

基于硫化物表面处理的 InP/ GaAs 低温晶片键合*

黄 辉¹ 王兴妍¹ 王 琦¹ 陈 斌¹ 黄永清¹ 任晓敏¹ 孙增辉²
钟 源² 高俊华² 马晓宇² 陈弘达² 陈良惠²

(1 北京邮电大学, 北京 100876)
(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 提出一种新的基于硫化物表面处理的 InP/ GaAs 低温晶片键合技术. 在 360 °C 的退火温度下, 获得了 1. 2MPa 的键合强度. 基于这种低温键合技术, 可将外延生长在 InP 衬底上的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/ InP 多量子阱(MQW) 键合并转移到 GaAs 衬底上. X 射线衍射表明量子阱的结构未受键合过程的影响. 光致发光谱分析表明键合后量子阱的晶体质量略有改善. 电流电压特性的测试表明 n-InP/ n-InP 的键合界面具有良好的导电特性; 在 n-InP/ n-GaAs 的键合界面存在着电荷势垒, 这主要是由于键合界面存在 GaAs 氧化物薄层所致.

关键词: 晶片键合; GaAs; InP; 低温; 硫化物

PACC: 5200F; 5200H; 8160C

中图分类号: O485 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)08-1667-04

1 引言

随着光电子集成技术的飞速发展, 由于不同的材料在光学特性、电学特性和机械特性等方面各具优势, 实现不同材料间的集成, 将能大大提高光电子器件的功能和集成度. 晶片键合技术作为一种实现异质兼容的有效方法, 受到广泛关注^[1].

为了获得高的键合强度, 退火温度通常在 525 ~ 700 °C 之间^[2~4]. 这么高的退火温度将导致晶片中原子的扩散、界面缺陷的扩散以及器件性能的劣化; 同时由于两种材料的热胀系数不同, 退火中升温 and 冷却过程所产生的应力, 使得键合的晶片分开甚至断裂^[2].

为了降低晶片键合的退火温度, 通常采取三种办法: 采用等离子体或离子束激活晶片的表面, 在较低的温度下实现高强度的结合^[5,6]; 采用粘合剂, 如硅胶等^[7]; 采用表面改性处理液处理晶片表面, 以提高晶片表面活性^[8]. 第一种方法, 对环境和设备的要求较高, 因此成本较为昂贵; 第二种方法, 在晶片间

会引入厚的间隔层(约 0. 1 ~ 1. 0 μ m), 造成器件的导电性能和光学性能劣化; 至于第三种方法, 目前通常使用的硒化物溶液有剧毒.

本文首次利用硫化物溶液对待键合晶片的表面进行处理, 实现了在 360 °C 的热处理温度下, InP/ GaAs 晶片间低成本、无毒性的高质量键合. 通过光致发光谱(PL)、X 射线衍射(XRD)、拉断试验和电流电压特性测量对键合质量进行了分析.

2 实验

实验采用的是(001)晶面的 n-InP 衬底和 n-GaAs 衬底, 其掺杂浓度约为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 在 InP 衬底上利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)生长 9 对厚度为 20 ~ 26nm 的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/ InP 多量子阱(MQW)结构. 将 GaAs 衬底和 InP 外延片解理成 5mm \times 5mm 的方块, 经过乙醇和丙酮清洗后, 放入一定浓度的硫脲溶液中处理 20min. 然后将 GaAs 和 InP 晶片面对面按晶向对准后, 放入夹具中夹紧, 施加的压力大小约为 2MPa, 接着将晶片连同夹具

*国家自然科学基金重大项目(批准号:90201035), 国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA312020), 国家重点基础研究发展计划(批准号:2003CB314902)资助项目

黄 辉 男, 1974 年出生, 副教授, 从事半导体光电子器件以及外延生长的研究. Email: huihuang@bupt.edu.cn
2004-11-18 收到, 2005-01-24 定稿

一起在氮气氛围中进行 1 h 360 ° 的退火. 为了能够进行 XRD 和 PL 测试, 必须采用 HCl/ H₃PO₄ (1:1) 溶液选择腐蚀除去键合后的 InP 衬底, 只留下键合的 MQW 在 GaAs 衬底上.

为了进行电流-电压 (I - V) 特性的测试, 将 n -InP/ n -InP 和 n -InP/ n -GaAs 衬底按照相同的条件键合. 并在衬底的背面蒸镀 AuGeNi/Au, 然后经过快速退火合金. 进行 n -InP/ n -GaAs 的 I - V 特性测试时, 对 InP 衬底施加正向偏压.

键合强度的测试是将键合好的 InP/GaAs 晶片分别粘到两块较大的玻璃上, 然后在玻璃上施加拉力, 使得晶片分开. 键合强度定义为将晶片拉开所需要的拉力除以晶片的面积^[9].

3 结果和讨论

InP/GaAs 键合晶片解理横断面的扫描电子显微镜图像如图 1(a) 所示. 由图可见, 9 对 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 多量子阱被直接键合到 GaAs 上, 并且 GaAs 和 InP 晶片牢固地结合在一起. 但两晶片不是沿各自的晶面解理, 这是由于两者的晶向没有严格对准所造成的. 经过测试表明键合强度达到了 InP 的断裂强度 1.2MPa, 因为 GaAs/InP 的拉断面不是键合界面, 拉断面如图 1(b) 所示. 通过键合强度, 可以估算出键合能达到了 0.73J/m²^[9]. 在这么低的退火温度下达到这么高的键合强度, 主要是由

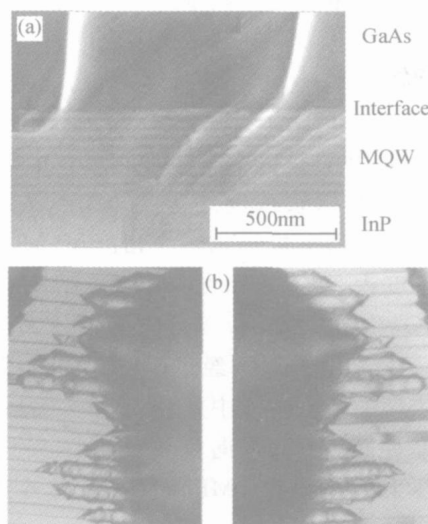


图 1 InP/GaAs 键合晶片的截面(a)和拉断面(b)的显微图像

Fig.1 Microscope image of the cross-section (a) and fracture-interface (b) of the bonded InP/GaAs pair

于在键合界面形成了 S-In 和 S-Ga 共价键^[10].

图 2 显示了键合前后的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP MQW 的 X 射线衍射谱. 由图中的衍射卫星峰可知, 键合前后 MQW 的衍射峰级数没有变化, 表明键合后量子阱的结构保持完好. 键合后的卫星峰向短波方向移动了 0.164°, 表明 (004) 晶面的面间距增加了约 2%, 这是由于在退火的冷却过程中由于 MQW 和 GaAs 间的热胀系数差异 (约 $2.0 \times 10^{-6}/K$) 所产生的热应力对量子阱层横向挤压变形所致. 从图 2 的试验数据可以计算出卫星峰的平均间距由键合前的 0.224° 变化到键合后的 0.221°, 相应的 MQW 周期由 46.2nm 变化到 47.0nm, 变化了约 2%. 从图 2 中还可见, 键合后的 MQW 衍射卫星峰稍微展宽, 这是由于测试的 X 射线光束是细长条, 相应探测的面积也是细长条. 由于热应力在面上的分布不均匀 (通常是边缘的应力要大于中心的应力)^[12], 因此在 X 射线探测的键合面积内, 应力的不均匀分布导致了不同探测位置的卫星峰移动的角度不同, 叠加的结果导致了峰型变宽.

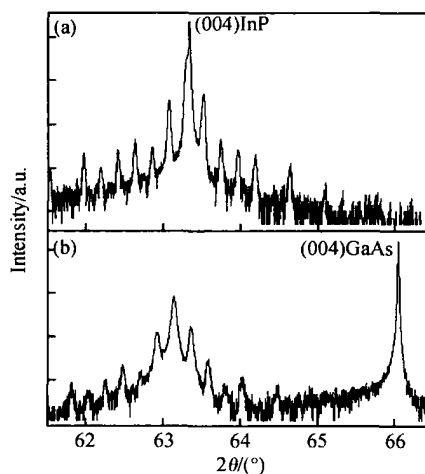


图 2 键合前(a)和键合后(b)MQW 的 X 射线衍射谱

Fig.2 XRD -2 scan of the as grown (a) and bonded (b) In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP MQW layer

图 3 显示了键合前后 MQW 的 PL 谱. 由图可知, 键合后的谱线半峰值宽度 (FWHM) 为 104.5nm, 而键合前的 FWHM 为 112.4nm. 谱线宽度的降低表明键合后 MQW 的晶体质量有所改善, 键合后谱线峰值约 17nm 的蓝移也表明键合的 MQW 层中存在压应力.

图 4 显示了键合的 n -InP/ n -InP 和 n -InP/ n -

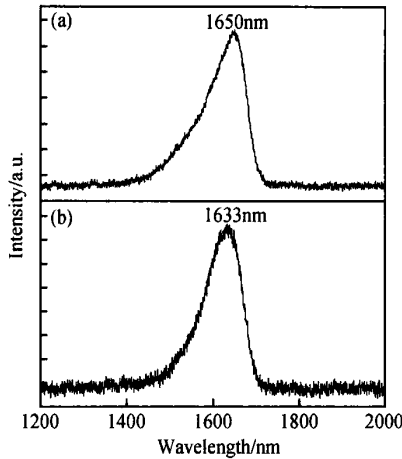


图 3 键合前(a)和键合后(b)MQW的 PL 谱

Fig. 3 PL spectra observed at 300 K for the as grown (a), and bonded (b) $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ MQW layer

GaAs 衬底的 $I-V$ 特性. 由图可知,对于 $n-InP/n-InP$ 键合晶片,键合界面呈欧姆特性的良好导电性;对于 $n-InP/n-GaAs$ 键合晶片,键合界面存在一定的电荷势垒. 这种界面势垒可能是由 GaAs 和 InP 间能带不连续和残留的 GaAs 氧化物薄层所造成的^[11].

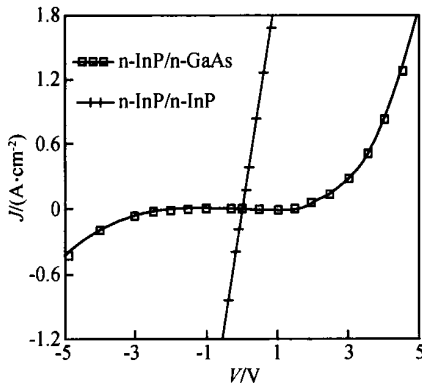


图 4 键合的 $n-InP/n-InP$ 和 $n-InP/n-GaAs$ 衬底的 $J-V$ 曲线

Fig. 4 $J-V$ curves for bonded $n-InP/n-InP$ and $n-InP/n-GaAs$ substrate

4 结论

利用硫化物溶液对待键合晶片的表面进行处理,实现了 InP/ GaAs 晶片间低成本、无毒性的高质

量键合. 在 360 的热处理温度下,获得了 1. 2MPa 的键合强度. 通过光致发光谱 (PL) 和 X 射线衍射 (XRD) 分析表明键合后仍保持良好的晶体质量,电流-电压特性测量表明键合界面具有较好的导电性能.

致谢 感谢中国科学院物理研究所和清华大学材料分析中心在扫描电子显微镜测试方面给予的支持和帮助.

参考文献

- [1] Jin Phillipp N Y, Sigle W, Black A, et al. Interface of directly bonded GaAs and InP. *J Appl Phys*, 2001, 89:1017
- [2] Ogawa S, Imada M, Noda S. Analysis of thermal stress in wafer bonding of dissimilar materials for the introduction of an InP-based light emitter into a GaAs-based three-dimension photonic crystal. *Appl Phys Lett*, 2003, 82:3406
- [3] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W, et al. High-power 1320-nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15:1495
- [4] Murtaza S S, Tan I H, Bowers J E, et al. High-finesse resonant-cavity photodetectors with an adjustable resonance frequency. *J Lightwave Technol*, 1996, 14:1081
- [5] Tong Q Y, Gan Q, Hudson G, et al. Low temperature InP/Si wafer bonding. *Appl Phys Lett*, 2004, 84:732
- [6] Chung T R, Hosoda N, Suga T, et al. 1. 3 μ m InGaAsP/ InP lasers on GaAs substrate fabricated by the surface activated wafer bonding method at room temperature. *Appl Phys Lett*, 1998, 72:1565
- [7] Radu I, Szafraniak I, Scholz R, et al. Low-temperature layer splitting of (100) GaAs by He + H co-implantation and direct wafer bonding. *Appl Phys Lett*, 2003, 82:2413
- [8] Arokiaraj J, Soga T, Jimbo T, et al. SeS₂ assisted bonding of GaAs to Si — A new method for wafer bonding. *Appl Surf Sci*, 2000, 159/ 160:282
- [9] Shi F, MacLaren S, Xu Chaofeng, et al. Hybrid-integrated GaAs/ GaAs and InP/ GaAs semiconductors through wafer bonding technology: interface adhesion and mechanical strength. *J Appl Phys*, 2003, 93:5750
- [10] Geelhaar L, Bartynski R A, Ren F, et al. Photoluminescence and X-ray photoelectron spectroscopy study of S-passivated InGaAs. *J Appl Phys*, 1998, 80:3076
- [11] Shi F, Chang K L, Epple J, et al. Characterization of GaAs-based $n-n$ and $p-n$ interface junctions prepared by direct wafer bonding. *J Appl Phys*, 2002, 92:7544

Low Temperature InP/ GaAs Wafer Bonding Based on a Sulfide Treated Surface *

Huang Hui¹, Wang Xingyan¹, Wang Qi¹, Chen Bin¹, Huang Yongqing¹, Ren Xiaomin¹,
Sun Zenghui², Zhong Yuan², Gao Junhua², Ma Xiaoyu²,
Chen Hongda², and Chen Lianghui²

(1 *Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(2 *Institution of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract : A new approach for InP/ GaAs wafer bonding based on sulfur passivation is presented. High bonding strength is obtained by annealing at 360 °C. An In_{0.53}Ga_{0.47}As/ InP MQW layer grown on InP is transferred onto a GaAs substrate via the new bonding process. X-ray diffraction reveals that structure integrity of the bonded MQW is preserved. Photoluminescence measurements indicate a slight improvement in crystal quality for the bonded MQW layers. Current-voltage measurements demonstrate the conductivity of the bonded interface.

Key words : wafer bonding; InP; GaAs; low temperature; sulfide

PACC : 5200F; 5200H; 8160C

Article ID : 0253-4177(2005)08-1667-04

* Project supported by the National High Technology Research Development Program of China (No. 2003AA312020), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314901), and the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 90201035)

Huang Hui male, was born in 1974, PhD, associate professor. His research interests include semiconductor optoelectronic devices and material growth. Email: huihuang@bupt.edu.cn

Received 18 November 2004, revised manuscript received 24 January 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics