

GeSe/准二维电子气氧化物范德华异质结中陷阱态工程调控的光电导特性

丁君豪^{1,2}, 刘国珍^{1,2*}

¹江苏高校智能光电子器件与芯片重点实验室, 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州

²太湖光子中心前沿技术研究院, 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2026年5月20日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月22日

摘要

本工作采用机械剥离与氩离子束辅助轰击技术, 成功制备了由p型GeSe与n型氧化物准二维电子气(Q2DEG)组成的范德华异质结, 并系统研究了其在20 K低温下的光响应特性。结果表明, 光电流随入射光波长的减小而增大, 即短波长激发下光响应更强, 且器件在循环测试中表现出稳定且可重复的响应行为。在20 K下, 本征载流子的热激发被显著抑制, 光生非平衡载流子被界面缺陷陷阱俘获, 产生明显的持久光电导效应。施加反向偏压可有效提取陷阱中的俘获载流子, 且反向放电电流随偏压扫描速率的增大而增加。进一步通过逐步提高反向偏压幅度的连续放电测量, 观察到释放电流随偏压幅度逐级增大的现象, 揭示了外电场与陷阱势垒深度之间的直接物理关联, 为通过宏观电学测量表征氧化物基异质界面陷阱态的能量分布提供了可行途径。本研究深化了对氧化物基异质结中界面陷阱电荷动力学的理解, 并为基于界面陷阱工程的功能性光电器件设计开辟了新方向。

关键词

异质结, 准二维电子气, 光电导

Photoconductivity Modulated by Trap-State Engineering in GeSe/Quasi-2DEG Oxide Van Der Waals Heterojunctions

Junhao Ding^{1,2}, Guozhen Liu^{1,2*}

¹Key Laboratory of Intelligent Optoelectronic Devices and Chips of Jiangsu Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

²Advanced Technology Research Institute of Taihu Photon Center, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

*通讯作者。

文章引用: 丁君豪, 刘国珍. GeSe/准二维电子气氧化物范德华异质结中陷阱态工程调控的光电导特性[J]. 应用物理, 2026, 16(6): 683-691. DOI: 10.12677/app.2026.166062

Abstract

In this work, we successfully fabricated a van der Waals heterojunction composed of p-type GeSe and n-type oxide quasi-two-dimensional electron gas (Q2DEG) using mechanical exfoliation combined with argon ion beam bombardment. The photoresponse characteristics of the device are systematically investigated at 20 K. The results show that the photocurrent increases with decreasing incident light wavelength, *i.e.*, a stronger photoresponse is observed under shorter-wavelength excitation, and the device exhibits stable and reproducible response under cyclic testing. At 20 K, thermal excitation of intrinsic carriers is strongly suppressed, and photogenerated nonequilibrium carriers are captured by interfacial defect traps, giving rise to a pronounced persistent photoconductivity effect. Applying a reverse bias can efficiently extract the trapped carriers from the traps, and the reverse discharge current increases with the bias sweep rate. Furthermore, sequential discharge measurements with progressively increasing reverse bias amplitude reveal an increase of the released current with increasing bias amplitude, uncovering a direct physical correlation between the applied electric field and the trap barrier depth. This correlation provides a feasible pathway to characterize the energy distribution of trap states at oxide-based heterointerfaces via macroscopic electrical measurements. This study deepens the understanding of interfacial trapped charge dynamics in oxide-based heterojunctions and opens new avenues for the design of functional optoelectronic devices based on interfacial trap engineering.

Keywords

Heterojunction, Quasi-Two-Dimensional Electron Gas, Photoconductivity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 基于层状二维材料的异质结的范德华界面及其可调的能带结构, 已成为现代光电子学器件领域极具潜力的候选体系。尽管如此, 面向实际器件应用时, 仍存在若干物理瓶颈亟待解决。一方面, 石墨烯的零带隙特性严重限制了其在逻辑开关和高开关比光电探测中的应用[1]。另一方面, 大多数传统二维材料表现出本征 n 型导电行为, 其主要由硫族元素空位等固有缺陷能级所主导。而能够同时兼具良好环境稳定性、高空穴迁移率以及合适带隙的 p 型二维半导体极为匮乏。因此, 单硫族化合物 GeSe 凭借其优异的光电性质与环境稳定性, 成为一种极具竞争力的 p 型层状材料[2] [3]。理论计算与纳米红外光谱成像研究表明, GeSe 表面氧化化学吸附的活化能高达 2.12 eV, 约为黑磷(0.71 eV)的三倍, 使其具有卓越的抗降解能力[4], 从而为空气兼容的高性能器件奠定了实用基础。此外, GeSe 具有适合宽带隙光电探测的能带结构: 其体材料具有约 1.14 eV 的间接带隙, 而当减薄至单层极限时, 则转变为约 1.30 eV 的直接带隙[5] [6]。这一带隙特性使得 GeSe 在可见光至近红外范围内均具有高光吸收系数, 成为高效光伏与光电探测应用的理想候选材料[7]。

以 SrTiO₃ (STO) 为代表的钙钛矿氧化物二维电子气, 因其高载流子迁移率、可调控的表面电荷密度以及丰富的界面量子态, 已成为探索界面量子态与低维电子器件的重要研究平台[8] [9]。通过真空高温还

原[10]、紫外光辐照[11]、化学掺杂[12]或 Ar^+ 离子束轰击[13]等手段,可以在 STO 表面可控地引入高密度氧空位。这些氧空位不仅向导带注入自由电子,诱导绝缘体-金属相变并形成准二维电子气(Q2DEG) [14], 同时也在带隙内引入了不同深度的缺陷态[15]。将具有高载流子迁移率的 n 型 Q2DEG 与光吸收能力极强的 p 型二维半导体相结合,构建范德华异质结,已被证实是拓展单一材料光响应范围并提升光电探测性能的有效途径[16]。我们前期的研究表明,基于 GeSe 与 STO 表面 Q2DEG 的异质结在室温下展现出非易失性阻变行为与电可调的整流特性,其核心机制可归因于界面缺陷态俘获的非平衡载流子导致的空间电荷区重构[17]。然而,关于 GeSe/Q2DEG 异质结在低温下的光响应特性,尤其是界面缺陷态在光生载流子捕获与释放过程中所起的具体物理作用,仍有待深入阐明。在本工作中,我们系统研究了 GeSe/Q2DEG 异质结在 20 K 下的光响应行为。在该温度下,本征载流子的热激发被显著抑制,加之极低的反向暗电流,为探究光生载流子的捕获与释放动力学提供了理想条件。因此,所有电学测量均限定在反向偏压区间。本研究阐明了低温下光生载流子与氧化物界面缺陷态之间的相互作用机制,为理解二维半导体/氧化物异质界面处的局域电荷动力学提供了独特的物理视角与实验依据。

2. 实验样品制备

采用机械剥离、光刻、磁控溅射与氦离子束轰击相结合的技术制备了 GeSe/Q2DEG 异质结,其制备流程如图 1 所示。首先,从块体单晶上机械剥离出少层 GeSe 薄片,并将其转移至单面抛光的 STO(100)衬底上。通过光刻工艺在 GeSe 薄片上定义出电极图案,随后采用磁控溅射沉积 Au 薄膜作为电极。随后,通过第二次光刻在 STO 表面暴露出特定区域,随后将样品置于离子束系统中,在腔体本底真空度抽至 4×10^{-6} mbar 以下的条件下通入高纯氦气,并将氦气流速维持在 6 sccm。采用加速电压为 250 V、束流为 5 mA 的氦离子束对暴露的 STO 表面进行轰击,轰击时间持续 7 min,从而产生高电导的 Q2DEG。用丙酮去除残留光刻胶后,通过超声压焊机将 Al 丝分别键合至 Au 电极和 Q2DEG 区域,作为测量电极。采用光学显微镜对 GeSe/Q2DEG 异质结的表面形貌进行表征。电输运性质通过 Keithley 2400 源表测量。光电测量中,采用波长为 405 nm 至 808 nm 的连续激光作为激发光源。低温测量在综合物性测量系统中完成。

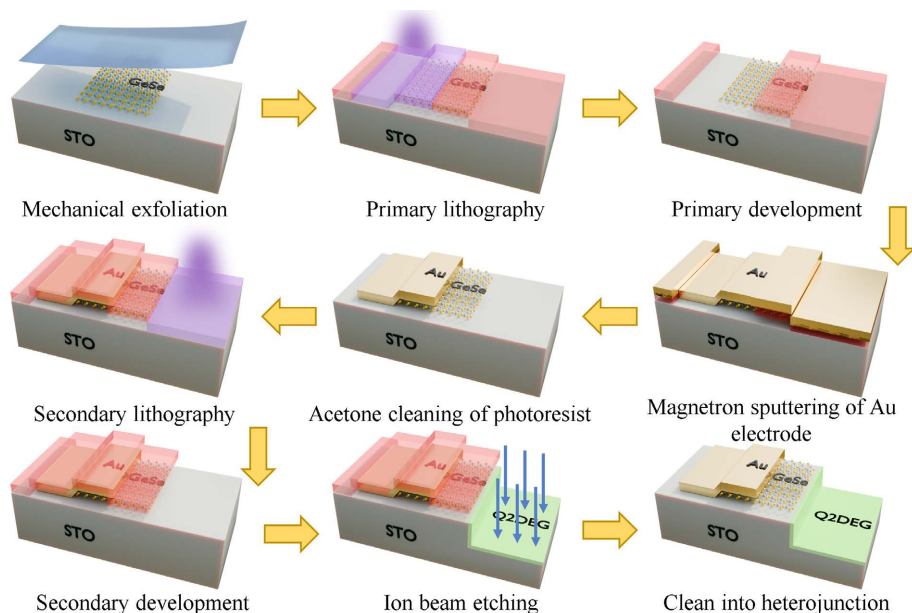


Figure 1. Fabrication process of the Germanium Selenide/Q2DEG heterojunction

图 1. GeSe/Q2DEG 异质结的制备流程

3. 结果与讨论

3.1. 结构及室温下的 I - V 特性

图 2(a) 呈现了在 STO 衬底上制备的 GeSe/Q2DEG 异质结的光学显微图像。由图可见, 层状的 GeSe 薄片均匀地覆盖于 STO 表面, 界面清晰。另外, 该 GeSe 薄片与右方的 Q2DEG 区域之间形成了清晰的边界。根据我们先前的研究[18], 这里估算室温 Q2DEG 的载流子浓度和迁移率分别为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。图 2(b) 展示了 GeSe 薄片的拉曼散射谱, 可以观察到三个特征拉曼峰, 分别位于 77 cm^{-1} 、 146 cm^{-1} 和 184 cm^{-1} 附近。这三个峰分别对应 GeSe 晶体的 A_g^1 、 B_{3g} 和 A_g^3 振动模式。清晰且尖锐的拉曼峰表明, 该 GeSe 薄片具有良好的结晶质量。图 2(c) 展示了在 300 K 温度下测得的 GeSe/Q2DEG 异质结的电流-电压 (I - V) 特性曲线。该异质结表现出典型的 p-n 结整流行为。在 +4 V 偏压下, 多数载流子能够克服内建电势, 导致明显的载流子注入, 正向电流达到 $1.57 \mu\text{A}$ 。相反, 在 -4 V 偏压下, 由于耗尽层展宽阻碍了少子漂移, 电流被抑制至 0.65 nA 。由此, 该异质结实现了约 2.4×10^3 的高整流比, 表明在 GeSe/Q2DEG 界面处形成了高质量的 p-n 结势垒。

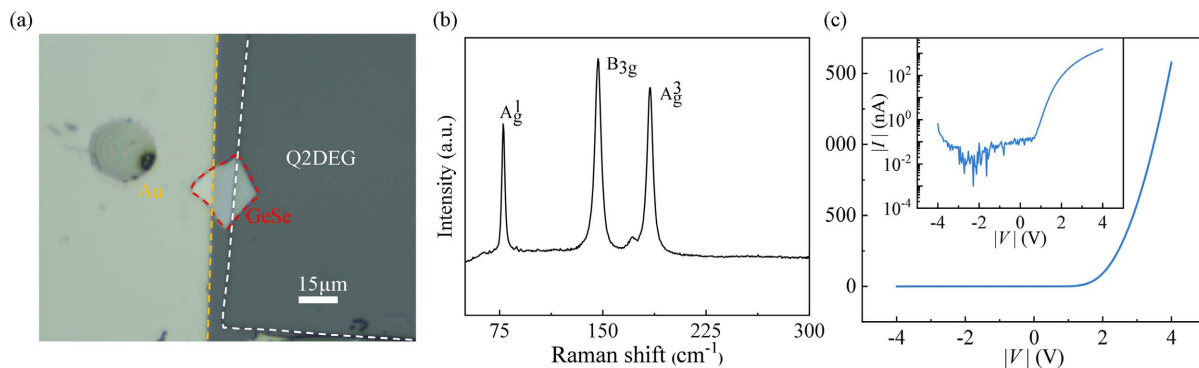


Figure 2. (a) Optical microscope image of the heterojunction; (b) Raman scattering spectrum of the GeSe thin flake; (c) I - V curve of the heterojunction at room temperature

图 2. (a) 异质结的光学显微镜照片; (b) GeSe 薄片的拉曼散射谱; (c) 异质结室温下的 I - V 曲线

3.2. 20 K 下的光电导特性

为了阐明异质结在低温下的电荷运输机制, 图 3(a) 展示了光照前后该异质结在 20 K 温度下的反向 I - V 特性曲线(半对数坐标)。光照之前, 反向电流可忽略不计(小于 10^{-2} nA), 表明在 20 K 下, 本征载流子的热激发被有效抑制, 且异质结具有非常高的势垒。采用功率密度为 10 mW/cm^2 的 405 nm 激光对样品辐照 3 秒后, 测量其反向 I - V 特性。光照之后, 当反向偏压从 0 V 扫描至 -4 V 时, 光电流单调增加, 在 -4 V 处达到最大值 52 nA。值得注意的是, 在随后的反向电压回扫过程中, 电流呈现出急剧衰减。当偏压回到 -3.7 V 时, 异质结已完全弛豫至其初始的高阻态。这种显著的充放电行为源于光生载流子在界面陷阱态中的俘获与退俘获过程。初始的光激发将大量非平衡载流子注入异质结界面, 这些载流子随后被界面空间电荷区内的陷阱态捕获并局域化。这种载流子局域化降低了内建势垒, 同时使空间电荷区变薄。随着反向偏压的增加, 外加电场逐渐将俘获的载流子提取出来。当从 -4 V 开始反向回扫电压时, 由于非平衡载流子被完全耗尽, 器件迅速恢复到初始的高阻态。图 3(b) 展示了在不同激光波长下测得的光电流, 实验中不同波长的光在单位时间内的光子数目保持一致。数据已归一化至单位时间内恒定的入射光子通量。图 3(c) 提取的单周期对比结果表明, 该异质结在较短波长下表现出更高的光响应, 在 405 nm 处达到最大值。随着激发波长增加, 光电流逐渐减小。这种波长依赖性反映了构成材料的光吸收特性。除了能

够促进 GeSe 中的价带到导带的跃迁之外, 更高能量的光子还可以激发 STO 内部更深能级的陷阱态中的载流子, 从而产生更多自由载流子, 贡献于光电流。

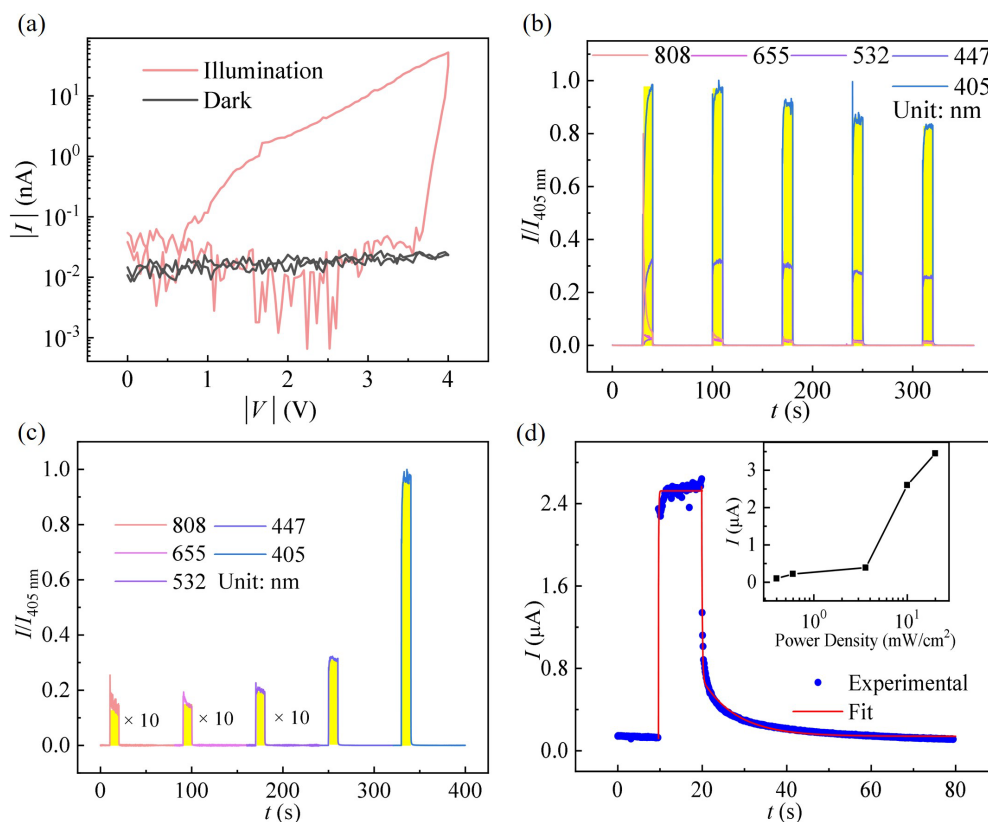


Figure 3. (a) I - V curves of the heterojunction before and after illumination; (b) Optical switching characteristics under different wavelengths; the photocurrents of other wavelengths are normalized to the photocurrent at 405 nm; (c) Normalized photocurrents under different wavelengths. All data were measured at a constant bias of -4 V, and the yellow shaded areas indicate the periods when the laser is turned on; (d) Single switching cycle photocurrent time response and the corresponding fitting curve. The inset shows the photocurrent as a function of 405 nm laser power density

图 3. (a) 光照前后异质结的 I - V 曲线; (b) 不同波长下光的开关特性, 其它波长的光电流根据 405 nm 波长下的光电流进行了归一化; (c) 不同波长下的归一化光电流。所有数据均在恒定 -4 V 下测量, 黄色阴影区域表示激光开启时段; (d) 单个开关周期的光电流时间响应及拟合曲线。插图展示了光电流随 405 nm 激光功率密度的变化关系

为了进一步阐明界面陷阱态对非平衡载流子动力学过程的影响, 图 3(d)展示了异质结在单个光开关周期(405 nm, $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$)内的瞬态光电流响应特性。由于放电条件与测试历史不同, 饱和光电流与前文存在一定差异。我们采用双指数模型对光电流的上升与衰减过程进行了动力学拟合, 公式如下:

$$I_{\text{rise}}(t) = I_{\text{dark}} + A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r2}}\right) \right]$$

$$I_{\text{decay}}(t) = I_{\text{dark}} + A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right)$$

式中, I_{dark} 为暗电流, A_1 和 A_2 为拟合权重常数。从拟合结果提取的快速时间常数 $\tau_{r1} = 0.0034\text{s}$, $\tau_{d1} = 0.14\text{s}$ 主要对应导带与价带间载流子的本征激发与快速复合过程; 而慢速时间常数 $\tau_{r2} = 0.075\text{s}$, $\tau_{d2} = 8.2\text{s}$ 则反映了异质结界面的深缺陷态对光生电子的连续俘获与缓慢释放。基于该单周期光响应数据, 我们进一步计

算了器件的响应度 R 为 119 A/W 和比探测率 D^* 为 $8.58 \times 10^{11} \text{ Jones}$ 。计算公式如下公式:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in} \cdot S} \quad \text{and} \quad D^* = \frac{R\sqrt{S}}{\sqrt{2qI_{dark}}}$$

其中, S 为异质结面积, 这里取 $200 \mu\text{m}^2$, I_{dark} 取 $0.12 \mu\text{A}$ 。我们进一步研究了激光功率密度与光电流的关系, 结果如图 3(d)插图所示, 发现激光功率密度越大, 光电流越大, 这里光电流的增大可归因于单位时间内入射光子数目的增加。

3.3. 反偏压下的放电特性

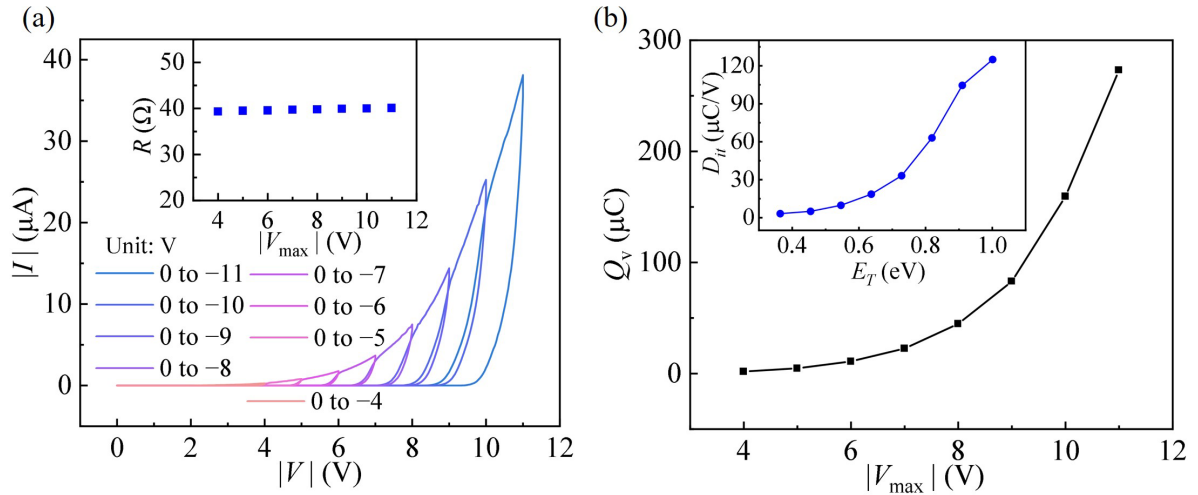


Figure 4. (a) Discharge characteristics under different reverse bias amplitudes after a single illumination; (b) Relationship between the discharge amount and voltage amplitude, the inset shows the relationship between $D_{it}(E_T)$ and the trap energy depth E_T

图 4. (a) 单次光照后不同反向偏压幅值的放电特性; (b) 放电量与电压幅值的关系, 插图为 $D_{it}(E_T)$ 随陷阱能级深度 E_T 的变化关系

图 4(a)展示了逐次放电的 I - V 曲线。在单次光照后, 施加了反向偏压扫描范围逐步增加的多次扫描。可以看出, 只有当施加的反向偏压超过前一次扫描的最大电压时, 才会出现明显的放电电流。这种逐次放电行为表明光生载流子分布在不同深度的界面陷阱态中, 更深陷阱中的载流子需要更强的反向电场才能提取。图 4(a)的插图显示了在这些不同反向偏压范围内放电后测得的 Q2DEG 的电阻。该电阻放电前后仅在 39.29Ω 至 40.03Ω 的微小范围内波动, 最大相对变化量小于 2%, 表明先前观察到的放电现象源于异质界面陷阱态。图 4(b)绘制了有效放电电荷量随施加的最大反向偏压幅值 V_{\max} 的变化关系。在 -4 至 -6 V 的反向偏压区间内, 释放的电荷量极小, 表明浅陷阱密度较低。当反向偏压幅值超过 7 V , 放电电荷量明显增加。这种关系反映了界面陷阱密度的能量分布, 表明较深能级区域分布有较高密度的缺陷态。为了定量提取界面陷阱态密度随能级的分布, 我们对图 4(b)的放电数据进行了如下处理。首先, 建立反向偏压 $|V|$ 陷阱能级深度 E_T 之间的关联。基于 Wentzel-Kramers-Brillouin 近似的隧穿模型[19], 假设两者之间满足线性关系,

$$E_T = \alpha |V|$$

以文献中报道的 STO 氧空位深能级(1.00 eV)作为参考点[20], 对应于最大反向偏压 11 V , 确定转换

系数 $\alpha = 1.00/11 = 0.091 \text{ eV/V}$ 。随后, 对放电电荷数据 $Q(|V|)$ 进行数值微分, $D_{ii}(E_T)$ 正比于放电电荷对陷阱能级的微分, 结合链式法则可得:

$$D_{ii}(E_T) \propto \frac{1}{a} \cdot \frac{dQ}{d|V|}$$

图 4(b)插图显示了由此计算得到的 $D_{ii}(E_T)$ 随陷阱能级深度 E_T 的变化关系, 可以看出, $D_{ii}(E_T)$ 随能级加深呈单调增长趋势, 在 1.0 eV 处达到最大值, 表明深能级陷阱在该体系中占主导地位。

3.4. 光的存储特性与温度的关系

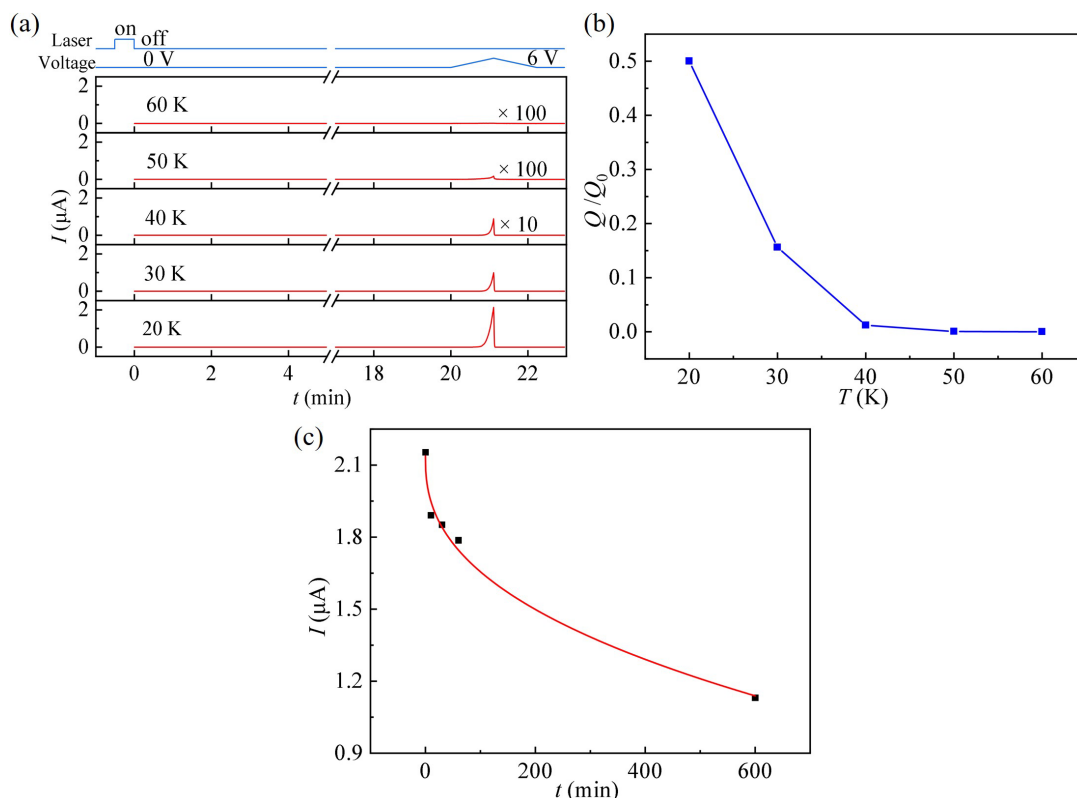


Figure 5. (a) Forward I - V characteristic curves measured after photo-charging and waiting for 20 minutes under different ambient temperatures; (b) Normalized remaining charge Q/Q_0 after being kept in the dark for 20 minutes at different temperatures; (c) Time-dependent photocurrent decay curve and fitting curve at 20 K after removing the illumination

图 5. (a) 不同环境温度下充光并等待 20 分钟后测得的正向 I - V 特性曲线; (b) 在不同温度下黑暗状态保持 20 分钟后的归一化剩余电荷 Q/Q_0 ; (c) 20 K 撤去光照后光电流随时间的衰减关系及拟合曲线

前文在 20 K 下观察到异质结的偏压放电特性可知, 由于低温对载流子弛豫过程的冻结作用, 器件在低温下具有光存储特性。为了进一步揭示环境温度对异质结界面陷阱俘获载流子的影响, 这里研究了器件在不同温度下的光存储能力。实验的具体流程为: 在特定的环境温度下, 首先使用 405 nm 激光照射器件 6 秒以注入光生载流子, 随后关闭光源并在黑暗条件下等待 20 分钟, 最后测试器件在 0 至 6 V 范围内的正向 I - V 特性曲线。实验选取了 20 K、30 K、40 K、50 K 和 60 K 五个温度节点进行平行测试, 结果如图 5(a)所示。实验结果表明, 器件的光存储能力对温度表现出高度敏感。在 20 K 下, 经过 20 分钟的黑暗条件弛豫后, 器件依然能够保持约 $2.1 \mu\text{A}$ 的较高正向电流。然而, 随着温度的升高, 相同等待时间后

的剩余电流呈现出快速衰减的趋势。当温度升高至 50 K 时, 器件的光电流锐减至约 1.7 nA, 仅为 20 K 时的千分之一; 当温度进一步提升至 60 K 时, 器件在 20 分钟的等待后已彻底恢复至初始的高阻绝缘态, 光电导现象完全消失。图 5(b)展示了黑暗状态保持 20 分钟后, 归一化剩余电荷量 Q/Q_0 随温度的变化关系。在 20 K 时, 约 50% 的捕获电荷仍保留在陷阱中。随着温度升高, 热激发作用逐渐增强, 被界面陷阱捕获的载流子获得足够能量克服势垒而逸出, 导致剩余电荷量下降, 并在 40 K 时趋近于零。这种温度升高导致光存储电量急剧减小的现象, 反映了界面陷阱电荷的热发射与重新俘获过程。在 20 K 时, 系统内热能极低, 被异质结界面陷阱俘获的光生电子缺乏足够的能量去克服陷阱周围的势垒, 因此表现为长效的记忆保持。随着环境温度从 20 K 逐渐升高至 60 K, 晶格的热振动逐渐加剧, 系统热能不断增大。电子获得足够的热激发能, 即使短暂被陷阱俘获也能很快逃逸, 表现为暂态光电导。

图 5(c)展示了 20 K 温度下撤去光照后光电流随时间的衰减过程。实验数据显示出明显的长弛豫特性, 电流在光照停止后并未迅速归零, 而是呈现出缓慢的下降趋势。通过扩展指数函数:

$$I(t) = I_0 + A \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right]$$

对该衰减过程进行拟合(图中红色实线), 提取得到的弛豫时间 τ 为 1596 min, 印证了器件低温下优异的长效光存储特性; 拉伸指数 β 为 0.47, 表明界面处存在宽能级分布的陷阱态, 这与前文的论述一致。

4. 结论

本文采用机械剥离结合离子束轰击法制备了 GeSe/Q2DEG 异质结, 并系统研究了其在 20 K 低温下的光电响应与界面电荷动力学特性。实验结果表明, 入射光波长越短, 光电流越大, 并具有良好的循环响应特性。由于低温下本征载流子的热激发被有效抑制, 器件在反向偏压下表现出明显的电荷捕获行为。研究发现, 通过控制反向偏压的扫描幅度进行逐次放电测试, 观测到了逐级的电流释放特征。通过分析放电量与偏压幅度的关系, 可以推断出捕获非平衡载流子的陷阱态主要分布于较宽的能级区域, 浅能级处陷阱密度较少, 深能级处陷阱密度较大。结合放电前后 Q2DEG 电阻的对比测量, 进一步证实了上述充放电行为主要源于异质结界面的电荷动力学过程。本研究阐明了低温下氧化物异质界面的光电耦合机制, 为探究界面缺陷态的能量分布提供了实验依据。

参考文献

- [1] Schwierz, F. (2010) Graphene Transistors. *Nature Nanotechnology*, **5**, 487-496. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.89>
- [2] Ye, Y., Guo, Q., Liu, X., Liu, C., Wang, J., Liu, Y., *et al.* (2017) Two-Dimensional GeSe as an Isostructural and Isoelectronic Analogue of Phosphorene: Sonication-Assisted Synthesis, Chemical Stability, and Optical Properties. *Chemistry of Materials*, **29**, 8361-8368. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02784>
- [3] Zhou, X., Hu, X., Jin, B., Yu, J., Liu, K., Li, H., *et al.* (2018) Highly Anisotropic GeSe Nanosheets for Phototransistors with Ultrahigh Photoresponsivity. *Advanced Science*, **5**, Article 1800478. <https://doi.org/10.1002/advs.201800478>
- [4] Yang, Y., Liu, S.C., Yang, W., Li, Z., Wang, Y., Wang, X., *et al.* (2018) Air-Stable In-Plane Anisotropic GeSe₂ for Highly Polarization-Sensitive Photodetection in Short Wave Region. *Journal of the American Chemical Society*, **140**, 4150-4156. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b01234>
- [5] Zhao, H., Mao, Y., Mao, X., Shi, X., Xu, C., Wang, C., *et al.* (2018) Band Structure and Photoelectric Characterization of GeSe Monolayers. *Advanced Functional Materials*, **28**, Article 1704855. <https://doi.org/10.1002/adfm.201704855>
- [6] Tołłoczko, A., Zelewski, S.J., Błaszczak, M., Woźniak, T., Siudzińska, A., Bachmatiuk, A., *et al.* (2021) Optical Properties of Orthorhombic Germanium Selenide: An Anisotropic Layered Semiconductor Promising for Optoelectronic Applications. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 14838-14847. <https://doi.org/10.1039/d1tc04280g>
- [7] Zhao, H., Yang, Y., Wang, C., Zhou, D., Shi, X., Li, Y., *et al.* (2019) Fast and Broadband Photoresponse of a Few-Layer GeSe Field-Effect Transistor with Direct Band Gaps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 38031-38038. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11132>

-
- [8] Ohtomo, A. and Hwang, H.Y. (2004) A High-Mobility Electron Gas at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterointerface. *Nature*, **427**, 423-426. <https://doi.org/10.1038/nature02308>
- [9] Hwang, H.Y., Iwasa, Y., Kawasaki, M., Keimer, B., Nagaosa, N. and Tokura, Y. (2012) Emergent Phenomena at Oxide Interfaces. *Nature Materials*, **11**, 103-113. <https://doi.org/10.1038/nmat3223>
- [10] Santander-Syro, A.F., Copie, O., Kondo, T., Fortuna, F., Pailhès, S., Weht, R., *et al.* (2011) Two-Dimensional Electron Gas with Universal Subbands at the Surface of SrTiO_3 . *Nature*, **469**, 189-193. <https://doi.org/10.1038/nature09720>
- [11] Meevasana, W., King, P.D.C., He, R.H., Mo, S., Hashimoto, M., Tamai, A., *et al.* (2011) Creation and Control of a Two-Dimensional Electron Liquid at the Bare SrTiO_3 Surface. *Nature Materials*, **10**, 114-118. <https://doi.org/10.1038/nmat2943>
- [12] Lee, Y., Clement, C., Hellerstedt, J., Kinney, J., Kinnischtzke, L., Leng, X., *et al.* (2011) Phase Diagram of Electrostatically Doped SrTiO_3 . *Physical Review Letters*, **106**, Article 136809. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.106.136809>
- [13] Chen, Y.Z., Trier, F., Wijnands, T., Green, R.J., Gauquelin, N., Egoavil, R., *et al.* (2015) Extreme Mobility Enhancement of Two-Dimensional Electron Gases at Oxide Interfaces by Charge-Transfer-Induced Modulation Doping. *Nature Materials*, **14**, 801-806. <https://doi.org/10.1038/nmat4303>
- [14] Chen, Y., He, A., Liu, G., Zhao, R., Gao, J. and Jiang, Y. (2019) A Universal Method to Fabricate P-N or Schottky Heterojunctions Based on Two-Dimensional Electron Gas. *Applied Physics Letters*, **115**, Article 241601. <https://doi.org/10.1063/1.5128099>
- [15] Shen, J., Lee, H., Valentí, R. and Jeschke, H.O. (2012) *Ab Initio* study of the Two-Dimensional Metallic State at the Surface of SrTiO_3 : Importance of Oxygen Vacancies. *Physical Review B*, **86**, Article 195119. <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.195119>
- [16] Li, F., Wang, F., Lu, H., Zhao, R. and Tian, W. (2025) Recent Progress in Oxide Interface-Based Two-Dimensional Electron Gas Systems: Conventional Devices and Emerging Hybrid Applications. *Advanced Materials Technologies*, **11**, e02215. <https://doi.org/10.1002/admt.202502215>
- [17] Sun, H., Ding, J., Zhao, R., Gao, J., Liu, G. and Qiu, J. (2025) Electrically Tunable Nonvolatile 2D Van Der Waals P-N Heterostructures Based on Gase-Quasi 2D Electron Gas on the SrTiO_3 Surface. *Applied Physics Letters*, **126**, Article 111603. <https://doi.org/10.1063/5.0258461>
- [18] He, A.P., Jiang, Y.C., Chen, J.Q., Zhao, R., Liu, G.Z. and Gao, J. (2019) Magnetoresistance and Photoelectrical Properties of Electron Gases at SrTiO_3 (1 0 0) Surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **52**, Article 375303. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab257c>
- [19] Simmons, J.G. (1963) Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film. *Journal of Applied Physics*, **34**, 1793-1803. <https://doi.org/10.1063/1.1702682>
- [20] Lin, C. and Demkov, A.A. (2013) Electron Correlation in Oxygen Vacancy in SrTiO_3 . *Physical Review Letters*, **111**, Article 217601. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.111.217601>