

第五章 结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管

一、 简答题

1、 什么结型场效应晶体管（即 JFET）？解释沟道夹断、漏电流饱和、夹断电压的概念。

答：（1）结型场效应晶体管（即 JFET）是指 PN 结场效应晶体管。JFET 利用 PN 结作为栅结去控制两个欧姆结之间的电阻，从而实现对两个欧姆结之间的电流的控制。JFET 本质上是一个由电压控制的电阻。JFET 的特点是只有多数载流子承担电流的输运，这种器件称为单极器件，JFET 是单极晶体管。

（2）随着漏端电压的增大，在 $x=L$ 处，空间电荷区连通，自由载流子全部耗尽，这种情况称为沟道夹断。

（3）沟道夹断之后的漏电流称为饱和漏电流，用 I_{DS} 表示。

（4）夹断点的电位为 V_p ，也称为夹断电压。

2、 目前用的比较多的是 GaAs MESFET，为什么？为什么没有 Si MESFET？

答：由于硅的 MESFET 难以制作，要倾注很大力量防止淀积金属前硅表面生成天然氧化层。而 N 型 GaAs 与金属的肖特基势垒高度为 $0.72 \sim 0.90 \text{ V}$ ，对于通常淀积金属前的 GaAs 表面处理不灵敏。

更为重要的是，金属与 GaAs 之间的界面陷阱不妨碍偏压对耗尽层厚度的调整，这为制作 GaAs MESFET 提供了必要的条件。

此外，GaAs 的电子迁移率约为硅的 6 倍，这使它更适合于高频应用。

目前，尽管多种化合物半导体晶体管不断被发明出来，并已包含了异质结构，但最为普及、能大量应用、技术成熟并作为商品化的化合物半导体晶体管多是 N 型 GaAs MESFET，无论是作为分立器件还是以 IC 形式出现，情况都是如此。

3、 什么是截止频率 f_{co} ？截止频率 f_{co} 由什么决定？如何实现最好的高频性能？

答：（1）随着工作频率的升高，JFET 的电流增益（输出电流与输入电流之比）会下降。频率 f_{co} 定义为晶体管电流增益下降到 1，即不能再放大输入信号时的最高工作频率，这个频率有时也称为截止频率。

（2）由截止频率公式：

$$f_{co} = \frac{V_{p0}\mu_n}{2\pi L^2}$$

说明，截止频率 f_{co} 由夹断电压、迁移率和沟道长度所决定。

(3) 在考虑最高频率时, 通常夹断电压这一项无法调节, 其他可调节的量为迁移率和沟道长度。因此, 为了实现最好的高频性能, 要有高的迁移率和短的沟道长度。

4、MESFET 有两种类型, 分别进行解释说明。

答: (1) 常闭型或增强型:

当 $V_G=0$ 时, MESFET 肖特基势垒穿透了 n-GaAs 外延层达到绝缘衬底, 因此不出现导电沟道。工作时, 需给耗尽层加上正向偏压, 使耗尽层变窄, 以致耗尽层的下边缘向 n-GaAs 层内回缩, 离开半绝缘衬底, 在耗尽层下方和绝缘体衬底之间形成导电沟道。这种 MESFET 称为常闭型或增强型 MESFET。对于增强型 MESFET, V_p 通常换成 $-V_{TH}$, $-V_{TH}$ 称为阈值电压, 它是使晶体管导通所需要施加的最小正向偏压。对于增强型 MESFET, V_{TH} 总是正的。

(2) 常开型或耗尽型:

当 $V_G=0$ 时, MESFET 的肖特基势垒没有达到半绝缘衬底。 $V_G=0$ 时, 就存在导电沟道。欲使沟道夹断, 需给耗尽层加上负的栅偏压。这种 MESFET 称为常开型或耗尽型 MESFET。

5、什么是二维电子气 (2-DEG) ?

答: 当宽禁带半导体材料 (如 AlGaAs) 与窄禁带半导体材料 (如 GaAs) 形成异质结时, 由于 AlGaAs 禁带宽度比 GaAs 的大, 它们形成异质结时, 导带边不连续。AlGaAs 的导带边比 GaAs 的高 ΔE_c , 这是由于前者的电子亲和势比后者的小, 结果电子从 AlGaAs 向 GaAs 转移, 引起界面处能带弯曲, 在界面处发生强烈的能带弯曲, 在窄禁带半导体一侧 (即 GaAs 表面) 形成近似三角形的电子势阱。如果宽禁带半导体 (AlGaAs) 掺有施主杂质, 则施主杂质中的电子将穿过界面势垒, 被捕获在 GaAs 势阱中。

当电子势阱较深时, 电子基本上被限制在势阱宽度所决定的薄层 ($\sim 100\text{ nm}$) 内, 这样的电子系统称为二维电子气 (2-DEG)。2DEG 是指电子 (或空穴) 被限制在平行于界面的平面内自由运动, 而在垂直于界面的方向上受到限制, 即势阱中的电子在垂直方向上的动量是量子化的。由于电子势阱的深度受到栅极偏压 V_G 的控制, 故 2-DEG 的浓度 (面密度) 将受到 V_G 的控制, 从而器件的电流受到 V_G 的控制。

二、计算题

1、在 n 沟道 JEFT 中: $N_a = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, $a = 2\text{ }\mu\text{m}$, $L = 20\text{ }\mu\text{m}$, $Z = 0.2\text{ cm}$ 。求: (1) 内建电势 ϕ_0 ; (2) 夹断电压 V_{p0} 和 V_p ; (3) 电导 G_0 ; (2) 当栅极和漏极为零偏时, 实际的沟道电导。 ($q = 1.6 \times 10^{-19}$, 硅相对介电常数 $k = 11.9$, $\epsilon_0 =$

$$8.85 \times 10^{-14} \text{ F/M}, n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}, V_T = 0.026 \text{ V}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$$

解: (1)

$$\varphi_0 = V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.026 \ln \frac{10^{18} \times 10^{15}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.76 \text{ V}$$

(2)

$$V_{p0} = \frac{q N_d a^2}{2 k \varepsilon_0} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \times (2 \times 10^{-4})^2}{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}} = 3.04 \text{ V}$$

$$V_p = V_{p0} - \varphi_0 = 3.04 - 0.76 = 2.28 \text{ V}$$

(3)

$$G_0 = \frac{2 q a Z \mu_n N_d}{L} = \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4} \times 0.2 \times 1350 \times 10^{15}}{20 \times 10^{-4}} = 8.64 \times 10^{-3} (\Omega^{-1})$$

(4)

$$G = \frac{2 q (a - W) Z \mu_n N_d}{L}$$

$$W = \left(\frac{2 k \varepsilon_0 \varphi_0}{q N_d} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.76}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15}} \right)^{1/2} = 1.0 \times 10^{-4} (\text{cm})$$

所以:

$$\begin{aligned} G &= \frac{2 q (a - W) Z \mu_n N_d}{L} \\ &= \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times (2 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-4}) \times 10^{-4} \times 0.2 \times 1350 \times 10^{15}}{20 \times 10^{-4}} \\ &= 4.32 \times 10^{-3} (\Omega^{-1}) \end{aligned}$$

2、一个 n 沟道 GaAs MESFET 器件, 其 $\phi_b = 0.89 \text{ eV}$, $N_d = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $a = 0.2 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $Z = 10 \mu\text{m}$ 。(1) 若夹断时, 沟道宽度 $a = 0.602 \mu\text{m}$, 这是增强型器件还是耗尽型器件? (2) 计算阈值电压或夹断电压; (3) 求 $V_G = 0$ 时的饱和电流。($q = 1.6 \times 10^{-19}$, GaAs 相对介电常数 $k = 13.1$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/M}$, $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $V_T = 0.026 \text{ V}$, $\mu_n = 8500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)

解: (1)

$$V_n = V_T \ln \frac{N_c}{N_d} = 0.026 \ln \frac{4.7 \times 10^{17}}{2 \times 10^{15}} = 0.141 \text{ V}$$

$$\varphi_0 = \phi_b - V_n = 0.89 - 0.141 = 0.749 \text{ V}$$

$$V_{p0} = \frac{q N_d a^2}{2 k \varepsilon_0} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15} \times (0.602 \times 10^{-4})^2}{2 \times 13.1 \times 8.85 \times 10^{-14}} = 0.499 \text{ V}$$

$$V_p = V_{p0} - \varphi_0 = 0.499 - 0.749 = -0.25 \text{ V}$$

故:

$$V_{TH} = 0.25 \text{ V}$$

(2) 由于 $V_p < 0$, $V_{TH} > 0$, 所以为增强型器件。

(3) 由于 MESFET 的 G_0 是 JFET 的一半:

$$G_0 = \frac{qaZ\mu_n N_d}{L} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.2 \times 10^{-4} \times 10 \times 10^{-4} \times 8500 \times 2 \times 10^{15}}{1 \times 10^{-4}} \\ = 5.44 \times 10^{-3} (\Omega^{-1})$$

$$I_{DS} = G_0 \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\varphi_0 - V_G}{V_{p0}}} - 1 \right) (\varphi_0 - V_G) + \frac{1}{3} G_0 V_{p0}$$

令 $V_G = 0$, 则

$$I_{DS} = G_0 \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\varphi_0}{V_{p0}}} - 1 \right) \varphi_0 + \frac{1}{3} G_0 V_{p0} \\ = 5.44 \times 10^{-3} \left(\frac{2}{3} \times \sqrt{\frac{0.749}{0.499}} - 1 \right) \times 0.749 + \frac{1}{3} \times 5.44 \times 10^{-3} \times 0.499 \\ = 1.58 \times 10^{-4} \text{ A}$$