



模拟电路基础（下）

半导体二极管以及等效模型

2.2 PN结



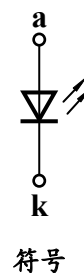
➤ 二极管的主要类型

发光二极管

将电能转换成光能的特殊半导体器件，当管子加正向电压时，在正向电流激发下，管子发光，属电致发光。

使用方法：

- 发光二极管只有在加正向电压时才发光；
- 可以通过直流或者交流信号驱动使其发光；
- 驱动电路需要增加保护电阻。



2.2 PN结

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管的主要类型

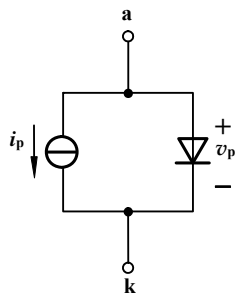
光电二极管

工作原理：利用光电导效应工作，PN结工作在反偏态，当光照射在PN结上时，束缚电子获得光能变成自由电子，形成光生电子—空穴对，在外电场的作用下形成光生电流。



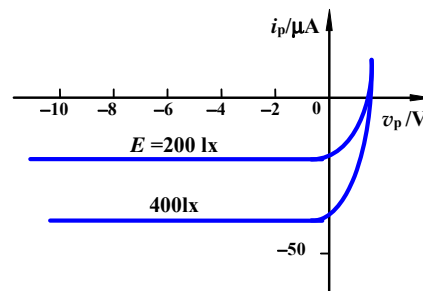
(a)

(a) 符号



(b)

(b) 电路模型



(c)

(c) 特性曲线

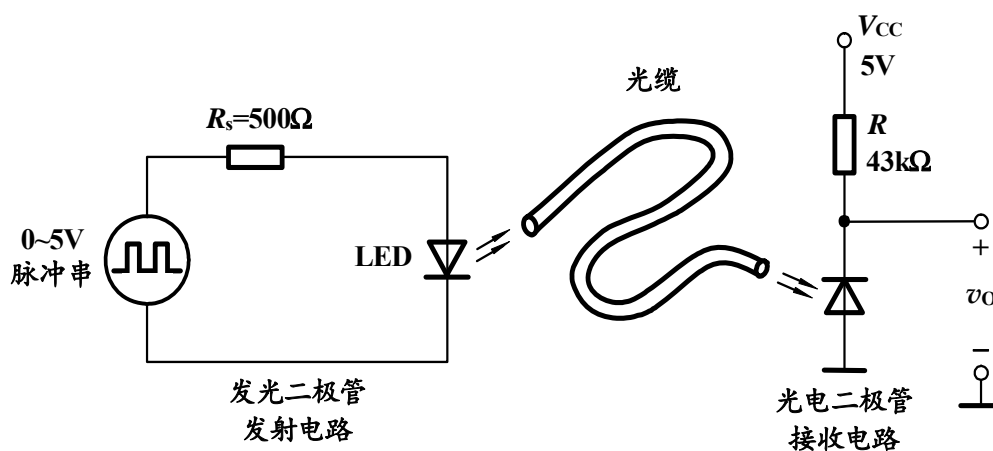
2.2 PN结

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管的主要类型



光电传输系统

2.3 二极管电路模型及分析

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

- 指数模型 ➡ 精确定量分析
- 理想二极管开关模型
- 二极管恒压降模型 } ➡ 工程近似定性分析
- 折线模型
- 小信号电路模型 } ➡ 基于静态工作点的定量分析
(小信号时准确, 大信号容易造成误差)

2.3 二极管电路模型及分析

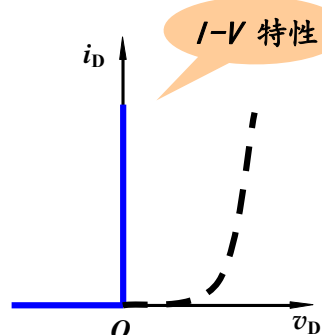
6



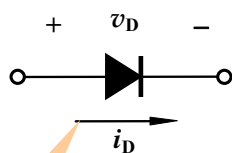
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

理想模型

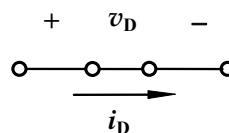


(a)



(b)

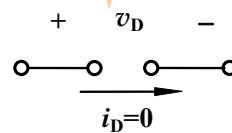
正向偏置时的
电路模型



($i_D > 0$, $v_D = 0$)

(c)

反向偏置时的
电路模型



($v_D < 0$, $i_D = 0$)

(d)

2.3 二极管电路模型及分析

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

理想模型

已知 $R_A = R_B = 1\text{k}\Omega$, $R_C = 10\text{k}\Omega$, $V_A = 5\text{V}$, $V_B = 3\text{V}$

1、假设两个二极管都为正向偏置

$$\frac{V_A - V_C}{R_A} + \frac{V_B - V_C}{R_B} = \frac{V_C}{R_C} \quad V_C \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \right) = \frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B}$$

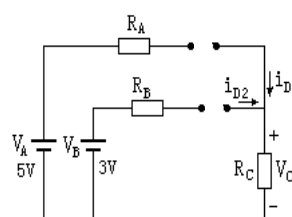
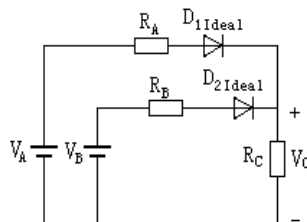
$V_C = 3.81\text{V}$ 二极管都正偏是错误的

2、假设两个二极管都为反向偏置

$V_C = 0\text{V}$ 二极管都反偏是错误的

3、假定D1导通、D2反偏截止, $i_{D2} = 0$, $i_{D1} = \frac{V_A}{R_A + R_C}$

$V_C = 4.55\text{V}$ 结果是正确的



2.3 二极管电路模型及分析

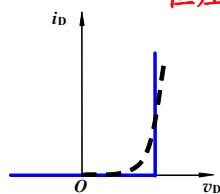
8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

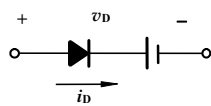
➤ 二极管电路的等效模型

恒压降模型



(a)

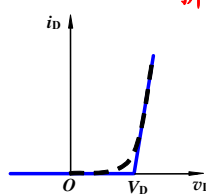
(a) I-V 特性



(b)

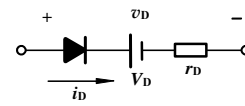
(b) 电路模型

折线模型



(a)

(a) I-V 特性



(b)

(b) 电路模型

二极管导通后管压降是恒定的，典型值为 **0.7V (硅二极管)**、**0.2V (锗二极管)**。二极管电流大于 **1mA** 时比较准确。

折线模型认为二极管的管压降不是恒定的，而是随着通过二极管电流的增加而增加。

2.3 二极管电路模型及分析

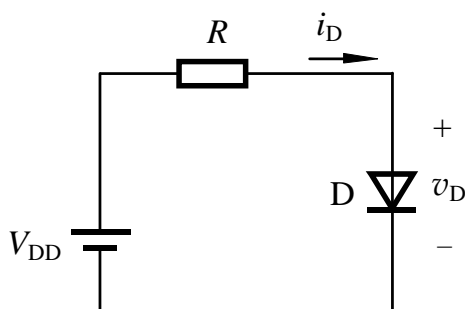
9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

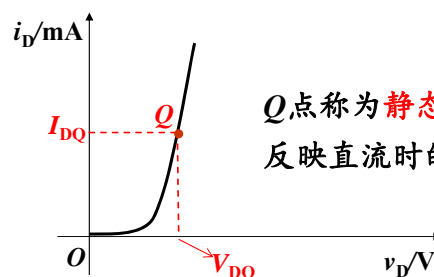
➤ 二极管电路的等效模型

小信号模型



$$\begin{cases} V_{DD} = Ri_D + v_D \\ f(v_D) = i_D = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \end{cases}$$

非线性函数



Q点称为静态工作点，
反映直流时的工作状态。

2.3 二极管电路模型及分析

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

小信号模型

$$\begin{cases} V_{DD} = Ri_D + v_D \\ f(v_D) = i_D = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \end{cases}$$

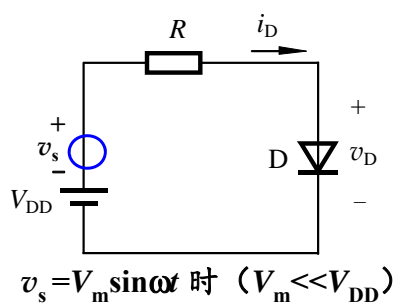


$$\begin{cases} V_{DD} + v_s = Ri_D + v_D \\ f(v_D) = i_D = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_{DD} + v_s = R(I_{DQ} + \Delta i_D) + (V_{DQ} + \Delta v_D) \\ \quad = (RI_{DQ} + V_{DQ}) + (R\Delta i_D + \Delta v_D) \\ f(v_D) = I_{DQ} + \Delta i_D = I_{DQ} + f'(V_{DQ}) \times \Delta v_D \end{cases}$$

$$f(v_D) = f(V_{DQ}) + f'(V_{DQ}) \times (v_D - V_{DQ}) + \dots \approx I_{DQ} + f'(V_{DQ}) \times \Delta v_D$$



2.3 二极管电路模型及分析

11

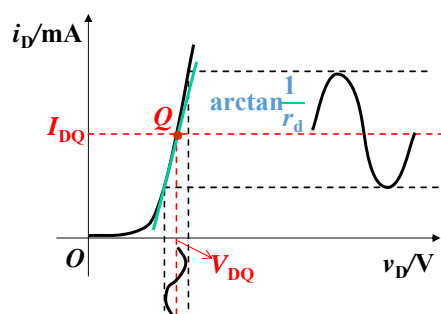


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

小信号模型

$$\begin{cases} V_{DD} + v_s = R(I_{DQ} + \Delta i_D) + (V_{DQ} + \Delta v_D) \\ \quad = (RI_{DQ} + V_{DQ}) + (R\Delta i_D + \Delta v_D) \\ f(v_D) = I_{DQ} + \Delta i_D = I_{DQ} + f'(V_{DQ}) \times \Delta v_D \end{cases}$$



2.3 二极管电路模型及分析

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

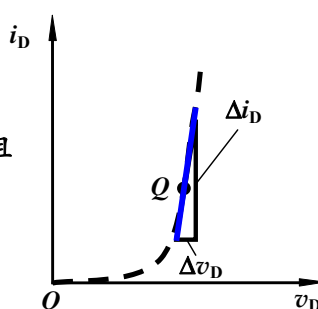
➤ 二极管电路的等效模型

小信号模型

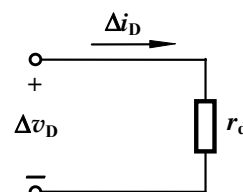
过Q点的切线可以等效成一个微变电阻

$$\text{即 } r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D}$$

$$\text{根据 } i_D = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \approx I_S e^{v_D/V_T}$$



(a)



(b)

得Q点处的微变电导

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \left. \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \right|_Q \approx \left. \frac{i_D}{V_T} \right|_Q = \frac{I_D}{V_T} \quad \text{则 } r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

$$\text{常温下 } (T=300\text{K}) \quad r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})}$$

2.3 二极管电路模型及分析

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的等效模型

小信号模型

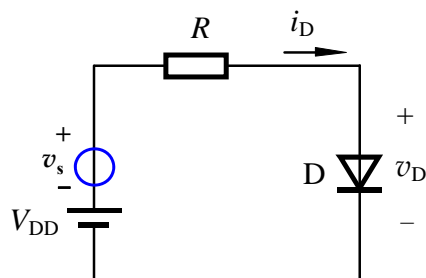
符号中大小写的含义：

大写字母大写下标：静态值（直流），如， I_B

小写字母大写下标：总量（直流+交流），如， i_B

小写字母小写下标：瞬时值（交流），如， i_b

需要熟练掌握，考试扣分项



$$i_D = \frac{1}{R}(V_{DD} + v_s - v_D)$$

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})}$$

2.3 二极管电路模型及分析

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法

图解分析法

二极管是一种非线性器件，因而其电路一般要采用非线性电路的分析方法，比较复杂，而图解分析法则较简单，前提条件是已知二极管的 $V-I$ 曲线。 V_{DD}

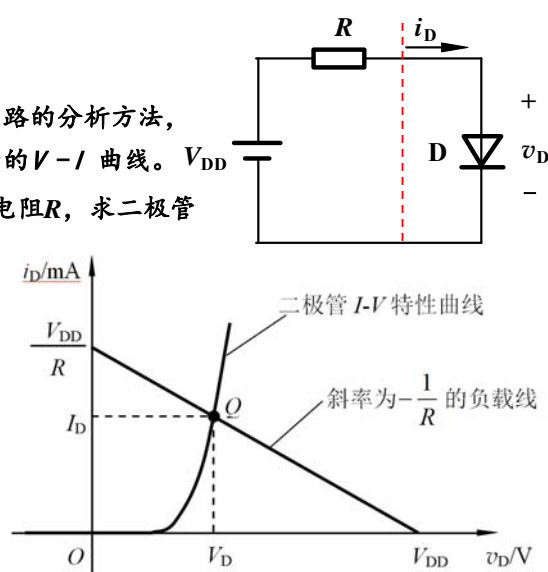
例 电路如图所示，已知二极管的 $V-I$ 特性曲线、电源 V_{DD} 和电阻 R ，求二极管两端电压 v_D 和流过二极管的电流 i_D 。

解：由电路的KVL方程，可得 $i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R}$

$$\text{即 } i_D = -\frac{1}{R}v_D + \frac{1}{R}V_{DD}$$

Q 的坐标值 (V_D, I_D) 即为所求。

Q 点称为电路的**工作点**。



2.3 二极管电路模型及分析

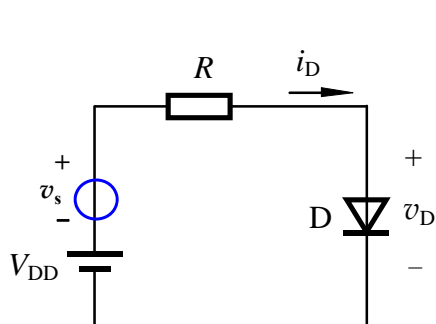
15



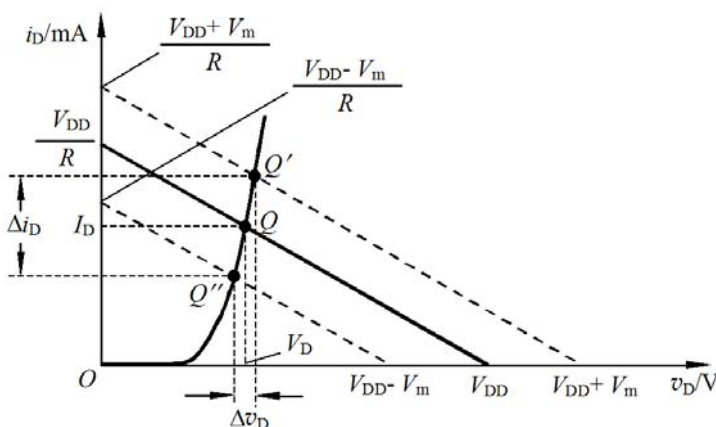
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法

图解分析法



$v_s = V_m \sin \omega t$ 时 ($V_m \ll V_{DD}$)



2.3 二极管电路模型及分析

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法

工程近似分析法

当 $V_{DD} = 10V$ 时, ($R = 10k\Omega$), 求电流 I_D

理想模型 $V_D = 0V$ $I_D = V_{DD} / R = 1mA$

恒压模型

$V_D = 0.7V$ (硅二极管典型值)

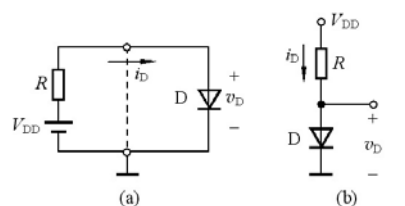
$I_D = (V_{DD} - V_D) / R = 0.93mA$

折线模型

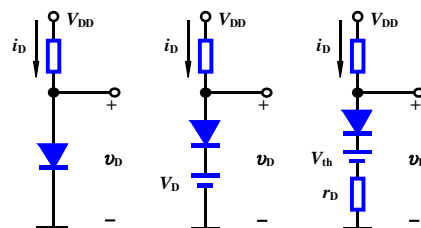
$V_{th} = 0.5V$ (硅二极管典型值)

设 $r_D = 0.2k\Omega$

$I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931mA$ $V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69V$



(a) 简单二极管电路 (b) 习惯画法



当 $V_{DD} = 1V$ 时, 结果如何?

2.3 二极管电路模型及分析

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法

工程近似分析法-小信号模型

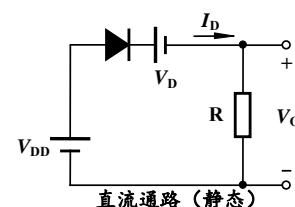
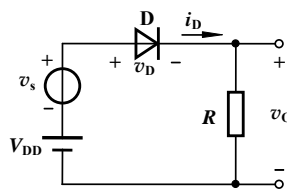
图示电路中, $V_{DD}=5\text{V}$, $R=5\text{k}\Omega$, 恒压降模型的 $V_D=0.7\text{V}$, $v_s=0.1\sin\omega\text{V}$ 。(1) 求输出电压 v_o 的交流量和总量; (2) 绘出 v_o 的波形。

$$\text{解: } I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} \quad r_d = \frac{V_T}{I_D}$$

$$v_o = \frac{R}{R + r_d} \cdot v_s$$

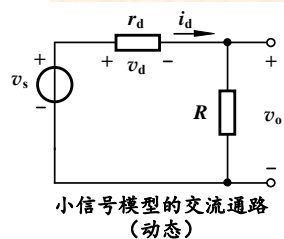
解得:

$$v_o = V_O + v_o = 4.3 + 0.0994\sin\omega \quad (\text{V})$$

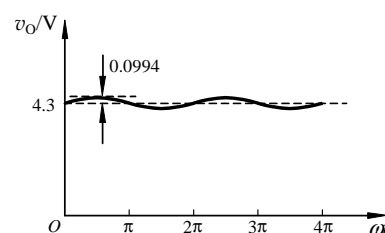


直流通路 (静态)

直流通路、交流通路、静态、动态等概念, 在放大电路的分析中非常重要。



小信号模型的交流通路 (动态)



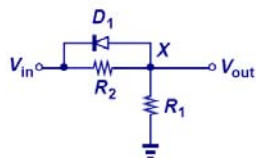
2.3 二极管电路模型及分析

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



(a)

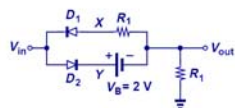
2.3 二极管电路模型及分析

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



(a)

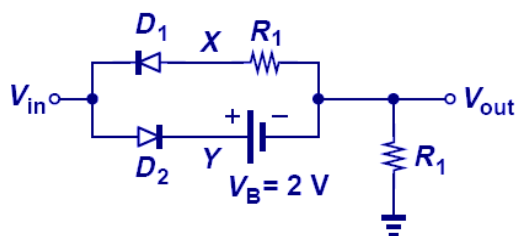
2.3 二极管电路模型及分析

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



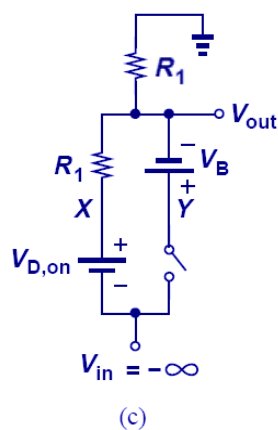
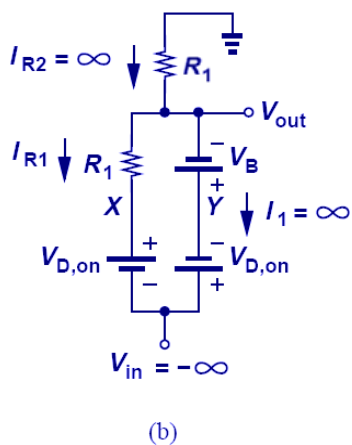
2.3 二极管电路模型及分析

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



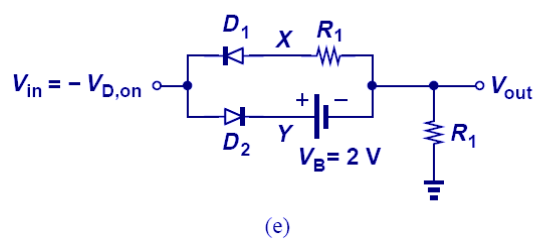
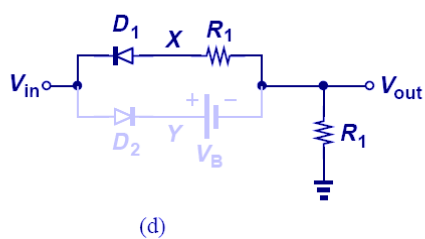
2.3 二极管电路模型及分析

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



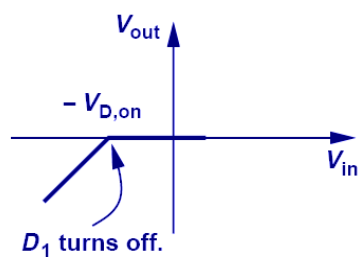
2.3 二极管电路模型及分析

23

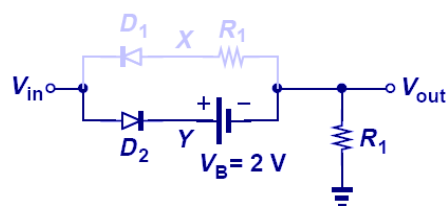


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



(f)



(g)

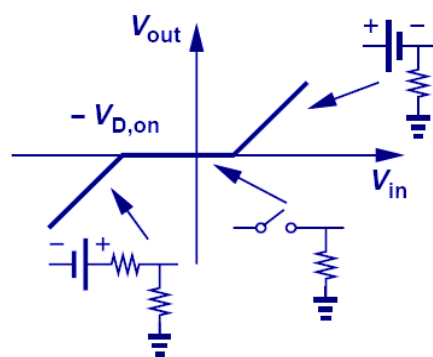
2.3 二极管电路模型及分析

24



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二极管电路的分析方法



(h)

第2章 半导体二极管以及等效模型

25



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

知识点掌握要求

- 了解本征/P型N型/半导体、多子、少子、扩散、漂移等基本概念
- 理解PN结的形成以及单向导电性的工作原理
- 掌握二极管的伏安特性以及主要性能指标
- 熟练掌握二极管电路的分析方法，尤其是小信号等效模型及其分析法

课后作业

26



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

2. 4
2. 10
2. 12
2. 13
2. 15
2. 18