

晶体管电路习题 分析与解答

山东科学技术出版社

晶体管电路习题分析与解答

徐振林 杨兰英 王荣华 编

责任编辑 原式溶

晶体管电路习题分析与解答

徐振林 杨兰英 王荣华 编

山东科学技术出版社出版
山东省新华书店发行
山东新华印刷厂潍坊厂印刷

787×1092毫米 32开本 18.5印张 1插图 338千字

1982年7月第1版 1982年7月第1次印刷

印数：1—46,000

书号 15195·98 定价 1.55 元

前 言

晶体管电路是电子专业的重要基础课。为了帮助学生巩固基本概念，加深理解基本原理，灵活掌握基本分析方法，以提高分析问题和解决问题的能力，我们根据多年来的教学实践，并参考国内外有关晶体管书籍，编写了《晶体管电路习题分析与解答》这本书。

本书共分十四章：内容包括半导体与晶体管的基本知识、音频小信号放大器、负反馈放大器、音频功率放大器、直流放大器、运算放大器、整流滤波与稳压电源、场效应管放大器、晶体管高频特性、宽频带放大器、调谐放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、调制与解调。本书第一章至第七章由杨兰英同志编写；第八章至第十章由王荣华同志编写；第十一章至第十四章及附录由徐振林同志编写。

本书在解题过程中，着重强调基本理论和方法，有的习题给出多种解法，以扩大知识面，提高灵活解题的能力。书中收入了部分实验分析性的习题，所用电路及数据力求与实际相符，以帮助读者建立实际的数量级概念。此外，书中还编写了部分内容较深的综合性习题；简明扼要地介绍了高频功率放大器的阻抗匹配圆图法，编写了部分用此法分析和设

计高频功率放大器的习题，并将此法与解析法加以比较。

本书适合大专院校电子专业师生阅读，也可供无线电工程技术人员及业余爱好者参考。

本书在编写过程中，冯传海教授和陈罡午副教授给予了热情指导和帮助，李炳炎同志做了大量工作，在此表示感谢。

编 者

一九八一年十二月

目 录

第一章	半导体与晶体管的基本知识	1
第二章	音频小信号放大器	24
第三章	负反馈放大器	78
第四章	音频功率放大器	145
第五章	直流放大器	175
第六章	运算放大器	214
第七章	整流滤波与稳压电源	245
第八章	场效应管放大器	291
第九章	晶体管高频特性	302
第十章	宽频带放大器	311
第十一章	调谐放大器	336
第十二章	高频功率放大器	414
第十三章	正弦波振荡器	473
第十四章	调制与解调	534
附 录	阻抗导纳圆图	562

第一章 半导体与晶体管 的基本知识

1—1. 试比较本征半导体、 N 型半导体和 P 型半导体的特点。

答：在室温下，本征半导体中的电子和空穴是由热激发产生的，它们成对出现。本征锗和硅中电子空穴对的数量级分别为 $2.4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 和 $2 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。在本征半导体中，掺入少量五族杂质（如磷），就构成 N 型半导体，其中电子是多数载流子。在本征半导体中掺入少量三族杂质（如硼），就构成 P 型半导体，其中空穴是多数载流子。掺杂浓度一般为 $10^{15} \sim 10^{17}/\text{cm}^3$ ，即百万分之一左右。

1—2. 在室温下， P 型半导体和 N 型半导体各带有什么电荷？

答：在任何温度下， P 型半导体和 N 型半导体中均不带电荷，保持电中性。

1—3. $P-N$ 结中的空间电荷区是怎样形成的？空间电荷能否互相中和而消失？

答： $P-N$ 结中空间电荷区的形成从略。

空间电荷是一些不能自由移动的离子，所以不能互相中和而消失。

1—4. 将一个玻璃管壳的二极管刮去外面的黑漆，两端接一微安表，不接任何电源，微安表中是否有读数？若用光

照射二极管，表中是否有读数？为什么？

答：无光照射时，P—N结中多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动处于平衡状态。若不接电源，电路中没有电流，所以表中没有读数。若用光照射二极管，表中就会有读数。这是因为在光的激发下，半导体中产生大量电子空穴对，使P区和N区中少数载流子浓度迅速增加，同时P—N结内也将产生更多的电子空穴对，这些都使得漂移运动加强；多数载流子浓度基本不变，在光线照射的很短时间内，温度还没来得及上升，因而可以近似认为扩散运动基本不变。这样一来，就破坏了扩散运动与漂移运动的平衡。漂移

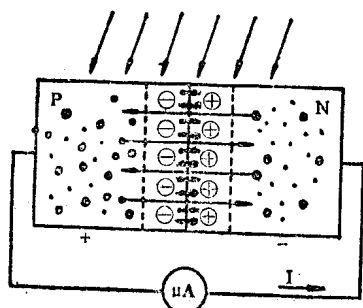


图 1—1

运动增强的结果，P区集聚了大量非平衡空穴，N区集聚了大量非平衡电子，在外电路中形成了一个由P区指向N区的电场，如图1—1所示。在此电场的作用下，电路中产生了电流，电流的方向与二极管反向电流的方向一致。因为从本质上来讲，

它们都是少数载流子的漂移造成的。

1—5. 对于一个突变P—N结（所谓突变结是设P区和N区的杂质均匀分布，在接触处，由一种杂质突变到另一种杂质），试证明其接触电位差

$$U_0 = U_T \ln \frac{N_A N_D}{N_i^2}$$

式中: $U_T = \frac{kT}{q}$; N_A 、 N_D 分别为受主和施主杂质的浓度, N_i 为本征载流子浓度。

证明: 我们采用一维模型来描述空间电荷区, 如图1—2所示。根据高斯定理, 空间电荷区电场 E 与电荷密度 ρ 的关系为

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

式中: ϵ 为半导体材料的介电常数。

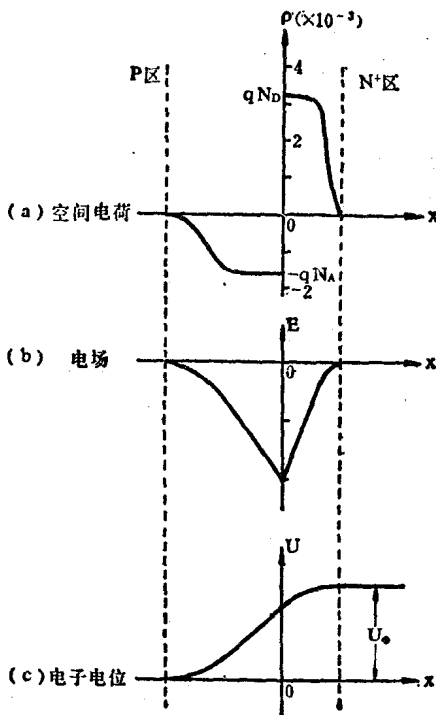


图 1—2

在空间电荷区, ρ 由载流子电荷和离子电荷两部分组成, 其中载流子电荷为

$$q(N_p - N_n)$$

式中: N_p 、 N_n 分别为空穴和电子的浓度。离子电荷为

$$q(N_d - N_a)$$

式中: N_d 、 N_a 分别为施主和受主离子的浓度。(1)式可以写成

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon} (N_p - N_n + N_d - N_a) \quad (2)$$

在空间电荷区, 空穴和电子非常少, $N_p - N_n \ll N_d - N_a$ 。因此, 在空间电荷区的中部, 电荷的分布与杂质离子的分布相同。在靠近空间电荷区的边界附近, 由于多数载流子的存在, 将逐渐恢复电中性。在界面上, 平衡载流子浓度与电位的关系服从波尔兹曼分布:

$$N_p = N_i e^{-qU_p/kT}$$

$$N_n = N_i e^{+qU_p/kT}$$

式中: U_p 为 P 区的电子电位。

在整个 P 区, 载流子电荷与离子电荷之和为零, 即

$$q(N_p - N_n) + (-q)N_a = 0$$

在 P 区:

$$N_n \ll N_p$$

$$N_p \approx N_a$$

所以

$$N_a = N_i e^{-qU_p/kT}$$

$$U_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{N_i}$$

同理可以求出 N 区的电子电位为

$$U_N = + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{N_i}$$

空间电荷区的接触电位差为

$$U_p = U_N - U_P = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{N_i^2}$$

因为离子浓度等于杂质浓度，所以

$$U_\phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{N_i^2}$$

1—6. 一个锗突变结二极管，半导体中的杂质浓度为 $N_D = 10^3 N_A$ ，而每 10^8 个原子中有一受主杂质原子。试计算 $T = 300\text{K}$ 时的接触电位差 U_ϕ 。对于同样掺杂的硅突变结，重复上述计算。

解：锗和硅材料的原子浓度约为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ，受主和施主杂质的浓度分别为

$$N_A = \frac{5 \times 10^{22}}{10^8} = 5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$$

$$N_D = 10^3 N_A = 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$$

在室温下，锗的本征载流子浓度 $N_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ ，锗二极管的接触电位差为

$$\begin{aligned} U_\phi &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{N_i^2} \\ &= \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \frac{5 \times 10^{14} \times 5 \times 10^{17}}{(2.5 \times 10^{13})^2} \\ &= 0.34(\text{V}) \end{aligned}$$

在室温下，硅的本征载流子浓度 $N_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，硅二极管的接触电位差为

$$U_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{N_i^2} = 0.026 \ln \frac{5 \times 10^{14} \times 5 \times 10^{17}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \\ = 0.72(\text{V})$$

1—7. 根据二极管电流方程:

$$I = I_s(e^{qU/kT} - 1)$$

计算当温度 $T = 300\text{K}$, 外加电压分别为 -1V 、 -0.52V 、 -0.26V 、 -0.052V 、 0V 、 $+0.026\text{V}$ 、 $+0.052\text{V}$ 、 $+0.13\text{V}$ 、 $+0.20\text{V}$ 时, 流过二极管的电流分别是多少? 利用计算结果画出二极管的伏安特性曲线 (设二极管的反向饱和电流 $I_s = 1\mu\text{A}$)。

解: $T = 300\text{K}$ 时, $\frac{kT}{q} = 26\text{mV}$ 。

$$I = I_s(e^{qU/kT} - 1) = e^{U/26} - 1$$

计算结果见表 1—1。

表 1—1

$U(\text{mv})$	-1000	-520	-260	-52	0	+26	+52	+130	+200
$U/26$	38	-20	-10	-2	0	1	2	5	7.7
$I(\mu\text{A})$	-1	-1	-1	-0.7	0	1.7	6.4	150	2.2×10^3

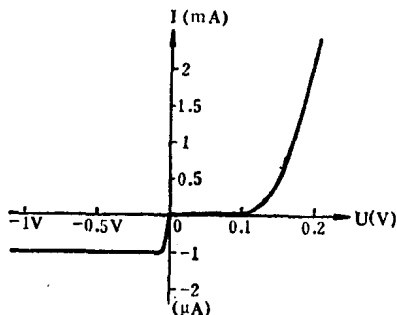


图 1—3

由表 1—1 可以画出二极管的伏安特性曲线, 如图 1—3 所示。

1—8. 利用二极管的电流方程:

$$I = I_s(e^{qU/kT} - 1)$$

导出室温下二极管正向交流电阻 r_e 的表达式。

当流过二极管的电流分别为 0.1mA、1mA、2mA 时，二极管的正向交流电阻分别是多少？

解：根据二极管正向交流电阻的定义，

$$r_e = \frac{dU}{dI}$$

可得

$$\frac{1}{r_e} = \frac{dI}{dU} = \frac{d}{dU} I_s (e^{\frac{q}{kT}U} - 1) = I_s \cdot e^{\frac{q}{kT}U} \cdot \frac{q}{kT}$$

一般情况下均满足 $U \gg \frac{kT}{q}$ ，则

$$e^{\frac{q}{kT}U} \gg 1$$

$$I = I_s (e^{\frac{q}{kT}U} - 1) \approx I_s e^{\frac{q}{kT}U}$$

所以

$$\frac{1}{r_e} \approx \frac{q}{kT} I$$

$$r_e \approx \frac{kT}{q} / I = U_T / I$$

在室温下， $U_T = 26 \text{ mV}$ ， $r_e = \frac{26(\text{mV})}{I(\text{mA})}$ 。

当电流 I 分别为 0.1mA、1mA 和 2mA 时，二极管的正向交流电阻分别为 260Ω、26Ω 和 13Ω。

1—9. 证明在室温附近，温度每增加 10℃，锗二极管的反向饱和电流增大一倍。而对于硅二极管，温度每增加 7℃， I_s 就会增大一倍。

证明：由半导体物理的知识可知，二极管的反向饱和电流为

$$I_s = A e^{-E_g/kT}$$

式中： A 为与材料有关的常数； E_g 为半导体材料的禁带宽度。对反向饱和电流 I_S 求微分，得

$$\frac{dI_S}{dT} = \frac{E_g}{kT^2} A e^{-E_g/kT} = \frac{E_g}{kT^2} I_S$$

对于锗材料的二极管：

$$E_g = 0.68 \text{ eV} = 1.1 \times 10^{-19} \text{ 焦耳}$$

$$\frac{dI_S}{dT} = \frac{1.1 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300^2} I_S = 0.1 I_S$$

$$dI_S = 0.1 I_S dT$$

当 $dT = 10^\circ\text{C}$ 时， $dI_S = I_S$ ，即温度每增加 10°C ，锗管的反向饱和电流增大一倍。

对于硅材料的二极管：

$$E_g = 1.1 \text{ eV} = 1.8 \times 10^{-19} \text{ 焦耳}$$

$$\frac{dI_S}{dT} = \frac{1.8 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300^2} I_S = 0.14 I_S$$

当 $dT = 7^\circ\text{C}$ 时， $dI_S = 0.14 \times 7 I_S = I_S$ ，即温度每增加 7°C ，硅管的反向饱和电流增大一倍。

1—10. 锗管和硅管的反向电流哪个大？死区电压哪个大？为什么？

答：二极管的反向电流与半导体中本征载流子浓度的平方 (N_i^2) 成正比。在相同温度下，锗比硅材料的本征载流子浓度大得多，因此在相同条件下，锗管比硅管的反相电流大得多。

由习题 1—6 知，硅管比锗管的接触电位差大，因此硅管比锗管的死区电压大。

1—11. 两个完全相同的二极管面对面地串接在一起，

然后接在 1.5V 电池的两端，电路如图 1—4 所示。每个二极管上的压降各是多少？

解：二极管 D_2 反偏，所以回路电流 $I \approx I_S$ ，设二极管 D_1 上的压降为 U_1 ，根据二极管电流方程，则有

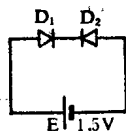


图 1—4

$$I_S(e^{U_1/U_T} - 1) = I_S$$

$$e^{U_1/U_T} = 2$$

$$U_1 = U_T \ln 2 = 26 \times 0.69 = 18(\text{mV})$$

$$U_2 = E - U_1 = 1.5 - 0.02 = 1.48(\text{V})$$

1—12. 能否把一个二极管直接正向接到 1.5V 电源的两端？为什么？

答：不能。由于没有限流电阻，回路中的电流将会很大，容易烧坏二极管。另一方面，电流太大，电源也会因发热而损坏。

1—13. 怎样用万用电表判断二极管的好坏与极性？

答：判断二极管的好坏时，可以将万用电表置于 $\times 1\text{k}\Omega$ 电阻档，两表笔接二极管的两个极，正反向各测量一次。若两次测得的电阻均接近于 0Ω ，说明二极管穿透，若两次表针均不动，说明管子内部断路。正常情况下，正向电阻为几百欧至几千欧，反向电阻为几十 $\text{k}\Omega$ 至几百 $\text{k}\Omega$ 。

判断二极管的极性时，可以将万用电表置于 $\times 1\text{k}\Omega$ 电阻档，测量二极管的正反向电阻。当表针指示几 $\text{k}\Omega$ 的电阻值时，“+”表笔连接的是二极管的负极，“-”表笔连接的是二极管的正极。当表针指示几十 $\text{k}\Omega$ (或几百 $\text{k}\Omega$) 的电阻值时，“+”表笔连接的是二极管的正极，“-”表笔连接的是二极管的负极。

1—14. 有人用 500 型万用电表测量一只二极管的正向电阻, 当用不同的档测量时, 得到的数据见表 1—2。为什么同一管子测得的正向电阻却不同?

表 1—2

档 级	$\times 10\Omega$	$\times 100\Omega$	$\times 1k\Omega$
阻 值	100 Ω	600 Ω	4.5k Ω

答: 用万用电表测出的是二极管的正向直流电阻。二极管的正向直流电阻与工作电流有关, 电流越大, 电阻越小。测量电路如图 1—5 所示。图中, E 为电表的内电源, $\times 10\Omega$ 、 $\times 100\Omega$ 、 $\times 1k\Omega$ 三档的电源均为 1.5V; R_i 为电表的内阻, 此三档之值分别为 100 Ω 、1k Ω 、10 k Ω 。测量电流为

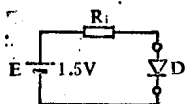


图 1—5

$$I = \frac{E - U}{R_i}$$

式中: U 为二极管的正向导通电压, 锗管 $U \approx 0.2V$, 硅管 $U \approx 0.6V$ 。用不同档级测量时, 二极管的正向导通电压 U 基本不变, 电表内阻 R_i 却不同, 因而回路电流不同。二极管的正向直流电阻 $R_D = \frac{U}{I}$, 所以用不同的档级测量时, 就会得到不同的数值。 $\times 10\Omega$ 档电表内阻最小, 电流 I 最大, R_D 最小; $\times 1k\Omega$ 档电表内阻最大, 电流 I 最小, R_D 最大。

1—15. 如何利用万用电表挑选两个伏安特性比较一致的二极管?

答: 由习题 1—14 的讨论可知, 用万用电表的不同欧姆

档测量同一只二极管的正向电阻时，将得到不同的阻值。根据这一现象，我们可以用不同的欧姆档测量两只二极管的正向电阻。若各档所测得的正向电阻均比较一致，就说明两只二极管的伏安特性比较一致。

1—16. 当温度升高时，二极管的伏安特性曲线会发生什么变化？为什么？

答：当温度升高时，二极管的伏安特性曲线将向左移动，如图 1—6 所示。这是因为当温度升高时， $P-N$ 结的接触电位差 U_0 减小，对于同样的外加电压，就会产生较大的电流，使得曲线左移。

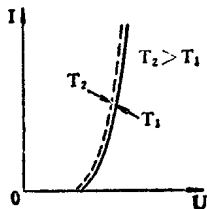


图 1—6

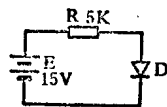


图 1—7

1—17. 一只二极管接入图 1—7 所示电路中，试估算回路电流 I 的大小。若将二极管反接，试估算二极管上的电压降。

解：在图 1—7 所示的电路中，二极管的正向电压降很小（锗管 0.2V，硅管 0.6V）， $U_D \ll E$ ，所以

$$I = \frac{E - U_D}{R} \approx \frac{E}{R} = \frac{15}{5} = 3(\text{mA})$$

将二极管反接后，因为二极管的反向电流很小（锗管为微安数量级，硅管的更小），所以二极管上的电压降为

$$U_{D\text{反}} = E - I_s R \approx E = 15\text{V}$$