

HEMT 结构材料中二维电子气的 的输运性质研究

张兴宏 夏冠群 徐元森

(中国科学院上海冶金研究所半导体材料与器件研究室 上海 200050)

徐 波 杨玉芬 王占国

(中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室 北京 100083)

摘要 本文通过变温的 Hall 测量系统地研究了 GaAs 基 HEMT 和 PHEMT 以及 InP 基 HEMT 三种结构材料的电子迁移率 μ_n 和二维电子浓度 n_s 。仔细地分析了不同 HEMT 结构材料的散射机制对电子迁移率的影响以及不同 HEMT 材料结构对电子浓度的影响。研究结果表明 InP 基 HEMT 的 $n_s \times \mu_n$ 值比 GaAs 基 HEMT 和 PHEMT 的 $n_s \times \mu_n$ 值都大, 说明可以用 $n_s \times \mu_n$ 值来判断 HEMT 结构材料的性能好坏。

PACC: 7340L

1 引言

由于 HEMT (高电子迁移率晶体管) 在高频和低噪声以及功率性能方面的优越性, 所以在微波和毫米波方面得到了广泛的应用^[1]。因此, HEMT 成为当今微电子领域中最前沿的和最活跃的研究领域之一。然而, 人们对 HEMT 中二维电子气的输运性质认识还不全面, 还有待于进行深入研究。

HEMT 的性能主要依赖于所用结构材料的二维电子气性质, 也就是说依赖于外电场作用下 HEMT 结构材料中二维电子气(2DEG)的输运性质。而二维电子的输运又受到能带结构(有效质量和带隙)和各种散射过程的影响, 各种散射机制总的效果反映在电子的迁移率上。因此, 迁移率是评价一个 HEMT 材料质量好坏的最重要的参数之一。另外, 它的电子浓度也是一个非常重要的参数。这样, HEMT 结构中 2DEG 的浓度和沟道电子的迁移率是表征 HEMT 材料质量的两个重要参数。

本文从实验深入研究了 HEMT 结构中二维电子气的输运性质。对三种不同 HEMT 结

张兴宏 男, 1966 年出生, 博士后, 主要从事半导体材料与器件物理研究
夏冠群 男, 1941 年出生, 研究员, 主要从事半导体器件与电路研究
徐元森 男, 1926 年出生, 中国工程院院士, 研究员, 主要从事硅器件与电路研究
1997-12-13 收到, 1998-04-22 定稿

构材料进行了变温 Hall 测量, 得到了变温时 HEM T 结构材料的电子迁移率和二维电子气浓度, 详细讨论了三种 HEM T 结构材料的电子迁移率和电子浓度随温度的变化

2 HEM T 材料结构和实验

三种 HEM T 材料的结构如图 1 所示, 它们是用 MBE 系统生长的 第一种结构(图 1 (a))为 GaAs 半绝缘衬底的 HEM T, 其沟道层为 0.5 μm 厚的未掺杂 GaAs, 缓冲层由 AlGaAs/GaAs 超晶格层和未掺杂 0.2 μm 厚的 GaAs 层组成, 空间隔离层厚度为 3nm 的 AlGaAs, 势垒层为 30nm 均匀掺杂的 AlGaAs, 其掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 帽层为 10nm 的高掺杂 GaAs 第二种(图 1(b))为 GaAs 半绝缘衬底的 PHEM T, 与第一种结构相比在沟道及其附近有较大的差异 PHEM T 的沟道为 12nm 未掺杂的 InGaAs 层, 在其两边采用双 δ 掺

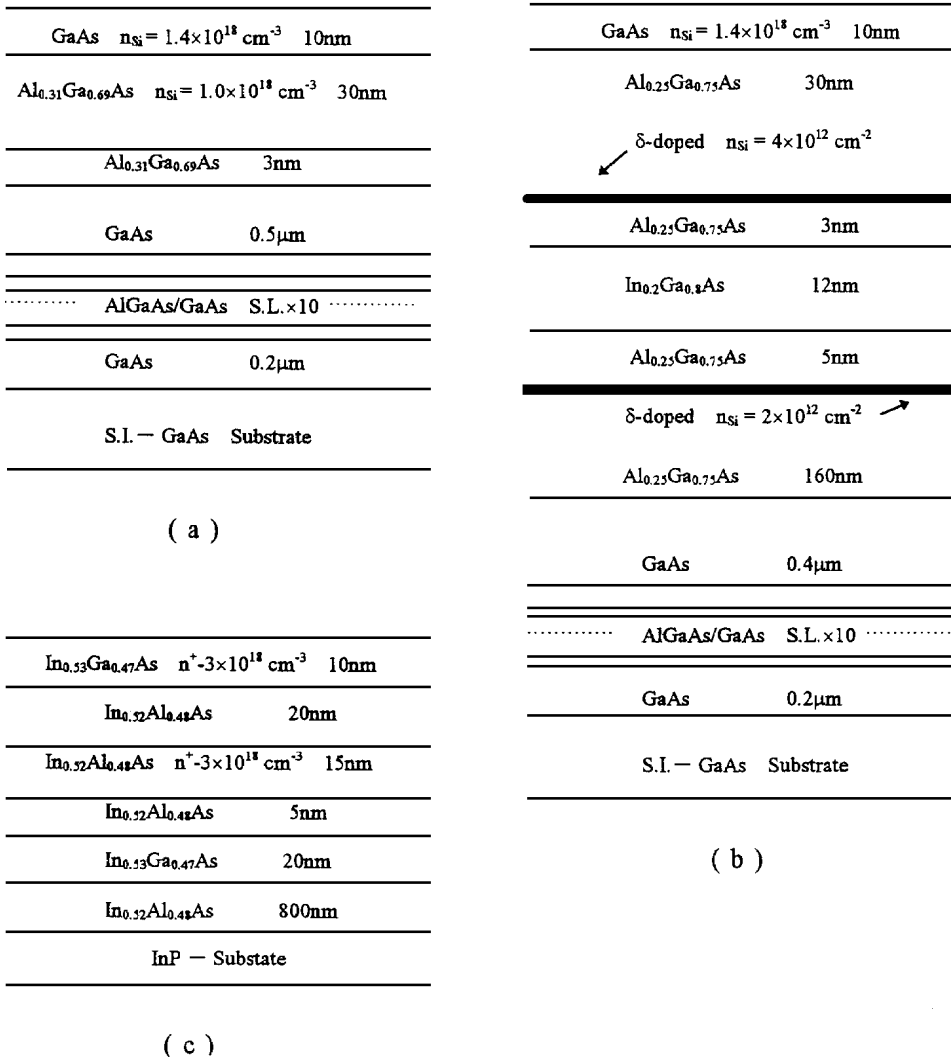


图 1 三种 HEM T 材料的结构图

(a) GaAs-HEM T; (b) GaAs-PHEM T; (c) InP-HEM T.

杂, 沟道两边的空间层分别为 3nm 和 5nm 厚的 AlGaAs 未掺杂层, 势垒层的厚度同第一种结构的 HEMT 材料, 但 PHEMT 势垒层不掺杂, 沟道层下面除了一个空间层和 δ 掺杂外还有一层 160nm 厚的未掺杂 AlGaAs. 第三种(图 1(c))为 InP 基的 HEMT 结构, 沟道层为 20nm 未掺杂的 InGaAs, 空间层为 5nm 未掺杂的 InAlAs, 势垒层为 20nm 未掺杂 InAlAs 和 15nm 的均匀掺杂的 InAlAs, 缓冲层为 800nm 的未掺杂 InAlAs, 顶层为 10nm 厚的高掺杂 InGaAs.

三种 HEMT 结构材料的变温 Hall 测量是用范得堡(Van der Pauw)法(测量时磁场为 0.2T, 电流为 $20\mu\text{A}$ 左右). 测量的样品为方形的, 其大小约为 $8 \times 8\text{mm}^2$. 每个样品的四个电极均用 In 制成欧姆接触. 测量的温度范围是从液氮温度 77K 通过加热器缓慢升至室温以上. 从而得到 HEMT 结构材料电子迁移率和电子浓度随温度的变化.

3 结果

图 2(a)和(b)分别为 GaAs 基 AlGaAs/GaAs HEMT 结构材料(结构如图 1(a))在变温时测得的电子迁移率和 2DEG 的浓度. 从图 2(a)可以看出, 在温度小于 100K 时, 2DEG 有较高的迁移率, 而且随温度变化较小, 由于 HEMT 中采用调制掺杂, 所以低温时电离杂质散射很小. 随着温度的升高电子的迁移率很快下降, 因为随着温度的升高, 声学声子散射和光学声子散射不断地增加. 图 2(b)为 HEMT 材料 2DEG 的浓度随温度的变化. 当温度小于 140K 时电子浓度基本不随温度变化, 当温度升高时, 电子浓度稍有下降, 然后随温度的增加而增加. 电子浓度稍有下降这可能是由于 DX 中心或界面态陷阱的因素引起的, 这种结构 Al 的组分为 0.31. 由于 Al 的组分较高, 所以在 AlGaAs 中易形成陷阱中心. 这样在较低的温度下测量系统受外界的光照, 引起陷阱中心的杂质电离, 导致温度小于 140K 时的电子浓度比 150K 时稍大一点. 大于 150K 时, 随温度的升高施主电离作用增强, 所以沟道中的电子浓度随温度的升高而增大.

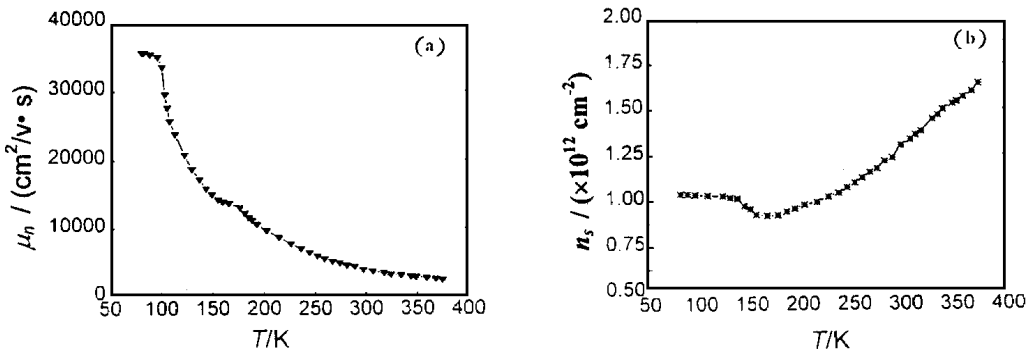


图 2 GaAs 基 AlGaAs/GaAs HEMT 材料沟道中电子迁移率(a)和电子浓度(b)与温度的关系

图 3 为测得的 GaAs 基双 δ 掺杂 PHEMT 结构材料(结构如图 1b)电子迁移率和电子浓度随温度的变化. 图 3(a)可以看出样品的迁移率在温度大于 120K 时随温度近似线性地下降, 这是由于晶格散射的结果. 图 3(b)表明电子浓度随温度的升高而增加, 在 150K 到 280K 之间增加缓慢, 但当温度大于 300K 时, 电子浓度增加很快. 这是因为在较高的温度时

本征载流子浓度很快增加

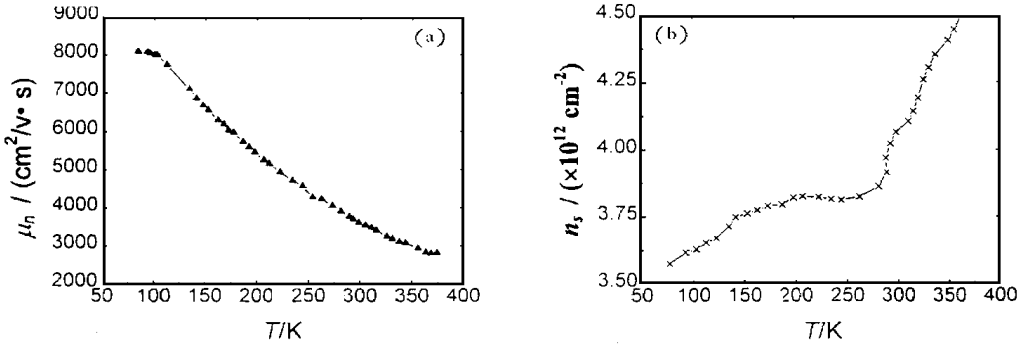


图 3 GaAs 基 AlGaAs/GaAs 双 δ 掺杂 PHEMT 材料电子迁移率(a)和电子浓度(b)与温度的关系

图 4 为 InP 基 InAlAs/InGaAs HEMT 结构材料(结构如图 1(c))的电子迁移率和电子浓度随温度变化的结果 图 4(a)表明电子的迁移率在低温时较高 图 4(b)中电子浓度随温度的增加而增加,但图在 180K 至 300K 之间电子浓度随温度变化较慢 对于图 2 至图 4 中在 180K 至 300K 之间电子浓度随温度变化较慢是因为掺杂层的电离为不完全电离,沟道中的电子由杂质电离提供 所以,电子浓度随温度升高而缓慢增加 当温度达到室温时杂质全部电离,温度继续增加时本征激发很快增加,所以温度大于室温时电子浓度增加很快

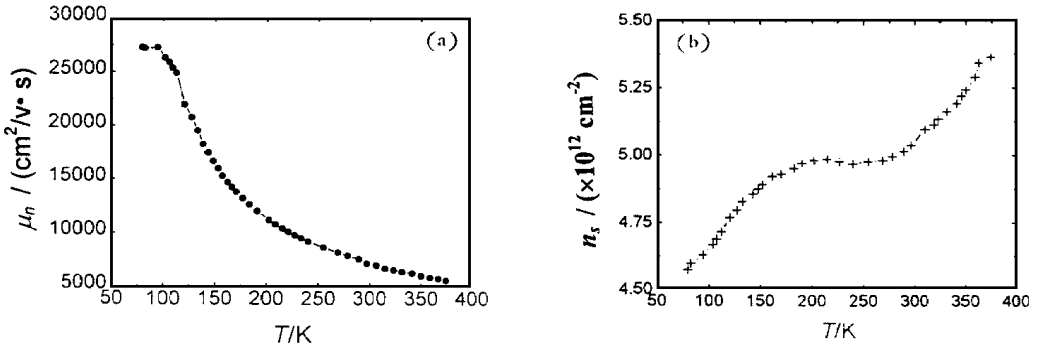


图 4 InP 基 InAlAs/InGaAs 晶格匹配的 HEMT 材料随温度变化的电子迁移率(a)和电子浓度(b)

4 讨论

比较 GaAs 基的 HEMT 和 PHEMT 的沟道电子迁移率和电子浓度,我们可以发现 HEMT 和 PHEMT 两种结构的电子迁移率和浓度有较大的差异,图 2(a)中的迁移率比图 3 (a)在温度低于 300K 时大很多,而 PHEMT 沟道中的电子浓度(如图 3(b))比 HEMT 结构的电子浓度(如图 2(b))大 从两者的结构我们可以看出图 1(a) HEMT 的结构中,沟道层为 GaAs,不存在合金散射,沟道较宽形势散射较小^[2],而且样品是在 580~ 600 基本不变的温度下生长的,所得到材料的界面较好,陷阱较少,所以有较高的电子迁移率 但沟道电子仅由 30nm 厚的掺杂层 AlGaAs 提供,所以 HEMT 沟道层中的 2DEG 浓度不太高 我们再来看看图 1(b)的 PHEMT 结构,虽然采用了双 δ 掺杂的结构和 InGaAs 沟道,这样大大提高

了沟道中 2DEG 的浓度,而且电子也大部分被限制在更深的 InGaAs 量子阱中.但是由于 InGaAs 沟道层很窄,所以形变势散射较大,合金的 InGaAs 沟道可能使 2DEG 受到的合金散射较大^[3,4].另外 InGaAs 沟道的生长温度为 500 而其他层的生长温度为 600 ,所以 InGaAs 两边的界面可能较差,存在界面粗糙度散射^[5],同时还可能在沟道层两界面存在缺陷和杂质,从而增加了 2DEG 的散射.由于在 InGaAs 沟道中有较高的 2DEG 浓度,所以,子带间散射的几率也较大^[6].因此,这种 PHEMT 结构的 2DEG 迁移率比图 1(a)的 HEMT 结构的 2DEG 迁移率小很多.现在我们来比较第三种结构的 InP 基 HEMT 的电子浓度和迁移率.图 1(c)为晶格匹配的 InP-HEMT 结构,InGaAs 沟道为 20nm 厚比第二种结构的 PHEMT 沟道宽,这样减小了沟道层的形变势散射,虽然在沟道层也存在合金散射,但是电子迁移率与图 2(a)相比下降并不多.另外空间层较厚,所以电离杂质的散射较小,这就抵消了较高浓度引起的子带间散射.所以 InP-HEMT 结构中沟道电子有较高的迁移率.由于 InAlAs/InGaAs 异质结有较大的导带不连续,所以沟道电子的限制作用比 GaAs 基的 HEMT 和 PHEMT 的电子限制作用增强了,因此在 InP 基 HEMT 中保持了较高的电子浓度.

由于电子电导率 $\sigma = qn\mu_n$, 其中 q 为电荷, n 为电子浓度, 所以对于 HEMT 结构材料要得到较高的电导率既要求材料有较高的电子迁移率, 又要有较高的电子浓度. 然而, 对于 HEMT 材料生长来说, 并不能保证既有较高的电子浓度, 同时又具有较高的电子迁移率. 这

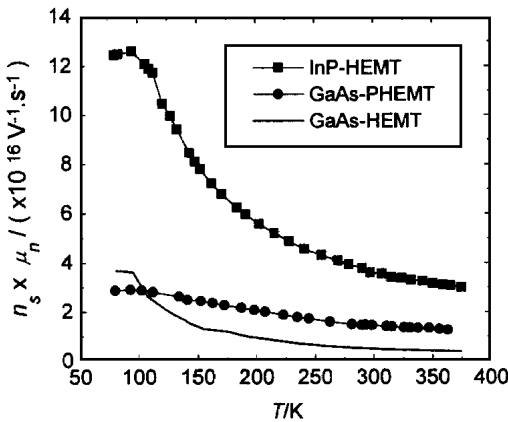


图 5 三种不同 HEMT 结构材料的
值随温度变化关系 $n_s \times \mu_n$

样在设计 HEMT 结构材料时就需要同时考虑两者的大小.因此,我们用 HEMT 材料电子迁移率和电子浓度的乘积来反映 HEMT 材料电导的性能.三种不同 HEMT 结构沟道中的电子浓度和迁移率相乘随温度变化的结果在图 5 中给出.从图中可以看出, InP-HEMT 的 $n_s \times \mu_n$ 值都比 GaAs 基的两种 HEMT 的值高.对于 GaAs 基的两种 HEMT, 在较高温度时 PHEMT 的 $n_s \times \mu_n$ 值较大; 而在小于 100K 时 HEMT 的 $n_s \times \mu_n$ 值较大.因此,可以看出 InP-HEMT 材料结构的性能优于前两种, 而对于 GaAs 基的两种 HEMT, HEMT 材料在电子迁移率方面占优势, 而 PHEMT 在电子浓度方面

占优势.三种结构的 HEMT 材料由于不同方面的优势可适用于不同性能器件的应用.

5 结论

通过对 GaAs 基 HEMT, GaAs 基 PHEMT 和 InP 基 HEMT 三种结构材料的变温 Hall 测量, 其结果表明不同结构材料和材料质量对 HEMT 沟道中的二维电子气迁移率和浓度有较大的影响.通过分析 HEMT 中二维电子气散射机制和不同材料结构我们讨论了三种 HEMT 材料的电子迁移率和电子浓度随温度而变化的特性.比较三种不同 HEMT 结构的电子浓度和迁移率乘积随温度的变化, 表明了所用的 InP 基 HEMT 样品的 $n_s \times \mu_n$ 值比 GaAs 基 HEMT 和 PHEMT 样品的 $n_s \times \mu_n$ 值大.我们的研究表明, 可以用乘积 $n_s \times \mu_n$ 来判

断 HEM T 结构材料的性能好坏

致谢 本实验所用的样品是由中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室 MBE 组和物理研究所凝聚态物理中心 MBE 组所提供的 变温 Hall 测量得到了半导体所王万年高工的支持, 在此一并表示感谢

参 考 文 献

- [1] M. Abe *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **36**: 2021~ 2028
- [2] K. Hess, Appl Phys Lett , 1979, **35**: 484~ 486
- [3] G. Bastard, Appl Phys Lett , 1983, **43**: 689~ 691.
- [4] P. K. Basu and B. R. Nag, Appl Phys Lett , 1983, **43**: 591~ 593
- [5] W. P. Hong, J. Singh and P. K. Bhattacharya, IEEE Electron Device Lett , 1986, **7**(8): 480~ 482
- [6] P. J. Price, Surf Sci , 1984, **143**: 145~ 156

Study on Transport Properties of Two-Dimensional Electron Gas in HEM T Structure Materials

Zhang Xinghong, Xia Guanqun, Xu Yuansen

*(Department of Semiconductor Materials & Devices, Shanghai Institute of Metallurgy,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)*

Xu Bo, Yang Yufen, Wang Zhanguo

*(Laboratory of Semiconductor Material Sciences, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 13 December 1997, revised manuscript received 22 April 1998

Abstract We have systematically investigated the variation of electron mobility μ_n and electron concentration n_s of three materials with temperature by dint of the Hall measurement of the materials of the three structures, GaAs based HEM T and PHEM T as well as InP based HEM T. The influences of the scattering mechanisms of the different HEM T structure materials on electron mobility and the different HEM T materials structures on electron concentration have been discussed in detail. The research results show that the values of $n_s \times \mu_n$ for InP based HEM T are larger than that for GaAs based HEM T and PHEM T. We also have illustrated that the performance of HEM T structure materials can be determined by the value of $n_s \times \mu_n$.

PACC: 7340L