

# 基于亲水表面处理的 GaAs/GaN 晶片直接键合\*

王 慧<sup>†</sup> 郭 霞 梁 庭 刘诗文 高 国 沈光地

(北京工业大学电控学院, 北京市光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 对晶片进行亲水表面处理, 在氮气保护下 500°C 热处理 10min, 成功实现 GaAs 与 GaN 晶片的直接键合, 键合质量较好. 扫描电子显微镜观测结果表明, 键合界面没有空洞. 光致发光光谱观测结果表明, 键合工艺对晶体内部结构的影响很小. 可见光透射谱测试结果表明, 键合界面具有良好的透光特性. GaAs 与 GaN 晶片直接键合的成功, 为实现 GaAs 和 GaN 材料的集成提供了实验依据.

关键词: 晶片直接键合; GaAs; GaN; 光电子集成

PACC: 3520G

中图分类号: TN405.96

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1042-04

## 1 引言

晶片直接键合技术是材料集成的一项新工艺. 利用键合技术可以集成晶格或晶向失配的材料, 制造传统外延生长技术不能制造的结构和器件; 可以集成具有不同光电和机械特性的材料, 实现优势互补. 不同材料键合后, 界面具有位错密度低, 导电透光性好, 化学和热稳定性好的特点, 材料的本身性质和晶体结构基本不受影响, 并且键合强度能满足器件加工工艺的要求. 近年来, 键合技术广泛应用于集成不同材料, 制造新型器件, 改善器件性能<sup>[1~4]</sup>.

GaAs 是制备多种光电器件的优良材料. GaN 是目前制备黄绿光到紫外波段的发光器件的首选材料, 而且适合制造高频、大功率器件. 将两者结合则成为制造电子器件的理想材料<sup>[5,6]</sup>, 可为实现全色显示开辟新思路<sup>[4]</sup>. 但是 GaAs 与 GaN 晶格失配较大, GaAs 为立方晶格, 晶格常数为 0.565nm, GaN 为六方晶格, 晶格常数为 0.319nm. 通过传统外延技术或粘合剂键合, 不能得到满足器件制备要求并具有良好导电透光特性的 GaAs/GaN 异质结.

目前对 p-GaAs/n-GaN 和 n-GaAs/n-GaN 直接键合的研究报道较多, 包括 p-GaAs/n-GaN 键合界面的微结构<sup>[7,8]</sup>, 键合 p-GaAs/n-GaN 和 n-GaAs/n-GaN 形成的异质结的电特性<sup>[9]</sup>, 以及通过键合 p-GaAs/n-GaN 制备 HBT<sup>[5,6]</sup>.

本文采用晶片亲水表面处理方法, 通过 500°C 退火处理, 外加压力, 实现 p-GaAs/p-GaN 的高质量晶片直接键合. 利用扫描电镜 (SEM)、光致发光

谱 (PL)、可见光透射谱对键合界面特性进行了测试, 并简单分析了键合机理.

## 2 实验

实验采用的晶片都是通过金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术生长得到的. GaAs 晶片是在 (100)GaAs 衬底上生长 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱, 表面为 230nm 厚的 p-GaAs. GaN 晶片是在 (0001)蓝宝石衬底上生长 GaN/InGaN 量子阱, 表面为 p-GaN. 将 GaAs 和 GaN 晶片都解理成 8mm × 8mm 的小片. 先用丙酮和乙醇清洗, 再进行表面亲水处理. 然后两晶片在甲醇中结合, 放入键合夹具压紧, 外加压力约为 10MPa, 晶片连同夹具一起在 N<sub>2</sub> 环境中退火, 温度为 500°C, 时间为 10min.

为了测试 GaAs/GaN 键合样品的可见光透射谱, 将两个样品按照相同工艺键合, 样品 1 选择腐蚀除去 GaAs 衬底和量子阱, 只留在 GaN 外延片上键合的 GaAs 层, 样品 2 将键合的 GaAs 外延片全腐蚀掉, 只留 GaN 外延片, 样品结构如图 1 所示.

## 3 结果与讨论

### 3.1 结果

采用亲水处理高温加压键合工艺, 晶片键合面积和成功率明显提高, GaAs/GaN 两晶片的结合强度足够大, 超声清洗、GaAs 或蓝宝石衬底减薄抛光、解理等工艺不会导致解键合.

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2004AA311030), 北京市教委重点项目 (批准号: KZ200510005003) 及国家自然科学基金 (批准号: 60506012) 资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: chuntian@emails.bjut.edu.cn

2005-10-14 收到, 2006-01-16 定稿

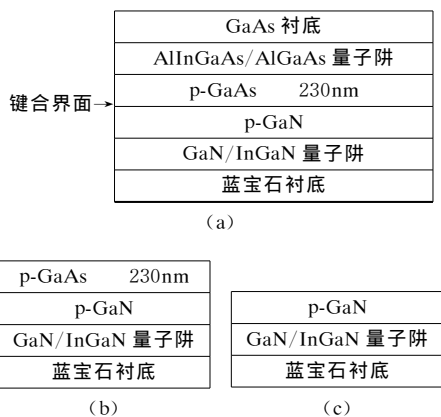


图 1 键合样品(a), 腐蚀后样品 1(b)和样品 2(c)的结构

Fig.1 Schematic diagram of the sample fracture (a) Wafer bonding sample; (b) Sample 1; (c) Sample 2

用扫描电子显微镜观察键合样品的截面, 如图 2 所示, GaAs/GaN 键合界面很平, 没有空洞, GaAs 与 GaN 晶片紧密结合. 因为蓝宝石衬底不易解理, 键合样品的截面不是解理面, 键合界面两侧的晶体结构差别很大, 使得晶片裂开造成的纵向纹路不连续.

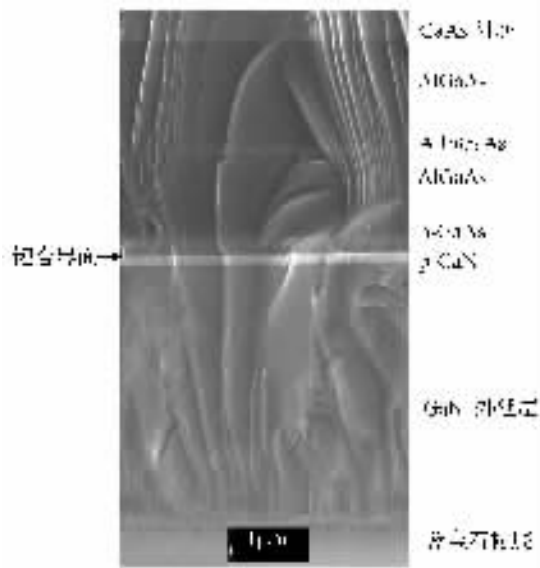


图 2 GaAs/GaN 键合截面的 SEM 图像

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

比较键合前后 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱的光致发光谱测试结果, 键合样品透过 GaN 晶片测试, 如图 3 所示, 两次测试的 PL 谱趋于重合, 表明键合过程对量子阱的影响很小.

键合样品的可见光透射谱如图 4 所示, 样品 1 留有键合的 230nm 厚的 GaAs 层在 GaN 外延片上, 透射率为  $T_1$ ; 样品 2 腐蚀去掉 GaAs, 只留 GaN 外延片, 透射率为  $T_2$ . 光透过蓝宝石衬底上生长的

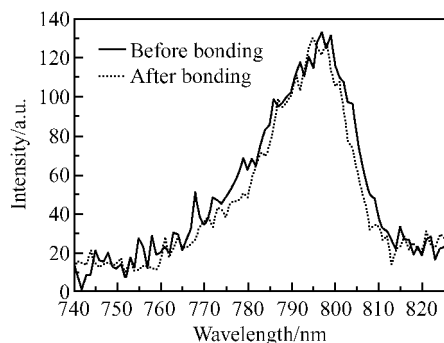


图 3 键合前后 AlInGaAs/AlGaAs 量子阱的 PL 谱  
Fig.3 PL spectra of AlInGaAs/AlGaAs QW before and after bonding

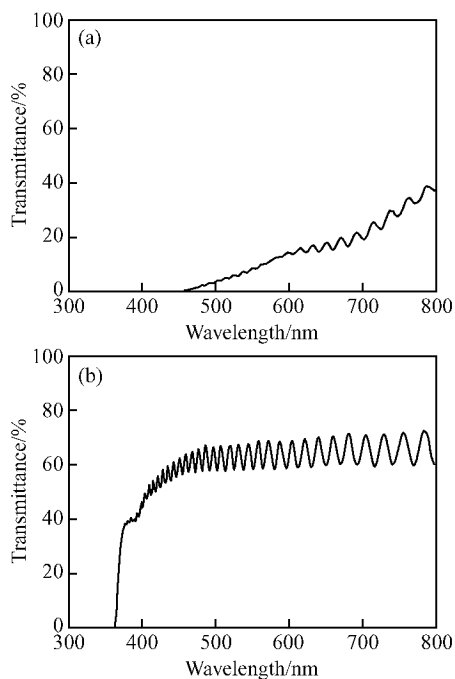


图 4 键合样品 1(a)和 2(b)的可见光透射谱  
Fig.4 Visible light transmission spectra of the samples after bonding (a) Sample 1; (b) Sample 2

GaN 外延层结构, 在各层的界面产生反射, 反射光与入射光发生干涉, 因此透射曲线具有周期性起伏<sup>[10]</sup>.

$T_1, T_2$  满足方程:

$$\begin{cases} T_1 = T_{i1} T_{GaAs} T_0 T_{GaN} \\ T_2 = T_{i2} T_{GaN} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $T_0$  为键合界面的透射率;  $T_{i1}$  为 GaAs/空气界面的透射率;  $T_{i2}$  为 GaN/空气界面的透射率;  $T_{GaAs}$  为 GaN 外延片上键合的 230nm 厚的 GaAs 层的透射率;  $T_{GaN}$  为 GaN 外延片的透射率. 媒质的复数折射率为  $N = n - ik$ , 实部  $n$  是普通折射率, 虚部  $k$  是消光系数,  $n$  和  $k$  都是光波长  $\lambda$  的函数<sup>[11]</sup>. 媒

质中光强的衰减公式为

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

其中  $x$  为光传播距离;  $\alpha$  为媒质的吸收系数,

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3)$$

根据菲涅耳反射透射公式,光垂直入射到不同媒质的界面,不能完全透射,透射率为

$$T = n_1 n_2 \left( \frac{2}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (4)$$

其中 1 和 2 分别表征入射和出射媒质<sup>[12]</sup>.

对于波长为 630nm 的光,由图 4 可知,键合样品 1 的透射率为  $T_1 = 16\%$ ,键合样品 2 的透射率为  $T_2 = 65\%$ . GaAs 的消光系数为  $k_{\text{GaAs}} = 0.19$ ,代入公式(2)和(3)得到,  $T_{\text{GaAs}} = 41.8\%$ . 空气, GaAs, GaN 的折射率分别为  $n_{\text{空气}} = 1$ ,  $n_{\text{GaAs}} = 3.83$ ,  $n_{\text{GaN}} = 2.51$ ,代入公式(4)得到,  $T_{\text{il}} = 65.7\%$ ,  $T_{\text{i2}} = 81.5\%$ . 解方程(1)得到键合界面的透射率  $T_0 = 73\%$ .

由公式(4)得到 GaAs/GaN 平面界面的透射率为  $T_{\text{i0}} = 95\%$ ,所以 GaAs/GaN 键合界面不是理想的光学界面. GaAs/GaN 键合界面的透射率与键合界面的微结构的关系需要进一步的测试验证.

### 3.2 分析讨论

充分的亲水表面处理,外加压力和高温退火是实现 GaAs 与 GaN 晶片直接键合的关键因素. 亲水表面的室温预键合强度和面积较大,高温退火并外加压力处理后键合强度增强,面积增大,键合质量提高.

根据浸润平衡方程,固体表面具有亲水性的基本条件为

$$A = \gamma_{\text{SG}} - \gamma_{\text{SL}} > 0 \quad (5)$$

式中  $\gamma_{\text{SG}}$  和  $\gamma_{\text{SL}}$  分别是平衡时固体和水的表面自由能(或表面张力),水的表面自由能  $\gamma_{\text{SL}} = 72.8 \text{ mJ/m}^2$ . 因此,亲水处理就是提高固体的表面自由能. 纯净固体的  $\gamma_{\text{SG}}$  是固定的,要改变  $\gamma_{\text{SG}}$  关键是改变固体表面的化学状态<sup>[13]</sup>. GaAs, GaN 晶片的亲水处理就是在晶片表面引入亲水基团,使晶片表面成为高能表面.

室温常压下,晶片预键合的主要作用力是近距离的原子间和分子间的作用力,例如范德华力、氢键力. 亲水的半导体表面因化学极性的作用,覆盖有非桥键的羟基( $\cdot\text{OH}$ ),羟基是亲水基,易于物理吸附水形成氢键. 氢键作用力比范德华力强得多,而且分散在表面的水分子在预键合中起桥梁作用<sup>[14]</sup>. 因此亲水预键合力较大. 晶片表面的弯曲和粗糙起伏会导致晶片的接触面积减小,键合界面产生气泡. 根据弹性固体的接触和吸附理论,如果晶片的表面张力

足够大,可以使晶片发生弹性形变,促使晶片接触<sup>[15]</sup>. 因此亲水室温键合对晶片的平整度、粗糙度的要求较低. 将键合界面分开需要的能量为  $G_0$ ,

$$G_0 = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 \quad (6)$$

式中  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别表征两晶片的表面自由能;  $\gamma_3$  表征两晶片的相互作用能. 用  $G_0$  来衡量键合强度. 因为亲水表面为高能表面,所以亲水预键合强度较大.

高温退火和外加压力可以使晶片很好的接触,除去晶片表面吸附物,形成较强的化学键. 由于 GaN 与蓝宝石晶格失配较大,在蓝宝石衬底上生长的 GaN 外延片会有一定的翘曲,没有外加压力时, GaAs/GaN 晶片不能完全接触,键合面积较小. 作用于整个晶片上的单轴压力,促使晶片形变,键合面积可达  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ . 高温退火过程中,亲水晶片表面吸附的水分子或是与周围的氧化物反应,或是扩散离开界面,在键合界面形成较强的共价键. 疏水晶片键合过程中,产生的气体较多,容易在键合界面形成气泡,影响键合质量<sup>[16]</sup>.

## 4 结论

晶片表面进行亲水处理,在氮气保护下  $500^\circ\text{C}$  热处理 10min 后,成功实现 GaAs 与 GaN 晶片的直接键合,键合质量较好. 扫描电子显微镜(SEM)测试表明键合界面没有空洞;光致发光谱的测试结果表明,键合工艺对晶体质量影响很小;可见光透射谱测试表明,键合界面具有良好的透光特性.

### 参考文献

- [1] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W, et al. High-power 1320-nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(11): 1495
- [2] Kang Y, Mages P, Lo Y H, et al. Fused InGaAs-Si avalanche photodiodes with low-noise performances. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(11): 1593
- [3] Raburn M, Liu B, Bowers J E, et al. InP-InGaAsP wafer-bonded vertically coupled X-crossing multiple channel optical add-drop multiplexer. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(6): 579
- [4] Floyd P D, Treat D W, Bour D P, et al. Heterogeneous integration of visible AlGaInP and infrared AlInGaAs lasers with GaN based light sources. *Electron Lett*, 1999, 35(24): 2120
- [5] Estrada S, Xing H, Hu E, et al. Wafer-fused AlGaAs/GaAs/GaN heterojunction bipolar transistor. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(5): 820
- [6] Estrada S, Huntington A, Stonas A, et al. n-AlGaAs/p-GaAs/n-GaN heterojunction bipolar transistor wafer-fused at  $550 - 750^\circ\text{C}$ . *Appl Phys Lett*, 2003, 83(3): 560
- [7] Jasinski J, Liliental-Weber Z, Estrada S, et al. Microstructure of GaAs/GaN interfaces produced by direct wafer fusion.

- Appl Phys Lett, 2002, 81(17):3152
- [ 8 ] Jasinski J, Liliental-Weber Z, Estrada S, et al. Transmission electron microscopy studies of electrical active GaAs/GaN interface obtained by wafer bonding. Mater Res Soc Symp Proc, 2002, 722:K7. 15. 1
- [ 9 ] Estrada S M. GaAs-GaN wafer fusion and the n-AlGaAs/p-GaAs/n-GaN double heterojunction bipolar transistor. PhD Dissertation, University of California Santa Barara, 2004
- [10] Chang K L. Wafer bonding with low-temperature grown compound semiconductor materials for optoelectronic device application. PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003
- [11] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Semiconductor physics. Beijing: National Defence Industry Press, 1994 (in Chinese)[刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理. 北京: 国防工业出版社, 1994]
- [12] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics. Beijing: Peking University Press, 1984(in Chinese)[赵凯华, 钟锡华. 光学. 北京: 北京大学出版社, 1984]
- [13] Zhu Lübing, Bao Xing. Surface and interface physics. Tianjin: Tianjin University Press, 1992 (in Chinese)[朱履冰, 包兴. 表面与界面物理. 天津: 天津大学出版社, 1992]
- [14] Donato P. Plasma assisted low temperature semiconductor wafer bonding. PhD Dissertation, Uppsala University, 2001
- [15] Gui C, Elwenspoek M, Gardeniers J G E. The effect of surface roughness on direct wafer bonding. J Appl Phys, 1999, 85(10):7448
- [16] Margalit N M. High temperature long wavelength vertical cavity lasers. PhD Dissertation, University of California, 1998

## GaAs/GaN Direct Wafer Bonding Based on Hydrophilic Surface Treatment\*

Wang Hui<sup>†</sup>, Guo Xia, Liang Ting, Liu Shiwen, Gao Guo, and Shen Guangdi

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Institute of Electronic Information and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** GaAs and GaN wafer pairs are successfully bonded based on the hydrophilic surface treatment. The bonding is carried out at 500°C in N<sub>2</sub> atmosphere for 10min. It is found that a large fraction of the interface area is well bonded. SEM results indicate that there is no air gap at the bonding interface. PL measurements indicate that the crystal structure is slightly affected by the wafer bonding process. Visible light transmission measurements indicate that the GaAs/GaN bonded interface is translucent. Success in GaAs/GaN direct wafer bonding has great implications for the integration of GaAs and GaN semiconductor materials.

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

**PACC:** 3520G

**Article ID:** 0253-4177(2006)06-1042-04

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2004AA311030), the Key Funds of the Beijing Committee of Education (No. KZ200510005003), and the National Natural Science Foundation of China(No. 60506012)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: chuntian@emails.bjut.edu.cn

Received 14 October 2005, revised manuscript received 16 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics