

GaAs 衬底上 Mn/Sb 多层铁磁膜的磁光克尔效应*

王学忠 蔡明 陈辰嘉 孙允希 孙陶亨 张毓英

(北京大学物理系, 北京, 100871)

摘要 利用超高真空电子束蒸发技术在 GaAs(100) 上生长 Mn/Sb 多层膜, 并经短时间热退火处理分别研究了其退火前后的磁性、磁光克尔效应及相应规律, 退火前 Mn/Sb 膜在室温下即具有较强的铁磁特性, 其易磁化轴在膜面内, 样品表面由密集的岛状铁磁颗粒组成, 未能观测到纵向 ($H//$ 平面) 克尔效应, 经 350 C、20min 退火的样品显示了最大饱和磁化强度 M_s 和最小矫顽力 H_c , X 射线衍射测量表明膜为 MnSb 单晶并具有均匀的铁磁特性, 能观测到显著的极向和纵向磁光克尔效应, 其随磁场变化表现出相应于磁化强度的磁滞行为。

关键词 薄膜, 退火, 铁磁性, 磁光克尔效应。

MAGNETO-OPTICAL KERR EFFECT OF Mn/Sb MULTILAYER FERROMAGNETIC FILMS ON GaAs SUBSTRATE*

WANG Xue-Zhong CAI Ming CHEN Chen-Jia SUN Yun-Xi
SUN Tao-Heng ZHANG Yu-Yin

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Mn/Sb multilayer films were grown on (100) GaAs substrate by an ultrahigh vacuum evaporation system and were annealed for a short time. The magnetic and magneto-optical properties were investigated for the samples unannealed and annealed, respectively. All unannealed Mn/Sb multilayer films exhibit strong ferromagnetic properties and the easy magnetization axes are in-plane. The surface of the samples consists of dense islands. The longitudinal ($H//$ plane) Kerr effect was not observed for the unannealed samples. All samples annealed at 350 C for 20min were found to be single phase with nickel arsenide (NiAs) crystal structure and have the largest saturation magnetization M_s and the lowest coercive force H_c . The magnetic force microscope image shows uniform ferromagnetic properties of the film. The longitudinal magneto-optical Kerr effect was observed. The observable Kerr effect hysteresis loop can be obtained for the annealed Mn/Sb multilayer films on GaAs.

Key words films, annealing, ferromagnetic properties, magneto-optical Kerr effect.

引言

MnSb 铁磁膜由于具有较大的磁光克尔效应, 而可能用作磁光记录介质而受到关注, 利用蒸发或溅射方法沉积 Mn/Sb 多层膜并经长时间退火形成 MnSb 铁磁膜的研究结果曾有一些报道^[1,2]。近年来, 由于铁磁半导体异质结在电子和磁光器件上可能的应用前景而迅速发展, 用分子束外延 (molecular-beam epitaxy-MBE) 或热壁外延 (hotwall epi-

taxy-HWE) 技术在 GaAs 上生长 MnSb 形成一种半导体铁磁异质结的研究甚为活跃^[3~5]。

本文报道利用比较简单的超高真空电子束蒸发技术在 GaAs 上生长 Mn/Sb 多层膜, 并用短时间退火以避免长时间退火对异质结产生不利影响, 获得了高质量 MnSb 铁磁半导体异质结的探索结果。

1 实验

用 BALZERS UMS 500P 超高真空电子束蒸发

* 国家自然科学基金(编号 19874005)资助项目
稿件收到日期 2000-07-14, 修改稿收到日期 2000-10-08

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 19874005)
Received 2000-07-14, revised 2000-10-08

设备在(100) GaAs 上生长不同层厚的 Mn/Sb 多层膜,衬底温度为 100℃,真空度为 $1.33 \times 6 \times 10^{-5}$ Pa. 在部分样品顶部生长 100 Å 的 SiO₂ 膜,用 RTP-300 型快速热处理设备在高纯 N₂ 保护下对样品进行短时间(~20min)退火处理,退火温度为 250~450 C.

用 Model 2900 MicroMag™ 交变梯度磁强计 (Alternating Gradient Magnetometer-AGM) 在室温下测量样品的磁学特性. 用 Philips X'pert X 射线衍射仪(XRD)分析形成的 MnSb 膜结构. 利用 MultiMode™ III a 型原子力显微镜 (Atomic Force Microscope-AFM) 和磁力显微镜 (Magnetic Force Microscope-MFM) 研究样品表面形貌和零场磁力像. 利用偏振调制磁光克尔效应测量方法^[6]分别观测室温下的 MnSb 膜在 632.8nm 处极向 (polar, $H \perp$ 平面) 和纵向 (longitudinal, $H //$ 平面) 克尔角随磁场的变化.

2 结果和讨论

图 1 为 GaAs 上生长 200 Å Sb/300 Å Mn/200 Å Sb/100 Å SiO₂ 多层膜未退火室温下典型的磁化强度与磁场的关系. 由图可见其饱和磁化强度达到 500 emu/cm², 大于 H. Tatsuoka 等^[7]用 HWE 生长的 MnSb 薄膜的饱和磁化强度 (300 emu/cm²). 同时分别测量了不同层厚 ($d_{Mn} = d_{Sb} = 20 \sim 200$ Å) Mn/Sb 多层膜未退火样品的磁化强度特性, 均获得与上述类似的结果. Mn 为反铁磁金属, Sb 为非磁性金属, 上述结果表明在 100℃ 衬底温度下, 多层膜 Mn/Sb 界面处存在极强的互扩散和反应, 在多层膜生长过程中已形成了 MnSb 铁磁化合物, 估计其扩散长

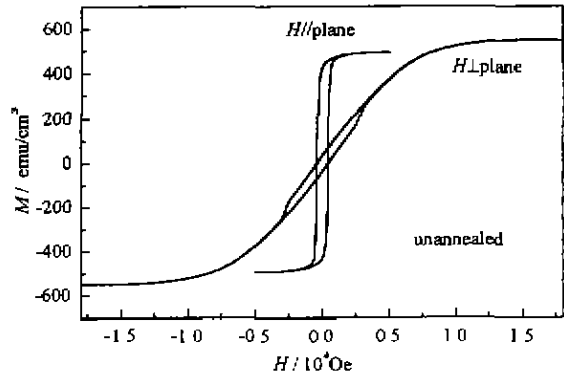


图 1 未退火 200 Å Sb/300 Å Mn/200 Å Sb/100 Å SiO₂ 多层膜室温下的铁磁特性

Fig. 1 Ferromagnetic properties of unannealed multilayer film of 200 Å Sb/300 Å Mn/200 Å Sb/100 Å SiO₂ at room temperature

度大于 100 Å. 图 1 也显示了该 MnSb 膜有显著的磁各向异性, 其易磁化轴在膜面内, 但在面内未观测到磁各向异性.

图 2(a) 为未退火 Mn/Sb 多层膜 ($d_{Mn} = d_{Sb} = 40$ Å, 5 周期) 的三维 AFM 表面形貌像, (b) 为同一区域二维 AFM 表面形貌像 (左) 和 MFM 零场磁力像 (右) 的对比. 由图 2(a) 可见, GaAs 上 Mn/Sb 膜以密集分布、大小不等的岛状方式生长, 其直径在 50~150 nm 之间, 高度大部分为 8 nm 左右. 图 2(b) 的结果显示其岛与磁分布有一一对应关系, 为 MnSb 铁磁颗粒. 所有未退火的 Mn/Sb 多层膜样品虽有较强的铁磁特性, 但未能观测到纵向 ($H //$ 表面) 磁光克尔效应.

对顶部覆盖有 100 Å SiO₂ 的 Mn/Sb 多层膜样

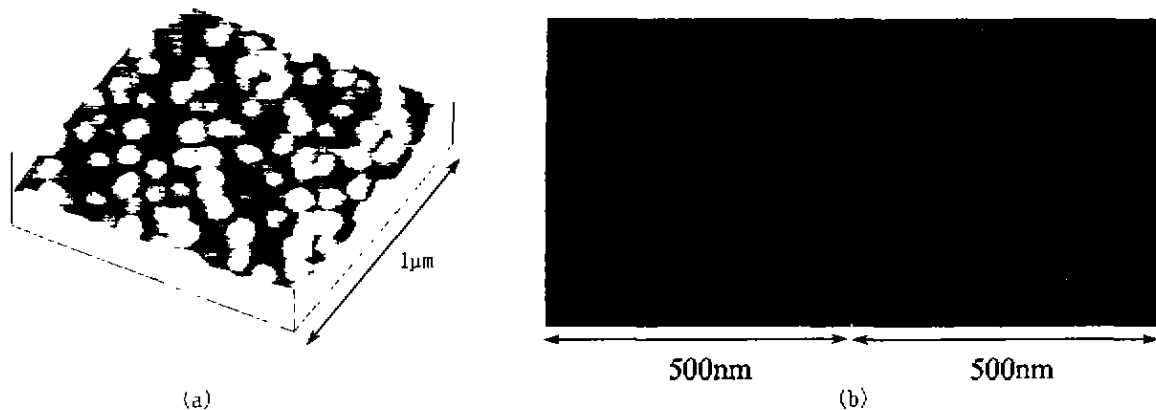


图 2 未退火 Mn/Sb 多层膜 ($d_{Mn} = d_{Sb} = 40$ Å, 5 周期) 的典型 AFM 和 MFM 像

(a) 三维形貌像, (b) 同一区域二维形貌 (左) 和磁力像 (右) 对比

Fig. 2 AFM and MFM images of unannealed multilayer film of Mn/Sb ($d_{Mn} = d_{Sb} = 40$ Å, 5 periods), (a) three-dimensional AFM topograph, (b) two-dimensional AFM (left) and MFM (right) images at the same place

品进行不同温度的短时间退火,并研究了退火对 Mn/Sb 膜各种特性的影响.表 1 给出了 GaAs 上生长 Sb(200 Å)/Mn(300 Å)/Sb(200 Å)/SiO₂(100 Å) 典型样品在不同温度下经 20min 退火后室温饱和磁化强度 M_s 和矫顽力 H_c 的测量结果.由表 1 可见,经退火样品的矫顽力随退火温度升高而减小,饱和磁化强度增大;但当退火温度高于 350℃ 后,其变化规律反之.通过控制退火温度可获得不同的矫顽力和饱和磁化强度,以控制其铁磁特性.

图 3 为 GaAs 上生长的 Mn/Sb 多层膜退火前和 350℃ 20min 退火后 XRD 测得的典型结果.退火前样品只能观测到相应于 GaAs(200)和(400)两个强衍射峰,如图 3(a)所示.但在 350℃、20min 退火的样品上,除 GaAs 衍射峰外,分别在 30.9°和 64.4°观测到两个新的锐衍射峰,其半宽可与 GaAs 单晶衍

表 1 20min 退火后 Sb(200 Å)/Mn(300 Å) /Sb(200 Å)/SiO₂(100 Å) 样品的室温饱和磁化强度 M_s 和矫顽力 H_c

Table 1 The saturation magnetization M_s and coercivity H_c at room temperature for sample Sb(200 Å)/Mn(300 Å)/Sb(200 Å)/SiO₂(100 Å) annealed for 20min

退火温度 (°C)	矫顽力 H_c (Oe)	饱和磁化强度 M_s (emu/cm ³)
未退火	413	490
250	213	590
350	103	669
450	153	636

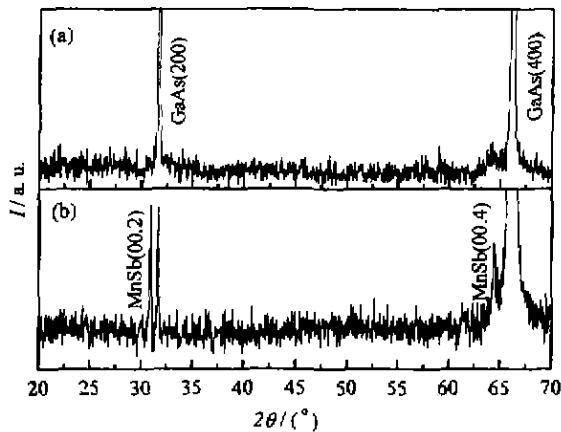


图 3 Mn/Sb 多层膜 XRD 分析的典型结果
(a) 未退火, (b) 350℃、20min 退火
Fig. 3 Typical X-ray diffraction spectra of Mn/Sb multilayer films (a) unannealed, (b) annealed at 350°C for 20min

射峰相比,相应的界面间距依次为 2.892 Å 和 1.445 Å,分别对应于 NiAs 型 MnSb 化合物的(00.2)和(00.4)衍射峰. XRD 结果表明经 350℃ 20min 退火, Mn/Sb 多层膜已形成较高质量的 MnSb 单晶膜.此外,上述样品经 450℃ 退火后的 XRD 分析显示,除前述衍射峰外,还在 2θ 为 23.6°和 48.4°处分别出现对应于 Sb(00.3)和(00.6)的衍射峰,这表明在 450℃ 下 MnSb 化合物又发生分解,从一个侧面说明表 1 所示 450℃ 退火样品 M_s 再次减小和 H_c 增大的可能原因.其次,对 350℃、20min 退火样品的 MFM 观测结果显示,图 2(b)所示的不均匀磁分布完全消失,退火后 MnSb 膜面内磁性分布已十分均匀.

图 4 为 GaAs 上厚度为 700 Å 的 Mn/Sb 多层膜经 350℃、20min 退火后典型的室温磁光克尔角 θ_k 与磁场 H 的关系(图中 θ_{kp} 和 θ_{kl} 分别为极向和纵向克尔角, θ_{km} 为测得相应的最大克尔角).由此可见,磁光克尔角随磁场的变化关系与图 1 中的磁滞回线类似,表明克尔转角正比于 MnSb 膜的磁化强度,并显示了磁场平行和垂直于膜面的磁各向异性,并未观测到面内各向异性.上述结果说明由磁光克尔测量亦可研究 MnSb 膜的铁磁特性.图中极向和纵向克尔角 θ_{kp} 和 θ_{kl} 相应的最大值分别为 0.09°和 0.02°.由于我们实验用电磁铁的场强高限为 3.2KG,因此未能获得极向克尔角的全貌.在极向磁化强度达到饱和的情况下极向克尔角最大为 0.19°.这一量值比 S. Miyanishi 等用 MBE 在 200℃ 衬底温度的 GaAs 上生长 MnSb 膜的实验中测得的饱和极向克



图 4 Mn/Sb 多层膜 350℃、20min 退火后典型的室温磁光克尔角与磁场的关系
Fig. 4 Typical magneto-optical Kerr angle as a function of magnetic field at room temperature for Mn/Sb multilayer film annealed at 350°C for 20min

尔角 0.27° 结果略小^[3]。根据对任意入射角条件下磁光克尔效应的理论分析结果^[6]，克尔效应可以表达为两个因子的乘积：其中一个因子是由入射条件决定的，另一个因子是由介质的磁光性质决定的。在入射角小于 45° 的情况下，极向克尔角基本不受入射角大小的影响，而纵向克尔角随入射角的变大而增加^[6]。由于我们在实验中采用了小角度入射（约为 10° 左右），因此造成极向和纵向饱和克尔角的量值相差较大。G. G. Han 等用 HWE 技术在 GaAs 上生长的 MnSb 膜中未能观测到磁光克尔转角^[4]，本实验的未退火 Mn/Sb 多层膜中亦未观测到纵向磁光克尔角，联系到对退火前后样品的结构、表面形貌和磁力像等分析结果，未能观测到磁光克尔转角的原因可能是由于膜内磁性不均匀和 MnSb 组分的不均匀或偏离所致。N. Yoshioka 等^[3]对 $Mn_{1-x}Sb$ 膜的克尔角与组分 x 关系的研究中曾指出，当 MnSb 组分偏离 1:1 后，其克尔角迅速减小。

3 结论

用超高真空电子束蒸发技术在 100°C 的 GaAs 衬底上生长 Mn/Sb 多层膜，经 350°C 、20min 退火，可以形成较高质量的单晶 MnSb 半导体异质结，室温下即具有强的铁磁性和较强的磁光克尔效应，与用 MBE 或 HWE 技术在 GaAs 上生长的 MnSb 膜特性相近。

致谢 XRD 实验在北京大学人工微结构和介观物

理国家重点实验室材料物理实验室完成。

REFERENCES

- [1] Yoshioka N, Koshimura M, Ono M, *et al.* Magnetic and magneto-optical properties of Mn-Sb alloys and multi-layer films, *J. Magn. Mater.*, 1988, **74**: 51
- [2] Takahashi M, Shoji H, Hozumi Y, *et al.* Giant magnetic Kerr rotation for Pt substituted MnSb compound films with NiAs type structure, *J. Magn. Mater.*, 1994, **131**: 67
- [3] Miyani S, Akinaga H, Tanaka K. Molecular-beam epitaxy of $Mn_{1-x}Sb$ thin films and substrate temperature dependence of their magneto-optical properties, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(20): 2890
- [4] Han G C, Ong C K, Liew T Y F. Magnetic and magneto-optical properties of MnSb films on various substrates, *J. Magn. Mater.*, 1999, **192**: 233
- [5] Akinaga H, Miyanishi S, Roy W V. Structural and magnetic properties of epitaxial (0001) MnSb thin films grown on (111) B GaAs; Influence of interface quality, *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(18): 2472
- [6] WANG Rong-Ming, WANG Xue-Zhong, CHEN Chen-Jia. Giant Faraday rotation in diluted magnetic semiconductors $Cd_{1-x}Mn_xTe$ and $Cd_{1-x}Fe_xTe$, *Universitatic Pekinensis* (王荣明、王学忠、陈辰嘉, 稀土半导体 $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x}Fe_xTe$ 的巨法拉第效应, 北京大学学报), 1995, **31**(7): 571
- [7] Tatsuoka H, Kuwabara H, Oshita M. Growth of epitaxial ferromagnetic MnSb layers by hot-wall epitaxy, *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(5): 2190
- [8] Chun-Yeol You, Sung-Chul Shin. Generalized analytic formulate for magneto-optical Kerr effects, *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(1): 541