



半导体量子器件物理讲座

第二讲 高电子迁移率晶体管(HEMT)*

王 良 臣

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘 要 文章从异质界面的三角势阱中二维电子气的形成入手,计算了二维电子气的量子化能级及其面电子密度.对 HEMT 器件材料结构参数的优化、器件的电荷控制模型及 $I-V$ 特性作了分析.

关键词 二维电子气,高电子迁移率晶体管,势阱

HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS

WANG Liang-Chen

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

Abstract Assuming the formation of a two-dimensional electron gas in a triangular potential well at the heterointerface we calculate both the quantized energy level and the interface sheet electron concentration. Optimization of high the electron mobility transistors, the charge control model and the current-voltage characteristics of these transistors are then analyzed.

Key words 2DEG, HEMT, potential well

1 前言

1960年,安德森(Anderson)预言^[1]在异质界面存在有电子的积累.1969年,Easki和Tsu提出^[2]在禁带宽度不同的异质结结构中,离化的施主和自由电子是分离的.即,电子离开施主母体,由宽带隙材料一侧进入窄带隙材料一侧.这种分离减少了母体对电子的库仑作用,提高了电子迁移率.1978年,Dingle等^[3]在调制掺杂的异质材料中观察到了载流子迁移率增高的现象.随后,在调制掺杂 GaAs/n-AlGaAs单异质结结构的实验中,证明了异质界面存在着具有二维行为的电子气(2DEG)^[4],而且有高的迁移率.1980年,一种新调制掺杂 GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As异质结构场效应管^[5],即所谓高电子迁移率晶体管(HEMT)问世.

近些年来,MBE和MOCVD材料生长技术快速发展,人们利用能带工程设计了多种异质材料结构的HEMT器件.HEMT以其高频、高速、低噪声、大功率等优势,已开始在通信等领域广泛应用,并显示出

了巨大的生命力.

本讲从异质结构中的2DEG形成入手,分析2DEG的量子化状态及其一些物理性质.在此基础上对HEMT器件的基本材料结构、工作原理及特性进行分析,以达到对这种新型的量子器件有一个基本了解的目的.

2 高电子迁移率晶体管(HEMT)材料结构的基本物理特性

2.1 异质界面势阱和二维电子气的形成

N-AlGaAs和GaAs晶格常数匹配可形成异质结. AlGaAs的禁带宽度大于GaAs(例如, $E_g |_{Al_{0.22}Ga_{0.78}As} = 1.70\text{eV}$, $E_g |_{GaAs} = 1.42\text{eV}$, $\Delta E_g = 0.28\text{eV}$).这种带隙的差异导致了在异质界面带边断续,重掺杂的N-AlGaAs层中的电子将转移到非掺杂的GaAs一侧,而电离施主仍留在AlGaAs一侧.界面附近能带发生弯曲,AlGaAs一侧形成势垒,GaAs

* 2000-03-30收到初稿,2000-11-24修回

一侧形成准三角形势阱, 积累在势阱中的电子在空间上与施主母体是分离的. 在垂直界面方面 (z 方向) 上的运动是被限制在很窄的阱中, 在平行界面方向上 (x, y 方向) 却是自由的, 因此, 被称为二维电子气 (见图 1).

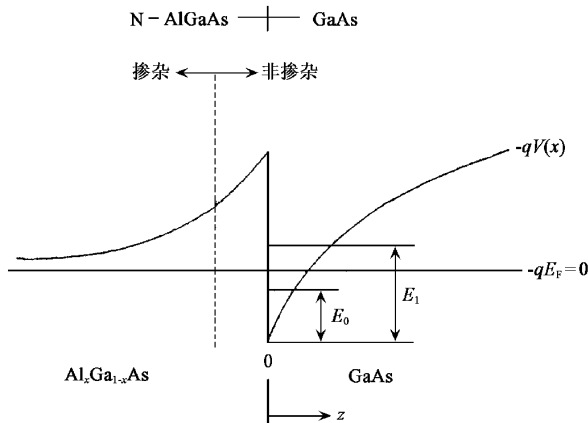


图 1 n-AlGaAs/GaAs 异质结界面导带边示意图

如上所述, 异质结构中非掺杂的窄带材料势阱中的电子与宽带中电离施主空间上是分离的, 减弱了二者之间的库仑作用 (即杂质散射), 电子迁移率显著增加, 而且在宽带材料高掺杂的情况下, 仍可获得高的迁移率. 因此, 在很大程度上缓解了 MESFET 结构中掺杂浓度与迁移率之间的突出矛盾, 得到了高电导率 ($\sigma = ne\mu$) 的导电沟道.

2.2 势阱中二维电子气的量子化状态^[6,7]

AlGaAs/GaAs 有限高势垒情况与无限高势垒有所区别, 但仍可利用三角形近似方法做近似处理, 去描述二维电子气的量子化行为. 电子在势阱中的波函数和能量本征值应满足薛定谔方程.

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} + qV(z) \right] \Psi(z) = E\Psi(z), \quad (1)$$

在三角形近似中,

$$V(z) = \begin{cases} \infty & (z \leq 0) \text{ (无穷高势垒)}, \\ F_s z & (z > 0), \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_s 为界面势阱中的电场, $V(z)$ 为电势, $\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常数, m^* 为电子的有效质量, E 为电子的能量本征值, $\Psi(z)$ 为电子在 z 方向上的波函数.

将 (2) 式代入 (1) 式, 得到

$$\frac{d^2 \Psi(z)}{dz^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} (E - qF_s z) \Psi(z) = 0, \quad (3)$$

其解是艾黎函数, 取 $\Psi(\infty) = 0, \Psi(0) = \alpha$ 无穷高

势垒) 则能量的本征值 E_i 只能取

$$E_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[\frac{3}{2} \pi q F_s \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

上式说明, 势阱中的电子状态是量子化的, 能量的本征值 E_i 是一系列量子化的分离值.

能级越高, 能级之间的间隔越小, 最后趋于连续. F_s 越大, ΔE_i 越大, 量子化效果越显著. 估算势阱的宽度为

$$z_i = 2E_i / 3qF_s, \quad (5)$$

以上利用三角形势阱近似的方法, 描述了阱中二维电子气的量子化行为. 实际上, 薛定谔方程中的电势 $V(z)$ 是由窄带一侧电离杂质电荷和阱中电子电荷的密度分布来决定, 其规律应满足泊松方程, 显然这是一个自洽求解过程.

图 2 给出了有限高势垒 (如 n-Al_xGa_{1-x}As/GaAs) 的自洽求解的计算结果^[9,10].

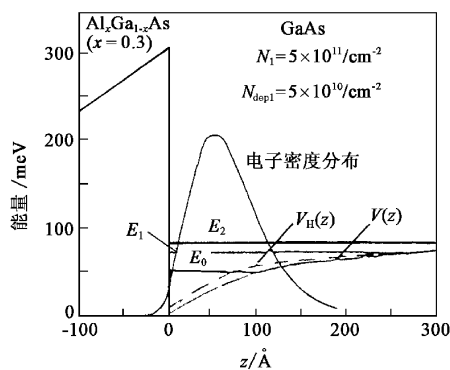


图 2 GaAs-Al_xGa_{1-x}As ($x=0.3$) 界面上势能和电子密度的分布

由图 2 看出, 对于有限高势垒, 电子波函数已渗透到了 AlGaAs 中. 因此, 为减少电离杂质散射, 在 n-AlGaAs 和 GaAs 之间加入非掺杂的 AlGaAs 薄层, 一般为 30Å 左右.

2.3 势阱中二维电子气密度^[11]

二维电子气的面密度是影响 HEMT 器件最大电流密度等性能的重要因素. 虽然, 势阱的电子来自高掺杂的宽禁带材料 (如 n-Al_xGa_{1-x}As), 但是要获得高的二维电子气密度, 除高掺杂外还应设计合理的材料结构, 如带隙差的选择, 层厚等等.

图 3 给出了 n-Al_xGa_{1-x}As/GaAs 异质结平衡时的能带图.

(4) 式表征了异质结中, 势阱中纵向量子化离散能量同电场之间的关系.

依照泊松方程, 在势阱 GaAs 中的电场 ϵ_1 可用

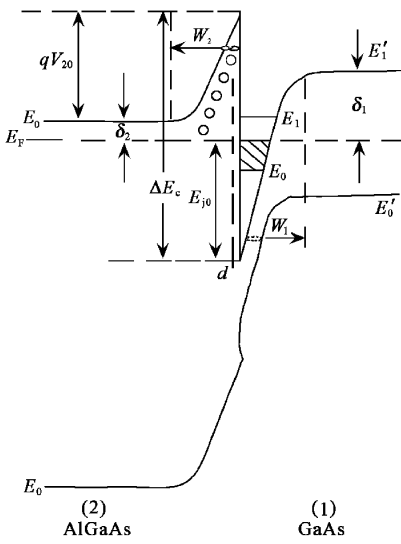


图3 n-Al_xGa_{1-x}As/GaAs 异质结平衡时的能带图

下式表示：

$$\frac{d\epsilon_1}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_{r1}\epsilon_0} [n(x) - N_{di}],$$

式中 ϵ_{r1} 为 GaAs 的相对介电常数, N_{di} 为非掺杂 GaAs 中电离施主浓度, 在大于阱宽 W_1 (即 $d_1 > W_1$) 时, 可认为电场为 0, 对上式积分, 得到

$$\epsilon_{r1}\epsilon_0\epsilon_1 = qn_s - qN_{di}d_1,$$

因为势阱 GaAs 为非掺杂, N_{di} 可以忽略, 因此有

$$\epsilon_{r1}\epsilon_0\epsilon_1 = qn_s, \quad (6)$$

应用费米-狄拉克统计(电子占据晶体中各能级几率的总和等于晶体中电子的总数, $\sum_j f(E_j) =$ 晶体中电子总数), 势阱中总的的面电子密度为

$$n_s = \frac{DkT}{q} \ln \left[\left(1 + \exp \frac{q(E_F - E_0)}{kT} \right) \left(1 + \exp \frac{q(E_F - E_1)}{kT} \right) \right], \quad (7)$$

式中 $D = \frac{qm^*}{\pi\hbar^2}$ 为常数.

以上建立了势阱中的电场 F_s 与阱中电子能级 (E_0, E_1, \dots), 阱中电子能级与二维电子气密度 n_s 以及 n_s 与费米能级 E_F 之间的关系. (7) 式表征了 n_s 与 E_F, E_0 及 E_1 之间的关系.

前面已经谈到, 二维电子气是由宽带隙的高掺杂 N-AlGaAs 来提供, 因此, 建立二者之间关系是必要的. 利用耗尽层近似, 在 N-AlGaAs 空间电荷区, 电压 $V_2(x)$ 遵守泊松方程,

$$\frac{d^2 V_2}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{r2}\epsilon_0} n_2(x), \quad (8)$$

式中 ϵ_{r2} 为 AlGaAs 的相对介电常数, $n_2(x)$ 为空间

电荷区的电荷密度. 取边界条件:

$$\begin{aligned} V_2(0) &= 0, \\ \left(\frac{dV_2}{dx} \right)_{x=0} &= -\epsilon_{r2}, \\ \left(\frac{dV_2}{dx} \right)_{x=-W_2} &= 0. \end{aligned}$$

式中 ϵ_{r2} 是异质结界面 (AlGaAs 一侧) 电场, W_2 为空间电荷区宽度. 若 $n_2(x) = 0, -d < x < 0$ (非掺杂隔离层 d); $n_2(x) = N_2, -W_2 < x < -d$ (掺杂层), 对 (8) 式积分, 得到

$$\epsilon_{r2}\epsilon_0\epsilon_{i2} = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_{r2}N_2V_{20} + qN_2^2d^2} - qN_2d.$$

由图 3 可知,

$$V_{20} = \Delta E_c - \delta_2 - E_{F0}.$$

平衡时, 界面上电位移矢量连续, 有

$$\epsilon_{r2}\epsilon_0\epsilon_{i2} = \epsilon_{r1}\epsilon_0\epsilon_{i1} = qn_s,$$

所以

$$qn_s = \sqrt{2q\epsilon_{r2}\epsilon_0N_2V_{20} + q^2N_2^2d^2} - qN_2d, \quad (9)$$

该式建立了在宽带 AlGaAs 层中空间电荷区的电压 V_{20} , 电荷密度 N_2 及隔离层 d 与窄带一侧阱中二维电子气浓度 n_s 之间的关系. 即得到平衡方程:

$$\begin{aligned} \sqrt{2q\epsilon_{r2}\epsilon_0N_2V_{20} + q^2N_2^2d^2} - qN_2d &= qn_s \\ &= DkT \ln \left[\left(1 + \exp \frac{q(E_F - E_0)}{kT} \right) \left(1 + \exp \frac{q(E_F - E_1)}{kT} \right) \right], \quad (10) \end{aligned}$$

对 (10) 式联立自治求解, 最终可以得到 2DEG 面密度, 见图 4.

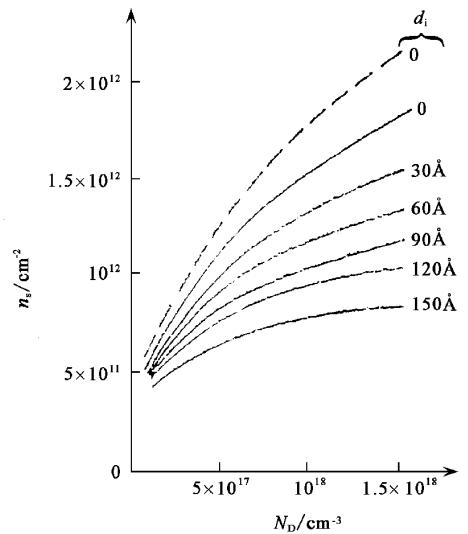


图4 沟道中的面电子密度和 AlGaAs 中掺杂浓度的关系

Lee^[12]认为在宽禁带一侧采用耗尽层近似不够精确,而采用费米-狄拉克统计得到了面电子密度与掺杂浓度,面电子密度与未掺杂层厚度 d_i 的关系.

以上结果说明势阱中二维电子气浓度与宽禁带层掺杂浓度 N_2 , 异质结导带断续 ΔE_c 以及未掺杂层的厚度等均有直接关系.

3 HEMT 器件工作原理

HEMT 器件是在 MESFET 基础上逐步发展起来的异质结场效应器件. 图 5 和图 6 给出了 GaAs MESFET 和 HEMT 两种器件结构.

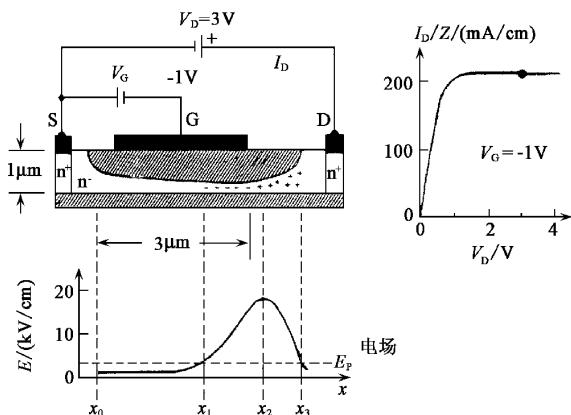


图 5 MESFET 器件结构图及在不同栅压、漏压下的电场分布和 $I-V$ 特性

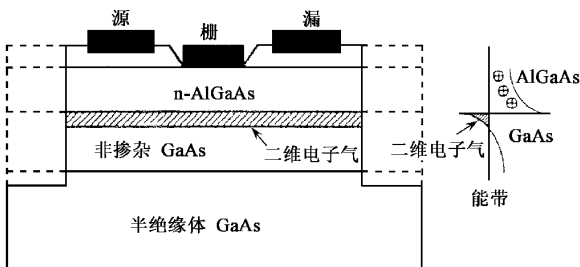


图 6 HEMT 器件的结构图

MESFET 分耗尽型和增强型. 所谓耗尽型是指在零栅压下沟道处于导通状态, 加大负栅压沟道耗尽, 处于关闭状态. 所谓增强型是指在零栅压沟道关闭, 加正栅压耗尽层变窄, 沟道导通. 显然, 前者要求有源区要厚, 而后者有源区要薄. 由图 5 可以看出栅压和漏压的变化, 沟道的宽窄发生变化, 沟道中电场分布也发生了变化. 从源端出发的电子在电场的作用下不断加速, 当漏压较小时, 电子的漂移速度随电场的增加而增加, 即 I_{ds} 和 V_{ds} 有线性关系, 沟道电场

继续增加时, I_{ds} 随 V_{ds} 的变化变缓; 当电场达到或超过临界电场时, 电子速度趋于饱和, 因此出现了 I_{ds} 饱和特性.

MESFET 器件结构是在半绝缘 GaAs 衬底上生长 n 型有源层, 源、漏电极制作在 n^+ 顶层上, 肖特基栅在 n 型有源层上.

HEMT 器件结构是在半绝缘 GaAs 衬底上生长 n 型掺杂的 AlGaAs 及 n^+ 顶层. 源、漏电极制作在 N^+ GaAs 顶层上, 肖特基栅制作在 N-AlGaAs 上. 若零栅压下肖特基栅下的耗尽层与异质结的耗尽层恰好连通, 在 $V_{ds} > 0$ 时, 增加负栅压, 耗尽层加深, 同时, 费米能级向势阱底部下移, 电子密度减小, 直到 $N_s = 0$ 无电流输出, 称之为夹断. 同样, HEMT 器件也分为耗尽型和增强型.

3.1 HEMT 器件的电荷控制模型^[13]

所谓电荷控制模型是在无漏极电压时, 栅压对二维电子气的调制作用.

对于耗尽型 HEMT 器件来说, 耗尽区包含有栅下的耗尽区和异质结耗尽区. 如果在负栅压的作用下, 掺杂的 $n - Al_x Ga_{1-x} As$ 层不能完全耗尽, 则 HEMT 的源漏电流 I_{SD} 除了二维电子气参与导电之外, $n - Al_x Ga_{1-x} As$ 层中未耗尽的自由载流子也将参与导电, 即形成一个附加的平行电导层, 它相当于 MESFET 的沟道层. 因此, 栅的调制不仅仅是对二维电子气, $n - Al_x Ga_{1-x} As$ 层未耗尽的自由载流子也将受到调制. 显然, 这种情况是不希望产生的. 若在栅压为零或接近零时, 耗尽层正好到 AlGaAs/GaAs 界面, 这样既不产生平行电导层, 二维电子气又可得到充分利用, 就能获得最高的器件跨导(栅压变化引起的源漏电流的变化). 下面我们阐述的电荷控制模型, 也是基于只有二维电子气参与导电的情况.

图 7 给出了具有肖特基势垒的异质结结构的带带图.

沟道电荷与栅压的关系为

$$Q_s = \frac{\epsilon_2}{d_2} (V_G - V_{off}), \quad (11)$$

其中 $V_{off} = \varphi_m - V_{P2} - \frac{1}{q} (\Delta E_c - E_F)$, V_{off} 称为夹断电压, 这就是 HEMT 器件的电荷控制模型.

Lee^[14]考虑到负栅压增加引起的费米能级的下移, 提出了一个修正模型, 即

$$Q_s = \frac{\epsilon_{i2}}{(d + \Delta d)} (V_g - V_{off}), \quad (12)$$

这里 $\Delta d \approx 80 \text{ \AA}$.

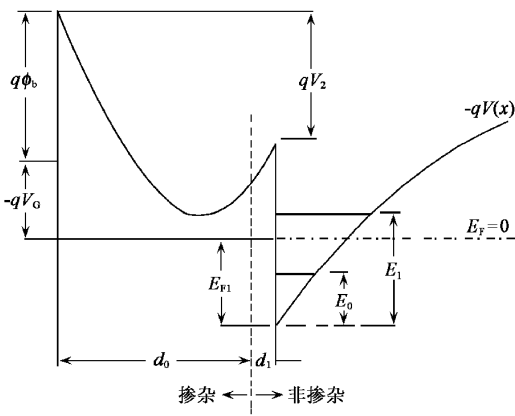


图7 具有肖特基势垒的 AlGaAs/GaAs 异质结构导图

3.2 HEMT 器件的 $I-V$ 特性^[15]

HEMT 器件的 $I-V$ 特性是同时考虑栅压和漏压对沟道电流的调制作用。若只考虑二维电子气导电, 电子的面电荷密度可近似为栅电压和沟道电压(沿平行异质结的 x 方向)的线性函数, 即

$$N_s(x) = \beta [V_G - V(x) - V_{th}], \quad (13)$$

这里 β 是电荷控制系数, V_{th} 是阈值电压, 则二维电子气形成的沟道电流为

$$I = ZqN_s(x)v(x), \quad (14)$$

式中 Z 是栅宽, $v(x)$ 是电子速度。

沟道中二维电子气的速度-场特性可表示为 Frofimenk-off-type 近似, 即

$$v_x = \frac{\mu E(x)}{1 + \frac{E(x)}{E_c}}, \quad (15)$$

显然, 该式给出的速度-场关系中, 电场接近无穷大时速度饱和。因此, 假定 $E > E_c$ 时速度饱和(E_c 为速度达到饱和时电场), 且 $v_s = (1/2)\mu E_c$ 。

在非饱和区($E < E_c$, 速度未达到饱和): 将(14)(15)式沿栅长方向从源到漏积分, 二维电子气沟道电流 I_D 可表示为栅压和漏压的函数:

$$I_D = \frac{A \left(V_g - V_{th} - \frac{V_D}{2} \right) V_D}{1 + \frac{V_D}{B}}, \quad V_D < V_{sat}, \quad (16)$$

式中 $A = \frac{Z\mu_2 q\beta}{L}$, $B = LE_{c2}$, E_{c2} 是由(15)式中定义的二维电子气的饱和电场, L 是栅长, Z 是栅宽, V_D 是漏压。

在饱和区($V_D \geq V_{sat}$): $x \geq L_c$ 电子以不变的饱和速度运动, 即 $dv/dx = E_{c2}$, 最后可得到 HEMT 器件的 $I-V$ 特性表达式

$$I_D = \frac{A \left(V_G - V_{th} - \frac{V_{sat}}{2} \right) V_{sat}}{1 - k_1 + \frac{V_{sat}}{B}}. \quad (17)$$

MESFET 和 HEMT 的输出特性常用跨导来表征, 它表示每毫米栅宽下, 栅压的变化引起的源漏电流的变化, 即 ms/mm (毫西门子/毫米)。

4 HEMT 器件的材料结构设计原则及制作工艺要点简述

4.1 HEMT 器件材料结构设计原则

上面阐述了异质结中的一些基本物理特性及 HEMT 器件的工作原理, 在这个基础上人们利用能带工程设计了不同的材料结构, 以满足对器件在不同场合下的性能需求。

回顾从 MESFET 到 HEMT 器件的发展, 重要的一点是异质结材料的生长技术的进展及能带工程设计产生的材料结构的变革。

MESFET 作为一种在同质材料中掺杂的场效应器件, 为获得高电导沟道($\sigma = ne\mu$), 掺杂浓度与迁移率存在着突出矛盾, 使器件性能如频率、跨导等受到了限制。后来人们想到了利用异质结构中的带隙差, 掺杂施主母体保留在宽禁带材料一侧, 自由电子进入非掺杂的 GaAs 一侧, 施主与电子的分离减弱了杂质散射, 提高了迁移率。同时, 宽带材料的掺杂浓度也可进一步提高。因此, 从同质材料结构到异质结构, 或者说从 MESFET 到 HEMT 器件, 是材料结构发展的一个变革, 是从一般的电子器件发展到了一种新的量子器件。

最初人们利用 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结构可使掺杂浓度 $N_d = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $\mu_n = 6000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。为了提高二维电子气密度, 希望加大异质结的带隙差。一方面可通过增加宽禁带材料 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 Al 的组分增加 E_g ($E_g |_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = 1.424 + 1.247x$), 也可变更窄带 GaAs 沟道材料, 减小 E_g ($E_g |_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = 1.424 - 1.064x$, 小于 $E_g |_{\text{GaAs}} = 1.424$)。前者, 增加 Al 组分, 如 $x > 0.25$ 将产生 DX 复合中心, 使浓度提高受到限制, 同时也出现了 $I-V$ 特性的塌陷和阈值漂移。所以一般控制 Al 组分的摩尔数在 0.2 附近。若将沟道材料 GaAs 变为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 即形成了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InGaAs}$ 异质结构, 可获得更高二维电子气浓度, 同时电子在 InGaAs 中迁移率大于 GaAs。显

然,这种异质结构有其更大的优越性.在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构中,用 GaAs 为衬底来生长,由于 InGaAs 与 GaAs 晶格常数的差异形成所谓赝配(pseudomorphic)结构,故称为 P-HEMT. GaAs P-HEMT 结构,二维电子气浓度可提高到 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 迁移率 μ_n 达 $8000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 为了进一步增加带隙差,将 GaAs 衬底改为 InP 基,并将 In 组分提高(In 组分为 0.53 时, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 与 InP 晶格匹配)同时把宽禁带材料 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 改为 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ 又比 AlGaAs 有更高的掺杂效率($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$),使二维电子气的浓度进一步得到提高.这出现了 InP 基的 HEMT 结构,其 n_s 可达 $3.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, μ_n 达 $9500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 另外, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 InP 也可以共同形成沟道:在靠近源端的低场区, InGaAs 有较高的迁移率,在漏端高场区, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层被耗尽时, InP 可作为沟道并具有高的迁移率.

在 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 结构中,若进一步提高 ΔE_g , In 组分由 0.53 提高到 0.62,出现了 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.62}\text{Ga}_{0.38}\text{As}/\text{InP}$ 的 InP 基的 P-HEMT 结构,其 n_s 可达 $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, μ_n 提高到 $10500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

由以上材料结构的发展来看,主要是改变沟道材料(GaAs, InGaAs)及与之组合的宽禁带材料(AlGaAs 和 AlInAs),衬底材料可选 GaAs,也可选 InP,这也出现 GaAs 基和 InP 基的 HEMT 和 P-HEMT 两种结构.

在材料的生长过程中,为了避免来自衬底的影响,对于 GaAs 基来说,往往先生长一层大约 $1 \mu\text{m}$ 厚的缓冲层.为了缩短生长时间,减小生长厚度,通常也采用超晶格结构,如 GaAs/AlAs 或 AlGaAs/GaAs 超晶格层作缓冲层,其厚度在 $1000\text{--}2000 \text{ \AA}$.

为了提高功率输出,可采用双异质结结构,如 $n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}/n\text{-AlGaAs}$ 或多异质结形成多沟道,这样可增加沟道中二维电子气的浓度,以满足大电流高功率的要求.

宽禁带材料的掺杂方式,可采用体均匀掺杂,也可采用面掺杂(或 δ 掺杂),后者更有利于得到较高的 2DEG 浓度,同时栅金属与非掺杂的 AlGaAs 层接触提高了肖特基结的击穿电压.

概括起来讲,HEMT 的材料结构基本包括:

- (1) 半绝缘衬底及缓冲层(沟道层);
- (2) 未掺杂的宽禁带隔离层(隔离层);
- (3) 高掺杂的宽禁带层(均匀掺杂或平面掺杂,

2DEG 提供层);

(4) 提供源漏欧姆接触的高掺杂帽层.

下面给出了几种基本的异质结结构组合:

- (1) 以未掺杂的 GaAs 作沟道层(GaAs 衬底)
 - $n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}$ (HEMT);
 - $n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}/n\text{-AlGaAs}$ (单沟道双掺杂);
 - $n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}/n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}/n\text{-AlGaAs}$ (多沟道).

(2) 以未掺杂 InGaAs 作沟道(GaAs 衬底或 InP 衬底)

- $n\text{-AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ (GaAs P-HEMT);
- $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x = 0.53$, InP HEMT);

$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x > 0.62$, InP P-HEMT).

(3) 缓冲层采用超晶格结构(因篇幅关系,在此不作介绍)

HEMT 器件几种类型的材料结构举例:

GaAs 衬底:

(a) GaAs HEMT

$n^+\text{GaAs}$ ($2\text{--}5$) $\times 10^{18}$, Si $300\text{--}500 \text{ \AA}$

非掺杂的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 500 \AA

Si δ 掺杂 ($1\text{--}3$) $\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

非掺杂的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ $30\text{--}60 \text{ \AA}$ (隔离层)

GaAs $1000\text{--}3000 \text{ \AA}$ (沟道层)

S. I (AlGaAs/GaAs 或 AlAs/GaAs)

GaAs 2000 \AA

S. I GaAs 衬底

(b) GaAs P-HEMT

$n^+\text{GaAs}$ ($2\text{--}5$) $\times 10^{18}$, Si $300\text{--}500 \text{ \AA}$

非掺杂的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 500 \AA

Si δ 掺杂 ($1\text{--}3$) $\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

非掺杂的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ $30\text{--}60 \text{ \AA}$ (隔离层)

$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ $100\text{--}200 \text{ \AA}$ (沟道层)

GaAs 或 S. L (缓冲层)

GaAs 2000 \AA

S. I GaAs 衬底

4.2 HEMT 器件制作工艺简述

GaAs 器件经过多年研究,已经形成了与 Si 器件不同的工艺制作体系,如欧姆接触、肖特基栅、干法与湿法腐蚀技术、金属剥离技术、空气桥技术及背孔接地技术等等.这里仅对 HEMT 器件制作中常常遇到的问题 and 特殊的工艺技术作简单叙述.

HEMT 器件制作的一般工艺流程:

腐蚀台面(器件隔离)→在 N^+ -GaAs 帽层上淀积 Au-Ge-Ni,金属化形成欧姆接触,形成源极和漏极区→光刻栅条(腐蚀 n^+ -GaAs, n -GaAs 测 S.D 电流控制其腐蚀深度)→淀积栅金属(如 TiPtAu 或 AlTiAu)→金属剥离形成栅→电镀加厚源、栅、漏极压焊区→中测。

为获得亚微米栅长,光刻栅条和 n -AlGaAs 的腐蚀是两步重要工艺环节。一般来讲, $1\mu\text{m}$ 左右的栅长用普通的接触曝光可以获得,更细的栅长可以采用电子束曝光或相移光刻等,当然也可采用斜蒸发等特殊方法,但这些方法往往在重复性、成品率方面受到限制。栅金属在淀积之前要先腐蚀掉 N^+ -GaAs 帽层,然后对 n -AlGaAs 进行腐蚀并保留适当厚度。此步腐蚀十分关键,因为它直接影响二维电子气的跨导、夹断电压等特性,所以往往通过监测 I_{SD} 电流来确定腐蚀深度。为了减小栅电阻,往往需要淀积较厚的栅金属,如大于 6000\AA 或采用 T 型栅结构。但单靠一层光刻胶难以达到此目的。目前,常采用加厚金属剥离(或称辅助剥离)技术,即在涂胶之前先淀积一层介质膜(如 SiO_2 等)或采用多层胶。光刻出栅条之后,先对介质进行腐蚀(干法腐蚀存在有损伤问题),然后对 GaAs 和 AlGaAs 腐蚀,淀积栅金属后再完成金属剥离(lift-off),最终得到较厚的栅。

5 结束语

本讲介绍了高电子迁移率晶体管(HEMT)的基本器件物理知识及其工作原理。在此基础上阐述了

材料结构参数设计的基本原则及目前 HEMT 器件材料结构的大体情况。最后,很简单地介绍了器件制作方法。由于篇幅所限,文章没有介绍器件的等效电路模型,器件几何尺寸及电学参数的设计。通过本讲叙述,希望能对这种新型量子器件有一个基本了解,并初步掌握材料结构设计的基本知识。

参 考 文 献

- [1] Anderson R L. IBM J. Res. and Develop. ,1960 3 283
- [2] Esaki L, Tsu R. IBM Res. ,Internal Rep. RC 24180 ,Mar. 26 , 1969
- [3] Dingle R *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1978 33 665
- [4] Hiyamizu S *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1980 37 805
- [5] Mimura T, Hiyamizu S, Fujii T *et al.* Jap. J. Appl. Phys. ,1980 , 19 225
- [6] Stern F. Phys. Rev. ,1972 ,B5 4891
- [7] 虞丽生. 半导体异质结物理. 北京: 科学出版社, 1990. 140 [YU Li-Sheng. Semiconductor Heterojunction Physics. Beijing: Science Press, 1990. 140 (in Chinese)]
- [8] Pals J A. Physics Letters ,1972 39A :101
- [9] Stern F. J. Comput. Phys. ,1970 6 56
- [10] Ando T. Phys. Soc. of Japan ,1982 51 3893
- [11] 李效白. 砷化镓微波功率场效应晶体管及其集成电路. 北京: 科学出版社, 1998. 502—507 [LI Xiao-Bai. GaAs Microwave Power FET and Intergrated Circuits. Beijing: Science Press, 1998. 502—507 (in Chinese)]
- [12] Lee K, Shur M, Drummond T J *et al.* J. Appl. Phys. ,1983 54 : 2093
- [13] Hess K. Appl. Phys. ,1979 35 484
- [14] Lee K, Shur M, Drummond T J *et al.* J. Appl. Phys. ,1983 54 : 6432
- [15] Vibter B. Appl. Phys. Lett. ,1984 45 581

(上接第 202 页)

- [3] Kroemer H. Proc. IRE 45 ,1535 ,1957 ;RCA Rev. ,1957 28 332
- [4] Alferov Zh I ,Kazarinov R F. Inventor's Certificate No. 181737(in Russian), Application No. 950840 ,priority as of March 30 ,1963
- [5] Kroemer H. Proc. IEEE ,1963 51 :1782
- [6] Alferov Zh I *et al.* Fiz ,Tekh. Poluprovodn ,1970 ,4 :1826(Sov. Phys. Semicond. ,1970 4 :1573)
- [7] Hayashi I ,Panish M B ,Foy P W *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1970 , 17 :109
- [8] Cho A Y. J. Vac. Sci. Technol. ,1971 8 31 ;Cho A Y. Appl. Phys. Lett. ,1971 ,19 467
- [9] Dupuis R D ,Dapkus P D. Appl. Phys. Lett. ,1977 31 466
- [10] van der Ziel J P ,Dingle R ,Miller R C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1975 26 463
- [11] Tsang W T. Appl. Phys. Lett. ,1982 40 217
- [12] Alferov Zh I. Semiconductors ,1998 32 1

作者简介



陈良惠,男,1939 年出生,福州人,中国工程院院士。1963 年毕业于上海复旦大学,现任中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师、光电子器件国家工程研究中心主任。他先后从事半导体 III-V 族材料生长,半导体光电子探测器以及半导体激光器研究。由于在量子阱光电子器件研究和工程化方面的成就,获中国科学院科技进步奖和国家科技进步奖多项。他目前的专业兴趣是新型量子阱光电子器件及其在光通信、光存储、光显示和激光医疗等方面的应用。