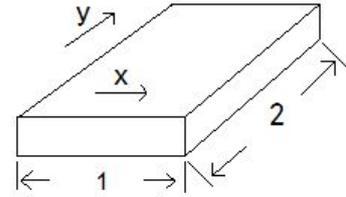


模拟题（一）参考答案

一、填空题

1. 麦克斯韦方程组是描述电磁现象的普遍规律的基本方程，其中泊松方程表明，空间任意点的电位移矢量的散度正比于该点的（ 电荷密度 ）。
2. 在对 PN 结的平衡状态进行研究时，采用了耗尽近似与中性近似。耗尽近似假设空间电荷区内的（ 自由载流子 ）已完全扩散掉，（ 电离杂质 ）构成空间电荷区内电荷的唯一来源。而在有些情况下，耗尽近似不再适用，当一个 NPN-N⁺结构的晶体管的集电极电流很大时，由于耗尽近似不再适用，将发生（ 基区扩展 ）效应。
3. 一个 P⁺N 结，当 N_D 增大时，内建电势将（ 增大 ），势垒区宽度将（ 增大 ），雪崩击穿电压将（ 减小 ），扩散电容将（ 减小 ）。
4. 正向电压下，PN 结中存在着三种电流，分别是（ 电子扩散电流 ）、（ 空穴扩散电流 ）、（ 势垒区复合电流 ）。电压较大时，以（ 扩散电流 ）为主；电流较小时，以（ 复合电流 ）为主。
5. 所谓大注入条件，是指注入某区边界附近的（ 非平衡少子 ）浓度远大于该区的（ 平衡多子 ）浓度。PN 结在发生大注入时，会形成内建电场，若某 PN⁺结发生了大注入，形成的内建电场方向是（ 由 P 型区指向 N 型区 ）。
6. 引起 PN 结反向击穿的机理主要有（ 雪崩倍增 ）、（ 隧道效应 ）和（ 热击穿 ），其中崩击穿电压和温度（ 正相关 ）。
7. 双极结型晶体管在集成电路中有着广泛的运用，模拟电路中的晶体管主要工作在（ 放大 ）区，此时发射结（ 正偏 ），集电结（ 反偏 ）。
8. 电流放大系数是双极型晶体管的重要直流参数之一，其中共基极直流短路电流放大系数 α 是发射结（ 正偏 ）、集电结（ 零偏 ）时，（ 集电极 ）电流与（ 发射极 ）电流之比。为了提高 α ，可以（ 减小 ）基区宽度，（ 增大 ）发射区掺杂浓度。
9. BJT 的反向特性中，共基极集电结雪崩击穿电压 BV_{CBO} 是指发射极（ 开路 ）时，使（ $I'_{CBO} \rightarrow \infty$ 或集电结电流趋于无穷 ）的（ 集电结 ）反向电压。一般情况下， BV_{CBO} （ > ）共发射极集电结雪崩击穿电压 BV_{CEO} 。

10. 某半导体材料如图所示，当电流沿 x 方向流动时，电阻为 1Ω ，当电流沿 y 方向流动时，电阻为（ 4 ） Ω 。



11. 在研究 BJT 的高频特性时，把 $|\beta_o|$ 下降为 1 时对应的频率称为晶体管的（ 特征频率 ），增大基区宽度将使得这一参数（ 减小 ）。
12. MOSFET 的阈值电压受诸多因素的影响，通常情况下，栅氧越薄，阈值电压的绝对值（ 越小 ），在工艺中，通常采用（ 离子注入 ）的方法来对阈值电压进行调整。
13. 理想情况下，MOSFET 在饱和区的漏源电导为（ 0 ）；但在实际情况中，由于（ 有效沟道长度调制效应 ）和（ 漏区静电场对沟道区的反馈作用 ）， g_{ds} 往往不为上述值。
14. 随着器件尺寸的缩小，MOSFET 存在一系列的短沟道效应。其中，阈电压的窄沟道效应是指阈值电压 V_T 随沟道宽度的减小而（ 增大 ），采用（ 自对准 ）工艺能有效缓解该问题。
15. 热电子效应对器件的性能有着重要影响，一个 NMOS 发生了热电子效应时，阈值电压将（ 变大 ），跨导将（ 减小 ）。

二、简单与作图

- 1、写出 P⁺N 结反向饱和电流密度 J_0 的表达式，并对影响 J_0 的几个主要因素进行简要讨论。

答：
$$J_0 \approx \frac{qn_i^2 D_p}{L_p N_D}$$

影响因素：①掺杂浓度，该 P⁺N 结中，N 型区的掺杂浓度 N_D 越高， J_0 越小；

②禁带宽度，禁带宽度越窄， n_i 就越大， J_0 也越大；

③温度， n_i 受温度的影响很大，当温度升高时， n_i 将增大， J_0 随之增大。

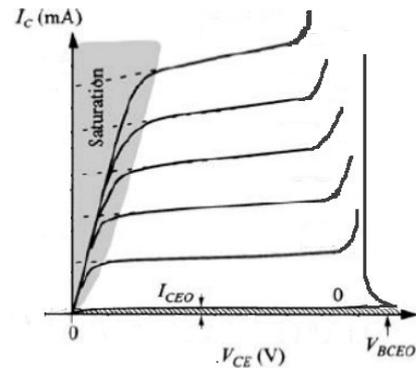
- 2、双极结型晶体管在结构上与两个背靠背的 PN 结类似，那么在实际应用中，能否用两个 PN 结二极管代替晶体管？简要说明原因。

答：不能。

双极结型晶体管的基本工作原理是通过改变正偏 PN 结的偏压来控制其附近反偏 PN 结的电流，即这两个 PN 结之间存在耦合作用。要使这种耦合作用存在，两个 PN 结必须靠得很近，以保证载流子从正偏 PN 结到达反偏 PN 结之前不会大量被复合掉，所以晶体管的基区一般都很薄。而把两个 PN 结二极管串在一起使用时，这种耦合作用显然已经不存在了。（言之有理即可）

3、试画出包括击穿特性在内的共发射极输出特性曲线，并对曲线作简单叙述。

答：输出特性如有图所示（教材图 3-31 也行，饱和区和截止区可以不用标出）。

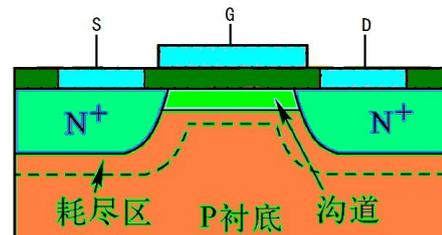


击穿电压随着电流的减小而增大，基极电流为 0 时，会有一段负阻。出现负阻区是由于这种雪崩击穿的条件是 $\alpha M = 1$ ，当基极开路时，集电极电流只有 I_{CEO} ，这个电流是很小的，所以刚开始击穿时的 α 很小，满足击穿条件所对应的 M 就较大，因此击穿电压较高。随着电流的增加， α 上升到正常值，为维持击穿条件所需要的 M 值就随之下降到正常值，击穿电压下降到维持电压。（击穿电压随着电流的减小而增大，与耗尽近似的不适用有关，超出了目前的范畴，就不管它了）

由于发生了厄尔利效应，集电极电流会随着 V_{CE} 的增大而增大。（如果是画的书上那个图，就不解释这一点了）

4、画出一个 N 型 MOSFET 的基本结构示意图，并简要描述 MOSFET 的工作原理。

答：MOSFET 的基本结构如图所示（教材图 4-1 好些，这个是从 PPT 里面抠下来的）



工作原理：当在栅极上加上适当的电压时会在栅下产生一个电场，当栅压达到被称为阈值电压 V_T 的值时，由于电场的作用，栅下面的 P 型半导体表面将发生强反型，形成一个连通源区与漏区的 N 型沟道。这时沟道内有大量可动电子，所以当漏极和源极之间加上电压时，就能够产生漏极电流。通过改变栅源电压 V_{GS} 的大小，可以控制沟道内可动电子的数量，从而控制漏极电流。

5、什么是 MOSFET 的衬底偏置效应？并对其原理进行解释。

答：当 MOSFET 的源和衬底之间存在电位差时，阈值电压会随着 V_{BS} 的变化而变化，这种现象称为衬偏效应。其变化规律是， $|V_{BS}|$ 越大， $|V_T|$ 越大。

V_T 随 V_{BS} 变化的原因：以 NMOS 为例，外加衬底偏压将使沟道下面的耗尽区宽度增大。根据电中性条件，金属一侧电荷 Q_M 、栅氧化层电荷 Q_{OX} 、沟道电子电荷 Q_n 和沟道电离杂质电荷 Q_A 之间存在着如下关系： $Q_M + Q_{OX} + Q_n + Q_A = 0$ 。当 V_{GS} 一定时， Q_M 和 Q_{OX} 为常数。外加衬底偏压后，耗尽区宽度及耗尽区内的 $|Q_A|$ 都将增大，这将导致 $|Q_n|$ 的减小。为了得到同样多的 $|Q_n|$ ，就要提高栅压，这就意味着阈值电压的提高。

三、计算题

1、某硅突变 PN 结，掺杂浓度 $N_A = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ， $N_D = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。电子和空穴的扩散系数为 $D_n = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，电子和空穴的寿命均为 $1 \mu\text{s}$ 。室温下，计算：

- (1) 外加 0.5V 反向电压时的电流密度；
- (2) 外加 0.7V 正向电压时的电流密度。

解：(1) $L_p = (D_p \tau_p)^{\frac{1}{2}} = 3.16 \times 10^{-3} \text{ cm}$ ， $L_n = (D_n \tau_n)^{\frac{1}{2}} = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}$

反向饱和电流密度 $J_0 \approx q n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} = 7.59 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$

0.5V 远大于 $\frac{kT}{q}$ ，所以外加 0.5V 方向电压时的电流密度约为 $-7.59 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ 。

- (2) 由大注入条件的转折电压公式可知

$$V_{KP} = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{\sqrt{2} N_A}{n_i} \right) = 0.856 \text{ V}, \quad V_{KN} = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{\sqrt{2} N_D}{n_i} \right) = 0.617 \text{ V}$$

$V_{KN} < 0.7 \text{ V}$ ，所以在 0.7V 的正向电压下，N 型区将发生大注入效应。

空穴扩散电流密度 $J_p = \frac{\sqrt{2} q D_p n_i}{L_p} \exp \left(\frac{qV}{2kT} \right) = 7.54 \text{ A/cm}^2$ ，

电子扩散电流密度 $J_n = q n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] = 0.59 \text{ A/cm}^2$

总电流密度 $J = J_p + J_n = 8.13 \text{ A/cm}^2$ 。

2、某 NPN 硅晶体管发射区、基区和集电区的杂质浓度分别为 $N_E = 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、

$N_B = 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $N_C = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，基区宽度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。若雪崩击穿临界电场 $E_C = 3 \times 10^5 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，求使发射极偏置对集电极电流失去控制的基极-集电极电压上限。

解：由基区内的泊松方程 $\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon_s} N_B$ 可知，若集电结发生雪崩击穿，则击穿时位于基区一侧的耗尽区宽度为 $0.625 \mu\text{m}$ ，这个宽度大于基区宽度，所以不会发生雪崩击穿，而是先发生穿通击穿。

忽略发射结对基区宽度的影响，可知穿通电压 V_{pt} 应满足

忽略发射结对基区宽度的影响，可知穿通电压 V_{pt} 应满足

$$\left[\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_B + N_C}{N_B N_C} \right) (V_{bi} + V_{pt}) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{N_C}{N_B + N_C} = W_B$$

计算得 $V_{pt} \approx 30.8 \text{V}$

所以基极-集电极电压上限为 30.8V 。

3、为了得到某长沟道 N 型 MOSFET 的电学参数，进行了一组测试。测试过程中将栅漏短接，源和衬底接地，测得几组漏极电流和电压的数据如表所示。试计算：

(1) 该 MOSFET 的阈值电压和增益因子；

(2) $V_{GS} = V_{DS} = 1 \text{V}$ 时的跨导。

V_{GS} / V_{DS} (V)	I_D (A)
0	0
0.5	0.55
1	1.60
1.5	3.15

解：(1) 若该测试条件下，MOS 管工作在饱和区，由饱和区漏极电流公式 $I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2$ 及前两组数据，易得 $V_T = 0$ ， $\beta = 4.4 \text{A/V}$ ，但后面两组数据将不再满足饱和漏极电流公式。所以该测试条件下 MOS 管工作在非饱和区。

由方程组
$$\begin{cases} I_{D1} = \beta \left[(V_{GS1} - V_T) V_{DS1} - \frac{1}{2} V_{DS1}^2 \right] \\ I_{D2} = \beta \left[(V_{GS2} - V_T) V_{DS2} - \frac{1}{2} V_{DS2}^2 \right] \end{cases},$$

带入第 2、3 组数据可得 $V_T = -0.3 \text{ V}$, $\beta = 2 \text{ A/V}^2$

(2) $V_{GS} = V_{DS} = 1 \text{ V}$ 时, 器件工作在非饱和区。由非饱和区的跨导公式可得

$$g_m = \beta V_{DS} = 2 \text{ S}$$