

# 模拟与数字电路

## Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十五讲： 半导体器件（一）二极管、晶体管

Lecture 15: **Semiconductor (1) Diode, transistor**

主 讲： 陈 迟 晓

Instructor: Chixiao Chen

# 提纲

- 复习
  - 模拟信号 与 数字信号的差别?
- 半导体材料
- PN与二极管
- 双极性晶体管 BJT
- 金属 - 氧化物 - 半导体 场效应管

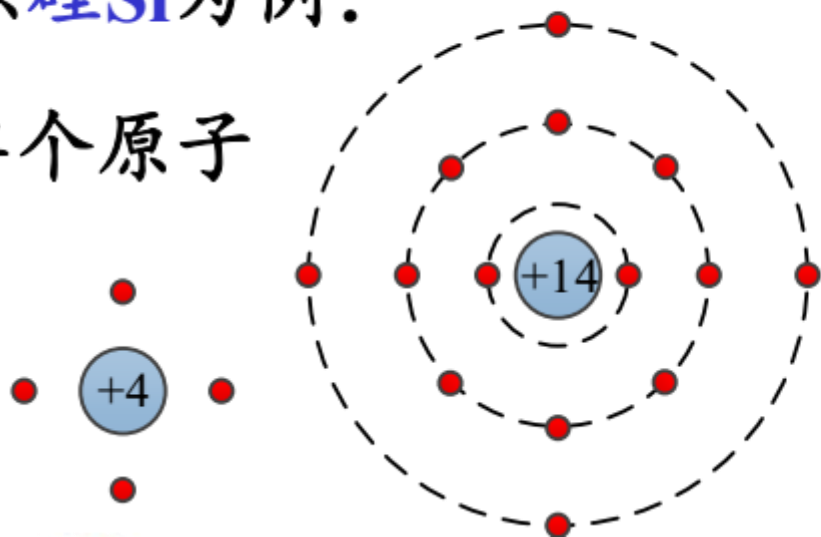


# 半导体架构——晶格

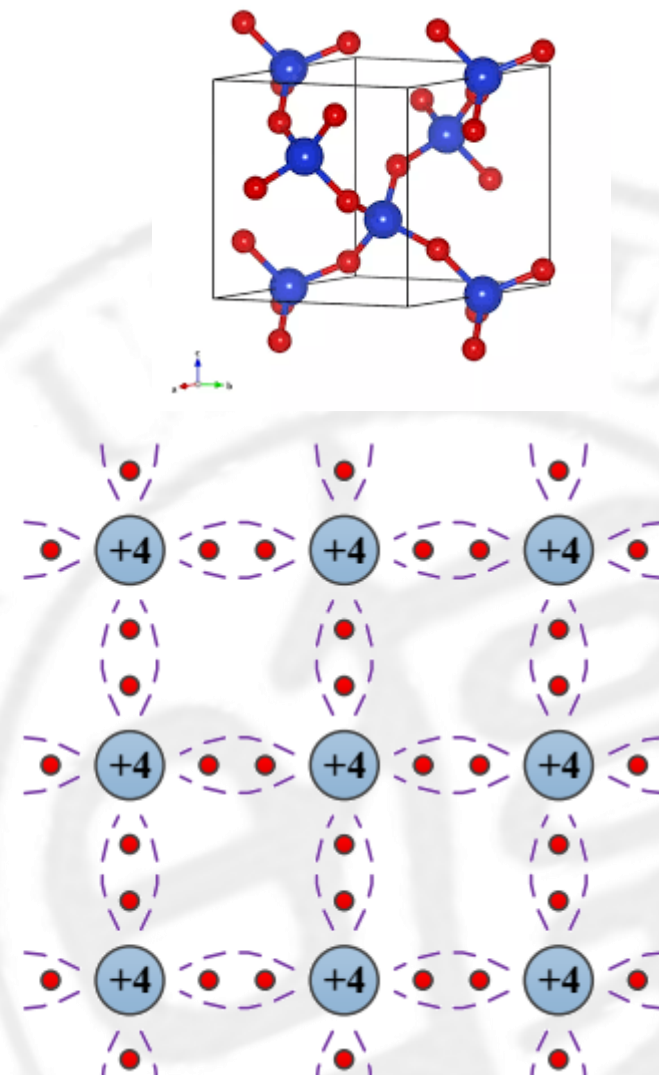
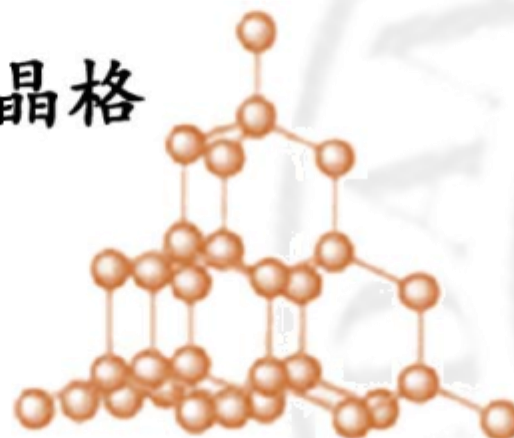
- 最常见的半导体材料——硅（碳/锗）

以**硅Si**为例：

单个原子

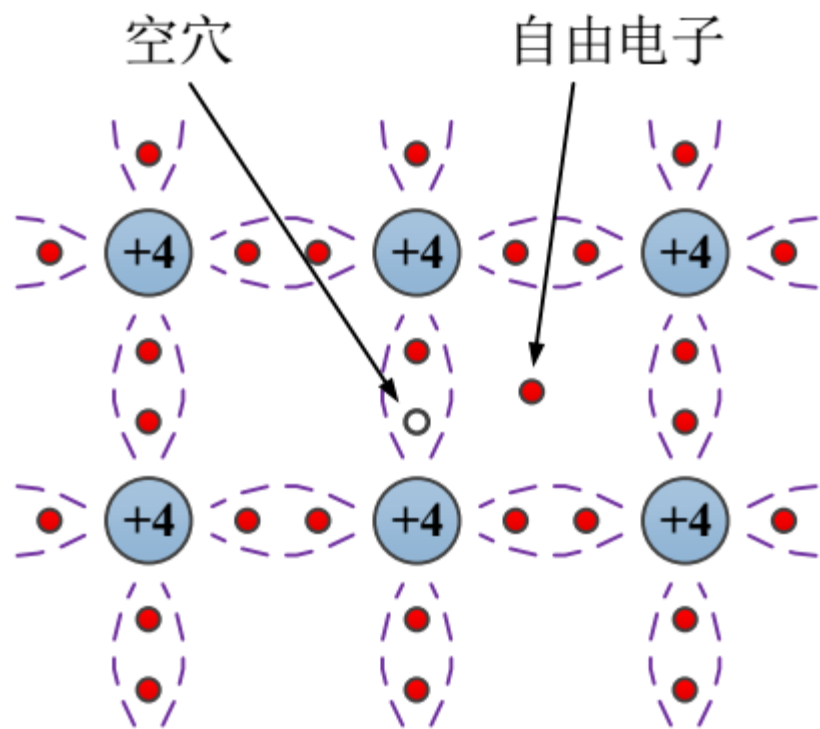


晶格



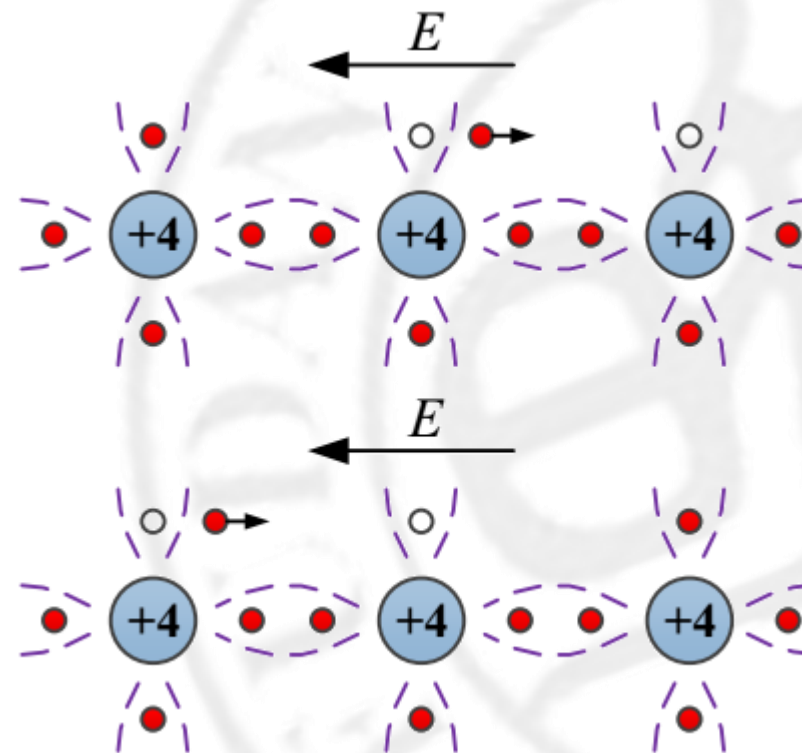
# 导电原理

- 电子、空穴



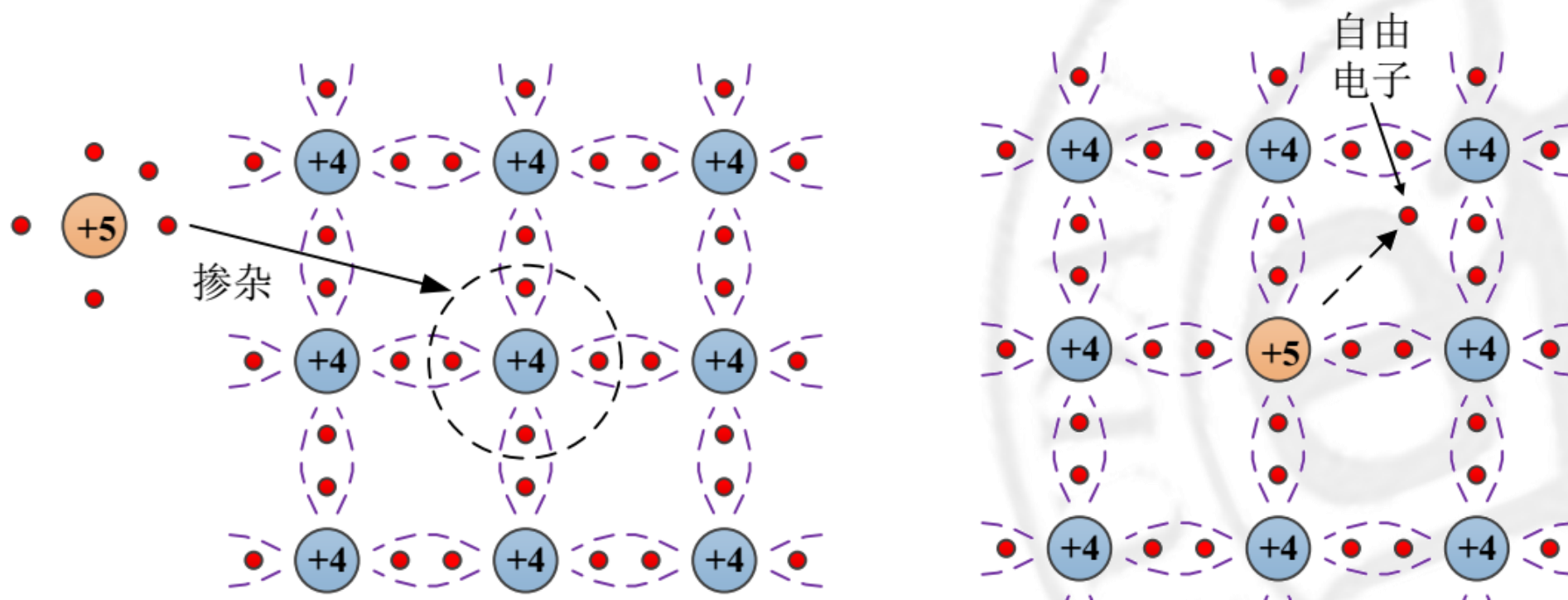
- 电流形成原理

- 外加电场下，载流子的移动  $\rightarrow$  电流
- 电子移动 等效于 空穴的反向移动

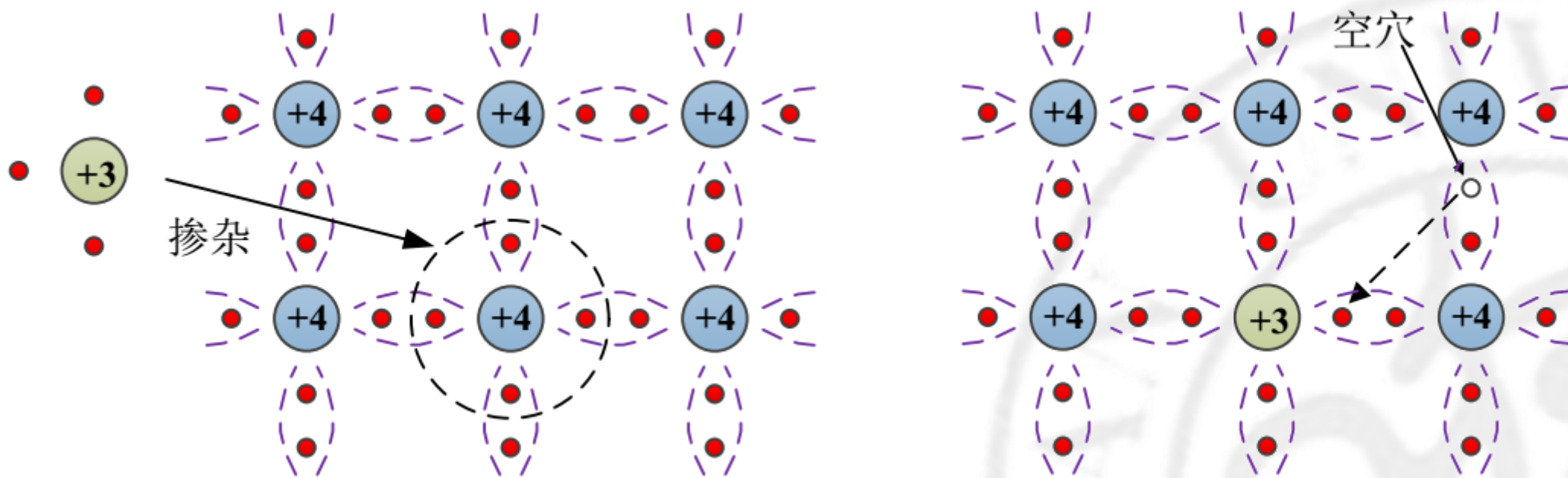


# 杂质半导体——N型半导体

- 本征纯净的Si的载流子非常少，可视为不导电。
- 通过磷参杂技术，改变Si的导电特性



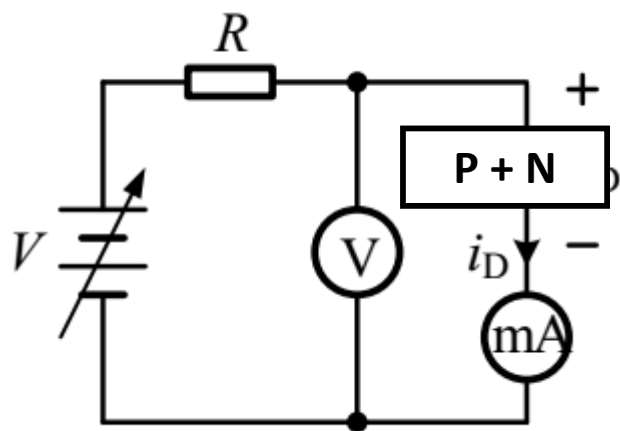
# 杂质半导体——P型半导体



- N型半导体 典型掺杂材料：磷（P） 多子：自由电子 少子：空穴
- P型半导体 典型掺杂材料：硼（B） 多子：空穴 少子：自由电子

# PN Junction (PN结)

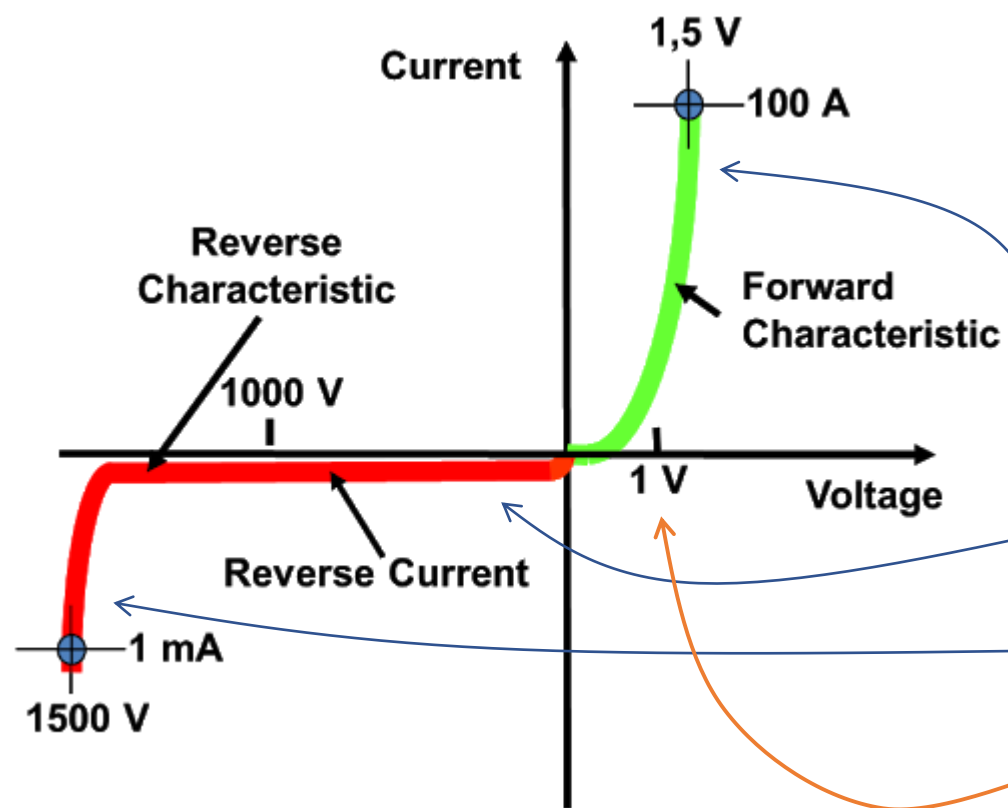
- 若将P型半导体与N型半导体在同一片Si上实现，会发生什么？



- 上述结构称为PN结

# PN Junction (PN结)

- 电压-电流 特性曲线 (伏安特性曲线)

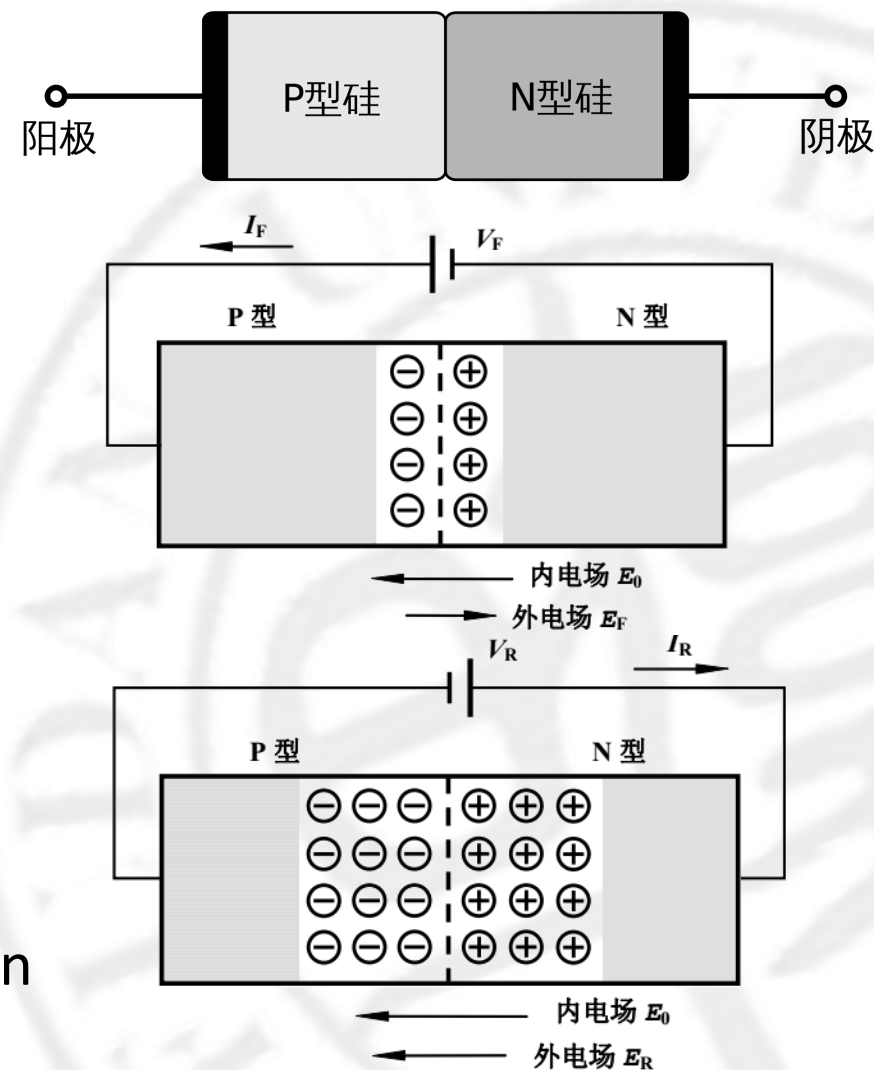


正向导通区

反向导通区

反向击穿区

导通电压  $V_{on}$

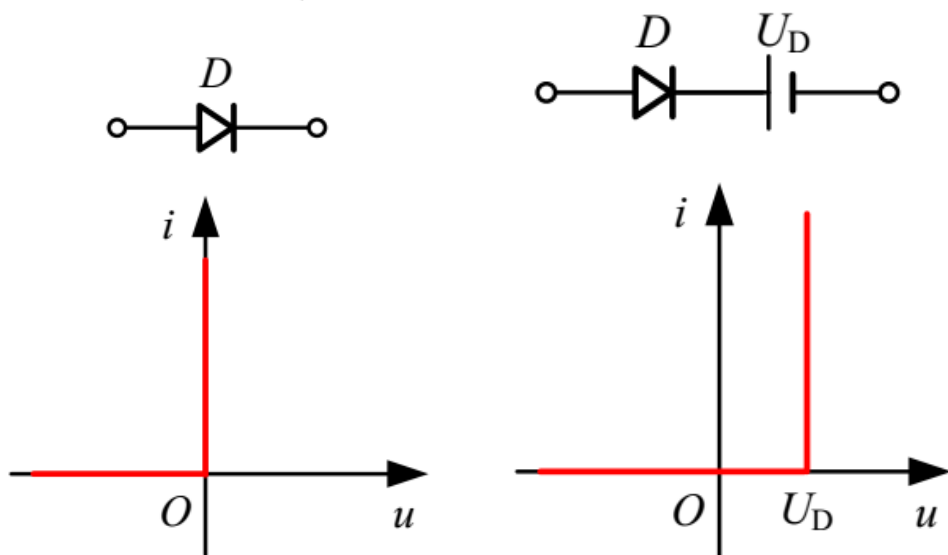




# PN结 等效模型

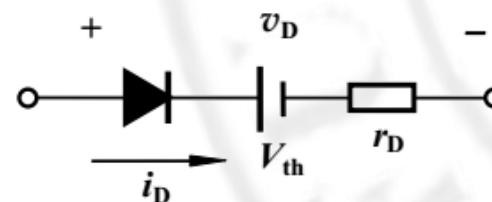
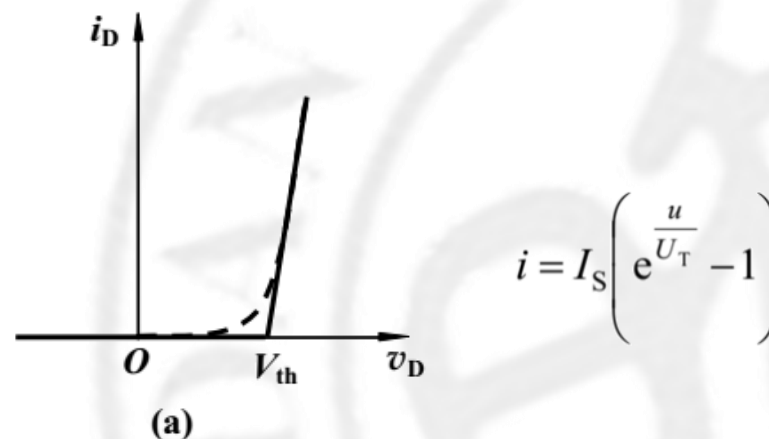
- 理想模型
  - 基于偏置电压的开关，二极管
  - 恒压模型

## 理想二极管



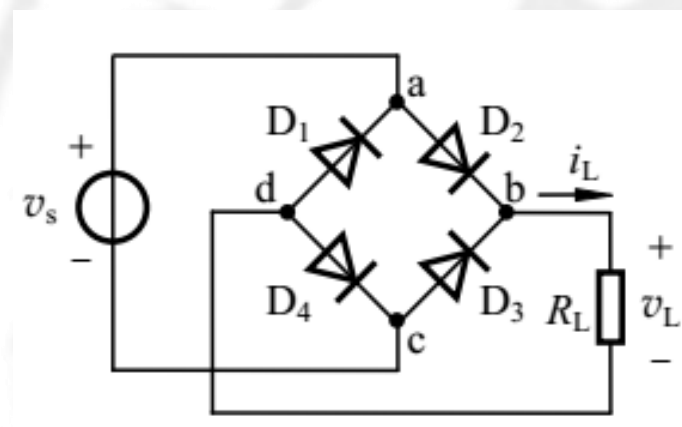
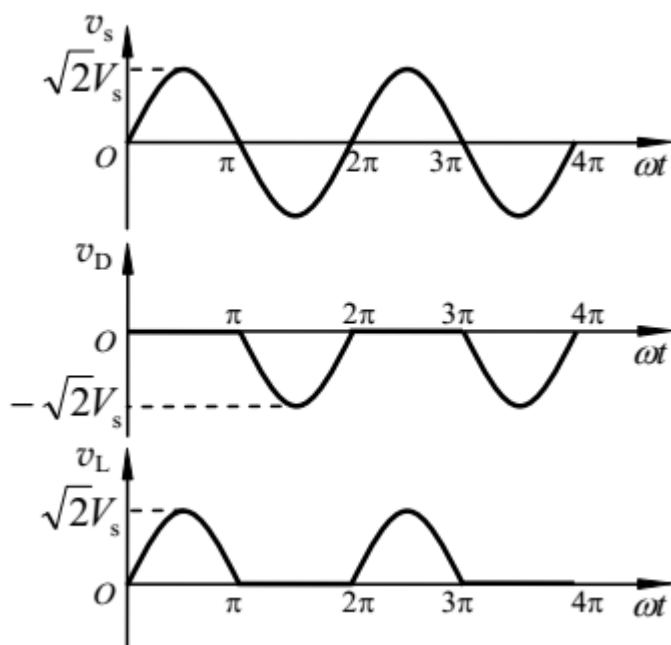
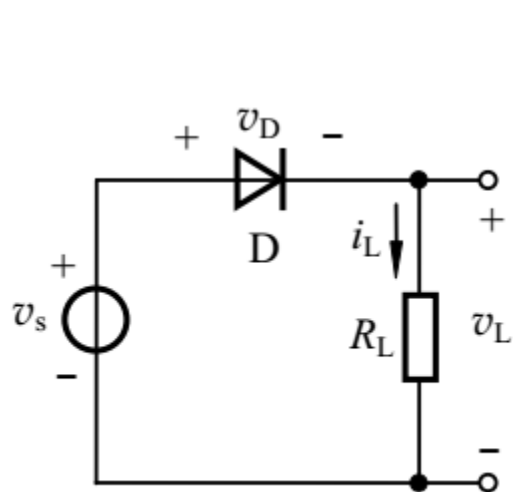
## 折线与指数模型

- 不考虑反向击穿
- 折线模型更便于计算
- 指数模型接近物理本质



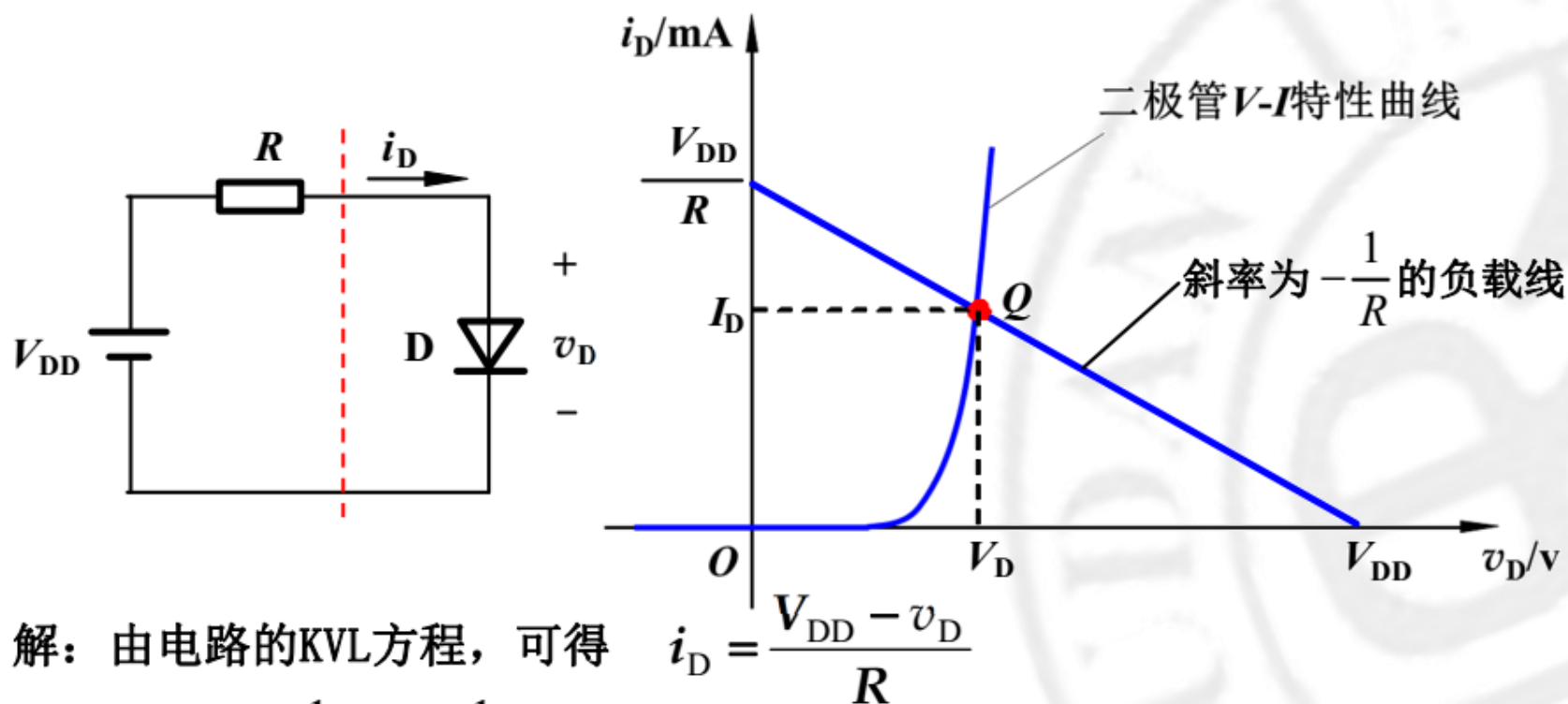
# 二极管的应用

- 整流电路
  - 基于理想模型



# 二极管的计算

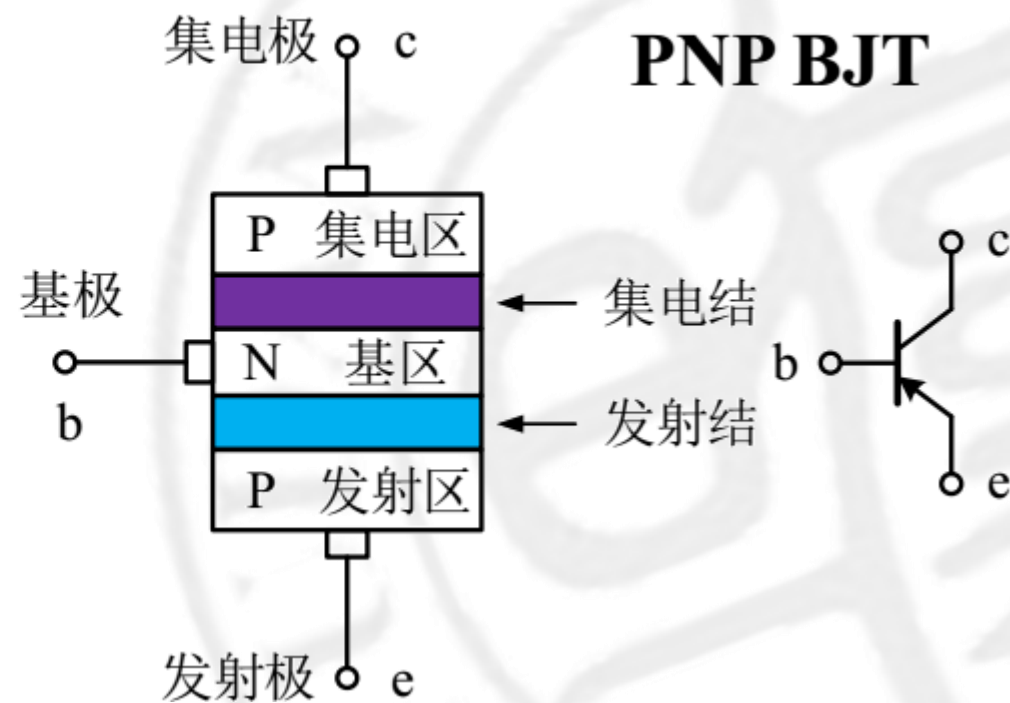
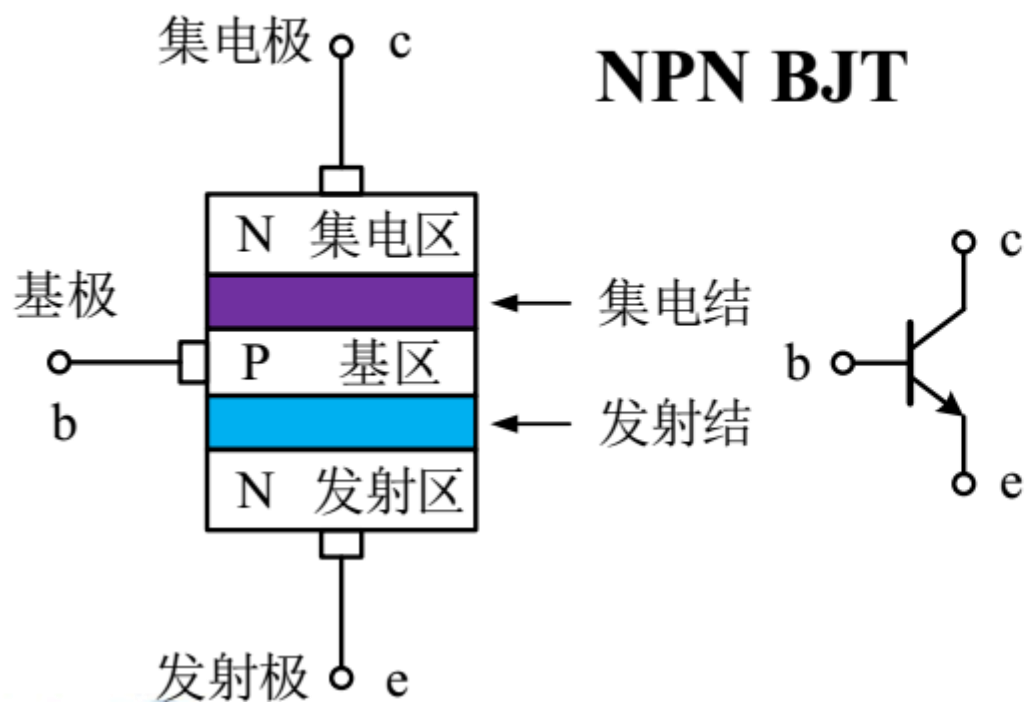
例3.4.1 电路如图所示，已知二极管的 $V$ - $I$ 特性曲线、电源 $V_{DD}$ 和电阻 $R$ ，求二极管两端电压 $v_D$ 和流过二极管的电流 $i_D$ 。



# 双极型晶体管

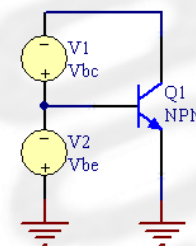
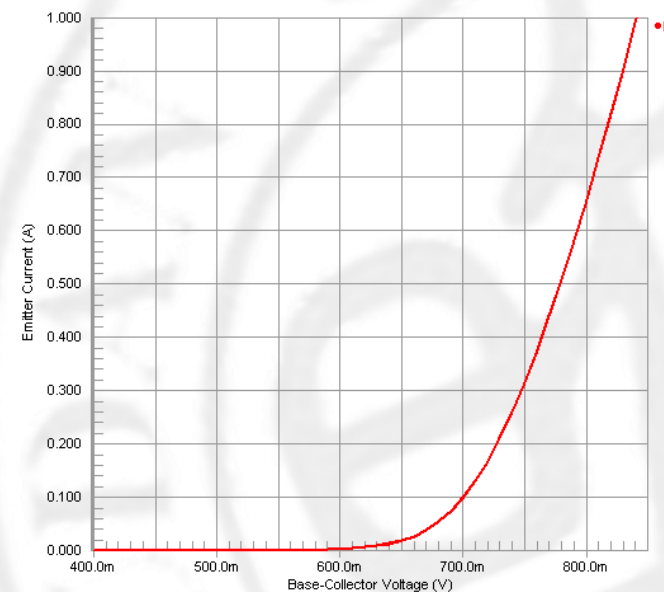
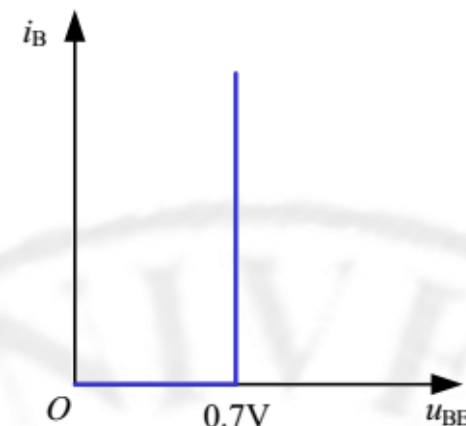
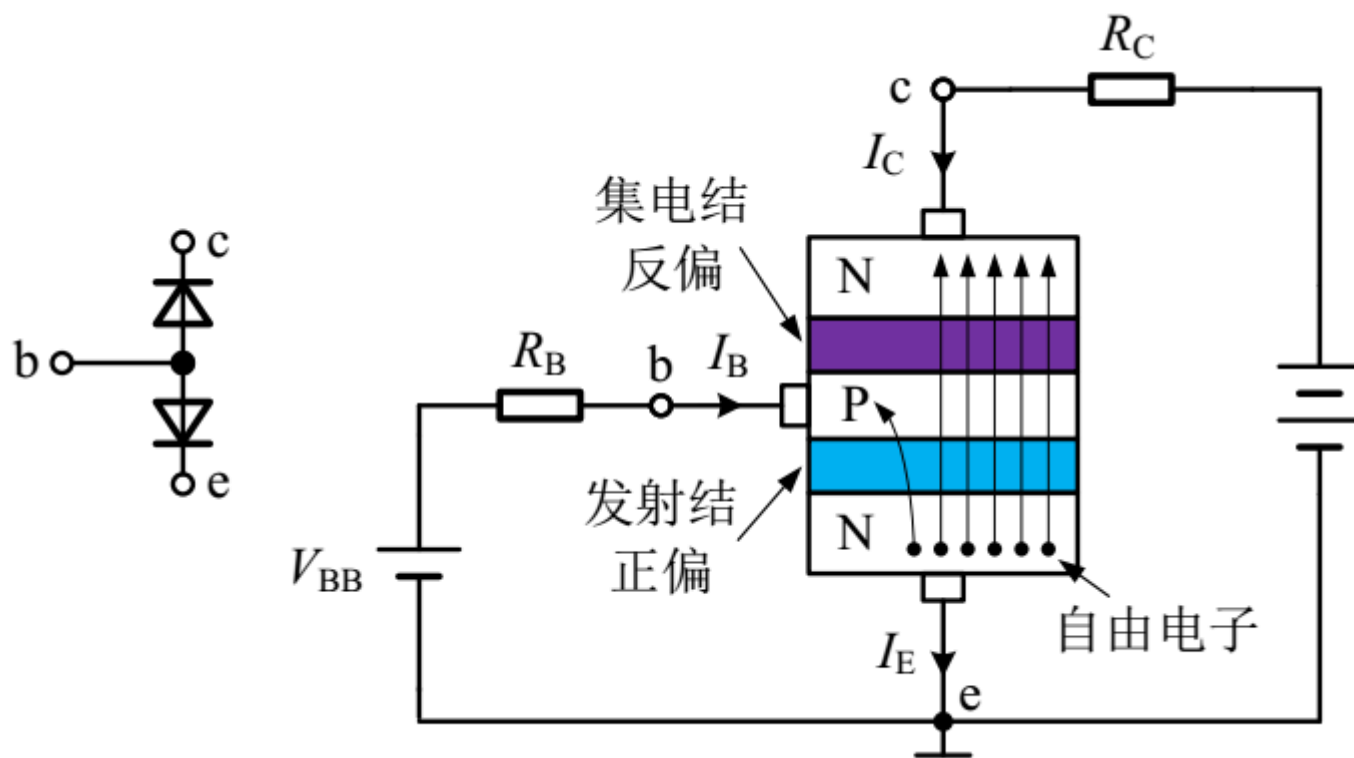
- 若将2个PN结在同一片Si上实现，会发生什么？

## 双极结型晶体管（BJT, Bipolar Junction Transistor）



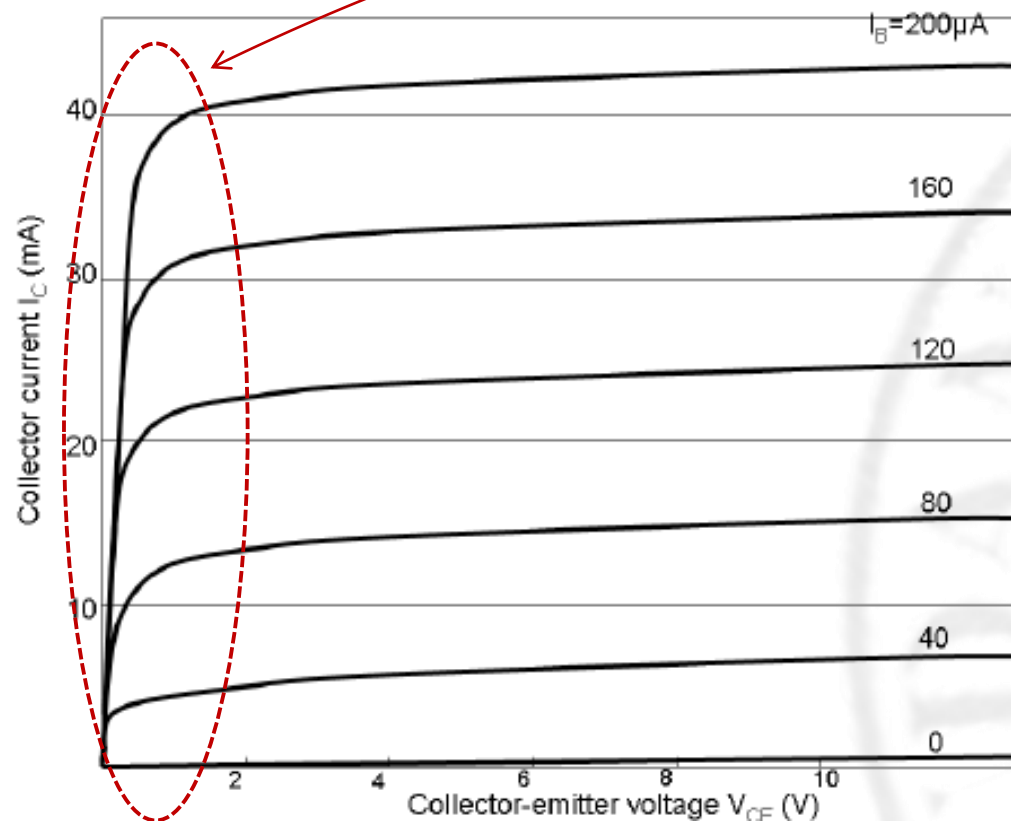
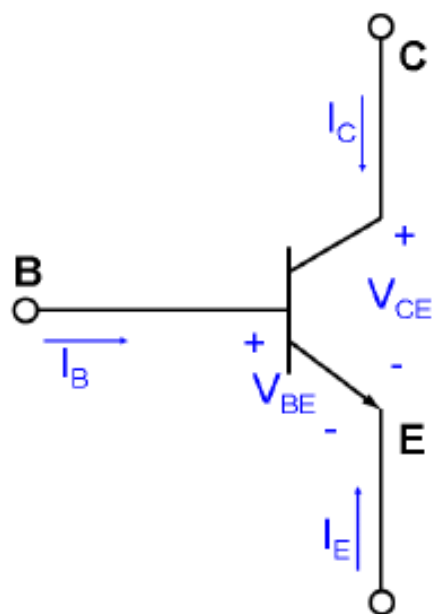
# 双极性晶体管

- 测试电压-电路 特性曲线（伏安特性曲线）

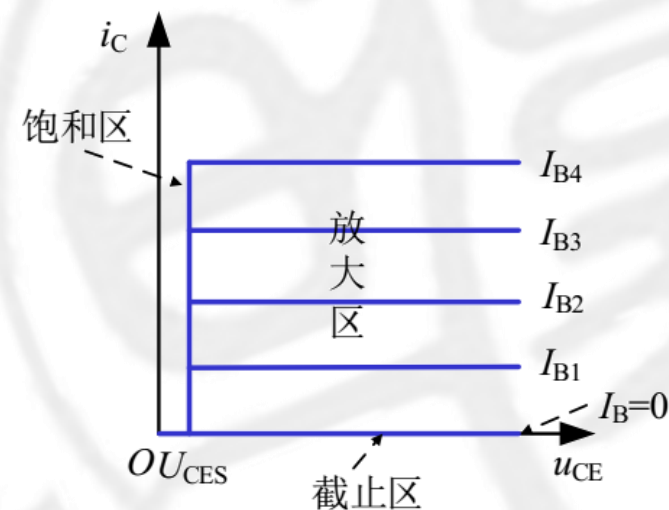


输入曲线模型

# 双极性晶体管 — 输出曲线模型

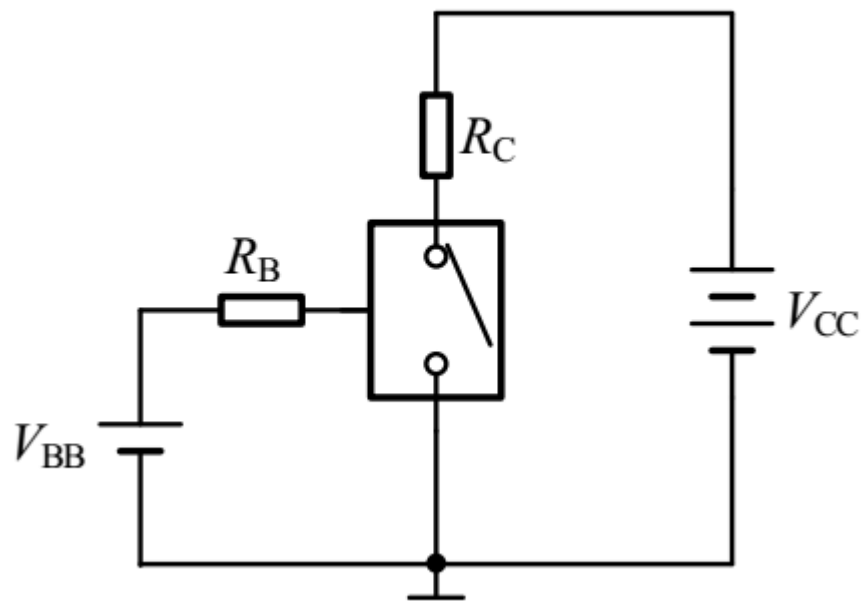


- 理想模型
  - 饱和区
  - 放大区
  - 截止区



# BJT的关断特性

- 截止区



发射结处于反偏

$V_{BB}$  过小或  $R_B$  过大

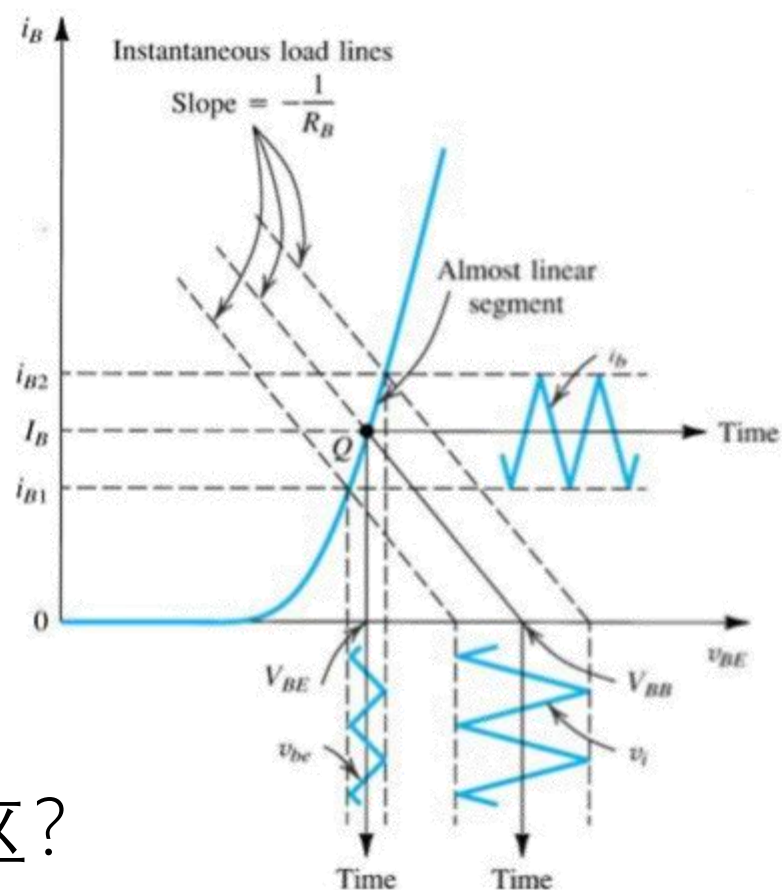
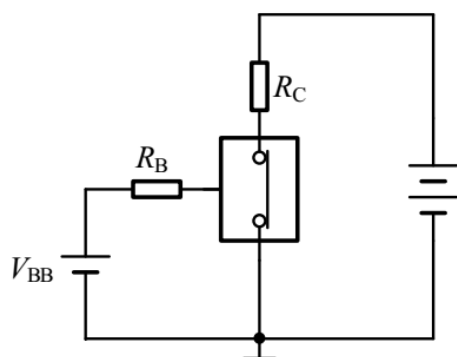
$$U_{BEQ} < 0.7V$$

$$I_{BQ} = I_{CQ} = 0$$

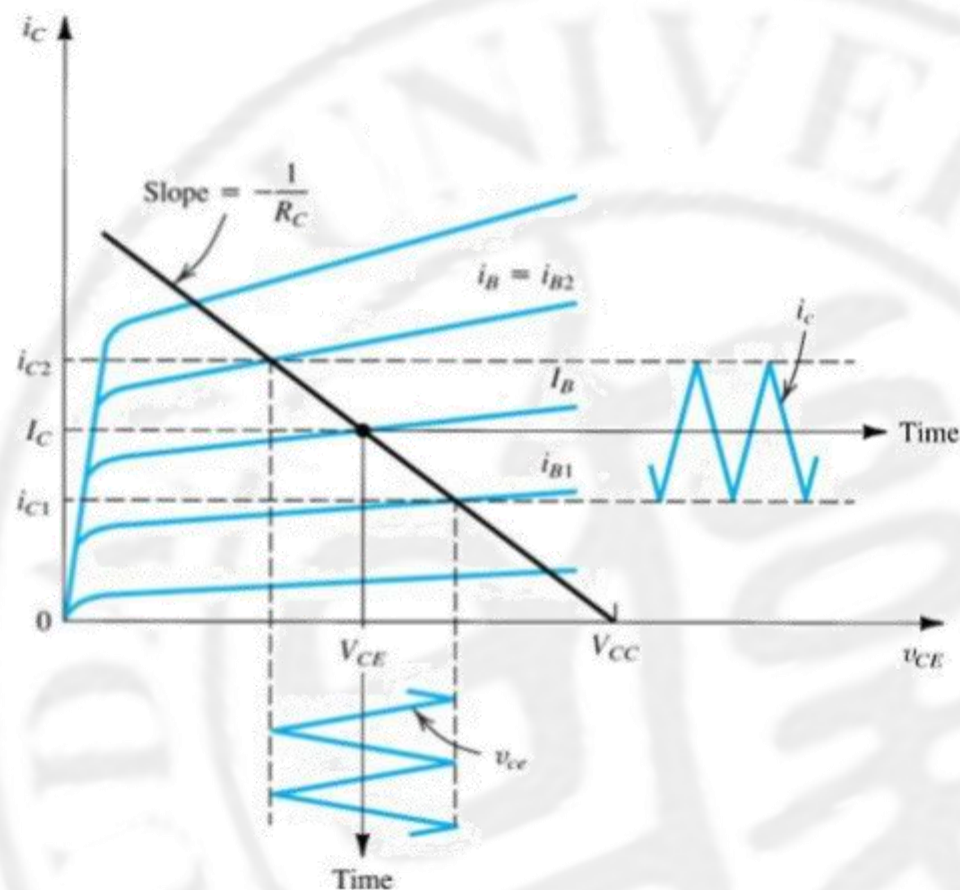
$$U_{CEQ} = V_{CC}$$

# BJT的导通特性

- 放大区



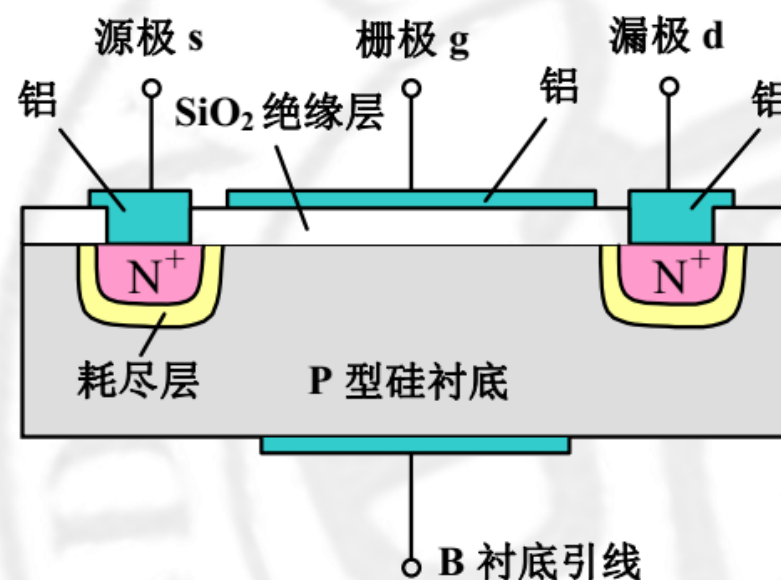
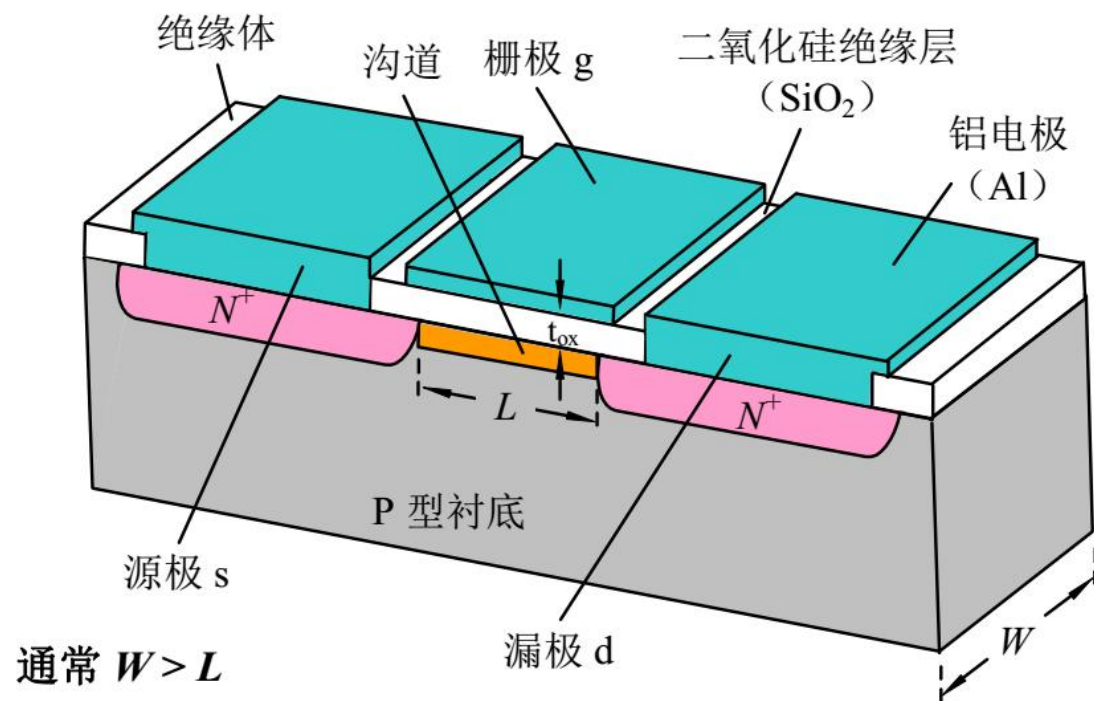
- 问题：饱和区？





# 金属—氧化物—半导体 场效应管

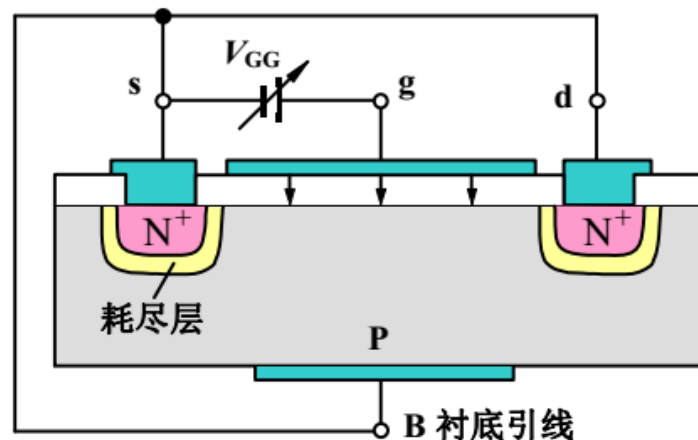
- Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Field Effect Transistor (FET)



# MOSFET 原理

- $V_{gs} < V_{th}$

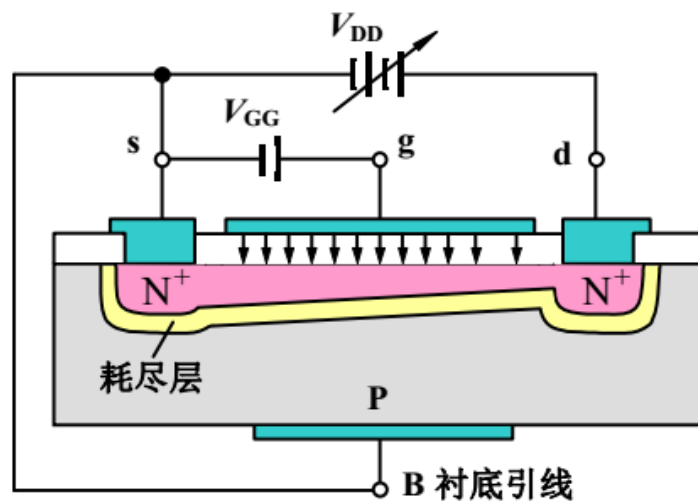
无导电沟道



- $V_{gs} > V_{th}$

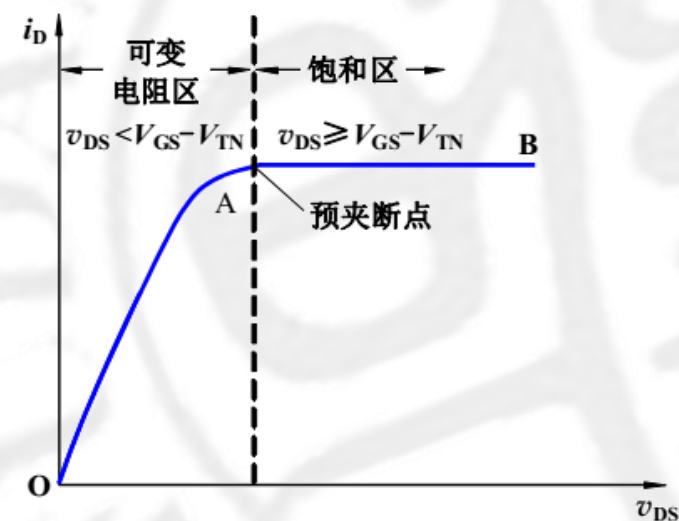
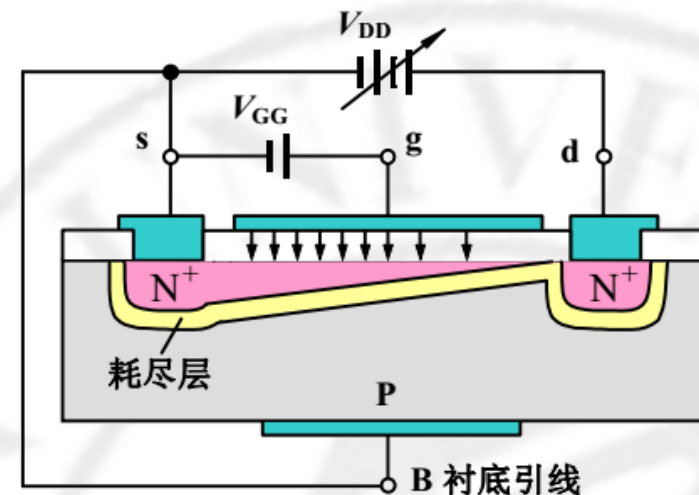
形成反型区

存在导电沟道



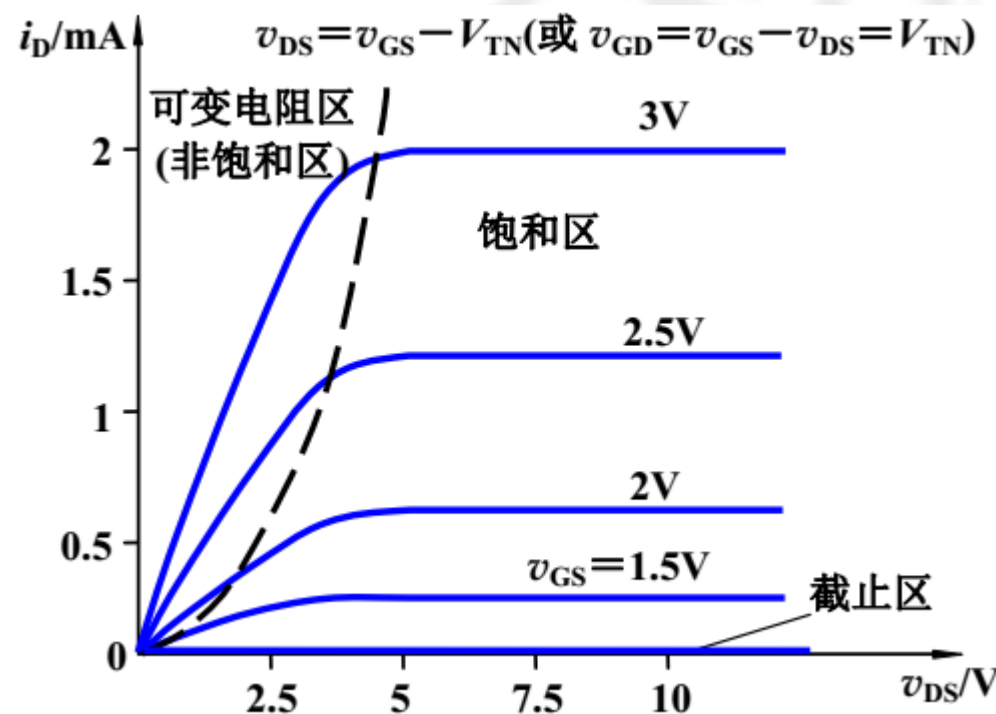
- $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$

沟道夹断



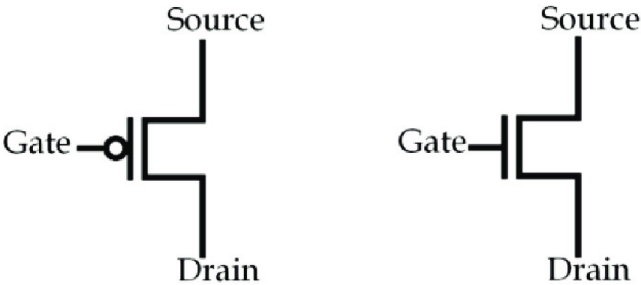
# MOSFET 工作区域

- 截止区  $i_D = 0$
- 可变电阻区  $v_{DS} < (v_{GS} - V_{TN})$   
$$i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$$
- 饱和区  $v_{GS} > V_{TN}$  , 且  $v_{DS} \geq (v_{GS} - V_{TN})$   
$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$

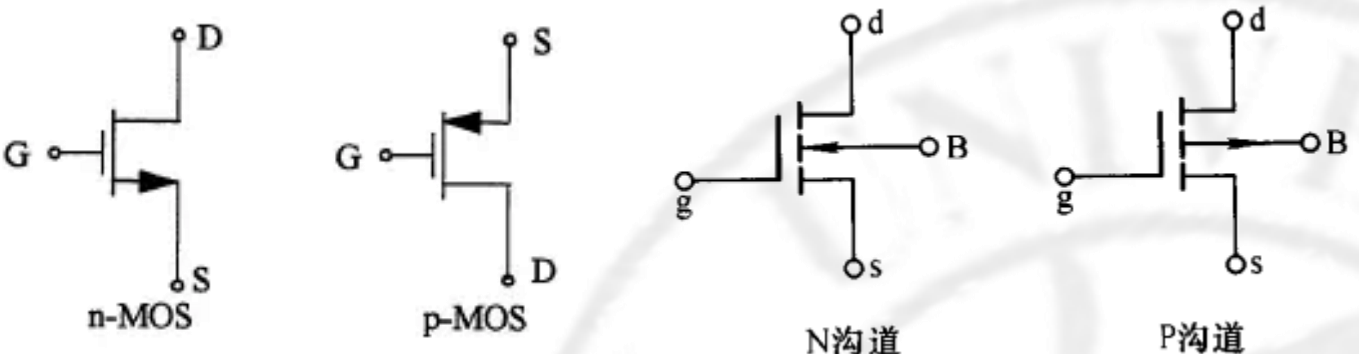


# BJT vs. MOSFET

- Complementary MOS



- BJT vs. MOSFET
  - 现代集成电路工艺多采用MOSFET



	BJT	E-MOSFET
相似	电极 (b、c、e)	电极 (g、d、s)
	工作区 (截止、放大、饱和)	工作区 (截止、恒流、可变电阻)
不同	双极性	单极性
	流控型	压控型