

GaN 基 LED 与 Si 键合技术的研究*

阮育娇¹, 张小英², 陈松岩¹, 李成¹, 赖虹凯¹, 汤亮^{3**}

(1. 厦门大学 物理系, 半导体光子学研究中心, 福建 厦门 361005; 2. 厦门理工学院 数理系, 福建 厦门 361024;

3. 厦门大学 化学化工学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 采用金属键合技术结合激光剥离技术将 GaN 基 LED 从蓝宝石衬底成功转移到 Si 衬底上。利用 X 射线光电谱(XPS)研究不同阻挡层对 Au 向 GaN 扩散所起的阻挡作用, 确定键合所需的金属过渡层。利用多层金属过渡层, 在真空、温度 400 °C 和加压 300 N 下实现 GaN 基 LED 和 Si 的键合, 通过激光剥离技术将蓝宝石衬底从键合结构上剥离下来, 形成 GaN 基 LED/金属层/Si 结构。用金相显微镜及原子力显微镜(AFM)观察结构的表面形貌, 测得表面粗糙度(RMS)为 12.1 nm。X 射线衍射(XRD)和 Raman 测试结果表明, 衬底转移后, GaN 基 LED 的结构及其晶体质量没有发生明显变化, 而且 GaN 与蓝宝石衬底间的压应力得到了释放, 使得 Si 衬底上 GaN 基 LED 的电致发光(EL)波长发生红移现象。

关键词: 晶片键合; 金属过渡层; 激光剥离; GaN 基 LED

中图分类号: TN312; TN383 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2010)08-1202-04

GaN LED/ metals/ Si structure fabricated by bonding and laser lift off

RUAN Yir jiao¹, ZHANG Xiaoying², CHEN Songyan¹, LI Cheng¹, LAI Hongkai¹,

TANG Dingliang^{3**}

(1. Department of Physics, Semiconductor photonics research center, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of mathematics and Physics, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The effect of different barrier layers on gold diffusing into GaN is analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy(XPS). By using wafer bonding and laser lift off(LLO), which uses a KrF excimer laser(248 nm) to separate GaN LED from sapphire substrate, an light emitting diode(LED) GaN epi layer is successfully transferred onto a Si substrate at the temperature of 400 °C. The surface of samples after laser lift-off(LLO) is observed with microscope and atomic force microscope(AFM). The root-mean square roughness of the transferred GaN LED surface is about 12.1 nm. The X-ray diffraction(XRD) and Raman test results show that the quality of LED on Si substrate has not obviously change, but the electroluminescence peak wavelength of GaN-based LED on Si substrate shows a red shift compared to that on sapphire substrate.

Key words: wafer bonding; intermediate metals; laser lift-off; GaN-based LED

1 引言

GaN 材料及其光电子器件的研制是近年的热点之一^[1,2]。由于缺少 GaN 单晶, GaN 基 LED 一般是外延生长在蓝宝石衬底上, 然而蓝宝石的热导率和电导率都很差, 影响了器件的性能。而 Si 衬底具有导热性好、成本低和易于集成等优点^[3], 因此在 Si 衬底上异质外延 GaN 受到关注。但是, GaN 与 Si 衬底间存在较大的晶格失配(17%)和热膨胀系数差异(GaN 为 5.6

$\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, Si 为 $2.6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)^[4], 很难生长出高质量的 GaN 外延层, 这是制约 Si 基 GaN 材料与器件发展的瓶颈。由于外延生长的困难, 利用键合技术并结合激光剥离技术将 GaN 外延层转移到 Si 衬底上, 成为制作 Si 基 GaN 器件的重要手段。但由于 GaN 与 Si 的热膨胀系数差异较大, 如果采用直接键合, 在冷却过程中, 键合界面上会存在很大的热应力使片子容易分裂开^[5]。而利用金属过渡层进行键合, 由于界面易于形成欧姆接触, 界面寄生参数小和键合温度低, 成为近年的主要研究方

* 收稿日期: 2010-01-26

** 基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(60837001); 福建省自然科学基金资助项目(2008J0221); 福建省教育厅科技项目(JB08215)

** E-mail: tdl9@xmu.edu.cn

向^[6-8]。

利用金属键合的方法已成功制备 Si 衬底上的 GaN 基 LED 结构,但键合金属在较高温度下会向半导体晶片发生扩散,降低器件的寿命,而目前在这方面的研究较少。因此,本文利用 X 射线光电子谱(XPS)分析了不同扩散阻挡层的作用,确定了键合所需的金属过渡层;成功地将 GaN 基 LED 从蓝宝石衬底转移到 Si 衬底上,并结合 X 射线衍射(XRD)、Raman 光谱、电致发光(EL)光谱测试等分析了衬底转移前后 GaN 基 LED 的结构及发光特性。

2 实验及结果分析

采用 P 型(100)面 Si 片和蓝宝石衬底上生长的 GaN。Si 片和 GaN 经过清洗后,采用磁控溅射在其表面沉积多层金属薄膜。

2.1 金属过渡层的研究

Au/Si 共晶键合由于其共晶温度低,而且 Au 具有很好的延展性,可以吸收键合和剥离所产生的热应力,因此 Au/Si 共晶键合受到青睐^[8-10]。但由于 Si 衬底表面存在着自然氧化的 SiO₂ 层,而 Au 与 SiO₂ 的粘结性不强,所以引入 Ti 为中间层,溅射在 Si(SiO₂) 衬底和 Au 层间,增强两者的粘结性^[10]。而采用金属作为键合过渡层,还应考虑如何避免 Au 向 GaN 扩散的问题,从而不影响器件性能。因此,研究了不同扩散阻挡层所起的作用。

Si 片经过标准清洗后,在其表面溅射 Ti 和 Au,厚度分别为 40 nm 和 200 nm。样品 A 是溅射 Ti/Au 的 GaN 与已溅射金属的 Si 片键合而得到的键合片,键合温度为 400 °C,恒温时间为 1 h,并施加 300 N 的压力。键合完成后,将键合片固定在竖直的电动平台上,用 7SS3 运动控制软件分别在 X、Y 方向上移动平台,从而实现激光脉冲对整个键合片的扫描。实验中,使用波长为 248 nm、脉冲宽度为 25 ns 的 KrF 准分子激光器。激光透过蓝宝石后在蓝宝石和 GaN 界面处产生强吸收,使得 GaN 发生热分解,生成 N₂ 和低熔点的金属 Ga,通过熔化 Ga 实现 GaN 外延层和蓝宝石衬底的分离,这样就成功地把 GaN 转移到了 Si 衬底上。

样品 B 是溅射 Ni/Au 的 GaN 与已溅射金属的 Si 片键合而得到的键合片,键合与激光剥离过程与样品 A 一致。

对样品剥离后得到的 Si 基 GaN 进行表面及深度的 XPS 测试,比较金属 Ti 和 Ni 对 Au 扩散到 GaN 所起的阻挡作用。

图 1 是样品剥离后在距离 GaN 表面 0 nm 及 45 nm 处对 Au4f 峰位附近的精细扫描谱,可以看出,样品 B 的 GaN 处有 Au 元素的存在,而样品 A 的 GaN 表面却没有发现 Au4f 的峰。这说明,样品 A 所用的金属层中,Ti 对 Au 扩散到 GaN 起到更好的阻挡作用。因此,可采用 Ti 作为扩散阻挡层。

2.2 GaN 基 LED 与 Si 的键合及剥离

利用金属键合及剥离技术已经成功地将 GaN 薄膜从蓝宝石衬底转移到 Si 衬底,键合温度为 400 °C,激光剥离的阈值能量密度为 300 mJ/cm^{2[11]}。

为了实现 Si 基上的光电集成,在之前的实验基础上进一步研究了 GaN 基 LED 与 Si 的键合及剥离,GaN 基 LED 结构如图 2 所示。

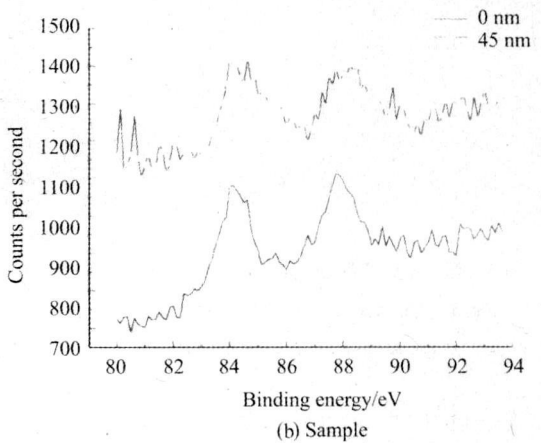
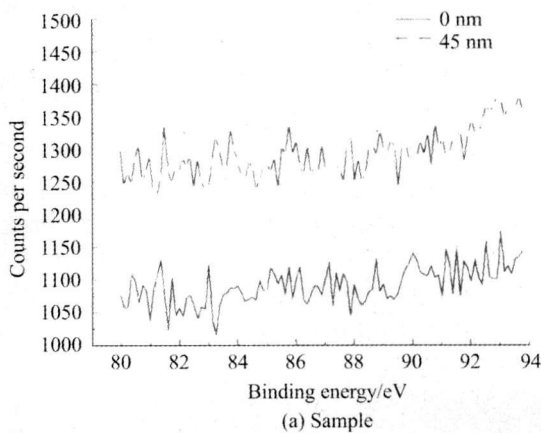


图 1 样品 A 和 B 剥离后 GaN 不同深度的 Au4f 峰
Fig 1 Au4f XPS core level spectra of samples A and B

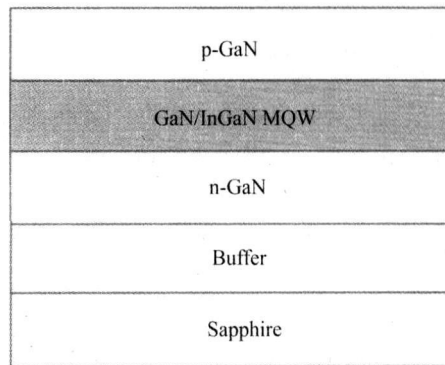


图 2 GaN 基 LED 结构

Fig. 2 Illustration of the LED structure

2.2.1 实验过程

在清洗后的 Si 片上溅射了 Ti/Au 金属层。而 GaN 基 LED 通过有机溶液超声清洗后,先沉积金属 Ni/Au 层各 20 nm,然后在 550 °C 下 O₂ 氛围中退火 30 min,这主要是为了能够与 p-GaN 构成欧姆接触^[12];接着依次溅射 Cr/Ti/Au,厚度分别为 50、40 和 200 nm,其中 Cr 层能够防止金属层间的互扩散。溅射完金属后,将 Si 片和 GaN 基 LED 结构直接面对面地叠放在一起,放入键合机中。在真空环境下,400 °C 恒温 30 min,施加压力为 300 N。键合完成后通过激光剥离技术就形成了

LED/金属层/Si结构。

2.2.2 实验结果及分析

图3给出激光剥离后样品的金相显微镜及原子力显微镜(AFM)照片,可以看出,剥离后样品表面总体较为平整。AFM测试结果表明,激光剥离后,GaN基LED表面的均方根粗糙度(RMS)约为12.1 nm。与剥离前相比RMS有所增加,这主要有两个原因:1) GaN在剥离过程发生热分解,引起表面粗化;2) 是蓝宝石衬底剥离后,AFM测试面为缓冲层表面,而缓冲层本身质量较差,所以测得的RMS值会相对较大。因此,在实际器件制作过程,应利用刻蚀技术将缓冲层去除。

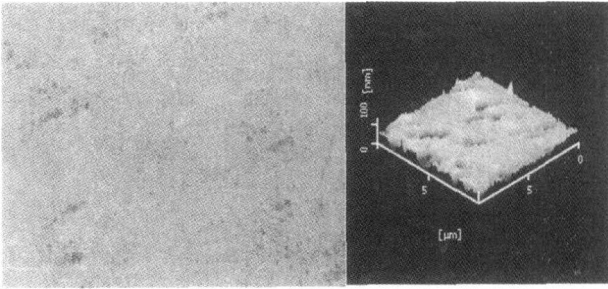


图3 激光剥离后样品的显微镜及AFM照片
Fig 3 The microscope and AFM image of the sample after laser lift off

为了进一步分析衬底转移后样品的晶体质量,对样品进行XRD测试。图4为衬底转移前后LED结构的XRD谱,可以看出,剥离后LED的量子阱结构没有被破坏,谱图的半高宽也没有发生明显变化,说明键合与激光剥离对LED的质量和结构并没有产生明显损伤。

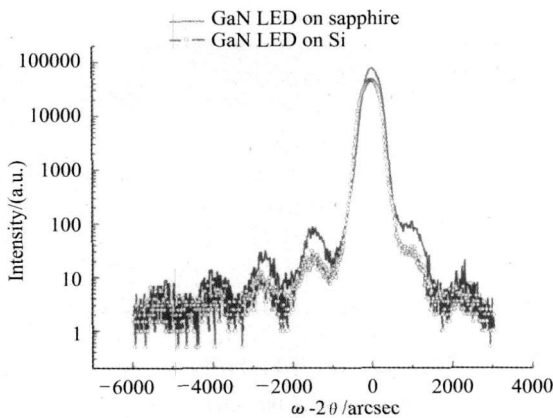


图4 衬底转移前后 GaN 基 LED 结构的 XRD 谱
Fig 4 XRD spectra of GaN based LED on sapphire and on Si

进一步研究该方法对 GaN 基 LED 器件性能的影响。由于 GaN 所受应力大小会影响器件的内量子效率,从而影响其发光性能。因此,需要通过 Raman 测试来研究衬底转移前后 GaN 所受应力的变化情况。由于蓝宝石与 GaN 两者的热膨胀系数相差较大,所以在生长过程中,会在 GaN 中引入压应力。而 Si 与 GaN 的键合及蓝宝石衬底的剥离,都会使 GaN 所受的

应力发生变化。

图5为衬底转移前后 GaN 基 LED 结构的 Raman 光谱,从图可以发现,衬底转移后 GaN 的 E_2 峰发生了蓝移,在蓝宝石衬底上 GaN 的 E_2 模峰位为 568.95 cm^{-1} ,而 Si 衬底上 GaN 的 E_2 模峰位为 567.39 cm^{-1} ,这种蓝移说明了衬底转移后 GaN 外延层所受的压应力得到释放,根据 Raman 频移与 GaN 外延层所受应力的关系式 $\Delta\omega = 6.2Q_{\text{GaN}}^{[13]}$,可以得到释放的应力为 252 MPa。应力释放的原因,可归结为去除了引起压应力的蓝宝石衬底。

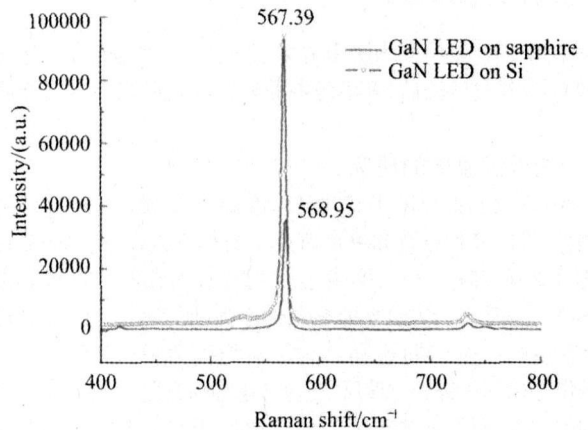


图5 衬底转移前后 GaN 基 LED 结构的 Raman 光谱和 EL 光谱

Fig. 5 Raman spectra and EL of GaN based LED on sapphire and on Si

图6是衬底转移前后的 GaN 基 LED 在通正向电流时的 EL 光谱。蓝宝石衬底上 GaN 基 LED 的 EL 光谱出现多个干涉峰,这主要是由于量子阱产生的荧光经界面反射后引起光的干涉^[14]。而转移到 Si 衬底上的 GaN 基 LED 由于剥离后的表面比原来的表面更为粗糙,所以 Si 衬底上 GaN 基 LED 的干涉现象并不明显。对比衬底转移前后的 LED 发光峰值可以看出,剥离后即在 Si 衬底上的 GaN 基 LED 发光波长发生了红移,红移 12.9 nm。由 Raman 测试可知,剥离后 LED 所受应力

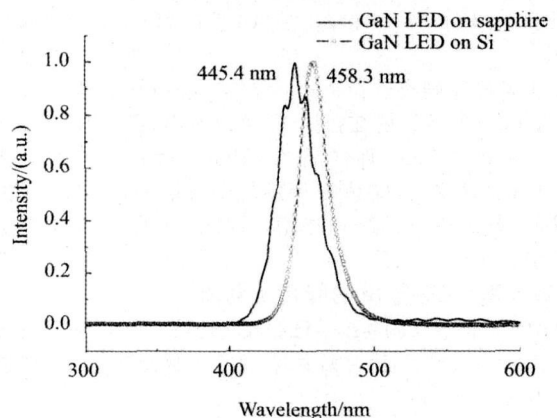


图6 衬底转移前后 GaN 基 LED 结构的 EL 发光谱
Fig. 6 EL of GaN based LED on sapphire and on Si

发生了改变,由于应力大小的不同,使 InGaN 量子阱发光层的极化场发生了变化,从而导致发光波长峰值的红移^[5]。

3 结 论

采用金属键合技术并结合激光剥离技术将 GaN 基 LED 从蓝宝石成功转移到 Si 衬底上,形成 GaN 基 LED/金属层/Si 结构。XPS 测试结果表明,Ti 对 Au 向 GaN 扩散起到了更好的阻挡作用。剥离后 GaN 基 LED 表面粗糙度约为 12.1 nm。XRD、EL 和 Raman 测试表明,采用金属过渡层进行键合并不会影响 GaN 基 LED 的结构及其光学特性,而且衬底转移后 GaN 外延层受到的应力得到了释放。键合与剥离技术是制备垂直 GaN 基 LED 的关键,同时也为研制 Si 基 GaN 光电子器件及 Si 基集成开辟了一条新的途径。

参考文献:

- [1] Shur M S, Davis R F. GaN-based materials and devices: growth, fabrication, characterization and performance[M]. World Scientific, Singapore, 2004. 1. 5.
- [2] FAN Jing-mei, WANG Liang-chan, LIU Zhi-qiang. The influence of surface roughening on GaN based vertical-electrodes LEDs [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, (8): 994-996.
樊晶美, 王良臣, 刘志强. 表面粗化对 GaN 基垂直结构 LED 出光效率的影响[J]. 光电子 • 激光, 2009, (8): 994-996.
- [3] XIONG Chuan-bing, JIANG Feng-yi, FANG Wen-qing, et al. The characteristics of GaN based blue LED on Si substrate [J]. Journal of Luminescence, 2007, 122-123: 185-187.
- [4] HONG Wei, ZHU Li-ping, YE Zhi-zhen, et al. Research Progress of GaN based LED on Silicon [J]. Materials Review, 2005, 19 (1): 97-100.
洪伟, 朱丽萍, 叶志镇等. 硅衬底 GaN 基 LED 研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(1): 97-100.
- [5] Yuan Zhi-jun, Gao Wen-sheng, Tang Xin-long, et al. Research advances in wafer bonding technique of GaN material [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(6): 377-381.
袁志军, 高文胜, 唐昕龙等. GaN 材料键合技术研究进展[J]. 半导体光电, 2003, 24(6): 377-381.
- [6] Wong W S, Cho Y, Weber E R, Sands T, et al. Structural and optical quality of GaN metal/Si heterostructures fabricated by

excimer laser lift-off [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(13): 1887-1889.

- [7] Wong W S, Sands T, Cheung N W, et al. In_xGa_{1-x}N light emitting diodes on Si substrates fabricated by Pd-In metal bonding and laser lift-off [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(18): 2822-2824.
- [8] Hsu S C, Liu C Y. Fabrication of thin-GaN LED structures by Au-Si wafer bonding [J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2006, 9(5): 171-173.
- [9] Arokiaraj J, Cheong Kee Leong, Vivian Lixian, et al. Bonding of GaN structures with Si(100) substrates using sequentially deposited NiAu metal layers [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 124105-1-3.
- [10] Wolffenbuttel R F. Low-temperature intermediate Au/Si wafer bonding; eutectic or silicide bond [J]. Sensors and Actuators A, 1997, 62: 680-686.
- [11] ZHANG Xiao-ying, RUAN Yu-jiao, CHEN Song-yan, et al. GaN metal/Si heterostructure fabricated by metal bonding and laser lift-off [J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(12): 12300-1-4.
- [12] YIN Yian. The research of GaN based blue-violet laser diodes [D]. Xiamen University, 2008.
尹以安. GaN 基蓝紫光激光器制备的理论与关键技术的研究 [D]. 厦门大学, 2008.
- [13] Kozawa T, Kachi T, Kano H, et al. Thermal stress in GaN epitaxial layers grown on sapphire substrates [J]. J Appl Phys, Part 1, 1995, 77: 4389-4392.
- [14] Yablonskii G P, Lutsenko E V, Marko I P, et al. Stimulated Emission, Electro- and Photoluminescence of InGaN/GaN EL-Test and SQW Heterostructures Grown by MOVPE [J]. Phys Stat Sol (A), 2000, 180: 149-155.
- [15] Shapiro N A, Feick H, Hong W, et al. Luminescence energy and carrier lifetime in InGaN/GaN quantum wells as a function of applied biaxial strain [J]. J Appl Phys, 2003, 94(7): 4520-4529.

作者简介:

阮育娇 (1985-), 女, 福建漳州人, 博士研究生, 主要从事 Si 基半导体材料与光电器件的研究。