

垂直电极结构 GaN 基发光二极管的研制*

康香宁[†] 包 魁 陈志忠 徐 科 章 蓓 于彤军 聂瑞娟 张国义

(北京大学物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室,
北京大学宽禁带半导体研究中心, 北京 100871)

摘要: 利用激光剥离技术(LLO)和晶片键合技术将 GaN 基发光二极管(LED)薄膜与蓝宝石衬底分离并转移到 Si 衬底上,高分辨 X 射线衍射(HRHRD)和阴极荧光谱(CL)结果表明激光剥离过程没有影响 GaN 量子阱的结构和光学性质,GaN 和 InGaN/GaN 多量子阱的发光峰都呈现红移,这都来源于去除蓝宝石后薄膜中应力的释放.采用金属 In 和 Pd 的合金化键合过程解决了 GaN 材料与 Si 衬底的结合问题,结合逐个芯片剥离和键合的方式实现了 GaN 大面积均匀转移.成功研制了激光剥离垂直电极结构的 GaN 基 LED,*L-I* 测试特性表明器件的热饱和电流和出光功率都有很大的提高.

关键词: GaN; LED; 激光剥离; 金属合金键合; 垂直电极

PACC: 4255P; 7855; 3250

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0482-04

1 引言

随着 GaN 基 III-V 族半导体材料生长和短波长器件制作等方面不断取得重大技术突破,宽带隙半导体材料的发展异常迅速,并已在光电子、高温大功率器件和高频微波器件等方面开拓了非常广阔的应用空间,尤其是蓝光 LED 在全色显示和全固态白光照明等方面具有很大的市场潜力.解决器件散热问题,提高 LED 的发光效率发展大功率器件是 GaN 基 LED 目前发展所面临的主要问题^[1~5].

蓝宝石衬底由于其稳定性好,与 GaN 有相同的晶格对称性,是目前应用最成熟、最经济的 III-V 族氮化物生长衬底.但是由于蓝宝石导电性能很差,常温下电阻率大于 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$,对于器件的制备必须在绝缘衬底上形成 p 型和 n 型电极在同一侧的电流注入结构;并且导热性能不好,在 100°C 约为 $0.25\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$,这对 GaN 基器件的性能影响很大,特别是在大面积大功率器件中,散热问题非常突出;同时蓝宝石硬度太高,不容易刻蚀,致使加工过程复杂.虽然目前在 Si, GaAs 等导电和导热性较好的衬底生长 GaN 基材料的进展非常迅速,但是由于晶格对称性和晶格失配的限制 GaN 晶体生长质量与蓝宝石上的相差较大.利用蓝宝石衬底和 GaN 材料能带大小的不同,选择激光的光子能量,利用 GaN 界面处对激光强烈吸收的特点可以将 GaN 材

料从蓝宝石上剥离^[6],并结合异质材料的键和技术将 GaN 薄膜转移至 Si 等衬底上,形成垂直的电极结构,改善器件的出光性能^[7,8].由于该项技术对于 GaN 基 LED 的发展非常具有潜力,近两年来受到了广泛的重视,国际上已经有转移至 Si 衬底及金属热沉上的垂直结构 GaN LED 的报道^[9,10],但目前还没有实用化的商品,这是由于其中仍存一些有关物理机制和器件结构的问题尚未解决.本文结合激光剥离技术和金属 In 的合金化键合技术,成功制备了垂直电极结构的 GaN 基 LED,解决了厚度仅有 $4\mu\text{m}$ 左右的 GaN 薄膜的大面积均匀键合和剥离,通过高分辨 X 射线和阴极荧光谱分析了激光剥离过程对 GaN 量子阱的影响,并测试了所研制的垂直电极结构 LED 器件的性能.

2 实验

在 *c* 面单抛光蓝宝石衬底上用低压 MOCVD 技术生长的传统结构的 GaN 基 LED 外延片,LED 外延层厚度约为 $4\mu\text{m}$,其依次包括低温成核层、 $1.5\mu\text{m}$ 的非掺杂缓冲层、 $2\mu\text{m}$ 的 n 型 GaN 层、5 个周期的 InGaN/GaN 量子阱有源区、 $0.2\mu\text{m}$ 的 p 型 GaN 层.对样品进行常规有机清洗(丙酮、乙醇、去离子水依次超声)、酸洗($\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$ 后(1min)蒸发沉积 Ni/Au(5nm/5nm),并在氧气氛中 500°C 合金 5min 形成 p 型欧姆接触,器件尺寸为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$,方形芯片间距为 $80\mu\text{m}$ 作为芯片

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60607003,60676032,60577030)

[†] 通信作者. Email: xnkang@pku.edu.cn

2006-12-04 收到,2006-12-26 定稿

隔离槽, 沉积键合金属 Ti/Pd/In (10nm/300nm/1000nm) 并将 GaN 与 Si 在真空键合设备中加压加热实现大面积的晶片键合, 键合后低熔点金属 In 和高熔点金属 Pd 形成熔点在 600℃ 以上的 PdIn 合金. 用工作波长为 248nm 的 KrF 准分子激光从蓝宝石衬底一侧对每个芯片进行逐个扫描, 将每个芯片完整地转移到 Si 衬底上, 实现 GaN 薄膜的大面积均匀剥离, 激光能量为 800mJ/cm², 脉冲宽度为 25ns. 用 HCl:H₂O=1:1 溶液清洗样品表面残余的金属 Ga, 再用 ICP 干法刻蚀技术去除非掺杂 GaN 层, 制备 n 型电极 Ti/Al/Ti/Au (20nm/100nm/20nm/200nm), 划片后得到转移到 Si 上的具有垂直电极结构的 GaN 基 LED 芯片, 同样的外延片也制备了尺寸一样的常规侧向电极结构 LED 芯片. 图 1 是用 HRXRD 对 GaN 芯片进行测试的结果, 从图中可以同时看到 Si, GaN 及金属合金结构, 表明 GaN 材料和 Si 衬底之间由导热和导电性能良好的合金材料紧密连接, 相比导电胶等粘结技术具有好的强度和高温特性; 并且金属合金层在没有额外的引入反射层的同时还能提供一定的反射率, 避免了 Si 衬底对光的吸收, 经测量合金层的反射高于 60%.

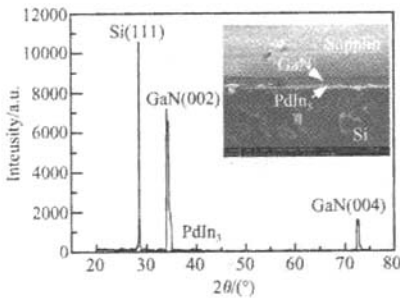


图 1 Si 衬底上 GaN 材料的高分辨 X 射线衍射曲线 其中插图是 Si 衬底/合金材料 PdIn/GaN 结构的截面照片.
Fig.1 High resolution X-ray diffraction pattern of GaN on Si substrate Inset is the cross section SEM photograph of Si/PdIn/GaN.

3 结果与讨论

为了研究激光剥离过程对 GaN 量子阱结构光学性能的影响, 我们首先对激光剥离 LED 样品进行了(002)方向的高分辨 X 射线衍射扫描, 图 2 给出了激光剥离前后扫描的结果, 从图中可以看出激光剥离后样品呈现清晰的量子阱衍射卫星峰, 这表明量子阱结构在激光剥离过程中未曾受到损害, 这是由于发生在界面处的瞬间热分解过程只影响到距离分解界面 50nm 左右的位置, 其他区域仍保持原

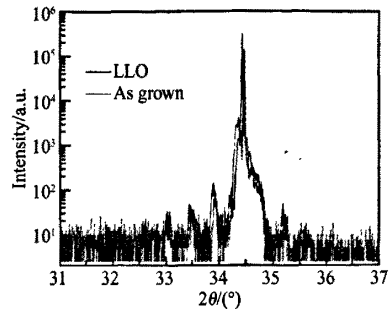


图 2 GaN LED 激光剥离前后(002)方向 2θ 扫描曲线
Fig.2 Two-theta scan curve of (002) direction for GaN based LED before and after LLO process

有的晶体质量, 关于激光剥离后界面处损伤程度的研究本课题组已在它处报道^[11]. 图 2 中激光剥离前后样品峰位变化非常小, 不能明确地给出样品中应力的变化情况, 因此我们对样品进行了阴极荧光谱 (CL) 测量, 结果如图 3 所示. 从图中发光峰的强度和主峰的半宽可以看出, 量子阱的发光特性没有受到激光剥离过程的破坏, 对于激光剥离 n 型 GaN 向上的样品由于量子阱上的 n 型 GaN 层较厚, 超出了电子束的作用距离, 因此只看到 373nm 处的 GaN 电致发光峰, 对于 p 型 GaN 向上的激光剥离样品, 发现激光剥离后 InGaN/GaN 多量子阱发射峰的峰位较未剥离的样品红移 6nm, 而两个剥离后样品 GaN 的峰位均出现红移, 只是红移的程度不同. 首先所有峰位的红移都是由于去除蓝宝石衬底后 GaN 基薄膜所受的压应力得到了部分释放所致. 虽然多量子阱中的晶格应力一方面取决于阱垒之间的应力状态, 另一方面取决于 GaN 材料, 但是由于量子阱是生长在厚层 n 型 GaN 上的, 因此其主要受 n 型 GaN 材料中应力变化的影响, 而改变 InGaN/GaN 多量子阱中阱、垒之间的应力状态, 如改变阱中的 In 组分或采用 AlGaIn 及 AlGaInN 等材料做

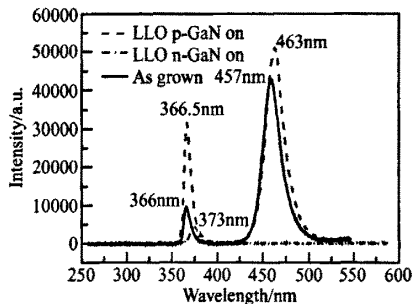


图 3 GaN LED 激光剥离前后的 CL 谱
Fig.3 Cathodoluminescence spectra of GaN based LED before and after LLO process

全层,提高多量子阱的稳定性可以克服蓝宝石衬底的去除对有源区的影响;其次由于 n 型向上的样品更接近生长界面受蓝宝石影响较大,因此剥离后峰位比 p 型向上的样品移动范围大些。

图 4 是采用激光剥离和晶片键合技术制备的垂直电极结构 GaN 基 LED,管芯尺寸为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 。图 5 是激光剥离垂直电极结构 LED 和常规侧向电极结构 LED 芯片的 $L-I$ 特性。可以看出转移至 Si 上的垂直电极结构的 GaN 基 LED 其饱和电流、出光功率都有明显的提高,激光剥离垂直电极结构 LED 的出光强度比常规的侧向 LED 提高了 44%,其饱和电流推迟了 50mA,这一方面是由于同样尺寸的垂直电极结构 LED 的有源发光区面积比侧向 LED 的大,另一方面是由于垂直电极 LED 是通过金属介质键合到 Si 衬底上,具有好的散热性能,并且合金层 PdIn 还提供了较高的反射率。

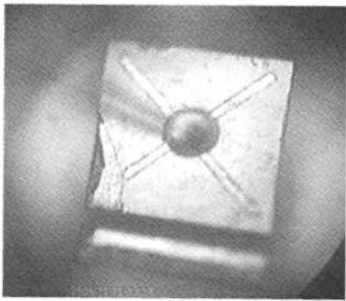


图 4 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 激光剥离垂直电极结构 GaN 基 LED
Fig. 4 Vertical electrode structure GaN based LED by LLO Chip size is $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$.

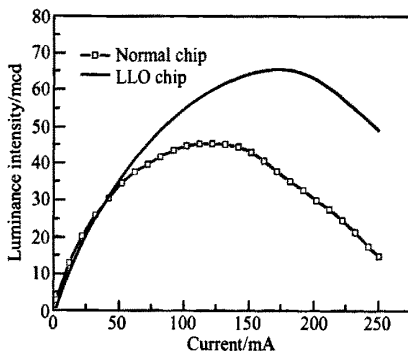


图 5 激光剥离垂直电极结构 LED 和常规侧向电极结构 LED 芯片的 $L-I$ 特性
Fig. 5 $L-I$ characteristic of LLO vertical electrode and normal lateral structure LED chips

4 结论

利用激光剥离技术和晶片键合技术将 GaN 基薄膜与蓝宝石衬底分离并转移到 Si 衬底上。高分辨 X 射线衍射 (HRXRD) 的测量表明,激光剥离过程没有影响 GaN 多量子阱的晶体结构和质量;阴极荧光光谱也表明激光剥离后 GaN 多量子阱仍旧保持较好的光学性能,峰位的红移是由于蓝宝石衬底的去除使 GaN 所受的压应力得到了释放所致。金属 In 和 Pd 的合金化键合解决了 GaN 材料与 Si 衬底的结合问题,为垂直电极结构 LED 提供了好的散热性能。最后成功研制出了激光剥离垂直电极结构的 GaN 基 LED,出光效率提高了 44%。

参考文献

- [1] Nakamura S. First III-V-nitride-based violet laser diodes. *J Cryst Growth*, 1997, 170, 11
- [2] Maxwell R. LED or lamp flasher; Minimum parts counting designed for 3V battery operation. http://www.ee.washington.edu/circuit_archive/circuits
- [3] Chen C H, Chang S J, Su Y K, et al. Nitride-based cascade near white light-emitting diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(7), 908
- [4] Cao X A, Stokes E B, Sandvik P. Optimization of current spreading metal layer for GaN/InGaN based light emitting diodes. *Solid-State Electron*, 2002, 46, 1253.
- [5] Tamura T, Setomoto T, Taguchi T. Illumination characteristic of lighting array using 10 candela-class white LEDs under AC, 100V operation. *J Lumin*, 2000, 87~89, 1180
- [6] Kelly M K, Ambacher O, Dimitrov R, et al. Optical process for liftoff of group III-nitride films. *Phys Status Solidi A*, 1997, 159, R3
- [7] Wong W S, Sands T, Cheung N W. Damage-free separation of GaN thin films from sapphire substrates. *Appl Phys Lett*, 1998, 72, 599
- [8] Wong W S, Sands T, Cheung N W, et al. Fabrication of thin-film InGaN light-emitting diode membranes by laser lift-off. *Appl Phys Lett*, 2004, 85, 2757
- [9] Wu D S, Hsu S C, Huang S H, et al. GaN/mirror/Si light-emitting diodes for vertical current injection by laser lift-off and wafer bonding techniques. *Jpn J Appl Phys*, 2004, 43(8) A, 5239
- [10] Horng R H, Lee C E, Hsu S C, et al. High-power GaN light-emitting diodes with patterned copper substrates by electroplating. *Phys Status Solidi A*, 2004, 201(12), 2786
- [11] Chen Weihua, Kang Xiangning, Xu Ke, et al. TEM study of GaN-based structures prepared by laser lift-off. *Proceeding of 13th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy*, Miyazaki, Japan, 2006

Vertical Electrode Structure GaN Based Light Emitting Diodes*

Kang Xiangning[†], Bao Kui, Chen Zhizhong, Xu Ke, Zhang Bei,
Yu Tongjun, Nie Ruijuan, and Zhang Guoyi

(National Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Widegap Semiconductor Research Center,
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Laser lift-off technique (LLO) and wafer bonding technique were employed to transform GaN based light-emitting diode (LED) membrane from sapphire onto Si substrate. It can be derived from the result of high resolution X-ray diffraction (HRXRD) and cathodoluminescence spectra (CL) that the InGaN MQW structure and optical quality maintain as grown state. The red shift of the emission peak of GaN and InGaN/GaN MQW originating from the release of stress after the GaN based film depart from sapphire. In and Pd were used as metal bonding material. And combined with chip by chip lift-off mode, the integrated and uniform GaN film on Si can be realized. The vertical electrode GaN based LED can be fabrication. *L-I* characterization results showed sharp device improvements in terms of maximum allowable current and output power.

Key words: GaN; LED; laser lift-off; metal bonding; vertical electrode

PACC: 4255P; 7855; 3250

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0482-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60607003, 60676032, 60577030)

[†] Corresponding author. Email: xnkang@pku.edu.cn

Received 4 December 2006, revised manuscript received 26 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics