

变 In 组分沟道的 MM-HEMT 材料电子输运特性研究^{*}

仇志军^{1)†} 蒋春萍¹⁾ 桂永胜¹⁾ 疏小舟¹⁾ 郭少令¹⁾ 褚君浩¹⁾
崔利杰²⁾ 曾一平²⁾ 朱战平²⁾ 王保强²⁾

¹⁾(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

²⁾(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2002 年 10 月 8 日收到 2003 年 3 月 18 日收到修改稿)

在变缓冲层高迁移率晶体管(MM-HEMT)器件中, 二维电子气的输运性质对器件性能起着决定作用. 通过低温下二维电子气横向电阻的量子振荡现象, 结合变温度的 Hall 测量, 系统研究了不同 In 组分沟道 MM-HEMT 器件中子带电子迁移率和浓度随温度的变化关系. 结果表明, 沟道中 In 组分为 0.65 的样品, 材料电学性能最好, In 组分高于 0.65 的样品, 严重的晶格失配将产生位错, 引起迁移率下降, 大大影响材料和器件的性能.

关键词: 变缓冲层高迁移率晶体管, Shubnikov-de Hass 振荡

PACC: 7360L, 7340H

1. 引言

高电子迁移率晶体管(HEMT)由于其高频和低噪声以及功率性能方面的优越性, 被广泛地用于制备微波和毫米波器件, 成为当今微电子领域中最前沿和最活跃的研究领域之一^[1-5]. 相对于 InP 基 HEMT 和传统 GaAs 基 HEMT 材料, 具有变缓冲层的 GaAs 基 HEMT(MM-HEMT)还具有价格便宜, 可与现有的 GaAs 器件集成等优点, 正成为军用毫米波器件和超高速电路的首选材料之一^[6-8].

MM-HEMT 的性能主要依赖于 InGaAs 沟道中二维电子气的性质^[9], 亦即依赖于外电场作用下 HEMT 结构材料中二维电子气的输运性质. 二维电子的输运受到电子浓度、电子能带结构(有效质量和带隙)和各种散射过程的影响^[10, 11], 各种散射机理总的效果反映在电子的迁移率上. 因此, 电子浓度和迁移率是评价一个 HEMT 材料好坏的重要参数.

本文利用横向磁阻振荡(SdH 振荡)现象研究了 1.5K 时 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ MM-HEMT ($0.60 < x < 0.75$) 异质结中二维电子气子带电子特性, 并通过变温 Hall 测量, 得到电子浓度和迁移率随温度的变化关系.

2. 样品结构与实验

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ MM-HEMT 材料结构设计如图 1 所示. 样品是在 GEN II 分子束外延系统上长成的, 以半绝缘的 GaAs(001)为衬底, 首先生长 80nm 的 GaAs 缓冲层, 生长温度为 580℃, 然后再生长 5 个台阶式变组分的 InAlAs 缓冲层, In 组分依此递增约 0.1, 每层厚度为 100nm, 随后生长 100nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层, 此阶段的生长温度为 400℃. 接着依此生长 14nm 的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.60, 0.65, 0.70, 0.75$) 沟道层, 10nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 隔离层, $6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 的 Si δ 掺杂层和 36nm 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 势垒层, 最后是 20nm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 帽层, 此阶段的生长温度为 480℃. 整个样品的生长过程由高能电子衍射(RHEED)监测.

测量用的样品被切割成 5mm × 5mm 的正方形, 样品的 4 个角蒸 In 形成良好的欧姆接触. 在 0—9 T 磁场范围内, 采用范德堡法测量样品在不同温度(1.5—100 K)下的纵向磁阻和 Hall 电阻. 低温下, 观察到明显的 SdH 振荡现象.

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2001GB309506)资助的课题.

[†] E-mail: zqj@mail.sitp.ac.cn

In _{0.53} Ga _{0.47} As 帽层	20 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	36 nm
Si δ -掺杂层 ($6\times10^{12}/\text{cm}^2$)	
In _{0.52} Al _{0.48} As 隔离层	10 nm
In _x Ga _{1-x} As 沟道层	14 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	100 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	100 nm
In _{0.40} Al _{0.60} As	100 nm
In _{0.30} Al _{0.70} As	100 nm
In _{0.20} Al _{0.80} As	100 nm
In _{0.10} Al _{0.90} As	100 nm
GaAs 缓冲层	80 nm
半绝缘 GaAs 衬底	

图 1 MM-HEMT 材料结构示意图

3. 结果与讨论

温度为 1.5K 时不同 In 组分 MM-HEMT 的磁阻对磁场的一次微分如图 2 所示. 从图 2 可以看出 SdH 微分振荡是由几个不同的振荡频率叠加而成, 这意味着电子占据着量子阱中几个不同的子能带. 其中 In 组分为 0.65 的样品 SdH 振荡最强烈, In 组分为 0.75 的样品振荡最弱, 反映出 $x = 0.75$ 的样品电子所受的散射最为强烈. 为了得到不同子带上电子的浓度, 我们将 $d\rho_{xx}/dB$ 对 $1/B$ 进行了快速傅里叶变换(FFT), 结果见图 3. FFT 谱显示了 $x = 0.70$ 和 0.75 的样品上有两个峰, 而 $x = 0.60$ 和 0.65 的样品上有三个峰. 经过分析, 发现浓度最高的第三个峰实际上是第一和第二子带的电子浓度之和. 这表明在低温下, 当二维电子气的浓度接近 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, MM-HEMT 样品中电子已经占据了第二子带.

由于沟道中二维电子气比掺杂层中的体电子对 Hall 电导的贡献大, 迁移率也较高, 通过 $|\sigma_{xy}| = \sum_i \frac{en_i\mu_i^2B}{1 + \mu_i^2B^2}$ 其中 σ_{xy} 为 Hall 电导, e 为电荷, n_i 为电子的浓度, μ_i 为电子的迁移率, B 为磁场强度. 在 $\mu_iB = 1$ 时, $|\sigma_{xy}|$ 为极大值, 就可以估计沟道中二维电子气的 Hall 迁移率 μ_{2D} . 图 4 给出 1.5K 温度下 In

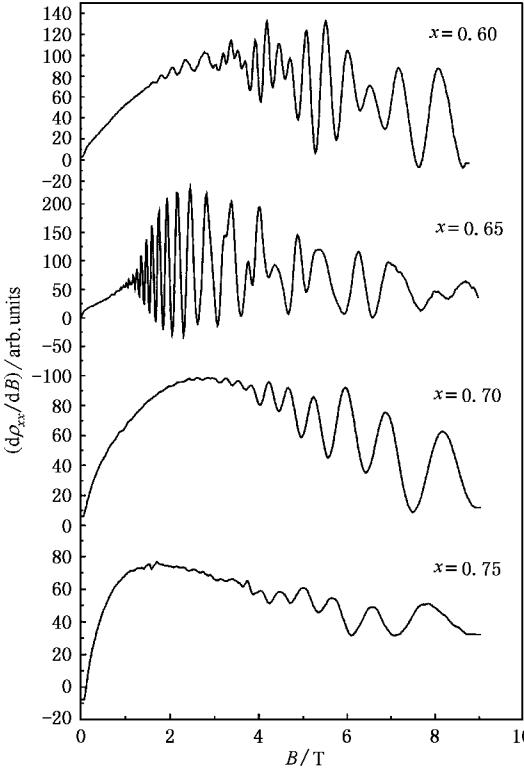


图 2 1.5K 下横向磁阻对磁场的一阶微分

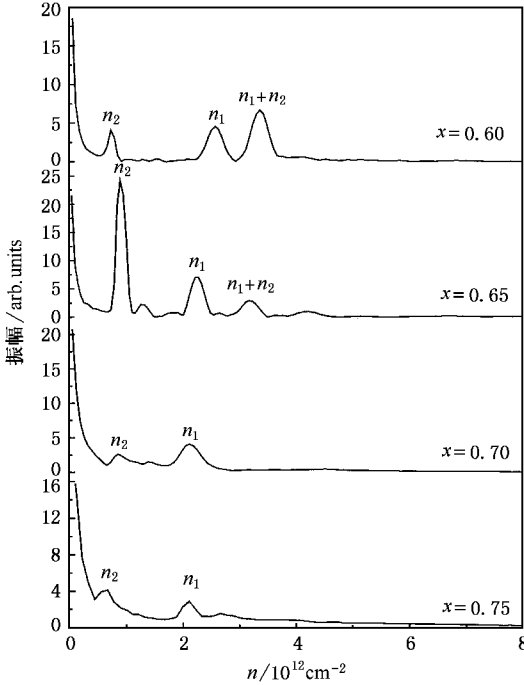


图 3 $d\rho_{xx}/dB$ 对 $1/B$ 的 FFT 谱

组分为 0.65 的 $|\sigma_{xy}|$ 随 B 的变化曲线. 利用 Hall 系数可以得到电子的 Hall 浓度 n_{Hall} , 它对应于材料中

子浓度和电子迁移率随 In 组分和温度的变化关系. 发现沟道中 In 组分的提高一方面可以减小沟道中电子的有效质量, 减小无规合金散射, 提高电子的迁移率, 另一方面由于晶格的失配度增大, 导致晶格间应力增强, 一旦晶格无法承受应力的增强而产生失配位错, 反过来会影响电子的迁移率. 因此, 这两个

方面是个互相竞争的过程. 所以在材料设计过程中, 需要设计一个最佳的组分, 使得材料的性能最优. 在此分析过程中发现 In 组分为 0.65 的 MM-HEMT 电学性能最佳, 这将对 MM-HEMT 材料的设计有重要意义.

- [1] Mishra U K , Brown A S , Jelloian L M , Thompson M , Nguyen L D and Rosenbaum S E 1989 *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.* p101
- [2] Li H , Wu J , Wang Z G , Liang J B , Xu B , Jiang C , Gong Q , Liu F Q and Zhou W 1998 *J. Cryst. Growth* **186** 309
- [3] Wang H 1996 *IEEE Proc. - Microw Antennas Propagation* **143** (5) 361
- [4] Ng G I , Pavlidis D , Quillec M , Chan Y J , Jaffe M D and Singh J 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 728
- [5] Cordier Y , Bollaert S , diPersio J , Ferre D , Trudel S , Druelle Y and Cappy A 1998 *Appl. Surf. Sci.* **123/124** 734
- [6] Gu P , Tani M , Sakai K and Yang T R 2000 *The 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves* ed by S G Liu and X C Shen (Beijing) p67
- [7] Gill D M , Kane B C and Svensson S P 1996 *IEEE Electron Device Lett.* **17** 328
- [8] Win P , Druelle Y and Cappy A 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 922
- [9] Drummond T J , Morkoc H and Cho A Y 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 1380
- [10] Cao J C and Lei X L 1999 *Phys. Rev. B* **60** 1871
- [11] Cao J C and Lei X L 2003 *Phys. Rev. B* **67** 85309
- [12] Kastalsky A , Dingle R , Chen K Y and Cho A Y 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 274
- [13] Basu P and Nag B 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 689
- [14] Bastard G 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 591

Electron transport properties of MM-HEMT with varied channel indium contents ^{*}

Qiu Zhi-Jun^{1†} Jiang Chun-Ping¹⁾ Gui Yong-Sheng¹⁾ Shu Xiao-Zhou¹⁾ Guo Shao-Ling¹⁾ Chu Jun-Hao¹⁾
Cui Li-Jie²⁾ Zeng Yi-Ping²⁾ Zhu Zhan-Ping²⁾ Wang Bao-Qiang²⁾

¹⁾ (State Key Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China)

²⁾ (Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

(Received 8 October 2002 ; revised manuscript received 18 March 2003)

Abstract

Transport properties of two-dimensional electron gas (2DEG) are crucial to metamorphic high-electron-mobility transistors (MM-HEMT). We have investigated the variations of subband electron mobility and concentration versus temperature from Shubnikov-de Hass oscillations and variable temperature Hall measurements. The results indicate that the electrical performance is the best when the In content is 0.65 in the channel for MM-HEMT. When the In content exceeds 0.65 , a large lattice mismatch will cause dislocations and result in the decrease of mobility and the fall of performance in materials and devices.

Keywords : MM-HEMT , Shubnikov-de Hass oscillation

PACC : 7360L , 7340H

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001GB309506).

[†] E-mail : qzj@mail.sitp.ac.cn