

文章编号: 1000-7032(2018)06-0784-06

# Na 或 Cu 掺杂对 Si/NiO 异质结的光电性能影响

李 彤<sup>1\*</sup>, 王铁钢<sup>2</sup>, 范其香<sup>2</sup>, 刘真真<sup>1</sup>, 王雅欣<sup>1</sup>, 赵新为<sup>3</sup>

(1. 天津职业技术师范大学 电子工程学院, 天津 300222;

2. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222; 3. 东京理科大学 物理系, 日本)

**摘要:** 利用磁控溅射方法制备了引入 Na 或 Cu 元素前后 Si/NiO 异质结。实验结果表明, Na 元素引入后的 Si/NiO: Na 异质结的整流特性最佳。此时, Si/NiO: Na 异质结光学透过率可以达到 70%, 这可能是由于 Si/NiO: Na 异质结的结晶质量较优、薄膜内缺陷少所致。Si/NiO: Na 异质结 *I-V* 曲线的拟合结果显示界面态也会影响其整流特性。而 Si/NiO 和 Si/NiO: Cu 异质结都没能获得较好的整流特性, 可能是薄膜内缺陷增多所致。这一结论得到了 XRD、SEM、AFM 和 UV 结果的支持。

**关键词:** NiO; Na 掺杂; Cu 掺杂; 异质结; 整流特性

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183906.0784

## Optical and Electrical Properties of Si/NiO Heterojunctions with and Without Na or Cu Doping

LI Tong<sup>1\*</sup>, WANG Tie-gang<sup>2</sup>, FAN Qi-xiang<sup>2</sup>, LIU Zhen-zhen<sup>1</sup>, WANG Ya-xin<sup>1</sup>, ZHAO Xin-wei<sup>3</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

3. Department of Physics, Tokyo University of Science, Japan)

\* Corresponding Author, E-mail: 59815668@qq.com

**Abstract:** The Si/NiO heterojunctions with and without Na or Cu doping were prepared by the magnetron sputtering method. The best rectifying characteristics appears in the Si/NiO: Na heterojunction, where the average optical transmittance can reach to 70% in the visible range, which may be explained by the reduced defects due to the improved crystallization. The fitted *I-V* curve of Si/NiO: Na heterojunction indicates that the interface state also affects the rectifying property. Good rectifying property hasn't been observed in Si/NiO and Si/NiO: Cu heterojunctions because of the appearance of more defects. These results are also evidenced by XRD, SEM, AFM and UV results.

**Key words:** NiO; Na doping; Cu doping; heterojunctions; rectifying property

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51301181, 51501130); 天津市高等学校创新团队培养计划(TD12-5043); 天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(15JCZDJC39700); 天津职业技术师范大学人才计划资助项目(RC14-53, RC14-54); 天津市科技特派员项目(16JCTPJC49500); 天津市科委科技发展战略项目(15JCYBJC52200)资助

Supported by National Science Foundation of China(51301181, 51501130); Innovation Team Training Program of Tianjin University(TD12-5043); Application Foundation and Frontier Technology Research Program of Tianjin(15JCZDJC39700); Talent Program of Tianjin University of Technology and Education(RC14-53, RC14-54); Tianjin Science and Technology Special Project(16JCTPJC49500); Strategic Project of Science and Technology Development of Tianjin(15JCYBJC52200)

## 1 引 言

NiO 是一种室温下宽禁带(禁带宽度约为 3.0~4.0 eV)p 型半导体材料。NiO 独特的电子结构导致其呈现多种特殊性能,这也使得它可以应用到很多领域,如应用到紫外探测器、透明导电材料、气敏传感器等<sup>[1-5]</sup>。然而,一直到现在,针对 NiO 的光电特性研究报道甚少<sup>[6-7]</sup>。研究半导体薄膜材料的光电性能通常会采用异质结形式。因为光照在异质结上会产生光生电荷,测试该电荷变化可以反映出半导体材料本身的光电性能本质。目前,为了揭示 NiO 的光电特性,相关文献主要报道的是 ZnO/NiO 异质结<sup>[8-21]</sup>。本文中构成异质结的 n 型半导体采用的是 Si,即将 NiO 直接沉积在 n 型 Si 衬底上。经过前期研究,我们发现退火温度对 Si/NiO 的光电特性有很大影响<sup>[22]</sup>。在高温退火下缺陷减少的 Si/NiO 异质结呈现优异的光电特性,但是高温不利于将它与其他器件集成。接下来,人们发现将 Li 引入 NiO 可以改善它的电学特性<sup>[5]</sup>。在这篇文献的提示下,鉴于 Na 和 Li 元素在周期表内属于同一族,在此引入价格低廉的 Na 元素,制备了 Si/NiO: Na 异质结,期待提高该异质结的光电性能。与此同时,也有文献报道了将 Cu 引入 NiO 后的 NiO: Cu 相对于 NiO 电学特性也有所提高<sup>[23-24]</sup>,所以本文在保证其他制备条件不变的前提下,分别制备了 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结,并对比这 3 种异质结的结构、光学和电学特性。通过将 Na 和 Cu 元素引入到 Si/NiO 异质结,探索 NiO 的光电特性,这对于新型器件的开发有着重要意义。

## 2 实 验

### 2.1 材料制备与表征

采用的靶材是通过高温烧结后获得的高纯 NiO(99.99%)、高纯 NiO: Na<sub>2</sub>O(99.99%) 和高纯 NiO: CuO(99.99%) 固体陶瓷靶。本实验中,我们使用射频磁控溅射仪分别在高阻 n 型 Si 衬底上沉积 NiO、NiO: Na 和 NiO: Cu 薄膜。当背底真空抽到低至  $2 \times 10^{-4}$  Pa 时,充入两种纯度为 99.99% 的高纯氩气和高纯氧气。充入的氩气和氧气在真空腔里,并控制  $O_2/(Ar + O_2)$  比例始终保持在 60%。分别溅射 NiO、NiO: Na 和 NiO: Cu 薄膜时,功率一

直保持在 150 W,工作气压为 2 Pa,衬底温度均设定在 300 °C,沉积时间为 40 min。

取出样品并对其测量,X 射线衍射(XRD)测量是在 philips xpert pro mpd 粉末衍射仪上进行,采用 Cu 靶(45 kV,40 mA)测试;KEITHLEY2620-SCS 半导体测试仪测试电学特性,SUPRA40 型场发射扫描电子显微镜分析表面形貌和成分,SPA400 型原子力显微镜分析表面形貌,UV-1700 分光光度计测试透过率。所有测量均在室温下进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 XRD 结果分析

图 1 比较了引入 Na 和 Cu 元素前后,Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 EDS 谱,插图为这 3 种异质结的结构示意图。从图 1 可以看出,相较于没有掺杂的 Si/NiO 异质结 EDS 谱,Si/NiO: Na 异质结在入射能量为 1.05 keV 出现了一个明显的能谱峰,Si/NiO: Cu 异质结在入射能量为 1.03 keV 处出现了一个明显的能谱峰,经过跟相应的标准峰对比,这两个峰分别对应于 Na 元素和 Cu 元素,说明 Na 和 Cu 元素已经分别成功引入 Si/NiO 异质结中。图 2 分别给出了 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 XRD 衍射谱。可以看出,在整个衍射角范围内,Si/NiO 异质结只在  $36^\circ \sim 37^\circ$  之间出现一个衍射峰,经过跟标准峰比对,该峰为 NiO 的 (111) 衍射峰,暗示此时制备的 NiO 呈现典型的 NaCl 结构。Si/NiO: Na 异质结也只在  $36^\circ \sim 37^\circ$  之间出现了衍射峰,对应于 (111) 衍射峰,说明 Na 引入 NiO 后的 NiO: Na 薄膜仍保持着 NaCl 结构

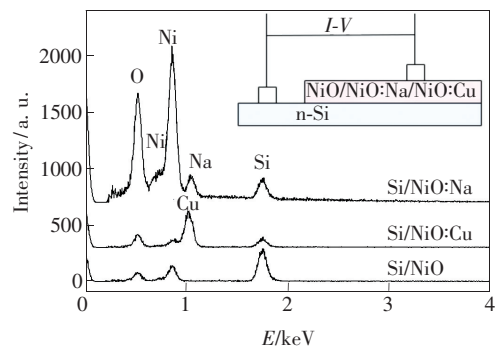


图1 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 EDS 谱,插图为异质结的结构。

Fig. 1 EDS spectra of Si/NiO, Si/NiO: Na and Si/NiO: Cu heterojunctions, respectively. Inset illustrates the schematic configuration of the heterojunctions.

生长。但是二者的(111)衍射峰经过放大发现, NiO: Na(111)衍射峰相较于 NiO(111)衍射峰左移。这暗示 NiO: Na 薄膜的  $c$  轴晶面间距增大, 接近压应力。这可能是因为制备纯 NiO 薄膜是非配比的, 当引入 Na 元素, Na 替代镍离子或进入间隙空位。对于 Si/NiO: Cu 异质结, 也在  $36^\circ \sim 37^\circ$  之间出现了衍射峰, 但该衍射峰相对较弱, 并且相较于 NiO 的(111)衍射峰呈现右移。与 Si/NiO: Na 异质结呈现的现象相反, 这暗示  $c$  轴晶面间距减小, 接近拉应力。同时在  $43^\circ$  位置也出现一个衍射峰, 该衍射峰对应于(200)取向。该现象说明 Si/NiO: Cu 异质结的生长为明显多晶状态, 沿

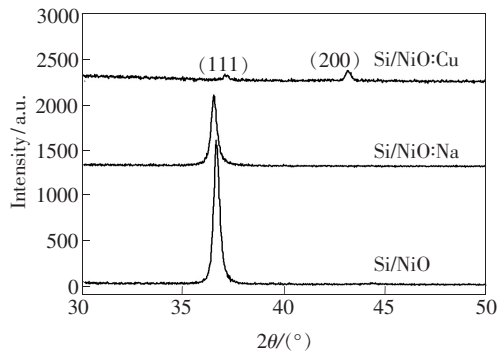


图 2 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 XRD 谱。

Fig. 2 XRD patterns of Si/NiO, Si/NiO: Na and Si/NiO: Cu heterojunctions, respectively.

着(200)和(111)两个取向生长。总的来看, 无论 Na 掺杂还是 Cu 掺杂的 NiO 薄膜, 都没有杂质峰出现, 而且一直保持着 NiO 结构。

### 3.2 表面形貌表征

图 3 比较了 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的表面形貌。图 3(a)、(b)和(c)分别为样品 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 SEM 图。与此同时, 我们还针对这 3 个异质结进行了 AFM 测试。图 3(d)、(e)和(f)分别为样品 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的 AFM 图。结果显示, Si/NiO 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的表面形貌比较相似, 但是与 Si/NiO: Na 异质结的表面有很大差异。Si/NiO 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结表面形貌相对均匀。而引入 Na 元素后的 Si/NiO: Na 异质结的表面形貌图却可以看出明显的颗粒。采用 EDS 对图 3(b)块状以及其旁边进行微区测量, 结果显示: 块状区域以及其旁边区域均含有 Ni、O、Na 元素, 但是块状物质中含有的 Na 元素相对于周边区域含量较多, 即更多的 Na 元素集中在块状物质中。从图 3(d)、(e)和(f)可以更清楚地看出 Si/NiO: Na 异质结的结晶状态更好, 而 Si/NiO: Cu 异质结结晶状态稍差, 这与图 2 所呈现的 XRD 结果相一致。

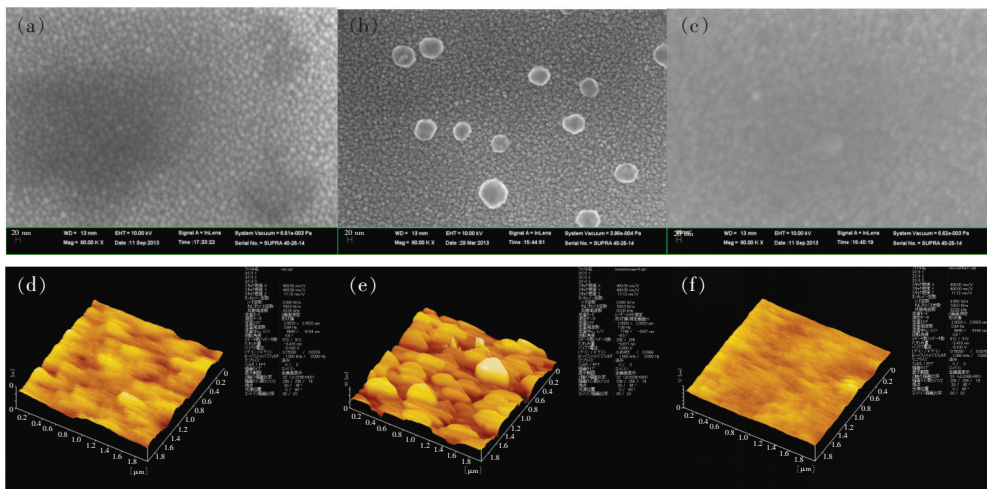


图 3 Si/NiO 异质结(a)、Si/NiO: Na 异质结(b)和 Si/NiO: Cu 异质结(c)的 SEM 图像, 以及 Si/NiO 异质结(d)、Si/NiO: Na 异质结(e)和 Si/NiO: Cu 异质结(f)的 AFM 图像。

Fig. 3 SEM images of Si/NiO(a), Si/NiO: Na(b) and Si/NiO: Cu(c) heterojunctions, and AFM images of Si/NiO(d), Si/NiO: Na(e) and Si/NiO: Cu(f) heterojunctions, respectively.

### 3.3 光学特性分析

图 4 给出了使用 UV-1700 测得的 NiO、NiO:

Na 和 NiO: Cu 单层薄膜的紫外透射谱。结果发现在可见光波段内, NiO: Cu 薄膜的光学透过率只有

60%, NiO 和 NiO: Na 薄膜的光学透过率可以达到 70%。NiO: Cu 薄膜衍射峰较弱, 对应的光学透过率也相对较低。此外, 还发现相较于 NiO 曲线, Na 以及 Cu 元素引入后的 NiO: Na 薄膜和 NiO: Cu 薄膜光透过曲线均呈现左移。利用光学带隙与吸收系数的理论关系式  $\alpha h\nu \propto (h\nu - E_g)^{1/2}$ , 通过做  $\alpha^2-h\nu$  关系曲线并外推曲线的线性部分, 得到 NiO、NiO: Na 和 NiO: Cu 薄膜的光学带隙<sup>[25]</sup>。经过计算, NiO、NiO: Na 和 NiO: Cu 薄膜的光学禁带宽度分别为 3.86, 4.21, 4.13 eV。可以看出, 相较于 NiO 薄膜, 随着 Na 和 Cu 元素的引入, NiO: Na 和 NiO: Cu 薄膜的光学禁带宽度均有所增加。这可能是因为随着 Na 和 Cu 元素的引入, 薄膜整体缺陷增多, 量子约束效应导致薄膜禁带宽度增大<sup>[26-27]</sup>。这一结果也得到了 XRD 图谱的支持。

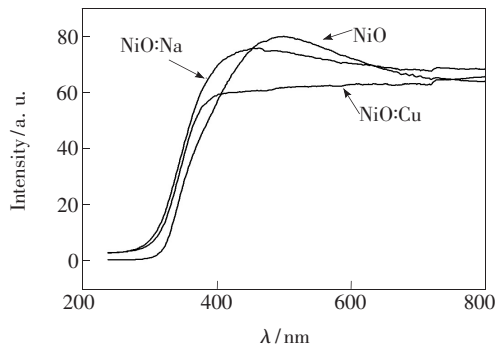


图 4 Si/NiO 异质结、Si/NiO: Na 异质结和 Si/NiO: Cu 异质结的紫外透射谱。

Fig. 4 UV transmittance spectra of Si/NiO, Si/NiO: Na and Si/NiO: Cu heterojunctions, respectively.

### 3.4 电学特性分析

图 5 比较了 Si/NiO、NiO: Na 和 NiO: Cu 异质结的  $I-V$  曲线, 插图为 Si/NiO 和 NiO: Cu 异质结的完整  $I-V$  曲线图。从插图可以看出, 没有引入 Na 或 Cu 元素前, Si/NiO 异质结  $I-V$  曲线没有呈现明显的整流特性, 随着电压的增加, 电流缓慢增加。同时, 在增加反向电压时, 电流也随着反向电压的增加而缓慢增加。对于 Cu 掺杂的 Si/NiO: Cu 异质结,  $I-V$  曲线显示了与 Si/NiO 异质结相似的电学现象, 也没有呈现明显的整流特性。而当引入 Na 元素后, Si/NiO: Na 异质结  $I-V$  曲线却呈现显著的整流特性。在以前的工作中, 我们发现室温制备的 Si/NiO 异质结不呈现整流特性。退火温度升到 600 °C 后, Si/NiO 异质结可以呈现很好的整流特性。这可能是因为高温退火后, 样品结

晶转好, 缺陷减少, 从而改善了样品的整流特性。本文中, 衬底温度 300 °C 制备的 Si/NiO: Cu 异质结衍射峰较弱, 说明此时获得的薄膜缺陷较多, 所以没有呈现优异的整流特性。而图 2 和图 3 都显示 Si/NiO: Na 异质结呈现较好的结晶状态, 缺陷较少, 这也使 300 °C 制备的 Si/NiO: Na 异质结呈现优异的电学特性。从图 5 还可以得知, 当正负偏压分别为 7 V 和 -7 V 时, Si/NiO: Na 异质结的整流比(正向电流/反向电流)分别为 233。当加 -7 V 时, 负向电流可以低至  $-4.441738E-5$  A, 开启电压也可达到 4 V。与此同时, 还可以看出制备的异质结还是和理想异质结偏离很大, 必须考虑许多其他因素。根据半导体器件物理得知, 界面态状态和串联电阻也会影响理想 pn 结直流电流-电压特性<sup>[28]</sup>。所以针对图 5 中 Si/NiO: Na 异质结  $I-V$  曲线, 我们利用公式  $I = I_s \exp(q(V - IR)/nk_0T)$  ( $n$  反映了界面态状态,  $R$

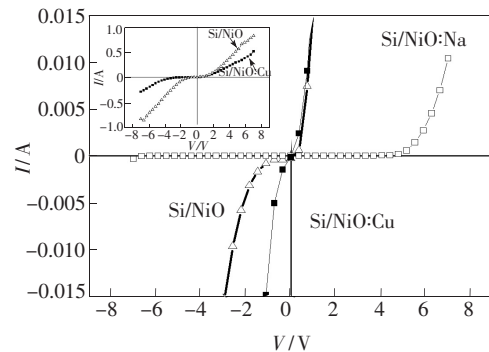


图 5 Si/NiO、Si/NiO: Na 和 Si/NiO: Cu 异质结  $I-V$  曲线, 插图为 Si/NiO 和 NiO: Cu 异质结的完整  $I-V$  曲线。

Fig. 5  $I-V$  curves of Si/NiO, Si/NiO: Na and Si/NiO: Cu heterojunctions, respectively. Inset illustrates the complete  $I-V$  curves of Si/NiO and Si/NiO: Cu heterojunctions.

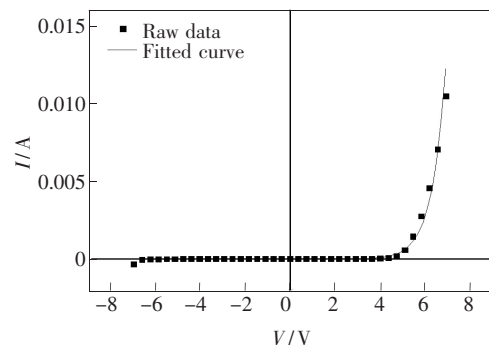


图 6 Si/NiO: Na 异质结的  $I-V$  原始曲线和拟合曲线

Fig. 6 Raw data and fitted  $I-V$  curve of Si/NiO: Na heterojunction

反映了串联电阻状态)进行拟合,拟合曲线见图6。拟合出来的饱和电流  $I_s$  为  $1.6 \times 10^{-7}$  A,理想因子  $n$  为 24,串联电阻为 55  $\Omega$ 。可以看出,理想因子可以反映界面态状态,而拟合的理想因子值( $n=24$ )远高于理想值 1,说明接下来我们还要继续研究改善界面结构,进而才能提高器件性能。

#### 4 结 论

利用磁控溅射方法制备了 Si/NiO、Si/NiO: Na 和 Si/NiO: Cu 异质结。EDS 谱显示 Na 或 Cu 元素已经成功进入到 Si/NiO 异质结中。XRD 结果显示 Si/NiO、Si/NiO: Cu 和 NiO: Na 异质结没有杂质

峰。其中 Si/NiO: Cu 异质结衍射峰较弱,呈现典型多晶状态,而 Si/NiO 和 Si/NiO: Na 只沿着(111)择优取向生长。SEM 和 AFM 图都显示 Si/NiO: Na 异质结呈明显的结晶状态。此外,UV-1700 结果也支持上述测试结果,结晶较差的 NiO: Cu 薄膜的光学透过率能够达到60%,而 NiO: Na 的透过率却可以达到约70%。电学性能显示 Si/NiO: Cu 异质结和 Si/NiO 异质结没有呈现明显的整流特性。但是引入 Na 元素后,Si/NiO: Na 异质结  $I$ - $V$  曲线却呈现显著的整流特性。综合 XRD、SEM、AFM 和 UV 测试结果,好的结晶状态会减少缺陷,进而促进整流特性。而 Si/NiO: Na 异质结的  $I$ - $V$  曲线拟合结果显示界面态状态也会影响到电学特性。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] FUJII E, TOMOZAWA A, TORII H, *et al.*. Preferred orientations of NiO films prepared by plasma-enhanced metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35(3):328-330.
- [ 2 ] SATO H. Transparent conducting p-type NiO thin films prepared by magnetron sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 1993, 236(1):27-31.
- [ 3 ] KITAO M, IZAWA K, URABE K, *et al.*. Preparation and electrochromic properties of RF-sputtered NiO<sub>x</sub> films prepared in Ar/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> atmosphere [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 33(12A):6656-6662.
- [ 4 ] YANG Q, SHA J, MA X Y, *et al.*. Synthesis of NiO nanowires by a sol-gel process [J]. *Mater. Lett.*, 2005, 59(14):1967-1970.
- [ 5 ] PUSPHARAJAH P, RADHAKRISHNA S, AROF A K. Transparent conducting lithium-doped nickel oxide thin films by spray pyrolysis technique [J]. *J. Mater. Sci.*, 1997, 32(11):3001-3006.
- [ 6 ] KARPINSKI A, OULDHAMADOUCHE N, FERREC A, *et al.*. Optical characterization of transparent nickel oxide films deposited by DC current reactive sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(17):5767-5770.
- [ 7 ] LI C H, FENG C H, QU F D, *et al.*. Electrospun nanofibers of p-type NiO/n-type ZnO heterojunction with different NiO content and its influence on trimethylamine sensing properties [J]. *Sens. Actuators B*, 2015, 207(207):90-96.
- [ 8 ] HAO L, AI L, LI S Z, *et al.*. Photosensitive and temperature-dependent  $I$ - $V$  characteristics of p-NiO film/n-ZnO nanorod array heterojunction diode [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2014, 184(1):44-48.
- [ 9 ] ZHAO Y, WANG H, WU C. Study on the electroluminescence properties of diodes based on n-ZnO/p-NiO/p-Si heterojunction [J]. *Opt. Commun.*, 2015, 336:1-4.
- [ 10 ] TSAI S Y, HON M H, LU Y M. Fabrication of transparent p-NiO/n-ZnO heterojunction devices for ultraviolet photodetectors [J]. *Solid-State Electron.*, 2011, 63(1):37-41.
- [ 11 ] IMEN S, MOHAMED J, MASSOUD H, *et al.*. Fabrication and characterization of NiO/ZnO p-n junctions by sol-gel spin coating technique [C]. *First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, Hammamet, Tunisia*, 2012:113-115.
- [ 12 ] STEIRERK X, OU K L, ARMSTRONG N R, *et al.*. Critical interface states controlling rectification of ultrathin NiO-ZnO pn heterojunctions [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(36):31111-31118.
- [ 13 ] PATEL M, KIM H S, KIM J, *et al.*. Excitonic metal oxide heterojunction (NiO/ZnO) solar cells for all-transparent module integration [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2017, 170:246-253.
- [ 14 ] ECHRESH A, ABBASI M A, SHOUSHARI M Z, *et al.*. Optimization and characterization of NiO thin film and the influence of thickness on the electrical properties of n-ZnO nanorods/p-NiO heterojunction [J]. *Semicond. Sci. Technol.*,

2014, 29(11):115009-1-6.

- [15] TIAN F S, LIU Y L. Synthesis of p-type NiO/n-type ZnO heterostructure and its enhanced photocatalytic activity [J]. *Scripta Materialia*, 2013, 69(5):417-419.
- [16] LEE Y M, YANG H W, HUANG C M. Effect of rapid thermal annealing on the structural and electrical properties of solid ZnO/NiO heterojunctions prepared by a chemical solution process [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, 45(22):225302-1-7.
- [17] LE T H, TIEN H N, HUR S H. A highly sensitive UV sensor composed of 2D NiO nanosheets and 1D ZnO nanorods fabricated by a hydrothermal process [J]. *Sens. Actuators A*, 2014, 207(1):20-24.
- [18] LIU Y L, LI G Z, MI R D. An environment-benign method for the synthesis of p-NiO/n-ZnO heterostructure with excellent performance for gas sensing and photocatalysis [J]. *Sens. Actuators B*, 2014, 191:537-544.
- [19] LI T, JIE Q, NI X C, *et al.*. Fabrication and characterization of NiO: Na/ZnO pn junction by magnetron sputtering technique [J]. *Mater. Res. Innov.*, 2015, 18(s4):680-683.
- [20] 李彤, 王铁钢, 陈佳桐, 等. 氧气含量对 NiO: Cu/ZnO 异质 pn 结的光电性能影响 [J]. *发光学报*, 2016, 37(4):416-421.  
LI T, WANG T G, CHEN J M, *et al.*. The influence of oxygen concentration on the optical and electrical properties of NiO: Cu/ZnO pn heterojunctions [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(4):416-421. (in Chinese)
- [21] 王海青, 李秀艳, 苑再武, 等. p-n 异质结 NiO/TiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的构建及应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2017, S1(31):30-33.  
WANG H Q, LI X Y, YUAN Z W, *et al.*. Progress on fabrication and application of NiO/TiO<sub>2</sub> nanocomposites with p-n heterostructures [J]. *Mater. Rev.*, 2017, S1(31):30-33. (in Chinese)
- [22] 李彤, 介琼, 王雅欣, 等. 退火温度对 Si/NiO 的光电特性有很大影响 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(1):42-45.  
LI T, JIE Q, WANG Y X, *et al.*. Optical and electrical properties of Si/NiO pn heterojunction [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2014, 25(1):42-45. (in Chinese)
- [23] REDDY Y A K, REDDY A S, REDDY P S. Influence of oxygen partial pressure on the structural, optical and electrical properties of Cu-doped NiO thin films [J]. *Phys. Script.*, 2013, 87(73):158-163.
- [24] REDDY Y A K, REDDY A S, REDDY P S, *et al.*. Copper nitride films deposited by DC reactive magnetron sputtering [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2007, 18(10):1003-1008.
- [25] 杨治国. NiO/ZnO 基半导体异质结及 MgNiO 固溶体薄膜的制备与性能研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2011.  
YANG Z G. *Investigation on The Preparation and Properties of NiO/ZnO Based Heterojunction and MgNiO Solid Solution Thin Films* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [26] JANG W L, LU Y M, HWANG W S, *et al.*. Point defects in sputtered NiO films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(6):062103-1-3.
- [27] YANG J L, LAI Y S H. Effect of heat treatment on the properties of non-stoichiometric p-type nickel oxide films deposited by reactive sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 488(1-2):242-246.
- [28] 刘树林. 半导体器件物理 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005.  
LIU S L. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)



李彤(1977-),女,辽宁丹东人,博士,副教授,2007年于北京工业大学获得博士学位,主要从事功能材料与器件方面的研究。

E-mail: 59815668@qq.com