

飞秒激光诱导 ZnO:Al 薄膜周期结构及其光致发光特性

周 侃^{1,2} 冯东海² 李 霞^{1,2} 贾天卿² 刘建胜¹ 徐至展¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

² 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 利用单束 800 nm 飞秒激光在掺杂了 Al 的 ZnO 薄膜中制备了纳米周期条纹结构。研究了不同能流密度的飞秒激光在照射不同的时间后, 表面纳米周期结构的变化规律及其形成机制。利用 He-Ge 激光器作为激发光源, 研究了 ZnO:Al 薄膜的光致发光特性及其与纳米周期结构的关系。结果表明, 近带隙发光增强的主要原因是 800 nm 飞秒激光在诱导纳米周期结构的同时对 ZnO:Al 薄膜的淬火作用和周期纳米条纹对 He-Ge 激光的吸收增加。

关键词 光学材料; 纳米周期条纹; 光致发光; 飞秒激光; ZnO:Al 薄膜

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0816002

Periodic Nanoripples and Photoluminescence on ZnO:Al Film Induced by Femtosecond Laser Pulses

Zhou Kan^{1,2} Feng Donghai² Li Xia^{1,2} Jia Tianqing² Liu Jiansheng¹ Xu Zhizhan¹

¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract The periodic nanoripples on ZnO:Al films induced by 800 nm femtosecond laser pulses are prepared. The regularity and formation mechanism of surface periodical nanostructure are studied after it is irradiated by femtosecond laser of different energy flux densities. Using He-Ge laser as light source, the photoluminescence spectra of ZnO:Al films and its relationship with periodical nanostructures are studied. It is shown that the enhancement of emission near the band gap results from the quenching effect by 800 nm femtosecond laser on ZnO:Al films and the increase in optical absorption of He-Ge laser by the nanoripples.

Key words optical materials; periodic nanoripples; photoluminescence; femtosecond laser; ZnO:Al film

OCIS codes 160.4236; 140.3390; 240.0310; 320.7090

1 引 言

自从激光器诞生以来, 单束激光在半导体表面诱导周期结构一直是一个令人感兴趣的研究课题^[1,2]。利用连续激光和长脉冲激光(纳秒激光)照

射半导体 Si, Ge 和 GaAs 等表面, 发现了周期约等于激光波长(λ)的条纹结构, 条纹的周期与激光的入射角密切相关。入射光与表面散射光的干涉被认为是形成这种长周期结构的最主要机制^[3,4]。近年

收稿日期: 2011-01-21; **收到修改稿日期**: 2011-04-08

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923203)、国家自然科学基金(10874044, 10904038)、上海市曙光学者项目(07SG25)、教育部新世纪优秀人才计划和上海市科学技术委员会资助项目(09142200500, 09JC1404700, 09ZR1409300)资助课题。

作者简介: 周 侃(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光与材料相互作用等方面的研究。

E-mail: may555snow@yahoo.com.cn

导师简介: 贾天卿(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞秒激光超快动力学方面的研究。

E-mail: tqjia@phy.ecnu.edu.cn(通信联系人)

来,人们发现使用飞秒激光照射半导体、透明介质和金属,能够在材料表面获得不同周期的条纹结构^[5~13]。条纹的周期在 $0.1\sim 1\lambda$ 的范围内变化,它依赖于激光的强度、脉冲数和材料的光热特性。这种条纹形成的物理机制是一个令人困惑的问题,国际、国内的研究队伍开展了大量的实验和理论研究,提出了激光与表面等离子体相互作用、局域光场增强、激光与散射光干涉、表面皱纹波凝固等观点。

最近飞秒激光诱导周期结构的一个热点问题是其对材料光电特性的影响。Vorobyev等^[14,15]系统地研究了飞秒激光照射后金属表面纳米周期结构的形成及其反射率、吸收率的变化,发现当铝表面形成较规则的亚波长周期条纹后,由于某些波段的光有较高的反射率,而使铝呈现不同的颜色。如果激光能量高,照射时间长,金属表面形成的条纹周期比较小且不规则,这种结构对整个可见光波段都具有很高的吸收率,金属看上去是黑色的。Zhao等^[16]研究了飞秒激光在SiC晶体表面形成的纳米条纹结构,发现其吸收率提高到40%以上。Jia等^[17,18]用双光束飞秒激光照射ZnO晶体表面,得到了二维光栅、亚微米坑阵列,发现其白光吸收率达到80%以上。纳米薄膜、纳米线和纳米管等纳米结构的光致发光特性是纳米结构的重要特性^[19~22],其研究报道不计其数。然而关于飞秒激光诱导纳米条纹的光致发光的报道还很少。最近Vorobyev等^[23]报道了用飞秒激光在金属钨丝表面制备周期条纹,发现其发光效率提高了近100%。

ZnO是一种性能优异的蓝紫色发光材料。ZnO的激子束缚能有60 meV,即使在室温下也可以保证稳定的激子态发光。由于其在实际应用上的巨大潜能,国内外的许多小组报道了ZnO纳米结构,如纳米线、纳米管、纳米薄膜等结构材料的制备和应用^[19~22]。掺杂了Al的ZnO薄膜是一种高性能的透明导电薄膜,在液晶、等离子体显示面板和太阳能电池、发光二极管等方面具有广阔的应用前景^[24~26]。大量文献报道了Al的浓度、退火温度、退火气氛环境和表面结构等对ZnO:Al薄膜的导电特性、折射率和透光率的影响。然而,掺Al的ZnO薄膜的发光效率远远低于ZnO纳米线、纳米薄膜。最近,掺Al的ZnO薄膜的发光特性也引起了人们的关注^[27~31]。人们通过改变Al的浓度、退火温度和制备表面纳米结构等方法研究其发光特性。

本文采用直流磁控溅射的方法,在熔石英衬底上制备了掺Al的ZnO薄膜。利用单束800 nm的飞秒

激光照射掺杂ZnO:Al薄膜,研究了周期纳米条纹的形成与激光的能量、脉冲数的关系。进一步用He-Ge激光器作为激发光源,研究了纳米条纹的形成对掺杂ZnO:Al薄膜发光特性的影响。

2 实 验

实验中所使用的ZnO:Al薄膜是厚度为500 nm的掺杂Al的ZnO薄膜,用直流磁控溅射方法制备。溅射靶直径10 cm,材料为质量分数98%的ZnO和2%的Al₂O₃。溅射前本底真空抽至 4.6×10^{-4} Pa,溅射时充氩气10.2 sccm(标准状态0℃、1个标准大气压下毫升每分),氩气压强达0.8 Pa。溅射电流0.4 A,电压390 V。溅射时石英基片处于室温,靶与基片的距离为10 cm,沉积速率0.14 nm/s。

实验中所用的飞秒激光是中心波长为800 nm的钛宝石再生放大激光器,它输出的激光脉冲的宽度和能量分别是50 fs和3.5 mJ,重复频率是1 kHz。激光束经过半波片和格兰棱镜可以连续改变脉冲的能量,经过250 mm的透镜会聚到样品表面。激光在适当离焦的条件下烧蚀样品,焦斑直径约280 μm。利用电子快门控制激光照射时间。样品装在一个计算机控制的三维移动平台上。照射后样品表面用JEOL扫描电镜(SEM)观测微纳结构。利用波长325 nm的He-Ge激光器作为激发光源,用显微物镜将激发光聚焦到10 μm以下。光致发光实验是在实验室环境下完成的,并且都是研究的烧蚀斑中心区域的发光特性。

3 结果与分析

3.1 纳米周期条纹的形成

图1为ZnO:Al薄膜表面纳米结构的扫描电镜图。与ZnO晶体的情况类似,为了在样品表面得到较规则的周期纳米条纹,激光的强度要小于单脉冲烧蚀阈值。经过最初的几个脉冲照射后材料表面只出现一个很淡的类似退火的平整斑点。经过10个以上脉冲的连续照射,材料表面开始出现轻微的烧蚀斑点。20个脉冲照射后,表面开始出现周期条纹。当照射的脉冲数增加到30时,烧蚀斑的直径约为15 μm,中心部分形成了周期约200 nm的条纹结构,条纹垂直于激光的偏振方向。为了能看清楚,图1(a)只显示出了整个烧蚀斑的四分之一。随着激光照射时间的增加,烧蚀斑的面积逐渐增大,周期条纹也越来越规则。当照射时间增加到0.5 s时,烧蚀斑的直

径增加到 $32\ \mu\text{m}$, 纳米条纹的周期仍是 $200\ \text{nm}$ 。即使照射时间增加到 $2.5\ \text{s}$, 纳米条纹的周期也仍是 $200\ \text{nm}$, 这与晶体表面的情况有很大的不同。这是因

为 ZnO:Al 薄膜很薄, 厚度只有 $500\ \text{nm}$, 不像晶体那样表层与亚表层部分的激光能流密度不同, 散射光情况也不同, 条纹周期随照射时间会逐渐变化。

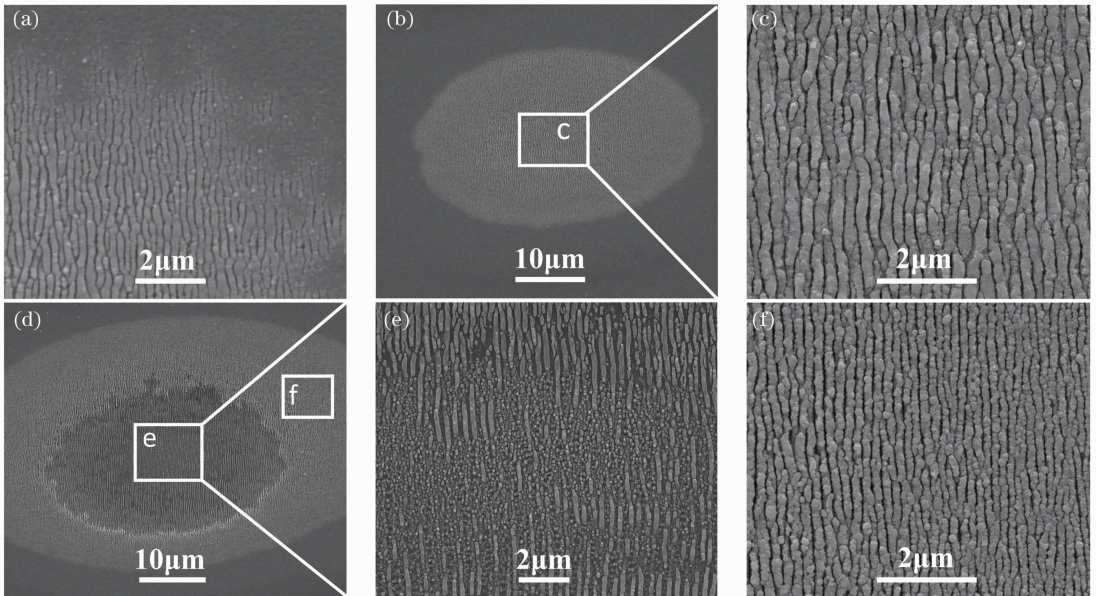


图 1 ZnO:Al 薄膜表面纳米结构的扫描电镜图

Fig. 1 Scanning electron micrographs of the nanostructures on ZnO:Al film surface

图 1 中各图对应的激光照射情况为: 图 1(a) 中激光的平均能流密度为 $0.32\ \text{J}/\text{cm}^2$, 照射时间为 $0.03\ \text{s}$; 图 1(b), (c) 平均能流密度是 $0.32\ \text{J}/\text{cm}^2$, 激光照射时间为 $0.5\ \text{s}$; 图 1(d) ~ (f) 平均能流密度为 $0.43\ \text{J}/\text{cm}^2$, 激光照射为 $2.5\ \text{s}$ 。图 1(d) 是烧蚀斑的整体扫描电镜图, 图 1(e), (f) 是局部放大, 其中图 1(e) 是光斑中心的放大, 而图 1(f) 是边沿部分的局部放大。从图 1(e) 可以看出在激光斑中心由于能流密度高, ZnO:Al 薄膜部分被烧蚀掉, 露出了一部分的石英玻璃衬底。所剩的纳米条纹的周期为 $270\sim 350\ \text{nm}$ 。由于激光强度呈高斯分布, 从烧蚀斑中心到边沿激光能流密度逐渐减小, 条纹的周期随着减小^[13]。图 1(f) 显示在烧蚀斑边沿部分条纹的周期只有 $170\sim 190\ \text{nm}$, 这与晶体表面形成条纹的情况类似。许多文献报道激光的强度不同, 材料表面的激发状态不同, 材料表面的等离子体密度波、材料的瞬态折射率等都不同, 形成的条纹周期也不同^[32]。

由图 1 可知激光的能流密度不同, 照射时间不同, 形成条纹情况也不同。所以, 可以通过控制激光能流密度和照射时间来改变薄膜表面纳米结构的特性。在一定的强度和照射情况下, 可以形成很规则的纳米周期条纹。

3.2 烧蚀光斑的光致发光特性

图 2(a) 是能流密度为 $0.32\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的 $800\ \text{nm}$ 飞

秒激光在不同照射时间后 ZnO:Al 薄膜烧蚀斑中心附近的光致发光谱, 这里 He-Ge 激光激发和收集发光的实验条件相同。从图 2 可以看出, 未经过激光照射的 ZnO:Al 薄膜在 $405\ \text{nm}$ 和 $540\ \text{nm}$ 分别有一个非常弱的发光带。为了能看清楚, 将其强度放大了 $2.5\ \text{nm}$ 倍。 $540\ \text{nm}$ 的绿光发光带通常被认为与氧空位缺陷态有关。ZnO 和 ZnO:Al 薄膜的近带隙发光峰通常小于 $390\ \text{nm}$ ^[27,28]。掺杂 Al 后薄膜中出现了电子和空穴, 它们提高了薄膜的导电性。同时这种电子-空穴等离子体还会导致 $405\ \text{nm}$ 的发光带。文献 [33] 系统研究了 ZnO 薄膜在波长 $355\ \text{nm}$ 激光照射下发光峰随激光强度的变化, 发现 ZnO 薄膜 $400\ \text{nm}$ 附近的发光峰是由电子-空穴等离子体引起的。

经过 $0.03\ \text{s}$ 的激光照射, 发光峰位置没有变化, 仍在 $405\ \text{nm}$ 和 $540\ \text{nm}$ 附近。但其强度增强很快, 分别增强了 5 倍和 7 倍。研究了 ZnO 表面形成纳米周期结构后光的反射率和透射率, 发现反射率和透射率都有显著下降, 吸收率能达到 90% ^[18]。激光照射后发光增强是由于吸收率增加导致的。

当照射时间增加到 $0.1\ \text{s}$ 时, 绿光的发光峰位置不变, 而 $405\ \text{nm}$ 的发光带不仅强度有了明显的增强, 同时在 $383\ \text{nm}$ 附近出现了一个新的发光峰。图 2(b) 中用高斯模型进行了数值模拟。两个峰的中心波长分别为 $405\ \text{nm}$ 和 $383\ \text{nm}$, 半峰全宽分别

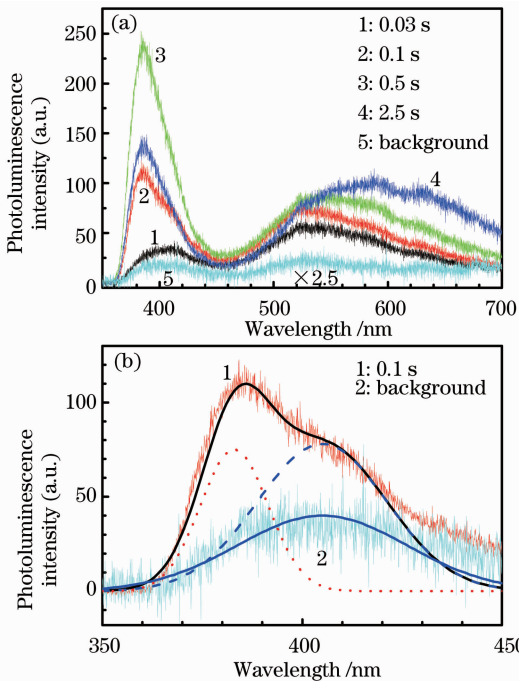


图2 烧蚀斑中心的光致发光谱(a)和高斯拟合结果(b)
Fig. 2 (a) Photoluminescence spectra of the central area of the ablation spots and (b) simulation results with Gaussian model

为 23 nm 和 12 nm。人们对 383 nm 的发光峰进行了大量的研究,发现它是激子复合发光。激光照射样品形成纳米周期条纹的同时,激光还对样品有一种淬火的作用^[20]。随着淬火温度的提高,激子复合发光强度逐渐增强^[27]。

当照射时间增加到 0.5 s 时,383 nm 发光峰迅速增强,其强度约为绿光发光峰的 2~3 倍。文献[21]曾报道在 ZnO 薄膜表面制备纳米壁网络结构时,发现近带隙发光增强 1~2 个数量级,与本文制备的纳米条纹的效果类似。除了光吸收增强的因素外,He-Ge 激光在纳米条纹狭缝中的局域也起着重要作用。理论和实验研究表明,激光会在纳米狭缝中局域,使得光强增加,从而导致吸收和非线性发光增强^[16,34]。

当 800 nm 飞秒激光的照射时间进一步增加到 2.5 s 时,近带隙紫外光发光峰显著下降,而绿光发光峰明显红移到 580 nm,发光强度增加。这是因为如果 800 nm 激光照射时间过长,一方面有淬火的作用,同时还对薄膜有明显的破坏和烧蚀作用,导致晶格破坏。缺陷态的增加会导致 383 nm 发光带减弱,同时黄绿光发光带明显增强,发光峰出现一定的红移。

图 3 给出了不同能流密度的 800 nm 飞秒激光照

射后烧蚀斑的光致发光谱,照射时间均为 0.1 s。当激光能流密度从 0.32 J/cm² 增加到 0.52 J/cm² 时,近带隙发光峰迅速下降,同时明显红移到 400 nm 附近。然而缺陷态发光明显增强,发光峰红移到 540 nm。从图 1(d)~(f)可以看出,在这样的飞秒激光照射条件下激光烧蚀斑中心处 ZnO:Al 薄膜部分被烧蚀掉,石英玻璃衬底上残留了一些纳米颗粒和不规则的纳米条纹。缺陷态大量产生会导致绿光发光带明显增强。

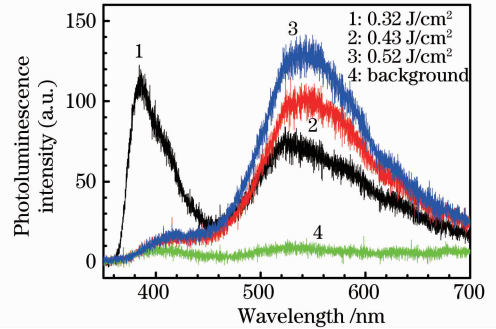


图3 不同能流密度的飞秒激光照射后烧蚀斑的光致发光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectra of the central area of the ablation spots under different energy flux densities

4 结 论

用重复频率 1 kHz,脉冲宽度 50 fs 的 800 nm 飞秒激光照射 ZnO:Al 薄膜,发现当能流密度为 0.32 J/cm²,照射时间 0.5 s 时在烧蚀斑上出现了周期约 200 nm 的规则条纹。增大能流密度或延长照射时间会导致纳米结构的破坏。用波长 325 nm 的 He-Ge 激光激发烧蚀斑,发现 383 nm 发光带能增强 1~2 个数量级,绿光发光带增强约一个数量级。提出 383 nm 发光带增强是由以下三个原因引起的:1)纳米周期结构导致对 He-Ge 激光的吸收增加;2) He-Ge 激发光场在纳米条纹的狭缝处局域增强;3) 800 nm 的飞秒激光对 ZnO:Al 薄膜的淬火作用。

参 考 文 献

- 1 M. Birnbaum. Semiconductor surface damage produced by ruby laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**: 3688~3689
- 2 Zhang Rongtao, Xu Li, Wu Keyue. Emission of low-dimensional structures formed by femtosecond laser interaction with semiconductor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 743~746
张荣涛,许丽,吴克跃.飞秒激光形成的半导体低维结构与发光[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 743~746
- 3 D. C. Emmony, R. P. Howson, L. J. Willis. Laser mirror damage in germanium at 10.6 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973,

- 23(11): 598~600
- 4 H. M. Van Driel, J. E. Sipe, J. F. Young. Laser-induced periodic surface structure on solids: a universal phenomenon[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**(26): 1955~1958
- 5 Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. R. Qiu *et al.*. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(24): 247405
- 6 贾 鑫, 贾天卿, 孙真荣 等. 单束、多束飞秒激光在 CdS, SiC 和 GaN 表面诱导一维和二维纳米周期结构[J]. *科学通报*, 2008, **53**(15): 1763~1767
- 7 J. Bonse, M. Munz, H. Sturm. Structure formation on the surface of indium phosphide irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(1): 013538
- 8 V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. P. Rajeev *et al.*. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(5): 057404
- 9 M. Shen, J. E. Carey, C. H. Crouch *et al.*. High-density regular arrays of nanometer-scale rods formed on silicon surfaces via femtosecond laser irradiation in water[J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(7): 2087~2091
- 10 X. Jia, T. Q. Jia, L. E. Ding *et al.*. Complex periodic micro/nanostructures on 6H-SiC crystal induced by the interference of three femtosecond laser beams[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 788~790
- 11 M. Huang, F. L. Zhao, Y. Cheng *et al.*. Mechanisms of ultrafast laser-induced deep-subwavelength gratings on graphite and diamond[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12): 125436
- 12 L. Qi, K. Nishii, Y. Namba. Regular subwavelength surface structures induced by femtosecond laser pulses on stainless steel[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(12): 1846~1848
- 13 X. Jia, T. Q. Jia, Y. Zhang *et al.*. Periodic nanoripples in the surface and subsurface layers in ZnO irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1248~1250
- 14 A. Vorobyev, C. L. Guo. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 041914
- 15 A. Vorobyev, A. Topkov, O. Gurin *et al.*. Enhanced absorption of metals over ultrabroad electromagnetic spectrum[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(12): 121106
- 16 Q. Z. Zhao, F. Ciobanu, S. Malzer *et al.*. Enhancement of optical absorption and photocurrent of 6H-SiC by laser surface nanostructuring[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(12): 121107
- 17 T. Q. Jia, M. Baba, M. Suzuki *et al.*. Fabrication of two-dimensional periodic nanostructures by two-beam interference of femtosecond pulses[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1874~1878
- 18 X. Jia, T. Q. Jia, Q. Zhang *et al.*. Optical absorption of two dimensional periodic microstructures on ZnO crystal fabricated by the interference of two femtosecond laser beams[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14401~14408
- 19 A. B. Djurisić, Y. H. Leung. Optical properties of ZnO nanostructures[J]. *Small*, 2006, **2**(8-9): 944~961
- 20 X. Xu, C. Guo, Z. Qi *et al.*. Annealing effect for surface morphology and luminescence of ZnO film on silicon[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, **364**(1-2): 57~63
- 21 Y. Zhang, W. F. Zhang, C. X. Peng. Strong ultraviolet luminescence of ZnO thin film with nanowall-network structures[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10696~10700
- 22 Chen Jiangbo, Wang Li, Su Xueqiong *et al.*. Effect of ZnO thin film of pulsed laser deposition by substrate temperatures[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1539~1544
陈江博, 王 丽, 苏雪琼 等. 基片温度对脉冲激光沉积 ZnO 薄膜性质的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1539~1544
- 23 A. Y. Vorobyev, V. S. Makin, C. L. Guo. Brighter light sources from black metal: significant increase in emission efficiency of incandescent light sources[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(23): 234301
- 24 Y. Kim, W. Lee, D. R. Jung *et al.*. Optical and electronic properties of post-annealed ZnO:Al thin films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(17): 171902
- 25 M. Berginski, J. Hüpkens, M. Schulte *et al.*. The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(7): 074903
- 26 Zhang Fuchun, Zhang Zhiyong, Zhang Weihu *et al.*. First-principles calculation of electronic structure and optical properties of AZO (ZnO:Al) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1025~1031
张富春, 张志勇, 张威虎 等. AZO(ZnO:Al) 电子结构与光学性质的第一性原理计算[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1025~1031
- 27 S. W. Xue, X. T. Zu, W. G. Zheng *et al.*. Effects of annealing and dopant concentration on the optical characteristics of ZnO:Al thin films by sol-gel technique[J]. *Physica B*, 2006, **382**(1/2): 201~204
- 28 T. H. Fang, S. H. Kang. Surface and physical characteristics of ZnO:Al nanostructured films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(11): 113512
- 29 H. X. Chen, J. J. Ding, X. G. Zhao *et al.*. Microstructure and optical properties of ZnO:Al films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering [J]. *Physica B*, 2010, **405**: 1339~1344
- 30 B. Z. Dong, H. Hao, G. J. Fang *et al.*. Comprehensive investigation of structural, electrical and optical properties for ZnO:Al films deposited at different substrate temperature and oxygen ambient[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(7): 073711
- 31 B. Z. Dong, G. J. Fang. Effect of thickness on structural, electrical, and optical properties of ZnO:Al films deposited by pulsed laser deposition[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(3): 033713
- 32 M. Huang, F. L. Zhao, Y. Cheng *et al.*. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and incident laser [J]. *ACS Nano*, 2009, **3**(12): 4062~4070
- 33 D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu *et al.*. High temperature excitonic stimulated emission from ZnO epitaxial layers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(8): 1038~1040
- 34 J. T. Zhu, L. Zhao, W. Li *et al.*. Great enhancement of infrared light absorption of silicon surface-structured by femtosecond laser pulses in N₂ ambient[J]. *Mater. Lett.*, 2006, **60**(17-18): 2187~2189