

ZnSe 多量子阱横向磁阻的无接触测量

王宗欣¹ 褚幼令² 胡古今²

(1 复旦大学电子工程系 上海 200433)

(2 复旦大学物理系 上海 200433)

郑国珍

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室 上海 200083)

摘要 用微波无接触法测量了 ZnSe 外延层和两种 ZnSe 多量子阱样品的横向磁阻, 在低磁场时, 这三种样品都表现为负磁阻, 并且也可以用 Khosla 和 Fischer 的半经验表示式进行拟合, 实验还发现了在两层 ZnSe 超晶格之间的 Zn+ Ga 单原子层也呈现为较大的负磁阻

PACC: 7360D, 7360F, 7590

1 引言

测量单量子阱^[1]、双量子阱^[2]在磁场中的电阻是用于研究二维电子气(2D)系统的一种重要方法。在垂直于生长平面的磁场中, 二维电子气的电阻变化与电子间的相互作用、量子阱间的隧道电导等因素有关。

单层和多层结构超晶格的磁阻测量和计算^[3,4]是研究这些材料磁输运机理的又一种重要方法。近年来, 对各层之间被金属或非金属原子相间的超晶格的磁阻的研究^[5]除了是研究它们的磁输运机理的原因外, 还由于这里面包含着很多工业和传感器应用的可能性。

无接触测量外延层材料的横向磁阻^[6]并由此计算外延层中载流子浓度和迁移率的方法是一种很方便和实用的方法, 由于不需要制作欧姆电极、无破坏性, 并且测试结果和常规的 Van der Pauw 法基本一致, 因此这种方法对测量单量子阱、多量子阱的磁阻也是极为有用的。

本文用无接触法测量了生长在半绝缘 GaAs 衬底上的 ZnSe 外延层和两种 ZnSe 多量子阱样品的磁阻。这两种多量子阱样品在量子阱之间分别间隔着金属或非金属单原子层。测量结果表明 ZnSe 外延层、ZnSe 多量子阱的横向磁阻仍然为负磁阻, 但在量子阱间间隔了金属

王宗欣 男, 1940 年出生, 教授, 从事微波半导体器件和微波通信研究

褚幼令 女, 1941 年出生, 教授, 从事半导体物理研究和半导体材料测试

郑国珍 女, 1939 年出生, 研究员, 从事半导体材料和器件输运研究

1998-05-02 收到, 1998-09-18 定稿

单原子层后, 样品的总磁阻中还迭加了金属单原子层的磁阻

2 样品

用MBE方法生长在半绝缘GaAs衬底上的ZnSe外延层和两种ZnSe多量子阱样品的结构如图1所示 图1(a)是掺杂Ga的ZnSe外延层, 外延层的厚度为2μm, 用微波无接触法

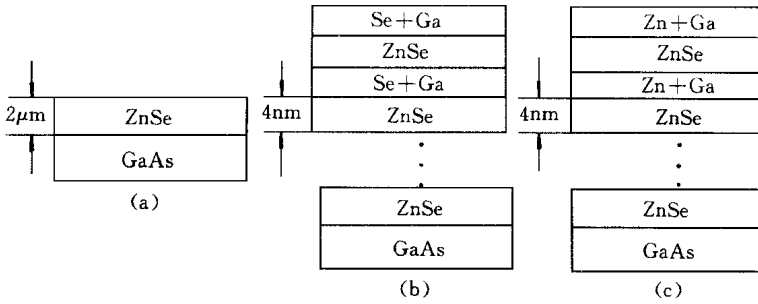


图1 ZnSe外延层和ZnSe多量子阱样品结构

测量得该外延层中Ga的浓度约为 $7.8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, 衬底是厚度为 $590\mu\text{m}$ 的半绝缘GaAs; 图1(b)中两层ZnSe超晶格之间是Se+Ga的单原子层, 即生长时, 在每个周期以 δ 函数形式控制Se+Ga的生长, 使生长成单原子层的Se+Ga, 生长时Se源的温度为 104°C , Ga源的温度为 420°C , 每层ZnSe的厚度为 4nm , 共有180个周期, 衬底是厚度为 $595\mu\text{m}$ 的半绝缘GaAs 图1(c)也是以同样方式生长成的超晶格, 但两层ZnSe超晶格之间是以 δ 掺杂形式生长的Zn+Ga单原子层, 生长时Se源的温度为 108°C , Zn源的温度为 205°C , 每层ZnSe的厚度也是 4nm , 共有300个周期, 衬底是厚度为 $600\mu\text{m}$ 的半绝缘GaAs 参考文献[7]报道了ZnSe的异质结构是一种有可能出现稳恒光电导现象的材料

3 横向磁阻的无接触测量

参考文献[6]已报道用微波无接触法测量了GaAs, AlGaAs, HgCdTe外延层中的横向磁阻, 并由此计算出外延层中载流子的浓度和迁移率 这种方法对样品无损伤, 也不需要切割样品, 测试面积为 $4 \times 4\text{mm}^2$, 并且所得结果和常规的需作欧姆电极的Van der Pauw法基本一致 用同样的测试装置, 我们测量了图1中三个样品的横向磁阻(磁场方向垂直于样品表面), 其结果表明: 在低磁场时, 这三种样品都表现为负磁阻, 如图2, 3, 4所示

一般的n型球形等能面材料外延层中载流子的横向磁阻 $\Delta\rho/\rho_0$ 与迁移率 μ_n 的关系已在参考文献[6]中进行了讨论, 对于声学形变势散射,

$$\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0}} = \alpha_i \mu_n B \tag{1}$$

对于光学形变势散射,

$$\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0}} = \alpha_o \mu_n B \tag{2}$$

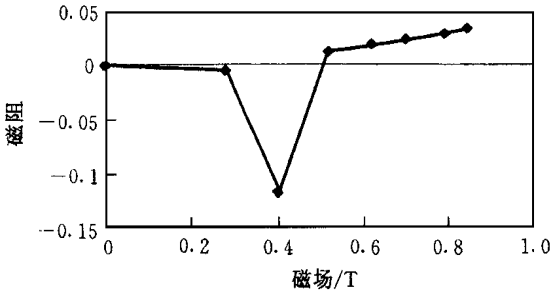


图 2 ZnS 外延层的磁阻

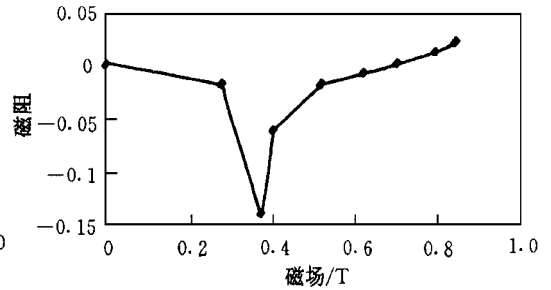


图 3 ZnS 多量子阱样品(b)的磁阻

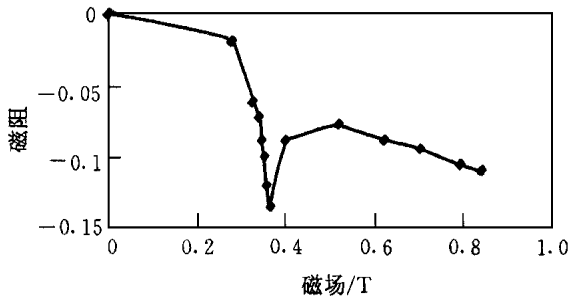


图 4 ZnS 多量子阱样品(c)的磁阻

$\alpha_1 = 1.73, \alpha_2 = 1.55, B$ 为外加磁场, 方向垂直于样品表面, 因此与载流子的 Hall 效应相应的横向磁阻为正磁阻 由于 n 型 ZnSe 在磁场中的迁移率为常数, 再取上述 α_1, α_2 的平均值, 对于图 1 中样品 (a) 和 (b) 分别由图 2, 3 的总磁阻中减去上述 Hall 效应引起的正磁阻, 余下部分的负磁阻可以用 Khosla 和 Fisher 的半经验表示式^[9]进行拟合

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = - a_1 \ln(1 + a_2 B^2) \tag{3}$$

其中 a_1, a_2 为常数; B 为外加磁场 拟合结果如图 5, 6 所示, 对图 1 (a) 所示的外延层样品, $a_1 = 1.766, a_2 = 0.915$; 对于图 1 (b) 的多量子阱样品, $a_1 = 3.188, a_2 = 0.445$; 在参考文献 [8] 中表明, ZnSe 外延层样品的负磁阻可用 (3) 式来拟合, 这次测量的结果再次证明了这一点,

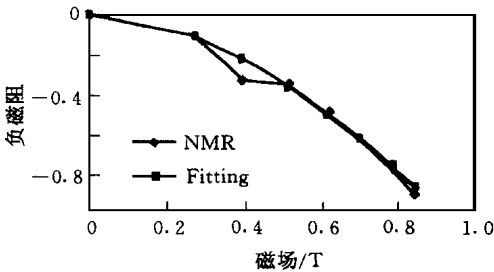


图 5 ZnSe 外延层负磁阻用 Khosla 和 Fisher 半经验表示式拟合结果
($a_1 = 3.188, a_2 = 0.445$)

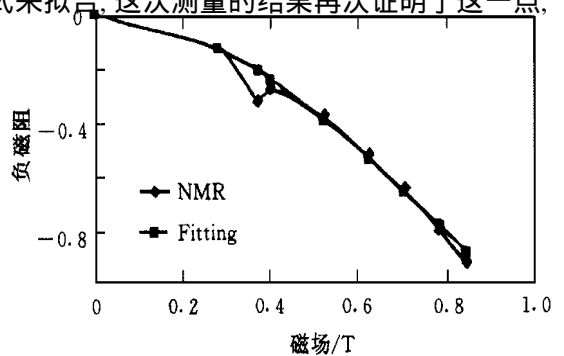


图 6 ZnSe 多量子阱(样品(b))的负磁阻用 Khosla 和 Fisher 半经验表示式拟合结果
($a_1 = 1.7657, a_2 = 0.915$)

但图 6 表明 ZnSe 的多量子阱的负磁阻也仍可用式(3)来进行拟合

图 3、4 中,当磁场大于 0.5T 以后,两种样品中(b)的横向磁阻随磁场增加而增加,(c)的横向磁阻随磁场的增加而减少,这是由于(c)样品的横向磁阻中叠加了 Zn+ Ga 单原子层(共 300 层单原子层)的横向磁阻的缘故,见以下的讨论

4 讨论

1) ZnSe 的负磁阻是由载流子在较低的外加磁场中,位于两点间的跃迁(hopping)路径发生干涉导致它的跃迁几率改变,使样品的电导增加^[10]; ZnSe 多量子阱仍呈现为负磁阻,并可用(3)式拟合,说明跃迁几率改变的解解释也适用于量子阱中的二维电子气,即 ZnSe 多量子阱样品在外加磁场作用下二维电子气的磁电导变化仍可近似用参考文献[10]中给出的式子:

$$\frac{\sigma(H) - \sigma(0)}{\sigma(0)} = \frac{H^2 k \chi \xi^2}{\Phi} \frac{d(2d+1)}{(d+2)(2d+3)} \frac{[\sigma/\sigma(0)]_{I_{3/2}} - I_{1/2}}{M_{1/2}} \tag{4}$$

来进行分析.其中 H 为磁场强度; k 为玻耳兹曼常数; χ 为杂质间距; ξ 为局域长度; d 为维数; $\Phi = hc/e$; h 为普朗克常数; c 为光速; e 为电子电荷; σ_0 是具有电导率量纲的常数; $\sigma(0)$ 为没有外磁场时的临界电导率; $I_{1/2}$ 、 $I_{3/2}$ 、 $M_{1/2}$ 是分别与 $\sigma(0)$ 、 d 、 σ_0 有关的积分

2) 样品(b)和(c)的总磁阻都是由材料的 Hall 效应引起的横向正磁阻和 Hopping 引起的负磁阻相互消长的结果,但样品(b)在磁场大于 0.7T 以后,它的 Hall 效应引起的正磁阻已大于 Hopping 引起的负磁阻,因此在磁场大于 0.7T 以后,它的总磁阻大于零,并且随着磁场的增加而增加;图 6 就是将样品(b)在各磁场下的总磁阻减去按(1)、(2)式计算得到的由 Hall 效应引起的横向正磁阻后,余下的负磁阻用 Khosla 和 Fisher 的半经验表示式的拟合结果

3) 与样品(b)不一样,样品(c)在磁场继续增加到大于 0.5T 以后,它的负磁阻不是减小而是增加,这是由于样品(c)的总磁阻是 ZnSe 的负磁阻, ZnSe 的 Hall 效应以及两量子阱间的 Zn+ Ga 单原子层的横向磁阻三部份合成的结果.当 $B > 0.5T$ 以后,总的磁阻仍是负值,

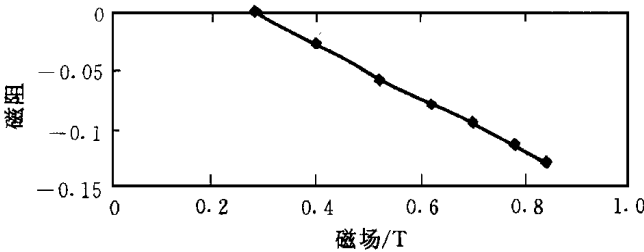


图 7 Zn+ Ga 单原子层的磁阻

并且这个负磁阻继续随着磁场的增加而增加,这说明 Zn+ Ga 单原子层的磁阻也呈现为负磁阻.将样品(b)的负磁阻按(3)式拟合得到的结果, $a_1 = 3.188$, $a_2 = 0.455$, 用于样品(c)的总的磁阻测量结果中,即在总磁阻中减去样品(c)的 Hall 效应的正磁阻和 ZnSe 超晶格的负磁阻(利用 $a_1 = 3.188$, $a_2 = 0.455$ 及(3)式),得到

Zn+ Ga 单原子层的磁阻随磁场的变化见图 7,由图 7 可见 Zn+ Ga 单原子层呈现为较大的负磁阻,负磁阻意味着 Zn+ Ga 单原子层在磁场中随着磁场的增加它的电阻率减小,值得一提的是参考文献[11]在 Mo_3Si 和 Nb_3Si 超导薄膜中也观察到了负磁阻,不过它的磁场需达到 30T.

5 结论

可以用微波无接触法测量 ZnSe 外延层和 ZnSe 多量子阱的横向磁阻, 这种方法快速又方便, 并且对样品无损伤、无破坏性。测试结果表明: ZnSe 外延层和 ZnSe 多量子阱在低磁场时的横向磁阻为负磁阻, 并且也可以用 Khosla 和 Fischer 的半经验表示式进行拟合。

致谢 作者感谢戴宁教授提供了测试样品

参 考 文 献

- [1] T. Jungwirth, T. S. Lay, L. Smrcka *et al*, Phys. Rev. B, 1997, **56**(3): 1029
- [2] J. A. Simmons, S. K. Lyo, N. E. Harff *et al*, Phys. Rev. Lett., 1994, **73**(10): 2256
- [3] S. Zhang and P. M. Levy, Phys. Rev. B, 1992, **45**(15): 8689
- [4] H. W. Zhao, M. Lu, J. Du *et al*, J. Appl. Phys., 1997, **82**(1): 485
- [5] Ken-ichi Chahara, Toshiyuki Ohno, Masahiro Kasai *et al*, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**(14): 1990
- [6] Wang Zongxin and Chu Youling, Solid-State Electron., 1997, **41**(12): 1837
- [7] Tineke Thio, J. W. Bennett, D. J. Chadi *et al*, J. Electron. Mater., 1996, **25**(20): 229
- [8] Zongxin Wang, Youling Chu, Zhen Ling *et al*, J. Appl. Phys., 1997, **82**(7): 478
- [9] R. P. Khosla and J. R. Fischer, Phys. Rev. B, 1970, **2**(10): 4084
- [10] U. Sivan, O. Entin-Wohlman and Y. Imry, Phys. Rev. Lett., 1988, **60**(15): 1566
- [11] A. V. Samoilov, N. C. Yeh and C. C. Tsuei, Czech. J. Phys., 1996, **46**(pt. S2): 761

Measurement of Magnetoresistance of ZnSe Multi-Quantum Wells by Contactless Method

Wang Zongxin¹, Chu Youling², Hu Gujin²

(1 Electronics Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433)

(2 Physics Department, Fudan University, Shanghai 200433)

Zheng Guozheng

(National Laboratory for Infrared Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Received 2 May 1998, revised manuscript received 18 September 1998

Abstract The transverse magnetoresistance of ZnSe epitaxial layer and two multi-quantum well samples has been measured by microwave contactless method. These samples show the negative magnetoresistance which can be fitted with Khosla and Fischer semiempirical expression. Experiments and measurements also show that there is negative magnetoresistance in the single atomic layer of Zn + Ga located between two ZnSe quantum wells.

PACC: 7360D, 7360F, 7590