　(b)n 型锗

图 3　p 型、n 型锗上制备的肖特基二极管的结构示意图

1.3　肖特基二极管 *I-V* 测试与参数提取

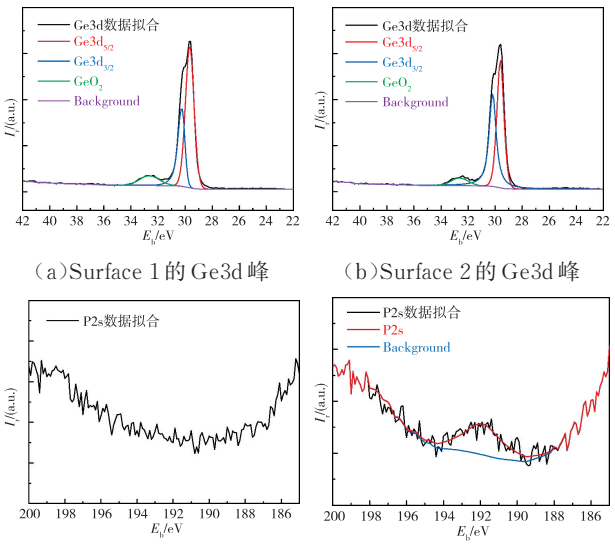
采用 Keithley 源表在 300 K 的黑暗条件下，−2～2 V 偏压范围内对肖特基二极管的 *I-V* 特性进行测量。如图 3(a)所示，p-Ge 肖特基二极管的 Al 电极端连接至电源负极，Au 电极端连接至电源正极。为保持 p-Ge 和 n-Ge 肖特基二极管的 *I-V* 曲线变化趋势一致，n-Ge 肖特基二极管在相同测量条件下采用反向电源连接方式。在同一 p 型衬底上制备多个样品，测量其电学性能，以表征钝化层的均匀性。为评估器件稳定性，以 p-Ge 肖特基二极管为研究对象，在 120 h 内每隔 24 h 测量一次 *I-V* 曲线，监测其随时间退化情况。

2　结果及分析

2.1　锗表面自组装单分子膜

应用 X 射线光电子能谱表征锗表面的氧化物与 DVP 单分子膜的形成。由图 4(a)和(b)的 Surface 1 和 Surface 2 的 Ge3d 光谱可知，Ge3d 核心能级的自旋轨道分裂能量为 0.58 eV，与文献[16]报道一致。图 4(a)中，经过 1% HF 循环处理后的 Surface 1 在 32.6 eV(*FWHM*=1.62 eV)出现明显的 GeO_2 峰位，是由 XPS 测试前的氧化造成的[17]。图 4(b)中，由于 Surface 2 表面存在 DVP 单分子膜的保护作用，GeO_2 特征峰面积明显变小。

通过标定 DVP 分子中的磷原子来验证 DVP 分子膜的形成。图 4(c)和(d)分别是 Surface 1 和 Surface 2 中 P2s 光谱的精细谱。分析 P2s 峰可知，Surface 1 与预期一致，没有检测到磷信号；Surface 2 在 192 eV 附近(*FWHM*=2 eV)有明显的峰位出现，该峰被指定为来自磷酸盐的磷[18-19]，表明 DVP 分子成功偶联到 Ge 表面。



(a)Surface 1 的 Ge3d 峰　　(b)Surface 2 的 Ge3d 峰

(c)Surface 1 的 P2s 峰　　(d)Surface 2 的 P2s 峰

图 4　锗表面 DVP 单分子膜的 X 射线光电能谱

2.2　DVP 单分子膜对肖特基势垒的调控

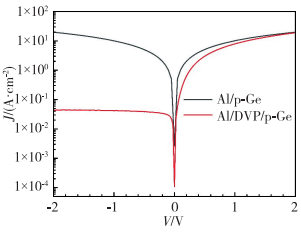
由于强烈的费米钉扎效应[20]，锗表面的费米能级被钉扎在价带附近，导致 p-Ge 和任何金属都形成欧姆接触，而与金属的功函数无关。图 5(a)中黑色曲线是铝电极和 p-Ge 接触(Al/p-Ge)的 *I-V* 曲线，其线性关系表明存在费米钉扎效应，斜率 35.54 Ω 来自于锗衬底。在 p-Ge 表面链接 DVP 单分子膜后，形成的 Al/DVP/p-Ge 结构的 *I-V* 曲线表现出明显的整流特性(图 5(a)中红色曲线)，证明 DVP 单分子膜有效缓解了费米钉扎，其正向偏置区域满足热电子发射理论[21]，*I-V* 的关系为：

$$I = I_0\left[\exp\frac{q(V-IR_s)}{nkT}-1\right] \tag{1}$$

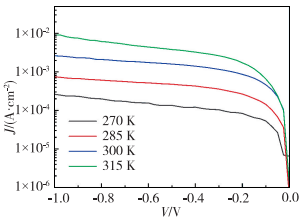
$$I_0 = AA^{**}\exp\left(-\frac{q\varphi_B}{kT}\right) \tag{2}$$

式中，n为理想因子，R_s为串联电阻，q为电子电荷，V为外加偏置电压，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度，I_0为饱和电流，A为有效接触面积(0.001 256 cm^2)，A^{**}为理查德常数(Ge(100)的A^{**}值常取50 $A\cdot cm^{-2}\cdot K^{-2}$[22])，$\varphi_B$为肖特基势垒。从$I$-$V$曲线可知，反向饱和电流约为0.043 A/cm^2，根据公式(2)计算可得φ_B=0.46 eV。用公式(1)对I-V曲线进行拟合，提取出理想因子n=1.64，串联电阻R_s=32.15 Ω，如表1所示。

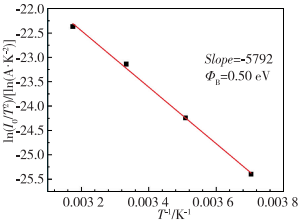
考虑到理查德常数与有效二极管面积的不确定性[22-23]，需进一步分析与温度相关的I-V特性(图5(b))，以更准确地提取肖特基势垒高度[24]。基于公式(2)，绘制Richardson图，即$\ln(I_0/T^2)$与$1/T$曲线(图5(c))，获得斜率$-q\varphi_B/k$，由此推导出Al/DVP/p-Ge接触的肖特基势垒为0.50 eV(见表1)，与室温I-V曲线中提取的结果基本一致。



(a)Al/p-Ge样品与Al/DVP/p-Ge SBD的I-V曲线图



(b)Al/DVP/p-Ge SBD I-V曲线随温度变化图



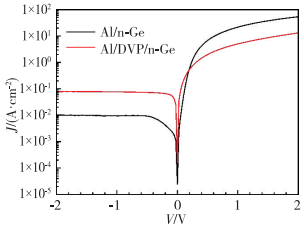
(c)Al/DVP/p-Ge SBD的Richardson图

图5 DVP单分子膜在p-Ge上的钝化效果

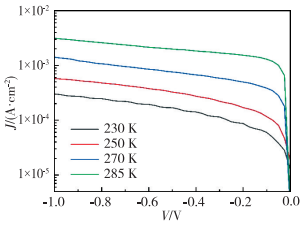
表1 Al/DVP/p-Ge，Al/n-Ge和Al/DVP/n-Ge SBD的肖特基参数

样品信息	φ_B/eV		n	R_s/Ω
	I-V	IV-T		
Al/DVP/p-Ge	0.46	0.50	1.64	32.15
Al/n-Ge	0.52	0.52	1.29	24.83
Al/DVP/n-Ge	0.46	0.44	1.88	24.58

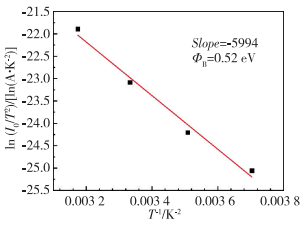
强烈的费米钉扎效应导致金属与n-Ge形成肖特基接触，如图6(a)所示，Al/n-Ge的I-V曲线呈整流特性。按照以上方法分别计算得到肖特基势垒φ_B=0.52 eV、理想因子n=1.29和串联电阻R_s=24.83 Ω。n型锗表面链接DVP单分子膜后，漏电流由0.009 5 A/cm^2提升至0.077 A/cm^2。从I-V曲线中提取出肖特基势垒φ_B=0.46 eV、理想因子n=1.88和串联电阻R_s=24.58 Ω。根据图6(b)和(d)与温度相关的I-V曲线分别绘制Al/n-Ge与Al/DVP/n-Ge接触的Richardson图，如图6(c)和(e)所示。从斜率推导出Al/n-Ge接触的肖特基势垒为0.52 eV，Al/DVP/n-Ge接触的肖特基势垒为0.44 eV。



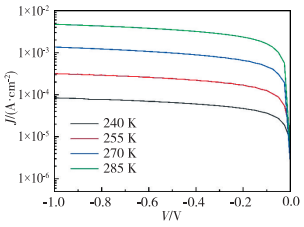
(a)Al/n-Ge与Al/DVP/n-Ge SBD的I-V曲线图



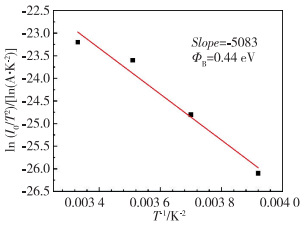
(b)Al/n-Ge SBD I-V曲线随温度变化图



(c)Al/n-Ge SBD的Richardson图



(d)Al/DVP/n-Ge SBD I-V曲线随温度变化图



(e)Al/DVP/n-Ge SBD的Richardson图

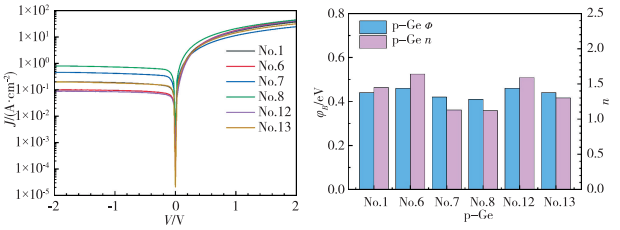
图6 DVP单分子膜在n-Ge上的钝化效果

链接DVP单分子膜后，Al/DVP/p-Ge样品的串联电阻为32.15 Ω与Al/p-Ge的35.54 Ω基本一致；Al/DVP/n-Ge样品的串联电阻为24.58 Ω与Al/n-Ge的24.83 Ω基本一致。因此，引入DVP钝化层不会产生额外的串联电阻。表1中同一样品的常温I-V与IV-T数据的肖特基势垒一致证明DVP分子膜能减弱费米钉扎作用，但是DVP分子膜的存在增加了隧穿电流[25-26]，进而使肖特基二极管的理想因子变大。

2.3 肖特基势垒的面内均匀性分析

通过释放费米钉扎，DVP单分子膜有效调控了

锗与金属间的肖特基势垒。为了研究肖特基势垒的面内均匀性，分别制备了 6 个 Al/DVP/p-Ge 样品。*I-V* 特性曲线显示漏电流密度在 0.083～0.73 A/cm^{2}之间，如图 7(a)所示。根据反向饱和电流(I_0)提取肖特基势垒(如图 7(b)所示)，发现 φ_B 在 0.41 ～0.46 eV 之间波动，最大值和最小值之间差 12.2%。从正偏 *I-V* 曲线中提取理想因子 n，n 在 1.12～1.64 之间。上述结果表明，DVP 对 p-Ge 表面态的钝化效果存在明显的面内不均匀性，其原因主要在于 DVP 分子难以完全钝化锗的表面悬挂键。一方面，每个分子在自组装过程中存在覆盖区域[13]，表面锗原子的 DVP 覆盖率难以达到 100%；另一方面，锗的表面化学复杂，HF 刻蚀后锗表面可能存在羟基基团以及氧化锗[17,27-28]，导致 DVP 单分子膜的致密性变差。



(a)Al/DVP/p-Ge 不同样品的 *I-V* 曲线　(b)Al/DVP/p-Ge 不同样品的肖特基势垒与理想因子

图 7　DVP 钝化效果的均匀性分析

2.4　费米钉扎释放效果的稳定性分析

锗表面原子与 DVP 分子通过 Ge—C 键链接，自然环境中的氧气、水分以及光照等因素可能会使 Ge—C 键断裂[29-31]，最终使自组装 DVP 单分子膜受到损伤。本文通过监测 Al/DVP/p-Ge 样品 φ_B 与 n 随时间的变化趋势，评估去费米钉扎效果的稳定性。如图 8 红色曲线所示，在初始 48 h 内肖特基势垒高度基本维持在 0.47 eV；理想因子 n 稳定在 1.6 附近。随后势垒高度急剧下降，到 98 h 时退化至 0.38 eV；与此同时，理想因子呈现相反的变化趋势，随着退化时间的增加而持续增大，如图 8 黑色曲线所示。当退化时间达到 98 h 时，理想因子 n 超过 2。因此，锗表面自组装单分子膜的去费米钉扎效果具有时效性，可通过增强分子膜的致密性[32]与界面化学键的稳定性[11]，增加去费米钉扎效果的稳定时间。

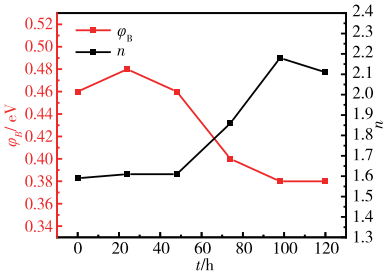


图 8　Al/DVP/p-Ge 肖特基二极管的肖特基势垒与理想因子随时间变化的曲线

3　结论

本文详细研究了 DVP 单分子膜作为钝化层对 Al/p-Ge 和 Al/n-Ge 接触界面肖特基势垒的调控效果。实验结果表明，DVP 单分子膜通过有效固定锗表面的悬挂键，使 p-Ge 肖特基势垒增加至 0.50 eV，n-Ge 的肖特基势垒降低了 0.08 eV。通过对 DVP 在 p 型锗上钝化效果的表面均匀性和稳定性分析，发现由于锗表面悬挂键未被完全钝化，导致钝化效果不均匀，肖特基势垒存在 12.2% 的变化量。DVP 单分子膜钝化效果具有时效性，仅在初始 48 h 内表现出良好的费米钉扎调控效果，肖特基势垒维持在 0.47 eV，随着时间延长退化至 0.38 eV (98 h)。本研究为自组装单分子膜调控锗半导体费米钉扎效应提供了重要的实验依据和技术支持。

参考文献：

[1] Maeda T, Ikeda K, Nakaharai S, et al. High mobility Ge-on-insulator p-channel MOSFETs using Pt germanide Schottky source/drain [J]. IEEE Electron Device Letters, 2005, 26(2): 102-104.

[2] Pillarisetty R. Academic and industry research progress in germanium nanodevices [J]. Nature, 2011, 479(7373): 324-328.

[3] Statz H, Demars G A, Davis L, et al. Surface states on silicon and germanium surfaces[J]. Physical Review, 1956, 101(4): 1272-1281.

[4] Wager J F, Robertson J. Metal-induced gap states modeling of metal-Ge contacts with and without a silicon nitride ultrathin interfacial layer [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(9): 094501.

[5] Zhou Y, Ogawa M, Han X, et al. Alleviation of Fermi-level pinning effect on metal/germanium interface by insertion of an ultrathin aluminum oxide [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(20): 202105.

[6] Liu G, Zhang M, Xue Z, et al. Fermi level depinning in Ti/n-type Ge Schottky junction by the insertion of fluorinated graphene [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 794: 218-222.

[7] Seo Y, Lee T I, Ahn H J, et al. Fermi level depinning in Ti/GeO_2/n-Ge *via* the interfacial reaction between Ti and GeO_2

[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(10): 4242-4245.

[8] Suzuki A, Nakatsuka O, Sakashita M, et al. Modulation of Fermi level pining position at metal/n-Ge interface by semimetal $Ge_{1-x}Snx$ and Sn interlayers[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 70: 162-166.

[9] Berghuis W J H, Melskens J, Macco B, et al. Surface passivation of germanium by atomic layer deposited Al_2O_3 nanolayers[J]. Journal of Materials Research, 2021, 36(3): 571-581.

[10] Kim H, McIntyre P C, Chui C O, et al. Interfacial characteristics of HfO_2 grown on nitrided Ge (100) substrates by atomic-layer deposition [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(14): 2902-2904.

[11] Bodlaki D, Yamamoto H, Waldeck D H, et al. Ambient stability of chemically passivated germanium interfaces [J]. Surface Science, 2003, 543(1/3): 63-74.

[12] Cai Q, Xu B, Ye L, et al. 1-Dodecanethiol based highly stable self-assembled monolayers for germanium passivation [J]. Applied Surface Science, 2015, 353: 890-901.

[13] Mäkinen A J, Kushto G P. Monolayer-induced band bending in the near-surface region of Ge(111)[J]. Physical Review B, 2011, 83(24): 245315.

[14] Garvey S, Maccioni B, Serino A C, et al. Effect of alkanethiol chain length on the oxidation resistance of self-assembled monolayer passivated Ge(100) surfaces[J]. Thin Solid Films, 2023, 778: 139875.

[15] Wang W, Wang J, Zhao M, et al. Fermi level depinning by a C-containing layer in a metal/Ge structure by using a chemical bath[J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(10): 102004.

[16] Matsui M, Murakami H, Fujioka T, et al. Characterization of chemical bonding features at metal/GeO_2 Interfaces by X-ray photoelectron spectroscopy [J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(7): 1549-1552.

[17] Sun S, Sun Y, Liu Z, et al. Surface termination and roughness of Ge(100) cleaned by HF and HCl solutions[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(2): 021903.

[18] Dubey M, Gouzman I, Bernasek S L, et al. Characterization of self-assembled organic films using differential charging in X-ray photoelectron spectroscopy [J]. Langmuir, 2006, 22 (10): 4649-4653.

[19] Gao X, Guan B, Mesli A, et al. Toward defect-free doping by self-assembled molecular monolayers: the evolution of interstitial carbon-related defects in phosphorus-doped silicon [J]. ACS Omega, 2019, 4(2): 3539-3545.

[20] Nishimura T, Kita K, Toriumi A. Evidence for strong Fermi-level pinning due to metal-induced gap states at metal/germanium interface[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91 (12): 123123.

[21] Racko J, Grmanová A, Breza J. Extended thermionic emission-diffusion theory of charge transport through a Schottky diode[J]. Solid-State Electronics, 1996, 39(3): 391-397.

[22] Crowell C R. The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes [J]. Solid-State Electronics, 1965, 8(4): 395-399.

[23] Sze S M, Ng K K. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: Wiley, 2006.

[24] Dubois E, Larrieu G. Measurement of low Schottky barrier heights applied to metallic source/drain metal - oxide - semiconductor field effect transistors[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(1): 729-737.

[25] Tung R T. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: general theory[J]. Physical Review B, 1992, 45 (23): 13509-13523.

[26] Dutta M, Basak D. P-ZnO / n-siheterojunction: Sol-gel fabrication, photoresponse properties, and transport mechanism [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92 (21): 212112.

[27] Rivillon S, Chabal Y J, Amy F, et al. Hydrogen passivation of germanium (100) surface using wet chemical preparation [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(25): 253101.

[28] Schwartz B, Robbins H. Chemical etching of germanium in solutions of HF, HNO_3, H_2O, and $HC_2H_3O_2$[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1964, 111(2): 196.

[29] Weng C C, Liao J D, Wu Y T, et al. Modification of monomolecular self-assembled films by nitrogen-oxygen plasma[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110 (25): 12523-12529.

[30] Srisombat L, Jamison A C, Lee T R. Stability: a key issue for self-assembled monolayers on gold as thin-film coatings and nanoparticle protectants [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 390(1/3): 1-19.

[31] Ramos N C, Will Medlin J, Holewinski A. Electrochemical stability of thiolate self-assembled monolayers on Au, Pt, and Cu[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(11): 14470-14480.

[32] Garvey S, Serino A, Maccioni M B, et al. Towards Ge-based electronic devices: increased longevity of alkanethiol-passivated Ge(100) in low humidity environments[J]. Thin Solid Films, 2022, 759: 139466.

作者简介：

郭玉欣(1997—)，女，贵州省遵义市人，硕士研究生，主要研究方向为半导体表面缺陷和体缺陷；

高雪娇(1988—)，女，河北省唐山市人，副教授，硕导，主要研究方向为光电材料和器件、半导体缺陷。