

# n-GaAs 和 p-GaN 晶片的直接键合

李 慧 何国荣 渠红伟 石 岩 种 明 曹玉莲 陈良惠<sup>†</sup>

(中国科学院半导体研究所 纳米光电实验室, 北京 100083)

**摘要:** 采用直接键合的方法成功实现了 n-GaAs 和 p-GaN 晶片的高质量键合. 扫描电子显微镜观测结果表明, 键合界面没有空洞. 键合前后光致发光谱测试表明, 键合工艺对材料质量影响不大. 室温下界面的电流-电压特性表明, 键合得到的 n-GaAs/p-GaN 异质结为肖特基二极管并且理想因子为 1.08. n-GaAs 和 p-GaN 材料直接键合的成功对于集成 GaAs 和 GaN 材料制备光电集成器件有重要意义.

**关键词:** 光电集成; 直接键合; GaAs; GaN

EEACC: 2520D; 4320J

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1815-03

## 1 引言

晶片键合技术在过去的 10 年中得到广泛研究, 因为这项技术可以完成失配很大的晶片之间的集成, 而如果通过异质外延的方法得到的集成晶片会有高密度失配和线型位错. 这种高密度缺陷会严重妨碍获得高质量的少子器件, 比如说激光器和低噪声探测器. 直接键合技术是晶片键合技术的一种, 研究显示这种技术可以获得原子级光滑, 导电并且透光的结果. 在过去的几年里, 通过直接键合制备了各种光电器件, 包括可见光 LED<sup>[1,2]</sup>, 1.3 和 1.55 $\mu\text{m}$  边发射和垂直腔面发射激光器<sup>[3,4]</sup>, 谐振腔光探测器 (APD's)<sup>[5]</sup>, GaN 基光电系统<sup>[6,7]</sup> 以及二维或三维纳米光子晶体<sup>[8,9]</sup> 等.

GaAs 和 GaN 这两种最常见的 III-V 族材料在高速、高功率的光电领域中起着至关重要的作用, 结合此两种材料则为制备多种新型的光电器件提供基础. 通过键合 p-GaAs/n-GaN 材料, Jasinski 等人<sup>[10]</sup> 实现了 n-AlGaAs/p-GaAs/n-GaN 异质结晶体管, 北工大的研究小组<sup>[11]</sup> 也对 p-GaAs/n-GaN 键合的电特性进行了研究, 表明在电压大于 0.4V 时呈现空间电荷局限电流 (SCLC). 要实现 GaN 基光电器件和 GaAs 基光电器件的集成, 对于 p-GaN 的直接键合研究很重要, 本文针对 n-GaAs 晶片和 p-GaN 晶片的直接键合开展了研究.

本文利用直接键合的方法, 获取了高质量的 n-GaAs/p-GaN 的键合晶片. 利用扫描电镜 (SEM)、光致发光谱 (PL) 以及电特性 ( $I-V$ ) 对键合界面进行了测试分析.

## 2 实验

实验中所采用的 GaAs 晶片是用水平布里奇曼法 (HB) 方法生长得到的, 掺杂物为 Si, 掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . 所用的 GaN 晶片是通过金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术, 先在 (0001) 蓝宝石衬底上生长一层 n-GaN, 然后生长 5 个 InGaN/GaN 量子阱, 最后在量子阱上面生长一层 0.2 $\mu\text{m}$  厚的 p-GaN, 其中 p-GaN 的掺杂浓度为  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . 将 GaAs 和 GaN 晶片解理为 10mm $\times$ 8.5mm 的小片, 然后将 GaN 和 GaAs 小片依次在三氯乙烯/丙酮/乙醇中超声清洗并在 HCl 溶液 (HCl : H<sub>2</sub>O = 1 : 5) 浸泡 30s 去除表面氧化物, 最后用去离子水清洗后面对面贴合放入夹具中, 然后将夹具放入键合机中, 外加压力为 4.5MPa, 550 $^{\circ}\text{C}$  退火 1h.

## 3 结果与讨论

键合前, 利用原子力显微镜 (AFM) 测得 GaN 和 GaAs 表面的均方根粗糙度分别为 0.7 和 1.2nm. 键合样品的结构示意图如图 1(a) 所示, 先利用磨抛机将 n 型 GaAs 减薄至 30 $\mu\text{m}$  左右, 然后利用腐蚀液 (HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 2 : 1) 将 n-GaAs 腐蚀至 8 $\mu\text{m}$  左右. 用剥离的方法在 n-GaAs 上制备面积为 0.5mm $\times$ 0.5mm 间隔为 0.5mm 的 AuGeNi/Au 电极, 再利用光刻胶保护腐蚀去除裸露的 GaAs, 露出 GaN 表面. 用剥离的方法在裸露 GaN 表面制备 Ni/Au 电极, 并且与 GaAs 电极距离为 30 $\mu\text{m}$ . 图 1(b) 为制备完电极后样品的结构示意图.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: chenlh@red.semi.ac.cn

2007-05-28 收到, 2007-06-08 定稿

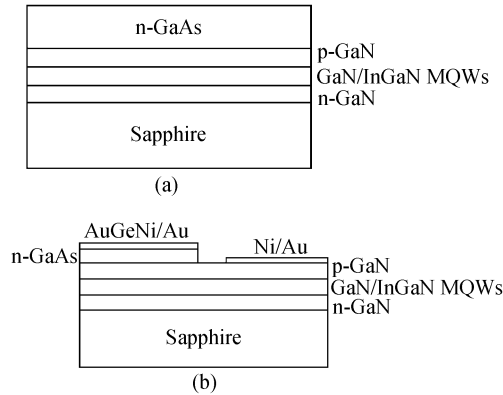


图 1 (a)键合样品结构示意图；(b)制备完电极后样品的结构示意图  
Fig.1 Scheme of the structure of n-GaAs wafer bonded on p-GaN wafer (a) and n-GaAs/p-GaN heterojunction after fabricating electrodes (b)

对键合后的样片进行拉力强度测试,测试结果表明平均键合强度达到了 1MPa. 图 2 为键合样品截面的扫描电子显微镜照片,从图中可以看出, GaAs/GaN 的键合界面很平整并且没有空洞, GaAs 和 GaN 晶片结合得很紧密. 图 2 所示的截面既不是 GaN 晶片的解理面也不是 GaAs 晶片的解理面,因此可以看到 GaN 晶片和 GaAs 晶片的截面上有着不同形貌的裂纹. 并且由于键合前未能实现 GaN 的解理晶向和 GaAs 的解理晶向的对齐,导致解理时不能实现图中 GaAs 和 GaN 截面的共面.

键合前测试了 p-GaN 样品的光致发光谱,键合后腐蚀去键合样品的小部分 GaAs 晶片,露出 p-GaN 表面,然后测试 p-GaN 样品的光致发光谱. 比较键合前后 p-GaN 样品的光致发光谱,如图 3 所示, PL 谱中 GaN 材料和 InGaN/GaN 量子阱材料的峰位在键合前后基本保持不变,可见键合前后 GaN 晶片的质量没有发生明显变化.

利用 Kethley2400 源表测试仪测试键合所得异质结的电特性. 测量方法是两探针扎在最近邻的 n-GaAs 的接触金属 AuGeNi/Au 和 p-GaN 的接触电极 Ni/Au 上,在探针两端施加电压并从 -10V 到

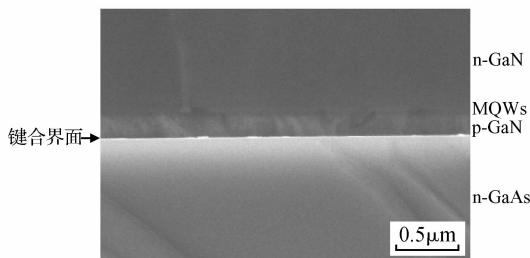


图 2 GaN/GaAs 键合截面的 SEM 图

Fig.2 SEM image in a cross sectional view of the GaAs/GaN bonding interface

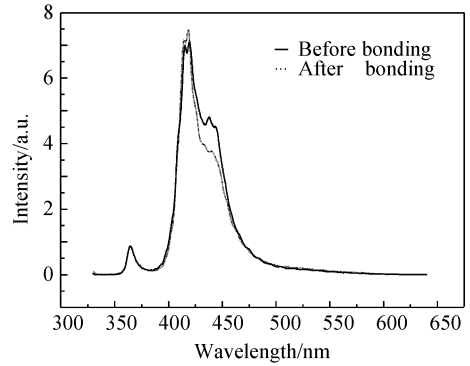


图 3 键合前后 GaN 材料的 PL 谱

Fig.3 PL spectra of p-GaN and InGaN/GaN MQWs before and after bonding

10V 进行扫描. 测得数据如图 4 所示. 从图 4 中我们可以看到键合得到的 n-GaAs/p-GaN 异质结呈现典型的肖特基二极管特性,其开启电压是 1.4V,反向击穿电压为 7.5V.

电流-电压测量法是最常用的求解肖特基二极管的势垒高度和理想因子的方法. 根据热电子发射理论<sup>[12]</sup>, 电流  $I$  可以表示为

$$I = A^* AT^2 \exp(-\Phi_B q/kT) (\exp(qV_2/nkT) - \exp(-qV_1/nkT)) \quad (1)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (2)$$

其中  $A^*$  为理查德森常数;  $A$  为二极管的面积;  $T$  为温度;  $q$  为电子电量;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\Phi_B$  为势垒高度;  $n$  为理想因子;  $V$  是施加的总电压;  $V_1$  和  $V_2$  分别为降落在 n-GaAs 和 p-GaN 上的电压.

当  $V > 3kT/q$  时, (1) 式中括号内第二项可以忽略, 因此可以改写为

$$I = A^* AT^2 \exp(-\Phi_B/kT) \exp(qV_2/nkT) \quad (3)$$

然后采用 Lien, So 和 Nicolet 方法<sup>[13]</sup>, 计算得到该肖特基二极管的理想因子  $n$  为 1.08, 势垒高度  $\Phi_B$  为 1.35eV. 理想因子  $n$  为 1.08, 接近于肖特基

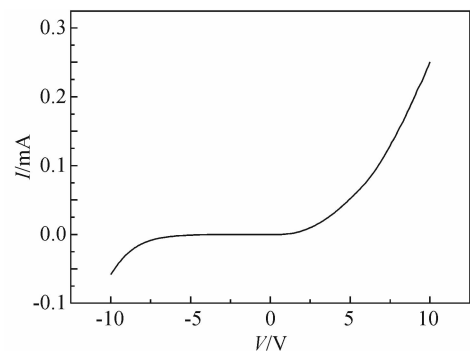


图 4 室温下键合得到的 n-GaAs/p-GaN 异质结 I-V 曲线

Fig.4 I-V curve of the bonded n-GaAs/p-GaN heterojunction measured at room temperature

二极管的理想因子 1, 键合得到的 n-GaAs/p-GaN 异质结的电特性接近于理想肖特基二极管的电特性.

## 4 结论

晶片清洗并去除表面氧化物后, 在氮气保护下 550°C 高温 4.5MPa 的压力下热退火 1h 后, 成功实现了 GaAs 和 GaN 晶片的高质量键合. 扫描电子显微镜测试显示键合界面没有空洞, GaAs 和 GaN 晶片结合得很好. 键合前后光致发光谱的比较表明, 键合工艺不会恶化材料质量. 键合界面电特性的测试结果表明, 键合所得 n-GaAs/p-GaN 异质结近乎为理想的肖特基二极管, 并且理想因子是 1.08. GaAs 和 GaN 高质量的键合为集成这两种材料制备新型光电器件提供了实验基础.

## 参考文献

- [ 1 ] Kish F A, Vanderwater D A, Peanasky M J, et al. Low-resistance ohmic conduction across compound semiconductor wafer-bonded interfaces. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(14): 2060
- [ 2 ] Sheu J K, Su Y K, Chang S J, et al. Investigation of wafer-bonded  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$  light-emitting diodes. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 1998, 145(4): 248
- [ 3 ] Zhu Z H, Ejeckam F E, Qian Y, et al. Wafer bonding technology and its applications in optoelectronic devices and materials. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1997, 3(3): 927
- [ 4 ] Okuno Y, Uomi K, Aoki M, et al. Direct wafer bonding of III-V compound semiconductors for free-material and free-orientation integration. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(6): 959
- [ 5 ] Kang Y, Mages P, Clawson A R, et al. Wafer-fused p-i-n In-GaAs/Si photodiode with photogain. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(7): 970
- [ 6 ] Tokuda T, Noda S. Wafer fusion technique applied to GaN/GaN system. *Jpn J Appl Phys, Part 2*, 2000, 39(6B): 572
- [ 7 ] Floyd P D, Chua C, Treat L, et al. Wafer fusion of infrared laser diodes to GaN light-emitting heterostructures. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(11): 1539
- [ 8 ] Noda S, Tomoda K, Yamamoto N, et al. Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths. *Science*, 2000, 289(5479): 604
- [ 9 ] Imada M, Noda S, Chutinan A, et al. Semiconductor lasers with one- and two-dimensional air/semiconductor gratings embedded by wafer fusion technique. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1999, 5(3): 658
- [ 10 ] Jasinski J, Linlental-Weber Z, Estrada S, et al. Microstructure of GaAs/GaN interfaces produced by direct wafer fusion. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(17): 3152
- [ 11 ] Liang T, Guo X, Guan B L, et al. Current-voltage characteristics of p-GaAs/n-GaN heterojunction fabricated by wafer bonding. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(10): 102107
- [ 12 ] Sze S M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed. New York: Wiley, 1981
- [ 13 ] Lien C D, So F C T, Nicolet M A, et al. An improved forward  $I-V$  method for nonideal Schottky diodes with high series resistance. *IEEE Trans Electron Devices*, 1984, 31(10): 1502

## Direct Bonding of n-GaAs and p-GaN Wafers

Li Hui, He Guorong, Qu Hongwei, Shi Yan, Chong Ming, Cao Yulian, and Chen Lianghui<sup>†</sup>

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** n-GaAs and p-GaN wafer pairs are successfully bonded by direct wafer bonding technology. SEM results indicate that there is no bonding gap at the bonding interface. PL measurements indicate that the bonding process does not visibly change the crystal quality. The current-voltage characteristics at room temperature show that the bonded n-GaAs/p-GaN heterojunction is a Shockley diode and the ideality factor  $n$  is 1.08. This high quality bonded wafer of n-GaAs/p-GaN has great implications for the optoelectronic integration of GaAs and GaN semiconductor materials.

**Key words:** optoelectronic integration; direct wafer bonding; GaAs; GaN

**EEACC:** 2520D; 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2007)11-1815-03

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: chenlh@red.semi.ac.cn

Received 28 May 2007, revised manuscript received 8 June 2007