

## 掺 Te 的 GaSb 薄膜分子束外延生长及缺陷特性

陈燕<sup>1,3</sup>, 邓爱红<sup>1\*</sup>, 汤宝<sup>2</sup>, 王国伟<sup>2</sup>, 徐应强<sup>2</sup>, 牛智川<sup>2</sup>

(1. 四川大学物理科学与技术学院物理系, 四川成都 610065;

2. 中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

3. 绵阳师范学院物理系, 四川绵阳 621000)

**摘要:**分析了非掺 GaSb 材料及在 GaAs 衬底上用分子束外延生长掺杂 Te 的 GaSb 薄膜材料的缺陷特性, 主要应用正电子湮没多谱勒展宽谱方法, 并结合原子力显微镜和 X 射线衍射测试进行. 多谱勒展宽谱研究表明, 采用分子束外延法生长的掺杂 Te 的 n 型半导体 GaSb 薄膜材料的 S 参数比体材料小, 所得缺陷主要是单空位与间隙原子, 而几乎无复合体的缺陷类型.

**关键词:**原子力显微镜; 正电子湮没; X 射线衍射

**中图分类号:**0474 **文献标识码:**A

### Defect of Te-doped GaSb layers grown by molecular beam epitaxy

CHEN Yan<sup>1,3</sup>, DENG Ai-Hong<sup>1\*</sup>, TANG Bao<sup>2</sup>, WANG Guo-Wei<sup>2</sup>,  
Xu Ying-Qiang<sup>2</sup>, NIU Zhi-Chuan<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. Department of Physics, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In this paper we present the results of positron annihilation doppler broadening spectroscopy (PADB), X-ray diffraction spectra (XRD), and atomic force microscopy (AFM) measurements on the undoped GaSb and Te-doped GaSb films grown on GaAs substrate by molecular beam epitaxy (MBE). Research shows that the S parameter is smaller in GaSb film than the bulk material. The defects in the Te-doped N-type semiconductor GaSb obtained by MBE are mainly vacancies and impurity atoms instead of complex defects.

**Key words:** atomic force microscopy (AFM); positron annihilation; X-ray diffraction

**PACS:** 68.37.Ps, 78.70.Bj, 61.05.cp

### 引言

由于 GaSb 基半导体材料具有带隙可调、较小的电子有效质量和高电子迁移率的特性, 因此 GaSb 衬底可作为长波长激光器和光探测器的优质衬底材料<sup>[1]</sup>. 然而, GaSb 现无半绝缘衬底, 且非常昂贵. 非掺杂的 GaSb 易发生自由载流子吸收, 强烈地吸收红外光, 对材料和器件的性能会产生很

大影响. 现在可行的替代办法是利用分子束外延生长高质量 GaAs 基 GaSb 厚薄膜缓冲层材料, 然后再在其上生长和制造含 Sb 化合物半导体器件<sup>[2-3]</sup>. 基于此目的, 选用了 GaAs(001) 衬底, 分别采用不同的生长工艺生长了掺 Te 的 GaSb 厚体薄膜材料的样品. 并通过原子力显微镜、XRD 和慢正电子束多谱勒实验谱方法分析了此生长条件下薄膜内部缺陷的演变.

收稿日期: 2011-06-06, 修回日期: 2012-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(Y112071000), 973 项目(2010CB327601)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Y112071000), The National Basic Research Programme of China (2010CB327601)

作者简介 (Biography): 陈燕(1974-), 女, 四川宜宾人, 讲师, 硕士, 主要从事半导体材料及器件的研究. E-mail: chen\_yan\_la@163.com.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ahdeng@scu.edu.cn

Received date: 2011-06-06, revised date: 2012-02-29

## 1 在 GaAs 衬底上用分子束外延生长掺 Te 的 GaSb 薄膜

测试薄膜样品采用的是 VC80H MKII 分子束外延系统. 使用该系统外延生长 GaSb 薄膜样品的结构与生长条件如下表所示.

表 1 样品结构与生长条件

Table 1 Sample structure and growth conditions

| 样品 A 编号  | 结构与生长条件  |
|----------|--|
| Vg091230 | 510℃生长 GaSb; 1 h (580 nm).<br>(掺 Te 温度为 280℃, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{16}$ ).<br>降温至 600℃, 关 As 等 25 s 后, 开 Sb 20 s.<br>降温至 670℃生长 GaAs 缓冲层; 20 min (170 nm).<br>720℃除气; 3 min.<br>GaAs (001) 衬底 670℃脱氧. |

## 2 实验结果与分析

### 2.1 原子力显微镜测试结果:

对样品 A 表面的形貌测试分析是在 SEIKO SPA 300 HV 型原子力显微镜测试系统下进行的. 图 1 是样品 A 在  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  范围内的测试结果.

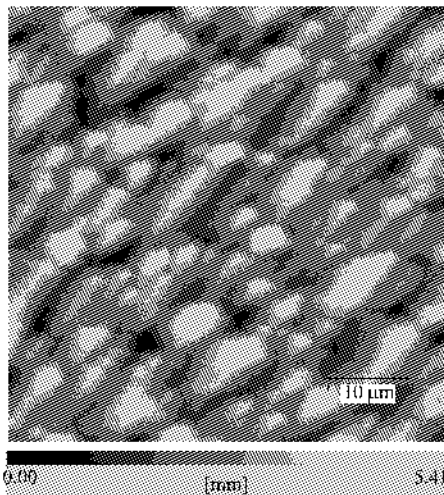


图 1 原子力显微镜测试结果

Fig. 1 Result of AFM measurement

从图 1 可以看出, 样品 A 的表面较为平整, 无明显的螺位错及岛状结构产生, 说明其结晶度较好<sup>[4]</sup>.

### 2.2 用 X 射线衍射 (XRD) 测试结果

实验是在 DX-1000 CSC 型 X 射线衍射仪下进行的. Cu 靶  $K\alpha$  辐射, 波长  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ , 测角仪精

度  $0.002^\circ$ , 步长为  $0.06^\circ$ , 扫描范围  $2\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$ . 实验工作电压 35 kV, 加速电流 25 mA. 为了方便对比, 又选了一个以 GaSb 为衬底, 与原样品 GaSb 外延层厚度相同的非掺杂的 GaSb 薄膜样品 B 进行同样测试, 测试结果如图 2 所示.

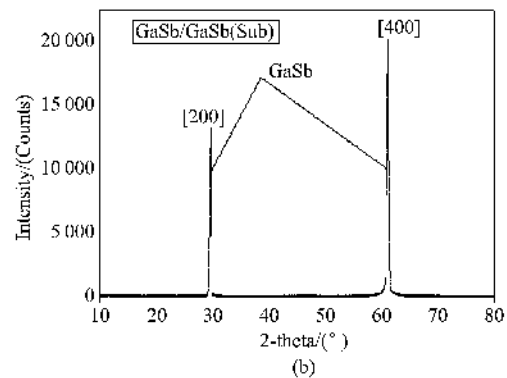
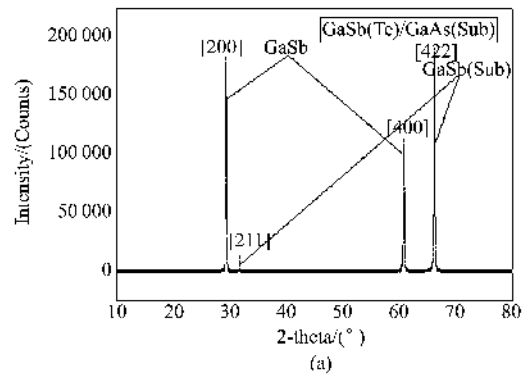


图 2 X 射线衍射谱 (a) 样品 A, (b) 样品 B

Fig. 2 X-ray diffraction spectra (a) sample A, (b) sample B

表 2 XRD 图谱分析结果

Table 2 Analysis result of X-ray diffraction spectra

| 谱峰位置     | GaSb [200] | GaAs [211] | GaSb [400] | GaAs [422] |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| 样品 A 半峰宽 | 0.176      | 0.161      | 0.176      | 0.150      |
| 样品 B 半峰宽 | 0.263      |            | 0.323      |            |

从以上 XRD 测试的结果中分析得出, 根据特征峰所在的位置, 有 GaSb 和 GaAs 各自相应的谱峰. 并且 A、B 两样品的衍射峰的半峰宽都较窄, 说明样品的结晶度较好, 其中 A 样品的结晶度稍好于 B 样品<sup>5-6</sup>.

### 2.3 用慢正电子束多谱展宽谱方法探测 GaSb 薄膜样品

实验采用慢正电子束设备, 正电子谱<sup>22</sup>Na 放射源, 能量在  $0 \sim 20 \text{ keV}$  连续可调. 用高纯锗半导体探测器探测正电子湮没产生的辐射能谱, 能量分辨率约为  $1 \text{ keV}$ , 每个能谱累计湮没事件达到  $5 \times 10^5$  个.

实验采用了  $S$  线形参数来表征能谱<sup>[7-8]</sup>. 对 A、B 两样品, 测量了不同的正电子注入能量  $E$  与所对应的  $S$  因子的关系, 获得了  $S-E$  曲线及  $S-W$  曲线.

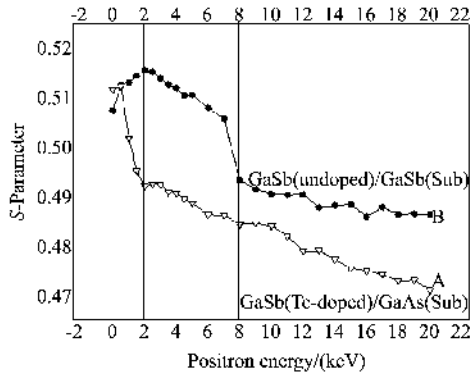


图3 多谱勒展宽  $S$  参数的变化趋势  
Fig. 3 The trends of Doppler broadening  $S$  parameters

图3中显示了用正电子湮没多谱勒展宽谱的  $S$  参数变化趋势的曲线. 从曲线 B 可以看出, 在能量为 8 keV 所对应的深度处, 曲线发生了较大的转折, 曲线斜率在这里有着明显的突变, 说明在该处为样品生长中的界面层. 因正电子注入的能量是其材料距表层深度的单值函数, 由下式可算出一定能量的正电子所对应的材料中的深度.

$$H = AE^n / \rho, \quad (1)$$

式中  $H$  为距薄膜表层的深度 (单位为 nm),  $A, n$  为常数,  $E$  为正电子的能量 (单位为 keV),  $\rho$  为材料的密度 (单位为  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<sup>[7]</sup>. 这样即可得到注入的能量与深度之间的对应关系. 前人常取经验式中常数为  $A = 40, n = 1.6$ . 若把 GaSb 的体密度  $\rho = 5.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  代入, 可计算出正电子能量为 8 keV 的薄层处所对应的深度约为 200 nm. 这里和实验所测结果稍有差异, 当然应以实验数据为依据, 并且已反复实验证明, 用分子束外延生长薄膜的厚度可精确控制在原子层数量级. 但是总可以得到, 能量分布在 0 ~ 8 keV 的正电子注入到了薄膜 GaSb 内, 而能量大于 8 keV 的正电子注入到缓冲层及衬底里.

因正电子在表层湮没的信息不是太准确, 这里不便研究, 但处在正电子注入能量 2 ~ 8 keV 所对应的薄膜层内, 样品的  $S$  参数分层较为明显, 且样品 A 在该薄膜层内的  $S$  参数  $< 0.5$ , 几乎与 GaSb 单晶衬底的  $S$  参数相等, 表征正电子在这里被捕获的较少, 其缺陷数也较少, 且缺陷类型可能为单空位和间隙原子为主<sup>[7]</sup>. 另外在曲线 A 转折 (8 keV) 处, 样品

在界面处的分层信息不是很明显, 说明采用该工艺生长的样品中衬底 GaAs 和外延 GaSb 薄膜之间的外延较好, 晶格失配较小, 缺陷较少<sup>[7-16]</sup>.

正电子在界面处具有独特的湮没信息, 通过分析不同正电子注入能量下测量的  $S-W$  参数, 在图中的  $S-W$  曲线上可以明显观察到正电子的界面处.

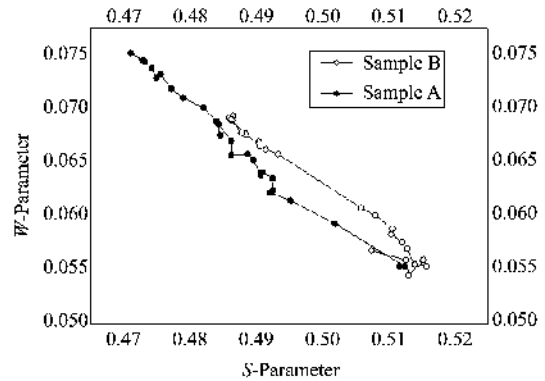


图4 多谱勒展宽  $S-W$  参数的变化趋势  
Fig. 4 The trend of Doppler broadening  $S-W$  parameters

图4是 0 ~ 20 keV 区间段的  $S-W$  参数曲线, 样品 A 的展宽谱中的  $S-W$  参数的曲线没有较大的转折, 各参数多分布在一条直线上, 说明该样品内无明显的界面, 且缺陷的种类几乎无变化, 这也说明样品内并无缺陷杂质的复合体产生<sup>[7,11-16]</sup>.

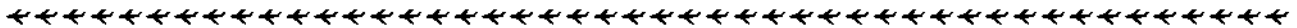
### 3 结论

主要介绍了用分子束外延生长掺杂 Te 的 GaSb 薄膜的生长工艺及缺陷特性, 并从实验上测试分析出缺陷在薄膜层内的分布及种类. 结果表明, 用该工艺生长的样品其缺陷类型主要以单空位和间隙原子为主, 而无复合体的缺陷结构产生. 也说明用掺 Te 的方法得到的 n 型半导体 GaSb 薄膜, 并没对原有的晶体结构产生较大影响.

### REFERENCES

- [1] Guo J, Peng Z Y, Sun W C, et al. InAs/GaSb superlattices for photodetection in short wavelength infrared range [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(4): 124-126.
- [2] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(2-3): 59-210.
- [3] HAO Rui-Ting, XU Ying-Qiang, ZHOU Zhi-Qiang, et al. GaSb bulk materials and InAs/GaSb superlattices grown by MBE on GaAs substrates [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (郝瑞亭, 徐应强, 周志强, 等. GaAs 基 GaSb 体材料及 InAs/GaSb 超晶格材料的 MBE 生长. 半导体学报), 2007, 28(7): 1088-1091.
- [4] Bowen W R, Hlil N. Atomic force microscopy in process en-

- gineering[M]. PREFACE, 2009: 55-98.
- [5] Abroug S, Saadallah F, Genty F, *et al.* Investigation of electrical and optothermal properties of Si-doped GaSb epitaxial layers by the hall effect, PI. measurement and photo-thermal deflection spectroscopy [J]. *Physics procedia*, 2009, **2**(3): 787-795.
- [6] Jha S, Liu C C, Kuan T S, *et al.* Defect reduction in epitaxial GaSb grown on nanopatterned GaAs substrates using full wafer block copolymer lithography [J]. *Appl. phys. lett.*, 2009, **95**(6): 062104.
- [7] WANG Shao-Jie, CHEN Zhi-Quan, WANG Bo, *et al.* *Applied Positron Spectroscopy* [M]. Wuhan City: Hubei Science and Technology Press (王少阶, 陈志权, 王波, 等. 应用正电子谱学. 武汉市: 湖北科学技术出版社), 2008: 197-231.
- [8] CAO Xing-Zhong, WANG Bao-Yi, WANG Ping, *et al.* Performance of Beijing intense slow positron beam [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics* (曹兴忠, 王宝义, 王平, 等. 北京慢正电子束流运行性能测试. 高能物理与核物理), 2006, **30**(12): 1196-1199.
- [9] Abroug S, Saadallah F, Yacoubi N. Photothermal investigations of doping effects on opto-thermal properties of bulk GaSb [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **484**(1-2): 772-776.
- [10] SHAO Yun-Dong, WANG Zhu, ZHAO You-Wen, *et al.* Positron annihilation study of defect in semiconductor material GaSb [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)* (邵云东, 王柱, 赵有文, 等. 用正电子研究半导体材料 GaSb 的缺陷. 武汉大学学报(理学版)), 2006, **52**(1): 035-039.
- [11] Ling C C, Fung S, Beling C D. Defect study of Zn-doped p-type gallium antimonide using positron lifetime spectroscopy [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(7): 075201.
- [12] Brandt W, Dupasquier A (Eds). *Positron solid-state physics* [M]. Amsterdam, 1983: 358-435.
- [13] Dupasquier A, Mills A P. *Positrons spectroscopy of solids* [M]. Amsterdam, 1995: 540-545.
- [14] Shao Y D, Wang Z, Dai Y Q, *et al.* Identification of vacancies in electron irradiated GaSb by coincidence Doppler broadening spectroscopy [J]. *Materials Letters*, 2007, **61**(4-5): 1187-1189.
- [15] Hu W G, Wang Z, Sua B F, *et al.* Gallium antisite defect and residual acceptors in undoped GaSb [J]. *Physics Letters A*, 2004, **332**(3-4): 286-290.
- [16] Koerperick E J, Murray L M, Norton D T, *et al.* Optimization of MBE-grown GaSb buffer layers and surface effects of antimony stabilization flux [J]. *J. Cryst. Growth*, 2010, **312**(2): 185-191.



(上接第 297 页)

## REFERENCES

- [1] Smulders P. Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2002, **40**(1): 140-147.
- [2] Floyd B A, Reynolds S K, Pfeiffer U R, *et al.* SiGe bipolar transceiver circuits operating at 60 GHz [J]. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 2005, **40**(1): 156-167.
- [3] Pfeiffer U R, Reynolds S K, Floyd B A. Radio frequency integrated circuits (RFIC) symposium, 2004. Digest of Papers. 2004 IEEE, 2004: 91-94.
- [4] Li W, Kracmer R, Bomgraber J. Microwave symposium Digest, 2006. IEEE MIT-S International, 2006: 1834-1837.
- [5] FCC 03-248 Allocations and service rules for the 71 ~ 76GHz, 81 ~ 86GHz and 92 ~ 95GHz bands [S]. FCC Report and order, Nov. 2003.
- [6] Cao Y X, Jin Z, Ge J, *et al.* A symbolically defined InP double heterojunction bipolar transistor large-signal model [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, **30**(12): 40001-1-40001-5.
- [7] Jin Z, Su Y B, Cheng W, *et al.* High current multi-finger InGaAs/InP double hetero-junction bipolar transistor with the maximum oscillation frequency 253GHz [J]. *CHIN. PHYS. LETT*, 2008, **25**(8): 3075-3078.
- [8] Lonac J A, Santarelli A, Melczarsky I, *et al.* Gallium arsenide and other semiconductor application symposium, 2005. EGAS 2005. European, 2005: 197-200.
- [9] Deguchi I, Ghannouchi F M. Systematic and rigorous extraction method of HBT small-signal model parameters [J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2006, **54**(2): 682-688.
- [10] O Sullivan T. Design of millimeter-wave power amplifiers using InP heterojunction bipolar transistors [D]. University of California, San Diego, USA: Electrical Engineering, 2009.
- [11] Li J C, Asbeck P M, Hussain T, *et al.* Compound semiconductors [C]. Post-Conference Proceedings, 2003 International Symposium on, 2003: 138-143.
- [12] Abbas K, Ali H. Custom integrated circuits conference [C]. Proceedings of the IEEE, 2005: 571-574.