

# 变 In 组分沟道的 MM-HEMT 材料电子输运特性研究 \*

仇志军<sup>1)</sup> 蒋春萍<sup>1)</sup> 桂永胜<sup>1)</sup> 疏小舟<sup>1)</sup> 郭少令<sup>1)</sup> 褚君浩<sup>1)</sup>  
崔利杰<sup>2)</sup> 曾一平<sup>2)</sup> 朱战平<sup>2)</sup> 王保强<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>( 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 )

<sup>2)</sup>( 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 )由于其在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<sup>[1-5]</sup> . 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<sup>[6-8]</sup> .

MM-HEMT 的性能主要依赖于 InGaAs 沟道中二维电子气的性质<sup>[9]</sup> , 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<sup>[10,11]</sup> , 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  $In_x Ga_{1-x} As/In_{0.52} Al_{0.48} As$  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

$In_x Ga_{1-x} As/In_{0.52} Al_{0.48} As$  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°C , 然后再生长 5 个台阶式变组分的 InAlAs 缓冲层 , In 组分依次递增约 0.1 , 每层厚度为 100nm , 随后生长 100nm 的  $In_{0.52} Al_{0.48} As$  缓冲层 , 此阶段的生长温度为 400°C . 接着依次生长 14nm 的  $In_x Ga_{1-x} As$  (  $x = 0.60, 0.65, 0.70, 0.75$  ) 沟道层 , 10nm 的  $In_{0.52} Al_{0.48} As$  隔离层 ,  $6 \times 10^{12} cm^{-2}$  的 Si $\delta$  掺杂层和 36nm 的  $In_{0.52} Al_{0.48} As$  势垒层 , 最后是 20nm 的  $In_{0.53} Ga_{0.47} As$  帽层 , 此阶段的生长温度为 480°C . 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计划项目( 批准号 2001GB309506 )资助的课题 .

† E-mail : qpj@mail.sitp.ac.cn

In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As 帽层	20 nm
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	36 nm
Si $\delta$ -掺杂层 ( $6 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ )	
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As 隔离层	10 nm
In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 沟道层	14 nm
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	100 nm
In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	100 nm
In <sub>0.40</sub> Al <sub>0.60</sub> As	100 nm
In <sub>0.30</sub> Al <sub>0.70</sub> As	100 nm
In <sub>0.20</sub> Al <sub>0.80</sub> As	100 nm
In <sub>0.10</sub> Al <sub>0.90</sub> 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  $|\sigma_{xy}| = \sum_i \frac{en_i \mu_i^2 B}{1 + \mu_i^2 B^2}$  其中  $\sigma_{xy}$  为 Hall 电导,  $e$  为电荷,  $n_i$  为电子的浓度,  $\mu_i$  为电子的迁移率,  $B$  为磁场强度。在  $\mu_i B = 1$  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  $\mu_{2D}$ 。图 4 给出 1.5K 温度下 In

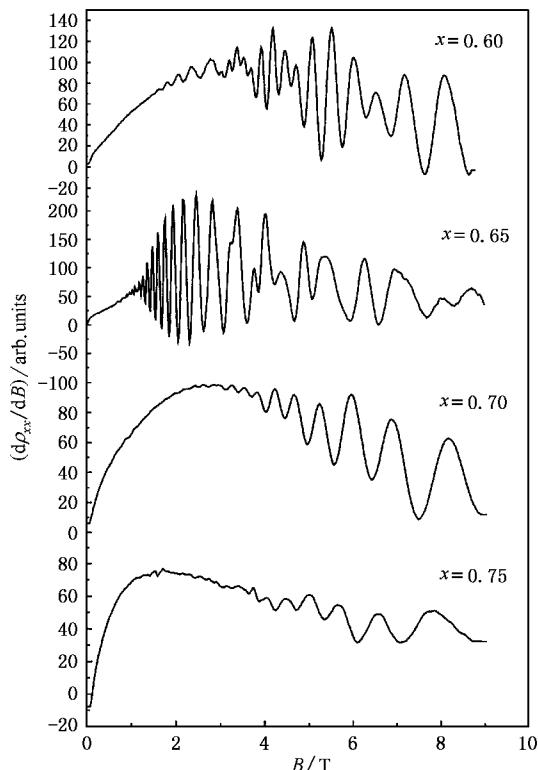
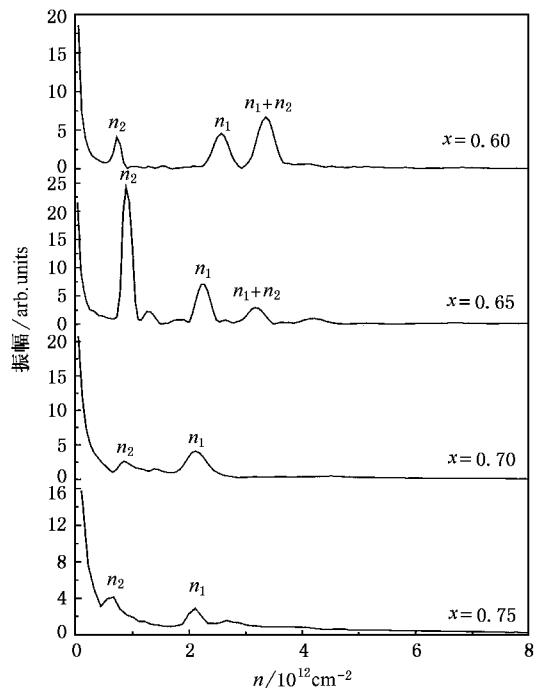


图 2 1.5K 下横向磁阻对磁场的一阶微分

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  $n_{\text{Hall}}$ , 它对应于材料中

整个电子的浓度,包括沟道中和掺杂层中的电子浓度。通过上述关系,我们可以得到掺杂层中体电子的迁移率 $\mu_{3D}$ 。表1给出1.5K温度下不同In组分的MM-HEMT材料的输运测量结果。可以看出In组分为0.65的样品沟道电子迁移率最高,这是因为沟道中In组分含量的提高导致沟道中有效带隙变小,从而导致电子的有效质量变小,提高了电子的迁移率,同时In组分含量的提高也减小了电子合金无规序的散射,这对于提高电子的迁移率也有帮助。然而当In组分的含量高于0.65时,电子的迁移率不但没有提高反而下降,这主要是沟道层与势垒层的晶格失配度随In组分含量的增大而增大。对于 $x=0.70$ 和 $0.75$ 样品晶格的失配应力较大,其中的应力可能通过产生位错得到释放,位错将对电子产生很强的散射作用,大大降低电子的迁移率。在同样的掺杂和生长条件下, $x=0.75$ 样品的电子迁移率要比 $x=0.65$ 的下降了近一个数量级,所以在图2中SdH振荡也要弱很多。从表1可以看出所有样品掺杂层中的体电子由于受到杂质离子的散射,电子的迁移率变化不大。

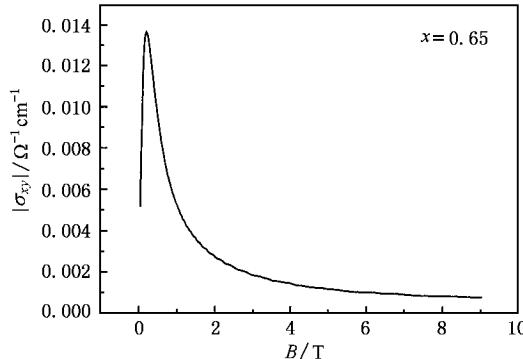


图4 1.5K温度下In组分为0.65的MM-HEMT Hall电导随磁场的变化

表1 1.5K温度下不同In组分MM-HEMT材料的测量结果

In组分 含量	子带电子浓度		子带电子Hall 迁移率 $\mu_{2D}$		体电子Hall 迁移率 $\mu_{3D}$		电子Hall 浓度 $n_{Hall}$	$\sigma_{2D}/\sigma_0$		
	$n_{2D}/10^{12} \text{ cm}^{-2}$		$\text{A} (10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs})$		$\text{A} (10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs})/10^{12} \text{ cm}^{-2}$					
	$n_1$	$n_2$								
$x=0.60$	2.58	0.76	3.78	1.09	4.2	0.93				
$x=0.65$	2.26	0.90	5.49	1.4	3.9	0.96				
$x=0.70$	2.14	0.85	1.86	0.86	4.04	0.88				
$x=0.75$	2.11	0.67	0.68	0.64	4.63	0.62				

在HEMT结构中,器件的性能与沟道中电子的电导率 $\sigma_{2D}=en_{2D}\mu_{2D}$ 直接相关,所以要求沟道有较

高的电导率,最好二维电子气既有较高的电子迁移率,又有较高的电子浓度。对MM-HEMT材料的设计同样如此,虽然在In组分为0.75样品中电子Hall浓度最高( $4.63 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ),但实际沟道中电子的电导并不大。表1用二维电子气的电导 $\sigma_{2D}$ 与总的电导 $\sigma_0$ 的比值来反映材料的电导性能,从表1可以看出In组分为0.65的样品电学性能最好,为0.96。当In组分高于0.65时, $\sigma_{2D}/\sigma_0$ 开始降低,因此在这些样品中存在着很强的平行电导,这些平行电导来源于 $\text{Si}\delta$ 掺杂的深V形势阱中,较高的平行电导对MM-HEMT器件的研制非常不利。

图5为不同In组分MM-HEMT材料沟道中电子迁移率随温度的变化。In组分 $x=0.60$ 和 $0.65$ 的样品在温度 $T < 40\text{K}$ 时,电子的迁移率基本上不随温度而变化。Kastalsky等人<sup>[12]</sup>证实如果在沟道层和势垒层之间插入一个未掺杂的隔离层,远程电离杂质散射就会大大减小,并且在极低温时,声子散射也被减小,所以影响电子散射的主要是无规合金散射。Basu和Bastard等人<sup>[13,14]</sup>从理论上表明在二维电子气中受合金散射影响的电子迁移率是个常数,不随温度变化。当温度升高时( $T > 40\text{K}$ ),电子的迁移率将受到声子散射的影响而下降。In组分高于0.65时,电子迁移率在整个温度范围内(1.5—100K)不随温度而变化,这主要是因为位错散射在其中起着主要作用。测量中发现所有样品的电子浓度在整个温度范围内基本上不随温度而变化。

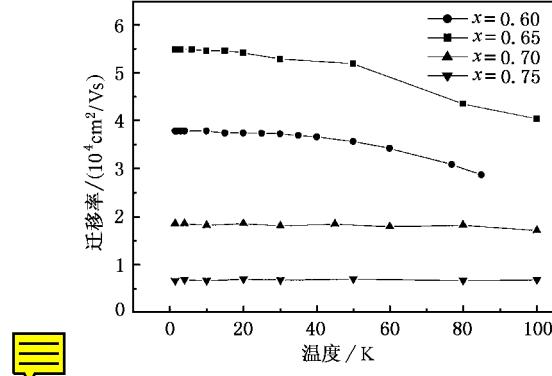


图5 不同In组分MM-HEMT沟道电子迁移率随温度的变化

#### 4. 结 论

通过测量变In组分MM-HEMT材料的SdH振荡和不同温度下的Hall效应,详细研究了材料中电

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<sup>\*</sup>

Qiu Zhi-Jun<sup>1)†</sup> Jiang Chun-Ping<sup>1)</sup> Gui Yong-Sheng<sup>1)</sup> Shu Xiao-Zhou<sup>1)</sup> Guo Shao-Ling<sup>1)</sup> Chu Jun-Hao<sup>1)</sup>  
Cui Li-Jie<sup>2)</sup> Zeng Yi-Ping<sup>2)</sup> Zhu Zhan-Ping<sup>2)</sup> Wang Bao-Qiang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> State Key Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>2)</sup> 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

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No.2001GB309506).

<sup>†</sup>E-mail: kqzj@mail.sitp.ac.cn