

基于导电原子力显微镜的单根GaN纳米带光调控力电耦合性能

邓长发 燕少安 王冬 彭金峰 郑学军

Optically modulated electromechanical coupling properties of single GaN nanobelt based on conductive atomic force microscopy

Deng Chang-Fa Yan Shao-An Wang Dong Peng Jin-Feng Zheng Xue-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 237304 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191097

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191097>

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

过渡金属掺杂的扶手椅型氮化硼纳米带的磁电子学特性及力-磁耦合效应

Magneto-electronic properties and mechano-magnetic coupling effects in transition metal-doped armchair boron nitride nanoribbons

物理学报. 2017, 66(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.238501>

AgNbO₃压电纳米材料压-电-化学耦合研究

Piezo-electrochemical coupling of AgNbO₃ piezoelectric nanomaterials

物理学报. 2018, 67(10): 107702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180287>

单根SnO₂纳米线器件的电输运性能及其机理研究

electrical transport properties and related mechanism of single SnO₂ nanowire device

物理学报. 2018, 67(24): 246801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181402>

基于导电原子力显微镜的单根 GaN 纳米带 光调控力电耦合性能*

邓长发 燕少安[†] 王冬 彭金峰 郑学军[‡]

(湘潭大学机械工程学院, 焊接机器人与应用技术湖南省重点实验室, 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湘潭 411105)

(2019 年 7 月 16 日收到; 2019 年 9 月 14 日收到修改稿)

利用导电原子力显微镜技术研究了单根 GaN 纳米带在光调控下的力电耦合性能. 首先使用化学气相沉积法制备出结晶性良好的 GaN 纳米带, 然后将 GaN 纳米带分散到高定向热解石墨基底上, 利用探针作为微电极构成基于单根 GaN 纳米带的两端结构压电器件. 通过改变探针加载力的大小和引入外加光源调控 GaN 纳米带的电流输运性能, 对单根 GaN 纳米带在光调控下的力电耦合性能变化规律进行研究. 研究发现, 在有光条件下单根 GaN 纳米带整流开关比明显增大, 随着加载力的增大, 单根 GaN 纳米带电流响应值增大但整流特性减弱. 最后, 基于压电电子学和光电导效应理论, 通过分析肖特基势垒在加载力及光照作用下的变化规律解释了实验现象.

关键词: GaN 纳米带, 压电效应, 光电导效应, 力电耦合

PACS: 73.61.Ey, 73.90.+f, 77.65.-j, 78.20.hb, 85.35.-p

DOI: 10.7498/aps.68.20191097

1 引言

氮化镓 (GaN) 半导体材料具有宽禁带、高热导率、高迁移率、高热稳定性、耐腐蚀及抗辐照等优良特性, 能够在高温、高电压和高辐射等恶劣条件下工作, 是一种重要的微电子器件、光电子器件、压电电子器件以及微纳机电器件材料^[1-4]. GaN 纳米材料具有独特的压电、光电和半导体特性, 如准一维结构的 GaN 纳米薄膜、纳米线、纳米管、纳米棒、纳米带、纳米片及准零维结构的 GaN 量子点等, 在高迁移率晶体管、光电探测器、发光二极管、压力传感器、纳米发电机、阻变存储器及量子计算机等领域的应用潜力已经被高度关注^[5-16].

GaN 纳米材料的力电、光电及光力电耦合特性是目前学术界和产业界的研究热点. Yu 等^[17]

对 GaN 纳米带输运性质的压电调控及原理型器件进行研究, 实现了 GaN 纳米带器件肖特基势垒高度的高可靠性调制, 拓展了 GaN 纳米带在柔性电子领域的应用; 另外, 该研究组制备了基于 GaN 纳米带的应变栅压电晶体管, 并且基于压电晶体管构筑了逻辑门器件, 实现了力电耦合压电逻辑运算^[18]. Peng 等^[19]利用 GaN 纳米薄膜的压电和光电特性, 制备了基于柔性 GaN 薄膜的自驱动紫外光电开关, 该器件可在无供电条件下长期工作, 为柔性可穿戴光机电一体化系统研究提供思路. Wang 等^[20]研究了 GaN 纳米带压电光电子特性的温度效应, 研究发现低温环境下 GaN 纳米带压电、光电特性产生竞争关系. Du 等^[21]提出了基于 InGaN/GaN 多量子阱纳米柱的压电光电效应调控可见光通信系统, 其中信息通过机械应变编码, 该工作提供了一种在复杂环境下进行非接触式可

* 国家自然科学基金 (批准号: 11832016, 61804130, 51775471) 和湖南省自然科学基金 (批准号: 2018JJ3513) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yanshaoan@xtu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: zhengxuejun@xtu.edu.cn

靠通信的方法. Liu 等^[22]制备了基于 GaN 纳米线的压电忆阻器, 利用压电效应调控忆阻器的阻变性能. Lin 等^[23]制备了基于石墨烯/GaN 异质结的多波长光电探测器, 可以实现对紫外光和可见光的有效探测.

导电原子力显微镜技术 (conductive atomic force microscopy, C-AFM) 是研究低维纳米结构半导体材料的有效手段. Zhao 等^[24]使用 C-AFM 研究了 GaN 纳米线的力电耦合特性; Wang 等^[25]使用 C-AFM 研究了单根 SnO₂ 纳米带的电流输运性质; Yang 等^[26]利用 C-AFM 研究了单根 ZnO 纳米线的力电耦合损伤行为; Zhang 等^[27]使用 C-AFM 直接证实了物理吸附的二维材料-金属/半导体界面的电导率是由局部的电荷转移决定的猜想. 本课题组利用 C-AFM 对 GaN 纳米带的压电特性及力电耦合性能进行了研究^[28,29].

GaN 纳米带由于其独特的大高宽比结构特点以及良好的压电性能, 易于集成和组装成平面结构的力电耦合器件^[18]. 然而目前针对 GaN 纳米带基压电器件的光调控研究还相对较少, 光力电耦合特性机制还不清晰, 限制了 GaN 纳米带压电器件在光写入、光擦除、光探测等领域的应用. 本文首先使用化学气相沉积法 (chemical vapor deposition, CVD) 制备出结晶性良好的 GaN 纳米带, 然后将 GaN 纳米带分散到高定向热解石墨 (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) 基底上, 利用 C-AFM 探针作为微电极构成基于单根 GaN 纳米带的两端压电器件. 通过改变探针加载力的大小和引入外加光源调控 GaN 纳米带的电流输运性能, 对单根 GaN 纳米带在光调控下的力电耦合性能变化规律进行研究.

2 实验设计

2.1 GaN 纳米带制备与表征

通过 CVD 方法进行 GaN 纳米带的制备, 具体工艺过程: 1) 称取 0.1172 g GaN/Ga₂O₃ 混合粉末作为镓源装入石英舟中, 将镀有催化剂的衬底表面朝上放置在镓源下游大约 10 cm 处; 2) 将石英管放入管式炉中, 接通一端通气管, 放置衬底和石英舟, 再将石英管另一端接通; 3) 打开真空泵进行抽真空和真空度测试, 抽完真空后将气体流量控制器打开, 将氨气流量设为 30 sccm/min, 氩气流量

设为 20 sccm/min; 4) 将温度设置为 1100 °C, 升温速率设为 30 °C/min, 保温时间定为 30 min; 5) 在通气 15 min 后开始运行温度程序, 待温度上升到实验预定值时关闭氩气阀门只通入氨气进行降温, 当温度降到 900 °C 后关闭氨气并通入氩气等待其自然冷却至室温; 6) 关闭气体流量控制器及真空泵, 在取出来的衬底上可以获得 CVD 法生长的 GaN 纳米带^[28,29]. 随后使用 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD, Ultima IV, Japan) 和场发射扫描电镜 (field emission scanning electron microscope, FE-SEM, Hitachi SU5000, Japan) 对 CVD 制备的 GaN 纳米带物相和微观形貌进行表征.

2.2 单根 GaN 纳米带器件构筑

从基片上获取少量 GaN 纳米带粉末置入盛有丙酮溶液的烧杯, 进行 20 min 的超声分散. 超声分散结束后用滴管取出适量的 GaN 纳米带悬浮液滴于 HOPG 基底上, 然后将 HOPG 基底放入真空干燥箱内干燥, 干燥温度为 120 °C, 干燥时间为 30 min. 利用原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM, Cypher S, AR, USA) 对 HOPG 基底上的 GaN 纳米带进行形貌及电学性能表征, 其中以导电探针 (针尖涂层材料为 Ti/Ir 金属薄膜) 作为顶电极, HOPG 基底作为底电极, 构成基于单根 GaN 纳米带的两端压电器件, 装置示意图如图 1 所示. GaN 纳米材料在紫外 (250 nm) 至可见光 (600 nm) 光源照射下均有光电流响应^[23,30,31], 本文选择波长为 450 nm 的激光作为光源, 光束经传导光纤和聚光镜照射至探针针尖区域, 通过改变探针加载力的大小和引入外加光源调控 GaN 纳米带的

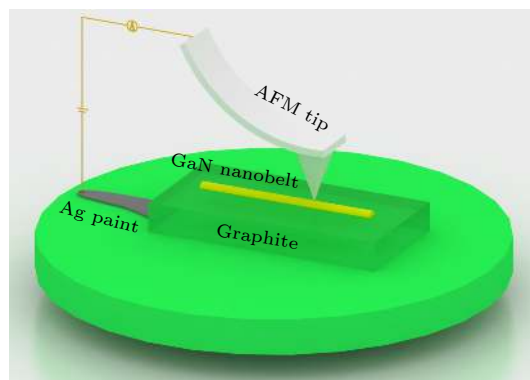


图 1 基于 C-AFM 的测试装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of C-AFM measurement setup.

电流输运性能. Ti/Ir 探针和 HOPG 的功函数分别为 5.5 eV 和 4.6 eV, GaN 电子亲和势为 4.2 eV, 单根 GaN 纳米带与探针和 HOPG 基底之间均形成肖特基接触^[32], 所以可通过加载力及外加光源对器件肖特基势垒高度进行调节, 进而对单根 GaN 纳米带的光力电耦合性能进行调控.

3 实验结果与分析

3.1 GaN 纳米带的形貌与微结构表征

图 2(a) 为 GaN 纳米带粉末的 XRD 图谱, 可以看出在 2θ 为 32.4° , 34.6° 和 36.9° 时出现分别对应六方纤锌矿 GaN (100), (002), (101) 面的 3 个主要晶面衍射峰, 与报道的体块材料纤锌矿 GaN 相一致^[14,28,29,32]. XRD 图谱衍射峰锐利, 表明制备的 GaN 结晶性比较好. 图 2(b) 为 GaN 纳米带粉末 SEM 图像, 可以看出所制备的 GaN 纳米材料呈现较好的带状分布, 宽度分布约在 0.1—1.0 μm 之间. 基于图 1 所示的测试装置图, 使用 AFM 在接触模式下扫描得到了单根 GaN 纳米带的二维及三维形貌图, 如图 2(c), (d) 所示. 可以看出, 单根 GaN 纳米带的宽度约为 1 μm , 高度约为 70 nm, 呈现出典

型的带状形态.

3.2 单根 GaN 纳米带力电性能的光调控

通过测量标准蓝宝石基底上的力曲线校准导电探针针尖弹性系数及悬臂的偏转灵敏度, 施加在 GaN 纳米带上的加载力可以通过改变偏转电压进行调节. 在 HOPG 基底上施加 4 V 的直流电压, 在接触模式下使用 C-AFM 对单根 GaN 纳米带进行面扫并同时记录电流值, 得到如图 3 所示的不同加载力下 (30, 50, 70 nN) 的单根 GaN 纳米带二维电流形貌图. 其中图 3(a)—(c) 为暗场下的电流形貌图, 明暗程度代表电流值的高低, 插图为电流形貌图截面处的电流值. 可以看到随着加载力的增大, 单根 GaN 纳米带的电流响应值逐渐增加, 主要原因是 GaN 纳米带具有良好的压电特性, 在探针加载力的作用下产生面外压电电场, 有效降低了导电探针与 GaN 纳米带之间的肖特基势垒. 选择波长为 450 nm 的激光作为光源, 光束经传导光纤和聚光镜照射至探针针尖区域, 然后通过 C-AFM 面扫得到如图 3(d)—(f) 所示光场下的 GaN 纳米带电流形貌图. 与暗场结果类似, 单根 GaN 纳米带的电流响应值随加载力增加而增大,

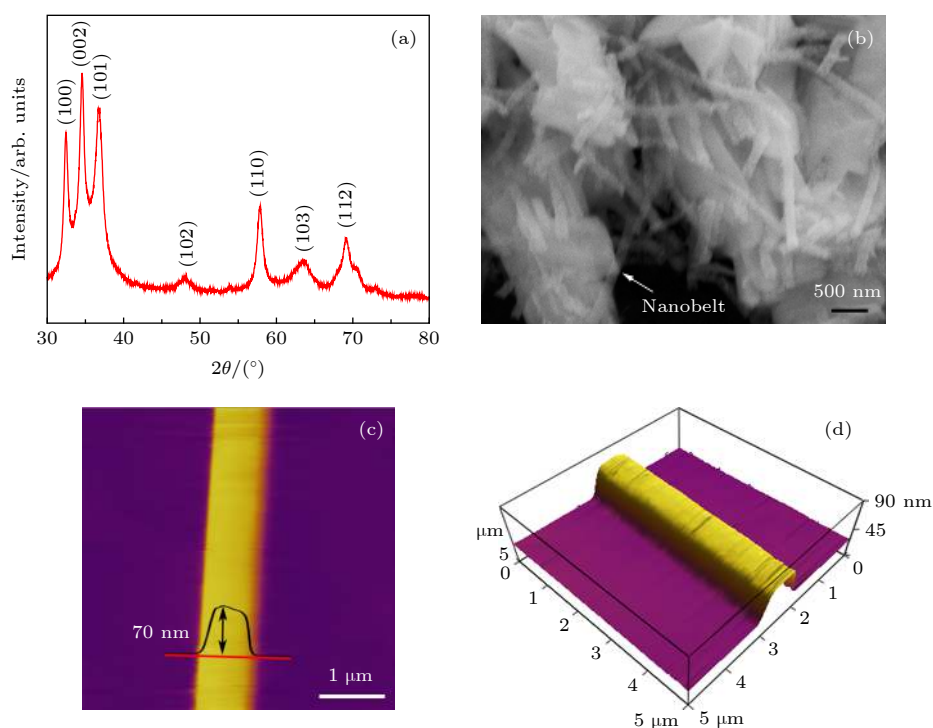


图 2 (a) GaN 纳米带粉末 XRD 图谱; (b) GaN 纳米带粉末 SEM 图像; (c) 单根 GaN 纳米带 AFM 二维形貌图及 (d) 三维形貌图
Fig. 2. (a) XRD scans and (b) SEM image of the as-prepared GaN nanobelt powder; (c) 2-D and (d) 3-D AFM morphology image of a single GaN nanobelt.

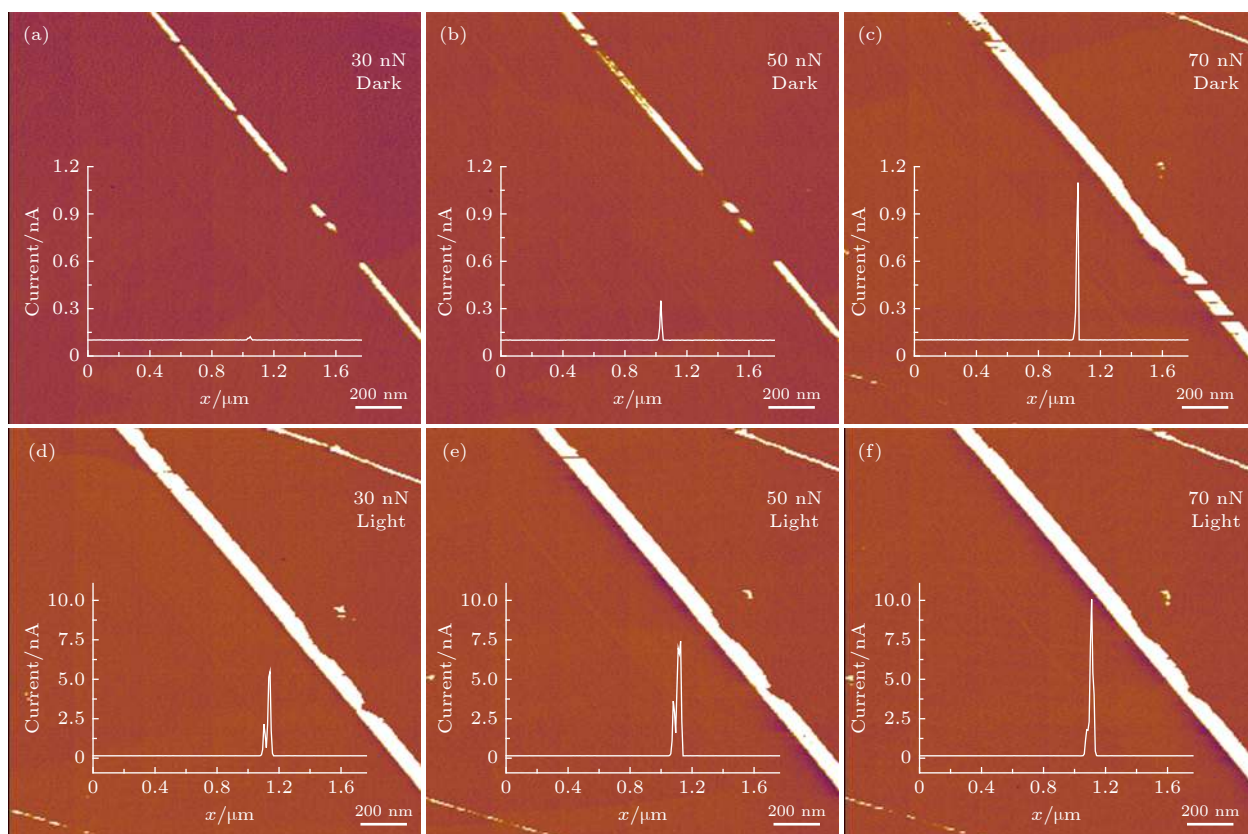


图3 (a)–(c) 暗场下单根 GaN 纳米带的二维电流形貌图, 加载力分别为 30, 50, 70 nN; (e)–(f) 光场下单根 GaN 纳米带的二维电流形貌图, 加载力分别为 30, 50, 70 nN; 插图为电流形貌图截面处的电流值

Fig. 3. (a)–(c) 2-D current topography of a single GaN nanobelt under dark condition with the loading forces of 30 nN, 50 nN and 70 nN, respectively; (d)–(f) 2-D current topography of a single GaN nanobelt under light condition with the loading forces of 30 nN, 50 nN and 70 nN, respectively. The insert shows the current value at the cross section of 2-D current topography.

且在相同加载力作用下, 光场下的 GaN 纳米带电流响应值更大. GaN 纳米带具有光电特性, 光场下 GaN 纳米带表面所产生的光生载流子在提高其电导率的同时还进一步降低了 GaN 纳米带与导电探针之间的肖特基势垒, 两者共同作用使得相同加载力作用下 GaN 纳米带获得更大的电流响应值.

通过图3的分析可知, 所制备的 GaN 纳米带具有显著的力电和光电响应. 为了更具体地研究单根 GaN 纳米带的力电性能及其光调控, 测试了 GaN 纳米带的单点电流-电压 (I - V) 性能, 如图4所示. 图4(a)为暗场下分别在探针上施加 20, 30, 40 nN 加载力时单根 GaN 纳米带的 I - V 曲线, 可以看出 20 nN 的小加载力作用下 I - V 曲线呈现明显的整流特性, 这与所分析的导电探针与 GaN 纳米带之间形成肖特基接触的分析一致. 随着加载力增大到 40 nN 时, 电流值随之增加, 同时 I - V 曲线的对称性增强, 整流特性几乎消失. 需要说明的是, 20 nA 是本实验室 C-AFM 电学测量单元的限流

值. 图4(b)为图4(a)的对数坐标形式, 可以清晰地看到随着加载力的增大, 最小电流值对应的电压从 -1.25 V 增加至约 0 V, 同时 I - V 曲线对称性也增强, 这说明探针施加的加载力在 GaN 纳米带表面诱导的压电电场有效降低了它们之间的肖特基势垒, 与上文分析一致. 图4(c)为光场下分别在探针上施加 20, 30 和 40 nN 加载力时单根 GaN 纳米带的 I - V 曲线, 可以看出, 加载力相同时光场作用下 GaN 纳米带的电流值明显增大, 此时加载力对 GaN 纳米带电流输运性能的调控减弱. 图4(d)为图4(c)的对数坐标形式, 可以看出在光场下 GaN 纳米带的 I - V 曲线呈现对称性, 且电流最小值对应的电压约为 0 V, 不随加载力的变化而变化, 此时 GaN 纳米带光电导效应是调控其电流输运的主要因素, 光场下 GaN 纳米带表面所产生的大量光生载流子很大程度上降低了导电探针与 GaN 纳米带之间的肖特基势垒.

为了进一步考察器件的光力电耦合特性, 对器

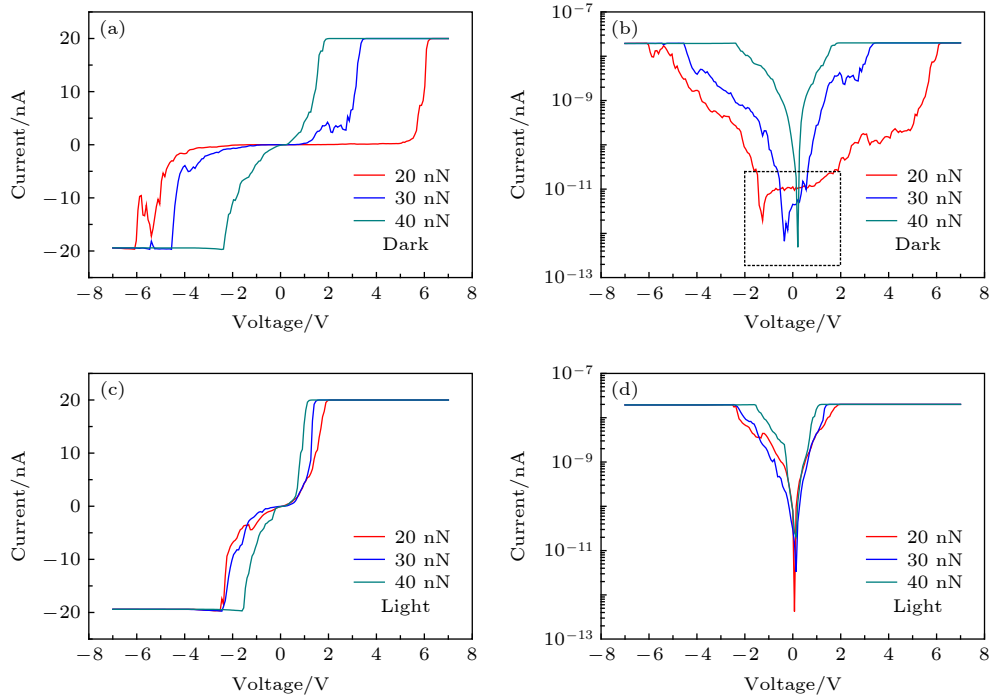


图4 GaN纳米带单点 I - V 曲线 (a), (b) 暗场不同加载力下的 I - V 曲线及对数坐标形式; (c), (d) 光场不同加载力下的 I - V 曲线及对数坐标形式

Fig. 4. Single point I - V curves of a single GaN nanobelt: (a), (b) I - V curve and its logarithmic coordinate with different loading forces under dark condition; (c), (d) I - V curve and its logarithmic coordinate with different loading forces under light condition.

件在明暗场下的直流脉冲电压响应进行了测试, 得到如图5所示的电流-时间 (I - t) 曲线. 脉冲电压幅值为 ± 2 V, 频率为 1 Hz. 图5(a) 中加载力为 30 nN, 此时单根 GaN 纳米带的 I - t 曲线表现出整流特性. 暗场下整流比约 70 (+2 V 脉冲电压下的电流值与 -2 V 脉冲电压下的电流绝对值的比值); 在光场下单根 GaN 纳米带的电流响应增加, 同时整流比增大到约 230. 由此可见, 外加光场的引入有效提高了单根 GaN 纳米带的整流特性. 如图5(b)所示, 当加载力增加到 40 nN 时, 由于肖特基势垒的降低, 单根 GaN 纳米带的电流响应值增大但整流特

性减弱, 在脉冲电压值为负时, I - t 曲线呈现出较为明显的弛豫现象. 引入光源后, 电流值明显增加, 且在脉冲为 +2 V 时输出电流已经达到 20 nA 限流.

3.3 机理解释

对于单根 GaN 纳米带的光力电耦合性能, 可以通过图6所示的能带结构示意图给出定性的解释. 探针、HOPG 基底与 GaN 纳米带之间均形成肖特基接触, 所以器件可等效成如图6(a)所示的肖特基二极管与 GaN 纳米带体电阻组成的串联电

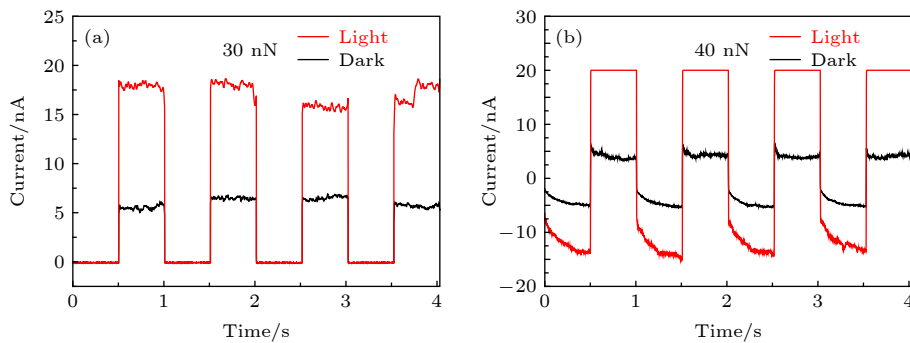


图5 明暗场不同加载力下单根 GaN 纳米带的 I - t 曲线 (a) 30 nN; (b) 40 nN

Fig. 5. I - t curves of a single GaN nanobelt under different loading forces in light and dark conditions: (a) 30 nN; (b) 40 nN.

路, 其中肖特基二极管可被加载力和光场调控. 图 6(b) 给出了能带结构示意图, 可以看出探针-GaN 纳米带、GaN 纳米带-HOPG 基底之间具有不对称的肖特基势垒, 其中探针端无加载力时的肖特基势垒高度为 φ_{SB} 、加载力作用下肖特基势垒高度为 φ'_{SB} 、肖特基势垒降低量为 $\Delta\varphi$. 需要指出的是, GaN 纳米带-HOPG 基底之间的肖特基势垒较低, 对于电流输运特性的影响较小. 探针端加载偏置电压时, 器件的电流响应将呈现典型的整流特性. 当探针施加加载力时, 界面形成的压电电场 (E_{PZ}) 可以降低肖特基势垒 (降低量记为 $\Delta\varphi$), 有效改变局域接触特性, 调控器件的电学输运特性. 另外, 当器件暴露在光场下时, 在 GaN 纳米带表面将形成大量的电子-空穴对, 价带空穴向纳米带-基底界面处靠近并聚集, 改变界面电势分布, 从而拉低界面处肖特基势垒. 导带电子在电场作用下可参与导电, 进一步增大纳米带电导率, 增强电流输运性能. 上述的压电效应和光电导效应可以共同作用, 对 GaN 纳米带的电流输运特性进行力、光的耦合调控.

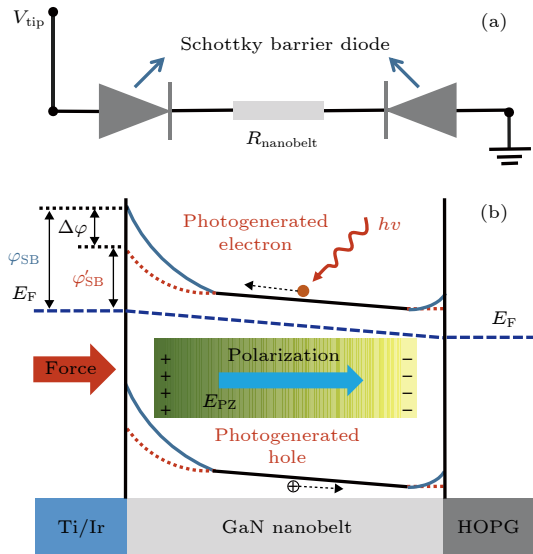


图 6 (a) 单根 GaN 纳米带器件等效电路示意图; (b) 光力电耦合能带结构示意图

Fig. 6. (a) Schematic diagram of equivalent circuit of the single GaN nanobelt based device; (b) schematic diagram of energy band structure with optically modulated electromechanical coupling.

4 结 论

本文使用 CVD 法制备了具有良好结晶性的 GaN 纳米带材料, 利用 C-AFM 探针作为微电极

构筑了基于单根 GaN 纳米带的两端结构压电器件, 器件具有较好的力电耦合性能, 在纳米力电开关领域具备应用潜力. 通过改变探针加载力的大小和引入外加光源调控 GaN 纳米带的电流输运性能, 对单根 GaN 纳米带在光调控下的力电耦合性能变化规律进行研究. 研究发现, 单根 GaN 纳米带的力电性能可以被外加光源有效调控, 在有光条件下单根 GaN 纳米带整流开关比明显增大, 随着加载力的增大, 单根 GaN 纳米带电流响应值增大但整流特性减弱. 最后, 通过压电电子学和光电导效应理论对本文的实验现象进行了解释. 本文研究结果可为准一维结构的 GaN 纳米压电光电子器件性能调控提供一定的指导.

参考文献

- [1] Johnson J C, Choi H J, Knutsen K P, Schaller R D, Yang P D, Saykally R J 2002 *Nature Mater.* **1** 106
- [2] Kang M S, Lee C H, Park J B, Yoo H, Yi G C 2012 *Nano Energy* **1** 391
- [3] Kim H M, Cho Y H, Lee H, Kim S I, Ryu S R, Kim D Y, Kang T W, Chung K S 2004 *Nano Lett.* **4** 1059
- [4] Sun S X, Wei Z C, Xia P H, Wang W B, Duan Z Y, Li Y X, Zhong Y H, Ding P, Jin Z 2018 *Chin. Phys. B* **27** 28502
- [5] Zhao S L, Wang Z Z, Chen Z D, Wang M J, Dai Y, Ma X H, Zhang J C, Hao Y 2019 *Chin. Phys. B* **28** 27301
- [6] Hou M C, Xie G, Sheng K 2019 *Chin. Phys. B* **28** 37302
- [7] Gon M J, Wang Q, Yan J D, Liu F Q, Feng C, Wang X L, Wang Z G 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 117303
- [8] Zhou X Y, Lv Y J, Tan X, Wang Y G, Song X B, He Z Z, Zhang Z R, Liu Q B, Han T T, Fang Y L, Feng Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 178501 (in Chinese) [周幸叶, 吕元杰, 谭鑫, 王元刚, 宋旭波, 何泽召, 张志荣, 刘庆彬, 韩婷婷, 房玉龙, 冯志红 2018 *物理学报* **67** 178501]
- [9] Holmes M J, Choi K, Kako S, Arita M, Arakawa, Y 2014 *Nano Lett.* **14** 982
- [10] Fu K, Fu H Q, Huang X Q, Yang T H, Chen H, Baranowski I, Montes J, Yang C, Zhou J G, Zhao Y J 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 375
- [11] Tchae Y, Jo J, Kim M, Heo J, Yoo G, Sone C, Yi G C 2014 *Adv. Mater.* **26** 3019
- [12] Tyagi P, Ramesh C, Sharma A, Husale S, Kushvaha S S, Senthil Kumar M 2019 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **97** 80
- [13] Hu W G, Kalantar-Zadeh K, Gupta K, Liu C P 2018 *MRS Bull.* **43** 936
- [14] Goswami L, Pandey R, Gupta G 2018 *Appl. Surf. Sci.* **449** 186
- [15] Aggarwal N, Krishna S, Jain S K, Arora A, Goswami L, Sharma A, Husale S, Gundimeda A, Gupta G 2019 *J. Alloys Compd.* **785** 883
- [16] Huang J Y, Zheng H, Mao S X, Li Q, Wang G T 2011 *Nano Lett.* **11** 1618
- [17] Yu R M, Dong L, Pan C F, Niu S M, Liu H F, Liu W, Chua S, Chi D Z, Wang Z L 2012 *Adv. Mater.* **24** 3532
- [18] Yu R M, Wu W Z, Ding Y, Wang Z L 2013 *ACS Nano* **7** 6403

- [19] Peng M Z, Liu Y D, Yu A F, Zhang Y, Liu C H, Liu J Y, Wu W, Zhang K, Shi X Q, Kou J Z, Zhai J Y, Wang Z L 2016 *ACS Nano* **10** 1572
- [20] Wang X F, Yu R M, Peng W B, Wu W Z, Li S T, Wang Z L 2015 *Adv. Mater.* **27** 8067
- [21] Du C H, Jiang C Y, Zuo P, Huang X, Pu X, Zhao Z F, Zhou Y L, Li L X, Chen H, Hu W G, Wang Z L 2015 *Small* **11** 6071
- [22] Liu H T, Hua Q L, Yu R M, Yang Y C, Zhang T P, Zhang Y J, Pan C F 2016 *Adv. Funct. Mater.* **26** 5307
- [23] Lin F, Chen S W, Meng J, Tse G, Fu X W, Xu F J, Shen B, Liao Z M, Yu D P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 073103
- [24] Zhao Z F, Pu X, Han C B, Du C H, Li L X, Jiang C Y, Hu W G, Wang Z L 2015 *ACS Nano* **9** 8578
- [25] Wang S J, Cheng G, Cheng K, Jiang X H, Du Z L 2011 *Nanoscale Res. Lett.* **6** 541
- [26] Yang Y, Qi J J, Gu Y S, Guo W, Zhang Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 123103
- [27] Zhang S, Gao L, Song A S, Zheng X H, Yao Q Z, Ma T B, Di Z F, Feng X Q, Li Q Y 2018 *Nano Lett.* **18** 6030
- [28] Wu D X, Cheng H B, Zheng X J, Wang X Y, Wang D, Li J 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 108102
- [29] Yan X Y, Peng J F, Yan S A, Zheng X J 2018 *J. Electron. Mater.* **47** 3869
- [30] Sun X, Liu W B, Jiang D S, Liu Z S, Zhang S, Wang L L, Wang H, Zhu J J, Duan L H, Wang Y T, Zhao D G, Zhang S M, Yang H 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 165108
- [31] Yang G, Li Y F, Yao B, Ding Z H, Deng R, Fang X, Wei Z P 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 16653
- [32] Ryu S R, Ram S D G, Lee S J, Cho H D, Lee S, Kang T W, Kwon S, Yang W, Shin S, Woo Y 2015 *Appl. Surf. Sci.* **347** 793

Optically modulated electromechanical coupling properties of single GaN nanobelt based on conductive atomic force microscopy^{*}

Deng Chang-Fa Yan Shao-An[†] Wang Dong

Peng Jin-Feng Zheng Xue-Jun[‡]

(Key Laboratory of Welding Robot and Application Technology of Hunan Province, Engineering Research Center of Complex

Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, School of Mechanical

Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

(Received 16 July 2019; revised manuscript received 14 September 2019)

Abstract

Gallium nitride (GaN) nanobelt with a quasi-one-dimensional structure possesses good piezoelectric and photoelectric properties. In this paper, the electromechanical coupling properties of single GaN nanobelt under optical modulation are studied by conductive atomic force microscope. The GaN nanobelts with good crystallization are prepared by the chemical vapor deposition method, then they are ultrasonically dispersed on a highly oriented pyrolysis graphite substrate. The conductive probe is used as a microelectrode to construct the two-terminal piezoelectric device based on a single GaN nanobelt, which has good electromechanical coupling performance. By changing the loading force of the probe and introducing an external light source to regulate the current transport properties of GaN nanobelt, the coupling between mechanical and semiconducting properties under light modulating is studied. It is found that the coupling between mechanical and semiconducting performance of the single GaN nanobelt can be effectively modulated by an external light source, and the electromechanical switch ratio of the single GaN nanobelt increases obviously in the presence of light. With the loading force increasing, the current response of the single GaN nanobelt increases but the rectification characteristics decrease. Finally, the experimental results are explained by the piezoelectric electronics and photoconductivity theory. This work is expected to provide a scientific basis for the performance modulation of nano-piezoelectric optoelectronic devices based on low-dimensional GaN nanomaterials.

Keywords: GaN nanobelt, piezoelectric effect, photoconductive effect, electromechanical coupling

PACS: 73.61.Ey, 73.90.+f, 77.65.-j, 78.20.hb, 85.35.-p

DOI: 10.7498/aps.68.20191097

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11832016, 61804130, 51775471) and the Provincial Natural Science Foundation of Hunan, China (Grant No. 2018JJ3513).

[†] Corresponding author. E-mail: yanshaoan@xtu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhengxuejun@xtu.edu.cn