

文章编号 1004-924X(2012)01-0058-06

准分子激光相位掩模法制备大晶粒尺寸多晶硅薄膜

张 健, 林广平, 张 睿, 崔国宇, 李传南*

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,
吉林 长春 130012)

摘要:为扩大晶粒尺寸并降低晶粒间界缺陷对多晶硅薄膜晶体管的不良影响,采用准分子激光相位掩模法制备了大晶粒尺寸的多晶硅薄膜。首先,在无相位掩模时利用不同能量密度的准分子激光晶化非晶硅薄膜,通过扫描电镜观测晶粒尺寸确定超级横向生长的能量窗口;然后,在该能量密度下采用周期为 1 073 nm 的相位掩模板对入射光束进行相位调制,在样品表面形成人工可控的横向温度梯度,使非晶硅熔化并横向生长结晶为多晶硅;最后,对薄膜特性进行测量,并与非晶硅薄膜和超级横向生长制备的多晶硅薄膜进行比较。结果表明:本文方法制作的薄膜的平均晶粒尺寸提高了一个数量级,达到了 228.24 nm;薄膜电阻率降低一个数量级,为 18.9 $\Omega \cdot \text{m}$;且晶粒分布规则有序。该方法能有效提高多晶硅薄膜的电学特性,适用于高质量多晶硅薄膜器件的制作。

关 键 词:多晶硅薄膜;准分子激光;相位掩模

中图分类号:TN304.055;TN305.7 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122001.0058

Fabrication of large grain size p-Si film by phase modulated excimer laser crystallization

ZHANG Jian, LIN Guang-ping, ZHANG Rui, CUI Guo-yu, LI Chuan-nan*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

*Corresponding author, E-mail:licn@jlu.edu.cn

Abstract: To enlarge the grain size and decrease the effect of the defect between the grain boundaries on a p-Si film transistor, a phase modulated excimer laser crystallization technique is used to fabricate the uniform p-Si film with a large grain size. First, an energy window for super lateral growth is determined by measuring the grain size of p-Si film fabricated with different laser energy intensities. Then, the spatial distribution of the input laser is modulated by a phase mask with a period of 1 073 nm and an artificially controlled lateral temperature gradient is induced on the a-Si film, which leads the a-Si to be melten and crystallized into p-Si grains by super lateral growth. Finally, the characteristics of the prepared p-Si film are measured and compared with those of the a-Si film and the p-Si film fabricated by super lateral growth technique. The results show that the grain size of the p-Si film is 228.24 nm, which is ten times of that fabricated by super lateral growth under the same processing parameters; the electrical resistivity of the prepared sample is 18.9 $\Omega \cdot \text{m}$,

收稿日期:2011-06-17;修订日期:2011-07-29.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB327701);吉林省科技厅支撑计划重点资助项目(No. 20093056)

which is lower by an order magnitude than that prepared by super lateral growth. Furthermore, the distribution of the grain is more uniform than that fabricated by other techniques. The reported technique can increase the electrical characteristics of the p-Si film greatly and is suitable for the fabrication of high quality p-Si devices.

Key words: polycrystalline silicon film; excimer laser; phase mask

1 引 言

为了制备高性能多晶硅薄膜晶体管(Poly Silicon Thin Film Transistor, p-Si TFT),提高多晶硅薄膜的质量一直是备受人们关注的课题^[1-5]。在众多制备多晶硅薄膜的方法中,准分子激光晶化法(Excimer Laser Annealing, ELA)是人们常采用的一种制备方法。准分子激光晶化利用高能紫外激光将预沉积的非晶硅薄膜熔化结晶成多晶硅^[6-7]。与固相晶化^[8]、快速热退火^[9]和金属诱导横向晶化^[10]等其他生长方法相比,准分子激光晶化属于硅熔体的再生长,因此所形成的多晶硅薄膜具有晶粒均匀、缺陷少、表面平整等优点^[11-12]。另外,在准分子激光晶化过程中,非晶硅薄膜的熔化再结晶时间只有几十纳秒,对衬底的热冲击很小^[13],是当前在普通玻璃和柔性有机衬底上大面积制备多晶硅薄膜的主流技术方法。

近年来,为进一步提高多晶硅薄膜晶体管的迁移率和开关态电流比,多种准分子激光晶化改进工艺被用于增大多晶硅晶粒尺寸,从而最大限度降低晶粒间界缺陷引起的载流子陷阱,其中最具有代表性的是超级横向生长技术^[14-15]。研究表明,在准分子激光晶化过程中,当激光能量密度位于某一狭窄区间时,可使非晶硅薄膜接近完全熔化,此时以非晶硅-衬底界面稀疏分布的残存晶核为籽晶,可实现尺寸达微米量级的晶粒横向生长^[16]。在此基础上,哥伦比亚大学 Im 等人研发了人工可控超级横向生长技术。通过采用透镜、遮光板或相移掩模板等装置对入射光束进行空间调制,改变照射在薄膜表面的激光能量分布,从而形成位置可控的非熔化区和完全熔化区,在形成大尺寸晶粒的同时,还可控制晶粒在衬底上的位置及分布^[17]。

然而,上述两种方法都有其不可避免的缺点。超级横向生长对应于一个很窄的能量窗口,激光

能量的微小波动会严重影响晶粒尺寸,并且所生长的晶粒位置随机分布,大小不均匀,会导致后工艺中所制备的 TFT 沟道区内晶界数量难以得到精确控制,进而影响 TFT 器件的性能;而采用遮光板或振幅掩模板的人工可控横向生长技术,受制版工艺限制,所加工的狭缝宽度很难达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,而完全熔化区过宽导致大晶粒之间均匀成核的出现,所制备的多晶硅薄膜通常是大、小晶粒及非晶硅的混合物;而文献报道的相移调制人工可控横向生长工艺,由于激光通过相移掩模板后,其能量主要集中在零级衍射中,光强随衍射级数的增加迅速衰减,而激光能量的非周期分布导致了多晶硅薄膜晶粒大小分布的不均匀。

本文利用光纤光栅相位掩模板抑制零级衍射使透射光强周期性分布的特点^[18],将紫外写入光纤光栅技术引入准分子激光晶化工艺中,采用准分子激光相位掩模方法,常温下在玻璃衬底上制备了晶粒规则分布的大晶粒尺寸多晶硅薄膜,并对其特性进行了分析讨论。

2 多晶硅薄膜的制备

实验采用在玻璃衬底上生长的 a-Si:H 薄膜样品(厚度 70 nm),经 RCA 清洗并用能量密度为 $70\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 、频率为 1 Hz 的 KrF 准分子激光照射样品表面 1 min 除氢。

为对不同准分子激光晶化工艺制备的多晶硅薄膜特性进行分析比较,实验中首先采用超级横向生长方法在常温常压条件下制备多晶硅薄膜。频率为 1 Hz 的 248 nm 准分子激光经柱透镜聚焦为宽 1 mm 的矩形光斑,照射在置于步进电机上的非晶硅薄膜表面;考虑到入射激光的光强空间分布为高斯型,能量主要集中在光斑中心位置附近,因此,步进电机速率设为 $0.076\ \text{mm}/\text{s}$,以确保高能激光线性扫描整个样品表面。

准分子激光相位掩模制备多晶硅薄膜的实验

装置图如图 1 所示。根据光栅衍射理论,如果相位掩模板的凸起高度 h 、周期 Λ 和掩模板折射率 n 之间满足 $h = \Lambda/2(n-1)$ 时,零级衍射光强为零,入射激光能量主要集中于 ± 1 级衍射,可在掩模板后形成周期为 $\Lambda/2$ 的干涉条纹。利用该原理制备的相位掩模板被广泛应用于光纤光栅器件的制作。实验采用加拿大 QPS 公司生产的矩形光纤光栅相位掩模板对激光光束的相位进行调制,掩模板周期 $\Lambda = 1\ 073\ \text{nm}$,0 级衍射效率 $< 3\%$, ± 1 级衍射效率 $> 38\%$,在样品表面形成周期为 $\Lambda/2 = 536.5\ \text{nm}$ 、光强周期性分布的明暗相间条纹,其能量分布如图 1 中右图所示。在晶化过程

中,入射激光能量密度的周期性分布将在硅薄膜表面引入横向温度梯度,低能量密度辐照的熔融硅首先结晶;而高能量密度辐照的熔融硅由于具有较高的温度,因此结晶时间相对滞后,从而引发率先结晶区域向滞后结晶区域的横向生长。实验采用与超级横向生长相同的工艺条件完成多晶硅薄膜的制备。

多晶硅薄膜样品经 secco 溶液腐蚀后,在扫描电子显微镜下观测样品表面形貌,通过本原 CSPM5500 扫描探针显微镜确定晶粒的大小,最后在样品表面蒸发铝电极并用 KEITHLEY 2400 数字源表测量薄膜的电阻率。

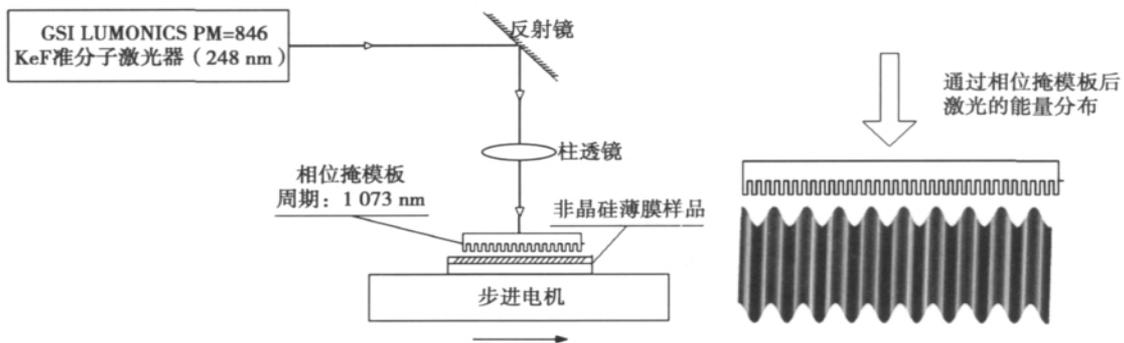


图 1 准分子激光相位掩模法制备多晶硅薄膜的实验装置示意图

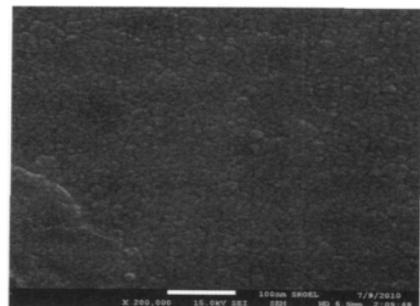
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for fabrication of p-Si film by phase modulated excimer laser crystallization

3 多晶硅薄膜特性分析

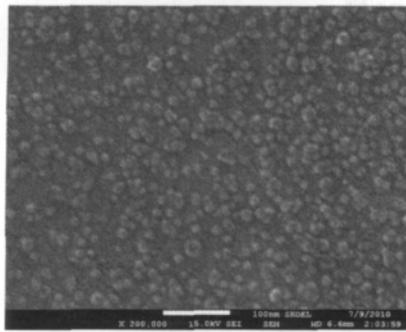
图 2 为无掩模时在不同能量密度下,准分子激光晶化形成的多晶硅薄膜扫描电子显微镜图片。由图中可看出,当激光能量密度为 $200\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,薄膜表面为非晶形态,说明激光能量未达到准分子激光晶化阈值(图 2(a));随着入射激光能量的增大,非晶硅薄膜熔化并在激光脉冲结束后结晶成多晶硅颗粒,在能量密度为 $330\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时晶粒尺寸达到最大值(平均直径约 $30\ \text{nm}$),这表明该能量密度为超级横向生长的能量窗口。此条件下非晶硅薄膜处于非完全熔化状态,触发了晶粒超级横向生长(图 2(b));当激光能量密度进一步增大($370\ \text{mJ}/\text{cm}^2$),使多晶硅的晶粒尺寸迅速减小(图 2(c));当激光能量密度增大到 $450\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,薄膜由尺寸均匀的纳米量级微晶颗粒组成,此

条件下对应均匀成核状态(图 2(d))。

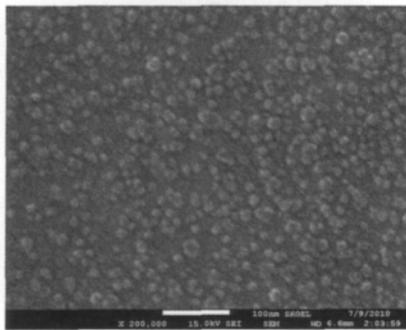
考虑到掩模板对入射激光有一定的吸收,在相位掩模制备多晶硅薄膜的过程中,激光能量密度设为 $350\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,略高于超级横向生长工艺中的功率密度最佳值。由所制备样品的扫描电子显微镜图片(图 3)可看出,与图 2(b)相比,晶粒尺寸明显加大,并且晶粒呈周期性分布,与照射在薄膜



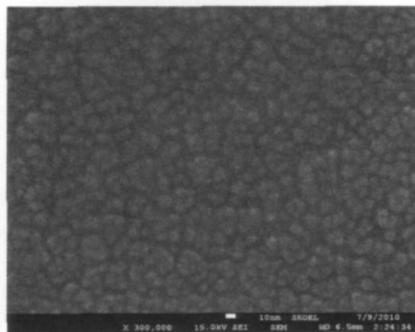
(a) $200\ \text{mJ}/\text{cm}^2$



(b)300 mJ/cm²



(c)370 mJ/cm²



(d)450 mJ/cm²

图 2 不同激光能量密度下多晶硅薄膜 SEM 图片

Fig. 2 SEM pictures of p-Si films irradiated by excimer laser with different energy intensities

表面的激光能量分布吻合。这说明通过光纤光栅相位掩模板对入射光束进行空间调制,可在薄膜内形成周期性分布的非熔化区和完全熔化区,从而实现大面积的晶粒有序排列,有效降低晶粒间界面缺陷对器件特性的影响,提高薄膜的均匀性。为进一步确定所形成多晶硅薄膜晶粒大小及分布,用 CSPM5500 扫描探针显微镜对样品进行了测试并给出了粒度分析报告,如表 1 所示。结果

表明,相位掩模法制备的多晶硅薄膜平均晶粒尺寸为 228.24 nm,较相同工艺条件下超级横向生长方法制作的样品提高了一个数量级。

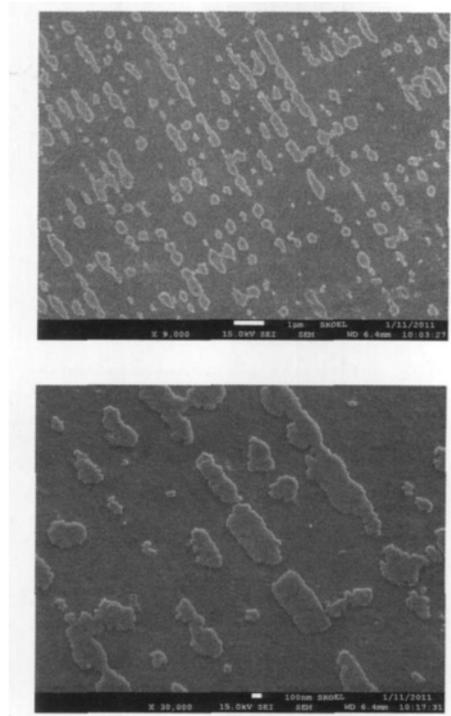


图 3 准分子激光相位掩模法制备多晶硅薄膜的 SEM 图片

Fig. 3 SEM pictures of p-Si films fabricated by phase modulated excimer laser crystallization

表 1 样品 CSPM 粒度分析报告结果

Tab. 1 Analysis of grain distributions of p-Si films given by CSPM system

	(nm)	
	超级横向生长法	准分子激光相位掩模法
≤10% 粒径	20.00	120.00
≤50% 粒径	30.00	220.00
≤90% 粒径	40.00	340.00
平均粒径	30.83	228.24

为分析所制备薄膜的电学特性,实验中采用 KEITHLEY 2400 可编程数字源表对非晶硅薄膜、超级横向生长工艺、准分子激光相位掩模法制备的多晶硅薄膜样品进行了 I-V 特性曲线测量,

如图4所示。由图4计算出3种样品的电阻率分别为 $1.44 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $1.04 \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $18.9 \Omega \cdot \text{m}$ 。与超级横向生长工艺相比,采用相位掩模法制备的样品薄膜电阻率降低了1个数量级,比非晶硅薄膜降低了3个数量级。

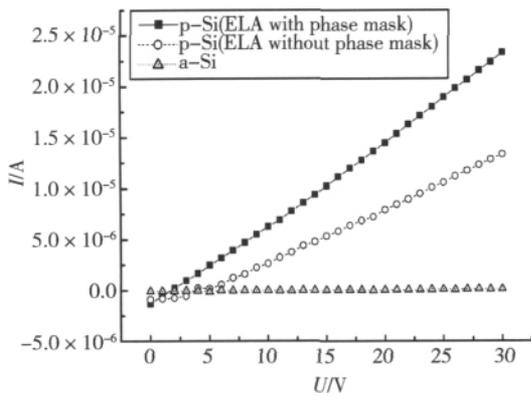


图4 不同方法制备的多晶硅薄膜样品的 I - V 特性曲线
Fig. 4 I - V curves of a-Si film and p-Si film fabricated by SLG and phase modulated excimer laser crystallization

参考文献:

- [1] KUO C C. In situ time-resolved optical measurements of a-Si thin films during excimer laser crystallization[J]. *Optik*, 2011, 122(8): 655-659.
- [2] KUO C C. Phase transformation mechanism in pulsed excimer laser crystallization of amorphous silicon thin films [J]. *Lasers in Engineering*, 2010, 19 (3-4): 225-238.
- [3] 刘松林. 多晶硅薄膜 ELC 制备方法中控制纵向热流的探索[J]. *科技创新导报*, 2010, 32: 11-13.
LIU S L. Investigation in controlling longitudinal heat flow during the fabrication of poly-silicon thin film by ELC technique[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2010, 32: 11-13. (in Chinese)
- [4] 尹亮, 陈伟平, 刘晓为, 等. 闭环加速度计 CMOS 接口电路[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(6): 1311-1315.
YIN L, CHEN W P, LIU X W, *et al.*. CMOS interface circuit for closed loop accelerometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (6): 1311-1315. (in Chinese)
- [5] 周春兰, 王文静, 李海玲, 等. 用电学参数表征晶体硅太阳能电池特性[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(7): 1163-1170.
ZHOU CH L, WANG W J, LI H L, *et al.*. Characterization of crystalline silicon solar cells by electrical parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (7): 1163-1170. (in Chinese)
- [6] 赵学庆, 刘晶儒, 易爱平, 等. 平滑化窄脉冲高功率准分子激光放大技术[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(2): 397-406.
ZHAO X Q, LIU J R, YI A P, *et al.*. Amplification of high power short pulse excimer laser with beam smoothing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 397-406. (in Chinese)
- [7] 薛全喜, 赵学庆, 华恒祺, 等. 高功率 XeCl 准分子激光系统前端平滑实验[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(2): 332-339.
XUE Q X, ZHAO X Q, HUA H Q, *et al.*. Seed beam smoothing for high power XeCl excimer laser system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 332-339. (in Chinese)
- [8] KAKKAD R, CHOI B D. Enhancement of solid-phase crystallization kinetics of amorphous silicon by annealing in a high-pressure H_2O ambient[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, 55(1): 1-4.
- [9] JIN B J, Oh S J, KIM D H, *et al.*. Activation be-

4 结论

本文首先采用准分子激光退火的方法制作了多晶硅薄膜,确定了触发超级横向生长的能量密度为 $330 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,该条件下晶粒平均粒径约为 30 nm ,薄膜电阻率为 $1.04 \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$ 。然后,通过准分子激光相位掩模方法常温制备了平均晶粒尺寸为 228.24 nm 、电阻率为 $18.9 \Omega \cdot \text{m}$ 的多晶硅薄膜。最后,对非晶硅薄膜、超级横向生长工艺及准分子激光相位掩模法制备的多晶硅薄膜的表面特性和电学特性进行了比较分析,结果表明:准分子激光相位掩模方法制备多晶硅可有效增大晶粒尺寸并降低器件的薄膜电阻率,且在薄膜表面晶粒呈周期性规则分布,具有良好的均匀性和一致性,可有效提高相关多晶硅薄膜的电学特性。同时,该制备方法在常温常压下进行,工艺简单,并与产业界现有 ELA 工艺相容,在大面积批量制备高性能多晶硅薄膜器件方面有广阔的应用前景。

- havior of SLS and ELC poly-Si after ion shower doping [C]. *IDW'06; Proceedings of the 13th International Display Workshops*, 2006, 1-3: 769-772.
- [10] LIAO Y P, SHAO X B, GAO F L, *et al.*. Nickel-disilicide-assisted excimer laser crystallization of amorphous silicon[J]. *Chinese Physics*, 2006, 15 (6):1310-1314.
- [11] CHIKOGA S U, IBARAKI N. Low temperature poly-Si TFT-LCD by excimer laser anneal[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 383:19-24.
- [12] SAMESHIMA T, KOHNO A, SEKIYA M, *et al.*. SiO₂ formation by thermal evaporation of SiO in oxygen atmosphere used to fabrication of high performance polycrystalline silicon thin film transistors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64:1018.
- [13] KUO Y, KOZLOWSKI P M. Polycrystalline silicon formation by pulsed rapid thermal annealing of amorphous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1996, 69:1092.
- [14] LEE S J, LEE S W, LEE K E, *et al.*. Electrical characterization of polycrystalline silicon thin film transistors crystallized by a new alignment sequential lateral solidification process[J]. *Phys. Scr.*, 2011, 83:055802.
- [15] SASAKI N, KITANARA K, YAMAMOTO K. Characterization of electrochemically-active defects in Si-film laser-crystallized with directional SLS by measuring the stress release during secco etching[C]. *Sid International Symposium Digest of Technical Papers.*, 2009, 40(13): 632-635.
- [16] IM J S, KIM H J. On the super lateral growth phenomenon observed in excimer laser-induced crystallization of thin Si films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64:2303.
- [17] SPOSILIM R S, IM J S. Sequential lateral solidification of thin silicon films on SiO₂ [J]. *J Appl. Phys.*, 1996, 69(19):2864-2866.
- [18] 张健,郑杰,张玉书. 菲波纳契准周期超结构光纤光栅[J]. *光子学报*, 2009, 38(8):2050-2054.
ZHANG J, ZHENG J, ZHANG Y SH. Fibonacci Quasi-periodic superstructure fiber bragg gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38 (8):2050-2054. (in Chinese)

作者简介:



张 健(1971—),男,吉林长春人,博士,副教授,1993年于南开大学获得学士学位,1996年、2009年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光纤无源器件,光纤激光器,传感器的研究。E-mail: zhangjian@jlu.edu.cn



崔国宇(1987—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事高性能 OLED 器件研究。E-mail: jlucui@163.com



林广平(1986—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2010年于吉林大学获得学士学位,主要从事多晶硅 TFT 方面的研究。E-mail: skyjlu@163.com

通讯作者:



李传南(1969—),男,江西莲花人,博士,教授,1991年、1997年和2001年于吉林大学分别获得学士、硕士及博士学位,2001年至2003年于香港大学从事博士后研究,主要从事显示技术的研究。E-mail: licn@jlu.edu.cn



张 睿(1987—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事 OLED、TFT 等方面的研究。E-mail: youth7@126.com