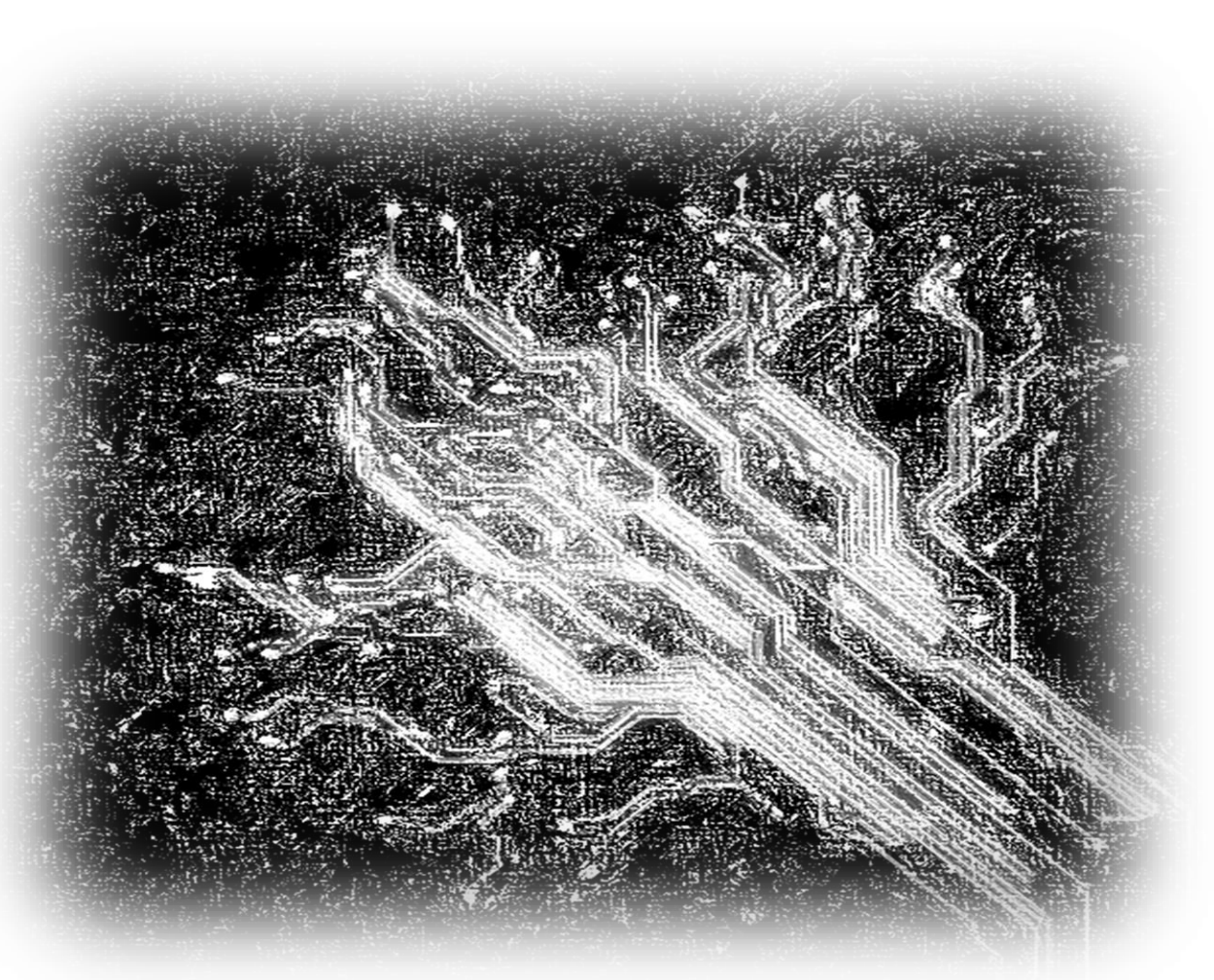


何松柏

电子工程学院



# 电子电路基础



sbhe@uestc.edu.cn

UESTC

# 学生自学检测提问

---

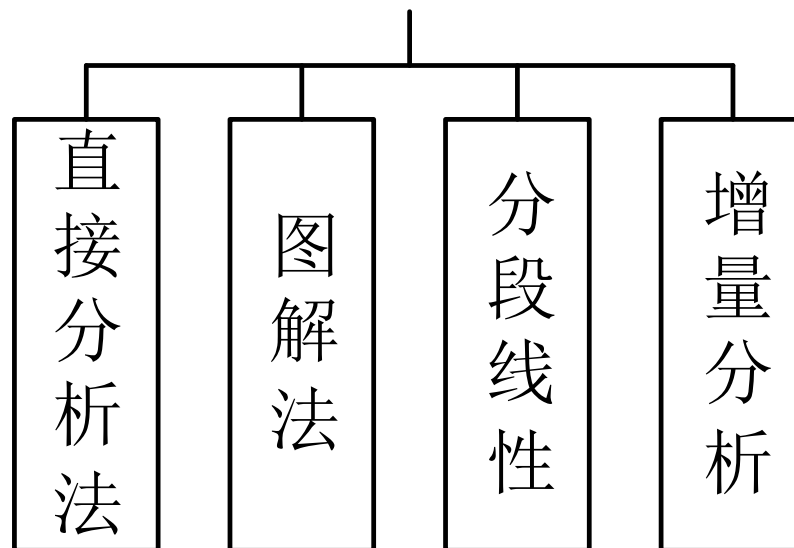
● 有哪些常用半导体器件，这些器件有哪些应用？

# 非线性电路基本分析方法

---

## ● 与线性电阻电路分析方法关系？

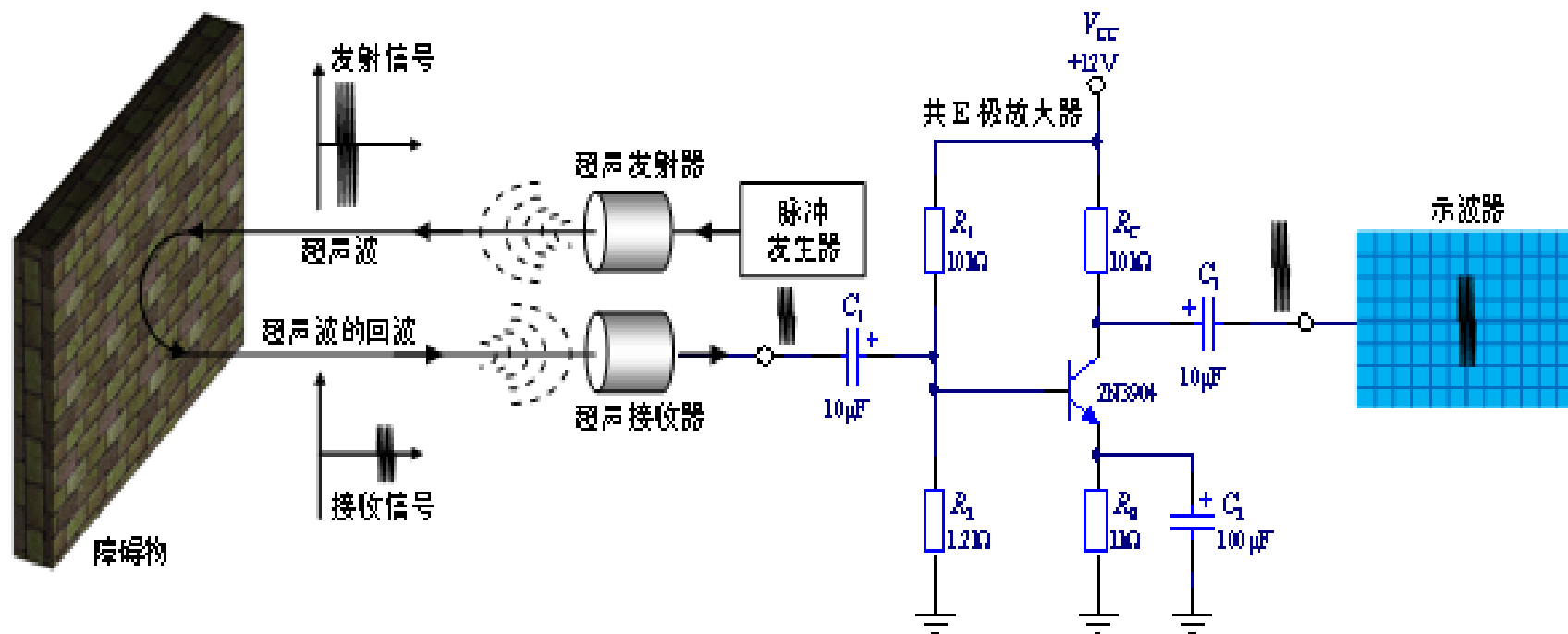
非线性电阻  
电路分析方法



# 半导体电路及基本分析



## 问题引入



# 半导体电路及基本分析

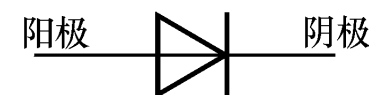
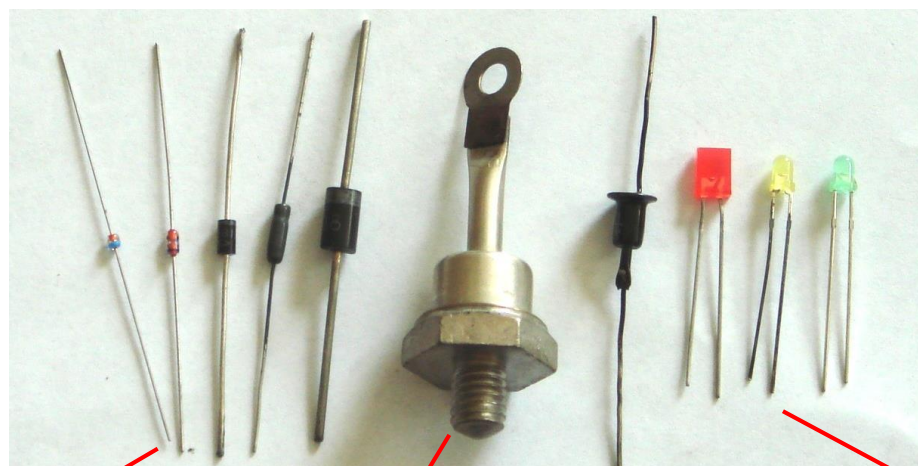
---



- 基本半导体器件
- 含非线性元件电路分析方法
- 晶体管开关特性

## 二极管的基本特性

半导体二极管是用半导体材料制成的电子元器件中的一个大类。  
用半导体材料制成PN结，引出两个电极并加以封装，就构成了二极管。  
根据所用的半导体，有Si管、Ge管和其它材料的二极管。



什么是半导体？  
什么是PN结？

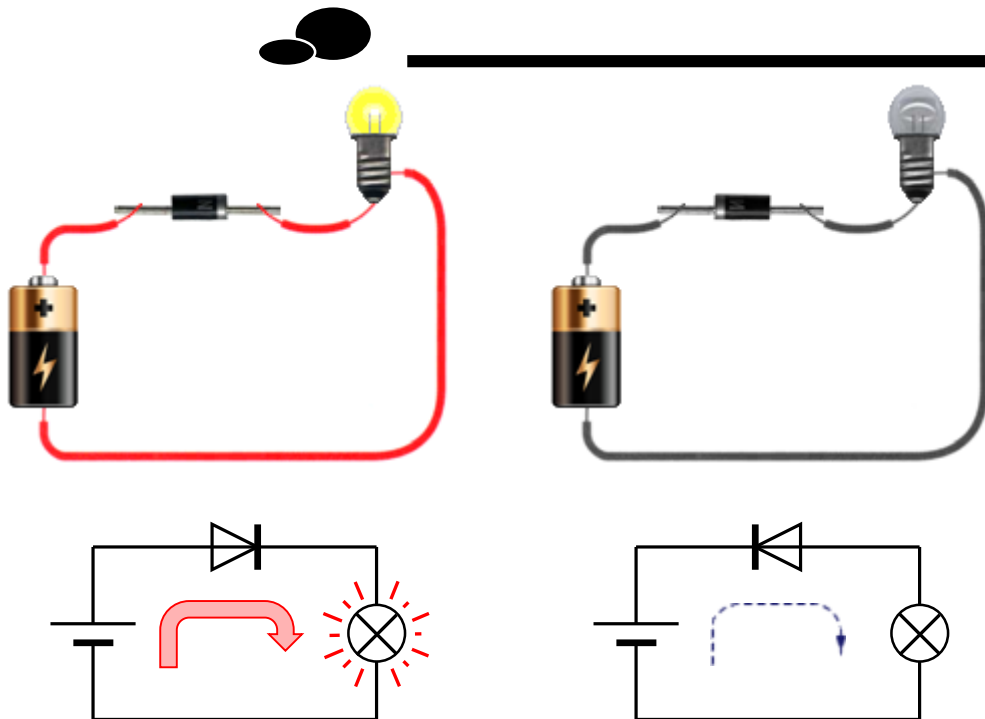
小功率  
二极管

大功率  
二极管

稳压  
二极管

发光  
二极管

# 二极管



半导体二极管最主要的特性是：**单向导电**

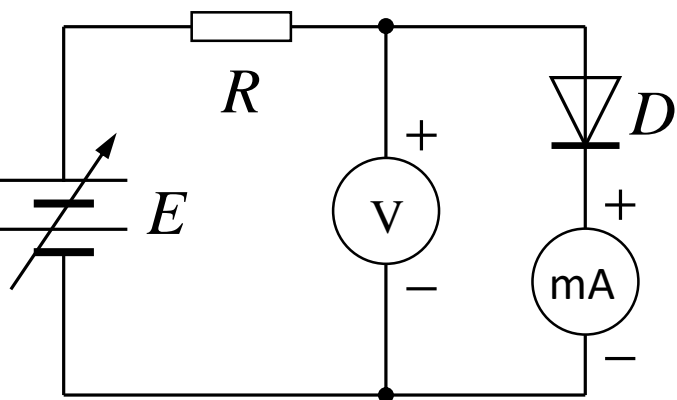
# 二极管

## • 半导体二极管的伏安特性(V-I)

电阻性元件的电流与端电压间的关系称为伏安特性。  $i = g(u)$

我们以1N4001型Si半导体二极管为例，测试研究其伏安特性。

正向特性测试电路

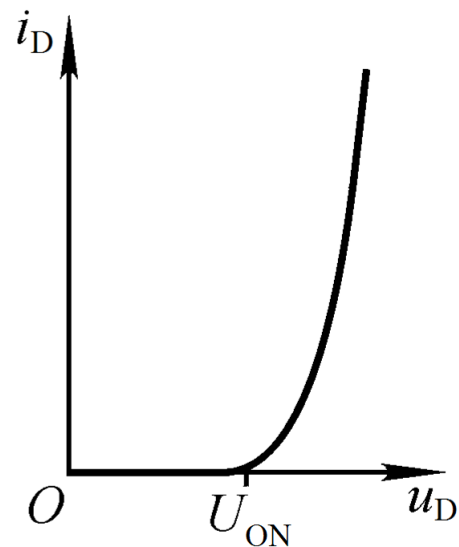


$D$ 为被测二极管  
 $R$ 为限流电阻

正向特性测试数据

$u_D$	$i_D$
0.000V	0.000 $\mu$ A
0.100V	0.189 $\mu$ A
0.200V	1.496 $\mu$ A
0.300V	10.527 $\mu$ A
0.400V	72.940 $\mu$ A
0.500V	504.126 $\mu$ A
0.535V	1.000mA
0.571V	2.000mA
0.592V	3.000mA
0.600V	3.476mA
0.700V	23.625mA
0.800V	147.375mA
0.900V	663.944mA
1.000V	1.796A

正向特性曲线



$U_{ON}$ 称为开启电压



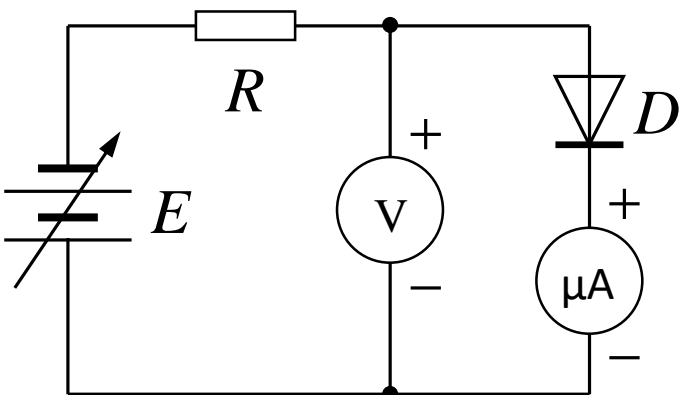
# 二极管

## • 半导体二极管的伏安特性

电阻性元件的电流与端电压间的关系称为伏安特性。  $i = g(u)$

我们以1N4001型Si半导体二极管为例，测试研究其伏安特性。

反向特性测试电路

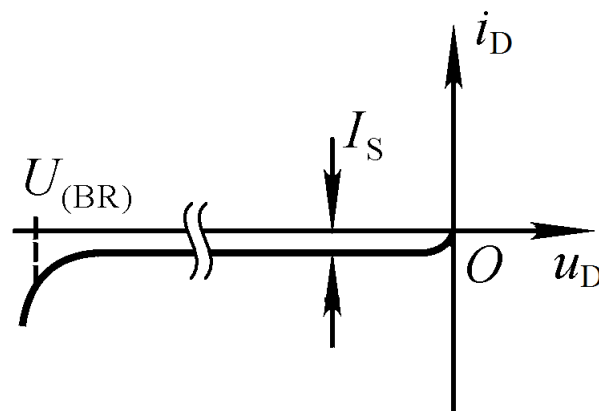


$D$ 为被测二极管  
 $R$ 为限流电阻

反向特性测试数据

$u_D$	$i_D$
0.000V	0.000 $\mu$ A
-0.0625V	-0.022 $\mu$ A
-0.125V	-0.029 $\mu$ A
-0.250V	-0.032 $\mu$ A
-0.500V	-0.032 $\mu$ A
-1.000V	-0.033 $\mu$ A
-2.000V	-0.034 $\mu$ A
-4.000V	-0.036 $\mu$ A
-8.000V	-0.040 $\mu$ A
-16.000V	-0.048 $\mu$ A
-32.000V	-0.064 $\mu$ A
-50.000V	-0.082 $\mu$ A
-52.907V	-1.000 $\mu$ A
-53.027V	-100.000 $\mu$ A
-53.147V	-10.000mA

反向特性曲线

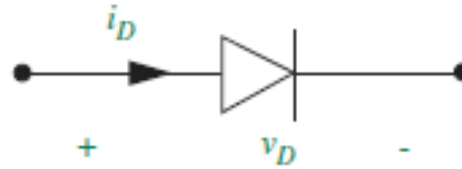


$I_S$  称为反向饱和电流  
 $U_{(BR)}$  称为击穿电压

# 二极管

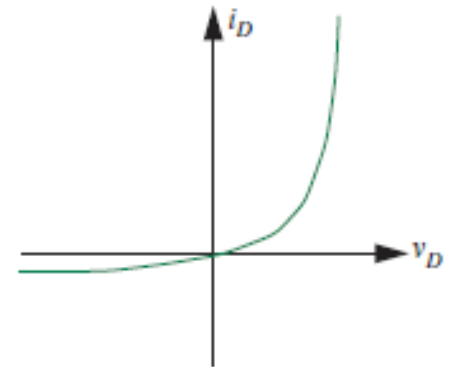


## ● 二极管电路符号



## ● 二极管V-I特性

$$i_D = I_s(e^{v_D/V_{TH}} - 1). \quad (4.1)$$





○大规模集成电路主要工艺

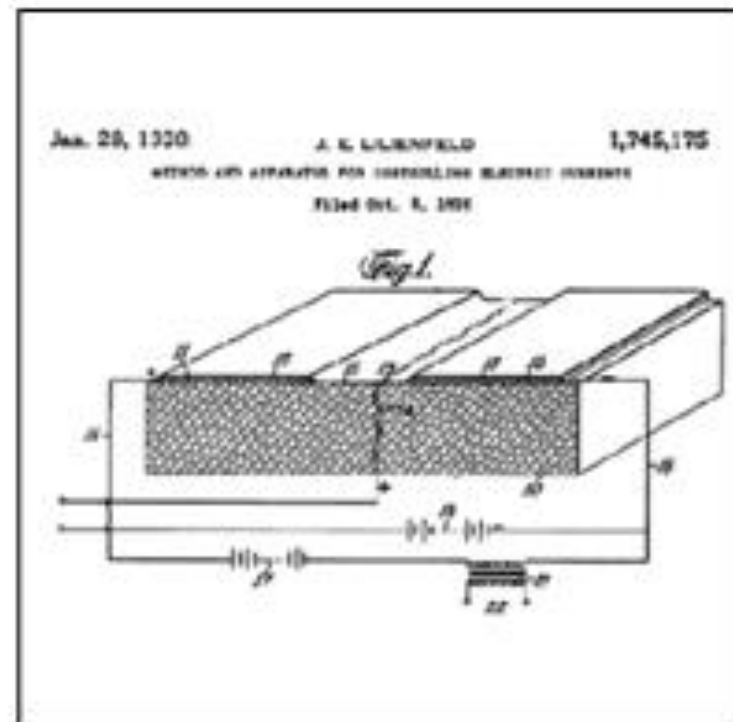
○半导体器件更低的能耗

# MOSFET

场效应管的出现-----1926年



Julius E. Lilienfeld



专利草图

图 12-2 Julius E. Lilienfeld 和他的专利

# FET在今天的应用

MOSFET



# MOSFET

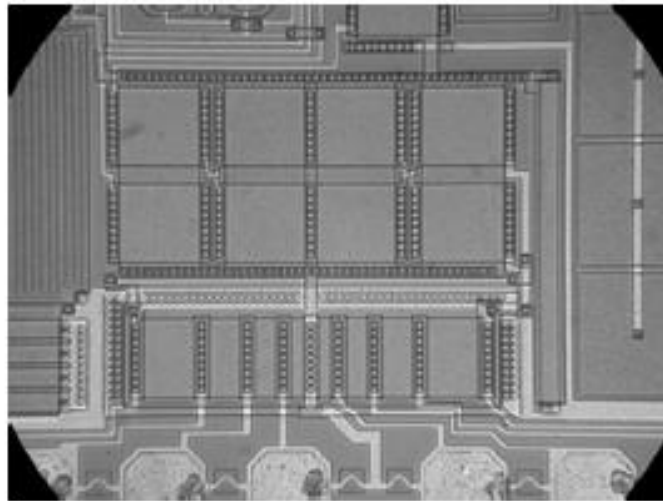


图6.32 (P203) 制造芯片中的N-MOSFET 俯视图

# MOSFET

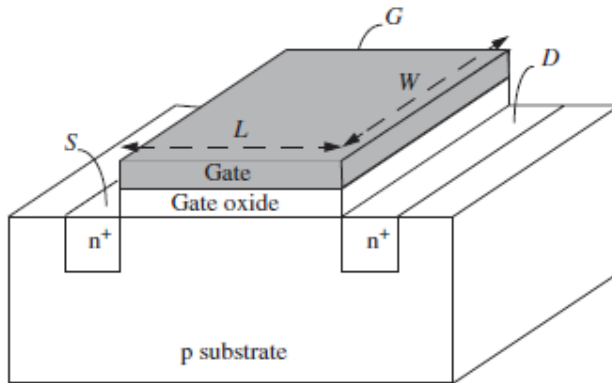


图6.34 (P203) N型MOSFET

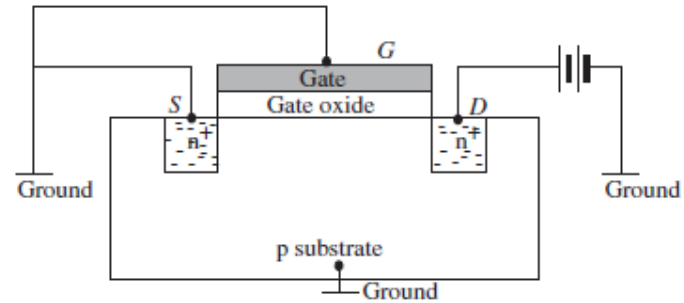


图6.35 (P203)

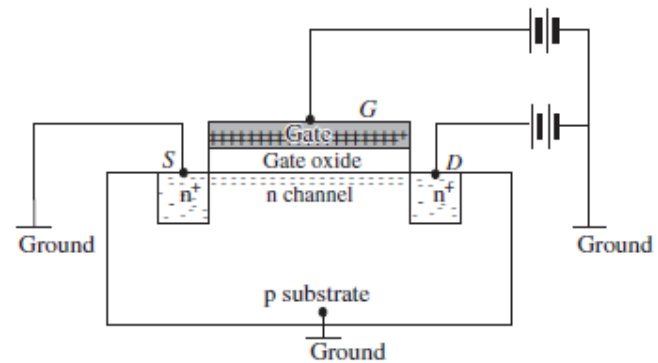


图6.36 (P203)

## ● MOSFET电路特性

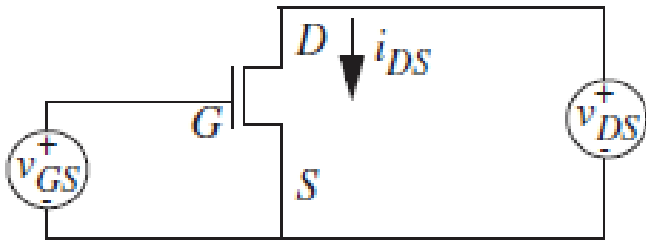


图7.7 (P224) 测量MOSFET特性的电路

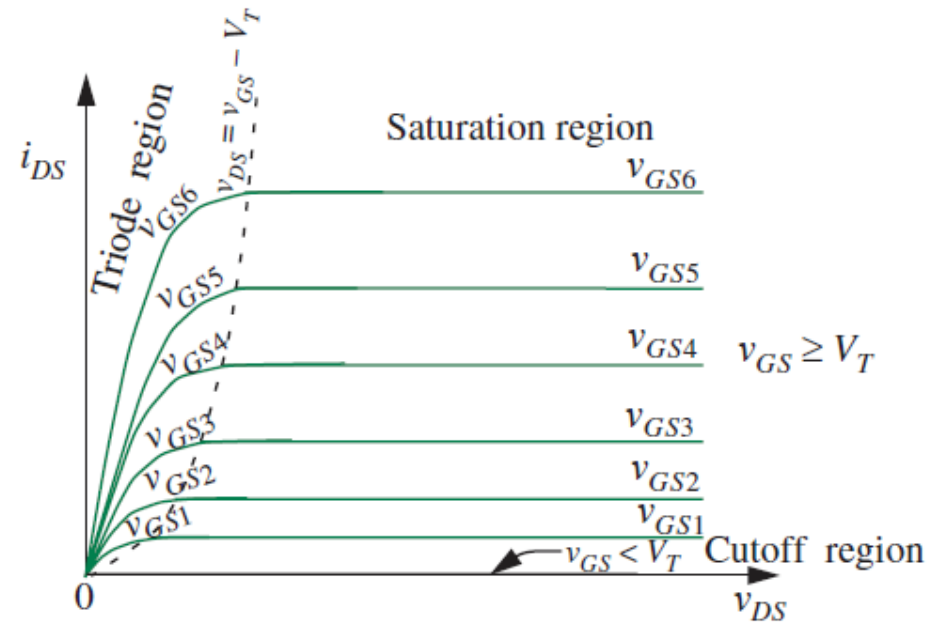


图7.12 (P226) MOSFET特性曲线





● 截止区  $v_{GS} < v_T$     $i_{DS} = 0$

● 饱和区域

$$v_{GS} \geq V_T$$

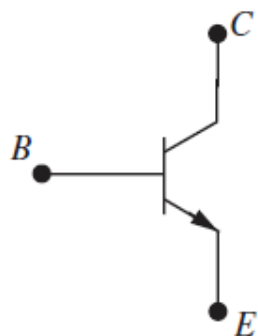
$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_T.$$

$$i_{DS} = \frac{K(v_{GS} - V_T)^2}{2} \quad (7.8)$$

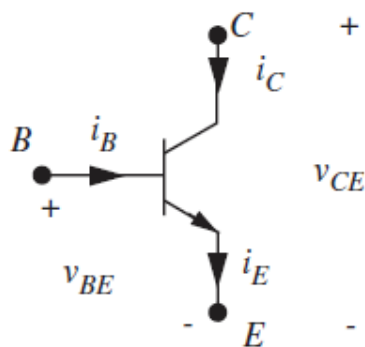
● SR模型（电阻区）  $v_{DS} < v_{GS} - V_T$    and    $v_{GS} \geq V_T.$

$$\frac{v_{DS}}{i_{DS}} = R_{ON}.$$

# BJT



(a)



(b)

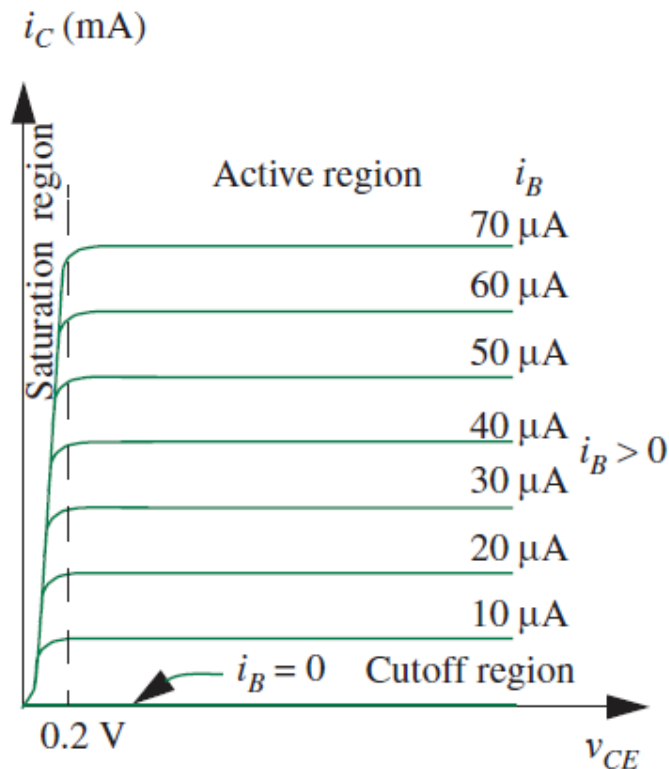
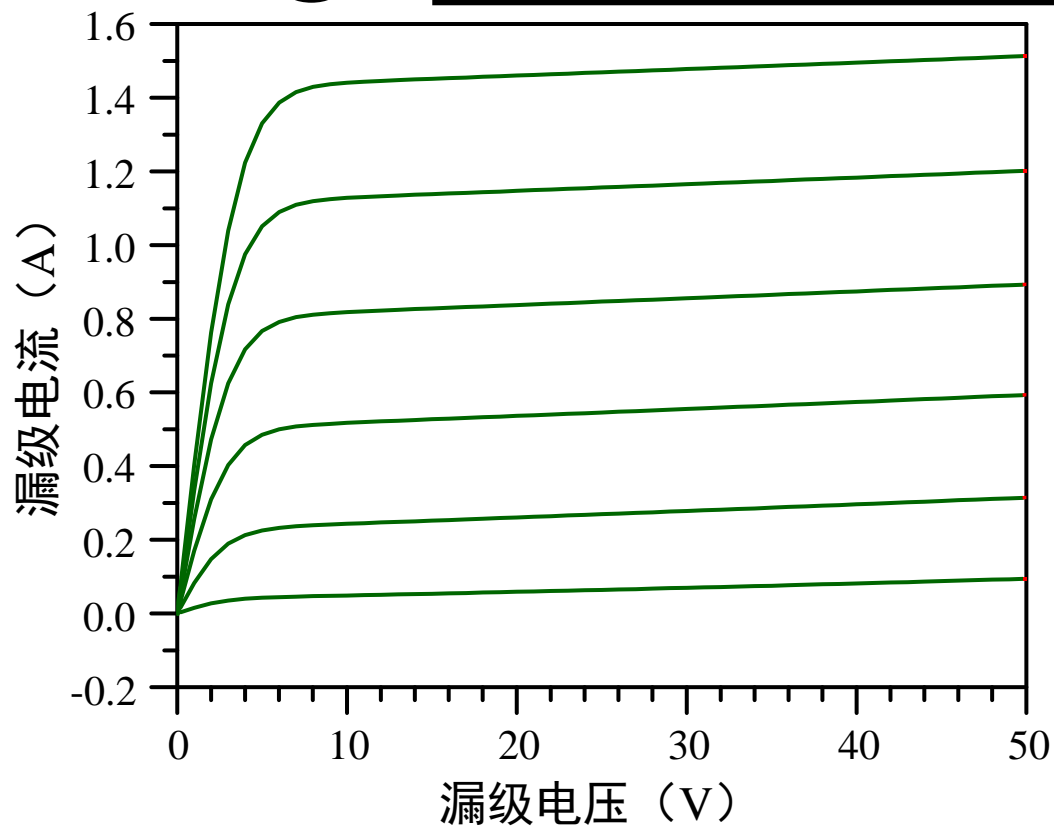


FIGURE 7.47 A bipolar junction transistor.

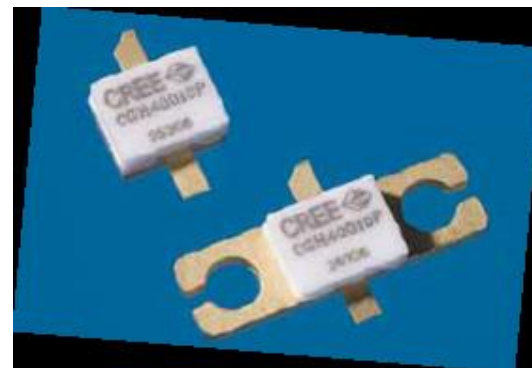
图7.48 (P248) BJT特性曲线

- 如何认识半导体器件的线性和非线性特性？
- 其它晶体管如GaAs FET, GaN FET等是否类似V-I特性？
- 理解晶体管工作状态(V-I特性) 与所加信号幅度大小有关

# GaN FET



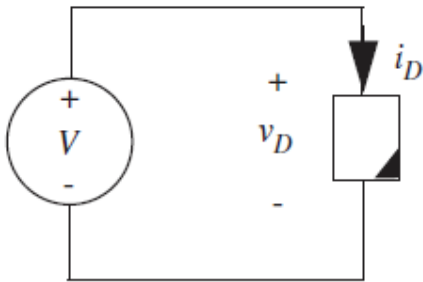
CGH40010 GaN HEMT 输出特性曲线



[www.cree.com/rf](http://www.cree.com/rf)

# 含非线性半导体器件电路基本分析

---



$$i_D = I_S(e^{v_D/V_{TH}} - 1).$$

FIGURE 4.6 A circuit containing the nonlinear device.

参见教材P129，例4.2

● 自学检测提问：如何求解？有哪些方法？

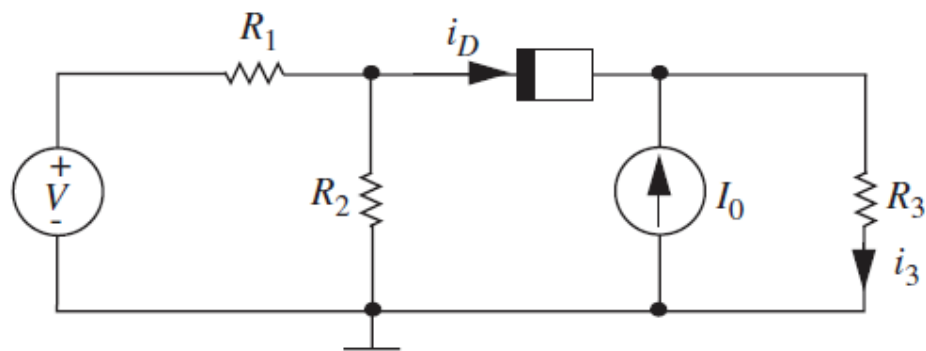
# 非线性电路分析方法

---



- 直接分析
- 图形分析（图解法）
- 分段线性法
- 增量小信号分析

# 非线性电路分析-直接法

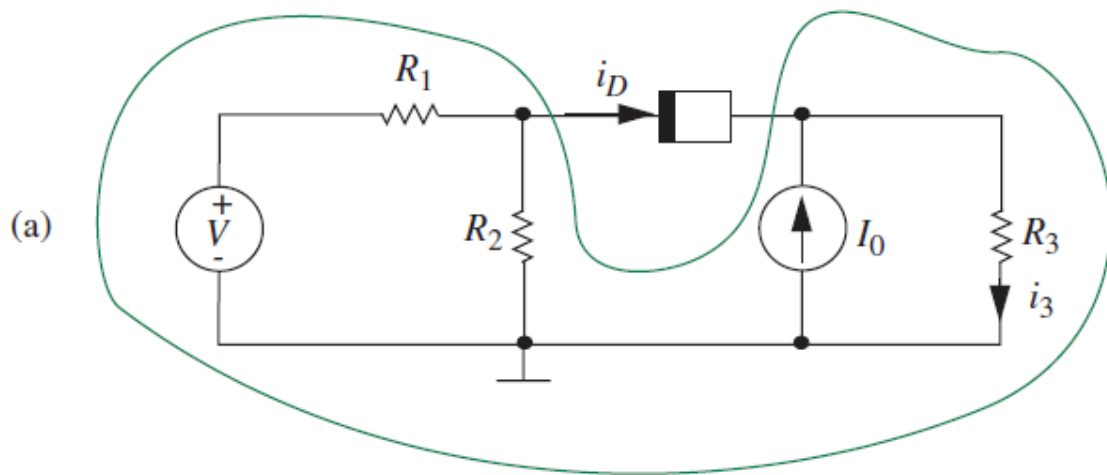


$$i_D = \begin{cases} K v_D^2 & \text{for } v_D > 0 \\ 0 & \text{for } v_D \leq 0. \end{cases}$$

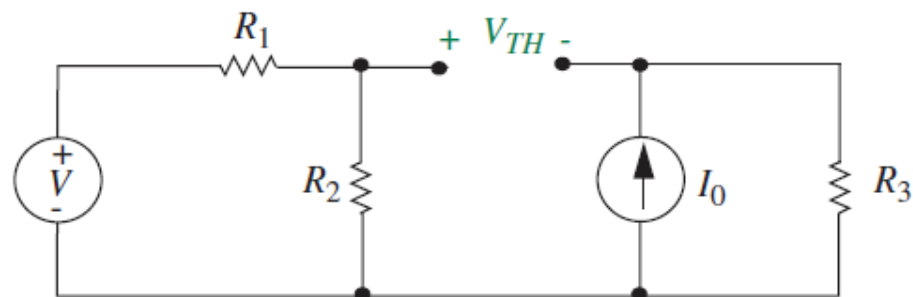
图4.12 (P131)

# 非线性电路分析-直接法

## ● 分析过程

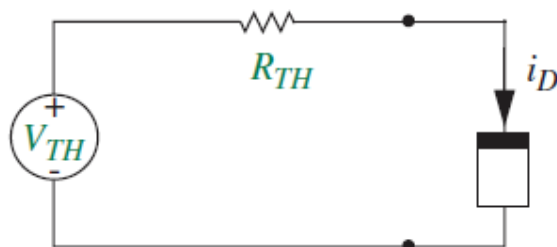


戴维南等效





# 非线性电路分析-直接法

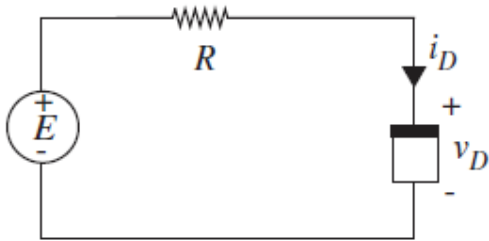


$$V_{TH} = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_0 R_3.$$

$$R_{TH} = (R_1 || R_2) + R_3.$$

# 非线性电路分析-直接法

## ● 列写方程



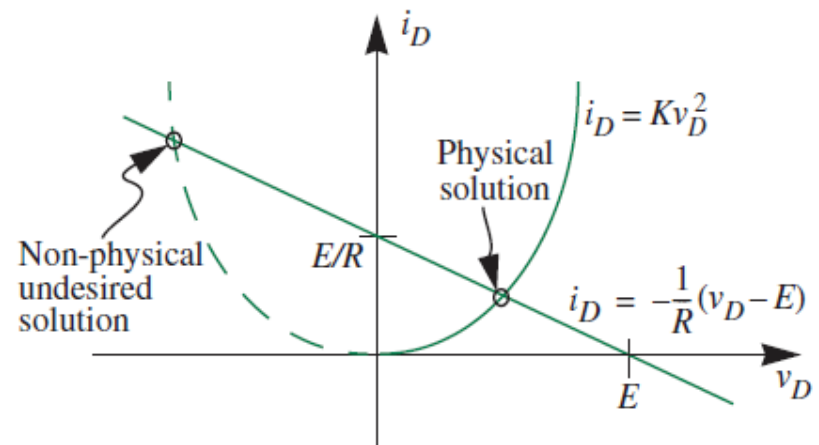
$$\frac{v_D - E}{R} + i_D = 0$$

$$i_D = \begin{cases} Kv_D^2 & \text{for } v_D > 0 \\ 0 & \text{for } v_D \leq 0. \end{cases}$$

问题：该方程组负解如何处理？

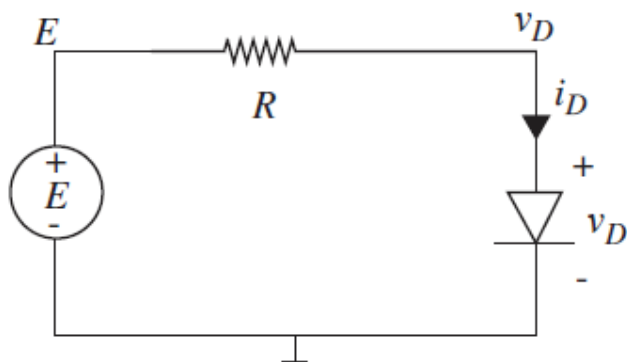
$$RKv_D^2 + v_D - E = 0.$$

$$v_D = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4RKE}}{RK}.$$



# 非线性电路分析-图解法

- 问题引出---指数函数非线性（超越方程如何求解）

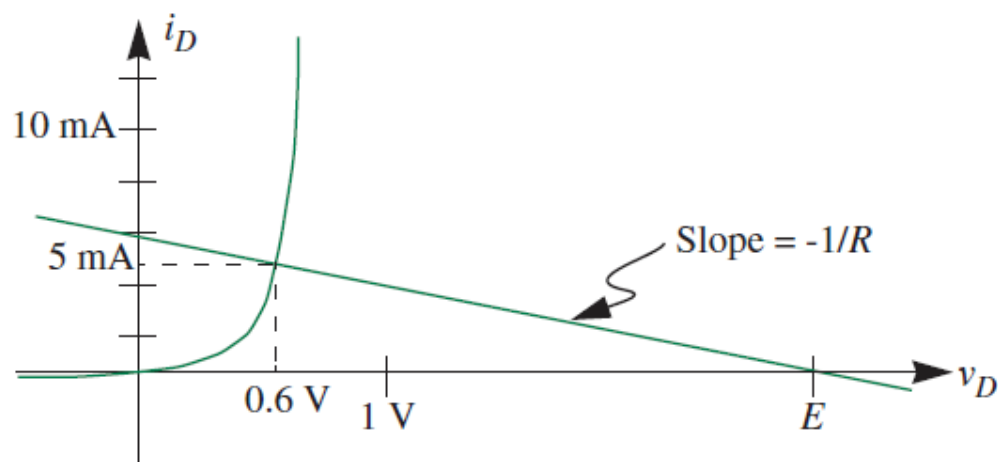


$$\frac{v_D - E}{R} + i_D = 0$$
$$i_D = I_s(e^{v_D/V_{TH}} - 1).$$



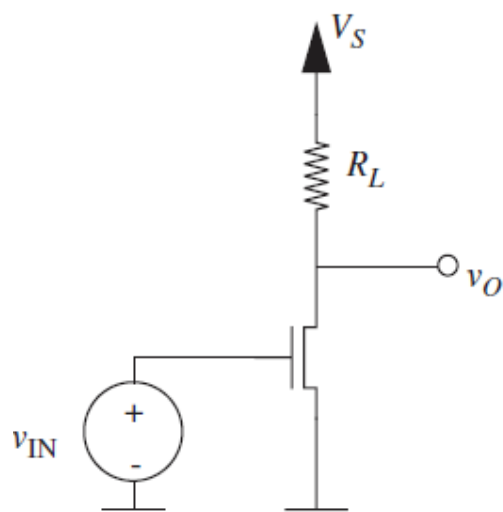
$$\frac{v_D - E}{R} + I_s(e^{v_D/V_{TH}} - 1) = 0.$$

# 非线性电路分析-图解法



负载线 (Load line)

电路如图所示，通过查阅资料，给出漏源端口输出负载线（示意图）



MOSFET基本放大电路

条件

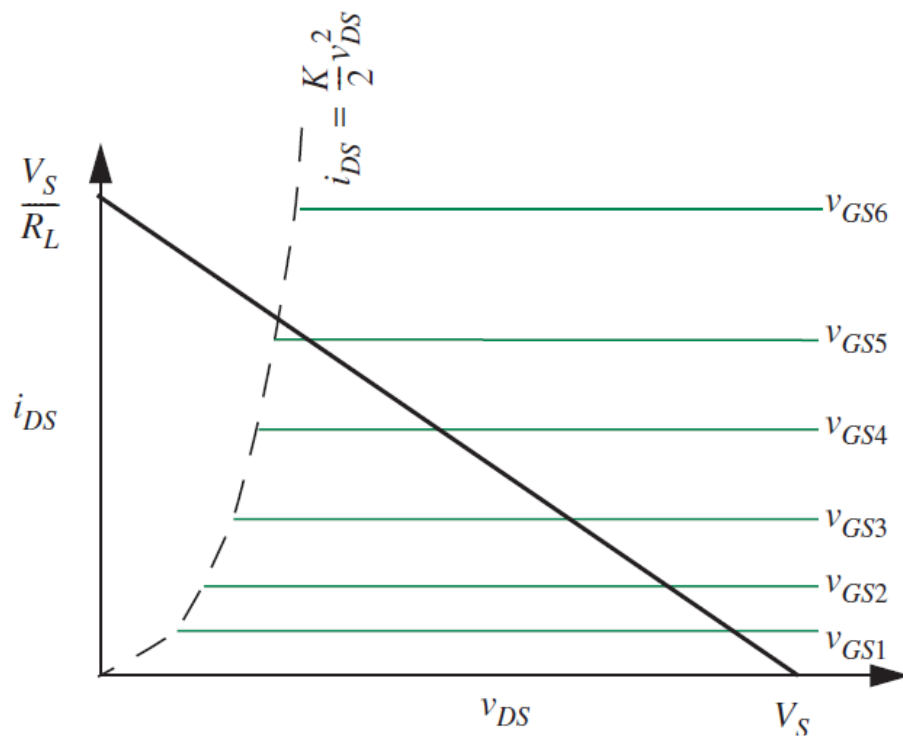
$$v_{IN} \geq V_T$$



$$v_O \geq v_{IN} - V_T.$$

负载线？

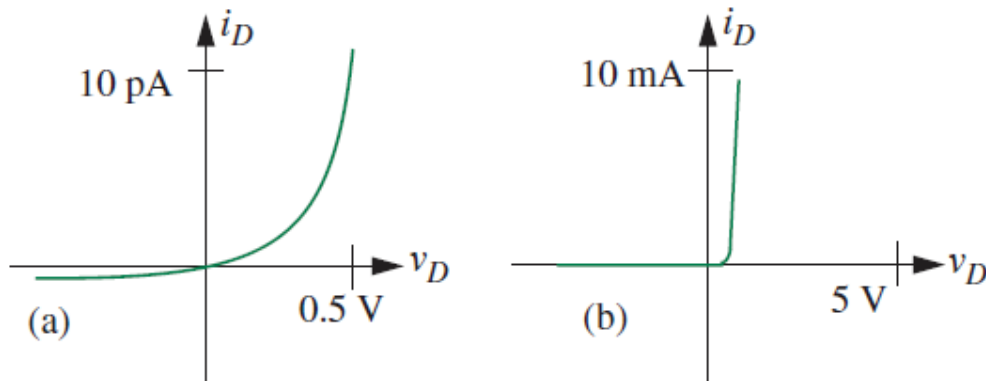
# 图解法 - 负载线



MOSFET基本放大器负载线

# 非线性电路分析-分段线性

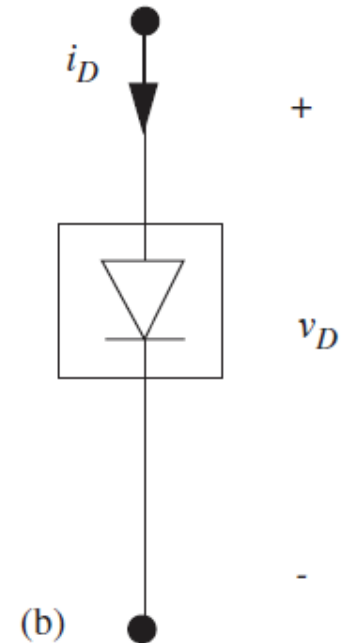
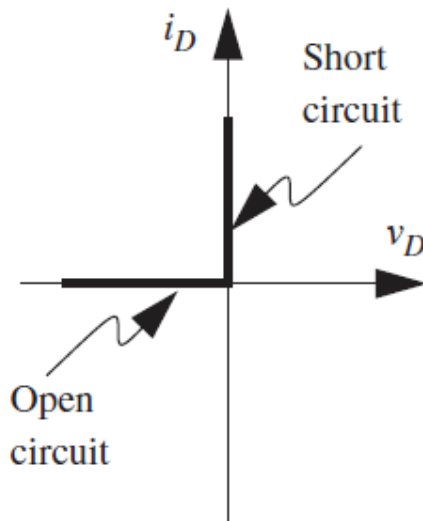
## 实际二极管特性



注意单位刻度—与误差相关

# 非线性电路分析-分段线性

## 理想二极管特性

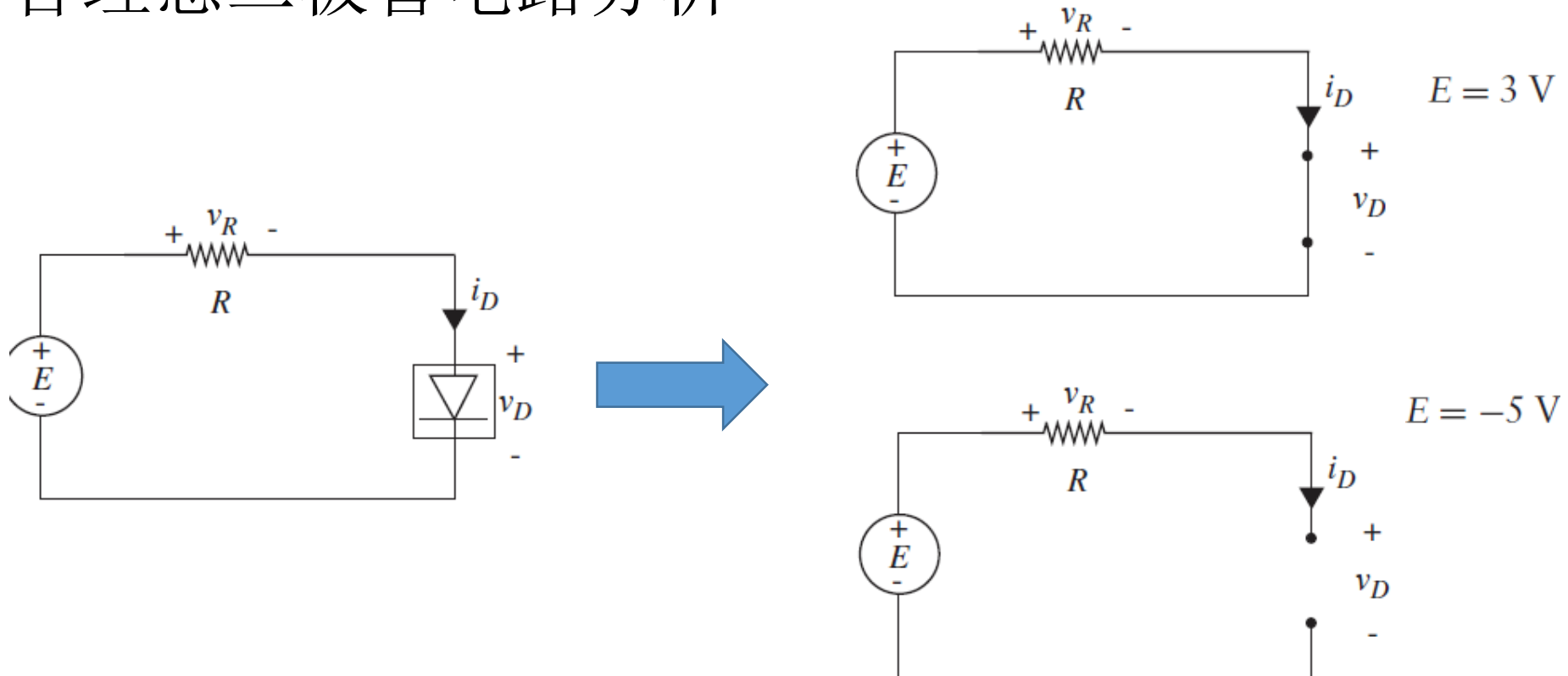


Diode ON (short circuit):  $v_D = 0$  for all positive  $i_D$ .  
Diode OFF (open circuit):  $i_D = 0$  for all negative  $v_D$ .

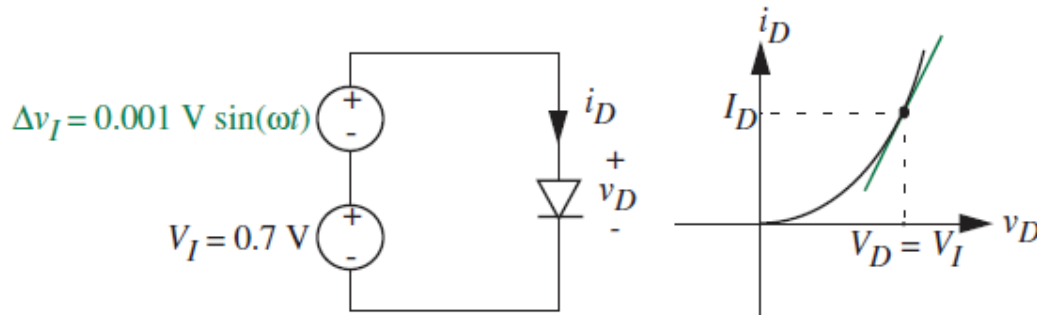


# 非线性电路分析-分段线性

## 含理想二极管电路分析



# 非线性电路分析-增量分析



怎么求解？

$$i_D = I_s \left( e^{(0.7 \text{ V} + 0.001 \text{ V} \sin(\omega t))/V_{TH}} - 1 \right)$$

给出该方程求解的过程

$$i_D = I_s \left( e^{(0.7 \text{ V} + 0.001 \text{ V} \sin(\omega t)) / V_{TH}} - 1 \right)$$

# 非线性电路分析-增量分析

## 回忆泰勒级数

$$i_D = f(v_D) = f(V_D) + \left. \frac{df}{dv_D} \right|_{V_D} (v_D - V_D) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{dv_D^2} \right|_{V_D} (v_D - V_D)^2 + \dots$$



$$i_D = I_s (e^{V_D/V_{TH}} - 1) + (I_s e^{V_D/V_{TH}}) \left[ \frac{1}{V_{TH}} \Delta v_D + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{V_{TH}} \right)^2 (\Delta v_D)^2 + \dots \right].$$



# 非线性电路分析-增量分析

忽略高次项

$$i_D = I_s \left( e^{V_D/V_{TH}} - 1 \right) + \left( I_s e^{V_D/V_{TH}} \right) \left[ \frac{1}{V_{TH}} \Delta v_D \right].$$



$$I_D + \Delta i_D = I_s \left( e^{V_D/V_{TH}} - 1 \right) + \left( I_s e^{V_D/V_{TH}} \right) \left[ \frac{1}{V_{TH}} \Delta v_D \right]$$

# 非线性电路分析-增量分析

结论:

● 二极管上流过的电流包含DC和小的扰 $\Delta i_D$

$$I_D = I_s (e^{V_D/V_{TH}} - 1)$$

$$\Delta i_D = (I_s e^{V_D/V_{TH}}) \frac{1}{V_{TH}} \Delta v_D.$$



等效电导

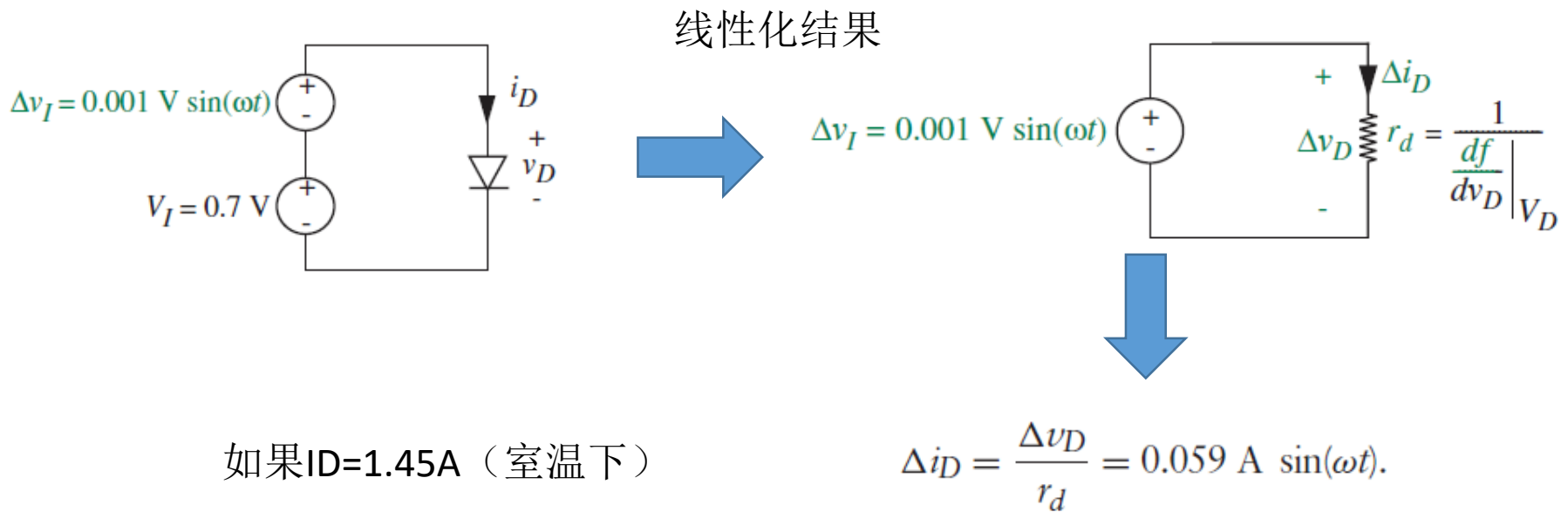
$$\frac{\Delta i_D}{\Delta v_D} = g_d = \frac{1}{V_{TH}} I_D$$



$$r_d = \frac{1}{\left. \frac{df}{dv_D} \right|_{v_D=V_D}}.$$

$$r_d = \frac{V_{TH}}{I_D}$$

# 非线性电路分析-增量分析



方法小结 P146

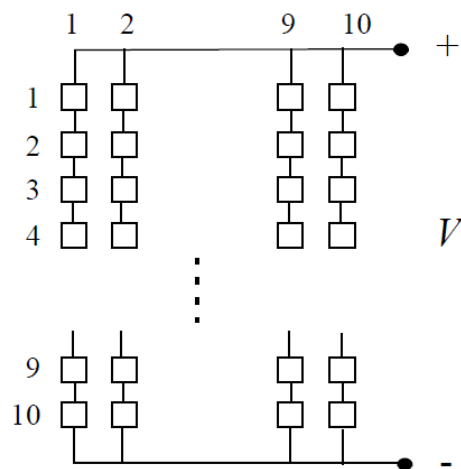
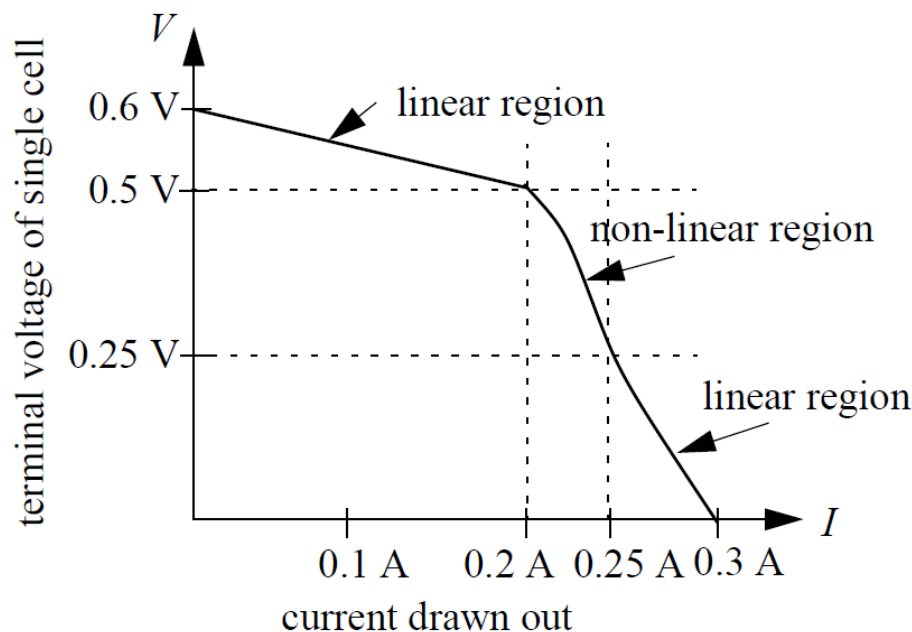
# 课堂交流讨论

---

● 不同分析方法适用范围及特点？

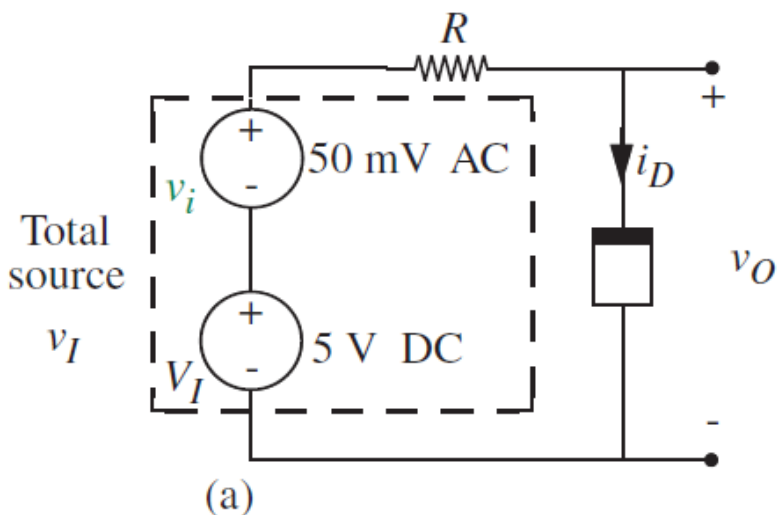


下图左所示的太阳能电池单元输出V-I特性，电路连接如右图，输出连接3欧姆电阻，分析电阻上电压电流。



稳压器:减小输出电压纹波。分析输出电压 $V_O$ 纹波系数 ( $R=1000$ 欧姆)

The current  $i_D$  is 0 for  $v_O \leq 0$ . Assume  $K = 1 \text{ mA/V}^2$ .

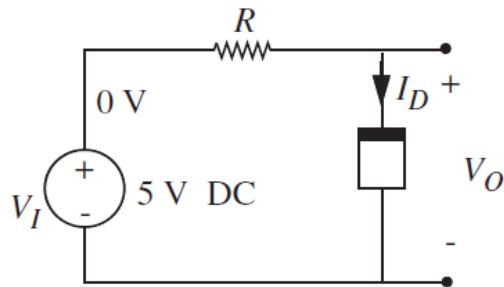


$$i_D = K v_O^2 \quad \text{for } v_O > 0.$$

进一步讨论：如何选择电路，使输出电压纹波更小？

# 稳压器分析

## 输出直流分析

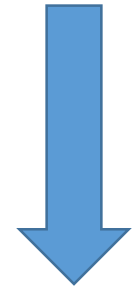


$$-V_I + I_D R + V_O = 0$$

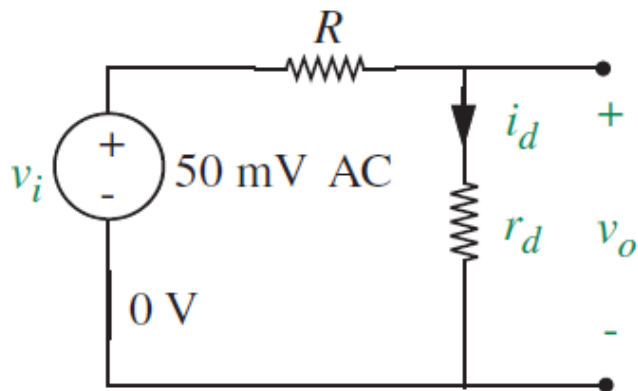
$$I_D = KV_O^2$$

$$V_O = 1.8 \text{ V}$$

$$I_D = 3.24 \text{ mA}$$



## 输出增量小信号分析



$$i_d = \left. \frac{d(Kv_O^2)}{dv_O} \right|_{v_O=V_O} v_o$$

$$r_d = \frac{1}{\left. \frac{d(Kv_O^2)}{dv_O} \right|_{v_O=V_O}}.$$

$$r_d = \frac{1}{2KV_O} = 278 \, \Omega.$$

# 稳压器分析



$$\begin{aligned}v_o &= v_i \frac{r_d}{R + r_d} \\&= 50 \times 10^{-3} \frac{278}{1000 + 278} = 10.9 \text{ mV.}\end{aligned}$$

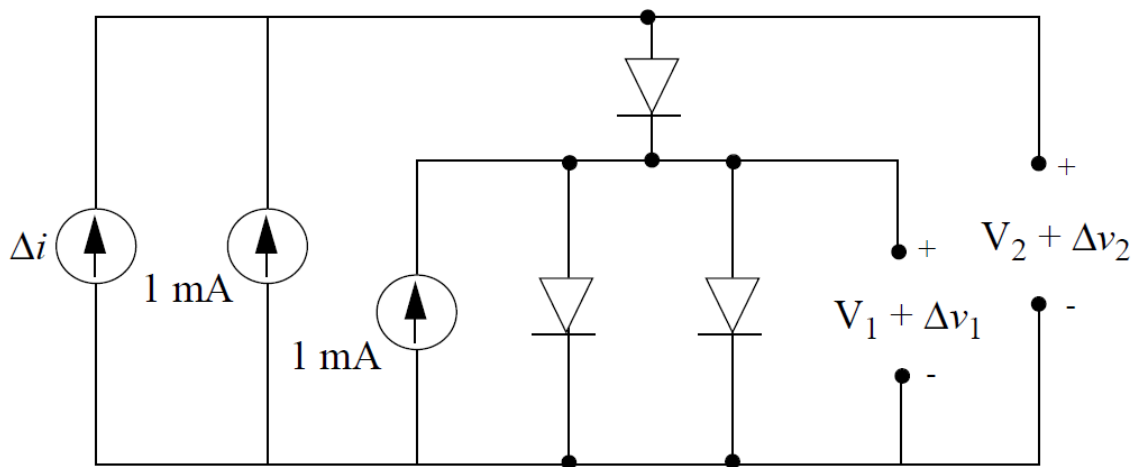
$$i_d = \frac{v_o}{r_d} = \frac{0.0109}{278} = 0.039 \text{ mA.}$$

$$\text{fractional ripple} = \frac{50 \times 10^{-3}}{5} = 10^{-2}$$

$$\text{fractional ripple} = \frac{10.9 \times 10^{-3}}{1.8} \simeq 0.6 \times 10^{-2},$$

如图所示电路。(1) 分析V1和V2; (2) 求  $\Delta v_1/\Delta v_2$  ?

$$i_D = I_S e^{(v_D/25mV)} \quad \text{where } I_S = 1mA/e^{25}$$



# 本章内容总结

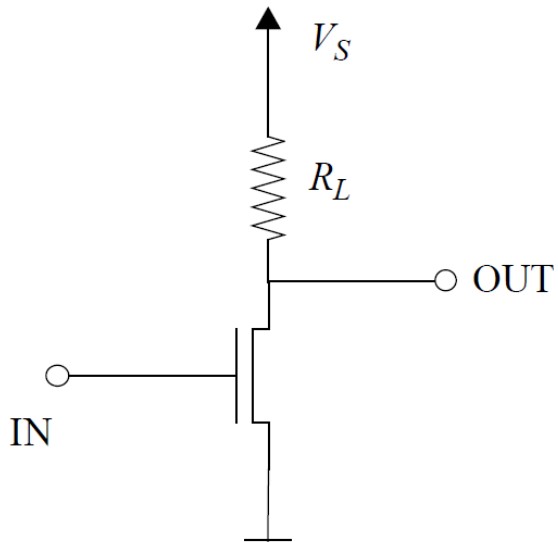
---

关键词：非线性元器件，图解法，  
线性化，增量小信号分析



含半导体器件的电路分析

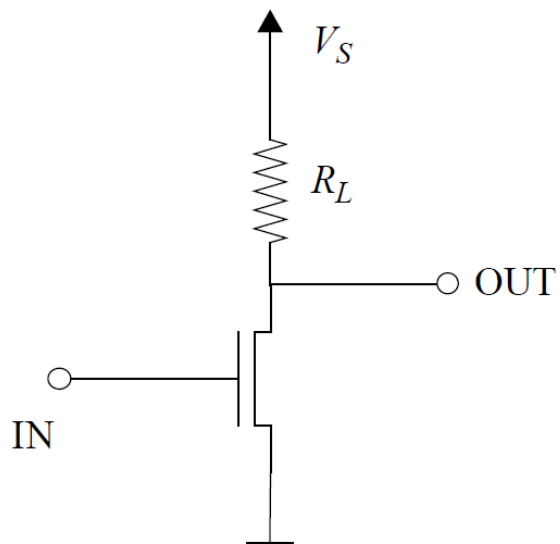
## ● 半导体开关电路原理及仿真设计



$V_T = 2V$ . Assume that  $V_S = 5V$  and  $R_L = 10k$ .



给出开关输入输出电压关系曲线



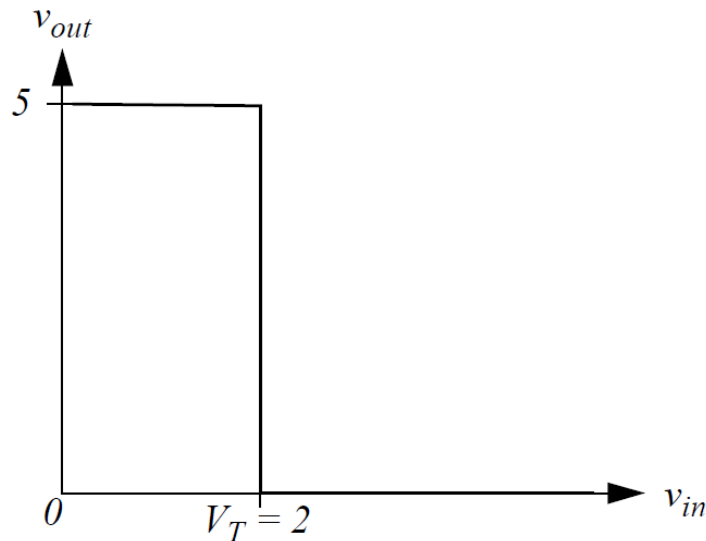
$V_T = 2V$ . Assume that  $V_S = 5V$  and  $R_L = 10k$ .

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



- 假设MOSFET导通状态电阻为零，给出输入输出曲线



进一步探讨，开关电路与放大电路在电路参数选择时需要注意什么？

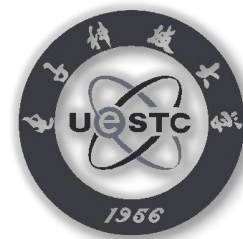
# 本章习题

---

● 练习7.5, 7.6 (P261)

● 练习4.4, (P152) 4.3, 4.7

● 问题4.4, 4.11 (P155)



何松柏  
电子工程学院

谢谢！

UESTC

sbhe@uestc.edu.cn

