

习题课-2025-spring

计算所需的物理常数:

电子电荷 $q=1.6\times 10^{-19}\text{C}$, 玻尔兹曼常数 $k=8.629\times 10^{-5}\text{eV/K}$, 硅的本征载流子浓度 $n_i=10^{10}\text{cm}^{-3}$, 硅的禁带宽度 $E_g=1.12\text{eV}$, 真空介电常数 $\epsilon_0=8.854\times 10^{-14}\text{F/cm}$, 二氧化硅的相对介电常数为 $K_{\text{ox}}=3.9$, 硅的相对介电常数为 $K_{\text{Si}}=11.9$ 。

除非特别说明, 否则所有的计算均为室温 $T=300\text{K}$ 。

一、名词解释 (20 分, 2 分/题 $\times 10$ 题)

- 1、 突变结
- 2、 准中性区近似
- 3、 小注入条件
- 4、 PN 结低频扩散电导
- 5、 共基极直流电流增益
- 6、 基区扩展效应 (Kirk 效应)
- 7、 BJT 正向有源工作模式
- 8、 MOS 电容的阈值电压
- 9、 沟道长度调制效应
- 10、 亚阈值电流

二、简答 (40 分, 2 分/题 $\times 20$ 题)

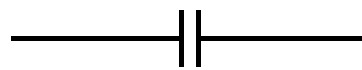
- 1、 若一个 PN 突变结中 $N_A > N_D$, 则与 x_n 相比, x_p 是更大、更小、还是相等?
- 2、 当 PN 结的外加偏压为正且增大时, 其空间电荷区内电场最大值 E_{max} 所在的空间位置是否会发生变化? E_{max} 的绝对值如何变化, 是增大、减小、还是不变?
- 3、 为什么 PN 结在外加正向偏压时可以导通很大的电流?
- 4、 考虑一个外加反向偏压的 PN 结, 在其空间电荷区附近的准中性区内, 载流子发生了哪种动态过程组合: 复合+漂移、复合+扩散、产生+漂移、产生+扩散?
- 5、 考虑一个外加较大正向偏压的 PN 结, 实际测量观察到的电流比理想值是更大、更小、还是相等? 为什么?
- 6、 某同学宣称: 对于任意一个 PN 结, 只要其外加反向偏压足够大, 就能够发生雪崩击穿现象。请问该同学的观点是否正确? 为什么?
- 7、 观察一个 PN 结在 $t=0$ 时刻从正向偏置条件切换为反向偏置条件后的关断过程, 发现 PN 结中流过的反向电流存在明显的延迟。请画出 $t \geq 0$ 时刻该器件中流过电流的 $I-t$ 曲线示意图, 并解释存在明显延迟的原因。
- 8、 请写出 BJT 共发射极直流电流增益 β_{DC} 表达式, 用发射效率 γ 和基区输运系数 α_T 表示。
- 9、 采用多晶硅发射极技术可以在减小发射区宽度 W_E 的同时提升 BJT 发射结的发射效率 γ , 因此某同学宣称: BJT 发射区可以全部由多晶硅构成, 其发射结的发射效率在浅发射区情况下也可以得到保障。请问该观点是否正确? 为什么?
- 10、 通常 BJT 的基区宽度 W_B 要尽可能地小以获得更好的性能。请写出一个当基区宽度减小后得到了提升的 BJT 性能指标, 并阐明其提升的原因。

- 11、考虑一个 NPN BJT 器件，其基区穿通击穿电压比基极开路雪崩击穿电压还要低，即基区穿通击穿先于基极开路雪崩击穿发生。请问这个现象可能发生吗？请解释你的观点。
- 12、抑制 BJT 的 Early 效应与提升 BJT 的基区穿通击穿电压是否可以兼得？请解释你的回答。
- 13、为了抑制发射结电流集边效应，可以将发射区的形状设计为窄长条样式。因此某同学宣称：在保持发射区宽度不变的情况下，可以无限制地增加发射区的长度。请问该观点是否正确？为什么？
- 14、MOSFET 器件的沟道中每个位置处的阈值电压都一样。请问该观点是否正确？为什么？
- 15、请简述 MOSFET 器件的沟道夹断现象及其对饱和区漏电导 g_{ds} 的影响。
- 16、如何判断一个 MOSFET 器件是否存在漏致势垒降低效应（DIBL 效应）？
- 17、通常体效应是不希望有的，因此一般情况下都有 $V_{BS}=0V$ ，但也可以利用体效应调整 MOSFET 器件的阈值电压。从 NMOSFET 正常工作的角度来说，能否利用体效应使 NMOSFET 的阈值电压减小？为什么？
- 18、采用平方率模型分析一个理想的长沟道 NMOSFET 器件，请写出线性区和饱和区栅跨导 g_m 的表达式。
- 19、缩小 MOSFET 器件的沟道长度 L 可以提升器件的多个性能指标。请写出一个在 L 减小时可以得到提升的性能指标参数，并解释其提升的原因。
- 20、当 MOSFET 栅氧化层厚度减小至 $2\sim 3nm$ 时，通常采用高 K 介质材料替代 SiO_2 作为栅介质层，为什么？

三、分析与计算（40 分，8 分/题×5 题）

- 1、考虑一个室温下的 P^+N 突变结长二极管，其低频交流小信号等效电路如图 1 所示。回答以下问题：
 - （1）该 P^+N 突变结是处于正向偏置条件还是反向偏置条件？为什么？
 - （2）请根据图 1 中给出的信息，计算外加偏压 V_A 的数值。
 - （3）在该外加偏压条件下，比理想情况相比，该 P^+N 突变结器件的实际电流绝对值是更大、更小、还是相等？为什么？

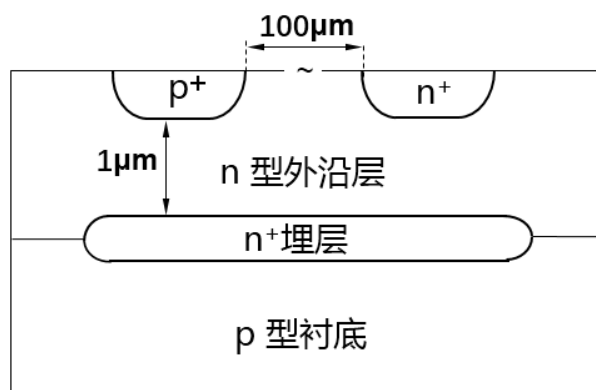
$$A_E=10\mu m^2, N_D=10^{16}cm^{-3}$$



$$C_J=0.5fF$$

图 1

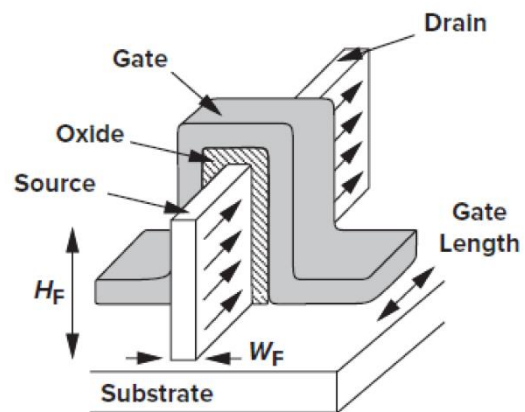
- 2、考虑一个室温下集成电路中的 PN 突变结，其器件结构剖面如图 2 所示。回答以下问题：
 - （1）对于由 P^+ 区垂直流向 N^+ 埋层的空穴电流，采用长二极管近似分析更好还是采用短二极管近似分析更好？为什么？
 - （2）对于由 P^+ 区水平流向 N^+ 区的空穴电流，采用长二极管近似分析更好还是采用短二极管近似分析更好？为什么？
 - （3）若该 PN 突变结的外加偏压 $V_A=0.7V$ ，求出由 P^+ 区水平流向 N^+ 区的空穴电流密度 $J_{p-水平}$ 。



N型外延层的参数如下
 $\tau_p=1\mu s, D_p=12cm^2/s, N_D=5\times 10^{15}cm^{-3}$

图 2

- 3、 考虑一个理想的（不考虑任何非理想效应）、工作在正向放大模式条件的 NPN BJT 器件，回答以下问题：
 - （1）画出该 NPN BJT 器件在共发射极条件下的低频交流小信号等效电路图，并标注出其中所有元件的名称或者符号。
 - （2）写出共发射极条件下低频交流小信号等效电路的输入电阻和跨导的表达式。
 - （3）若计入 Early 效应，则应当在该低频交流小信号等效电路图中的输出端（CE 端）增加什么元件？
- 4、 考虑一个室温下长沟道 NMOSFET，采用 N^+ 多晶硅作为栅电极，栅氧化层厚度 $t_{ox}=5nm$ ，栅氧化层电荷 $Q_{ox}=0C/cm^2$ ， $\mu_n C_{ox}=10\mu A/V^2$ ，衬底 p-Si 掺杂浓度 $N_A=10^{18}cm^{-3}$ 。采用平方率模型。
 - （1）计算该 NMOSFET 器件的平带电压 V_{FB} 。
 - （2）计算该 NMOSFET 器件的阈值电压 V_T 。
 - （3）当 $V_{GS}=3V$ 、 $V_{DS}=1.5V$ 时，该器件工作在哪个区域？
 - （4）若要求该 NMOSFET 器件在饱和区工作且 $V_{GS}=3V$ 时能够驱动 $1mA$ 沟道电流，请问其沟道宽长比 W/L 应当设计为多少？
- 5、 鳍式晶体管（FinFET）相比传统 MOSFET 的器件结构有很大改变，大幅提升了器件性能的同时又很好地抑制了小尺寸效应，使摩尔定律可以继续发展至 $3nm$ 技术节点。如图 3 所示为 FinFET 的三维结构示意图，请根据图 3 回答以下问题：
 - （1）请分析 FinFET 与传统 MOSFET 在器件结构方面的差异。
 - （2）为什么 FinFET 很好地抑制了传统 MOSFET 的次表面穿通现象？
 - （3）对于如图 3 所示的 FinFET 器件，请写出单个鳍的沟道宽度表达式。



H_F : Fin的高度, W_F : Fin的厚度

图 3