

ZnO 的激光分子束外延法制备及 X 射线研究^{*}

杨晓东^{1,2,3}, 张景文², 毕臻², 贺永宁², 侯洵^{1,2,4}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 西安交通大学 信息光子技术陕西省重点实验室, 西安 710049)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(4 河南大学 物理与信息光电子学院, 河南 开封 475000)

摘 要:利用激光分子束外延(L-MBE)技术在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底上生长出了沿 C 轴高度择优取向的 ZnO 外延薄膜, 并采用 Philips 四晶高分辨 X 射线衍射仪(Philip's X'Pert HR-MRD)对 ZnO 薄膜的表面及结构特性进行了研究. 应用小角度 X 射线分析方法(GIXA)对 ZnO 薄膜的表面以及 ZnO/ Al_2O_3 界面状况进行了定量表征. X 射线反射率(XRR)曲线出现了清晰的源于良好表面及界面特性的 Kiessig 干涉振荡峰, 通过对其精确拟合求得 ZnO 薄膜的表面及界面粗糙度分别为 0.34 nm 和 1.12 nm. ZnO 薄膜与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底的 XRD 在面(in-plane) Φ 扫描结果表明形成了单一的平行畴(Aligned in-plane Oriented Domains), 其在面外延关系为 $\text{ZnO}[10\bar{1}0] \parallel \text{Al}_2\text{O}_3[11\bar{2}0]$. XRD ω - 2θ 扫描以及 ω 摇摆曲线半峰宽分别为 0.12 度和 1.27 度, 这一结果表明通过形成平行畴及晶格弛豫过程, ZnO 薄膜中的应力得到了有效的释放, 但同时也引入了螺位错.

关键词:氧化锌; 激光分子束外延; 小角度 X 射线分析; X 射线反射率

中图分类号: O484.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)03-0485-5

0 引言

由于 ZnO 薄膜良好的激子发光特性以及其在紫外 LED 及 LD 等发光器件中的巨大应用潜力, ZnO 薄膜及其低维结构的研究目前引起了越来越多研究机构的关注^[1-3]. ZnO 最大的优势在于其高达 60 meV 的激子束缚能, 而其它宽禁带半导体材料如 GaN、ZnSe 的激子束缚能分别为 25 meV 和 22 meV. 高的激子束缚能使得 ZnO 在制作室温下运转的低阈值紫外 LED 及 LD 方面具有更大的优势.

同时, 表面结构对于薄膜的物理特性具有很重要的影响. 要制作 ZnO 基光电子器件, 必须要克服源于表面及界面缺陷所造成的制约. 而小角度 X 射线分析技术(Glancing-incidence X-ray analysis)作为一种对于多层及单层薄膜的界面和表面特性进行表征的强有力分析工具已经得到了广泛的应用^[4-6]. 目前该技术已经成功地应用于 GaAlN/GaN 结构及器件的界面与表面分析之中^[7]. 对于具有巨大潜力的 ZnO 及其异质结构而言, 采用 GIXA 对其表面及界面的研究仍然报道较少. 本文对 L-MBE 法生长的 ZnO 薄膜进行了高分辨 X 射线的研究, 介绍了采

用 GIXA 技术对于 ZnO 薄膜的表面及界面特性研究的定量结果.

1 实验

ZnO 外延生长所采用的衬底为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底, 激光光源采用 Lambda Physik 公司的 Compex 102 型 KrF 准分子激光器(波长为 248 nm, 脉冲宽度为 20 ns). 生长时脉冲频率设定为 3 Hz, 单脉冲能量为 100 mJ, 系统的生长速率为 0.003 nm/pulse. 激光靶材采用 99.999% 的高纯 ZnO 多晶陶瓷靶, 靶与衬底之间的距离为 7 cm. 真空系统的本底真空度为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa, 生长过程在 10^{-4} Pa 气氛中进行, 衬底温度为 300°C. 在外延生长前先对衬底进行 600°C 的热处理 1 h 时, 生长结束后对样品进行原位退火, 以提高晶体的结晶质量. XRD 衍射以及 GIXA 的测量均采用 Philips 公司 PW3040 型高分辨 X 射线衍射仪(Philips X'Pert HR-MRD), X 射线波长为 0.154 06 nm. 室温荧光 PL 谱的测量光源选用功率为 450 W 的氙灯(Xe 900), 激发波长为 325 nm. 荧光信号采用光电倍增管进行放大和输出.

2 实验结果及分析

2.1 ZnO 薄膜的 GIXA 厚度以及粗糙度表征

小角度 X 射线分析(GIXA)是一种对于薄膜的表面和界面情况进行定量表征的一种无损伤探测技

^{*}教育部 985 工程、教育部 211 工程二期、河南省杰出人才基金和教育部博士点基金资助

Tel: 029-82663122; E-mail: yd.yang@163.com

收稿日期: 2006-02-22

术·它结合了 X 射线反射率(XRR)以及小角度 X 射线荧光(GIXRF)两种方法,可对于单层及多层薄膜的厚度,表面与界面粗糙度以及化学组分,密度等参数进行全面的定量表征.

实验中对生长了 120 min 的 ZnO 外延薄膜进行了 XRR 测试.图 1 为所测 ZnO 薄膜的 X 射线反射率曲线及最佳理论拟合结果,实线代表实验曲线,圆圈代表拟合结果.从曲线中可以观察到清晰的干涉振荡峰,表明所生长的薄膜具有良好的表面与界面质量.通过对实验曲线的精确拟合,得到 ZnO 薄膜的厚度为 $(60.14\pm1.80)\text{nm}$,薄膜的表面粗糙度为 $(0.34\pm0.03)\text{nm}$,薄膜与衬底之间的界面粗糙度为 $(1.12\pm0.11)\text{nm}$.

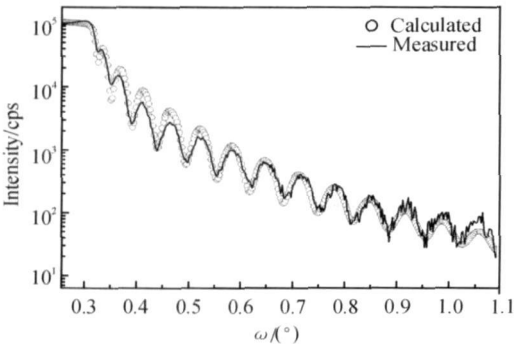


图 1 在 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底上生长的 ZnO 外延薄膜的 XRR 曲线以及拟合结果

Fig.1 XRR spectrum and simulated result of ZnO epi-layer on $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ substrate

2.2 ZnO 薄膜的高分辨 XRD 结构表征

分别对 ZnO 多晶靶材以及所生长的 ZnO 薄膜进行了 2θ 相分析以及 $2\theta\text{-}\omega$ 扫描,图 2(a)和(b)分别为 ZnO 高纯靶材及 ZnO 外延薄膜的扫描结果.图 2(a)中除了 ZnO 的特征峰之外,没有发现其它杂质的衍射峰,表明 ZnO 多晶靶材具有良好的质量.图 2(b)中从 $20^\circ\sim80^\circ$ 扫描范围内仅出现了 ZnO(0002)

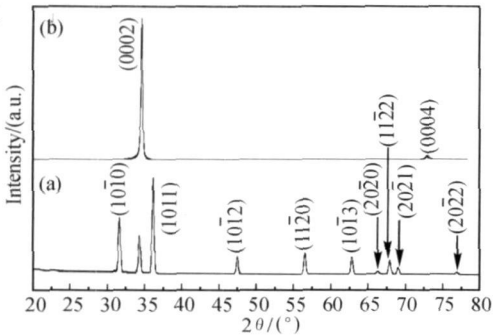


图 2 ZnO 的 X 射线衍射谱.(a) ZnO 多晶靶材的 XRD 2θ 扫描结果;(b) $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底生长的 ZnO 薄膜的 $2\theta\text{-}\omega$ 扫描结果

Fig.2 XRD spectra of ZnO.(a) XRD 2θ scan of ZnO polycrystalline target;(b) XRD $2\theta\text{-}\omega$ scan of ZnO film grown on $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$

面和 ZnO(0004)面的衍射峰,没有出现 ZnO 其它面的衍射峰,表明 ZnO 薄膜具有良好的 C 轴取向.ZnO(0002)面衍射峰的位置处于 $2\theta=34.5787^\circ$ 处,根据布喇格方程可以求得 ZnO 外延薄膜(0002)面的晶面间距为 $d=0.2592\text{nm}$,小于 ZnO 单晶体材料的晶面间距($d_0=0.2602\text{nm}$),表明薄膜中沿 C 轴方向产生了压应变;这是由于蓝宝石衬底与 ZnO 外延层之间大的晶格失配(18%)所引起的.

根据 (0002)面晶面间距 d 可计算出 c 轴压应变的大小为

$$\epsilon_{\text{in}} = \frac{c - c_0}{c_0} = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{0.2592 - 0.2602}{0.2602} = -0.0038 = -3800\text{ppm}$$

(1)

式中, c_0 和 d_0 分别为无应变 ZnO 的晶格常量和 (0002)面晶面间距.ZnO 薄膜的晶粒尺寸可用谢乐公式^[8-9]进行计算,公式为

$$D = 0.9\lambda/\beta\cos\theta$$

(2)

式中 $\lambda=0.15406\text{nm}$ 为 Cu K α 射线的波长, $\beta=0.25^\circ$ 为 ZnO(0002)面衍射峰的 2θ 半峰宽, θ 为布喇格衍射角,通过计算得到的 ZnO 的晶粒尺寸为 33nm .

图 3(a)为 ZnO 外延薄膜($10\bar{1}2$)面的 XRD 在面 (in-plane) Φ 扫描结果.作为对比,图 3(b) 显示了 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底($11\bar{2}3$)面的在面 Φ 扫描结果.从图 3(a)中可以看到仅出现了六个等间隔的衍射峰,分别来源于 ZnO($10\bar{1}2$)面的六个等价面的衍射,相邻的衍射峰之间相差 60° ,表明了 ZnO 良好的六方对称性.对比图 3(b)可以看出,ZnO($10\bar{1}2$)面的六个 Φ 角衍射峰同 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底($11\bar{2}3$)面的六个 Φ 角衍射峰峰位完全重合,从这一点可以确定 ZnO 薄膜与 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底之间的在面外延关系为 $\text{ZnO}[10\bar{1}0] \parallel \text{Al}_2\text{O}_3[11\bar{2}0]$.也就是说,相对于蓝宝石衬底,ZnO 薄膜的晶格以 C 轴为轴发生了 30° 的旋转,这种在面外延关系被称为平行畴^[10](aligned

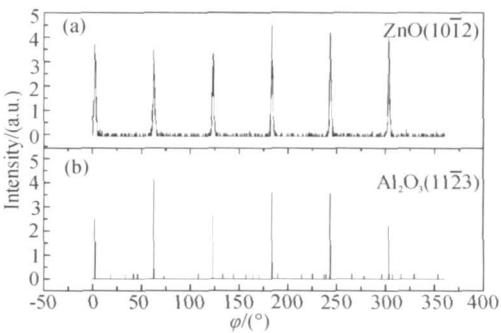


图 3 (a) ZnO ($10\bar{1}2$) 面(b) $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底($11\bar{2}3$) 面的 XRD 在面 Φ 扫描

Fig.3 XRD in-plane Φ scan results of (a) ($10\bar{1}2$) plane of ZnO film (b) ($11\bar{2}3$) plane of $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ substrate

in-plane oriented domains), 它的形成将有效地降低 ZnO 薄膜与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底间晶格失配. 单一的平行畴也产生于采用其它方法高温生长的 ZnO 外延薄膜中^[11-12]. 值得一提的是, 用本文所述方法生长的薄膜即使在 300℃ 的低衬底温度下也仅出现了平行畴, 没有出现混合相以及 30° 旋转畴^[10] (其对应的在面外延取向关系为 $\text{ZnO} [10\bar{1}0] \parallel \text{Al}_2\text{O}_3 [10\bar{1}0]$). 而目前所报道的出现单一平行畴的最低衬底温度均超过了 500℃. 在平行畴 ($\text{ZnO} [10\bar{1}0] \parallel \text{Al}_2\text{O}_3 [11\bar{2}0]$) 在面外延关系下, ZnO 薄膜与蓝宝石衬底之间的晶格失配为

$$m = \frac{a_L - a_S}{a_S} = \frac{\sqrt{3}a_{\text{ZnO}} - a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{\sqrt{3} \times 3.249 - 4.759}{4.759} = 18.2\% \tag{3}$$

若 ZnO 晶格相对于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底的晶格而言不发生 30° 的在面旋转, 即在 30° 旋转畴 ($\text{ZnO} [10\bar{1}0] \parallel \text{Al}_2\text{O}_3 [10\bar{1}0]$) 情况下, 可以求出晶格失配为

$$m = \frac{a_L - a_S}{a_S} = \frac{a_{\text{ZnO}} - a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{3.249 - 4.759}{4.759} = -31.7\% \tag{4}$$

从计算结果中可以得出结论, 相对于 30° 旋转畴而言, ZnO 晶格经过 30° 旋转所形成的平行畴将会减小 ZnO 薄膜与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 衬底之间的晶格失配.

图 4 为 ZnO (0002) 面的 ω -2 θ 扫描及 ω 摇摆曲线测试结果. 从图中结果来看, 这两种扫描方式下衍射峰的峰形均为具有良好对称性的高斯形分布, 但半峰宽相差较大. ω -2 θ 扫描半峰宽比 ω 摇摆曲线半峰宽下降了近一个数量级. 由于 ω -2 θ 扫描反映的是晶体内晶面间距的变化, 因此在该扫描模式下, ZnO (0002) 面衍射峰的半高全宽 (FWHM) 主要取决于两个因素, 即晶粒的尺寸以及由失配所产生的非均匀应变. 可表示为^[13]:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_e + \Delta\theta_D = \epsilon_m \tan\theta + \lambda / (2D \cos\theta) \tag{5}$$

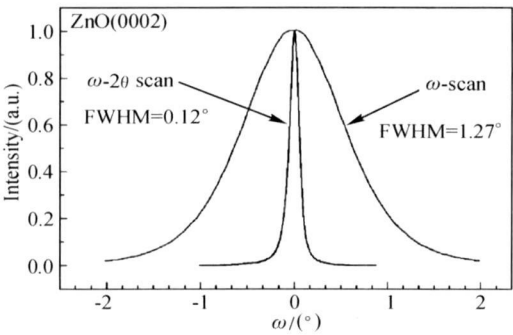


图 4 ZnO (0002) 面的 XRD ω -2 θ 扫描以及 ω 摇摆曲线结果
Fig. 4 XRD ω -2 θ scan and ω rocking curve of ZnO (0002)

式中 $\Delta\theta$ 为 ω -2 θ 扫描模式下衍射峰的半高全宽, $\Delta\theta_e$ 和 $\Delta\theta_D$ 分别为应变效应和晶粒尺寸效应所引起的展宽. D 为晶粒尺寸, ϵ_m 为薄膜中的非均匀应变. 从式 (5) 可以看出, 小的晶粒尺寸以及大的非均匀应变均会引起 ω -2 θ 衍射峰的展宽. 根据讨论, 本文所生长的 ZnO 薄膜的非均匀应变表现为 c 轴压应变, 大小为 0.38%, 该结果略低于 Chen Y F 研究小组^[13] 采用等离子体辅助分子束外延法 (Plasma-assisted MBE) 所生长的 ZnO 薄膜的 4% 的压应变结果. 而且 ZnO (0002) 面衍射峰的峰形非常对称, 没有出现由于薄膜内较大的应变所引起的低入射角方向的展宽以及衍射峰形非对称的情况^[13]. 以上两点表明所生长的 ZnO 薄膜中的应变较小. 然而相对于 Chen Y F 所报道的较窄的 ω -2 θ 衍射半高宽 (0.026°), 该样品衍射半高宽仍然很宽 (0.12°). 这是由于相对于其样品较厚的薄膜厚度 (1.5 μm), 样品厚度很薄 ($\sim 60\text{ nm}$), 因此 ω -2 θ 衍射峰的展宽主要是由于晶粒尺寸较小 (33 nm) 所致.

ω 摇摆曲线主要反映了晶体取向的变化. 一般而言, ZnO 非对称面摇摆曲线的展宽主要是由于刃位错所引起的, 而 (0002) 对称面的展宽主要是由螺位错所引起的. 产生位错的原因主要是由于 ZnO 薄膜与蓝宝石衬底之间仍存在较大的晶格失配, 即使通过平行畴降低了晶格失配 (从 31.7% 降为 18.2%), 但其 18.2% 的晶格失配值仍然很大. 晶格失配会导致应变的产生. 对于完全应变的 ZnO 薄膜而言, 为了同衬底的晶格常数保持一致, 外延层沿平行于衬底方向将受到压缩或拉伸, 从而导致了沿 C 轴方向晶面间距的变化. 由于本文所取样品 (0002) 面的晶面间距同 ZnO 体材料的晶面间距相接进, 因而说明薄膜内的应变得到了很大程度的释放, 薄膜接近于完全弛豫状态. 也可以认为应变的释放是以位错的产生为代价, 这也是导致 ω 摇摆曲线展宽的原因. 另外, 样品的厚度对于 ZnO 摇摆曲线半峰宽也有很重要的影响. 通常情况下随着样品厚度的增加, ω 摇摆曲线的半峰宽变窄^[14]. 因而样品厚度较薄 ($\sim 60\text{ nm}$) 是 ω 摇摆曲线展宽的另一个原因.

图 5 为 ZnO 薄膜的室温荧光光谱 (PL), 图中位于 378 nm (3.28 eV) 附近的紫外近带边发光峰来源于 ZnO 的自由激子复合^[13-15]. 从图中可以看出, 紫外发光峰的半高宽较宽, 为 211 meV, 这可能与 ZnO 中的螺位错缺陷有关. 位于 550 nm 附近微弱的黄绿发射带为 ZnO 的深能级辐射. 紫外近带边辐射 (NBE) 与深能级辐射 (DLE) 强度比为 24:1. 一般而言, 氧空位 V_o 以及锌间隙 Zn_i 等偏离化学计量比缺陷将导致 ZnO 中深能级的产生, 从而引起近带边

与深能级(NBE;DL)发光峰强度比例的下降. PL 结果与 XRD 结果相符合, 表明 ZnO 薄膜的位错及计量比缺陷仍需要加以改善, 以提高 ZnO 薄膜的发光质量.

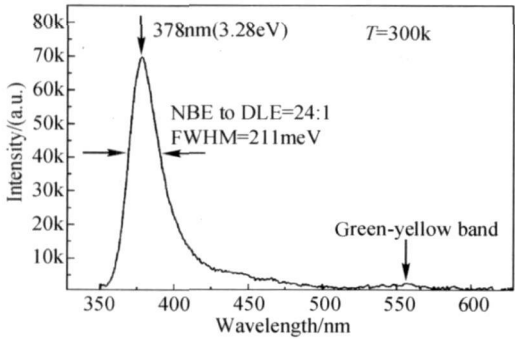


图 5 ZnO 薄膜的室温荧光 PL 谱测量结果
Fig.5 Time-integrated photoluminescence (TIPL) result of ZnO film measured at room temperature

3 结论

采用激光分子束外延法(L-MBE)在 Al₂O₃(0001)衬底上制备了沿 C 轴高度择优取向的 ZnO 外延薄膜. 利用小角度 X 射线分析技术(GIXA), 对于薄膜的结构信息如单层厚度, 表面粗糙度, 薄膜一衬底界面粗糙度进行了精确的表征. 高分辨 X 线衍射测试及计算分析结果表明, 所生长的 ZnO 外延薄膜的晶格相对于蓝宝石衬底发生了 30° 旋转, 形成了单一的平行取向畴(aligned in-plane oriented domains). 该过程降低了衬底与外延薄膜之间的晶格失配; 同时通过产生螺位错的方式释放了薄膜的内应力.

致谢: 感谢中国科学院西安光学精密机械研究所王水才研究员、贺俊芳副研究员在荧光光谱测试方面给予的帮助.

参考文献

[1] SONG Guo-li, SUN Kai-xia. Photoluminescence emission properties of nanocrystalline ZnO films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 590-593.
宋国利, 孙凯霞. 纳米 ZnO 薄膜的光致发光性质[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 590-593.

[2] XIA Y, YANG P D, SUN Y G. *et al.* One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization and application[J]. *Adv Mater*, 2003, **15**(5): 353~389.

[3] NING Guang-hui, LI Jia, ZHANG Chang-qing, *et al.* Electroluminescence Characteristic of ZnO Nanoparticles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 769-772.
宁光辉, 李佳, 张昌清, 等. ZnO 粉末的直流电致发光特性研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(5): 769-772.

[4] LEENAERS A J G, de BOER G D K. Applications of glancing incidence X-Ray analysis[J]. *X-Ray Spectrometry*, 1997, **26**: 115~121.

[5] SLOUTSKIN E, GANG O, KRAACK H, *et al.* Demixing transition in a quasi-two-dimensional surface-frozen layers[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89** (6): 065501~065504.

[6] STOEV K N, SAKURAI K. REVIEW on grazing incidence X-Ray spectrometry and reflectometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 1999, **54**: 41~82.

[7] ZHONG Z Y, AMBACHER O, LINK H A, *et al.* Influence of GaN domain size on the electron mobility of two-dimensional electron gases in AlGaIn/GaN heterostructures determined by X-ray reflectivity and diffraction[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **80** (19): 3521~3523.

[8] SUBRAMANYAM T K, SRINIVASULE N B, UTHANNA S. Characterization of DC reactive magnetron sputtered ZnO films prepared at different Oxygen pressures[J]. *Phys Stat Sol (A)*, 1999, **173**(2): 425-436.

[9] YANG Xiao-dong, ZHANG Jing-wen, ZOU wei, *et al.* The characterization of DC reactive magnetron sputtered ZnO films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1216~1219.
杨晓东, 张景文, 邹玮, 等. 紫外光电材料 ZnO 的反应溅射制备及研究. 光子学报[J], 2002, **31**(10): 1216~1219.

[10] OHKUBO I, OHTOMO A, OHNISHI T, *et al.* In-plane and polar orientations of ZnO thin films grown on atomically flat sapphire[J]. *Surface Science*, 1999, **443**(1-2): L1043-L1048.

[11] VISPUTE R D, TALYANSKY V, TRAJANOVIC Z, *et al.* High quality crystalline ZnO buffer layers on sapphire (001) by pulsed laser deposition for III-V nitrides[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **70**(20): 2735~2737.

[12] KIM K K, SONG J H, JUNG H J, *et al.* Photoluminescence and heteroepitaxy of ZnO on sapphire substrate(0001) grown by RF magnetron sputtering[J]. *J Vac Sci Technol A*, 2000, **18**(6): 2864~2868.

[13] CHEN Y F, BAGNALL D M, YAO T. ZnO as a novel photonic material for the UV region[J]. *Mat Sci Eng B*, 2000, **75**(2-3): 190-198.

[14] BELLINGERI E, MARRE D, PALLECCHI I, *et al.* High mobility in ZnO thin films deposited on perovskite substrates with a low temperature nucleation[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(1): 012109-1~012109-3.

[15] SONG Guo-li, LIANG Hong, SUN Kai-xia. Study on the Visible Emission Mechanism of Nanocrystalline ZnO Thin Films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 485~488.
宋国利, 梁红, 孙凯霞. 纳米晶 ZnO 可见发光机制的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(4): 485~488.

XRD Analysis ZnO Frown by Laser Molecular Beam Epitaxy

YANG Xiao-dong^{1,2,3}, ZHANG Jing-wen^{1,2}, BI Zhen², HE Yong-ning², HOU Xun^{1,2,3,4}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and photonics, X'ian Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, X'ian 710068, China)

(² Key Laboratory of Photonics Technology for Information, Shaanxi Province, X'ian Jiaotong University, X'ian 710049, China)

(³ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(⁴ School of physics and photoelectronics, Henan University, Kaifeng, 475000, China)

Received date: 2006-02-22

Abstract: Highly c-axis oriented ZnO epilayers were grown on $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)$ substrates by laser molecular beam epitaxy (L-MBE) at a low substrate temperature. High resolution X-Ray diffractometer (Philips X'Pert HR-MRD) was used to investigate the structural proprieties of ZnO films. Glancing incidence X-Ray analysis (GIXA) technique was also conducted to analyze quantitatively the layer thickness, the surface roughness and the interface roughness of ZnO top layer and ZnO/ Al_2O_3 interface. By the simulation of XRR curves, the calculated surface and interface rms roughness are 0.34 nm and 1.12 nm, respectively. XRD in-plane Φ scan results of ZnO and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)$ substrate show a 30° rotation of the ZnO unit cell with respect to the sapphire substrate, indicating the formation of the single aligned in-plane oriented domains. The results of XRD ω - 2θ scan and ω rocking curve indicate that the strain of ZnO epilayer has been effectively relaxed, by the formation of aligned in-plane orientation and lattice relaxation, while the screw dislocations were also formed at the same time.

Key words: ZnO; Laser molecular beam epitaxy; Glancing incidence X-ray analysis; X-ray reflectivity



YANG Xiao-dong was born in 1977. He received his M.S. degree in 2002, and now a Ph.D. candidate in physical electronics at Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, CAS. His research area focuses on wide bandgap semiconductor materials and devices.