

文章编号: 0253-2239(2009)02-0500-06

# 三极结构四针状纳米 ZnO 场致发射显示器的研究

林志贤 郭太良

(福州大学物理与信息工程学院, 福建, 福州 350002)

**摘要** 针对二极管式场致发射显示器(field emission display, FED)驱动电压过高的问题, 设计制作了前栅极式三极结构纳米 ZnO 场致发射显示器, 并进行了场致发射实验, 验证这种结构的可行性。前栅极结构采用喷砂工艺结合光刻技术, 制作出微细的栅孔结构, 实现了较低电压的控制。同时对影响场致发射性能的栅极电压、栅孔开口尺寸和介质层厚度进行了分析讨论。实验结果表明: 采用三极结构四针状纳米 ZnO 场致发射显示器具有良好的发射性能, 是一种有前途的场致发射显示器。

**关键词** 光电子学; 场致发射; 四针状氧化锌; 三极结构; 发射性能

**中图分类号** TN305.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0500

## Tetrapod-Like Nano ZnO Field Emission Display with Triode Structure

Lin Zhixian Guo Tailiang

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

**Abstract** The diode field emission display (FED) has high driving voltage, which brings trouble to driving circuit. In order to solve this problem, we design normal grid triode structure tetrapod-like nano-ZnO FED. The field emission property is investigated. The results show that the structure is feasible. With abrasive blasting and lithographic technology, grid apertures of the normal grid structure have been created, and low voltage control is achieved. The grid voltage, the gate apertures size and the thickness of medium layer parameters which influence the performance of triode FED have been analyzed. The experimental results show that normal gate triode-structure tetrapod-like nano-ZnO FED has well electron emission performance and it is also a potential field emission display.

**Key words** optoelectronics; field emission; tetrapod-like ZnO; triode structures; emission performance

## 1 引 言

场致发射显示器(FED)被认为是最有可能真正与等离子体显示器(Plasma display panel, PDP)和液晶显示器(Liquid crystal display, LCD)相竞争的平板显示器<sup>[1~3]</sup>。其产生图像的原理与阴极射线管(Cathode ray tube, CRT)相同, 均为电子撞击荧光粉发光, 但采用的是矩阵选址方式, 画面质量和分辨率可优于 CRT。场致发射阴极阵列是整个 FED 的核心。ZnO 具有宽的直接带隙和高的激子结合能, 它在光电器件、传感器件、压电器件、声光器件

等方面具有潜在的应用, 备受关注<sup>[4~7]</sup>。用四针状 ZnO 纳米材料作为阴极材料, 进行了场致发射性质的研究。实验表明, 四针状 ZnO 纳米材料具有大的场致发射电流密度及高度的场致发射稳定性, 是一种很有前途的平板显示器的阴极材料。由于采用了丝网印刷技术的厚膜工艺, 且结构简单, 使二极管式 FED 显示器的成本大大降低。但是二极管式驱动电压与发光亮度之间存在着不可避免的矛盾: 降低阳极电压, 可以减小驱动电压, 但是阳极的发光亮度也会明显降低, 如需维持同等亮度, 就必须提高

**收稿日期**: 2008-07-07; **收到修改稿日期**: 2008-08-10

**基金项目**: 国家 863 计划(2005AA303G10)、福建省科技重大专项(2004HZ01-2)和福建省科技三项经费(2006F5061)资助项目。

**作者简介**: 林志贤(1975—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事 FED 显示器, 信息显示技术研究工作。

E-mail: lzx2005000@163.com

**导师简介**: 郭太良(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事 FED 显示器, 信息显示技术研究工作。

E-mail: gtl@fzu.edu.cn

发射电流密度。这样会造成荧光粉的快速老化,影响器件的寿命;如果不降低驱动电压,则驱动电路的设计难度随之增加,很难实现多灰度等级快速动态显示。

三极结构的提出,为解决器件发光亮度与驱动电压之间的矛盾提供了一个有效的解决途径。一般的三极结构在阳极和阴极之间增加了控制栅极,使控制电子发射的电极大大缩短了与发射阴极的距离,从而大大降低了驱动电压。与二极管结构相比,尽管三极结构的工艺复杂度和制作成本要高出很多,但是由于三极结构能在很大程度上弥补二极管结构的不足之处<sup>[8~10]</sup>。

## 2 实 验

场致发射显示的分类方法很多,无栅极的称为二极管结构场致发射,有栅极的称为三极结构场致发射。按栅极位置的不同,可将三极结构场致发射显示板分为前栅极场致发射和后栅极场致发射<sup>[11]</sup>。前栅式 FED 与后栅式 FED 的主要区别在于栅极所处的位置不同,前者栅极位于阳极与阴极之间而后者栅极位于阴极的下方。虽然后栅式 FED 制作工艺较为简单,但是却存在不易克服的阴极与阳极漏发射电流的现象,而前栅式能较好地避免这种现象。在三极结构中,栅极和支撑结构设计是关键问题<sup>[12]</sup>。本文设计制作了前栅极式三极结构的 ZnO-FED,并且对它的场发射性能进行测试,结果表明在这种结构中,栅极电压能对阴极发射电流起到调制作用,大大降低了驱动电压。

### 2.1 四针状 ZnO 的制备

为提高四针状 ZnO 晶须的纯度和均匀性,改造了普通管式电阻炉(型号:SK<sub>2</sub>-4-12),使其成为氛围可控制的低真空电阻加热炉,即将中心石英管两端与低真空系统(机械泵)、充气管道、冷却水管道连接,组成密闭空间。先将陈化处理过的锌粉预先放入石英管中央,然后密闭并开始抽真空,当真空度达到 5 Pa 左右,开始加热,加热最高温度为 900 °C,升温速率 1.67 °C/s,在 900 °C 时保温 1800 s,让锌充分升华成蒸气。然后通过充气管道往石英管中充入一定量的氧气和氮气的均匀混合气体。这种方法通过反应氛围的控制,制备出 ZnO 晶须<sup>[13]</sup>。

通过环境扫描电子显微镜(Environment scanning electron microscope, ESEM)(型号:XL30 ESEM-TMP)对管式电阻炉制备出的四针状 ZnO

进行扫描,形貌如图 1 所示。从图中可以看出在低真空管式炉中,通过反应氛围的控制,得到的四针状 ZnO 晶须均匀,颗粒小且纯度高。图 2 为 ZnO 粉末的 X 射线衍射图谱(型号:德国 AXS-D8)。从图中看到 ZnO 的特征衍射峰强度大且明显宽化,说明所制备的 ZnO 粉末具有较好的结晶性和较小的粒径。而且图中没有观察到其它杂质的明显的衍射峰,说明生长的四针状 ZnO 是单一的纤锌矿结构。

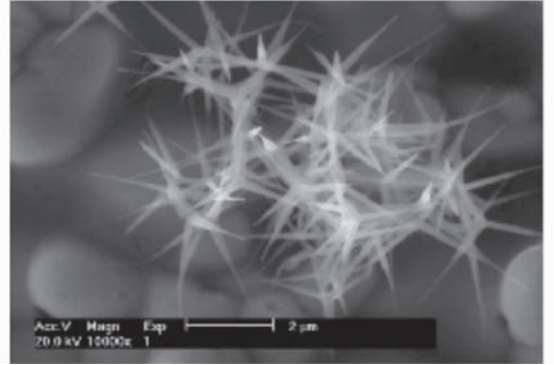


图 1 管式炉制备的四针状 ZnO 形貌

Fig. 1 Morphology of the tetrapod-like ZnO manufactured by pipe stove

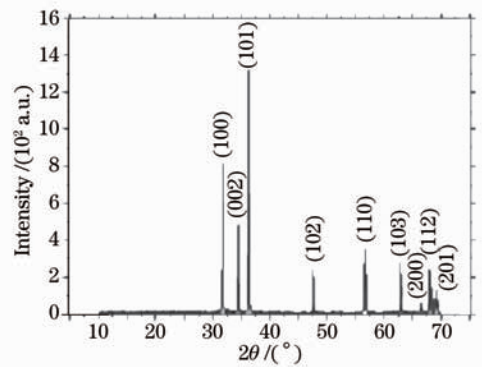


图 2 四针状 ZnO 粉末的 XRD 衍射谱

Fig. 2 XRD pattern of the tetrapod-like ZnO powder

### 2.2 阴栅电极制作工艺

前栅极的制作主要采用丝网印刷技术和喷砂技术。在平板显示中,喷砂技术主要是被应用到 PDP 障壁的制作,还未见到喷砂技术用来制作 FED 栅孔的报道。传统工艺采用微细加工技术来制作栅孔结构,这样对设备要求很高,生产成本也就相应很高。本文将喷砂工艺引入到制作 FED 栅孔中,不但可制作出较精细(栅孔直径尺寸为 70 μm),一致性好的栅孔结构,还大大降低了成本。具体步骤如图 3 所示。

在 11.5 cm×11.5 cm 的玻璃上印刷银浆电极即为阴极电极,高温烧结,如图 3(a)所示;在银浆

电极上印刷上一整层的感光胶,通过曝光显影,在银浆电极上留下如图 3(b)所示的感光胶栅孔图形;印刷一整层的介质浆料,低温烘干,留下部分银浆电极作为引线,如图 3(c)所示;在介质浆料上印刷银浆电极(栅极电极),根据对准标记,银浆电极刚好覆盖在对应的感光胶(栅孔位置)上,如图 3(d)所示;低温烘干栅极银浆电极之后,在整面玻璃上印刷上一层感光胶,曝光显影出如图 3(e)的图形,

即只剩下栅孔位置裸露在外面,其它地方有感光胶的保护;采用喷砂技术,剥除没有被感光胶保护的位置,即栅孔位置上的银浆和银浆底下的介质浆料,由于介质浆料下面有感光胶的保护,所以最底层电极得到了保护,没有被喷除。最后进行高温烧结,把表面上的感光胶烧除干净,这样阴极板上的栅极和阴极电极制作完毕,如图 3(f)所示。

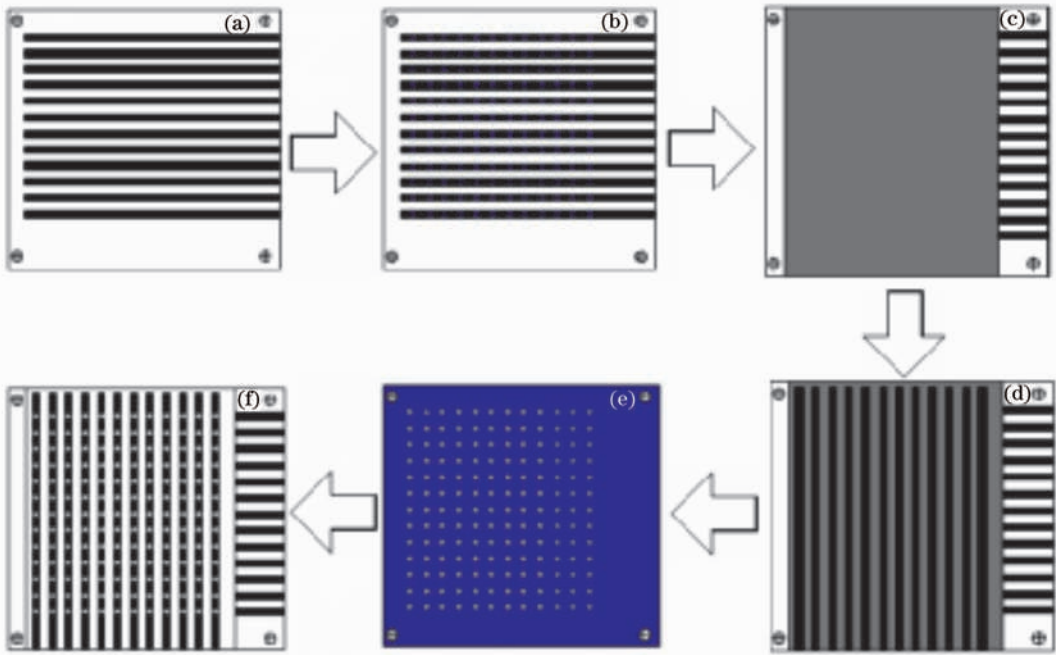


图 3 前栅极结构的制作流程

Fig. 3 Flow chart of the manufacture of normal grid electrode

实验使用的介质浆料是以铅硼硅酸玻璃为主体的黑色玻璃绝缘浆料,具有良好的遮盖力和绝缘耐压性能。要将介质浆料烧结完全,需要  $580\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温烧结,该温度已经超过浮法玻璃的应变温度  $506\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,为了防止玻璃变形,烧结时需要在玻璃下面垫上平整的高熔点微晶玻璃。

### 2.3 电泳方法转移 ZnO

为了最终形成三极结构,制备好阴栅板后,需要将四针状 ZnO 沉积在栅孔中的下层银浆阴极引线电极上,介质上层的银浆电极作为栅极。此时丝网印刷的精度已经达不到要求,由于网板变形等多方面不可避免的因素,ZnO 浆料很难做到刚好印刷在栅孔中。这就需要更加有效的阴极制备工艺。

目前主要通过喷墨打印法和电泳沉积法来实现<sup>[14]</sup>,考虑到工艺复杂性和成本,本文选择电泳沉积法。电泳沉积是在电场的作用下,悬浮液中的带

电固体微粒发生定向移动、并沉积在具有相反电荷的电极上的现象。

电泳沉积包括两个过程,首先是悬浮在分散介质中的带电颗粒在电场作用下定向移动(电泳),其次是颗粒在电极上沉积形成致密均匀的薄膜。利用电泳沉积方法制备 ZnO 阴极,电泳液主要由异丙醇和  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  组成,其中异丙醇作为溶剂, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  作为电解质,两者以一定比例混合后,再与之前制备好的 ZnO 粉末相溶,将配好的溶液超声  $1800\text{ s}$  以提高 ZnO 在溶液中的分散性,最后形成较为稳定的悬浮溶液。采用表面平整的钢片作为阳极,刻蚀好电极的阴极片作为阴极,保持平行竖直放置于电泳槽中的阴极和阳极间距  $5\text{ cm}$ ,在阴阳极之间施加一直流电压( $10\sim 20\text{ V}$ ),在电场的作用下, $\text{Mg}^{2+}$  向阴极板移动,推动着被  $\text{Mg}^{2+}$  包围的 ZnO 向阴极板移动,通过控制

Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 的量和电泳时间的长短，可以对 ZnO 沉积量进行控制。沉积后，将阴极片从电泳液中取出，烘干后即可使用。

### 2.4 ZnO 的烧结

在沉积 ZnO 的阴栅板完成后下一步进入烧结工序。烧结在程控的烘箱中进行，设置好运行程序，在 450 °C 保温 1800 s。整个烧结过程主要是去除浆料中的有机溶剂，同时对四针状 ZnO 材料进行高温退火，有利于提高 ZnO 的发射稳定性。烧结后冷却的阴极观察形貌发现四针状 ZnO 的分散均匀性有待进一步的研究。

### 2.5 荧光屏的制作

荧光粉采用丝网印刷，把荧光粉浆料转印到带电极的玻璃基板上。丝网采用尼龙丝网，目数为 300 目。

### 2.6 三极结构 FED 显示器制作

电泳沉积 ZnO 之后，低温烘干。烘干后进入场致发射显示器封装工艺流程。将阴栅板与印刷好荧光粉的荧光板相对准，采用 1 mm 的隔离子作为支撑和隔离。整个封装过程包括低熔点玻璃浆料涂敷、隔离子制作和布置、荧光屏预烧结、显示屏封接、排气封离、吸气剂激活等。三极结构 ZnO-FED 显示屏结构示意图<sup>[15]</sup>如图 4 所示。当 ZnO 发射源发射出的电子经阳极加速电压的作用，打到阳极荧光粉发光。栅极作为调制极，主要调节发射电流密度，由于栅极和阳极在阴极的同一侧，有利于电子的发射并轰击荧光粉，实现低压调制。在阴极、栅极和阳极上加上相应的驱动电信号，就可以实现光栅、图形、图像的显示了。

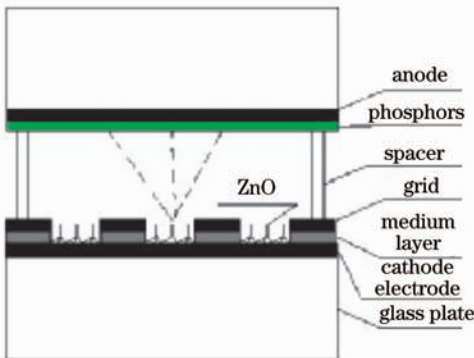


图 4 四针状 ZnO 三极式场致发射结构图

Fig. 4 Structure of the triode-structure tetrapod-like ZnO-FED

## 3 结果与讨论

测试在场发射测试仪(沈阳天成真空技术有限

公司)中进行，整个仪器设备主要包括真空系统、加热系统以及气体流量控制系统，在这个实验中，主要利用到其真空系统。

实验中，主要对影响三极结构场致发射性能的栅极电压、栅孔开口尺寸大小和介质层厚度三个主要参数进行一系列的实验。

保持阳极的电压值为 2600 V，栅孔的直径为 70 μm，阴、阳两极间距为 1 mm，介质层的厚度为 10 μm，调节栅极电压，观察阴极电子发射性能的变化。实验得到栅极电压和阴极发射电流的曲线如图 5 所示。从曲线中可以看出，在阳极电压保持不变的情况下，随着栅极电压的增加，阴极发射电流也随之增加，这是因为在介质层厚度保持不变的情况下，增加栅极电压，则栅极电压对阴极表面电场作用增强，阴极发射电流增大。

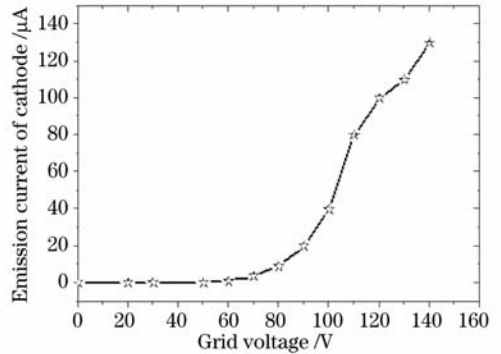


图 5 栅极电压与发射电流的关系曲线

Fig. 5 Gate voltage versus emission current

栅孔开口尺寸对发射电流的大小有较大的影响。保持阳极的电压为 2600 V，栅极电压为 120 V，改变栅孔的尺寸从 70 μm~120 μm，得到一组栅孔大小与阴极发射电流的关系曲线，如图 6 所示。随着栅孔尺寸的增大，发射电流密度迅速减小。但是由于采用喷砂技术制作栅孔，栅孔的尺寸精度受

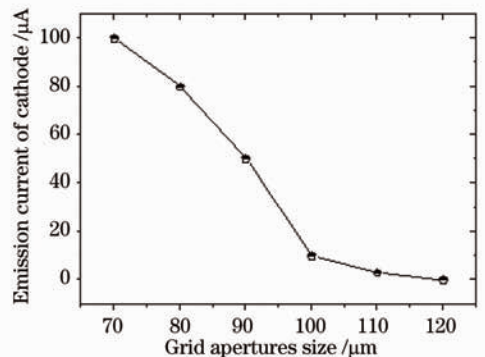


图 6 栅孔直径与发射电流关系曲线

Fig. 6 Grid apertures size versus emission current



限,目前实验室水平只能做到  $70\ \mu\text{m}$ ,可以预见随着栅孔的进一步缩小,阴极的发射电流将会呈指数上升。但是由于 ZnO 本身的尺寸( $3\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ )限制,栅孔不宜过小,否则同一栅孔内的 ZnO 数目太少也将影响发射效果。

阳极电压为 2600 V,栅极电压为 120 V,栅孔的尺寸为  $70\ \mu\text{m}$ ,改变介质层的厚度,研究介质层厚度与阴极发射电流的关系,如图 7 所示。随着介质层的厚度从  $10\ \mu\text{m}$  增加到  $30\ \mu\text{m}$ ,对应的阴极电流从  $100\ \mu\text{A}$  减小到了  $25\ \mu\text{A}$ ,电流的大小与介质层的厚度近似呈线性关系。随着介质层变厚,栅极电压对阴极表面电场的影响减弱。在相同栅极电压下,随着介质厚度的增加,栅极电压对阴极表面即 ZnO 尖端电场强度下降,因此场致发射电流减小。介质层厚度越大,栅极对阴极的调制能力越弱。

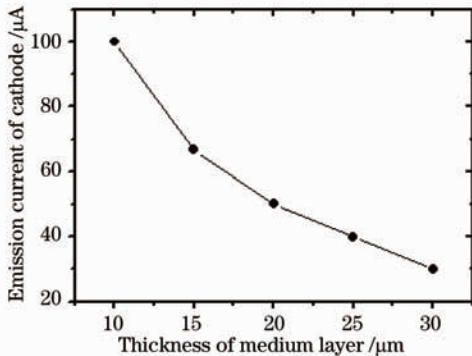


图 7 介质层厚度与发射电流关系曲线

Fig. 7 Thickness of medium layer versus emission current

根据栅极电压、栅孔开口尺寸大小和介质层厚度对场致发射影响的参数下优化设计制得了对角线为 12.7 cm 三极结构的 ZnO-FED 显示器。在其上加扫描驱动信号,可以使显示屏发光显示。如图 8

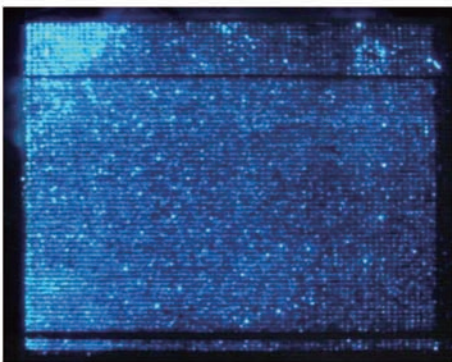


图 8  $64\times 64$  点阵三极结构的 ZnO FED 发光照片

Fig. 8 Photo of luminescence of the  $64\times 64$  array triode-structure ZnO FED

所示是该  $64\times 64$  三极结构的矩阵四针 ZnO 纳米材料 FED 动态扫描全屏发光的照片。

## 4 结 论

本文设计制作了前栅极式三极结构 ZnO 场致发射显示器,并进行了场致发射实验,验证这种结构的可行性。采用了喷砂工艺结合光刻技术,制作出微细的栅孔结构,实现了较低电压的控制。分析讨论对影响三极结构场致发射性能的栅极电压、栅孔开口尺寸大小和介质层厚度等参数。根据实验分析所得的优化参数制得了对角线为 12.7 cm 三极结构的 ZnO-FED 显示器,实现了 FED 显示屏全屏发光显示。实验结果表明:采用三极结构四针状纳米 ZnO 场致发射显示器具有良好的发射性能,是一种有前途的场致发射显示器。

## 参 考 文 献

- Lin Zhixian, Lin Yuning, Guo Tailiang. The image processing and display control technology of printable field emission display [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(2): 140~143  
林志贤,林韵英,郭太良. 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
- Li Juntao, Lei Wei, Zhang Xiaobing *et al.*. Field emission characteristic of screenprinted carbon nanotube cathode [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2003, **220**(7): 96~104
- Lin Zhixian, Liao Zhijun, Guo Tailiang. Larger screen FED video display system [J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(5): 440~445  
林志贤,廖志君,郭太良. 大屏幕 FED 集成驱动电路的研制[J]. *液晶与显示*, 2005, **20**(5): 440~445
- Liu Yaodong, Zhao Lei. Preparation of ZnO thin films by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 534~537  
刘耀东,赵磊. 脉冲激光沉积法制备氧化锌薄膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 534~537
- Huang Taohua, Zhou Shengming, Teng Hao *et al.*. Structural and optical characteristics of ZnO films on LiGaO<sub>2</sub> substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1420~1424  
黄涛华,周圣明,滕浩等. LiGaO<sub>2</sub> 衬底上 ZnO 外延膜的结构与光学特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1420~1424
- Chen Chuanxiang, Qi Hongxia. Influence of annealing on ZnO films and ZnO/p-Si heterojunctions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1411~1414  
陈传祥,齐红霞. 退火对 ZnO 薄膜晶体结构和 ZnO/p-Si 异质结光电性质的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1411~1414
- Zhao Fenggang, Wang Guonian, Hu Lili. Effect of CuO, CuCl on properties of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZnO-Na<sub>2</sub>O glasses [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1146~1150  
赵凤刚,汪国年,胡丽丽. CuO, CuCl 对 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZnO-Na<sub>2</sub>O 玻璃性质的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1146~1150
- Wang Qilong, Wei Lei, Zhang Xiaobing *et al.*. A novel gate structure in large diagonal size printable CNT-FED [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2005, **239**(3-4): 458~463
- Hyung Soo Uh, Sang Sik Park. Carbon nanotubes growing on rapid thermal annealed Ni and their application to a triode-type field emission device [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **504**(1-2): 50~54

- 10 Kyung Ho Park, Sungil Bae, Soonil Lee. Triode field emitters with planar carbon- nanoparticle cathodes[J]. *Current Applied Physics*, 2006, **6**(6): 1048~1053
- 11 Y. J. Jung, G. H. Son, J. H. Park. Fabrication and properties of under-gated triode with CNT emitter for flat lamp [J]. *Diamond and Related Materials*, 2005, **14**(11-12): 2109~2112
- 12 Fuminori Ito, Yoshiori Tomihari, Yuko Okada *et al.*. Carbon nanotube-based triode field emission displays using gated emitter structure[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1999, **22**(9): 426~428
- 13 Iwanaga H, Fujii M. Some evidence for the octa-twin model of tetrapod ZnO particles[J]. *J. Crystal Growth*, 1994, (141): 234
- 14 Zhao Haifeng, Song Hang, Li Zhiming. Electrophoretic deposition and field emission properties of patterned carbon nanotubes[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2005, **251**(1-4): 242~244
- 15 J. E. Jung, Y. W. Jin, J. H. Choi *et al.*. Fabrication of triode-type field emission displays with high-density carbon-nanotube emitter arrays [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2002, **323**(1-4): 71~77

---

## 《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于 2009 年 6 月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009 年 3 月 31 日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请发邮件至 zhgjg@mail.shcnc.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部