

室温铁磁性半导体 $Mn_xGa_{1-x}Sb$

陈诺夫^{①②} 张富强^{①②} 杨君玲^{①②} 刘志凯^① 杨少延^① 柴春林^① 王占国^①

胡文瑞^② 林兰英^{①②}

(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^[1-5].

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 9.331×10^{-4} 和 3.035×10^{-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.

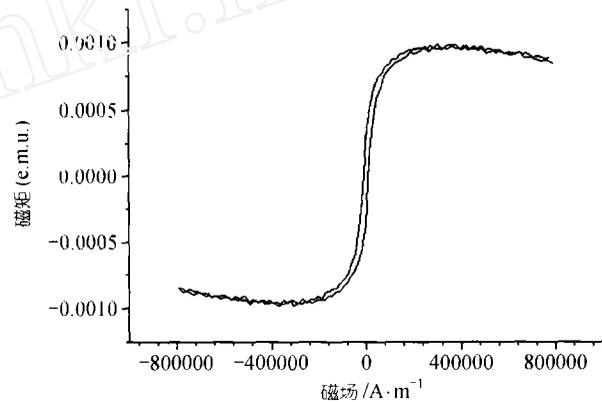


图 1 振动样品磁强计所测 $Mn_xGa_{1-x}Sb$ 样品的磁滞回线

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^[6]及其修正^[7], $Mn_xGa_{1-x}Sb$ 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	4.201×10^{-4}	1.117×10^{-4}	6379.051
1024	9.331×10^{-4}	2.872×10^{-4}	11176.51
1026	3.517×10^{-4}	6.804×10^{-5}	13606.23
1028	8.549×10^{-4}	3.035×10^{-4}	9611.628
1036	3.078×10^{-4}	9.218×10^{-5}	14916.63

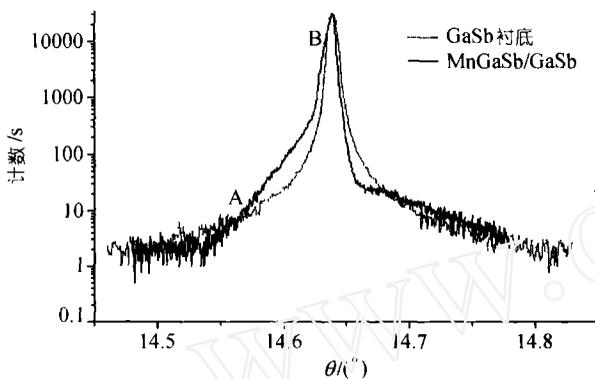


图 2 $Mn_xGa_{1-x}Sb/GaSb$ (实线)和 $GaSb$ (虚线)衬底的(002) X 射线衍射曲线

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

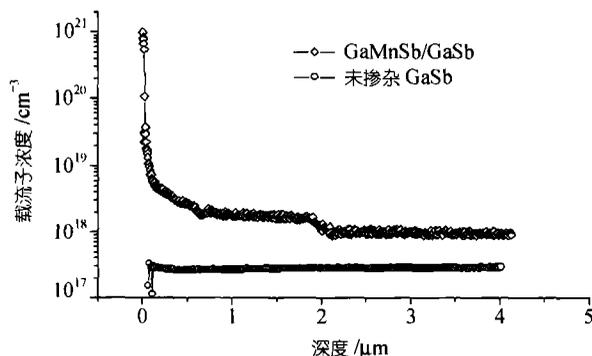


图 3 $Mn_xGa_{1-x}Sb/GaSb$ (上)和非故意掺杂 $GaSb$ (下)的载流子浓度纵向分布曲线

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)