

# 室温铁磁性半导体 $Mn_xGa_{1-x}Sb$

陈诺夫<sup>①②</sup> 张富强<sup>①②</sup> 杨君玲<sup>①②</sup> 刘志凯<sup>①</sup> 杨少延<sup>①</sup> 柴春林<sup>①</sup> 王占国<sup>①</sup>  
胡文瑞<sup>②</sup> 林兰英<sup>①②</sup>

(①中国科学院半导体研究所, 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, 中国科学院国家微重力实验室, 北京 100080. 联系人, E-mail: nfchen@red.semi.ac.cn)

**摘要** 采用离子注入、离子淀积及后期退火方法制备了稀磁半导体单晶  $Mn_xGa_{1-x}Sb$ , 在室温下(300 K)获得了单晶的磁滞回线. 用 X 射线衍射方法分析了铁磁性半导体单晶  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  的结构, 用电化学 C-V 法分析了单晶的载流子浓度分布. 由 X 射线衍射得知,  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中 Mn 含量逐渐由近表面处的  $x = 0.09$  下降到晶片内部的  $x = 0$ . 电化学 C-V 测得单晶的空穴浓度高达  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 表明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  单晶中大部分 Mn 原子占据 Ga 位, 起受主作用.

**关键词**  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  铁磁性 稀磁半导体

磁性半导体兼具半导体和磁体特性, 在磁传感器、磁记录以及未来的量子计算和通讯领域都有着良好的应用前景<sup>[1-5]</sup>.

本文通过 Mn 离子的注入、淀积和后期退火制备了闪锌矿结构的  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  单晶, 并在室温(300 K)下获得了磁滞回线. 用 X 射线衍射方法分析了闪锌矿结构铁磁性半导体  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  单晶的结构和 Mn 含量. 用电化学 C-V(ECC-V)方法研究了  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中载流子浓度的纵向分布.

闪锌矿结构  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  单晶用低能离子束淀积 (LEIBD) 系统制备. 该系统中的质量分析仪可把 Mn 元素提纯到同位素级. 首先, 将具有 1 keV 能量的 Mn 离子注入进(001)晶向的非故意掺杂的 p 型 GaSb 晶片中, 注入深度约为 70 nm. 注入时衬底晶片的温度为 200℃. 然后, 再将 100 eV 的 Mn 离子淀积到晶片表面, 形成 5 nm 厚的薄膜. 之后, 在 Ar 气氛中将样品在 400℃ 下退火 30 min. GaSb 表面淀积的 Mn 膜可阻止已注入进衬底的 Mn 离子在退火过程中的外扩散, 并使晶片近表面处具有较高的 Mn 组分.

$Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品的磁特性用振动样品磁强计 (VSM)LDJ9600 在室温下(300 K)进行了分析. VSM 所测  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品的典型磁滞回线如图 1 所示. 测量的详细结果见表 1. 这些样品的最大饱和磁化强度和剩余磁化强度分别为  $9.331 \times 10^{-4}$  和  $3.035 \times 10^{-4}$  e.m.u., 最大矫顽力为  $14916.63 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ . 这些结果表明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品具有室温铁磁性. 图 1 中当磁场强度超过饱和值后, 磁化强度的绝对值下降. 这是因为 GaSb 衬底是反铁磁性, 当磁场强度超过饱和值后

GaSb 的反铁磁性作用变得更加明显.

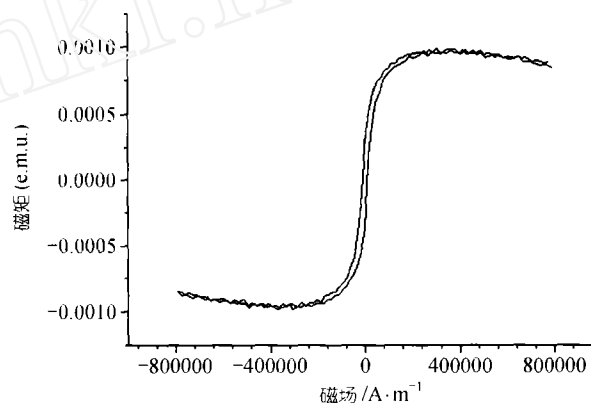


图 1 振动样品磁强计所测  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品的磁滞回线

用 X 射线衍射的  $\theta-2\theta$  和小角衍射模式对样品的结构和 Mn 含量进行了研究. 在衍射结果中除 GaSb 衍射峰外没有发现新峰. 对  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品在(002)衍射峰附近作了精细测量, 结果如图 2 所示. 作为对比, 对 GaSb 衬底作了相同的测量. 图 2 中  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品的  $\theta-2\theta$  衍射曲线(实线)与 GaSb 衍射曲线(虚线)相比, 其左边的 A 和 B 之间明显膨胀. 注入和扩散进 GaSb 衬底中的 Mn 离子占据 Ga 位, 使晶格常数增加, 造成了衍射曲线的膨胀. 因为 Mn 离子在 GaSb 中的扩散, Mn 含量随深度的增加而逐渐降低, 晶格膨胀亦然. 图 2 中的 A 点对应于  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中最大的晶格膨胀. 根据分析闪锌矿晶体中替位元素的模型<sup>[6]</sup>及其修正<sup>[7]</sup>,  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中导致最大晶格膨胀的最大 Mn 含量为  $x = 0.09$ . 因此,  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  晶片中的

Mn 含量由近表面处的  $x = 0.09$  逐渐减少到体内的  $x = 0$ . 晶格应变也逐渐由近表面处的  $\Delta a/a_0 = 0.005$  降低到体内的  $\Delta a/a_0 = 0$ . 晶格常数的逐渐变化使  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  能够保持稳定的闪锌矿结构.

表 1 振动样品磁强计所测磁特性

样品编号	饱和磁化强度 (e.m.u)	剩余磁化强度 (e.m.u)	矫顽力 ( $A \cdot m^{-1}$ )
1012	$4.201 \times 10^{-4}$	$1.117 \times 10^{-4}$	6379.051
1024	$9.331 \times 10^{-4}$	$2.872 \times 10^{-4}$	11176.51
1026	$3.517 \times 10^{-4}$	$6.804 \times 10^{-5}$	13606.23
1028	$8.549 \times 10^{-4}$	$3.035 \times 10^{-4}$	9611.628
1036	$3.078 \times 10^{-4}$	$9.218 \times 10^{-5}$	14916.63

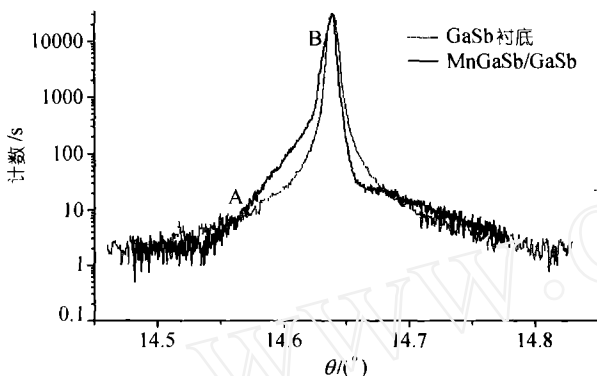


图 2  $Mn_xGa_{1-x}Sb/GaSb$ (实线)和  $GaSb$ (虚线)衬底的(002) X 射线衍射曲线

另一方面, 如果 Mn 替 Ga 位, 替位的 Mn 元素将起受主作用. 用 ECC-V 技术对  $Mn_xGa_{1-x}Sb/GaSb$  中载流子浓度的纵向分布进行了测量, 典型的分布曲线如图 3 所示. 在 70 nm 内, 载流子浓度由近表面处的约  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  急剧降低到约  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Mn 离子的注入和在退火中的扩散造成载流子浓度的降低. 然后, 在  $4 \mu\text{m}$  内载流子浓度均匀下降到约  $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

为进行对比, 同样用 ECC-V 技术对非故意掺杂

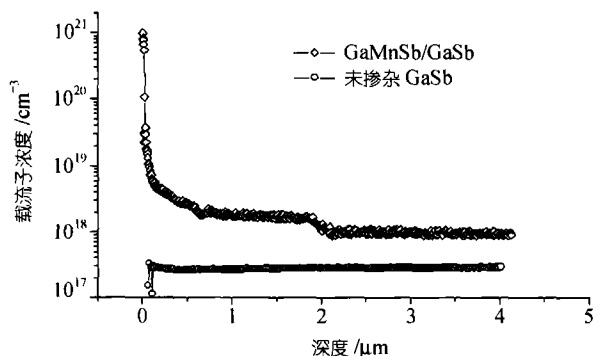


图 3  $Mn_xGa_{1-x}Sb/GaSb$ (上)和非故意掺杂  $GaSb$ (下)的载流子浓度纵向分布曲线

p 型  $GaSb$  晶片的载流子浓度纵向分布进行了测量, 如图 3 所示. 其载流子浓度约为  $2.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 且分布均匀. 对比表明,  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中的空穴浓度显著增加, Mn 元素在  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中起受主作用.

$GaSb$  单晶的原子密度是  $1.78 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ .  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  的最高载流子浓度约为  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . 所以最高载流子浓度与  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  原子密度之比为 5.6%, 对应于  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中的 Mn 含量为  $x = 0.10$ . 此结果和 X 射线衍射的分析结果相符合, 说明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中大部分 Mn 原子占据了 Ga 位.

综上所述, 采用低能离子束淀积系统及后期退火处理, 制备出了具有室温铁磁性的稀磁半导体  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  单晶. 在室温下获得  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品的磁滞回线. X 射线衍射分析证明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  样品具有稳定的闪锌矿结构, 并且 Mn 含量逐渐由近表面处的  $x = 0.09$  下降到体内的  $x = 0$ . ECC-V 测量结果表明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  的空穴浓度高达  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 说明  $Mn_xGa_{1-x}Sb$  中 Mn 原子占据 Ga 位, 起受主作用.

**致谢** 对吴金良、彭常涛、张秀兰、钟兴如、张茂生和包小倩等的帮助表示感谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 60176001)和国家重大基础研究计划(批准号: G20000683; G20000365)资助项目.

### 参 考 文 献

- 1 Mac W, Heribich M, Nguyen T K, et al. The s-d and p-d exchange interaction in  $Zn_{1-x}Fe_xTe$ . *Phys Rev B*, 1996, 53(15): 9532 ~ 9535
- 2 Haury A, Wasiele A, Arnoult A, et al. Observation of a ferromagnetic transition induced by two-dimensional hole gas in modulation-doped  $CdMnTe$  quantum wells. *Phys Rev Lett*, 1997, 79(3): 511 ~ 514
- 3 Kacman P. Spin interactions in diluted magnetic semiconductors and magnetic semiconductor structures. *Semicond Sci Technol*, 2001, 16(4): R25 ~ R39
- 4 Matsukura F, Ohno H, Shen A, et al. Transport properties and origin of ferromagnetism in  $(Ga, Mn)As$ . *Phys Rev B*, 1998, 57(4): R2037 ~ R2040
- 5 Hayashi T, Tanaka M, Nishinaga T, et al. Magnetic and magnetotransport properties of new III-V diluted magnetic semiconductors:  $GaMnAs$ . *J Appl Phys*, 1997, 81(8): 4865 ~ 4867
- 6 Chen N F, Wang Y T, He H J, et al. Effects of point defects on lattice parameters of semiconductors. *Phys Rev B*, 1996, 54(12): 8516 ~ 8521
- 7 陈诺夫, 修惠欣, 杨君玲, 等. 用 X 射线双晶衍射方法测定  $GaMnAs$  组分. *科学通报*, 2001, 46(24): 2035 ~ 2037

(2002-06-17 收稿, 2002-10-25 收修改稿)