

文章编号: 1672-8785(2016)07-0010-06

基于 InAs/GaAs 量子点-石墨烯复合结构的肖特基光电探测器研究

甘 桃^{1,2,3,4} 杜 磊^{1,4} 刘昌龙^{1,4} 李 梁^{1,4} 陈 刚¹

徐鹤靓^{1,3} 陈平平¹ 李志峰¹ 陈永平^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 上海科技大学, 上海 201210;

3. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 石墨烯具有电子迁移率高、透过率高 ($T \approx 97.7\%$) 且费米能级可调的特性。砷化镓的电子迁移率比硅的大 5 到 6 倍。引入砷化镓量子点后, 光电探测器具有低暗电流、高工作温度、高响应率和探测率的特点, 因而可被用于制备响应快、量子效率高和光谱宽的光电探测器。对基于 InAs/GaAs 量子点-石墨烯复合结构的肖特基结的 I-V 特性和光电响应进行了研究。结果表明, 在 0 V 偏压下, 该器件在 400 nm~950 nm 均有响应, 峰值响应率可达 0.18 A/W; 在反向偏压下, 器件的峰值响应率可达到 0.45 A/W。通过对暗电流随温度变化的特性进行分析, 得到了 InAs/GaAs 量子点-石墨烯肖特基结在室温附近以及 80 K 附近的势垒高度。

关键词: 石墨烯; 肖特基结; 砷化镓; 砷化铟; 量子点

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.07.002

Study of Schottky Photodetector Based on InAs/GaAs Quantum Dot-Graphene Hybrid Structure

GAN Tao^{1,2,3,4}, DU Lei^{1,4}, LIU Chang-long^{1,4}, LI Liang^{1,4}, CHEN Gang¹, XU He-liang^{1,3},

CHEN Ping-ping¹, LI Zhi-feng¹, CHEN Yong-ping^{1,2,3}

(1. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China;

3. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61474130), 中科院百人计划, 国家重点基础研究发展计划 (CSTC2009CA2003); (973 计划)(2012CB619200), 中科院创新基金 (CXJJ-14-S82)

作者简介: 甘桃 (1988-), 男, 四川邻水人, 硕士研究生, 主要从事纳米薄膜光电探测器技术研究。

E-mail: gantao@mail.sitp.ac.cn

Abstract: Graphene has the features of high electron mobility, high transmittance ($T = 97.7\%$) and adjustable Fermi energy. The electron mobility of GaAs is 5 to 6 times higher than that of silicon. After introducing indium arsenide quantum dots, the photoelectric detector will have the features of low dark current, high operation temperature, high responsivity and high detectivity. Therefore, it can be used to fabricate fast, high quantum efficiency and wide spectrum photoelectric detectors. The I-V characteristics and photoresponse of a Schottky junction based on a graphene-InAs/GaAs quantum dot hybrid structure are studied. The results show that at the bias voltage of 0 V, the device shows its photoresponse in the wavelength range 400 nm to 950 nm with the peak response of 0.18 A/W. At the reverse bias voltage, its peak response can reach 0.45 A/W. Through the analysis of the temperature dependence of dark current, the barrier height of the Schottky junction at room temperature and 80 K is obtained.

Key words: graphene; Schottky junction; GaAs; InAs; quantum dot

0 引言

石墨烯是 sp^2 杂化的二维碳原子层, 具有非常独特的物理化学特性。它具有超高的电子迁移率, 在二氧化硅上的石墨烯的迁移率可达 $1 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, 悬浮石墨烯的迁移率可高达 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, 而且它还具有近弹道输运的电子特性, 其导热性好, 电导率高, 与金属接触时电阻低。此外, 石墨烯具有独特的光吸收特性, 对紫外到太赫兹波段的光均有吸收。石墨烯的费米能级可以通过栅压的方式进行调控, 而且石墨烯的制备工艺与传统的光电传感器件的工艺兼容。因此以石墨烯为材料制备光电传感器具有很大的应用前景。E. J. H. Lee 等人对石墨烯的光电响应在理论和实验上进行了初步研究^[1], 夏丰年等人用石墨烯为材料成功制备出了响应波长范围为 $0.514 \mu\text{m} \sim 2.4 \mu\text{m}$ 的光电探测器^[2]。这些工作开启了基于石墨烯的光电探测器件的先河。

目前, 以石墨烯为材料的光电传感器的结构主要有两种: 金属 / 石墨烯 / 金属光电传感器和石墨烯 / 半导体结光电传感器。金属 / 石墨烯 / 金属光电传感器的吸收层为石墨烯, 由于单层石墨烯的吸收率仅为约 2.3%, 且石墨烯的光生载流子寿命很短(皮秒量级)^[3], 在没有增强结构的情况下器件的响应率在 mA/W 量级。因此, 金属 / 石墨烯 / 金属结构通常适合制作远红外至太赫兹波段纳米级尺寸的快速响应光电探测器件, 往往需要使用等离子增强结构、微腔等来

增强石墨烯的吸收以及器件的响应^[4,5]。对于可见光和近红外波段的光电探测器, 最佳结构为石墨烯 / 半导体肖特基结, 光吸收层为半导体的耗尽层, 石墨烯的作用是形成肖特基势垒并使入射光透射至半导体的耗尽区。因此, 石墨烯 / 半导体肖特基结器件的量子效率比金属 / 半导体 / 金属器件的更高。A. Di Bartolomeo 对石墨烯 / 半导体肖特基结的实验和应用进行了比较详细的总结^[13]。S. Tongay 等人对石墨烯 / 半导体肖特基结进行了系统研究^[6], 得到了 Graphene/ 半导体肖特基结势垒高度等一系列数据, 并预测了其在光电传感器领域的潜在应用。X. An 等人以 Graphene/Si 为例对石墨烯 / 半导体肖特基结光电探测原理进行了系统研究^[7], 发现石墨烯 / 半导体肖特基结光电传感器的光吸收层为半导体的耗尽层, 因此器件的光谱响应和响应率受到半导体材料的限制。为进一步提高探测器效率, G. Konstantatos 等人将石墨烯与硫化铅纳米粒子量子点相结合, 成功制备出了具有很高增益的红外光电探测器件^[8]。这是由于用硫化铅纳米粒子量子点作为光的吸收层后, 大大提高了器件的响应光谱范围、响应率和量子效率。但该文章所用的量子点为胶体量子点, 其制备工艺与现有光电器件工艺的兼容度低。因此引发了利用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 方法生长的量子点与石墨烯构成的肖特基结来制备光电探测器的思路。目前大多数这方面的工作尚集中在石墨烯 - 外延半导体量子点复合结构的材料光电性质方面。比如 Y. Chen、H. Ajlani、R.

Bkakri 和 K. Rezgui 等人分别对 Graphene/GeSi^[9] 和 Graphene/InAs/GaAs^[10,11] 量子点复合结构的光致发光谱 (Photoluminescence, PL) 和拉曼谱^[12] 进行了研究, 探讨了石墨烯与量子点的光电响应和光生载流子的复合机制。研究表明, 引入用 MBE 方法生长的 GeSi 量子点和 InAs/GaAs 量子点后, 能有效提高石墨烯肖特基材料在可见光和近红外波段的吸收率和响应率。但到目前为止, 真正关于基于石墨烯-外延量子点肖特基结的光电探测器件的研究尚无报道。因此本文尝试在 InAs/GaAs 量子点衬底上制备一种新型 Graphene-InAs/GaAs 量子点肖特基光电探测器, 并对器件的光电特性、光谱响应以及肖特基结变温特性进行初步研究, 确定了肖特基势垒的高度。

1 器件制备

外延衬底为高掺杂 n 型 GaAs, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。使用的生长系统为 RIBER32 R & D 型 MBE 系统。样品的制备过程大致分三个步骤: 第 1 步, 衬底高温脱氧后在 600 °C 温度下生长约 120 nm 的 GaAs 缓冲层, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 第 2 步, 生长 10 个周期的 InAs 量子点/GaAs 间隔层。每个 InAs 量子点层的覆盖度为 2.5 ML, GaAs 间隔层的厚度为 20 nm; 第 3 步, 生长厚度为 10 nm 的 GaAs 帽层, 然后以该 InAs/GaAs 量子点样品为基础制备石墨烯肖特基器件。图 1 为该量子点衬底的室温 PL 谱, 在 832 nm 处有较强的发光峰。

器件结构如图 2(a) 所示, 最下面一层材料为 GaAs 衬底, 嵌在 GaAs 上表面的是 10 层 InAs 量子点。GaAs 上面为 Al_2O_3 绝缘层, Al_2O_3 中心有一个 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 大小的窗口, 石墨烯和 InAs/GaAs 量子点通过该窗口形成肖特基结。在氧化铝表面具有六角蜂巢结构的一层材料为单层石墨烯, 最上面环绕 Al_2O_3 窗口的是 Cr/Au 金属电极, Cr 的厚度为 20 nm, Au 的厚度为 100 nm。该器件的制作工艺是, 首先用湿法腐蚀将 GaAs 腐蚀至高掺杂 GaAs 层, 然后用电子束蒸发制备 AuGe(100 nm)/Ni(20 nm)/Au(300 nm) 金

属电极, 并在 380 °C 高温下快速退火, 使金属膜与衬底形成良好的欧姆接触。用原子层沉积方法在样品上生长 30 nm 的 Al_2O_3 介质层, 用湿法腐蚀将 Al_2O_3 腐蚀出 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 的窗口, 然后在样品上面转移一层石墨烯。石墨烯采用铜基 CVD 方法生长, 其拉曼光谱如图 2(b) 所示。从图中可以看出, G 峰和 2D 峰比较明显, 2D 峰比 G 峰高 2 倍多, 说明铜基上的石墨烯为单层且生长质量较好。转移石墨烯时, 采用传统的方法先将 PMMA 旋涂到铜片上, 然后用 Fe_2Cl_3 对铜进行腐蚀, 将石墨烯转移至样品上, 再用丙酮去除 PMMA。转移石墨烯后, 在 Al_2O_3 窗口周围制作 Cr(20 nm)/Au(100 nm) 环形电极, 完成器件的制备。

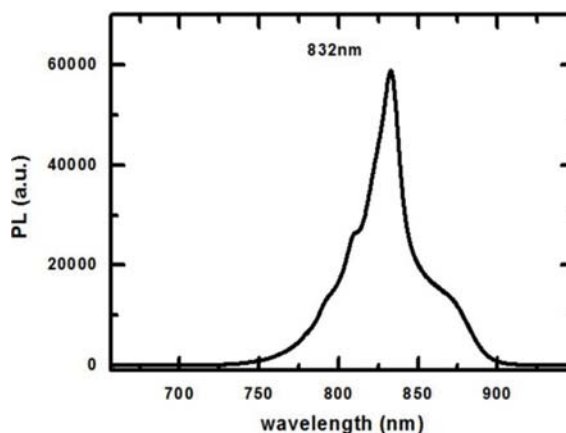


图 1 InAs/GaAs 量子点的 PL 谱

2 实验结果与讨论

2.1 光电流响应

如图 3(a) 和 3(d) 所示, 当光照在 InAs/GaAs 量子点-石墨烯复合结构上时会产生光电流。给器件施加反向偏压, 器件的光电流会逐渐增大, 但是当反向偏压加到一定值后光电流的值不再发生变化, 而给器件施加正向偏压的时候产生的光电流很小。不仅如此, 如果入射光功率不同, 产生的光电流也会不同。如图 3(a)、3(b) 和 3(c) 所示, 当入射光功率比较小的时候, 产生的光电流与入射光功率几乎线性增加, 但当光功率大到一定值后, 产生的光电流就趋于饱和。

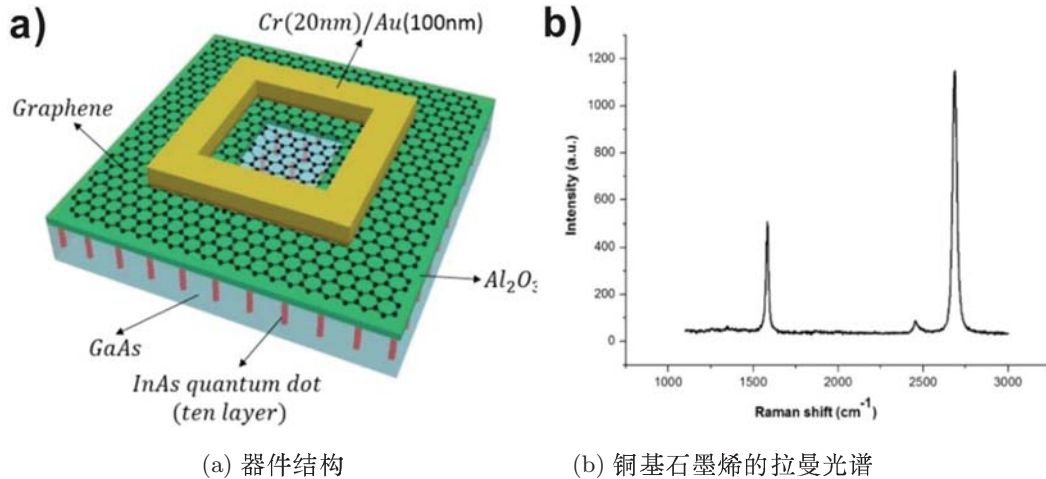


图 2

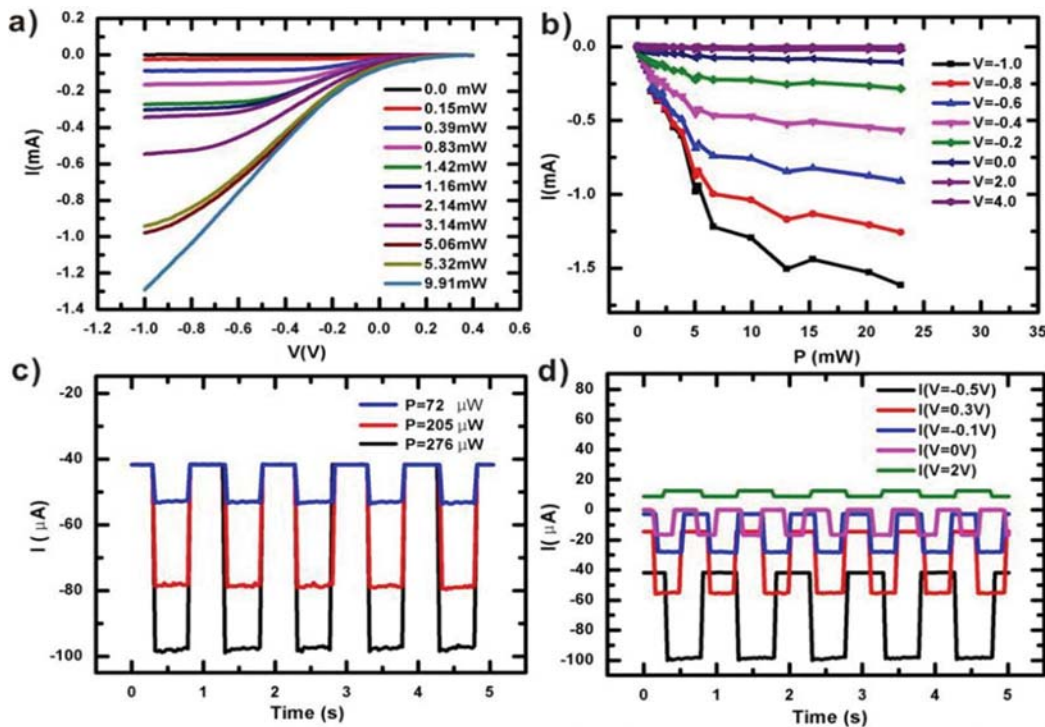


图 3 基于 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的光电特性: (a) 不同入射光功率下的 I-V 特性曲线; (b) 不同电压下光电流随功率变化曲线; (c) 反偏电压为 0.5 V, 不同入射光功率下的光电响应; (d) 输入光功率 $P=276 \mu\text{W}$, 不同偏压下的光电响应

这里我们以 X. An 等人提出的光电响应模型为基础来讨论上述结果^[7]。图 4(a) 为 Graphene/n-Semiconductor 肖特基结在无光照热平衡条件下的能带结构, 图中没有考虑石墨烯掺杂的情况。无光照下石墨烯的费米能级为 E_F , 半导体的费米能级为 E_{FS} , 半导体的准费米能级为 $E_{FS,P}^q$ (其

中 $E_V < E_{FS,P}^q < E_{FS}$)。当光照射到半导体的耗尽层时, 会产生电子 - 空穴 (e-h) 对, 其中光生空穴会从 GaAs 注入到石墨烯中, 空穴的注入会使石墨烯的能级下降至 $E_{F,P}^q$, 而电子会注入到 GaAs 中形成光电流, 但是石墨烯的能级需满足关系式: $E_{FS,P}^q < E_{F,P}^q < E_F$, 因此注入石

石墨烯的空穴数是有限的, 达到一定量之后就会饱和。这就解释了图 3(b) 所示 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的光电流随入射光功率的变化。当入射光功率比较小的时候, GaAs 耗尽层产生的光生空穴数比较少, 仍然保持 $E_{F,P}^q > E_{FS,P}^q$ 。光产生的空穴均能注入石墨烯, 此时产生的光电流与光功率几乎呈线性关系。当入射光比较大的时候, GaAs 耗尽层产生的光生空穴数比较多, 但是由于石墨烯的能级 $E_{F,P}^q$ 不能低于半导体的准费米能级 $E_{FS,P}^q$, 因此当光生空穴注入石墨烯使 $E_{F,P}^q = E_{FS,P}^q$ 的时候就不再注入, 达到饱和。此外, 对 Graphene/n-Semiconductor 肖特基结施加偏压也会引起光电

流的变化。当施加正向偏压的时候, 相对于半导体的费米能级 E_{FS} 而言, 石墨烯的费米能级 E_F 会下降, 而半导体光生空穴注入后石墨烯的费米能级 $E_{F,P}^q$ 需满足 $E_{FS,P}^q < E_{F,P}^q < E_F$, 因此费米能级的下降使得注入石墨烯的光生空穴量减少, 产生的光电流减小。相反, 当施加反向偏压时, 相对于半导体费米能级 E_{FS} 而言, 石墨烯的费米能级 E_F 会上升, 使注入石墨烯的光生空穴量增加, 产生的光电流增加, 如图 4(c) 所示。这就解释了当对 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结施加正向偏压时光电流会减小, 而施加反向偏压时光电流会增加的原因。

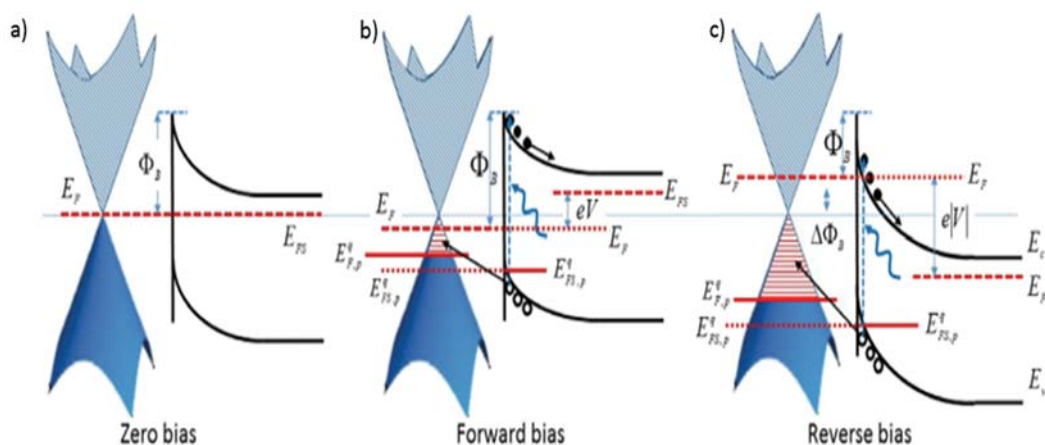


图 4 Graphene/n-Semiconductor 肖特基结的能带图: (a) 零偏 (b) 正偏 (c) 反偏 (参考文献 [7])

2.2 光谱响应

在可见光至近红外波段对 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构的光谱响应进行了测试, 测试波长范围为 400 nm~1100 nm。偏压为 0 V 时的测试结果如图 5 所示。从图中可以看出, 器件在 400 nm~950 nm 波长范围均有响应, 响应率峰值为 0.18 A/W。由于 GaAs 本身的吸收在 900 nm 处截止, 因此可以认为含有量子点结构的 Graphene/GaAs 肖特基结将器件的响应波段延伸到了 950 nm。器件在 920 nm 附近出现的一个较小的响应峰, 也可以归结为 InAs/GaAs 量子点的作用。根据器件光电流随反向偏压的变化

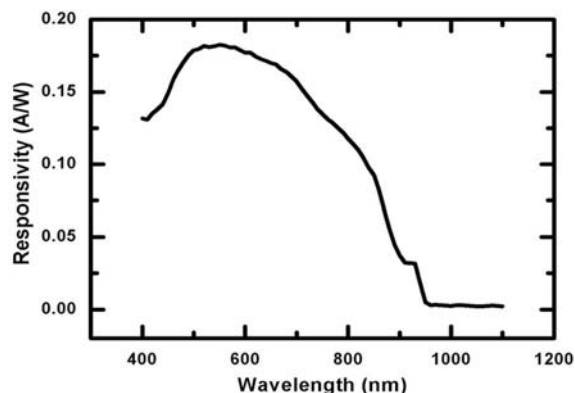


图 5 基于 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的光谱响应特性

关系 (图 3a), 可以估算出器件在反向偏压为 -1 V 时的响应率可达约 0.45 A/W。

2.3 暗电流特性

对 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构的暗电流随温度的变化特性进行了测试, 测试温度范围为 80 K 到 300 K, 测试结果如图 6(a) 所示。随着温度的降低, 二极管的导通电压会升高。利用图 6(a) 的数据, 可计算出不同温度下 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的理想因子 n , 计算结果如图 6(b) 所示。结果表明, 随着温度的降低, n 会升高。常温下的 n 值约为 2.6, 在 80 K 低温时, n 约为 10.45。利用图

6(a) 的数据可计算出不同温度下 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的势垒高度, 图 6(c) 为 $\ln(I_0/T^2)$ 随 $1000/T$ 的变化曲线。从图 6(c) 中可以看出, 曲线的斜率随温度逐渐变缓, 说明随着温度的降低势垒高度会降低。通过拟合可以得出在 300 K 附近的势垒高度 ϕ_B 约为 0.544 eV, 当温度降到 80 K 附近的时候, 势垒高度约为 0.169 eV; 温度从 80 K 上升到 300 K 的过程中, 势垒高度从 0.169 eV 逐渐上升到 0.544 eV。

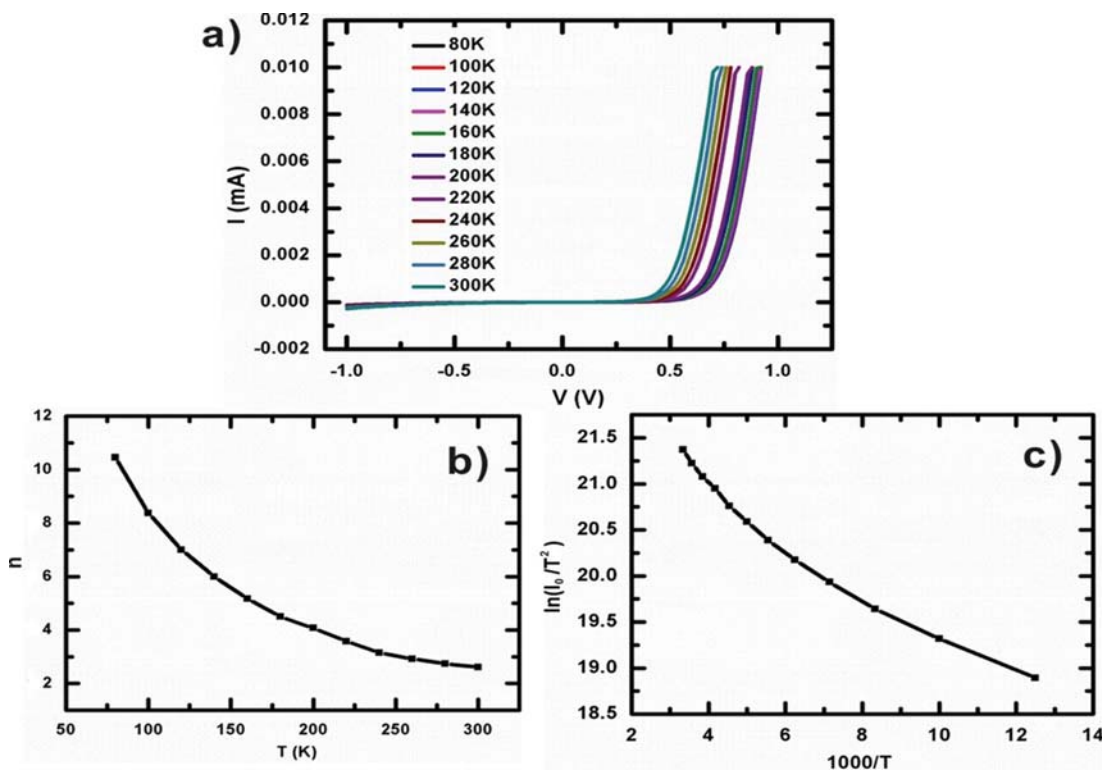


图 6 基于 InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结的低温特性: (a) 不同温度下无光照 I-V 特性曲线 (b) 理想因子随温度的变化曲线 (c) $\ln(I_0/T^2)$ 随 $1000/T$ 的变化曲线

3 结论

通过对器件的测试分析表明, InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构肖特基结器件具有整流特性, InAs/GaAs 量子点可以增强器件在可见 - 近红外波段的光电响应。常温下, Graphene/GaAs 肖特基结的理想因子约为 2.6。随着温度的降低, 器件的理想因子升高。当温度为 80 K 时, 理想因子约为 10.45。器件的光电流响应明显, 光电流的大小可以通过电压进行调制, 光电流随着反向电

压的升高而增加。增加到一定值后, 由于石墨烯的态密度有限而达到饱和。InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构的光谱响应范围为 400 nm~950 nm, 在 0 偏压下响应率峰值为 0.18 A/W; 通过电压调制, 响应率可达 0.45 A/W。InAs/GaAs 量子点 - 石墨烯复合结构的势垒高度与温度有关。当温度从 80 K 上升到 300 K 时, 势垒高度 ϕ_B 从 0.169 eV 逐渐上升到 0.544 eV。

(下转第 28 页)