

## 单根In掺杂ZnO纳米带场效应管的电学性质\*

唐欣月 高红† 潘思明 孙鉴波 姚秀伟 张喜田‡

(光电带隙材料省部共建教育部重点实验室, 哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

(2014年3月27日收到; 2014年5月24日收到修改稿)

采用化学气相沉积法合成了In掺杂ZnO纳米带, 并对其进行了X射线衍射、光致发光及透射电镜表征. 基于单根纳米带, 采用廉价微栅模板法制备了背栅场效应管, 利用半导体参数测试仪测量了场效应管的输出( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )和转移( $I_{ds}$ - $V_{gs}$ )特性, 得出相关电学参数, 其中迁移率值为 $622 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 该值明显优于包括ZnO在内的大多数材料; 讨论了迁移率提高的可能原因.

关键词: ZnO, 纳米带, 场效应管, 迁移率

PACS: 73.63.Nm, 81.05.Dz, 81.15.Gh

DOI: 10.7498/aps.63.197302

## 1 引言

由于In掺杂ZnO(ZnO:In)材料具有较高的电导率<sup>[1]</sup>、优良的光电性质<sup>[2,3]</sup>, In已经成为拓展ZnO应用领域的有效可行的掺杂元素之一<sup>[4]</sup>. 对低维体系电子输运性质的关心和对缩小器件尺寸的需求, 使得人们关注于一维ZnO:In纳米材料的电学性质研究. 迄今为止, 针对ZnO:In纳米线或纳米带的物理性质研究非常广泛, 例如不同掺杂浓度的ZnO:In纳米带的输运性质<sup>[5]</sup>、针对光电应用的ZnO:In电导率优化<sup>[6]</sup>和ZnO:In纳米线的气敏性质<sup>[7]</sup>等等.

作为重要的基础电子元件之一, 场效应管(FET)早已见报道; 而其中针对ZnO纳米线、带或薄膜FET的报道日渐增多. Maeng等研究了激光退火引起的ZnO纳米线FET的阈值电压向负栅压方向偏移<sup>[8]</sup>. Cha研究小组报道了显著增强ZnO纳米线FET性能的方法<sup>[9]</sup>. Arnold等制作了基于厚度在10到30 nm之间的单根ZnO纳米带FET, 并测量了相应器件的性质<sup>[10]</sup>. Kim等研究了In掺杂对ZnO薄膜的影响<sup>[11]</sup>. 从以上这些报道还能够

看出, 纳米带或纳米线的迁移率高于薄膜, 其原因可能是在材料制备过程中, 薄膜易形成非晶体, 且薄膜接触面积相对较大, 杂质散射程度相对较高. 而迁移率是FET器件性能的重要衡量参数; 由此推断, 纳米带是制作FET器件的优良材料. 目前, 单根ZnO:In纳米带FET还未见报道. 此外, 大量关于器件制作的报道中, 都采用电子束蒸发、光刻等方式制作电极<sup>[12,13]</sup>, 成本昂贵且难以应用于大规模生产. 这样, 廉价微栅模板法的优势就显现出来了.

本文中, ZnO:In纳米带采用化学气相沉积(CVD)方法合成, 利用廉价的微栅模板法和热蒸发蒸镀电极, 制作出单根ZnO:In纳米带FET器件. 测量了FET的基本电学性质, 并据此得出相关器件参数; 其迁移率至高于ZnO纳米带FET, 并分析了可能影响因素.

## 2 实验

采用CVD法合成ZnO:In纳米带. 1.0 g ZnO和0.15 g In粉末作为前驱物置于40 cm长的刚玉舟前端, 在Si基底表面镀上2 nm厚的金颗粒作为

\* 国家自然科学基金(批准号: 11074060, 51172058)、黑龙江省教育厅科学技术重点研究项目(批准号: 12521z012)和黑龙江省研究生创新科研项目(2013)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gaohong65cn@126.com

‡ 通讯作者. E-mail: xtzhangzhang@hotmail.com

催化剂, 并将其置于舟下游部位, 后将刚玉舟放入高温管式炉中. 将管式炉加热至 1350 °C 恒温 20 min, 后停止加热. 其间持续通入高纯氮气并保持流量为 100 sccm, 炉内压强维持在 500 Pa. 待管式炉自然冷却至室温后取出刚玉舟, 在基底上生长的一层白色絮状物为合成样品.

利用微栅模板法制作单根纳米带 FET 器件. 选用表面有 300 nm SiO<sub>2</sub> 栅介电层的 p 型 Si 片作为衬底, 先用稀释过的氢氟酸腐蚀掉衬底背面的氧化物<sup>[14]</sup>, 然后用模板通过静电作用将单根纳米带从生长基底吸附到 Si 衬底上. 采用真空镀膜方法在衬底背面沉积上背栅电极<sup>[15-17]</sup>, 再用相同方法, 在纳米带两端沉积上相距 20 μm 的源漏电极; 电极由 80 nm Ti 金属层和 100 nm Au 金属层组成<sup>[18,19]</sup>. 撤去微栅, 450 °C 退火 5 min (高纯氮环境). 实验结果显示, 退火有效地改善了器件的电极接触. 用 Ag 丝作引线进行电学性质测量. 这样, 如图 1 所示的基于单根 ZnO:In 纳米带 FET 制作完成.

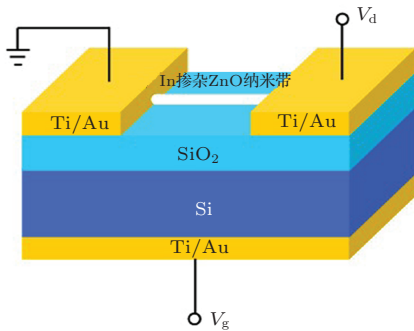


图1 单根 ZnO:In 纳米带 FET 器件结构示意图

利用扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi, S-4800, Japan) 观察样品形貌及器件显微结构图. 单根纳米带的微观结构和化学组分由带有 X 射线能谱仪 (EDX) 的高分辨透射电子显微镜 (HRTEM, Tecnai, TF20, FEI, 200 kV) 表征. 样品晶体结构由 X 射线衍射 (XRD, D/max 2600/PC) 测定. 用 325 nm He-Cd 激光为激发光源的微区拉曼系统 (JY-HR 800, France) 记录 ZnO:In 纳米带的发光 (PL) 谱. FET 的室温电学特性由半导体参数测试仪 (Agilent B1500A) 测量.

### 3 实验结果与讨论

图 2 为合成样品的 SEM 图像, 据此估算纳米带宽度为 100—200 nm, 厚度约为 20 nm. FET 器件制作成功后, 对跨 Ti/Au 电极的单根纳米带进行 SEM 表征, 如图 2 中插图所示. 纳米带宽度约为 120 nm, 有效沟道长度 20 μm.

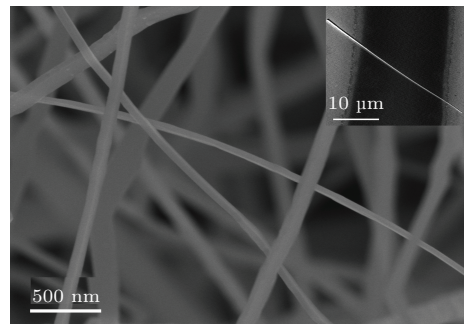


图2 ZnO:In 纳米带 SEM 图 (插图为跨 Ti/Au 电极的单根 ZnO:In 纳米带)

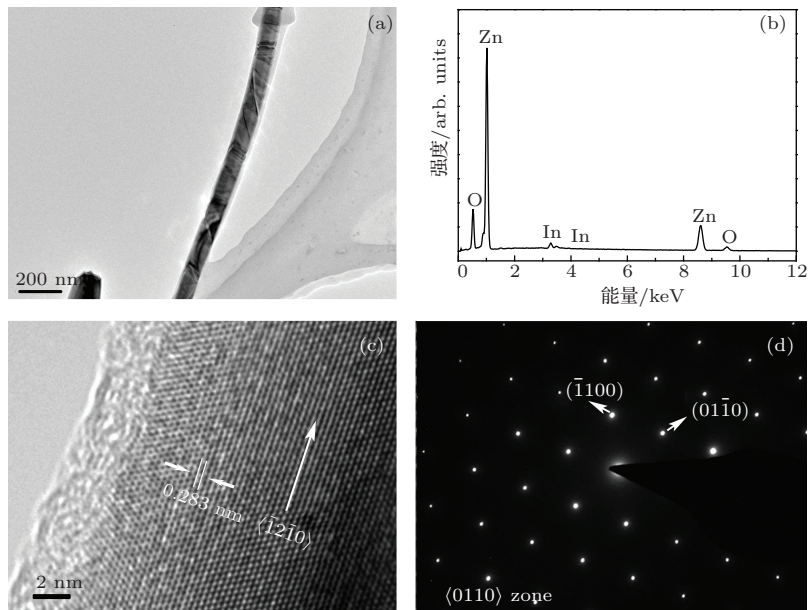


图3 (a) 单根 ZnO:In 纳米带的低倍 TEM 图; (b) ZnO:In 纳米带的 EDX 谱; (c) 纳米带的 HRTEM 晶格图像; (d) 对应的 SAED 图

为详细表征形貌和组分, 图3所示为纳米带的透射电镜(TEM)图像. 图3(a)中单根纳米带低倍TEM图像给出纳米带的宽度约为100 nm. 图3(b)中EDX分析结果显示只有In, Zn, O三种元素; 其中In的原子比为1.5%. 图3(c)中HRTEM图像显示纳米带原子排布整齐, 少有晶格畸变. 根据测量结果可以得到(10 $\bar{1}$ 0)面间的间距是0.283 nm, 与本征ZnO相比略有增大. 与图3(d)中的选区电子衍射(SAED)图综合分析得到, 纳米带沿[1 $\bar{2}$ 10]方向生长. 通常一维ZnO纳米材料沿[0001]方向生长, 形成纳米线. In的加入可以改变一维纳米材料各晶面的表面能, 从而改变了晶体固有的生长习性, 使其沿着[10 $\bar{1}$ 0]方向形成纳米带[20].

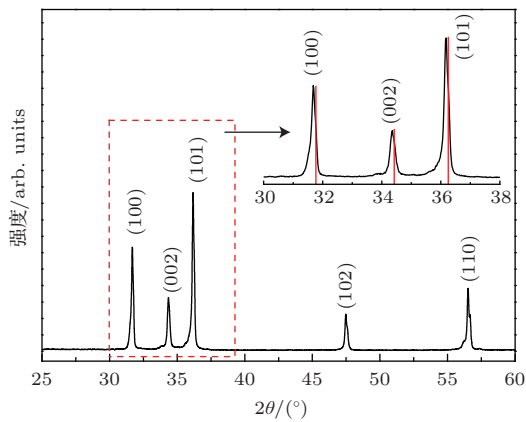


图4 ZnO:In纳米带的XRD图(插图为样品三强峰与ZnO对比)

图4中XRD图谱显示样品结构与ZnO六角纤锌矿结构对应[21], 并且没有检测到Zn单质或其他杂质峰. 插图中红线为同台仪器针对本征ZnO材料的测试谱线, 两者三强峰对比可以看出In掺杂后, 主要衍射峰向小角度方向有所偏移, 说明样品中半径较大的In<sup>3+</sup>离子代替Zn<sup>2+</sup>离子, 造成晶面间距有所增大. 该结果与TEM结果相互印证, 说明In成功地掺入ZnO中.

图5所示为室温下测得的ZnO:In纳米带的光致发光谱. 图谱显示, 除380 nm附近的近带边紫外发光峰外, 还存在与样品中氧空位有关[22,23]的相对弱的可见发光峰(550 nm附近). 两峰的比值说明样品结晶质量良好.

将FET器件置于室温暗环境下, 测量其输出、转移特性曲线. 图6(a)为不同栅压( $V_{gs}$ )下, 源漏电流与电压之间( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )的关系. 这些曲线呈线性且对称, 说明ZnO:In纳米带与电极之间保持着良好的欧姆接触. 此外还可以看出, 当 $V_{gs}$ 正向(负向)增加,  $I_{ds}$ 随之增加(减小); 这与典型的n型半

导体FET输出特性一致[23]. 在不同 $V_{ds}$ 下测量的 $I_{ds}$ - $V_{gs}$ 曲线, 如图6(b)所示, 表明器件为n沟道耗尽型FET.

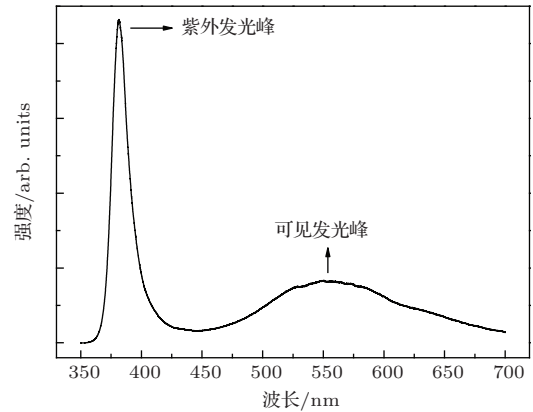


图5 室温下ZnO:In纳米带的PL谱

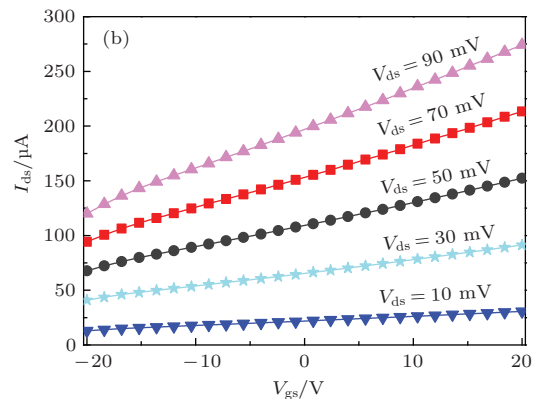
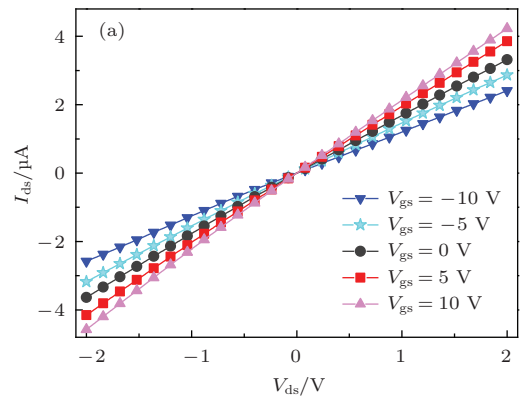


图6 (a) ZnO:In纳米带FET的输出特性(说明纳米带和金属层之间存在良好的欧姆接触); (b) ZnO:In纳米带FET的转移特性

根据测量出来的转移特性曲线, 首先可以由下式计算出FET跨导( $g_m$ ):

$$g_m = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}}, \quad (1)$$

$g_m$ 为 $I_{ds}$ - $V_{gs}$ 曲线线性区的斜率. 单位面积电容由

$C_o = \epsilon_0 \epsilon / h$  给出, 其中  $\epsilon = 3.9$  为  $\text{SiO}_2$  的介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$  为真空介电常数,  $\text{SiO}_2$  层的厚度  $h$ , 在本实验中取值为  $300 \text{ nm}$ . 综上所述, 可以得出当  $V_{gs} = 0.09 \text{ V}$  时跨导  $g_m$  为  $3.86 \text{ nS}$ , 单位面积电容为  $1.2 \times 10^{-4} \text{ F}\cdot\text{m}^{-2}$ . 根据下式可知, 由跨导和单位面积可以得到  $\text{ZnO:In}$  纳米带 FET 的迁移率 ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{g_m L}{Z C_o V_{ds}}, \quad (2)$$

其中  $L$  为纳米带 FET 的有效沟道长度  $20 \mu\text{m}$ ,  $Z$  为 FET 的沟道宽度, 也就是纳米带宽度  $120 \text{ nm}$ . 这样, 得出的 FET 迁移率  $\mu$  为  $622 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . 通过对比 [10,11,23-27] 得出, 该值明显优于其他材料的 FET 迁移率 (表 1).

材料电阻率可由下式计算:

$$\rho = \frac{V_{ds} Z T}{I_{ds} L}, \quad (3)$$

其中  $T$  为纳米带厚度, 约为  $20 \text{ nm}$ .  $\text{ZnO:In}$  纳米带电阻率估算值为  $0.007 \Omega\cdot\text{cm}$ ; 相比于本征  $\text{ZnO}$ , 电阻率数值有所降低 [28]. 载流子浓度  $n = 1/e\mu\rho$ , 其中  $e$  为元电荷电量; 根据之前计算的迁移率和电阻

值,  $n = 1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 相比于  $\text{ZnO}$ , 载流子浓度明显有所升高.

从表 1 可以看出,  $\text{ZnO:In}$  纳米带 FET 的迁移率高于包括  $\text{ZnO}$  纳米带、纳米线或薄膜在内的其他材料, 其可能原因如下: 首先, 将本次实验得到的结果与本组之前制作的单根  $\text{ZnO}$  亚微米线 FET [14] 相比, 在制作工艺、衬底相同的情况下, 单根  $\text{ZnO:In}$  纳米带 FET 迁移率大幅度提高. Ahmad [6], Hsu [26] 等也报道了类似的实验结果; 对于  $\text{ZnO:In}$  薄膜, Shinde 等 [29] 也得到了迁移率增大的结论. 由此推断  $\text{In}$  的掺杂可能是导致迁移率升高的原因之一. 其次, 栅介电层越光滑, 表面缺陷越少, 载流子越容易通过; 所以, 介电层表面粗糙度是影响场效应管迁移率的重要因素, 尤其是在薄膜场效应管研究领域 [30,31]. 本实验采用的是热氧化的  $\text{SiO}_2$  介电层, 具有良好的表面光滑度, 为高迁移率值提供了保证. 再次, 作为沟道材料, 不同材料体系的结晶质量也影响其迁移率的大小. 通常由传统 CVD 方法合成的  $\text{ZnO}$  纳米带缺陷较少、结晶质量较好; 实验中, XRD 谱 (图 4) 及 PL 谱 (图 5) 显示所合成的  $\text{ZnO:In}$  纳米带样品晶体质量良好.

表 1  $\text{ZnO:In}$  纳米带及其他材料的 FET 参数对比

材料	$\mu / \text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$C_o / 10^{-4} \text{ F}\cdot\text{m}^{-2}$	$g_m$
CdS 纳米带 [24]	100—350	0.6	200 nS ( $V_{ds} = 0.8 \text{ V}$ )
$\text{SnO}_2$ 纳米带 [10]	26.1	1.4	2.5 $\mu\text{S}$ ( $V_{ds} = 1V_{max}$ )
$\text{ZnO}$ 纳米带 [10]	440	1.4	18 $\mu\text{S}$ ( $V_{ds} = 1V_{max}$ )
$\text{ZnO}$ 纳米棒 [23]	75		$\sim 140\text{nS}$ ( $V_{ds} = 1 \text{ V}$ )
$\text{ZnO}$ 纳米线 [25]	17.2		1.9 nS ( $V_{ds} = 0.01 \text{ V}$ )
$\text{ZnO:In}$ 纳米线 [26]	85.2		
$\text{ZnO}$ 薄膜 [27]	8		
$\text{ZnO:In}$ 薄膜 [11]	39.71		
$\text{ZnO:In}$ 纳米带	622	1.2	3.86 nS ( $V_{ds} = 0.09 \text{ V}$ )

## 4 结 论

采用廉价微栅模板法成功制作单根  $\text{ZnO:In}$  纳米带背栅 FET, 操作简单, 工艺成熟. 通过测量其输出、转移特性, 得到的跨导、单位面积电容、电阻率和载流子浓度等参数表明 FET 性能良好; 迁移率值  $622 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  更是明显高于本征  $\text{ZnO}$  纳米带 FET. 分析了高迁移率的可能影响因素, 比如

$\text{In}$  原子的引入、介电层的光滑程度以及半导体材料的结晶质量等.

## 参考文献

- [1] Chen K J, Hung F Y, Chang S J, Hu Z S 2009 *Appl. Surf. Sci.* **255** 6308
- [2] Huang Y H, Zhang Y, Gu Y S, Bai X D, Qi J J, Liao Q L, Liu J 2007 *J. Phys. Chem. C* **111** 9039



- [3] Phillips J M, Cava R J, Thomas G A, Carter S A, Kwo J, Siegrist T, Krajewski J J, Marshall J H, Peck W F, Jr., Rapkine D H 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2246
- [4] Kim K J, Park Y R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 475
- [5] Su J, Li H F, Huang Y H, Xing X J, Zhao J, Zhang Y 2011 *Nanoscale* **3** 2182
- [6] Ahmad M, Zhao J, Iqbal J, Miao W, Xie L, Mo R, Zhu J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 165406
- [7] Li L M, Li C C, Zhang J, Du Z F, Zou B S, Yu H C, Wang Y G, Wang T H 2007 *Nanotechnology* **18** 225504
- [8] Maeng J, Heo S, Jo G, Choe M, Kim S, Hwang H, Lee Takhee 2009 *Nanotechnology* **20** 095203
- [9] Cha S N, Jang J E, Choi Y, Amaratunga G A J, Ho G W, Welland M E, Hasko D G, Kang D J, Kim J M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 263102
- [10] Cheng Y, Xiong P, Fields L, Zheng J P, Yang R S, Wang Z L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 093114
- [11] Kim D H, Cho N G, Kim H G, Cho W Y 2007 *J. Electrochem. Soc.* **154** H939
- [12] De D, Manongdo J, See S, Zhang V, Guloy A, Peng H 2013 *Nanotechnology* **24** 025202
- [13] Li M, Zhang H Y, Guo C X, Xu J B, Fu X J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1594
- [14] Jiang W, Gao H, Xu L L 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 037102
- [15] Lang Y, Gao H, Jiang W, Xu L L, Hou H T 2012 *Sens. Actuators A* **174** 43
- [16] Li M J, Gao H, Li J L, Wen J, Li K, Zhang W G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 187302 (in Chinese) [李铭杰, 高红, 李江禄, 温静, 李凯, 张伟光 2013 物理学报 **62** 187302]
- [17] Yuan Z, Gao H, Xu LL, Chen T T, Lang Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 057201 (in Chinese) [袁泽, 高红, 徐玲玲, 陈婷婷, 郎颖 2012 物理学报 **61** 057201]
- [18] Zhou J, Gu Y D, Hu Y F, Mai W J, Yeh P H, Bao G, Sood A K, Polla D L, Wang Z L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 191103
- [19] Wan Q, Huang J, Lu A, Wang T H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 103109
- [20] Jie J S, Wang G Z, Han X H, Yu Q X, Liao Y, Li G P, Hou J G 2004 *Chem. Phys. Lett.* **387** 466
- [21] Jabeen M, Iqbal M A, Kumar R V, Ahmed M, Javed M T 2014 *Chin. Phys. B* **23** 018504
- [22] Chen Y T, Cheng C L, Chen Y F 2008 *Nanotechnology.* **19** 445707
- [23] Park W I, Kim J S, Yi G C, Bae M H, Lee H J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5052
- [24] Ma R M, Dai L, Huo H B, Yang W Q, Qin G G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 203120
- [25] Fan Z Y, Wang D W, Chang P C, Tseng W Y, Lu J G 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5923
- [26] Hsu C L, Tsai T Y 2011 *J. Electrochem. Soc.* **158** K20
- [27] Wu Y, Girgis E, Ström V, Voit W, Belova L, Rao K V 2011 *Phys. Status Solidi A* **208** 206
- [28] Li S S, Zhang Z, Huang J Z, Feng X P, Liu R X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097405 (in Chinese) [李世帅, 张仲, 黄金昭, 冯秀鹏, 刘如喜 2011 物理学报 **60** 097405]
- [29] Shinde S S, Shinde P S, Bhosale C H, Rajpure K Y 2008 *J. D: Appl. Phys.* **41** 105109
- [30] Fritz S E, Kelley T W, Frisbie C D 2005 *J. Phys. Chem. B* **109** 10574
- [31] Yang H, Yang C, Kim S H, Jang M, Park C E 2010 *ACS Appl. Mat. Interfaces* **2** 391

# Electrical characteristics of individual In-doped ZnO nanobelt field effect transistor<sup>\*</sup>

Tang Xin-Yue Gao Hong<sup>†</sup> Pan Si-Ming Sun Jian-Bo Yao Xiu-Wei Zhang Xi-Tian<sup>‡</sup>

(Key Laboratory for Photonic and Electronic Bandgap Materials, Ministry of Education, School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

( Received 27 March 2014; revised manuscript received 24 May 2014 )

## Abstract

Back-gate field effect transistors based on In-doped ZnO individual nanobelts have been fabricated using the low-cost microgrid template method. The output ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) and transfer ( $I_{ds}$ - $V_{gs}$ ) characteristic curves for the transistors are measured, and the mobility is derived to be  $622 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . This value is obviously superior to those for most of materials including pure ZnO in the literature, and possible influence factors have also been discussed.

**Keywords:** ZnO, nanobelt, field effect transistor, mobility

**PACS:** 73.63.Nm, 81.05.Dz, 81.15.Gh

**DOI:** [10.7498/aps.63.197302](https://doi.org/10.7498/aps.63.197302)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074060, 51172058), the Key Project of the Science Technology and Research of Education Bureau, Heilongjiang Province, China (Grant No. 12521z012), and the Graduate Students' Scientific Research Innovation Project of Heilongjiang Province, China (2013).

† Corresponding author. E-mail: [gaohong65cn@126.com](mailto:gaohong65cn@126.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [xtzhangzhang@hotmail.com](mailto:xtzhangzhang@hotmail.com)