

紫外光辐照对TiO<sub>2</sub>纳米线电输运性能的影响及磁阻效应研究

孙志刚 庞雨雨 胡靖华 何雄 李月仇

Electronic transportation properties and magnetoresistance effects on single TiO<sub>2</sub> nanowire under ultraviolet irradiation

Sun Zhi-Gang Pang Yu-Yu Hu Jing-Hua He Xiong Li Yue-Chou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 097301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.097301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[D<sub>3h</sub> 和 D<sub>4h</sub> 等离子激元超分子的 Fano 共振光谱的子集合分解解释](#)

[Subgroup decomposition analyses of D<sub>3h</sub> and D<sub>4h</sub> plasmonic metamolecule Fano resonance spectrum](#)

物理学报.2016, 65(5): 057302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.057302>

[两端线型双量子点分子 Aharonov-Bohm 干涉仪电输运](#)

[Electron transport through a two-terminal Aharonov-Bohm interferometer coupled with linear di-quantum dot molecules](#)

物理学报.2015, 64(20): 207304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.207304>

[电子的谷自由度](#)

[The valley degree of freedom of an electron](#)

物理学报.2015, 64(18): 187301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.187301>

[光激发作用下分子与多金属纳米粒子间的电荷转移研究](#)

[Theoretical study of photoinduced charge transfer in molecule and multi-metalnanoparticles system](#)

物理学报.2015, 64(14): 147303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147303>

[T型双量子点分子 Aharonov-Bohm 干涉仪的电输运](#)

[Electron transport through T-shaped double quantum dot molecule Aharonov-Bohm interferometer](#)

物理学报.2014, 63(22): 227304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227304>

# 紫外光辐照对TiO<sub>2</sub>纳米线电输运性能的影响及磁阻效应研究\*

孙志刚<sup>1)†</sup> 庞雨雨<sup>1)</sup> 胡靖华<sup>2)</sup> 何雄<sup>1)</sup> 李月仇<sup>1)</sup>

1)(武汉理工大学材料科学与工程学院, 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

2)(武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

(2015年12月7日收到; 2016年2月15日收到修改稿)

采用溶胶凝胶法以及静电纺丝法, 利用热处理工艺, 成功制备出了多晶锐钛矿型TiO<sub>2</sub>纳米线, 通过两线法在室温下测试单根TiO<sub>2</sub>纳米线的V-I曲线来研究其电输运性能及磁阻效应. 结果表明: 在无光照环境下其V-I曲线为不过零点的直线, 零场电阻较大, 在磁场作用下电阻下降, 表现出负磁阻效应; 紫外光辐照环境下TiO<sub>2</sub>纳米线载流子浓度增加使得电阻变小, 然而在磁场作用下电阻增大, 表现为正磁阻效应. 紫外光辐照导致的载流子浓度变化, 使得负磁阻转变为正磁阻, 我们将磁阻变化归结为d电子局域导致的负磁阻与能带劈裂导致的正磁阻两种机理相互竞争的结果.

**关键词:** TiO<sub>2</sub> 纳米线, 静电纺丝, 电输运性能, 磁阻效应

**PACS:** 73.43.Qt, 73.63.-b, 81.07.Gf

**DOI:** 10.7498/aps.65.097301

## 1 引言

近年来, 以氧化物半导体纳米材料(TiO<sub>2</sub><sup>[1-8]</sup>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[9,10]</sup>, ZnO<sup>[11-19]</sup>等)为基本单元构筑的纳米传感器、纳米激光器等纳米器件, 已成为纳米科技领域的研究热点之一. 其中, TiO<sub>2</sub>因其在气敏传感器<sup>[3]</sup>、湿敏传感器<sup>[4]</sup>、光伏电池<sup>[5]</sup>、光催化<sup>[6,7]</sup>等方面具有广阔的应用前景, 引起科研工作者极大的研究兴趣.

许多科研人员对氧化物半导体纳米材料的电输运性能以及磁阻效应进行了相关研究. 在电输运性能方面主要研究温度、光照、晶体缺陷等对其的影响, 比如, 对掺杂氮的单根TiO<sub>2</sub>纳米管的研究表明, 载流子浓度受温度的影响很大, 从而导致电输运性质随之变化较大<sup>[1]</sup>; 而通过不同温度处理得到的混合晶型TiO<sub>2</sub>纳米纤维具有一定的晶体管特

性<sup>[2]</sup>; Sani<sup>[8]</sup>发现在紫外光照下n-TiO<sub>2</sub>纳米线在4 V偏置电压作用下的电流比黑暗环境下的大1.5倍; Yu等<sup>[19]</sup>发现ZnO纳米线的电学性能受氧空位的影响. 而在磁阻效应研究方面人们也得到很多有意义的结果, 比如, 在Fe掺杂的In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表现出负磁阻效应<sup>[9]</sup>, 这是由于磁性颗粒之间的电子隧穿导致的; Xu等<sup>[11]</sup>发现Co掺杂的ZnO在低温环境下由于载流子浓度降低使得该体系的局域性增强, 最终导致了正磁阻效应越来越明显; Wang等<sup>[12]</sup>发现ZnO薄膜在低载流子浓度时表现为负磁阻效应, 而当载流子浓度较高时由负磁阻转变为正磁阻. 上述研究表明, 对于氧化物半导体, 载流子浓度对其电输运性质有着很大的影响. 我们知道, 当半导体材料受到能量大于其禁带宽度的光子辐照时, 会激发产生电子-空穴对, 从而极大地增加了半导体内的载流子浓度, 最终对其电输运性质产生了很大影响. 与此同时, 在非氧化物半导体中人们还发现由

\* 国家自然科学基金(批准号: 11574243, 11174231)和材料复合新技术国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金(批准号: 2016-KF-13)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sun\_zg@whut.edu.cn

于光照导致磁阻效应改变的现象, 比如, Akinaga 等<sup>[20]</sup>在(111) B GaAs中发现光照频率的不同对磁阻效应具有一定的影响, 当839 nm激光照射时, 在较小外加磁场强度(小于0.1 T)就可以得到高达20%左右的室温磁阻, 显示出了较强的光激发磁阻效应; Shon 等<sup>[21]</sup>在掺有纳米磁畴的p-GaAs, 低温(80 K)光照条件下发现了较明显的正磁阻效应; Viana 等<sup>[22]</sup>发现当温度为220—315 K时半绝缘GaAs在外加磁场( $B < 0.2$  T)和光照条件下表现为正磁阻效应. 上述研究表明光照对半导体磁阻具有很大而且较为复杂的影响. 目前, 虽然人们对于TiO<sub>2</sub>半导体进行了大量的研究<sup>[1-8]</sup>, 但是其在光照下的电输运性能, 特别是磁阻效应研究很少.

本文正是针对这一问题, 首先采用溶胶-凝胶法和静电纺丝法, 再结合热处理工艺制备得到了一维TiO<sub>2</sub>纳米线, 然后将所得的纳米线制成纳米器件, 分别在无光以及紫外光辐照环境下进行电输运测试, 研究光照对TiO<sub>2</sub>纳米线的电输运性能和磁阻效应的影响.

## 2 实验部分

### 2.1 TiO<sub>2</sub>纳米线的制备及表征

首先采用溶胶-凝胶法将无水乙醇、乙酸、聚乙烯吡咯烷酮、钛酸四正丁酯按一定的比例在恒温磁力搅拌器中搅拌4 h得到TiO<sub>2</sub>前驱体溶液, 然后用静电纺丝法制备Ti(OH)<sub>4</sub>纳米线, 再将制得的Ti(OH)<sub>4</sub>纳米线加热到500 °C后热处理2 h, 自然冷却到室温, 最终获得本文所需TiO<sub>2</sub>纳米线. 采用日本RIGAKU公司生产的Rigaku D/max-III A型X射线衍射(XRD)分析仪对所得的TiO<sub>2</sub>纳米线进行XRD测试; 利用日本日立公司制造的S-4800场发射扫描电子显微镜对TiO<sub>2</sub>纳米线的形貌进行表征.

图1是经过热处理后TiO<sub>2</sub>纳米线XRD图. 通过对比标准衍射峰可以看出, 500 °C热处理得到TiO<sub>2</sub>纳米线的衍射峰与JCPDS卡片#21-1272完全对应, 说明形成的二氧化钛是多晶锐钛矿型结构.

500 °C热处理的TiO<sub>2</sub>纳米线的SEM图像如图2所示, 从图中可知TiO<sub>2</sub>纳米线的直径约为300 nm, 粗细均匀, 表面比较光滑.

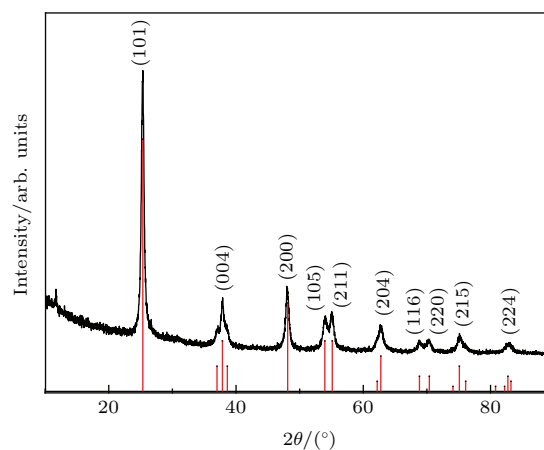


图1 500 °C两小时热处理后的TiO<sub>2</sub>的XRD图谱  
Fig. 1. The XRD pattern of TiO<sub>2</sub> nanowires after annealing process at 500 °C for 2 h.



图2 500 °C两小时热处理后的TiO<sub>2</sub>纳米线的SEM图片  
Fig. 2. SEM images of TiO<sub>2</sub> nanowires after annealing process at 500 °C for 2 h.

### 2.2 TiO<sub>2</sub>纳米器件的制备及测试

通过高真空蒸镀系统在玻璃基底上蒸镀铂矩阵电极, 利用静电纺丝的方法将前驱体纳米线纺在铂矩阵电极上, 并在500 °C下进行热处理得到TiO<sub>2</sub>纳米线, 之后用银浆点接上导线, 烘干即可得到测试所需的纳米器件, 其电极间距约为0.5 mm, 纳米器件如图3所示. 我们知道, 锐钛矿型TiO<sub>2</sub>的禁带宽度 $E_g = 3.2$  eV, 其对应吸收波长为387.5 nm, 因此本文选取了波长为375—380 nm蓝光发光二极管灯珠研究光照的影响. 我们选用北京东方晨景科技有限公司的ET9000系列电输运测试系统, 在室温下对样品在无光照和紫外光辐照环境下进行电输运性能测试. 该电输运测试系统采用美国Keithley6220型源表提供电流, 测试过程中通过Keithley6485型皮安计测量电流, Keithley2182 A型纳伏表测量电压, 从而得到V-I曲线. 高阻测量

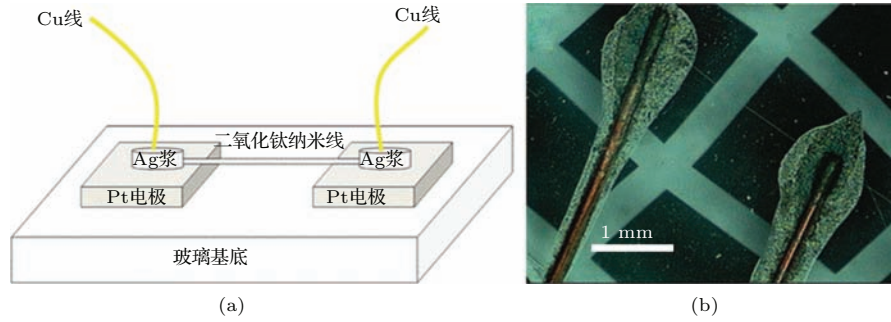


图3 (网刊彩色)(a) TiO<sub>2</sub> 纳米器件原理图; (b) TiO<sub>2</sub> 纳米器件实物图

Fig. 3. (color online) (a) Schematic drawing of TiO<sub>2</sub> nanowire device; (b) the image of TiO<sub>2</sub> nanowire device.

时, 该测量系统的具体电学性能参数如下: 电流源提供电流范围为  $\pm 0.1 \text{ pA} - \pm 0.1 \text{ A}$ , 皮安计测量范围为  $\pm 10 \text{ fA} - \pm 21 \text{ mA}$  ( $10 \text{ fA}$  为最小分辨率), 纳伏表测量范围为  $\pm 0.1 \text{ nV} - \pm 100 \text{ V}$  ( $0.1 \text{ nV}$  为最小分辨率).

### 3 结果与讨论

图 4(a) 给出了无光照环境下不同磁场下的  $V-I$  曲线, 对这些曲线进行线性拟合, 我们发现它们均为不过零点的直线; 随着磁场的增加曲线斜率先减小后增加, 但都小于  $B = 0 \text{ T}$  时的斜率. 图 4(a) 中的插图为  $V-I$  曲线偏压为零附近的局部细节放大图. 图 4(b) 给出了电阻随磁场的变化曲线, 从中可以看出在无光照环境下 TiO<sub>2</sub> 纳米线电阻数量级为  $10^{11}$ , 当磁场由  $B = 0 \text{ T}$  增加到  $B = 0.7 \text{ T}$  时, 电阻单调减小, 从零磁场下的  $7.5 \times 10^{11} \text{ } \Omega$  降到  $B = 0.7 \text{ T}$  时的  $4.7 \times 10^{11} \text{ } \Omega$ , 当磁场进一步上升, 我们发现电阻迅速增加. 我们知道磁阻的定义式为  $MR$  ( $MR = [R(B) - R(B = 0 \text{ T})] / R(B = 0 \text{ T}) \times 100\%$ ), 从图 4(b) 中的插图可以看出总体磁阻为负值, 呈现出负磁阻效应, 随着磁场的增加负磁阻效应 ( $|MR|$ ) 先增大, 然后减小, 在  $B = 0.7 \text{ T}$  时达到最大负磁阻  $-37.5\%$ .

图 5(a) 给出了紫外光辐照下不同磁场下的  $V-I$  曲线, 对这些曲线进行线性拟合, 同样我们发现它们均为不过零点的直线, 随着磁场的增加曲线斜率逐渐增大. 图 5(a) 中的插图为  $V-I$  曲线偏压为零附近的局部细节放大图. 图 5(b) 给出了电阻随磁场的变化曲线, 在零磁场时, 紫外光辐照下的电阻  $0.65 \times 10^{11} \text{ } \Omega$  小于无光照环境下的电阻  $7.5 \times 10^{11} \text{ } \Omega$ , 这是因为在紫外光辐照下, 由于光生载流子的产生使得 TiO<sub>2</sub> 纳米线在紫外光辐照下的

载流子多于无光照下的载流子, 从而表现出紫外光辐照下的电阻小于无光照下的电阻. 随着磁场的增加, 电阻由零磁场下的  $0.65 \times 10^{11} \text{ } \Omega$  迅速增大到  $B = 1 \text{ T}$  时的  $4.65 \times 10^{11} \text{ } \Omega$ . 从图 5(b) 中的插图可以看出磁阻为正值, 且磁阻随着磁场的增加而迅速增大, 在  $B = 1.0 \text{ T}$  时磁阻达到最大值  $620\%$ , 呈现正磁阻效应.

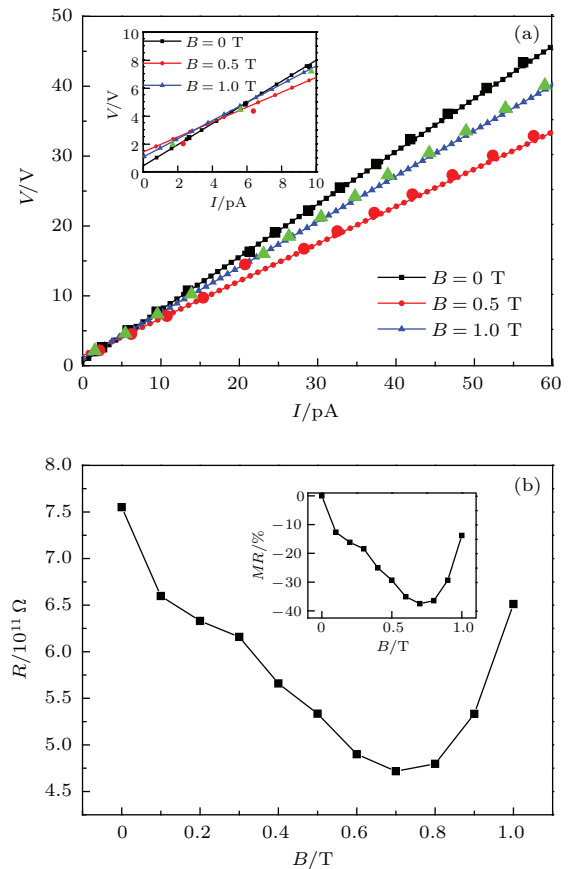


图4 (网刊彩色) 室温无光照环境下 (a)  $V-I$  曲线, 插图为零偏压附近的  $V-I$  曲线; (b)  $R-B$  曲线, 插图为  $MR-B$  曲线

Fig. 4. (color online) Room temperature electrical properties and magnetoresistance effect in the dark environment (a)  $V-I$  curves, the inset is the  $V-I$  curve at near zero bias; (b)  $R-B$  curve. inset is  $MR-B$  curve.

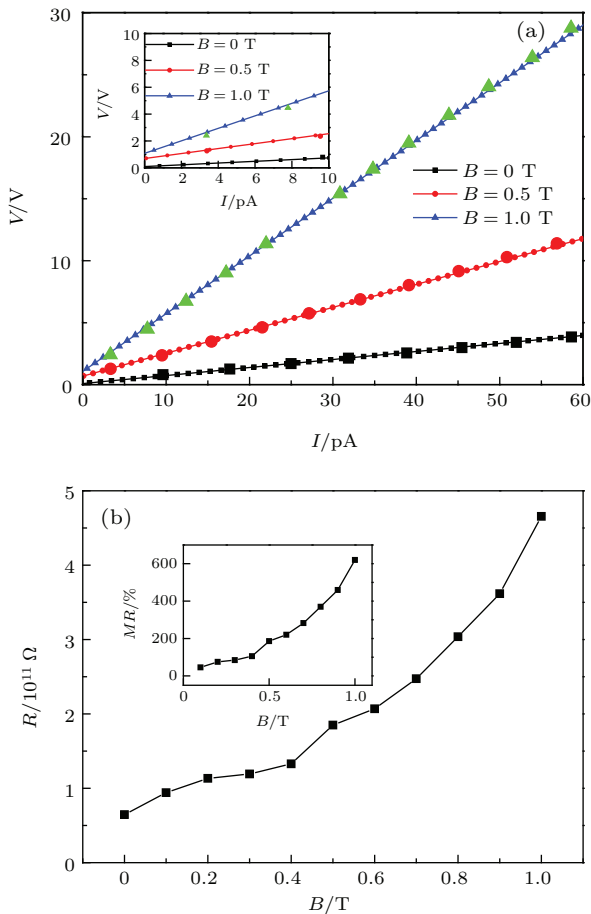


图5 (网刊彩色) 室温紫外光辐照环境下 (a)  $V-I$  测试曲线, 插图为零偏压附近的  $V-I$  曲线; (b)  $R-B$  曲线, 插图为  $MR-B$  曲线

Fig. 5. (color online) Room temperature electrical properties and magnetoresistance effect under ultraviolet illumination. (a)  $V-I$  curves, the inset is  $V-I$  curve near the zero bias; (b)  $R-B$  curve, the inset is  $MR-B$  curve.

对比无光照和紫外光辐照条件的结果, 我们发现无光照情形下负磁阻效应导致电阻减小, 但是其最小值  $4.7 \times 10^{11} \Omega$  也大于紫外光辐照下由于正磁阻效应导致的最大电阻  $4.65 \times 10^{11} \Omega$ , 可见虽然外加磁场对载流子的运动产生了一些影响, 但是此时的光生载流子使得载流子浓度增加对电阻的影响占据着主导地位, 总体表现出紫外光辐照下的电阻小于无光照下的电阻.

在零磁场时,  $TiO_2$  纳米线电阻数量级均为  $10^{11}$ , 呈现出高阻状态. 由电阻公式  $R = \rho \cdot L/S$  可知, 影响其电阻的因素有  $\rho$ ,  $L$  和  $S$ . 由图 3 (b) 可知, 电极间的纳米线长度较长 ( $L = 0.5$  mm), 且直径较小  $D \approx 300$  nm (如图 2 所示), 其长径比高达  $1.7 \times 10^3$ , 从而导致了纳米线电阻很大. 由于实验在干燥的空气中进行, 可以排除表面由于水分子

吸附导致的离子导电效应<sup>[4]</sup>, 另外本文研究的是纯  $TiO_2$ , 没有离子掺杂, 因此电阻主要是由  $TiO_2$  纳米线本征的导电性决定. 又由于二氧化钛的禁带宽度比较大 (为  $3.2$  eV), 因此在室温下的极少数载流子是由材料本身的热激发所产生, 从而导致在无辐照情况下电阻很大. 此外, 当紫外光辐照时, 由于光子能量大于其禁带宽度, 因此  $TiO_2$  纳米线会产生大量的电子-空穴对, 使得纳米线内部的载流子浓度增加, 但是由于纳米线内部存在着大量的纳米晶以及纳米线表面等复合中心, 使得产生的电子-空穴对在未达到电极时就被复合, 因此总的载流子浓度由载流子的激发产生以及在缺陷中心的复合共同决定的. 同时, 在零磁场无光照下  $TiO_2$  纳米线的电阻为  $7.5 \times 10^{11} \Omega$ , 而紫外光辐照下的电阻为  $0.65 \times 10^{11} \Omega$ , 紫外光照下电阻减小了约 10 倍, 这表明光照对于电输运性能仍然有很大的影响.

对于氧化物半导体的负磁阻效应, 人们往往利用弱局域效应<sup>[12]</sup>、自旋相关的散射<sup>[13]</sup>、s-d 交换耦合作用<sup>[14]</sup> 等机理进行相关解释; 而对于正磁阻效应, 人们通常利用 sp-d 相互交换作用<sup>[10]</sup>、自旋劈裂效应<sup>[15]</sup>、电子波函数的收缩<sup>[16]</sup>、Zeeman 劈裂<sup>[17]</sup> 等机理进行相关解释. 但是, 产生正磁阻效应或者负磁阻效应的内在机理十分复杂, 不是由某一个机理单独作用导致的, 而是由多个机理共同作用形成, 只是在某个具体过程中某一个机理相对于其他机理占据主导地位.

黑暗环境下同时存在弱局域效应、自旋劈裂效应等其他形式的机理, 由于此时  $TiO_2$  纳米线载流子浓度相对较低, 因此在这几个机理相互竞争中使磁阻减小的弱局域效应占据了主导地位. 磁场的存在使得 d 电子局域化, 磁相关散射减弱, 导致电阻减小, 产生了负磁阻效应. 磁场从  $B = 0$  T 增加到  $B = 0.7$  T 时, 负磁阻效应增大, 表明此时弱局域效应占据着绝对主导地位; 在  $B = 0.7$  T 时负磁阻最大, 但是在  $B = 0.7$  T 增加到  $B = 1.0$  T 时, 负磁阻效应减小, 可能此时弱局域效应的主导地位在减弱, 而自旋劈裂效应等其他能够使得磁阻增加机理的作用增强, 从而使得磁阻在  $B = 0.7$  T 时开始增加.

在紫外光辐照环境下, 也同时存在自旋劈裂效应、弱局域效应等其他形式的机理, 由于光生载流子的产生, 使得  $TiO_2$  纳米线的载流子浓度升高, 因此在这几个机理相互竞争中能使磁阻增加的自旋

劈裂效应占据了主导地位. 在没有磁场时, 紫外光辐照下的电阻比无光环境下的电阻小很多, 这是因为此时载流子是自由的s电子, 而受到磁场影响的应该是局域的d电子. 和无光情形一样, 磁场的作用导致d电子局域化, 这时导致负磁阻效应. 但是磁场也会导致能带劈裂成两个不同自旋取向的子能带, 这时电子将从高能子带转移到低能子带, 电子的重新分配导致了费米面处的电子态密度降低, TiO<sub>2</sub> 纳米线电阻增加, 产生正磁阻效应. 同时磁场导致的劈裂可能使光电子浓度减小, 这也可能是产生正磁阻的原因. 上述两种作用相互竞争, 在紫外光辐照条件下影响d电子局域化导致的负磁阻效应是相对次要的, 而在高载流子浓度下能带劈裂导致的正磁阻效应起主要作用, 因此整体呈现为正磁阻效应.

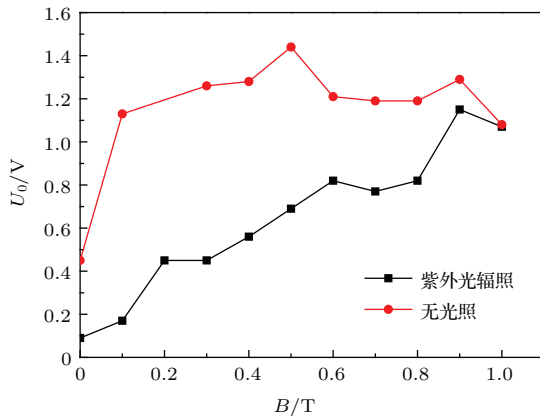


图6 不同环境下起始电压与磁场 ( $V_0$ - $B$ ) 曲线

Fig. 6. The curves of the initial voltage vs magnetic field ( $V_0$ - $B$ ) under different illumination situation.

由图4和图5可以看出, 虽然TiO<sub>2</sub> 纳米线的  $V$ - $I$  曲线为线性关系, 但是从图中可以发现其起始电压不为零. 对于不同磁场下测试的起始电压如图6所示, 从图中可以看出, 无光照环境下的起始电压都大于紫外光辐照时的起始电压. 在无光照环境下, 从磁场  $B = 0$  T 到  $B = 0.1$  T 时起始电压迅速增加, 然后随着磁场的继续增加, 起始电压趋于平衡状态, 为 1.2 V 左右; 在紫外光辐照环境下, 随着磁场的增加, 起始电压单调增大. 我们知道 TiO<sub>2</sub> 和 Pt 的功函数  $W$  分别为 5.58 eV 和 5.65 eV, 由于  $W_{\text{TiO}_2} = 5.58$  eV <  $W_{\text{Pt}} = 5.65$  eV, 因此 TiO<sub>2</sub> 与 Pt 接触表面为肖特基接触, 从而表现为起始电压不为零. 在磁场作用下, 起始电压快速上升, 这表明磁场增加肖特基势垒的高度; 而当 TiO<sub>2</sub> 纳米线受

到紫外光辐照时, 由于纳米线具有大的比表面积, 使得暴露在空气中的纳米线在紫外光辐照下产生光生电子-空穴对, 空穴则在内置电场的作用下容易迁移到纳米线的表面, 纳米线内部的电子浓度增加, 这将减小肖特基势垒高度, 导致起始电压下降, 磁场的作用使得势垒高度缓慢增加, 从而导致起始电压逐渐升高.

## 4 结 论

本文采用了溶胶-凝胶法以及静电纺丝法制备得到多晶锐钛矿型 TiO<sub>2</sub> 纳米线, 并对其电输运性质以及磁阻效应进行了研究. 研究表明: 在无光照环境下, 其零场电阻较大, 在磁场作用下电阻下降, 表现出负磁阻效应; 紫外光辐照导致的载流子浓度变化, 零场电阻减小, 在磁场作用下电阻增大, 表现为正磁阻效应. 我们将磁阻变化归结为 d 电子局域导致的负磁阻与能带劈裂导致的正磁阻两种机理相互竞争的结果.

## 参考文献

- [1] Zhao F 2011 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute Technology) (in Chinese) [赵峰 2011 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [2] Zhang H N 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [张弘楠 2011 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [3] Meng D, Yamazaki T, Kikuta T 2014 *Sens. Actuator B* **190** 838
- [4] Li H 2013 *M. S. Dissertation* (Wuhan: Wuhan University of Technology) (in Chinese) [李寒 2013 硕士学位论文 (武汉: 武汉理工大学)]
- [5] Peng R X, Chen C, Shen W, Guo Y, Geng H W, Wang M T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6582 (in Chinese) [彭瑞祥, 陈冲, 沈薇, 郭颖, 耿宏伟, 王命泰 2009 物理学报 **58** 6582]
- [6] Li D D, Wang L L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034212 (in Chinese) [李冬冬, 王丽莉 2012 物理学报 **61** 034212]
- [7] Liang P, Wang L, Xiong S Y, Dong Q M, Li X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 053101 (in Chinese) [梁培, 王乐, 熊斯雨, 董前民, 李晓艳 2012 物理学报 **61** 053101]
- [8] Sani S R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 107302
- [9] Zhang L, Huang B, Liu Y, Zhang L, Zhang R, Mei L 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **261** 257
- [10] Peleckis G, Wang X L, Dou S X, Munroe P, Ding J, Lee B 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07D113
- [11] Xu Q, Hartmann L, Schmidt H, Hochmuth H, Lorenz M, Spemann D, Grundmann M 2007 *Phys. Rev. B* **76** 134417

- [12] Wang D F, Kim J M, Thuy V T T, Seo M S, Lee Y P 2011 *J. Korean Phys. Soc.* **58** 1304
- [13] Hartmann L, Xu Q, Schmidt H, Hochmuth H, Lorenz M, Sturm C, Meinecke C, Grundmann M 2006 *J. Phys. D* **39** 4920
- [14] Reuss F, Frank S, Kirchner C, Kling R, Gruber T, Waag A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 112104
- [15] Liang W J, Yuhas B D, Yang P D 2009 *Nano Lett.* **9** 892
- [16] Tian Y F, Yan S, Cao Q, Deng J X, Chen Y X, Liu G L, Mei L M, Qiang Y 2009 *Phys. Rev. B* **79** 115209
- [17] Tian Y F, Antony J, Souza R, Yan S S, Mei L M, Qiang Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 192109
- [18] Jabeen M, Iqbal M A, Kumar R V, Ahmed M, Javed M T 2014 *Chin. Phys. B* **23** 018504
- [19] Yu X X, Zhou Y, Liu J, Jin H B, Fang X Y, Cao M S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 127307
- [20] Akinaga H, Mizuguchi M, Ono K, Oshima M 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2600
- [21] Shon Y, Yuldashev S U, Fan X J, Fu D J, Kwon Y H, Hong C Y, Kang T W 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 3082
- [22] Viana E R, Ribeiro G M, Oliveira A G, Peres M L, Rubinger R M, Rubinger C P L 2012 *Mater. Res.* **15** 530

# Electronic transportation properties and magnetoresistance effects on single TiO<sub>2</sub> nanowire under ultraviolet irradiation\*

Sun Zhi-Gang<sup>1)†</sup> Pang Yu-Yu<sup>1)</sup> Hu Jing-Hua<sup>2)</sup> He Xiong<sup>1)</sup> Li Yue-Chou<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

2) (School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

( Received 7 December 2015; revised manuscript received 15 February 2016 )

## Abstract

The polycrystalline anatase TiO<sub>2</sub> nanowires with a diameter of about 300 nm are successfully prepared by the sol-gel method together with electrospinning method under a heat treatment at 500 °C. The effect of illumination on electronic transport property and magnetoresistance (*MR*) effect are studied via voltage-current (*V-I*) curves measured at room temperature in the cases of the dark and the ultraviolet irradiation. The results show that the *V-I* plots are straight lines without passing through zero point and the resistance of the nanowire is as high as  $7.5 \times 10^{11} \Omega$  in the dark. The resistance decreases gradually with the magnetic field increasing and after reaching a minimum  $4.7 \times 10^{11} \Omega$  at  $B = 0.7$  T it turns to increase rapidly, but is still smaller than the resistance without magnetic field, indicating a negative *MR* effect. With the increase of the magnetic field, the negative *MR* effect increases and then decreases, and the negative *MR* achieves a maximum value of  $-37.5\%$  under  $B = 0.7$  T. Interestingly, the resistance of nanowires in the ultraviolet irradiation is reduced by about 10 times compared with that in the dark without applying a magnetic field. As the magnetic field increases, the resistance increases monotonically, presenting a positive *MR* effect. The *MR* increases rapidly with the increase of magnetic field, and reaches the maximum positive *MR* effect 620% under  $B = 1.0$  T. At room temperature only a few carriers are generated by the thermal excitation in the TiO<sub>2</sub> nanowires, which leads to a large resistance in the dark situation. In the ultraviolet irradiation case, the carrier concentration of the nanowires increases because of the generation of a large number of electron-hole pairs, resulting in huge decrease of resistance compared with in the dark. We attribute the change of the *MR* to the competition between two *MR* mechanisms: negative *MR* effect due to the localization of d electron and positive *MR* effect due to spin splitting of the conduction band. In the dark, due to the low carrier concentration, the negative *MR* mechanism caused by the localization of d electron is dominant under the magnetic field. However, in the ultraviolet irradiation, because carrier concentration increases hugely due to the irradiation, the positive *MR* mechanism caused by spin splitting of the conduction band is dominant. The fact that the *V-I* curves does not pass through zero point implies that the contact between TiO<sub>2</sub> nanowire and Pt metal is Schottky contact due to the difference in work function. In the dark, the initial voltage first increases with the increase of magnetic field, and then remains steady. In the ultraviolet irradiation the initial voltage is smaller than in the dark and increases monotonically with the magnetic field increasing. In this paper, the physical mechanism of the electrical transport property and *MR* effect of TiO<sub>2</sub> nanowire are discussed, which may provide a meaningful exploration for developing the new electronic device based on the oxide nanowires.

**Keywords:** TiO<sub>2</sub> nanowires, electrospinning, property of electronic transport, magnetoresistance effect

**PACS:** 73.43.Qt, 73.63.-b, 81.07.Gf

**DOI:** 10.7498/aps.65.097301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574243, 11174231), and the State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing (Wuhan University of Technology), China (Grant No. 2016-KF-13).

† Corresponding author. E-mail: sun\_zg@whut.edu.cn