

## 第二章 PN 结

### 填空题

- 1、若某突变 PN 结的 P 型区的掺杂浓度为  $N_A=1.5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，则室温下该区的平衡多子浓度  $p_{p0}$  与平衡少子浓度  $n_{p0}$  分别为（ ）和（ ）。
- 2、在 PN 结的空间电荷区中，P 区一侧带（ ）电荷，N 区一侧带（ ）电荷。内建电场的方向是从（ ）区指向（ ）区。
- 3、当采用耗尽近似时，N 型耗尽区中的泊松方程为（ ）。由此方程可以看出，掺杂浓度越高，则内建电场的斜率越（ ）。
- 4、PN 结的掺杂浓度越高，则势垒区的长度就越（ ），内建电场的最大值就越（ ），内建电势  $V_{bi}$  就越（ ），反向饱和电流  $I_0$  就越（ ），势垒电容  $C_T$  就越（ ），雪崩击穿电压就越（ ）。
- 5、硅突变结内建电势  $V_{bi}$  可表为（ ），在室温下的典型值为（ ）伏特。
- 6、当对 PN 结外加正向电压时，其势垒区宽度会（ ），势垒区的势垒高度会（ ）。
- 7、当对 PN 结外加反向电压时，其势垒区宽度会（ ），势垒区的势垒高度会（ ）。
- 8、在 P 型中性区与耗尽区的边界上，少子浓度  $n_p$  与外加电压  $V$  之间的关系可表示为（ ）。若 P 型区的掺杂浓度  $N_A=1.5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ，外加电压  $V=0.52\text{V}$ ，则 P 型区与耗尽区边界上的少子浓度  $n_p$  为（ ）。
- 9、当对 PN 结外加正向电压时，中性区与耗尽区边界上的少子浓度比该处的平衡少子浓度（ ）；当对 PN 结外加反向电压时，中性区与耗尽区边界上的少子浓度比该处的平衡少子浓度（ ）。
- 10、PN 结的正向电流由（ ）电流、（ ）电流和（ ）电流三部分所组成。
- 11、PN 结的正向电流很大，是因为正向电流的电荷来源是（ ）；PN 结的反向电流很小，是因为反向电流的电荷来源是（ ）。
- 12、当对 PN 结外加正向电压时，由 N 区注入 P 区的非平衡电子一边向前扩散，一边（ ）。每经过一个扩散长度的距离，非平衡电子浓度降到原来的（ ）。
- 13、PN 结扩散电流的表达式为（ ）。这个表达式在正向电压下可简化为（ ），在反向电压下可简化为（ ）。
- 14、在 PN 结的正向电流中，当电压较低时，以（ ）电流为主；当电压较高时，以（ ）电流为主。
- 15、薄基区二极管是指 PN 结的某一个或两个中性区的长度小于（ ）。在薄基区二极管中，少子浓度的分布近似为（ ）。
- 16、小注入条件是指注入某区边界附近的（ ）浓度远小于该区的（ ）浓度，因此该区总的多子浓度中的（ ）多子浓度可以忽略。
- 17、大注入条件是指注入某区边界附近的（ ）浓度远大于该区的（ ）浓度，因此该区总的多子浓度中的（ ）多子浓度可以忽略。
- 18、势垒电容反映的是 PN 结的（ ）电荷随外加电压的变化率。PN 结的掺杂浓度越高，则势垒电容就越（ ）；外加反向电压越高，则势垒电容就越（ ）。
- 19、扩散电容反映的是 PN 结的（ ）电荷随外加电压的变化率。正向电流越大，则扩散电容就越（ ）；少子寿命越长，则扩散电容就越（ ）。
- 20、在 PN 结开关管中，在外加电压从正向变为反向后的一段时间内，会出现一个较大



的反向电流。引起这个电流的原因是存储在( )区中的( )电荷。这个电荷的消失途径有两条,即( )和( )。

21、从器件本身的角度,提高开关管的开关速度的主要措施是( )和( )。

22、PN结的击穿有三种机理,它们分别是( )、( )和( )。

23、PN结的掺杂浓度越高,雪崩击穿电压就越( );结深越浅,雪崩击穿电压就越( )。

24、雪崩击穿和齐纳击穿的条件分别是( )和( )。

问答与计算题

1、简要叙述PN结空间电荷区的形成过程。

2、什么叫耗尽近似?什么叫中性近似?

3、什么叫突变结?什么叫单边突变结?什么叫线性缓变结?分别画出上述各种PN结的杂质浓度分布图、内建电场分布图和外加正向电压及反向电压时的少数载流子浓度分布图。

4、PN结势垒区的宽度与哪些因素有关?

5、写出PN结反向饱和电流 $I_0$ 的表达式,并对影响 $I_0$ 的各种因素进行讨论。

6、PN结的正向电流由正向扩散电流和势垒区复合电流组成。试分别说明这两种电流随外加正向电压的增加而变化的规律。当正向电压较小时以什么电流为主?当正向电压较大时以什么电流为主?

7、什么是小注入条件?什么是大注入条件?写出小注入条件和大注入条件下的结定律,并讨论两种情况下中性区边界上载流子浓度随外加电压的变化规律。

8、在工程实际中,一般采用什么方法来计算PN结的雪崩击穿电压?

9、简要叙述PN结势垒电容和扩散电容的形成机理及特点。

10、当把PN结作为开关使用时,在直流特性和瞬态特性这两方面,PN结与理想开关相比有哪些差距?引起PN结反向恢复过程的主要原因是什么?

11、某突变PN结的 $N_D=1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_A=1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,试求 $n_{n0}$ ,  $p_{n0}$ ,  $p_{p0}$ 和 $n_{p0}$ 的值,并求当外加0.5V正向电压和(-0.5V)反向电压时的 $n_p(-x_p)$ 和 $p_n(x_n)$ 的值。

12、某突变PN结的 $N_D=1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_A=1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,计算该PN结的内建电势 $V_{bi}$ 之值。

13、有一个P沟道MOSFET的衬底掺杂浓度为 $N_D=1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,另一个N沟道MOSFET的衬底掺杂浓度为 $N_A=1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。试分别求这两个MOSFET的衬底费米势,并将这两个衬底费米势之和与上题的 $V_{bi}$ 相比较。

14、某突变PN结的 $N_D=1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_A=1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,试问 $J_{dp}$ 是 $J_{dn}$ 的多少倍?

15、已知某PN结的反向饱和电流为 $I_0=10^{-12} \text{A}$ ,试分别求当外加0.5V正向电压和(-0.5V)反向电压时的PN结扩散电流。

16、已知某PN结的反向饱和电流为 $I_0=10^{-11} \text{A}$ ,若以当正向电流达到 $10^{-2} \text{A}$ 作为正向导通的开始,试求正向导通电压 $V_F$ 之值。若此PN结存在寄生串联电阻 $R_{cs}=4\Omega$ ,则在同样的测试条件下 $V_F$ 将变为多少?

17、某硅单边突变结的雪崩击穿临界电场 $E_C=3.5 \times 10^5 \text{Vcm}^{-1}$ ,开始发生雪崩击穿时的耗尽区宽度 $x_{dB}=8.57\mu\text{m}$ ,求该PN结的雪崩击穿电压 $V_B$ 。若对该PN结外加 $|V|=0.25V_B$ 的反向电压,则其耗尽区宽度为多少?

18、如果设单边突变结的雪崩击穿临界电场 $e_C$ 与杂质浓度无关,则为了使雪崩击穿电压 $V_B$ 提高1倍,发生雪崩击穿时的耗尽区宽度 $x_{dB}$ 应为原来的多少倍?低掺杂区的杂质浓度应为原来的多少倍?

19、某突变 PN 结的  $V_{bi} = 0.7V$ ，当外加  $-4.3V$  的反向电压时测得其势垒电容为  $8pF$ ，则当外加  $-19.3V$  的反向电压时其势垒电容应为多少？

20、某突变结的内建电势  $V_{bi} = 0.7V$ ，当外加电压  $V = 0.3V$  时的势垒电容与扩散电容分别是  $2pF$  和  $2 \times 10^{-4} pF$ ，试求当外加电压  $V = 0.6V$  时的势垒电容与扩散电容分别是多少？

21、某硅突变结的  $n_A = 1 \times 10^{16} cm^{-3}$ ， $n_D = 5 \times 10^{16} cm^{-3}$ ，试计算平衡状态下的

(1) 内建电势  $V_{bi}$ ；

(2) P 区耗尽区宽度  $x_p$ 、N 区耗尽区宽度  $x_n$  及总的耗尽区宽度  $x_D$ ；

(3) 最大电场强度  $\epsilon_{max}$ 。

22、某单边突变结在平衡状态时的势垒区宽度为  $x_{D0}$ ，试求外加反向电压应为内建电势  $V_{bi}$  的多少倍时，才能使势垒区宽度分别达到  $2x_{D0}$  和  $3x_{D0}$ 。

23、一块同一导电类型的半导体，当掺杂浓度不均匀时，也会存在内建电场和内建电势。设一块 N 型硅的两个相邻区域的施主杂质浓度分别为  $n_{D1}$  和  $n_{D2}$ ，试推导出这两个区域之间的内建电势公式。如果  $n_{D1} = 1 \times 10^{20} cm^{-3}$ ， $n_{D2} = 1 \times 10^{16} cm^{-3}$ ，则室温下内建电势为多少？

24、试推导出杂质浓度为指数分布  $N = N_0 \exp(-x/l)$  的中性区的内建电场表达式。若某具有这种杂质浓度分布的硅的表面杂质浓度为  $10^{18} cm^{-3}$ ， $\lambda = 0.4 \mu m$ ，试求其内建电场的大小。再将此电场与某突变 PN 结的耗尽区中最大电场作比较，该突变 PN 结的  $n_A = 10^{18} cm^{-3}$ ， $n_D = 10^{15} cm^{-3}$ 。

25、图 P2-1 所示为硅 PIN 结的杂质浓度分布图，符号 I 代表本征区。

(1) 试推导出该 PIN 结的内建电场表达式和各耗尽区长度的表达式，并画出内建电场分布图。

(2) 将此 PIN 结的最大电场与不包含 I 区的 PN 结的最大电场进行比较。设后者的 P 区与 N 区的掺杂浓度分别与前者的 P 区与 N 区的相同。

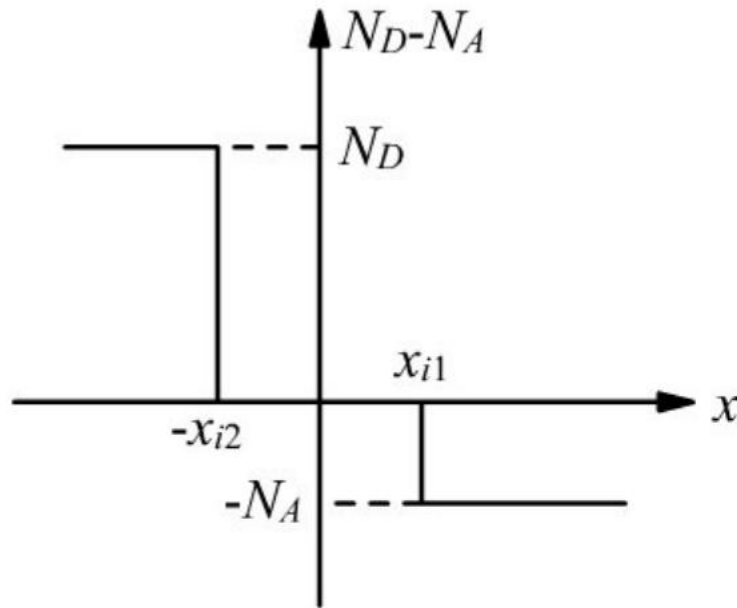


图 P2-1



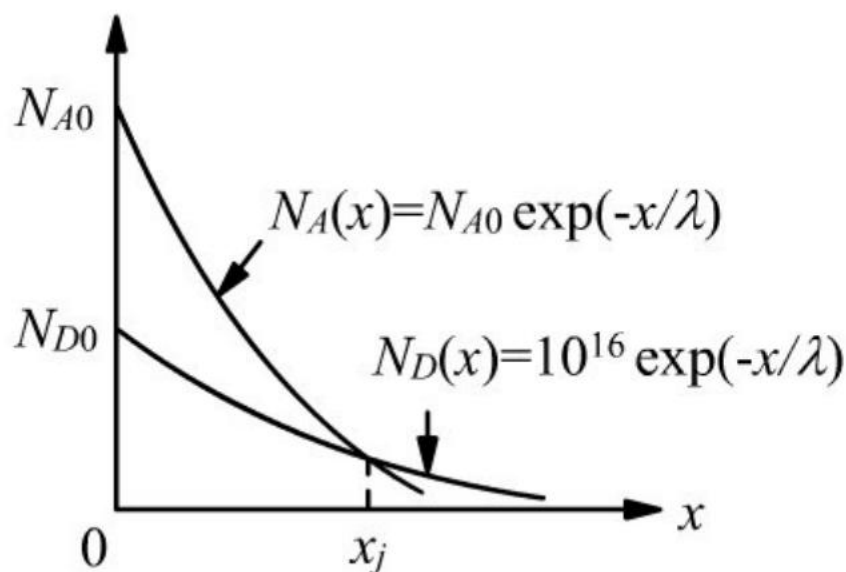


图 P2-2

26、某硅中的杂质浓度分布如图 P2-2所示，施主杂质和受主杂质的浓度分别为  $N_D(x)=10^{16}\exp(-x/2\times 10^{-4})\text{cm}^{-3}$  和  $N_A(x)=N_A(0)\exp(-x/10^{-4})\text{cm}^{-3}$

(1) 如果要使结深  $x_j=1\mu\text{m}$ ，则受主杂质的表面浓度  $n_A(0)$  应为多少？

(2) 试计算结深处的杂质浓度梯度  $A$  的值。

(3) 若将此 PN 结近似为线性缓变结，设  $V_{bi}=0.7\text{V}$ ，试计算平衡时的耗尽区最大电场  $\epsilon_{\max}$ ，并画出内建电场分布图。

27、试证明在一个 P 区电导率  $\sigma_p$  远大于 N 区电导率  $\sigma_n$  的 PN 结中，当外加正向电压时空穴电流远大于电子电流。

28、已知  $n_1^2 = N_C N_V \exp(-e_G/kT) = CkT^3 \exp(-e_{G0}/kT)$ ，式中  $n_C$ 、 $n_V$  分别代表导带底、价带顶的有效状态密度， $e_{G0}$  代表绝对零度下的禁带宽度。低温时反向饱和电流以势垒区产生电流为主。试求反向饱和电流  $I_0$  与温度的关系，并求  $I_0$  随温度的相对变化率  $(dI_0/dT)/I_0$ ，同时画出电压一定时的  $I_0 \sim T$  曲线。

29、某  $P^+N$  结的雪崩击穿临界电场  $\epsilon_c$  为  $32\text{V}/\mu\text{m}$ ，当 N 区的长度足够长时，击穿电压  $V_B$  为  $144\text{V}$ 。试求当 N 区的长度缩短为  $3\mu\text{m}$  时的击穿电压为多少？

30、已知某硅单边突变结的内建电势为  $0.6\text{V}$ ，当外加反向电压为  $3.0\text{V}$  时测得势垒电容为  $10\text{pF}$ ，试计算当外加  $0.2\text{V}$  正向电压时的势垒电容。

31、某结面积为  $10^{-5}\text{cm}^2$  的硅单边突变结，当  $(V_{bi}-V)$  为  $1.0\text{V}$  时测得其结电容为  $1.3\text{pF}$ ，试计算该 PN 结低掺杂一侧的杂质浓度为多少？

32、某 PN 结当正向电流为  $10\text{mA}$  时，室温下的小信号电导与小信号电阻各为多少？当温度为  $100^\circ\text{C}$  时它们的值又为多少？

33、某单边突变  $P^+N$  结的 N 区杂质浓度  $n_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，N 区少数扩散长度  $L_p=10\mu\text{m}$ ，结面积  $A=0.01\text{cm}^2$ ，外加  $0.6\text{V}$  的正向电压。试计算当 N 区厚度分别为  $100\mu\text{m}$  和  $3\mu\text{m}$  时存储在 N 区中的非平衡少子的数目。

填空题

1、晶体管的基区输运系数是指（ ）电流与（ ）电流之比。由于少子在渡越基区的过程中会发生（ ），从而使基区输运系数（ ）。为了提高基区输运系数，应当使基区宽度（ ）基区少子扩散长度。

2、晶体管中的少子在渡越（ ）的过程中会发生（ ），从而使到达集电结的少子比从发射结注入基区的少子（ ）。

3、晶体管的注入效率是指（ ）电流与（ ）电流之比。为了提高注入效率，应当使（ ）区掺杂浓度远大于（ ）区掺杂浓度。

4、晶体管的共基极直流短路电流放大系数  $\alpha$  是指发射结（ ）偏、集电结（ ）偏时的（ ）电流与（ ）电流之比。

5、晶体管的共发射极直流短路电流放大系数  $\beta$  是指（ ）结正偏、（ ）结零偏时的（ ）电流与（ ）电流之比。

6、在设计与制造晶体管时，为提高晶体管的电流放大系数，应当（ ）基区宽度，（ ）基区掺杂浓度。

7、某长方形薄层材料的方块电阻为  $100\Omega$ ，长度和宽度分别为  $300\mu\text{m}$  和  $60\mu\text{m}$ ，则其长度方向和宽度方向上的电阻分别为（ ）和（ ）。若要获得  $1\text{k}\Omega$  的电阻，则该材料的长度应改变为（ ）。

8、在缓变基区晶体管的基区中会产生一个（ ），它对少子在基区中的运动起到（ ）的作用，使少子的基区渡越时间（ ）。

9、小电流时  $\alpha$  会（ ）。这是由于小电流时，发射极电流中（ ）的比例增大，使注入效率下降。

10、发射区重掺杂效应是指当发射区掺杂浓度太高时，不但不能提高（ ），反而会使（ ）。造成发射区重掺杂效应的原因是（ ）和（ ）。

11、在异质结双极晶体管中，发射区的禁带宽度（ ）于基区的禁带宽度，从而使异质结双极晶体管的（ ）大于同质结双极晶体管的。

12、当晶体管处于放大区时，理想情况下集电极电流随集电结反偏的增加而（ ）。但实际情况下集电极电流随集电结反偏增加而（ ），这称为（ ）效应。

13、当集电结反偏增加时，集电结耗尽区宽度会（ ），使基区宽度（ ），从而使集电极电流（ ），这就是基区宽度调变效应（即厄尔利效应）。

14、 $I_{ES}$  是指（ ）结短路、（ ）结反偏时的（ ）极电流。

15、 $I_{CS}$  是指（ ）结短路、（ ）结反偏时的（ ）极电流。

16、 $I_{CBO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏时的（ ）极电流。

17、 $I_{CEO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏时的（ ）极电流。

18、 $I_{EBO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏时的（ ）极电流。

19、 $BV_{CBO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏，当（ ） $\rightarrow\infty$  时的  $V_{CB}$ 。

20、 $BV_{CEO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏，当（ ） $\rightarrow\infty$  时的  $V_{CE}$ 。

21、 $BV_{EBO}$  是指（ ）极开路、（ ）结反偏，当（ ） $\rightarrow\infty$  时的  $V_{EB}$ 。

22、基区穿通是指当集电结反向电压增加到使耗尽区将（ ）全部占据时，集电极电流急剧增大的现象。防止基区穿通的措施是（ ）基区宽度、（ ）基区掺杂浓度。

23、比较各击穿电压的大小时可知， $BV_{CBO}$ （ ） $BV_{CEO}$ ， $BV_{CBO}$ （ ） $BV_{EBO}$ 。

24、要降低基极电阻  $r_{bb'}$ ，应当（ ）基区掺杂浓度，（ ）基区宽度。



- 25、无源基区重掺杂的目的是（ ）。
- 26、发射极增量电阻  $r_e$  的表达式是（ ）。室温下当发射极电流为  $1\text{mA}$  时,  $r_e =$ （ ）。
- 27、随着信号频率的提高, 晶体管的  $\alpha_{\omega}, \beta_{\omega}$  的幅度会（ ），相角会（ ）。
- 28、在高频下, 基区渡越时间  $\tau_b$  对晶体管有三个作用, 它们是:（ ）、（ ）和（ ）。
- 29、基区渡越时间  $\tau_b$  是指（ ）。当基区宽度加倍时, 基区渡越时间增大到原来的（ ）倍。
- 30、晶体管的共基极电流放大系数  $|\alpha_{\omega}|$  随频率的（ ）而下降。当晶体管的  $|\alpha_{\omega}|$  下降到（ ）时的频率, 称为  $\alpha$  的截止频率, 记为（ ）。
- 31、晶体管的共发射极电流放大系数  $|\beta_{\omega}|$  随频率的（ ）而下降。当晶体管的  $|\beta_{\omega}|$  下降到  $\frac{1}{\sqrt{2}} \beta_0$  时的频率, 称为  $\beta$  的（ ），记为（ ）。
- 32、当  $f \gg f_{\beta}$  时, 频率每加倍, 晶体管的  $|\beta_{\omega}|$  降到原来的（ ）；最大功率增益  $K_{p\max}$  降到原来的（ ）。
- 33、当（ ）降到1时的频率称为特征频率  $f_T$ 。当（ ）降到1时的频率称为最高振荡频率  $f_M$ 。
- 34、当  $|\beta_{\omega}|$  降到（ ）时的频率称为特征频率  $f_T$ 。当  $K_{p\max}$  降到（ ）时的频率称为最高振荡频率  $f_M$ 。
- 35、晶体管的高频优值  $M$  是（ ）与（ ）的乘积。
- 36、晶体管在高频小信号应用时与直流应用时相比, 要多考虑三个电容的作用, 它们是（ ）电容、（ ）电容和（ ）电容。
- 37、对于频率不是特别高的一般高频管,  $\tau_{cc}$  中以（ ）为主, 这时提高特征频率  $f_T$  的主要措施是（ ）。
- 38、为了提高晶体管的最高振荡频率  $f_M$ , 应当使特征频率  $f_T$ （ ），基极电阻  $r_{bb'}$ （ ），集电结势垒电容  $C_{TC}$ （ ）。
- 39、对高频晶体管结构上的基本要求是:（ ）、（ ）、（ ）和（ ）。

#### 问答与计算题

- 画出 NPN 晶体管在饱和状态、截止状态、放大状态和倒向放大状态时的少数分布图。画出 NPN 晶体管在饱和状态、截止状态、放大状态和倒向放大状态时的能带图。
- 画出共基极放大区晶体管中各种电流的分布图, 并说明当输入电流  $I_e$  经过晶体管变成输出电流  $I_c$  时, 发生了哪两种亏损?
- 倒向晶体管的电流放大系数为什么小于正向晶体管的电流放大系数?
- 提高基区掺杂浓度会对晶体管的各种特性, 如  $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $C_{TE}$ 、 $BV_{EBO}$ 、 $V_{pt}$ 、 $V_A$ 、 $r_{bb'}$  等产生什么影响?
- 减薄基区宽度会对晶体管的上述各种特性产生什么影响?
- 先画出双极晶体管的理想的共发射极输出特性曲线图, 并在图中标出饱和区与放大区的分界线, 然后再分别画出包括厄利效应和击穿现象的共发射极输出特性曲线图。
- 画出包括基极电阻在内的双极型晶体管的简化的交流小信号等效电路。
- 什么是双极晶体管的特征频率  $f_T$ ? 写出  $f_T$  的表达式, 并说明提高  $f_T$  的各项措施。
- 写出组成双极晶体管信号延迟时间  $\tau_{cc}$  的4个时间的表达式。其中的哪个时间与电流



$I_c$  有关? 这使  $f_T$  随  $I_c$  的变化而发生怎样的变化?

10、说明特征频率  $f_T$  的测量方法。

11、什么是双极晶体管的最高振荡频率  $f_M$ ? 写出  $f_M$  的表达式, 说明提高  $f_M$  的各项措施。

12、画出高频晶体管结构的剖面图, 并标出图中各部分的名称。

13、某均匀基区 NPN 晶体管的  $W_B = 1\mu\text{m}$ ,  $D_B = 20\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 试求此管的基区渡越时间  $\tau_b$ 。当此管的基区少子电流密度  $J_{nE} = 10^2\text{Acm}^{-2}$  时, 其基区少子电荷面密度  $Q_B$  为多少?

14、某均匀基区晶体管的  $W_B = 2\mu\text{m}$ ,  $L_B = 10\mu\text{m}$ , 试求此管的基区输运系数  $\beta^*$  之值。若将此管的基区掺杂改为如式 (3-28) 的指数分布, 场因子  $\eta=6$ , 则其  $\beta^*$  变为多少?

15、某均匀基区 NPN 晶体管的  $W_B = 2\mu\text{m}$ ,  $N_B = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,  $D_B = 18\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ,  $\tau_B = 5 \times 10^{-7}\text{s}$ , 试求该管的基区输运系数  $\beta^*$  之值。又当在该管的发射结上加 0.6V 的正向电压, 集电结短路时, 该管的  $J_{nE}$  和  $J_{nC}$  各为多少?

16、某均匀基区晶体管的注入效率  $\gamma=0.98$ , 若将其发射结改为异质结, 使基区的禁带宽度  $e_{GB}$  比发射区的禁带宽度  $e_{GE}$  小 0.08eV, 则其注入效率  $\gamma$  变为多少? 若要使其  $\gamma$  仍为 0.98, 则其有源基区方块电阻  $R_{\square B1}$  可以减小到原来的多少?

17、某双极型晶体管的  $R_{\square B1} = 1000\Omega$ ,  $R_{\square E} = 5\Omega$ , 基区渡越时间  $\tau_b = 10^{-9}\text{s}$ , 当  $I_B = 0.1\text{mA}$  时,  $I_C = 10\text{mA}$ , 求该管的基区少子寿命  $\tau_b$ 。

18、某晶体管的基区输运系数  $\beta^* = 0.99$ , 注入效率  $\gamma = 0.97$ , 试求此管的  $\alpha$  与  $\beta$ 。当此管的有源基区方块电阻  $R_{\square B1}$  乘以 3, 其余参数均不变时, 其  $\alpha$  与  $\beta$  变为多少?

19、某双极型晶体管当  $I_{B1} = 0.05\text{mA}$  时测得  $I_{C1} = 4\text{mA}$ , 当  $I_{B2} = 0.06\text{mA}$  时测得  $I_{C2} = 5\text{mA}$ , 试分别求此管当  $I_C = 4\text{mA}$  时的直流电流放大系数  $\beta$  与小信号电流放大系数  $\beta_0$ 。

20、某缓变基区 NPN 晶体管的  $BV_{CBO} = 120\text{V}$ ,  $\beta = 81$ , 试求此管的  $BV_{CEO}$ 。

21、某高频晶体管的  $f_\beta = 5\text{MHz}$ , 当信号频率为  $f = 40\text{MHz}$  时测得其  $|\beta_\omega| = 10$ , 则当  $f = 80\text{MHz}$  时  $|\beta_\omega|$  为多少? 该管的特征频率  $f_T$  为多少? 该管的  $\beta_0$  为多少?

22、某高频晶体管的  $\beta_0 = 50$ , 当信号频率  $f$  为  $30\text{MHz}$  时测得  $|\beta_\omega| = 5$ , 求此管的特征频率  $f_T$ , 以及当信号频率  $f$  分别为  $15\text{MHz}$  和  $60\text{MHz}$  时的  $|\beta_\omega|$  之值。

23、某高频晶体管的基区宽度  $W_B = 1\mu\text{m}$ , 基区渡越时间  $\tau_b = 2.7 \times 10^{-10}\text{s}$ ,  $f_T = 550\text{MHz}$ 。当该管的基区宽度减为  $0.5\mu\text{m}$ , 其余参数都不变时,  $f_T$  变为多少?

24、某高频晶体管的  $f_\beta = 20\text{MHz}$ , 当信号频率为  $f = 100\text{MHz}$  时测得其最大功率增益为  $K_{p\max} = 24$ , 则当  $f = 200\text{MHz}$  时  $K_{p\max}$  为多少? 该管的最高振荡频率  $f_M$  为多少?

25、画出 NPN 缓变基区晶体管在平衡时和在放大区、饱和区及截止区工作时的能带图。

26、画出 NPN 缓变基区晶体管在平衡时和在放大区、饱和区及截止区工作时的少子分布图。

27、某晶体管当  $I_{B1} = 0.05\text{mA}$  时测得  $I_{C1} = 4\text{mA}$ , 当  $I_{B2} = 0.06\text{mA}$  时测得  $I_{C2} = 5\text{mA}$ , 试分别求此管当  $I_C = 4\text{mA}$  时的直流电流放大系数  $\beta$  与增量电流放大系数  $\beta_0$ 。

28、已知某硅 NPN 均匀基区晶体管的基区宽度  $W_B = 2\mu\text{m}$ , 基区掺杂浓度  $n_B = 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 基区少子寿命  $\tau_B = 1\mu\text{s}$ , 基区少子扩散系数  $D_B = 15\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 以及从发射结注入基区的少子电流密度  $J_{nE} = 0.1\text{A/cm}^2$ 。试计算基区中靠近发射结一侧的非平衡少子电子浓度  $n_B(0)$ 、发射结电压  $V_{BE}$  和基区输运系数  $\beta^*$ 。

29、已知某硅 NPN 缓变基区晶体管的基区宽度  $W_B = 0.5\mu\text{m}$ , 基区少子扩散系数  $D_B =$



$20\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 基区自建场因子  $\eta = 20$ , 试计算该晶体管的基区渡越时间  $t_b$ 。

30、对于基区和发射区都是非均匀掺杂的晶体管, 试证明其注入效率  $\gamma$  可表为

上式中,  $Q_{EO}$  和  $Q_{BO}$  分别代表中性发射区和中性基区的杂质电荷总量,  $D_e$  和  $D_B$  分别代表中性发射区和中性基区的少数有效扩散系数。

31、已知某硅 NPN 均匀基区晶体管的基区宽度  $W_B = 0.7\mu\text{m}$ , 基区掺杂浓度  $n_B = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 基区少数寿命

$t_B = 10^{-7}\text{s}$ , 基区少数扩散系数  $D_B = 18\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 发射结注入效率  $\gamma = 0.995$ , 发射结面积  $A_e = 10^4\mu\text{m}^2$ 。表面和势垒区复合可以忽略。当发射结上有  $0.7\text{V}$  的正偏压时, 试计算该晶体管的基极电流  $I_B$ 、集电极电流  $I_C$  和共基极电流放大系数  $\alpha$  分别等于多少?

32、已知某硅 NPN 均匀基区晶体管的基区宽度  $W_B = 0.5\mu\text{m}$ , 基区掺杂浓度  $n_B = 4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 基区少数寿命

$t_B = 10^{-6}\text{s}$ , 基区少数扩散系数  $D_B = 18\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 发射结面积  $A_e = 10^{-5}\text{cm}^2$ 。

(1) 如果发射区为非均匀掺杂, 发射区的杂质总数为  $Q_{EO}/q = 8 \times 10^9$  个原子, 发射区少数扩散系数  $D_e = 2\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 试计算此晶体管的发射结注入效率  $\gamma$ 。

(2) 试计算此晶体管的基区输运系数  $\beta^*$ 。

(3) 试计算此晶体管的共发射极电流放大系数  $\beta$ 。

(4) 在什么条件下可以按简化公式

$$\beta \approx \frac{Q_{BO}D_B}{Q_{EO}D_E}$$

来估算  $\beta$ ? 在本题中若按此简化公式来估算  $\beta$ , 则引入的百分误差是多少?

33、在 N 型硅片上经硼扩散后, 得到集电结结深  $x_{jc} = 2.1\mu\text{m}$ , 有源基区方块电阻  $R_{\square B1} = 800\Omega$ , 再经磷扩散后, 得发射结结深  $x_{je} = 1.3\mu\text{m}$ , 发射区方块电阻  $R_{\square e} = 10\Omega$ 。设基区少数寿命  $t_B = 10^{-7}\text{s}$ , 基区少数扩散系数  $D_B = 15\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , 基区自建场因子  $\eta = 8$ , 试求该晶体管的电流放大系数  $\alpha$  与  $\beta$  分别为多少?

34、在材料种类相同, 掺杂浓度分布相同, 基区宽度相同的条件下, PNP 晶体管和 NPN 晶体管相比, 哪种晶体管的发射结注入效率  $\gamma$  较大? 哪种晶体管的基区输运系数  $\beta^*$  较大?

35、已知某硅 NPN 均匀基区晶体管的基区宽度  $W_B = 2.5\mu\text{m}$ , 基区掺杂浓度  $n_B = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 集电区掺杂浓度

$n_C = 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 试计算当  $V_{CB} = 0$  时的厄尔利电压  $V_A$  的值。

36、有人在测晶体管的  $I_{CEO}$  的同时, 错误地用一个电流表去测基极与发射极之间的浮空电势, 这时他声称测到的  $I_{CEO}$  实质上是什么?

37、某高频晶体管的  $f_\beta = 20\text{MHz}$ , 当信号频率  $f = 100\text{MHz}$  时测得其最大功率增益  $K_{p\max} = 24$ 。试求:

(1) 该晶体管的最高振荡频率  $f_M$ 。

(2) 当信号频率  $f$  为  $200\text{MHz}$  时该晶体管的  $K_{p\max}$  之值。

38、某硅 NPN 缓变基区晶体管的发射区杂质浓度近似为矩形分布, 基区杂质浓度为指数分布, 从发射结处的  $n_B(0) = 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 下降到集电结处的  $n_B(W_B) = 5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 基区宽度  $W_B = 2\mu\text{m}$ , 基区少数扩散系数  $D_B = 12\text{cm}^2/\text{s}$ , 基极电阻  $R_{bb} = 75\Omega$ , 集电区杂质浓度  $n_C = 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 集电区宽度  $W_C = 10\mu\text{m}$ , 发射结面积  $A_e$  和集电结面积  $A_C$  均为



$5 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 。工作点为:  $I_c = 10 \text{mA}$ ,  $V_{CB} = 6 \text{V}$ 。(正偏的势垒电容可近似为零偏势垒电容的2.5倍。)试计算:

- (1) 该晶体管的四个时间常数  $t_{cb}$ 、 $t_b$ 、 $t_D$ 、 $t_c$ , 并比较它们的大小;
- (2) 该晶体管的特征频率  $f_T$ ;
- (3) 该晶体管当信号频率  $f = 400 \text{MHz}$  时的最大功率增益  $K_{pmax}$  ;
- (4) 该晶体管的高频优值  $M$ ;
- (5) 该晶体管的最高振荡频率  $f_M$ 。

39、在某偏置在放大区的 NPN 晶体管的混合  $\pi$  参数中, 假设  $C_\pi$  完全是中性基区载流子贮存的结果,  $C_\mu$  完全是集电结空间电荷区中电荷变化的结果。试问:

- (1) 当电压  $V_{CE}$  维持常数, 而集电极电流  $I_C$  加倍时, 基区中靠近发射结一侧的少数浓度  $n_B(0)$  将加倍、减半、还是几乎维持不变? 基区宽度  $W_B$  将加倍、减半、还是几乎维持不变?
- (2) 由于上述参数的变化, 参数  $R_{bb}$ 、 $R_\pi$ 、 $g_m$ 、 $C_\pi$ 、 $C_\mu$  将加倍、减半、还是几乎维持不变?
- (3) 当电流  $I_C$  维持常数, 而集电结反向电压的值增加, 使基区宽度  $W_B$  减小一半时,  $n_B(0)$  将加倍、减半还是几乎维持不变?

## 第五章 绝缘栅场效应晶体管

### 填空题

- 1、N 沟道 MOSFET 的衬底是 ( ) 型半导体, 源区和漏区是 ( ) 型半导体, 沟道中的载流子是 ( )。
- 2、P 沟道 MOSFET 的衬底是 ( ) 型半导体, 源区和漏区是 ( ) 型半导体, 沟道中的载流子是 ( )。
- 3、当  $V_{GS} = V_T$  时, 栅下的硅表面发生 ( ), 形成连通 ( ) 区和 ( ) 区的导电沟道, 在  $V_{DS}$  的作用下产生漏极电流。
- 4、N 沟道 MOSFET 中,  $V_{GS}$  越大, 则沟道中的电子就越 ( ), 沟道电阻就越 ( ), 漏极电流就越 ( )。
- 5、在 N 沟道 MOSFET 中,  $V_T > 0$  的称为增强型, 当  $V_{GS} = 0$  时 MOSFET 处于 ( ) 状态;  $V_T < 0$  的称为耗尽型, 当  $V_{GS} = 0$  时 MOSFET 处于 ( ) 状态。
- 6、由于栅氧化层中通常带 ( ) 电荷, 所以 ( ) 型区比 ( ) 型区更容易发生反型。
- 7、要提高 N 沟道 MOSFET 的阈电压  $V_T$ , 应使衬底掺杂浓度  $n_A$  ( ), 使栅氧化层厚度  $T_{ox}$  ( )。
- 8、N 沟道 MOSFET 饱和漏源电压  $V_{DSat}$  的表达式是 ( )。当  $V_{DS} \geq V_{DSat}$  时, MOSFET 进入 ( ) 区, 漏极电流随  $V_{DS}$  的增加而 ( )。
- 9、由于电子的迁移率  $\mu_n$  比空穴的迁移率  $\mu_p$  ( ), 所以在其它条件相同时, ( ) 沟道 MOSFET 的  $I_{DSat}$  比 ( ) 沟道 MOSFET 的大。为了使两种 MOSFET 的  $I_{DSat}$  相同, 应当使 N 沟道 MOSFET 的沟道宽度 ( ) P 沟道 MOSFET 的。
- 10、当 N 沟道 MOSFET 的  $V_{GS} < V_T$  时, MOSFET ( ) 导电, 这称为 ( ) 导电。
- 11、对于一般的 MOSFET, 当沟道长度加倍, 而其它尺寸、掺杂浓度、偏置条件等都不变时, 其下列参数发生什么变化:  $V_T$  ( ),  $I_{DSat}$  ( ),  $R_{on}$  ( ),  $g_m$  ( )。
- 12、由于源、漏区的掺杂浓度 ( ) 于沟道区的掺杂浓度, 所以 MOSFET 源、漏 PN

结的耗尽区主要向（ ）区扩展，使 MOSFET 的源、漏穿通问题比双极型晶体管的基区穿通问题（ ）。

13、MOSFET 的跨导  $g_m$  的定义是（ ），它反映了（ ）对（ ）的控制能力。

14、为提高跨导  $g_m$  的截止角频率  $\omega_{gm}$ ，应当（ ） $\mu$ ，（ ） $L$ ，（ ） $V_{GS}$ 。

15、阈电压  $V_T$  的短沟道效应是指，当沟道长度缩短时， $V_T$  变（ ）。

16、在长沟道 MOSFET 中，漏极电流的饱和是由于（ ），而在短沟道 MOSFET 中，漏极电流的饱和则是由于（ ）。

17、为了避免短沟道效应，可采用按比例缩小法则，当 MOSFET 的沟道长度缩短一半时，其沟道宽度应（ ），栅氧化层厚度应（ ），源、漏区结深应（ ），衬底掺杂浓度应（ ）。

#### 问答与计算题

1、画出 MOSFET 的结构图和输出特性曲线图，并简要叙述 MOSFET 的工作原理。

2、什么是 MOSFET 的阈电压  $V_T$ ？写出  $V_T$  的表达式，并讨论影响  $V_T$  的各种因素。

3、什么是 MOSFET 的衬底偏置效应？

4、什么是有效沟道长度调制效应？如何抑制有效沟道长度调制效应？

5、什么是 MOSFET 的跨导  $g_m$ ？写出  $g_m$  的表达式，并讨论提高  $g_m$  的措施。

6、提高 MOSFET 的最高工作频率  $f_T$  的措施是什么？

7、什么是 MOSFET 的短沟道效应？

8、什么是 MOSFET 的按比例缩小法则？

9、在  $n_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 P 型硅衬底上制作 Al 栅 N 沟道 MOSFET，栅氧化层厚度为 50nm，栅氧化层中正电荷数目的面密度为  $10^{11} \text{cm}^{-2}$ ，求该 MOSFET 的阈电压  $V_T$  之值。

10、某处于饱和区的 N 沟道 MOSFET 当  $V_{GS} = 3\text{V}$  时测得  $I_{D\text{sat}} = 1\text{mA}$ ，当  $V_{GS} = 4\text{V}$  时测得  $I_{D\text{sat}} = 4\text{mA}$ ，求该管的  $V_T$  与  $\beta$  之值。

11、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1\text{V}$ ， $\beta = 4 \times 10^{-3} \text{AV}^{-2}$ ，求当  $V_{GS} = 6\text{V}$ ， $V_{DS}$  分别为 2V、4V、6V、8V 和 10V 时的漏极电流之值。

12、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1.5\text{V}$ ， $\beta = 6 \times 10^{-3} \text{AV}^{-2}$ ，求当  $V_{DS} = 6\text{V}$ ， $V_{GS}$  分别为 1.5V、3.5V、5.5V、7.5V 和 9.5V 时的漏极电流之值。

13、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1.5\text{V}$ ， $\beta = 6 \times 10^{-3} \text{AV}^{-2}$ ，求当  $V_{GS}$  分别为 2V、4V、6V、8V 和 10V 时的通导电阻  $R_{on}$  之值。

14、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1\text{V}$ ， $\beta = 4 \times 10^{-3} \text{AV}^{-2}$ ，求当  $V_{GS} = 6\text{V}$ ， $V_{DS}$  分别为 2V、4V、6V、8V 和 10V 时的跨导  $g_m$  之值。

15、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1\text{V}$ ， $\beta = 6 \times 10^{-3} \text{AV}^{-2}$ ，求当  $V_{DS} = 4\text{V}$ ， $V_{GS}$  分别为 2V、4V、6V、8V 和 10V 时漏源电导  $g_{ds}$  之值。

16、某 N 沟道 MOSFET 的沟道长度  $L = 2\mu\text{m}$ ，阈电压  $V_T = 1.5\text{V}$ ，电子迁移率为  $320 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，试求当外加栅电压  $V_{GS} = 5\text{V}$  时的饱和区跨导的截止角频率  $\omega_{gm}$ 。

17、某铝栅 N 沟道 MOSFET 的衬底掺杂浓度为  $n_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，栅氧化层厚度为 120nm，栅氧化层中有效电荷数的面密度  $Q_{ox}/Q$  为  $3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 。试计算其阈电压  $V_T$ 。

18、某铝栅 P 沟道 MOSFET 的衬底掺杂浓度为  $n_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，栅氧化层的厚度为 100nm，



$f_{MS} = -0.6\text{eV}$ ,

$Q_{OX}/q = 5 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 。若要得到-1.5V 的阈电压,应采用沟道区硼离子注入。设注入深度大于沟道下耗尽区最大厚度,则所需的注入浓度为多少?

19、一个以高掺杂 P 型多晶硅为栅极的 P 沟道 MOSFET,在源与衬底接地时阈电压  $V_T$  为-1.5V。当外加5V 的衬底偏压后,测得其  $V_T$  为-2.3V。若栅氧化层厚度为100nm,试求其衬底掺杂浓度。

20、某工作于饱和区的 N 沟道 MOSFET 当  $V_{GS} = 3\text{V}$  时测得  $I_{Dsat} = 1\text{mA}$ , 当  $V_{GS} = 4\text{V}$  时测得  $I_{Dsat} = 4\text{mA}$ , 试求该管的  $V_T$  与  $\beta$  之值。

21、若 N 沟道增强型 MOSFET 的源和衬底接地,栅和漏极相接,试导出描述其电流-电压特性的表达式。

22、P 沟 Al 栅 MOSFET 具有以下参数:  $T_{OX} = 100\text{nm}$ ,  $n_D = 2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,  $Q_{OX}/q = 10^{11}\text{cm}^{-2}$ ,  $L = 3\mu\text{m}$ ,  $Z = 50\mu\text{m}$ ,  $\mu_p = 230\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。试计算其阈电压  $V_T$ ; 并计算出当  $V_{GS} = -4\text{V}$  时的饱和漏极电流。

23、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1\text{V}$ ,  $\beta = 4 \times 10^{-3}\text{AV}^{-2}$ , 求当  $V_{GS} = 6\text{V}$ ,  $V_{DS}$  分别为2V、4V、6V、8V 和10V 时的漏极电流之值。

24、将  $Z/L = 5$ ,  $T_{OX} = 80\text{nm}$ ,  $\mu_n = 600\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  的 N 沟道 MOSFET 用作可控电阻器。为了要在  $V_{DS}$  较小时获得  $R_{on} = 2.5\text{K}\Omega$  的电阻, ( $V_{GS} - V_T$ ) 应为多少? 这时沟道内的电子面密度  $Q_n/Q$  为多少?

25、试求出习题19中,当外加5V 的衬底偏压时,温度升高  $10^\circ\text{C}$  所引起的阈电压的变化。

26、铝栅 P 沟道 MOSFET 具有以下参数:  $T_{OX} = 120\text{nm}$ ,  $n_D = 1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,  $Q_{OX}/q = 10^{11}\text{cm}^{-2}$ ,  $L = 10\mu\text{m}$ ,  $Z = 50\mu\text{m}$ ,  $\mu_p = 230\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。试计算当  $V_{GS} = -2\text{V}$ ,  $V_{DS} = 5\text{V}$  时的亚阈电流  $I_{Dsub}$ 。

27、某 N 沟道 MOSFET 的  $V_T = 1.5\text{V}$ ,  $\beta = 6 \times 10^{-3}\text{AV}^{-2}$ , 求当  $V_{DS} = 6\text{V}$ ,  $V_{GS}$  分别为1.5V、3.5V、5.5V、7.5V 和9.5V 时的跨导之值。

28、导出 N 沟道 MOSFET 饱和区跨导  $g_{ms}$  和通导电阻  $R_{on}$  的温度系数的表达式

