

离子束外延制备 GaAs Gd 薄膜*

宋书林¹,陈诺夫^{1,2},周剑平¹,尹志岗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)

摘要: 室温条件下,用低能离子束外延制备了 GaAs Gd 薄膜,X射线衍射(XRD)结果表明除了 GaAs 衬底峰没有发现其它新相的衍射峰,并借助于高分辨 X 射线衍射(HR-XRD)进一步分析了晶格常数的变化特点。俄歇电子能谱(AES)分析了样品表面的成分,及元素随深度的分布规律,在 60nm 深处元素的相对含量发生明显改变,运用原子力显微镜(AFM)揭示了样品表面的形貌特点。

关键词: GaAs Gd 薄膜;低能离子束外延;GaAs 衬底

中图分类号: TN304.7;TN304.054 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-9731(2004)03-0336-02

1 引言

信息行业主要是利用半导体中电子的电荷自由度处理、传输信息以及磁性材料中电子的自旋自由度来存储信息,如何将这两种性质结合起来探索新的功能材料将是下一步发展的目标。而半导体中载流子的自旋没有得到充分利用的主要原因是信息行业中所用的材料,如 Si 和 GaAs 等都不是铁磁性的^[1]。

通过运用低温分子束外延生长或者离子注入方式,可以在半导体中掺入超过其固溶度的磁性离子(过渡族金属元素或稀土元素),来替代化合物半导体中的部分组成元素,形成稀磁半导体(DMS)。GaMnAs($T_c = 110\text{K}$)材料的成功制备^[2],吸引诸多的研究者针对这一材料开展了大量的研究工作^[3-6],但其铁磁性转变温度仍然远低于室温。改变掺杂元素的类型以 Gd 为例,其半满的 f 壳层电子提供了很大的自旋磁矩(7.9 μB),在 GaAs 中掺 Gd 形成 GaAs Gd,将会为稀磁半导体的研究提供更多的信息。

2 实验方案

所采用的低能双离子束外延制备(mass analyzed low energy dual ion beam epitaxy,简称 IBE),具有高真空度,利用磁质量分析器的离子质量分析功能,可对其它工艺不易实现的难提纯、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纯等优点,本台设备的结构和工作原理参见文献^[7]。其基本性能参数为:靶室静态真空度为 $5.3 \times 10^{-8}\text{Pa}$;靶室动态真空度为 $1.2 \times 10^{-5}\text{Pa}$;离子能量为 30 ~ 1500eV(连续可调);可分选原子量为 1 ~ 207(H-Pb);衬底温度为 300 ~ 1073K。

所用的衬底为半绝缘 GaAs(100)单晶片,为除去衬底表面的污物、重金属离子和氧化物,衬底要经过清洗和腐蚀^[8]后,通过机械手送入真空室(真空度 $< 1 \times 10^{-6}\text{Pa}$)。离子由 Bernas 源电离产生,经过加速电压引出,通过质量分析器得到所需的离

子,再减速到 1000eV 聚焦,使 Gd^+ 离子浅注入到 GaAs 衬底中。室温条件下注入离子的剂量为 $1.6 \times 10^{17}\text{cm}^{-2}$,注入过程中离子束流大小为 20 ~ 40 μA ,时间约为 120min。

3 实验结果与分析

运用 X 射线衍射仪(XRD)和高分辨 X 射线衍射仪(HR-XRD)分析了样品的结构特征,借助于俄歇电子能谱(AES)揭示了样品表面的组成及元素分布随深度的变化规律,结合原子力显微镜(AFM)分析了样品表面的形貌特点。

3.1 结构分析

对样品进行结构分析所采用的设备是日本理学 Rigaku 公司的 X 射线衍射仪,设备型号 D/max-2400,使用的波长为 CuK($\lambda = 0.154056\text{nm}$),扫描范围是 20 ~ 90°,采用 -2 联动扫描模式,步长为 $2\theta = 0.02^\circ$ 。实验结果如图 1 所示除了 GaAs 衬底的(002)和(004)峰,没有发现其它的新峰。

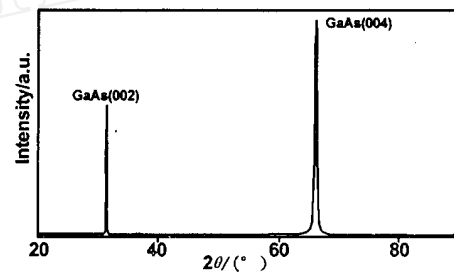


图 1 样品 X 射线衍射图

Fig 1 X-ray diffraction spectrum of the sample

为了进一步分析元素注入后晶格常数的变化特点,借助于 Philips Xpert-MRD(materials research diffractometer)设备对样品的(004)峰采用 -2 扫描模式进行了分析。从图 2 的摇摆曲线可以看出,在(004)峰的低端方向有一个连续分布的突起,但并没有与(004)峰完全分离开来。这一特点说明注入的 Gd 离子造成了晶格的膨胀,并且 Gd 的分布与深度成一定关系。

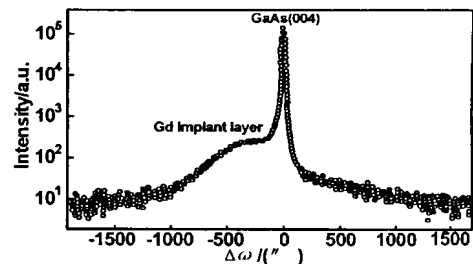


图 2 样品的(004)摇摆曲线

Fig 2 Rocking curve of (004) peak

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60176001);国家重大基础研究计划资助项目(G20000365 和 G2002CB311905)

收稿日期:2003-07-08 通讯作者:宋书林

作者简介:宋书林(1976-),男,山东烟台人,在读博士,2001年于吉林大学获工学硕士学位,现在中科院半导体所材料开放室,师承陈诺夫研究员,从事磁性半导体材料研究。

3.2 组份分析

用 PHF-610/SAM 型扫描俄歇微探针,对注入的样品表面进行分析,样品表面 AES 微分谱表明存在 C、O 和 Gd 3 种元素。如图 3 所示,其中 C 元素的出现与样品取出样品室后被污染有关, O 是由于注入过程中表面沉积的一层 Gd 在空气中容易被氧化所导致的。图 4 是样品经过 Ar 离子轰击后在表面下 20nm 深处的 AES 微分谱,从图中可以看出 C 和 O 元素仍然存在,并且元素 Ga 和 As 也出现。

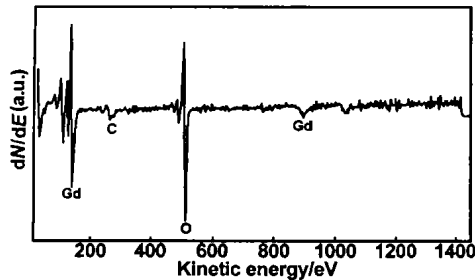


图 3 样品表面的 AES 谱

Fig 3 AES spectrum of the sample surface

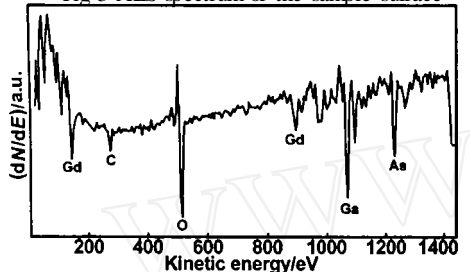


图 4 样品表面下 20nm 深处的 AES 谱

Fig 4 AES spectrum of the sample at 20nm depth

图 5 是样品的 AES 深度成分分析图,由于 C 的存在是与样品被污染有关,因而仅对 Gd、O、As 和 Ga 4 种元素进行了归一化分析。

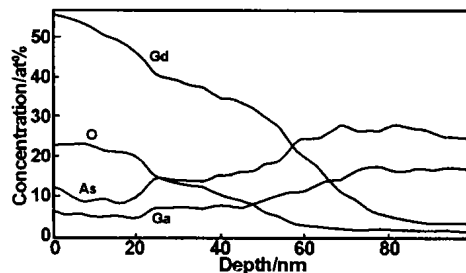


图 5 样品组份随深度变化分布图

Fig 5 AES depth profile of the sample

从图 5 中可以看出 Gd 和 O 与 As 和 Ga 随深度的变化规律正好相反,样品表面至 20nm 深处,Gd 和 O 相对含量较高,这主

要是由于注入的剂量比较大,有一部分 Gd 会沉积在 GaAs 的表面;在大约 60nm 深处 4 种元素的相对含量发生明显的改变,即元素含量逐步过渡为以 As 和 Ga 为主。在所分析的范围, Gd 的存在深度约为 100nm。

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 6 可以看出样品的表面比较粗糙。结合 AES 的分析结果,这主要是由于样品在低能注入过程中会在表面沉积一层 Gd,室温条件下,元素 Gd 容易被氧化,因此当样品取出后暴露于大气中,会使表面沉积的 Gd 被氧化后形成表面的非晶态氧化层。

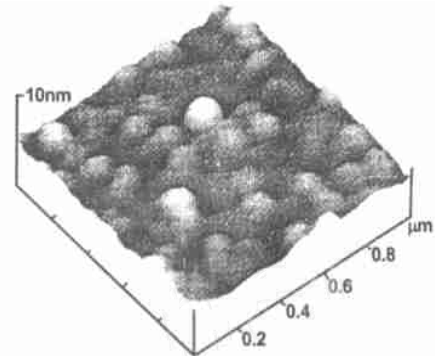


图 6 样品表面原子力显微镜形貌图

Fig 6 The sample surface morphology by AFM

4 结 论

运用低能离子束外延设备在半绝缘的 GaAs(100) 单晶衬底上得到了 GaAs Gd 薄膜,X 射线衍射分析没有发现新衍射峰的存在,高分辨 X 射线衍射分析表明 Gd 注入后晶格常数增大。AES 的分析结果表明样品表面下 60nm 深处,元素的分布规律发生改变,主要组成元素的相对含量在样品中不同的区域具有明显的变化,并对样品表面沉积的 Gd 所形成氧化物的厚度进行了分析。样品表面形貌图说明在样品取出后,室温条件下表面沉积的一层 Gd 被氧化形成了非晶态的氧化物薄膜。

参考文献:

- [1] Ohno H. [J]. Science, 1998, 281: 951.
- [2] Ohno H, Shen A, Matsukara F, et al. [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69: 363.
- [3] Shi Jing, Kikkawa J M, Proksch R, et al. [J]. Nature, 1995, 377: 707.
- [4] Chen Chenjia, Cai Ming, Wang Xuezhong, et al. [J]. J Appl Phys, 2000, 87: 5636.
- [5] Ball P. [J]. Nature, 2000, 404: 918.
- [6] Prinz G. [J]. Science, 1990, 250: 1092.
- [7] Qin F G, Wang X M, Liu Zh K, et al. [J]. Rev Sci Instrum, 1991, 62: 2322.
- [8] Yang J L, Chen N F, Liu Zh K, et al. [J]. J Cryst Growth, 2002, 234(2-3): 359.

GaAs Gd film preparation by ion beam epitaxy

SONG Shu-lin¹, CHEN Nuo-fu^{1,2}, ZHOU Jian-ping¹, YIN Zhi-gang¹, LI Yan-li¹, YANG Shao-yan¹, LIU Zhi-kai¹

(1. Key Lab. of Sem. Mat. Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. National Microgravity Laboratory of Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics, Beijing 100080, China)

Abstract: GaAs Gd film was fabricated on GaAs (100) substrate by ion beam epitaxy technique at room temperature. There was no new peak found except the GaAs substrate main peaks from the X-ray diffraction results. The lattice change was further measured with the help of high-resolution X-ray diffraction. Surface components and depth profiles were analyzed by auger electron spectra. It was shown that the proportion of main components changed at the depth of 60nm from the results while surface morphology was imaged by atomic force microscopy.

Key words: GaAs Gd film; low energy ion beam epitaxy; GaAs substrate