

注：还有填空题20分。

## 一、简答题（60分）

1、简述能带的性质。

答：（1）由于：

$$\Psi_{k+k_n}(r) = \Psi_k(r)$$

所以波函数对应的能量谱值具有倒格子的周期性，即：

$$E_n(k + k_n) = E_n(k)$$

说明：能带在倒空间的周期性重复并不能得到新的独立状态，不能引起能级的简并化。因此，可以把  $k$  限制在第一布里渊区。

（2）由于势函数  $U(r)$  具有晶体的微观对称性，所以能量谱值  $E$  作为  $k$  的函数，具有晶体的宏观对称性。若将晶体转动  $\alpha$ ，则： $E(\alpha k) = E(k)$ 。与它们对应的能量谱值相等。 $\alpha k$  代表  $k$  经过转动反射操作后得到的一个新的波矢量。

（3）能量  $E$  是  $k$  的偶函数，即：

$$E(k) = E(-k)$$

（4）各能带之间可能相互重叠，也可能有能量间隙。各允带能量之间的能带间隙称为禁带或带隙。

7、什么是直接复合？分别从载流子运动和能带的角度解释直接复合。

答：（1）直接复合：电子由导带直接跃迁到价带的空状态，使电子和空穴成对消失。

（2）从载流子运动的角度：半导体中的自由电子和空穴在运动中总会有一定的几率直接相遇而复合。

（3）从能带的角度：由电子在导带与价带间直接跃迁而引起非平衡载流子的复合过程就是直接复合。

#### 4、什么是隧道电流？隧道电流是如何产生的？

答：（1）隧道电流：在 p 侧和 n 侧均为重掺杂的情况时，由于量子力学的隧道效应，有些载流子还可能隧道穿透（代替越过）势垒而产生额外的电流，即隧道电流。

（2）隧道电流的产生条件：

在下列情况下可以产生隧道电流：

一、费米能级进入能带，即费米能级位于导带和价带的内部。

二、空间电荷区的宽度很窄，因而有高的隧道穿透概率。

三、在相同的能量水平上，在一侧的能带中有电子而在另一侧的能带中有空的状态。

#### 4、什么是欧姆接触？如何形成欧姆接触？对于金属-p 型半导体，什么情况下是欧姆接触？

什么情况是整流结？如果是金属-n 型，什么情况下是欧姆接触？什么情况是整流结？

答：欧姆接触：定义为这样一种接触，所使用的结构不会添加较大的寄生阻抗，且不足以改变半导体内的平衡载流子浓度使器件特性受到影响。

实际上，不论 n 型还是 p 型半导体，由于在界面态上的电荷效应，理想的欧姆接触只能是种近似，在金属和半导体之间的直接接触一般不形成欧姆结。但如果半导体为重掺杂，那么金属半导体接触为欧姆接触。金属和重掺杂半导体之间形成欧姆接触的物理机制：载流子可以隧道穿透而不是越过势垒。

金属-n 型半导体：

$\varphi_m > \varphi_s$ ：整流结

$\varphi_m < \varphi_s$ ：欧姆结

金属-p 型半导体：

$\varphi_m > \varphi_s$ ：欧姆结

$\varphi_m < \varphi_s$ ：整流结

5、什么是双极结型晶体管的开关时间？开关时间包括 4 种时间，请分别说明这 4 种时间的物理意义。画出集电极电流的典型开关波形图，在图上标出这几种时间。

答：晶体管处于截止区，集电极电流很小，阻抗很高，晶体管处于“关”态。在饱和状态，集电极电流很大，阻抗很低，晶体管被认为是“通”态。在“通”和“断”两个状态之间的转换是通过改变载流子的分布来完成的。载流子分布不能立刻改变。需要一个过渡时间，称为开关时间。开关时间对应于建立和去除这些少数载流子的时间。

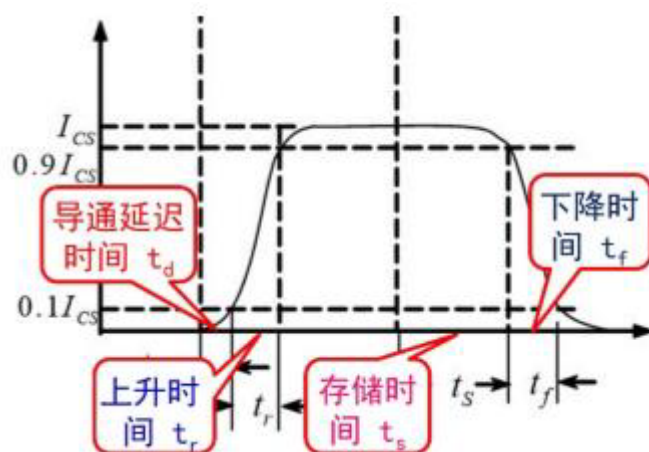
开关时间包括 4 种时间，分别为：

(1) 导通延迟时间  $t_d$ ：从加上输入阶跃脉冲至输出电流达到最终值的 10%，即  $0.1 I_{CS}$  所经历的时间。

(2) 上升时间  $t_r$ ：电流  $I_c$  从  $I_{CS}$  的 10% 上升到 90% 所需要的时间。

(3) 存储时间  $t_s$ ：从基极电流发生负阶跃到集电极电流下降到  $0.9 I_{CS}$  之间的时间。

(4) 下降时间  $t_f$ ：集电极电流从最大值 ( $I_{CS}$ ) 的 90% 下降到 10% 的时间间隔。为上升时间的逆过程。



#### 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  $\Delta E_c$ ，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。

4、写出实际的 MOS 的阈值电压公式，并说明每一项的物理意义。

答：实际的 MOS 阈值电压公式为：

$$V_{TH} = \phi_{MS}' - \frac{Q_o}{C_o} - \frac{Q_B}{C_o} + \phi_{si}$$

第一项：为消除半导体和金属的功函数差的影响，在金属电极上相对于半导体所加的外加电压；

第二项：为了把绝缘层中正电荷发出的电力线全部吸引到金属电极一侧，即消除硅-二氧化硅界面陷阱和二氧化硅电荷的影响所需要加的外加电压；

第三项：当半导体表面开始出现强反型层时，半导体空间电荷区中的体电荷  $Q_B$  与金属电极的相应电荷在绝缘层上所产生的电压降，即支撑出现强反型层时所需体电荷  $Q_B$  所需要的外加电压；

第四项：开始出现强反型层时，半导体表面所需的表面势，也就是跨在空间电荷区上的电压降。

## 二、计算题 (20分)

5、一电子具有  $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率，动量的不确定范围为动量的 0.01%，则该电子的位置不确定范围有多大？（ $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ， $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）

解：电子的动量为：

$$p = mv = 9.1 \times 10^{-31} \times 200 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.8 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

动量的不确定范围：

$$\Delta p = 0.01\% \times p = 1.0 \times 10^{-4} \times 1.8 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.8 \times 10^{-32} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

由不确定关系式，得电子位置的不确定范围：

$$\Delta x = \frac{h}{\Delta p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.8 \times 10^{-32}} \text{ m} = 3.7 \times 10^{-2} \text{ m}$$

1、一个硅肖特基势垒二极管有  $0.01 \text{ cm}^2$  的接触面积, 半导体中施主浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 设  $\varphi_0 = 0.7 \text{ V}$ ,  $V_R = 10.3 \text{ V}$ 。计算: (1) 耗尽层厚度; (2) 势垒电容; (3) 表面处的电场。  
(硅相对介电常数  $k = 11.9$ ,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ ,  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )。

解: (1) 耗尽层厚度:

$$W = \left[ \frac{2k\varepsilon_0(\varphi_0 + V_R)}{qN_d} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} (0.7 + 10.3)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ (cm)}$$

(2) 势垒电容:

$$C = \frac{dQ}{dV_R} = \left[ \frac{qk\varepsilon_0N_d}{2(\varphi_0 + V_R)} \right]^{\frac{1}{2}} A = 0.01 \times \left[ \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 10^{16}}{2(0.7 + 10.3)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ = 8.75 \times 10^{-11} \text{ (F)}$$

(3) 表面处的电场:

$$\varepsilon = -\frac{qN_dW}{k\varepsilon_0} = -\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 1.2 \times 10^{-4}}{11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}} = -1.82 \times 10^5 \text{ (V/cm)}$$

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)

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

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

$$V_{p0} = \frac{qN_d a^2}{2k\varepsilon_0} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15} \times (6.02 \times 10^{-4})^2}{2 \times 13.1 \times 8.85 \times 10^{-14}} = 0.499 \text{ V}$$

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

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

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

$$= 5.44 \times 10^{-3} \left( \frac{2}{3} \times \sqrt{\frac{0.749}{0.499}} - 1 \right) \times 0.749 + \frac{1}{3} \times 5.44 \times 10^{-3} \times 0.499$$

$$= 1.58 \times 10^{-4} \text{ A}$$