

BaTiO₃/p-Si 异质结的整流特性和光诱导特性的研究*

杨世海 金克新 王晶 罗炳成 陈长乐†

(西北工业大学, 凝聚态结构与性质陕西省重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2013年1月18日收到; 2013年3月22日收到修改稿)

利用脉冲激光沉积法成功制备了 BaTiO₃/p-Si 异质结, 该异质结在 80—300 K 显示出了良好的整流特性和光诱导特性. 开启电压随着温度的升高而逐渐降低. 利用不同频率的光子辐照样品, 观察到明显的光电导效应. 且随着照射光子能量的增大, 结电流也相应变大, 光诱导效应越明显. BaTiO₃ 薄膜电阻 - 温度 ($R-T$) 曲线显示氧缺陷条件下 BaTiO₃ 薄膜具有良好的半导体特性.

关键词: 异质结, 光诱导效应, BaTiO₃ 薄膜

PACS: 73.40.-c, 72.40.+w, 73.40.Ei, 77.55.fe

DOI: 10.7498/aps.62.147305

1 引言

近年来在钙钛矿结构中相继发现了超导电性和巨磁阻抗特性, 使得这类材料的结构和物理性能之间的关系引起了人们的极大兴趣. BaTiO₃(BTO) 是位移型铁电体的典型代表, 具有优良的铁电、压电、电光、光折变和非线性光学性能, 使其在微电子学和光电集成器件等方面有着重要的应用价值^[1-6]. 近年来, 由于半导体 p-n 结是很多器件的核心, 比如半导体二极管、发光二极管、光电池、光电二极管等, 特别是光电池、光电二极管显现了光与结的相互作用. BaTiO₃/Si 异质结具有的独特特性引起了人们的极大兴趣^[7-11]. Hunter 等^[7]发现 BaTiO₃/p-Si 异质结存在明显的整流特性和光诱导特性. 随后 Hao 等^[10]发现 BaTiO₃/n-Si 异质结同样存在明显的整流特性和金属绝缘体转变. Xing 等^[11]发现 BaTiO₃/p-Si 异质结存在明显的光伏效应. 现今对 BaTiO₃/Si 异质结的研究主要集中在其整流特性及不同光强辐照下的光诱导特性, 而在不同频率光照下的光诱导特性研究极少. 本文利用激光脉冲沉积 (PLD) 成功制备 BaTiO₃/p-Si 异质结,

并研究了薄膜的输运特性、异质结的整流特性和不同波长光辐照下的光诱导效应.

2 实验

用常规的固相反应法制备了 BaTiO₃ (BTO) 多晶靶材. 采用 PLD 在经标准工艺处理表面氧化层后的 p 型单晶 Si(100) 衬底上沉积 BaTiO₃ 薄膜, 沉积温度为 700 °C, 氧压为 5×10^{-3} Pa, 激光由 KrF 准分子激光器提供 (波长为 248 nm, 脉冲宽度为 20 ns, 频率为 2 Hz, 能量为 150 mJ).

采用德国 Mikropack 公司生产的椭偏仪测得 BaTiO₃ 薄膜厚度为 150 nm 左右. 采用日本 RigakuD/max-2400 X 射线衍射仪 (XRD, Cu K α 射线, 波长为 0.15432 nm) 进行物相表征; 采用美国 Asylum Research MFP-3D™ 原子力 (AFM) 进行样品表面测试. 为提供良好的欧姆接触, 分别在 Si 及 BaTiO₃ 表面蒸镀 0.5 mm \times 0.5 mm 的 Pt 作为电极. 异质结的电学特性采用 Keithley 2400 在 80—300 K 范围内测量, 测试装置见文献 [12]. 使用的光源为 Newport 公司的可变波长光源, 输出功率为 40 mW, 为防止热效应, 只在测量时照射样品, 且照射时间仅十几秒.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61078057, 51172183, 51202195)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2011JM6013, 2012JQ8013)、航空基金 (批准号: 2011ZF53065) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号: JC201155, JC20120246, JC20110270) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chencl@nwpu.edu.cn

3 结果与分析

3.1 薄膜结构分析

图 1(a) 给出了在 p-Si 基片上制备的 BaTiO₃ 异质结的 XRD 图. 从图中可以看出 BaTiO₃ 薄膜的 (110), (211), (220) 峰. 可知薄膜为多晶结构, 空间群为 *P4mm*. 图 1(b) 给出了 BTO 薄膜的表面形貌图, 从图中可以看出生长薄膜均匀, 起伏较小, 平均起伏 (RMS) 约 2 nm.

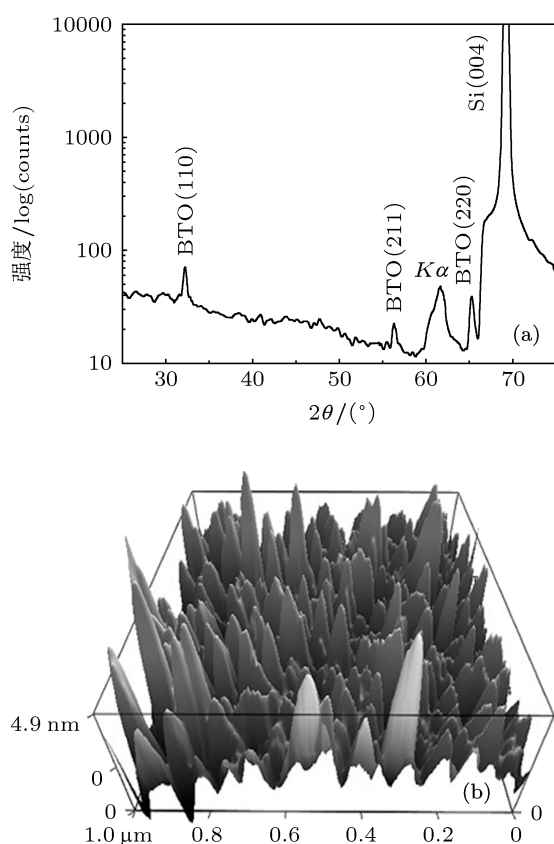


图 1 (a) BaTiO₃/p-Si 异质结的 XRD 图谱; (b) BaTiO₃ 薄膜的形貌图

3.2 薄膜的电阻 - 温度特性

利用探针法测量薄膜在 80—300 K 的温度范围内的电阻, 如图 2 所示, 显示制备的 BaTiO₃ 薄膜呈现半导体输运特性. 对于多晶材料, 氧缺陷容易在颗粒的边缘产生, 这些边缘更像绝缘相, 从而导致高阻的存在, 呈现出半导体输运特性.

3.3 异质结的整流特性

如图 3 所示, 异质结在不同温度下表现出极好的整流特性. 随着温度从 80 K 升高到 300 K, 反向

饱和电流 I_s 无明显变化, 300 K 时 1.5 V 下的整流比 $((I_+)/(-I_-))$ 达到 1363. 开启电压由 0.80 V 降至 0.39 V, 如插图所示. 许多研究已经表明 BaTiO₃ 在缺氧条件下具有 n 型导电特性^[13], 因此在与 p-Si 衬底接触时, 会在界面处形成耗尽层, 形成扩散势垒. 随着温度的升高, 异质结的耗尽层宽度变窄, 结势垒变低, 将电子从 BaTiO₃ 方向注入到 p-Si 方向需要的电压变小, 所以开启电压变小. 并且随着温度的升高, 电子的浓度和动能变高, 只需要很小的电压就可以将电子激发越过势垒层形成结电流, 所以异质结的伏安曲线的正向斜率变大.

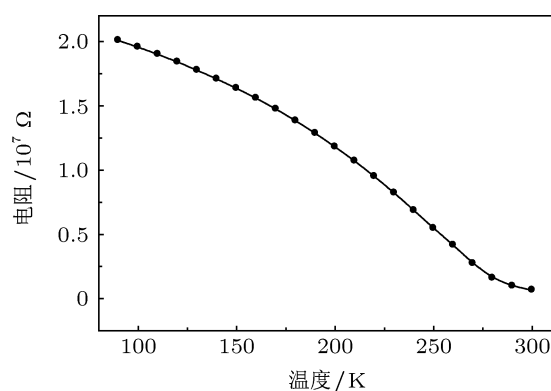


图 2 BaTiO₃ 薄膜的电阻 - 温度曲线

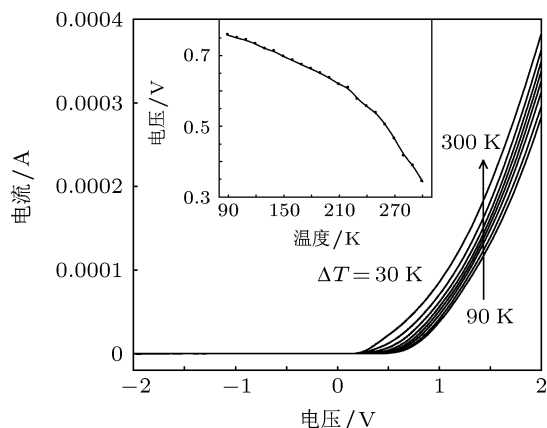


图 3 BaTiO₃/p-Si 异质结在不同温度下的伏安特性曲线, 其中插图为不同温度下的开启电压

3.4 异质结的光电特性

当光束辐照材料时会有两个效应, 分别是光热效应和光电效应. 光的热效应是普遍存在的, 是电磁波与物质相互作用的结果. 光电效应分为内光电效应和外光电效应, 其与光子能量以及物质的能带结构有密切关系. 本文主要研究光频率对异

质结的整流特性的影响, 对于异质结器件在复杂环境下的应用有一定的意义. 由于 BaTiO_3 的带隙为 3.2 eV ^[13,14], 所以我们选择三种不同波长 (350, 400, 450 nm) 的光覆照整个器件表面. 为消除外界光对实验的影响, 所有过程均在暗室中进行; 为降低热效应的影响, 仅在实验时照射样品, 且照射时间仅十几秒; 为消除光强对光诱导的影响, 使用光强衰减器使照射能量为 40 mW . 测量样品在 300 K 时不同波长光覆照下的伏安特性曲线如图 4 所示. 从图中可以看出, 不管正向还是反向偏压, 相同电压下的电流均变大, 表现出光电导效应, 并且随着光子能量的增大, 结电流也相应增大.

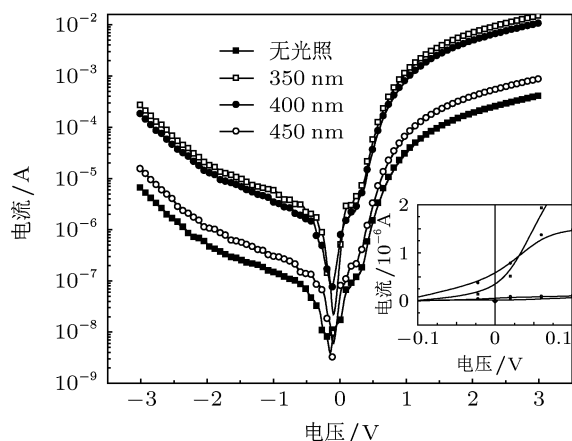


图 4 $\text{BaTiO}_3/\text{p-Si}$ 异质结在 $T = 300 \text{ K}$ 时不同波长光照条件下的光电流半对数曲线, 插图为局部放大图

当照射异质结时, 价带中的电子吸收光子后跃迁到导带, 如图 5 中过程 1, 在异质结的空间电荷区形成空穴 - 电子对. 在内建电场的作用下, 在 p 区 (Si) 导带中的光生电子就会漂移到 n 区 (BTO), 而 n 区价带上的光生空穴就会漂移到 p 区, 如过程 2 所示. 这样, 产生一个与热平衡时内建电场方向相反

的光生电场, 诱导出 p 到 n 方向的光电流和 n 到 p 方向的光生电动势, 因此在外加偏压为 0 时仍可以观察到电流的出现, 如图 4 插图所示. 当光子能量大于 Si (1.2 eV) 带隙和 BTO (3.2 eV) 带隙时, 光子被 Si 和 BTO 均吸收. 而当光子能量介于两异质结材料带隙之间时, 仅被带隙小的材料 (Si) 吸收. 因此前者产生的光生载流子要多于后者, 因此光生电场变大. 因此在相同光强辐照条件下, 随着光照频率的增大, 光生电场越大, 结电流也相应变大, 光诱导效应越明显.

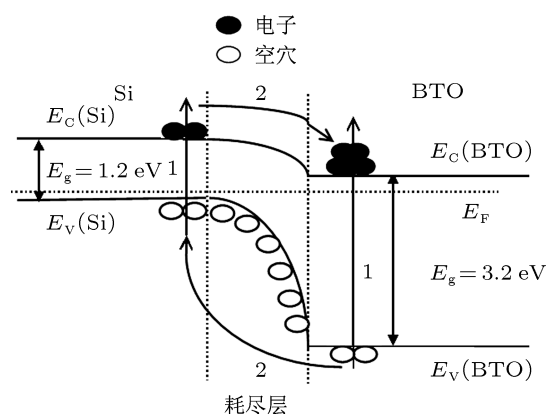


图 5 异质结的 Anderson 能带图

4 结论

利用脉冲激光沉积法制备了 $\text{BTO}/\text{p-Si}$ 异质结, 薄膜的 $R-T$ 曲线显示薄膜具有良好的半导体特性, 并且该异质结在 $80-300 \text{ K}$ 显示出了良好的整流特性. 随着温度的升高, 异质结开启电压逐渐变小. 利用不同频率的光辐照样品, 观察到明显的光电导效应. 随着照射光子能量的增大, 结电流也相应变大.

- [1] Roy D, Krupanidhi S B 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2057
- [2] Ring K M, Kavanagh K L 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5982
- [3] Hu Z G, Wang G S, Huang Z M, Meng X J, Chu J H 2003 *Semicond. Sci. Technol.* **18** 449
- [4] Huang J Q, Hong X L, Han G R, Weng W J, Du P Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3664 (in Chinese) [黄集权, 洪秀兰, 韩高荣, 翁文剑, 杜丕一 2006 物理学报 **55** 3664]
- [5] Amy F, Wan A S, Kahn A, Walker F J, Mckee R A 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 1635
- [6] Kim S, Hishita S, Kang Y M, Balk S 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 5604
- [7] Hunter D, Lord K, Williams T M, Zhang K, Pradhan A K, Sahu D R, Huang J L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 092102
- [8] Lee M B, Kawasaki M, Yoshimoto M, Koinuma H 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 1331
- [9] Li G Q, Lai P T, Zeng S H, Huang M Q, Liu B Y 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2436
- [10] Hao L Z, Xue Q Z, Gao X L, Li Q, Zheng Q B, Yan K Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 212105
- [11] Xing J, Jin K J, Lu H B, He M, Liu G Z, Qiu J, Yang G Z 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 071113
- [12] Wang J Y, Chen C L, Gao G M, Han L A, Jin K X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6617 (in Chinese) [王建元, 陈长乐, 高国棉, 韩立安, 金克新 2006 物理学报 **55** 6617]
- [13] Cardona M 1965 *Phys. Rev. A* **140** 651
- [14] Berglund C N, Braun H J 1967 *Phys. Rev.* **164** 790

Rectifying behavior and photocarrier injection effect in BaTiO₃/p-Si heterostructure*

Yang Shi-Hai Jin Ke-Xin Wang Jing Luo Bing-Cheng Chen Chang-Le†

(Shaanxi Key Laboratory of Condensed Matter Structures and Properties, the Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 18 January 2013; revised manuscript received 22 March 2013)

Abstract

A good rectifying behavior is observed in a temperature range from 80 K to 300 K in the BaTiO₃/p-Si heterostructure, which is fabricated by a pulse laser deposition. The diffusion voltage (V_D) decreases with the increase of temperature. A significant photocarrier injection effect is also observed with light irradiation. The photocarrier injection effect increases with the energy of photon increasing. Meanwhile, R - T curve of the BaTiO₃ film indicates that the oxygen-deficient BaTiO₃ is an n-type semiconductor.

Keywords: heterostructure, photocarrier injection effect, BaTiO₃ film

PACS: 73.40.-c, 72.40.+w, 73.40.Ei, 77.55.fe

DOI: 10.7498/aps.62.147305

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61078057, 51172183, 51202195), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2011JM6013, 2012JQ8013), Aviation Foundation of China (Grant No. 2011ZF53065), and the NPU Foundation for Fundamental Research, China (Grant Nos. JC201155, JC20120246, JC20110270).

† Corresponding author. E-mail: chencl@nwpu.edu.cn