

低能离子束制备(Ga, Gd, As)薄膜*

宋书林¹ 陈诺夫^{1,2} 周剑平¹ 李艳丽¹ 杨少延¹ 刘志凯¹

(¹ 中国科学院半导体所 半导体材料科学重点实验室, 北京, 100083)

(² 中国科学院力学研究所 国家微重力实验室, 北京, 100080)

2003-07-29 收稿, 2003-09-22 收改稿

摘要: 室温条件下, 用离子束外延设备制备(Ga, Gd, As)样品, X射线衍射(XRD)结果表明除了GaAs衬底峰, 没有发现其他新相的衍射峰。俄歇电子能谱(AES)分析了样品中元素随深度的变化, 不同样品中元素的分布有着不同的特点。并运用原子力显微镜(AFM)研究了样品表面的形貌特点, 表明样品表面的粗糙度与Gd注入过程中在样品表面沉积的多少有关。运用交变梯度磁强计(AGM)对薄膜进行磁性分析, 结果表明有的样品在室温条件下出现铁磁性, 但金属钐本身具有室温铁磁性, 因而需要进一步分析。

关键词: 镓、钐、砷薄膜; 低能离子束系统; 砷化镓衬底

中图分类号: TN 304.7; TN 304.054 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2004)02-258-04

(Ga, Gd, As) Film Prepared by Low Energy Ion Beam System

SONG Shulin¹ CHEN Nuofu^{1,2} ZHOU Jianping¹ LI Yanli¹ YANG Shaoyan¹ LU Zhikai¹

(¹ Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, CHN)

(² National Microgravity Laboratory of Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics, Beijing, 100080, CHN)

Abstract: (Ga, Gd, As) film was prepared on GaAs (100) substrate by ion beam technique with low energy of 1 000 eV at room temperature. There was no new peak found except the GaAs substrate main peaks from the X-ray diffraction results. The element distributions vary much in the two samples because of the ion doses difference from the element depth profile by AES. Sample surface morphology was obtained by AFM, whose roughness extent was related to the amount of Gd ion deposit on sample surface after implantation. Although room temperature ferromagnetic behavior showed in some samples with alternating gradient magnetometer, further investigation still need to be carried out for gadolinium metal's ferromagnetic behavior at room temperature.

Key words: (Ga, Gd, As) film; low energy ion beam system; GaAs substrate

EEACC: 2550B; 3110

1 引言

如何实现磁性材料与半导体材料的结合, 研究

者从以下两种途径^[1,2]进行了探索。在半导体衬底上外延得到铁磁性金属化合物/半导体异质结构; 制备稀磁半导体/半导体的混合结构。由于金属和半导体中导电率不同和自旋散射长度的差异, 后一

* E-mail: slsong@red.semi.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金 60176001 和国家重大基础研究计划项目 G20000365 和 G2002CB311905 共同资助

种结构更适合进行电子的自旋极化输运性质的研究^[3]。

用磁性离子(过渡族金属元素或稀土元素)替代化合物半导体中的部分组成元素形成稀磁半导体(DMS), 开创了在半导体中利用和研究电子自旋性质的新领域并引起了广泛的重视^[4,5]。GaAs 具有良好的光学和电学性质, 如直接带隙和电子迁移率高的优点, 而被广泛地应用于高速电子器件和光电器件中。稀土元素具有很好的磁学性质, 以元素 Gd 为例, 其半满的 f 壳层电子具有自旋磁矩。通过对 GaAs 掺 Gd 形成稀磁半导体的研究可以获得更多的信息。

2 材料制备

所采用的低能双离子束外延设备(Mass Analyzed Low Energy Dual Ion Beam Epitaxy, 简称 BE), 具有高真空度, 利用磁质量分析器的离子质量分析功能, 可对难化合、易氧化的特殊材料进行提纯, 使离子纯度达到同位素级等优点, 本台设备的结构和工作原理参见文献^[6]。其基本性能参数为: 靶室静态真空度为 5.3×10^{-8} Pa; 靶室动态真空度为 1.2×10^{-5} Pa; 离子能量为 30~1500 eV, 通常进行外延生长的能量较低, 选择较高的能量如 1000 eV 可以使离子注入衬底中; 可分选原子量为 1~207(H-Pb); 衬底温度为 300~1073 K。

所选用衬底为半绝缘 GaAs(100) 单晶片, 在注入前除去衬底表面的污物、重金属离子和氧化物, 并经过清洗和腐蚀^[7], 通过机械手送入真空室(真空度 $< 1 \times 10^{-6}$ Pa)。离子由 Bernas 源电离产生, 经过加速电压引出由质量分析器得到所需的 Gd^+ 离子, 再减速到 1000 eV, 聚焦后, 在室温条件下注入衬底, 离子剂量分别为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (A) 和 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (B), 生成过程中离子束流大小为 20~40 μA , 生长时间约为 120 min。

3 测试与分析

运用 X 射线衍射(XRD) 和俄歇电子能谱(AES) 分析了样品组份的特点, 及元素 Gd 在样品内部随深度的变化规律, 结合原子力显微镜(AFM) 分析了样品表面的形貌特点。磁性分析借助于交变梯度磁强计(AGM), 部分样品具有室温

铁磁性, 但这有待于进一步分析。

3.1 结构分析

结构分析采用日本理学(Rigaku) 公司转靶 X 射线衍射仪, 设备型号 D/max-2400, 使用的波长为 $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154056 \text{ nm}$), 扫描范围是 $2\theta = 20^\circ \sim 90^\circ$; 采用 θ - 2θ 联动扫描模式, 步长为 $2\theta = 0.02^\circ$ 。分析结果表明, 两个样品中除了 GaAs 衬底的 (002) 和 (004) 峰, 没有发现其他的衍射峰, Gd 注入样品中引起结构的微小变化需要进一步分析, 因而本文只给出了样品 A 的 XRD, 结果如图 1 所示。

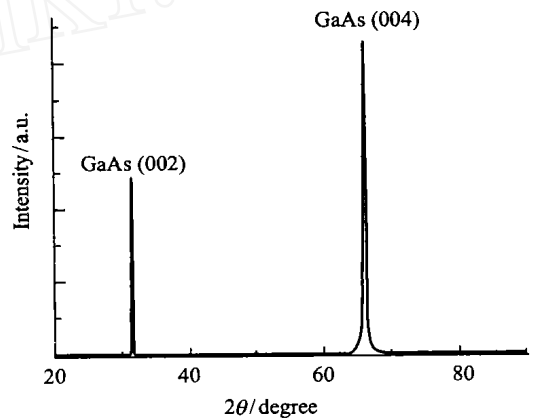


图 1 样品 A 的 X 射线衍射图

Fig 1 X-ray diffraction spectrum of the sample A

3.2 组份分析

用 PHI-610/SAM 型扫描俄歇微探针, 对样品表面进行分析, 样品表面 AES 微分谱表明含有 C、O 和 Gd 三种元素。其中 C 元素的出现与样品取出样品室后被污染有关, O 是由于样品取出后表面沉积的 Gd 被氧化所导致的。为了排除被污染样品表面对分析结果的影响, 进一步分析样品内部存在的元素, 对样品表面下 20 nm 深处的 AES 微分谱进行分析, 从图 2 中可以看出样品 A 在这一深度 C 元素消失, 但 O 元素仍然存在; 样品 B 中元素 C 和 O 消失, 元素 Ga 和 As 出现。

通过对样品进行 AES 深度成分分析, 可以了解元素在样品内部的变化规律。从图 3 可以看出 Gd 在样品 A 中的存在深度约为 230 nm, 并且 Gd 和 O 的相对含量高于 Ga 和 As; 样品 B 中元素相对含量正好相反, 并且 Gd 的存在深度浅。根据两

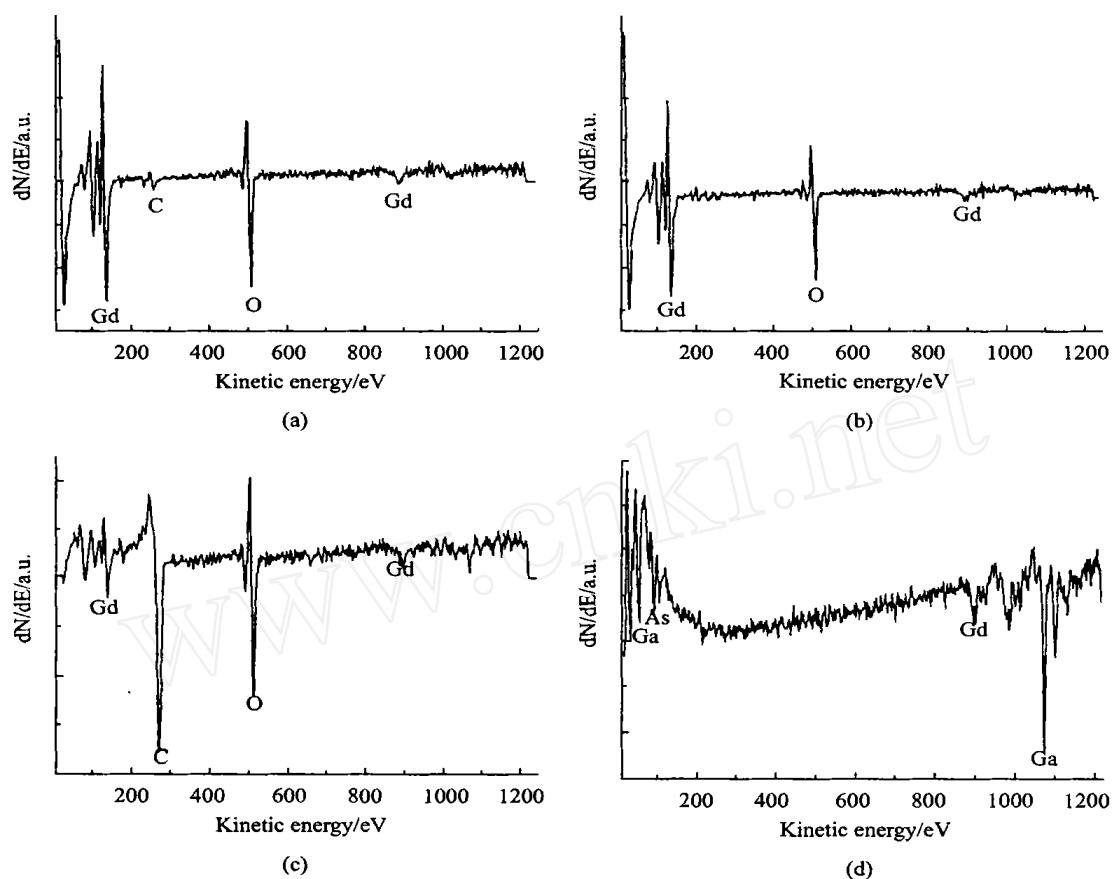


图2 样品A 表面AES 谱(a)和20 nm 深处AES 谱(b); 及样品B 表面AES 谱(c)和20 nm 深处AES 谱(d)
Fig. 2 AES spectrum of sample A surface (a); at 20 nm depth (b); sample B surface (c); at 20 nm depth (d)

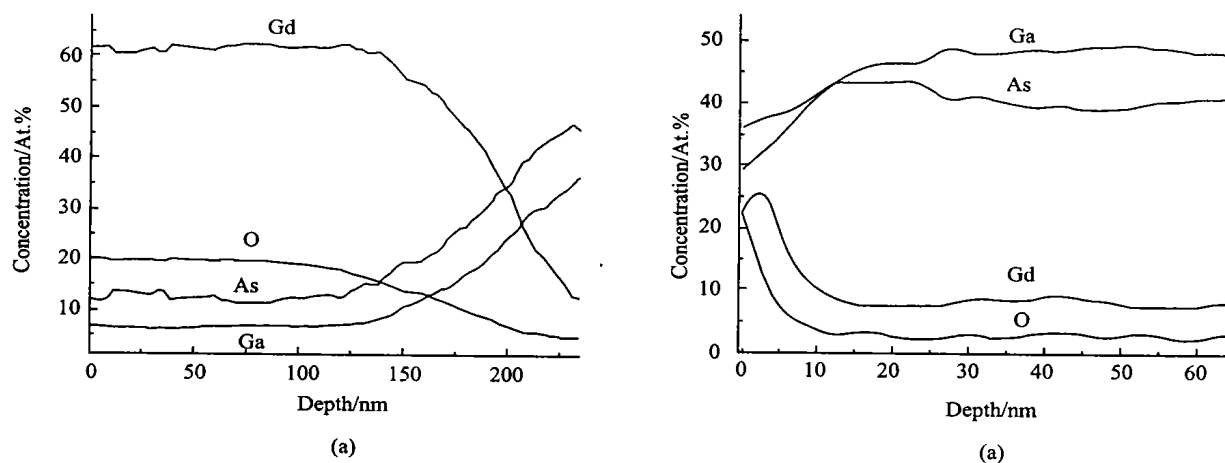


图3 样品A (a)和B (b)组份随深度变化分布图
Fig. 3 AES depth profiles of the sample A (a) and B (b)

个样品中元素 Gd 随深度的变化关系可以说明, 由于样品A 中 Gd 的注入剂量比较大, 会导致较多的 Gd 沉积在 GaAs 的表面, 使得元素 Gd 在样品中的变化较为平缓

3.3 形貌分析

运用原子力显微镜(AFM)对样品的表面形貌

进行了分析, 从图 4 可以看出样品 A 的表面比较粗糙。通常对样品进行离子注入会因为离子的轰击造成样品表面的粗糙, 根据两个样品表面形貌的对比, 说明低能离子注入对样品的表面破坏性较小。由于样品 A 中 Gd 的注入剂量大, 样品表面沉积了一层 Gd, 在室温条件下, 当样品取出后被氧化形成表面的氧化层。

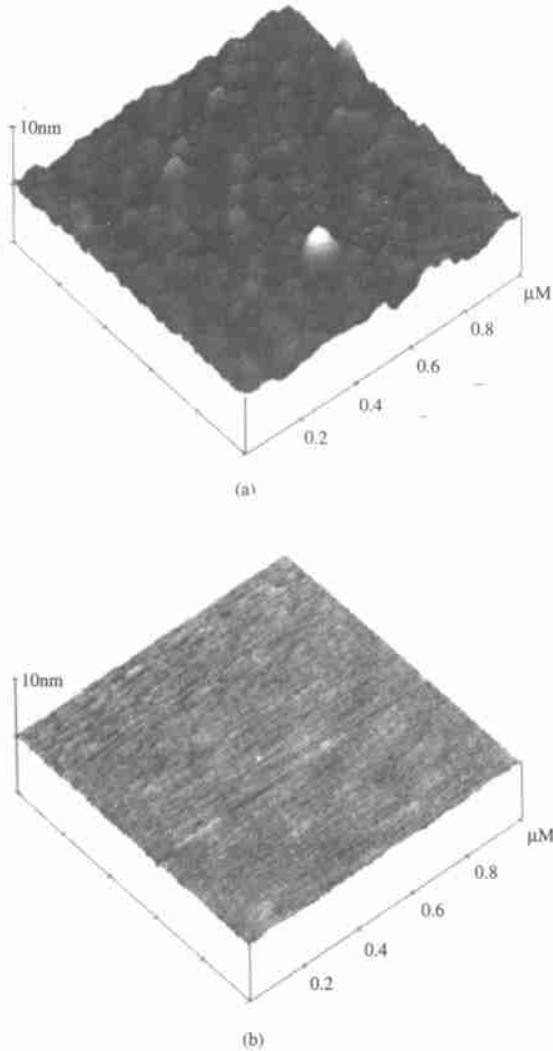


图 4 样品 A (a) 和 B (b) 表面原子力显微镜形貌图
Fig. 4 Sample A (a) and B (b) surface morphology by AFM

(100) 单晶衬底上得到了 (Ga, Gd, As) 薄膜, X 射线分析没有发现新相衍射峰的存在。AES 深度分析结果表明样品 A 中 Gd 的存在深度较深, 而元素的相对含量与注入的剂量有关。对样品表面的 AFM 分析结果可以看出, 样品 A 中 Gd 的注入剂量大, 会导致样品的表面沉积一层 Gd, 样品取出后由于 Gd 容易被氧化形成一层氧化物薄膜。

参 考 文 献

- 1 Tanaka M, Higo Y. Large Tunneling magnetoresistance in GaMnAs/AlAs/GaMnAs ferromagnetic semiconductor tunnel junctions *Phys Rev Lett*, 2001; **87**: 26602
- 2 Ohno H, Munekata H, Penney T, et al. Magneto-transport properties of p-type (In, Mn)As diluted magnetic III-V semiconductors *Phys Rev Lett*, 1992; **68**: 2664
- 3 Schmidt G, Molenkamp L W. Dilute magnetic semiconductors in spin-polarized electronics *J Appl Phys*, 2001; **89**(11): 7443
- 4 Ohno Y, Young D K, Beschoten B, et al. Electrical spin injection in a ferromagnetic semiconductor heterostructure *Nature*, 1999; **402**: 790
- 5 Prinz G. Magnetoelectronics *Science*, 1990; **250**: 1092
- 6 Qin F G, Wang X M, Liu Zh K, et al. Construction and applications of a dual mass-selected low-energy ion beam system. *Rev Sci Instrum*, 1991; **62**: 2322
- 7 Yang J L, Chen N F, Liu Zh K, et al. (Ga, Mn, As) compounds grown on semi-insulating GaAs with mass-analyzed low energy dual ion beam deposition. *J Cryst Growth*, 2002; **234**(2-3): 359



宋书林 (SONG Shulin) 男, 1976 年 1 月生, 2001 年毕业于吉林大学, 获得硕士学位。现就读于中科院半导体所材料开放室, 进行材料物理与化学专业博士学位的学习, 研究方向为磁性半导体的制备与性质研究。

4 结 论

运用低能离子束外延设备在半绝缘的 GaAs