

薄膜后栅型 SnO₂ 场发射显示器的制备及性能研究

张永爱 林金阳 吴朝兴 郭太良

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘要 利用光刻、阳极氧化和剥离技术在玻璃基底制备薄膜后栅型场发射阵列,采用丝网印刷技术将一维 SnO₂ 纳米发射材料转移至后栅结构的阴极电极上,借助光学显微镜和扫描电镜观测薄膜后栅型场发射阴极阵列,利用 ANSYS 软件模拟了不同条件下阴极电极附近电子运动轨迹。结果表明,一维 SnO₂ 纳米线在阴极电极衬底上分布均匀,电子束斑随着阳压的增大而逐渐减小,随栅压的增加而变大。将阴极板与阳极荧光板制成了 5 inch(1 inch=25.4 mm)单色薄膜后栅型结构场致发射显示器并对其进行了场发射性能测试。实验表明,在栅压和阳压分别为 140 V 和 2000 V,阴极和阳极的距离为 1100 μm 时,薄膜后栅型 SnO₂ 场致发射显示器能实现全屏点亮,其器件的最大阳极电流为 232 μA,峰值亮度为 270 cd/m²,稳定发射 400 min,发射电流无明显衰减,表明器件场发射性能良好,具有潜在的应用前景。

关键词 光电子学; SnO₂; 薄膜后栅; 场发射; 模拟; 丝网印刷

中图分类号 O462.4; TN873.91 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0323002

Fabrication and Characteristics of Film-Under-Gate Field Emission Displays with SnO₂ Emitters

Zhang Yongai Lin Jinyang Wu Chaoxing Guo Tailiang

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract The film-under-gate field emission arrays (FEA) are fabricated on the glass substrates by conventional photolithography, anodic oxidation and stripping method. SnO₂ emitters are migrated on the cathode of film-under-gate triode by screen printing. The images of film-under-gate FEA with SnO₂ emitters are measured by the optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The electron trajectory in this triode is simulated by ANSYS. It shows that the SnO₂ emitters by screen printing are uniformly distributed on the surface of cathode. The electron beam size gradually becomes small with the increase of anode voltage and gradually becomes large with the increase of gate voltage. The cathode plate and anode plate are made of a 5 inch monochromatic film-under-gate field emission displays (FED) panel and its field emission performance are investigated. It indicates that the FED with SnO₂ emitters can achieve full-screen light emission when the gate voltage and anode voltage are 140 V and 2000 V, respectively, at the anode-cathode spacing of 1100 μm. In addition, the maximum anode current of fabricated device can come to 232 μA and the highest luminance is approximately 270 cd/m². Moreover, the emission current fluctuation is less than 5% for 400 min, which shows that the film-under-gate field emission displays with SnO₂ emitters by screen printing have a good field emission characteristics and good application prospects.

Key words optoelectronics; SnO₂ emitters; film-under-gate; field emission; simulation; screen printing

OCIS codes 230.3990; 250.4745; 230.0250; 220.3740

收稿日期: 2010-04-24; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03A313)、福建省科技厅资助省属高校项目(2008F5001)和福州大学科技发展基金(2008-XY-11)资助课题。

作者简介: 张永爱(1977—),男,博士研究生,主要从事纳米材料和纳米器件等方面的研究。

E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn

导师简介: 郭太良(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事信息显示技术方面的研究。

E-mail: gtl_fzu@yahoo.com.cn(通信联系人)

1 引 言

场致发射显示器(FED)发展于20世纪80年代,凭着亮度高、响应速度快、视角大和色逼真和节能环保等方面的优势而即将成为新一代平板显示器^[1~3]。场致发射阴极阵列(FEA)是整个FED的核心,其阴极阵列结构主要包括前栅型^[4]、平栅型^[5]和后栅型^[6]。与前栅型和平栅型FED相比,后栅型FED是将栅极埋在阴极之下,且阴极材料转移为整个阴极阵列制作的最后一道工序,所以材料可以保持较高的纯度,不致被前几道工序污染。后栅型FED的发射原理是利用栅极与阴极边缘的强电场,使阴极边缘的场致发射源产生场致电子发射^[7]。

自从发现碳纳米管具有优异的场发射特性以来,准一维纳米材料由于具有较高的长径比而吸引了人们越来越多的研究兴趣^[8]。较高的长径比使得一维纳米材料在场发射中产生较高的场增强因子,从而有效地降低了开启和阈值场强。在这些准一维纳米材料中,一些半导体氧化物表现出的化学惰性和优异的场发射特性备受关注, RuO_2 ^[9], IrO_2 ^[10]和 ZnO ^[11,12]等纳米材料的场发射特性已被相继报道。而一维氧化锡(SnO_2)属于立方晶系,具有金红石结构,其晶格中的氧缺陷形成施主能级,呈n型半导体特征,是一种新型的纳米功能材料,被用来制作高性能的气敏器件^[13~15]和光电器件^[16,17]。由于一维氧化锡纳米结构具有大的长径比、负的电子亲和势^[18]、稳定的化学特性以及低的功函数^[19],近年来在场发射方面的优异性能已经引起了人们普遍关注^[20~26]。

目前,纳米材料的转移有多种方法,包括Flow-Directed and Langmuir-Blodgett技术^[27,28]、热敷法^[29]和CVD生长^[30~33]等方法。装配显示器件常采用丝网印刷法^[34~36]、电泳法^[5]和沉淀法^[37]。这些方法各有自己的优缺点,电泳法转移的阴极材料与基底的附着力较差,沉淀法转移的材料在基底的分布不均匀以及材料不能精确定位等缺点。相比较丝网印刷法具有操作简单、不受图形大小限制以及适合各种浆料等优点,是目前普遍采用的一种阴极材料转移方法。本文利用光刻、阳极氧化和剥离技术制备薄膜后栅型场发射阴极阵列,通过丝网印刷 SnO_2 阴极发射材料实现薄膜后栅型场致发射显示器的制备,并研究该器件的场发射性能。

2 实 验

利用光刻、阳极氧化和剥离技术在 $10\text{ cm} \times$

3 mm 玻璃基底表面制备薄膜后栅型场发射阵列,实验工艺流程如图1所示。采用直流磁控溅射在玻璃基底表面溅射厚度为 700 nm 金属钽膜,结合传统的光刻工艺形成具有光刻胶保护的光刻图案,利用阳极氧化法将无光刻胶的金属钽膜彻底阳极氧化变成 Ta_2O_5 绝缘膜,去除光刻胶后,通过严格控制阳极氧化的电流密度、电压和时间,将厚度为 700 nm 钽电极局部氧化,在钽电极(栅极)表面形成厚度 600 nm 的 Ta_2O_5 绝缘膜保护层,利用剥离技术在 Ta_2O_5 绝缘膜表面制备厚度 100 nm 金属钽电极(阴极)。在进行材料转移之前,对用热蒸发法制备的氧化锡纳米线进行过滤提纯,以便去除杂质以及较大的氧化锡颗粒,使丝网转移的纳米线较均匀。其次,印刷浆料由有机载体和 SnO_2 纳米线按 $50\text{ mL}:2\text{ g}$ 比例混合而成,其中有机载体由体积分数为4%的乙基纤维素、94%的松油醇和2%的添加剂组成。为了均匀地印刷氧化锡纳米线,用超声波细胞粉碎机(宁波新芝Scientz-IIID)将氧化锡纳米线浆料间断性超声处理 60 min ,以使纳米线在有机浆料中均匀分散开。将一维 SnO_2 阴极发射材料配制成印刷浆料,利用丝网印刷将 SnO_2 阴极发射材料转移至Ta阴极表面,从而形成具有 SnO_2 阴极发射材料的薄膜后栅型场致发射阴极阵列。

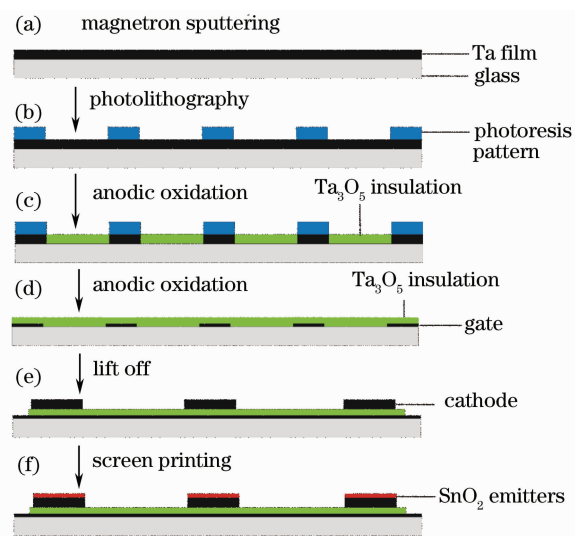


图1 薄膜后栅型 SnO_2 场发射阴极阵列的制备工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of fabrication processing for film-under-gate triode field emission cathode arrays with SnO_2 emitters

利用光学显微镜和扫描电镜观测薄膜后栅型场发射阵列及丝网印刷后的 SnO_2 纳米线微观结构,借助ANSYS软件模拟了不同条件下阴极电极附近

的电子分布和运动轨迹,结合场发射测试系统测试薄膜后栅型 SnO₂ 阴极阵列的场发射性能。

3 结果与讨论

为了优化薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列的结构和场发射特性,利用 ANSYS 软件模拟阴极表面电场分布和电子运动轨迹,模拟结果如图 2 所示。模拟中,栅压固定在 140 V,阴极和阳极的距离及阴极和栅极的距离分别为 1100 μm 和 600 nm,阴极和栅极的电极宽度为 200 μm 和 100 μm 。图 2 显示的是栅压固定在 140 V,不同阳压下阴极附近的电子分布和运动轨迹模拟结果。从仿真结果中可以看到,对于后栅型结构,随着阳极电压从 1000 V 增加到 2500 V,相应的电子束着屏束斑半径由 720 μm 逐渐减小至 420 μm ,有利于电子在阳极屏上聚焦;然而,作为后栅型 FED,由于栅极埋在阴极之下,失去了对阳极电场的屏蔽作用,阴极直接暴露在阳极电场中,在阴极与阳极间的距离一定时,阳极电压太高,易出现二极管式 FED 电子发射。因此,对于后栅型 FED,在避免二极管式 FED 发射同时使阳极电压尽可能达到最大值。另外,阴极表面的电场主要集中于阴极电极边缘,电子从阴极表面的边缘发射而不是阴极电极中心发射。因此,SnO₂ 发射材料应该

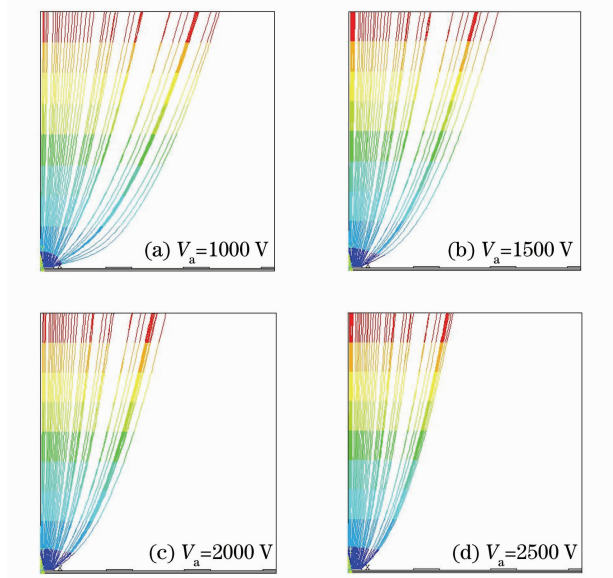


图 2 栅压 140 V 时不同阳压下阴极附近发射出的电子分布和运动轨迹模拟图

Fig. 2 Simulation results of electron distribution and trajectories of emitted near the cathode electrodes under various anode voltages when gate voltage is 140 V

转移在阴极电极边缘。

为了测试场发射特性,实验模拟了阳压 2000 V,栅压 0,80,140 和 160 V 下阴极附近发射出的电子分布和运动轨迹,结果如图 3 所示。从仿真结果可以看出,随着栅压从 0 变化到 160 V,电子束斑半径由 120 μm 逐渐增大到 480 μm ,不利于在阳极屏上聚焦。因此,考虑薄膜后栅型结构的发射特性和在阳极屏上聚焦,测试时最大栅压被设置在 140 V。

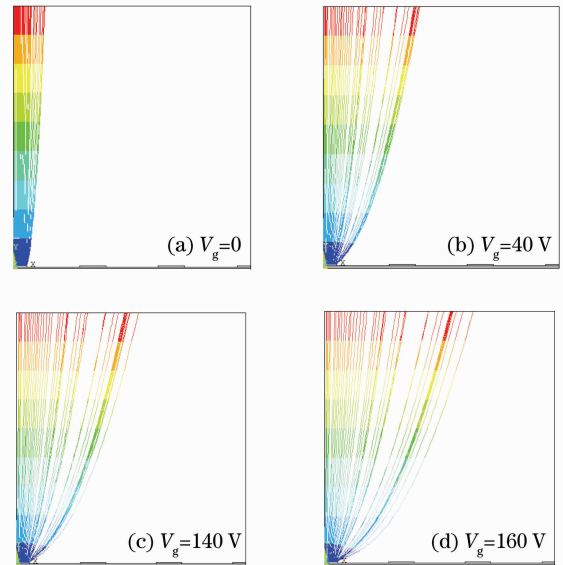


图 3 阳压 2000 V 不同栅压下阴极电极附近发射出的电子分布和运动轨迹模拟图

Fig. 3 Simulation results of electron distribution and trajectories of emitted near the cathode electrodes under various gate voltages when anode voltage is 2000 V

根据 SnO₂ 纳米线的特点,结合成熟的丝网印刷工艺,在薄膜后栅型结构中的金属阴极表面印刷宽度约为 200 μm 的 SnO₂ 纳米线发射源。图 4(a)是用光刻、阳极氧化和湿法刻蚀制备的薄膜后栅型场发射阴极阵列,图 4(b)为印刷烧结后氧化锡纳米线在阴极板上的分布形貌。从图上可以看到大量的氧化锡纳米线在整个衬底上相对均匀的分布,且纳米线沿着印刷的方向在衬底上大多随机平躺排列,这种平躺于电极表面的纳米线有利于提高薄膜后栅型场致发射显示器的工作稳定性。

在测试薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列的场发射性能时,实验以涂覆荧光粉的 ITO 玻璃当作阳极基板,薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列作为阴极基板,将阴极板与阳极荧光板制成了 5 inch (1 inch=25.4 mm) 单色薄膜后栅型场致发射显示器,并对

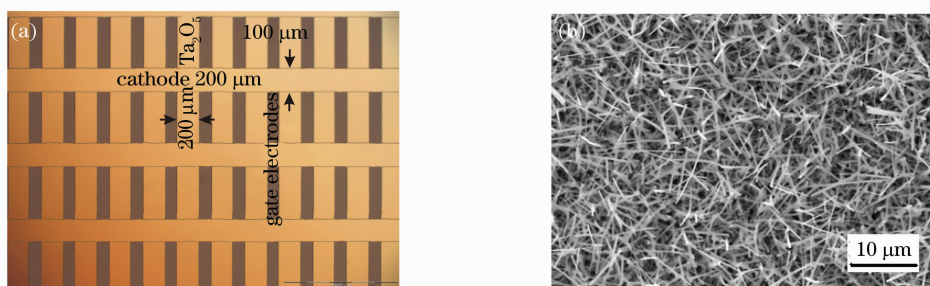


图 4 薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列图。(a)薄膜后栅型场发射阵列光学显微镜图,(b) SnO₂ 发射源的扫描电镜图
Fig. 4 Typical image of film-under-gate triode field emission cathode arrays with SnO₂ emitter. (a) optical microscopic image of field emission cathode array, (b) SEM image of SnO₂ emitters screen-printed on the cathode

其进行了场发射性能测试。在测试时,阴极基板中的阴极接地,阴极与阳极的距离为 1100 μm。测试时缓慢地提高阳极电压,待阳极电压达到2000 V时,屏上出现少数亮点,此时保持阳极电压不变,调节栅极电压的大小,利用安捷伦数字万用表实时采集电压电流值,测得发射电流大小与栅压之间的关系如图 5 所示。从图中可以看出,当阳压固定在 2000 V 时,随着栅极电压的增加,阳极基板的电流随栅压的逐步升高而增大。当栅压为 140 V 时,阳极电流可达 232 μA(有效发光面积 6 cm×6 cm),而此时测量的栅极电流仅为 24 μA,插图是 F-N 曲线,场强较大时呈现线性关系,表明遵循场发射效应。图 6 分别给出了在栅压为 0,40,80 和 120 V,阳压为 2000 V 时薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列的电子发射像。从图 6 可以看出,在没有栅压的情况下,仅有少量的

发光点,随着栅压的增加,器件的发光点不断增多,亮度和均匀性增加;当栅压为 120 V 时能够接近整屏点亮,相应的亮度值高达 230 cd/m²。

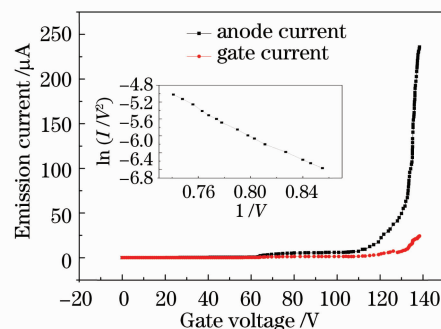


图 5 薄膜后栅型 SnO₂ 场发射显示器的 I-V 特性
Fig. 5 I-V characteristics of a film-under-gate field emission display with SnO₂ emitters

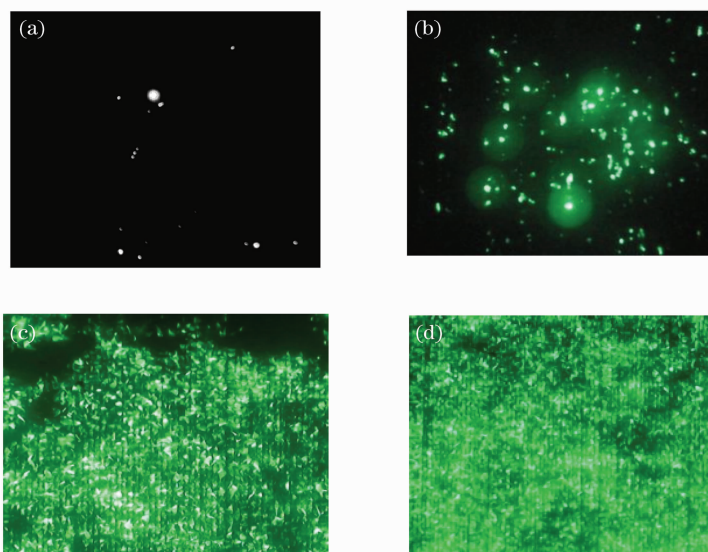


图 6 不同栅压调控下薄膜后栅型 SnO₂ 阵列的发光图。(a) $V_g=0$, (b) $V_g=40$ V, (c) $V_g=80$ V, (d) $V_g=120$ V
Fig. 6 Emission images of film-under-gate triode with SnO₂ emitters in different gate voltage. (a) $V_g=0$, (b) $V_g=40$ V, (c) $V_g=80$ V, (d) $V_g=120$ V

将阳极电压固定在 2000 V, 栅压固定在 140 V, 测量薄膜后栅型 SnO₂ 场发射显示器的场发射电流波动性随着时间的变化, 测定其场发射性能的稳定性, 如图 7 所示。电场强度固定为 1.82 V/ μm , 对器件长达 400 min 的连续直流测试, 其发射电流始终在 232 μA 上下波动, 波动范围在 $\pm 5\%$ 以内, 期间没有发现电流明显衰减迹象, 表明器件具有寿命长、场发射性能稳定的特性。

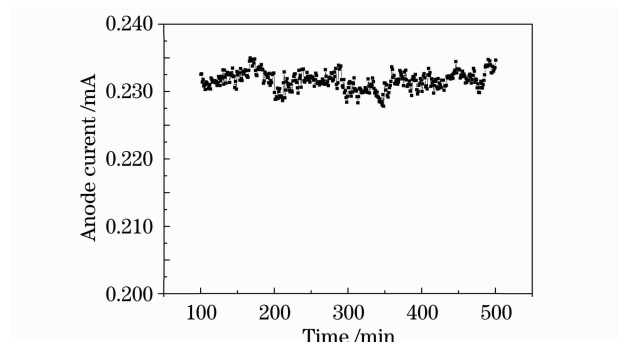


图 7 薄膜后栅型 SnO₂ 场发射显示器的稳定性测试曲线

Fig. 7 Emission stability test curve of film-under-gate triode field emission displays with SnO₂ emitters

4 结 论

利用光刻、阳极氧化和剥离技术在玻璃基底制备薄膜后栅型场发射阴极阵列, 采用丝网印刷技术将一维 SnO₂ 纳米发射材料转移至薄膜后栅结构的阴极电极表面, 将阴极板与阳极荧光板制成了 5 inch 单色薄膜后栅型场致发射显示器, 并对其进行了场发射性能测试。实验结果表明, 薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列的场发射性能由栅压控制。在电场强度为 1.82 V/ μm , 栅压为 140 V 时, 薄膜后栅型 SnO₂ 场发射阴极阵列的最大阳流为 232 μA , 栅流为 24 μA , 峰值亮度高达 270 cd/m²。对器件进行长达 400 min 的连续直流测试, 发射电流波动范围在 $\pm 5\%$ 以内, 期间没有发现明显的电流衰减迹象, 表明器件具有寿命长、场发射性能稳定的特性。

参 考 文 献

- Lin Zhixian, Lin Yunying, Guo Tailiang. The image processing and display control technology for printable field emission display [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(2): 140~143
林志贤, 林韵英, 郭太良等. 印刷型 FED 图像处理与显示控制技术[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(2): 140~143
- Lin Zhixian, Guo Tailiang. Study of the application of field emission display of tetrapod-like nanostructures ZnO [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7): 877~880
林志贤, 郭太良. 四针状纳米 ZnO 在场致发射显示器的应用研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(7): 877~880
- Lin Zhixian, Guo Tailiang, Hu Liqin *et al.*. Tetrapod-like ZnO

- nanostructures serving as cold cathodes for flat panel displays[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5531~5534
林志贤, 郭太良, 胡利勤等. 四角状氧化锌纳米材料的场致发射平板显示器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5531~5534
- Y. S. Choi, J. H. Kang, H. Y. Kim *et al.*. A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, **221**(1-4): 370~374
- W. H. Lu, H. Song, Y. X. Jin *et al.*. Electrophoresis deposition and field emission characteristics of planar-gate-type electron source with carbon nanotubes [J]. *Physica B*, 2008, **403**(11): 1793~1796
- Y. J. Jun, G. H. Son, J. H. Park *et al.*. Fabrication and properties of under-gated triode with CNT emitter for flat lamp [J]. *Diamond and Related Materials*, 2005, **14** (11-12): 2109~2112
- Y. S. Choi, J. H. Kang, Y. J. Park *et al.*. An under-gate triode structure field emission display with carbon nanotube emitters [J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, **10**(9-10): 1705~1708
- Xie Bin, Chen Bo, Song Hang *et al.*. Research of X-ray source using carbon nanotubes based field-emission cathode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1434~1436
解滨, 陈波, 宋航等. 以碳纳米管阵列为场致发射阴极的 X 射线源研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1434~1436
- C. L. Cheng, Y. F. Chen, R. S. Chen *et al.*. Raman scattering and field emission properties of RuO₂ nanorods [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(4): 1031041~1031043
- R. S. Chen, Y. S. Huang, Y. M. Liang *et al.*. Field emission from conductive vertically aligned IrO₂ nanorods [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(5): 1552~1554
- Qu Ke, Zhang Xiaobing, Lei Wei *et al.*. Synthesis of tetrapod-like zinc oxide and its field emission characteristic [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, **29**(3): 542~546
屈科, 张晓兵, 雷威等. 四针氧化锌制备及其场致发射特性 [J]. *发光学报*, 2008, **29**(3): 542~546
- Q. Zhao, H. Z. Zhang, Y. W. Zhu *et al.*. Morphological effects on the field emission of ZnO nanorod arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 2031151~2031153
- A. Kolmakov, Y. X. Zhang, G. S. Cheng *et al.*. Detection of CO and O₂ using tin oxide nanowire sensors [J]. *Adv. Mater.*, 2003, **15**(2): 997~1000
- Q. Wan, T. H. Wang. Single-crystalline Sb-doped SnO₂ nanowires: synthesis and gas sensor application [J]. *Chem. Commun.*, 2005, **14**(8): 3841~3843
- A. Kolmakov, D. O. Klenov, Y. Lilach *et al.*. Enhanced gas sensing by individual SnO₂ nanowires and nanobelts functionalized with Pd catalyst particles [J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(4): 667~673
- L. P. Qin, J. Q. Xu, X. W. Dong *et al.*. The template-free synthesis of square-shaped SnO₂ nanowires; the temperature effect and acetone gas sensors [J]. *Nanotechnol.*, 2008, **19**(18): 18570501~18570508
- N. D. Eric, Q. Wan, W. Guo *et al.*. Fully transparent thin-film transistor devices based on SnO₂ nanowires [J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(8): 2463~2469
- T. Sahm, A. Gurlo, N. Barsan *et al.*. Fundamental studies on SnO₂ by means of simultaneous work function change and conduction measurements [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **490**(1): 43~47
- J. Szuber, G. Czempik, R. Larciprete *et al.*. The comparative XPS and PYS studies of SnO₂ thin films prepared by LPCVD technique and exposed to oxygen and hydrogen [J]. *Sensors and Actuators B*, 2000, **70**(3): 177~181
- L. A. Ma, T. L. Guo. Stable field emission from cone-shaped SnO₂ nanorod arrays [J]. *Physica B*, 2008, **403** (19-20): 3410~3413

- 21 L. A. Ma, Y. Ye, T. L. Guo. Efficient field emission from patterned Al-doped SnO₂ nanowires [J]. *Physica E*, 2008, **40**(10): 3127~3130
- 22 S. H. Luo, P. K. Chu, G. D. Li *et al.*. Vacuum electron field emission from SnO₂ nanowhiskers annealed in N₂ and O₂ atmospheres [J]. *App. Phys. Lett.*, 2006, **88** (1): 013109~013111
- 23 L. A. Ma, T. L. Guo. Synthesis and field emission properties of needle-shaped SnO₂ nanostructures with rectangular cross-section [J]. *Mater. Lett.*, 2009, **63**(16): 295~297
- 24 S. H. Luo, Q. Wan, W. L. Liu. Vacuum electron field emission from SnO₂ nanowhiskers synthesized by thermal evaporation[J]. *Nanotechnology*, 2004, **15**(11): 1424~1427
- 25 Y. S. Zhang, K. Yu, G. D. Li. Synthesis and field emission of patterned SnO₂ nanoflowers[J]. *Mate. Lett.*, 2006, **60**(25-26): 3109~3112
- 26 J. Wu, K. Yu, L. J. Li. Controllable synthesis and field emission properties of SnO₂ zigzag nanobelts [J]. *Physica D*, 2008, **41**(18): 185302~185308
- 27 Y. Huang, X. Duan, Q. Wei *et al.*. Directed assembly of one-dimensional nanostructures into functional networks[J]. *Science*, 2001, **291**(5504): 630~633
- 28 D. Whang, S. Jin, Y. Wu *et al.*. Large-scale hierarchical organization of nanowire arrays for integrated nanosystems[J]. *Nano Lett.*, 2003, **3**(5): 1255~1259
- 29 Xu Yahong, Ye Yun, Guo Tailiang *et al.*. Linear cathodes and its field emission application fabricated by thermal coating method [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(4): 451~453
许亚红, 叶芸, 郭太良. 热敷法制备丝状阴极及其在场发射中的应用[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(4): 451~453
- 30 Zhu Qingfeng, Zhang Haiyan, Chen Yiming *et al.*. Synthesis of aligned carbon nanotubes film by plasma-enhanced hot filament chemical vapor deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1824~1827
朱清锋, 张海燕, 陈易明等. 热丝和射频等离子体化学气相沉积法制备定向碳纳米管薄膜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1824~1827
- 31 Chen Ting, Sun Zhuo, Guo Pingsheng *et al.*. Deposition of carbon nanotubes film by LPCVD and related field emission property[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 777~782
陈婷, 孙卓, 郭平生等. LPCVD法制备碳纳米管薄膜及其场发射性能的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 777~782
- 32 D. Sarangi, C. Hierold. Carbon nanotubes over metallic wires and its possible applications[J]. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nano-Structures*, 2005, **13**(3): 243~254
- 33 N. Olivier, S. Thomas, C. Mirko *et al.*. Growth of carbon nanotubes on cylindrical wires by thermal chemical vapor deposition[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2001, **3469**(8): 349~355
- 34 Li Yukui, Zhu Changchun, Liu Xinghui. Field emission display with carbon nanotubes cathode: prepared by a screen-printing process[J]. *Diamond and Related Materials*, 2002, **11**(11): 1845~1847
- 35 Y. S. Choi, J. H. Kang, H. Y. Kim *et al.*. A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, **221**(12): 370~374
- 36 Lin Zhixian, Guo Tailiang, Zhang Ting. Development of the parallel-gate structure of ZnO field emission display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 518~524
林志贤, 郭太良, 张婷. 平行栅结构氧化锌场致发射显示器的研制[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 518~524
- 37 Qin Huafang, Guo Tailiang. Preparation of tetrapod-shaped ZnO nanomaterial field emission cathodes by deposition method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 1124~1127
覃华芳, 郭太良. 基于沉淀工艺制作四脚氧化锌纳米材料场致发射阴极的研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 1124~1127