

电子电路与系统基础(B2)---非线性电路

# 第1讲：器件基础

这是**B2**-“非线性电路”课堂，已获得**A1**-“电阻电路”课堂学分的同学，不得选修本课堂，否则学分不予承认

李国林

清华大学电子工程系

# 联系方式

## ■ 李国林

- EMAIL: [guolinli@tsinghua.edu.cn](mailto:guolinli@tsinghua.edu.cn)

- 校内

- TEL(O): 62781842

- 罗姆楼4105房间

## ■ 答疑

- 推荐EMAIL答疑

- 推荐助教视频答疑，提前数天把问题发给助教，助教整理后集体答疑

## ■ 助教联系方式

- 黄子莹, 19800330117

- [huang-zy19@mails.tsinghua.edu.cn](mailto:huang-zy19@mails.tsinghua.edu.cn)

- 东主楼小二楼北

# 考评

由于课程多，李国林老师班级不再有期中考试

- 期末考试 85分
- 作业 5分
- CAD作业 10分
- 雨课堂练习 额外最多5分，也许没有，看具体情况

## ■ 关于作业

- 当周布置的作业，在1周内提交
- 助教批改，同学有问题直接向助教汇总，助教集体视频答疑
  - 助教解决不了的，可拉我入讨论群一并讨论
  - 作业不要抄袭：独立思考，多方讨论（自己理解的应努力让同组、同班、同宿舍同学理解），随时答疑（Email: [guolinli@tsinghua.edu.cn](mailto:guolinli@tsinghua.edu.cn)）

# 课程内容安排

春季：线性	序号	秋季：非线性
电路定律*	1	<b>器件基础</b>
电阻电源*	2	二极管*
电容电感^	3	<b>MOSFET*</b>
信号分析*	4	<b>BJT*</b>
分压分流^	5	反相电路*
正弦稳态^	6	数字门*^
时频特性^	7	放大器*
期中复习	8	期中复习
<b>RLC二阶^</b>	9	负反馈*
二阶时频^	10	差分放大*
受控源*	11	频率特性^
网络参量*^	12	正反馈*^
典型网络*^	13	振荡器^
作业选讲	14	作业选讲
期末复习	15	期末复习

\*电阻  
^动态

理想  
元件

真实  
器件

# 器件基础 内容

- 基本元件与基本器件
  - 电源、电阻、电容、电感
  
- 半导体器件基础
  - 物质基础
    - 导体、半导体、绝缘体分类
  - 半导体基础
    - 电子与空穴
    - P型与N型
  - PN结

# 一、基本元件

$$\sum_{k=1}^N i_k(t) = 0$$

**KCL**

$$v(t) = v_s(t)$$

$$i(t) = i_s(t)$$

电源

欧姆定律

$$i(t) = Gv(t) \quad \text{电阻}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_S$$

$$v_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

基尔霍夫定律

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_S + \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

麦克斯韦方程

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

电容

$$i = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

$$d_{AB} \ll \lambda$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

广义欧姆定律

$$\sum_{k=1}^M v_k(t) = 0$$

**KVL**

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

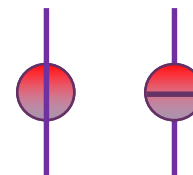
电感

# 理想元件：elements

电源

$$v = v_S$$

$$i = i_S$$



电阻

$$i = Gv$$

$$v = Ri$$



电容

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

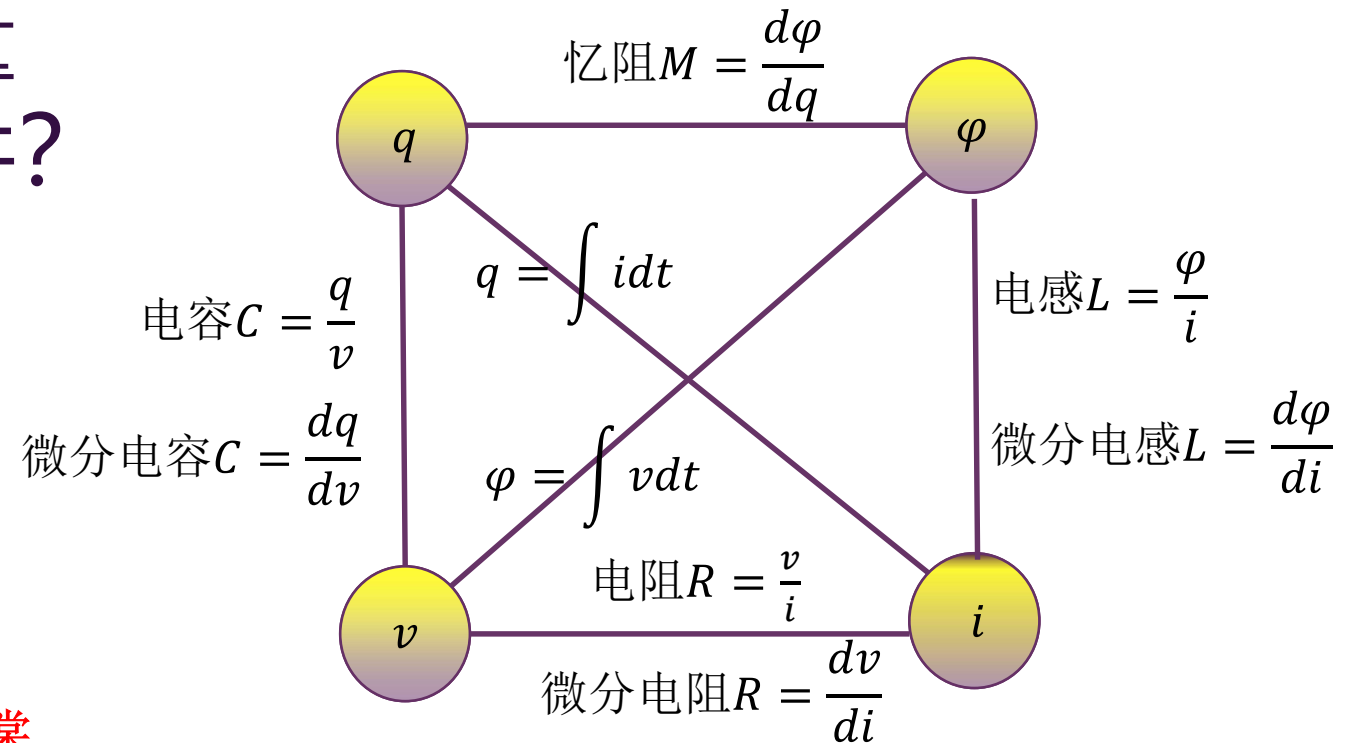


电感

$$v = L \frac{di}{dt}$$



# 四个电量 四种元件?



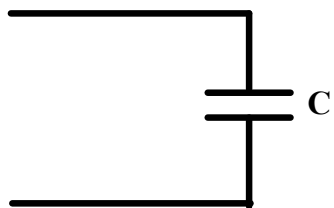
1971, Leon Chua, 蔡少棠

The **memristor**'s electrical resistance is not constant but depends on the history of current that had previously flowed through the device, i.e., its present resistance depends on how much electric charge has flowed in what direction through it in the past; the device remembers its history — the so-called non-volatility property. When the electric power supply is turned off, the memristor remembers its most recent resistance until it is turned on again.

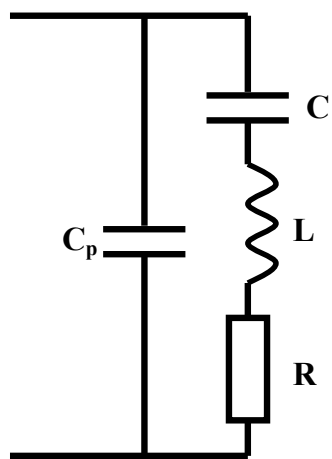
2008, HP Labs claimed to have found Chua's missing memristor based on an analysis of a thin film of **titanium dioxide** thus connecting the operation of ReRAM devices to the memristor concept.



# 电容器

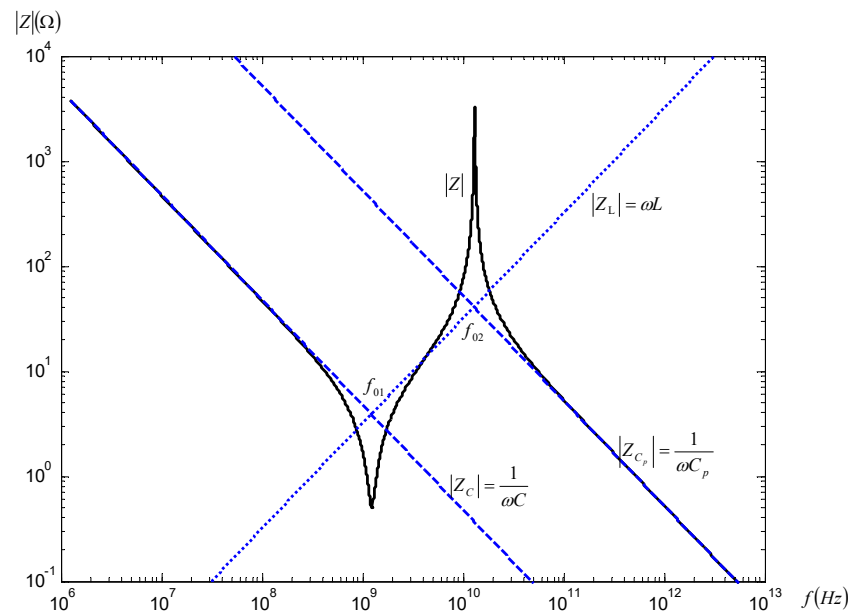


理想电容模型  
电容元件



电容器实际模型  
寄生电阻、寄生电感、寄生电容

P655页, 习题8.2  
Matlab代码, 自跑

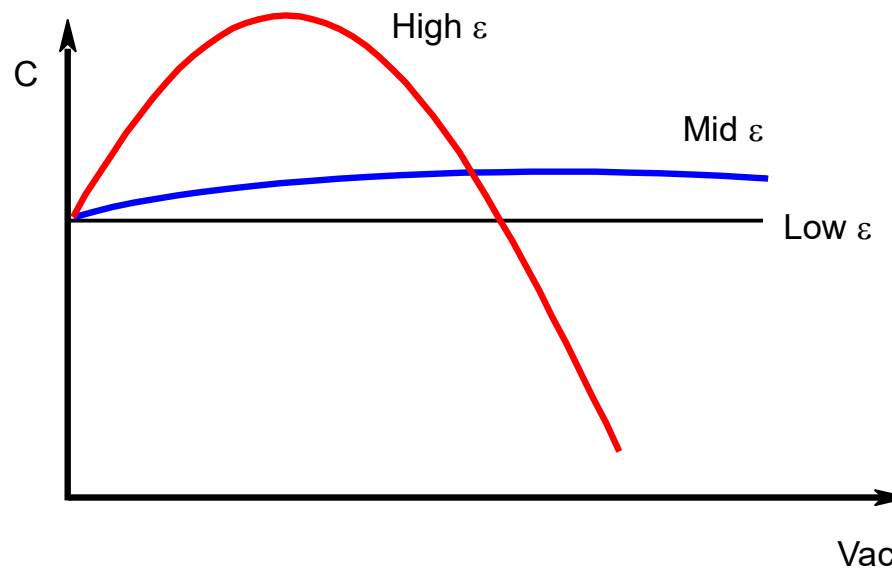


电容器阻抗频率特性

# 频率特性外：非线性

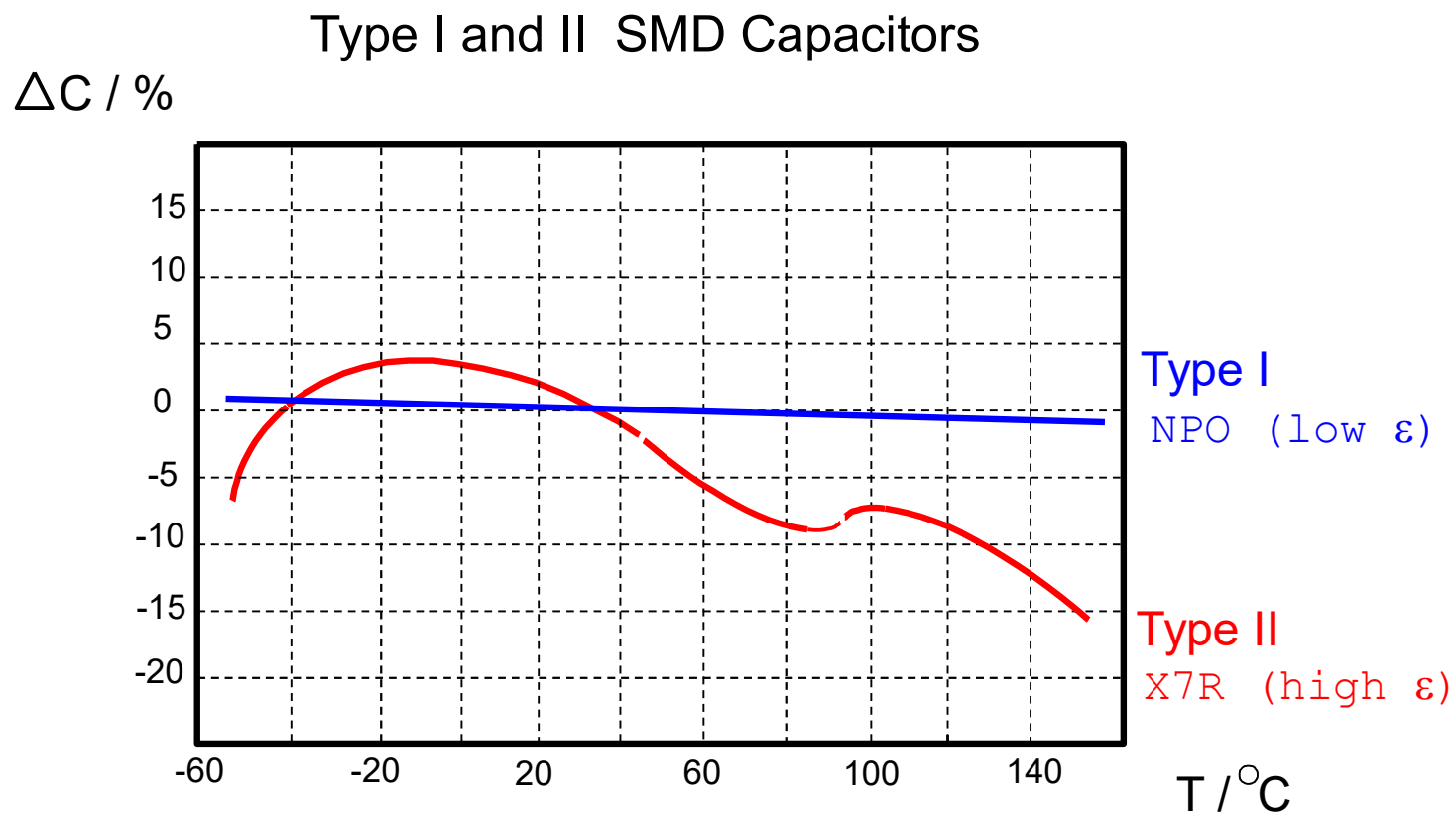
## Surface Mounted Device

- 贴片器件SMD越来越流行，以贴片电容为例
  - 陶瓷介质特性和测试信号强度相关，介电常数越高，相关度越大

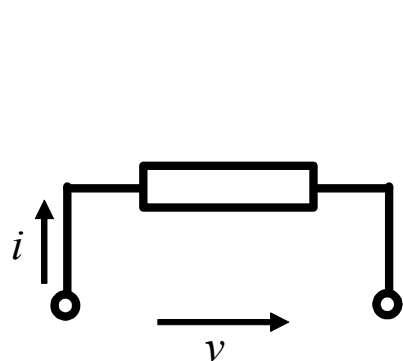


# 频率特性外：温度

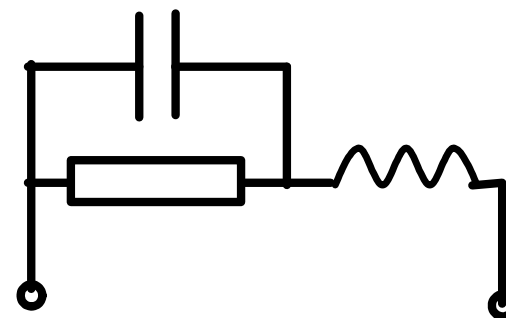
- 湿度、光、振动、老化、…



# 电路器件：电阻器

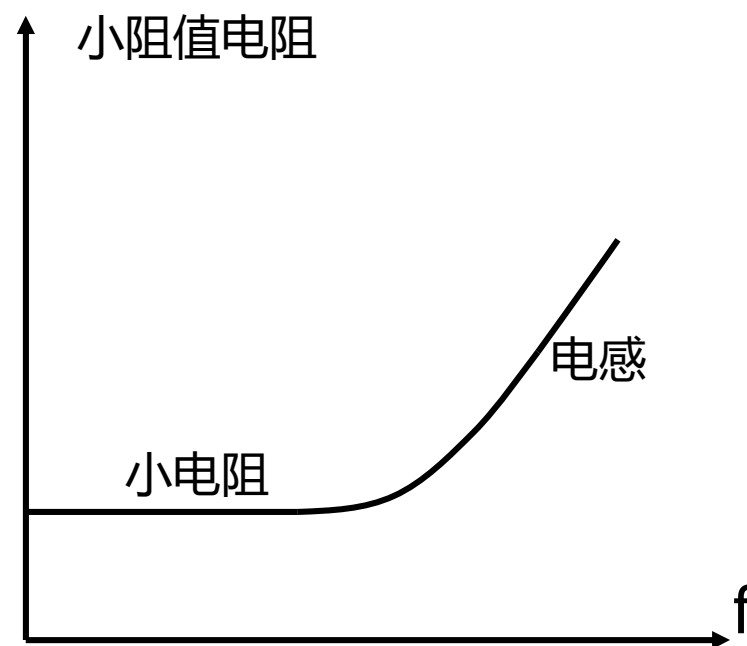
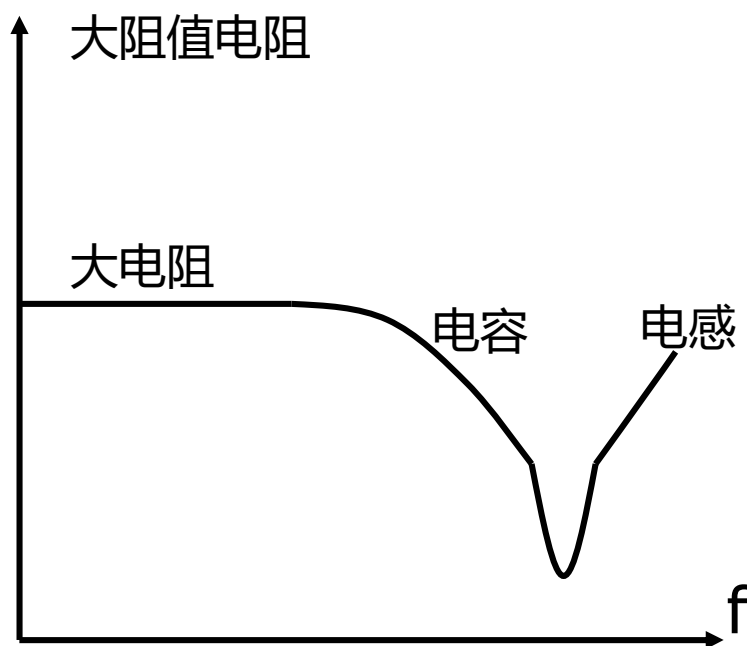
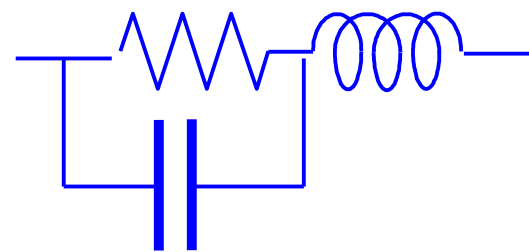


电阻器理想模型：电阻元件

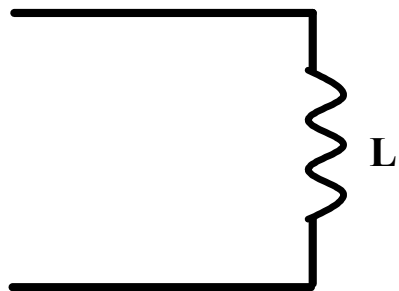


电阻器实际模型：寄生电容和寄生电感

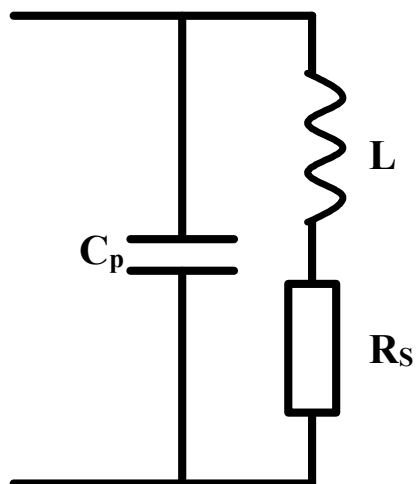
# 电阻频率特性



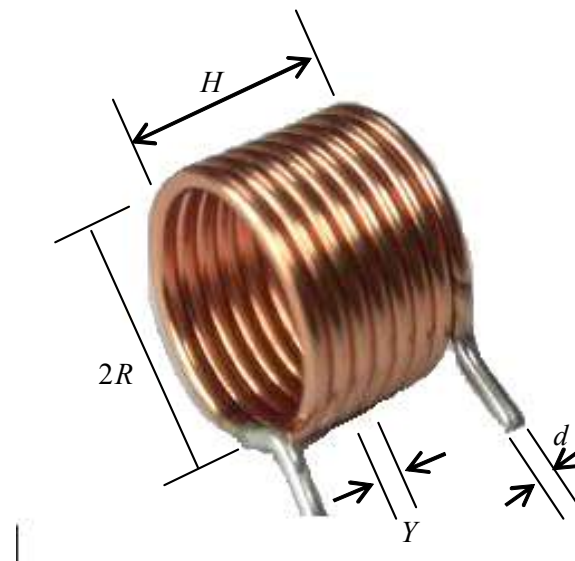
# 电感器



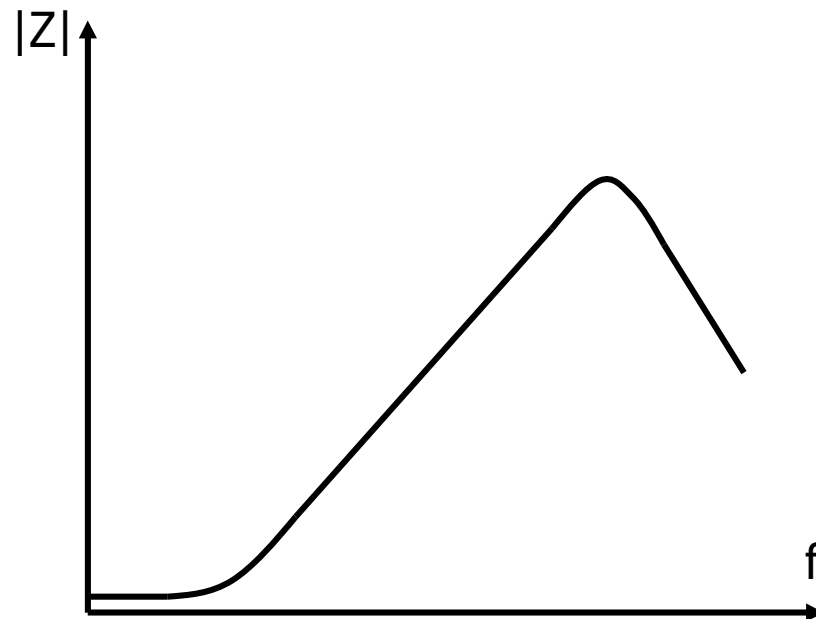
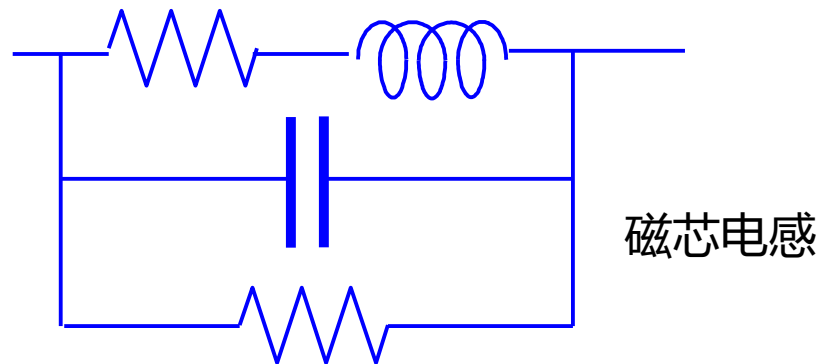
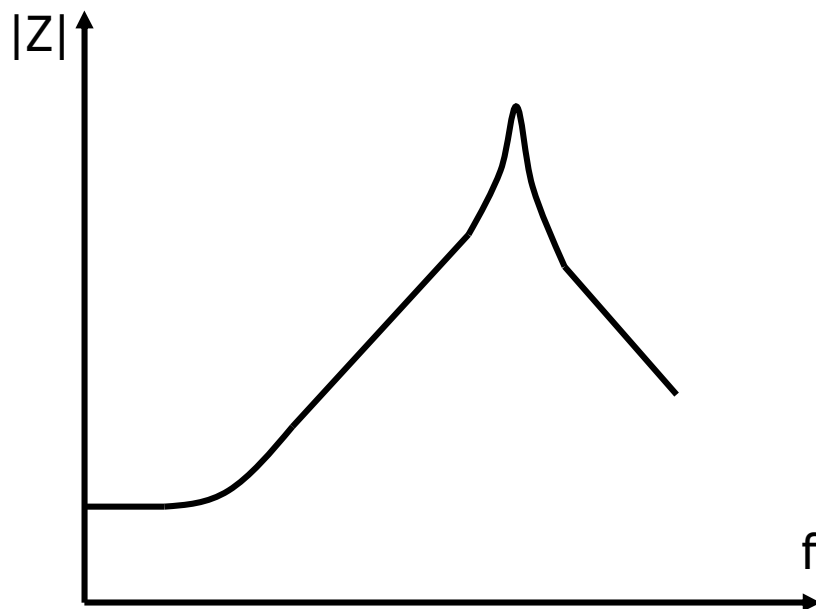
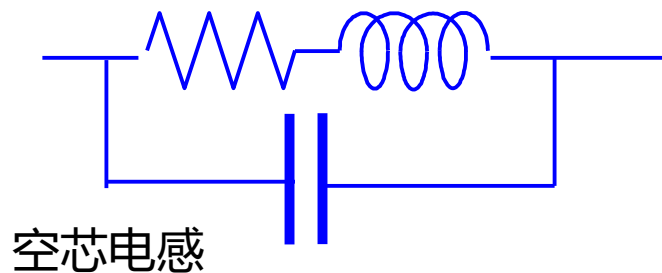
理想电感模型  
电感元件



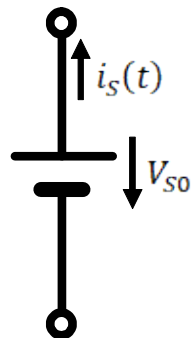
空芯电感模型  
寄生电阻、寄生电容



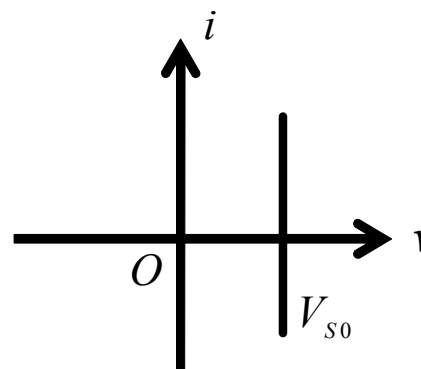
# 电感频率特性



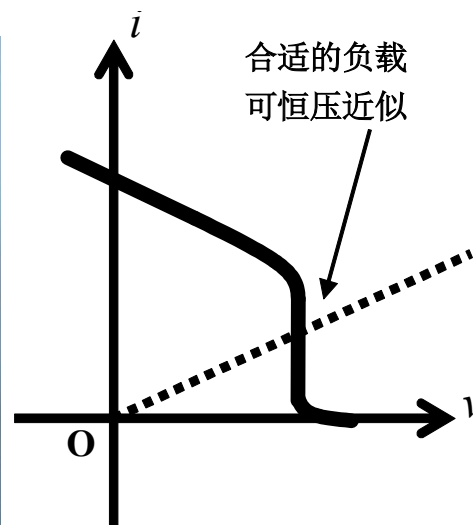
# 电压源



理想电池（理想直流恒压源）



理想直流恒压源伏安特性






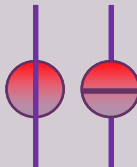
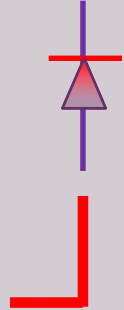
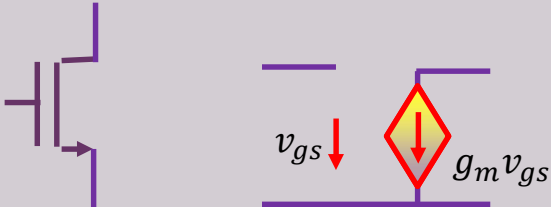
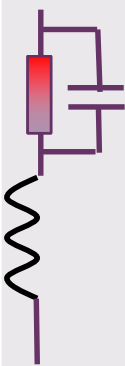
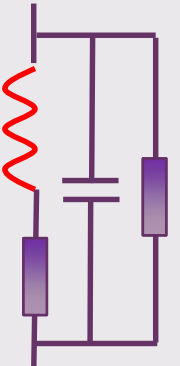

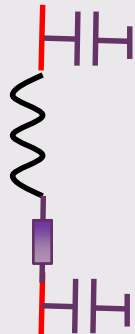

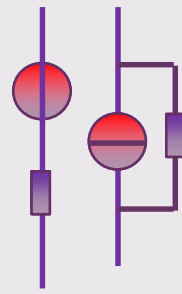
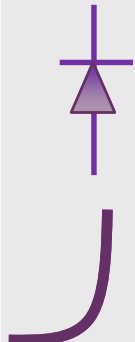
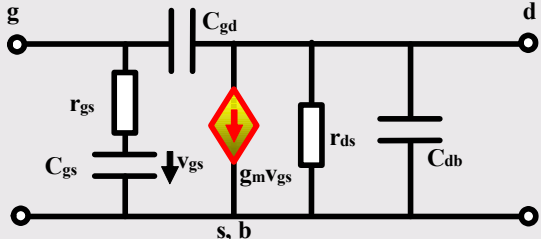


实际电池伏安特性

电池	内阻
9V 锂电池	18Ω
9V 碱性电池	1Ω
AA 碱性电池	150mΩ
AA 镍氢电池	20mΩ
D 镍镉碱性电池	9mΩ
铅酸电池	6mΩ
氧化银电池	10Ω



# 器件与元件 Devices and Elements

器件	电阻器	电感器	电容器	连接导线	开关	电源	二极管	晶体管
理想模型								
实际模型 (简单模型, 有时需要更复杂模型)								

# 小结：器件和元件

- 要想实现某种元件特性，必须用具有某种结构的某些材料的组合形成器件端口特性，但是形成的实际电路器件由于材料、结构原因，其端口伏安特性仅在特定范围内接近理想元件特性，偏离应用范围，则严重偏离理想元件特性，导致一系列设计问题
- 电路设计以电路分析为前提，而电路模型的准确性是电路分析、电路仿真准确性的前提
- 电路分析结果和设计实测结果不一样时，分析其原因，可能是
  - 电路不工作：检查焊点，开路、短路、电源检查
  - 工作不正常：分析用电路模型不符合实际器件模型
    - 器件检查：查datasheet，是否超出了器件自身的可正常工作范围
      - 应该是电路设计和调试前早就应该做的工作
    - 版图检查
      - 多个器件连接，协调完成某个功能，如果排布不合理，产生信号完整性问题
        - 不匹配：反射
        - 寄生路径：寄生振荡

## 二、半导体器件基础

- 物质基础
  - 价电子为基础的导体、半导体、绝缘体分类
  
- 半导体基础
  - 电子与空穴
  - P型与N型
  
- PN结
  - PN结形成
  - PN结特性
  - 二极管电路模型

## 2.1 物质基础

		实体物质	场物质
基本特性	质量	具有质量	没有质量
	能量	$E = mc^2$	$E = h\nu$
共性		从能量角度看，都是能量的表现形式 物质（能量）不能消灭，只能转化，能量守恒	
区别	空间占据	占据空间不容其他实体物质进入	可进入其他物质占据空间，具有可叠加性
	粒子	原子	光子

电路器件由实体物质构成，实体物质和进入实体物质的电磁场相互作用，交换能量，使得器件中的电场和磁场具有某种约束关系，这种关系在器件端口的表象（端口电压、电流关系）被称为是电路器件的电特性，称为元件约束条件（广义欧姆定律）

# 核外电子

- 原子 (atom) 由原子核 (atom nucleus) 和围绕原子核运动的电子 (electron) 构成
- 核外电子分层排布, 其排布规律为
  - 第n层轨道最多排 $2n^2$ 个电子, 最外层不超过8个
    - 次外层不超过18个, ...

元素	原子序数 电子数目	第1层	第2层	第3层	第4层
<b>Cu</b> 铜	<b>29</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>18</b>	<b>1</b>
<b>Si</b> 硅	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	
<b>O</b> 氧	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>6</b>		
<b>Ne</b> 氖	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>8</b>		

# 价电子

- 能够和其它原子形成化学键的电子被称为价电子
  - valence electron
  - 价电子数目决定了原子的物理化学稳定性
- 主族元素最外层电子为价电子
- 最外层电子数目最多为8
  - 当最外层电子数目为8时，其物理化学性质是稳定的：惰性气体
  - 最外层电子数目不是8时，其价电子则有可能脱离轨道，成为自由电子 (free electron)，留下带正电的正离子；最外层的价电子层也有可能获得外界电子，成为带负电的负离子
    - 自由电子是在物质内部空间可自由移动的电子

# 导体

**Cu29: 2, 8, 18, 1**

**Ag47: 2, 8, 18, 18, 1**

**Au79: 2, 8, 18, 32, 18, 1**

**Fe26: 2, 8, 14, 2**

**Zn30: 2, 8, 18, 2**

**Al13: 2, 8, 3**

## ■ 导体conductor

- 原子最外层电子数目为1、2、3时，价电子易于脱离价电子层轨道成为自由电子。由于有大量的自由电子存在，这些物质很容易导电
  - 如金属导体，包括Cu, Au, ...
    - 导电因自由电子的移动
  
- 离子键 (ionic bond) 化合物在溶液中溶解后，有可移动的正、负离子存在，也可导电
  - 离子键：阴阳离子通过静电作用形成的化学键
  - 因溶液中正负离子的移动而形成导电

**导电：具有可移动的带电粒子**

**Electric conductive**

# 绝缘体

**N7: 2, 5**

**O8: 2, 6**

**F9: 2, 7**

**Ne10: 2, 8**

## ■ 绝缘体insulator

- 主族元素原子的价电子数为5、6、7时，价电子和原子核联系紧密，元素之间易形成共价键（covalent bond），价电子很难脱离原子核成为自由电子，故而这些物质不容易导电：如O，S，…
  - 共价键：原子间通过共用电子形成的化学键
- 绝缘体指那些物理化学性质很稳定的物质，包括惰性气体
- 不容易导电的化合物，也是绝缘体：如玻璃（主要成分SiO<sub>2</sub>）、橡胶



# 半导体

**Si<sub>14</sub>: 2, 8, 4**

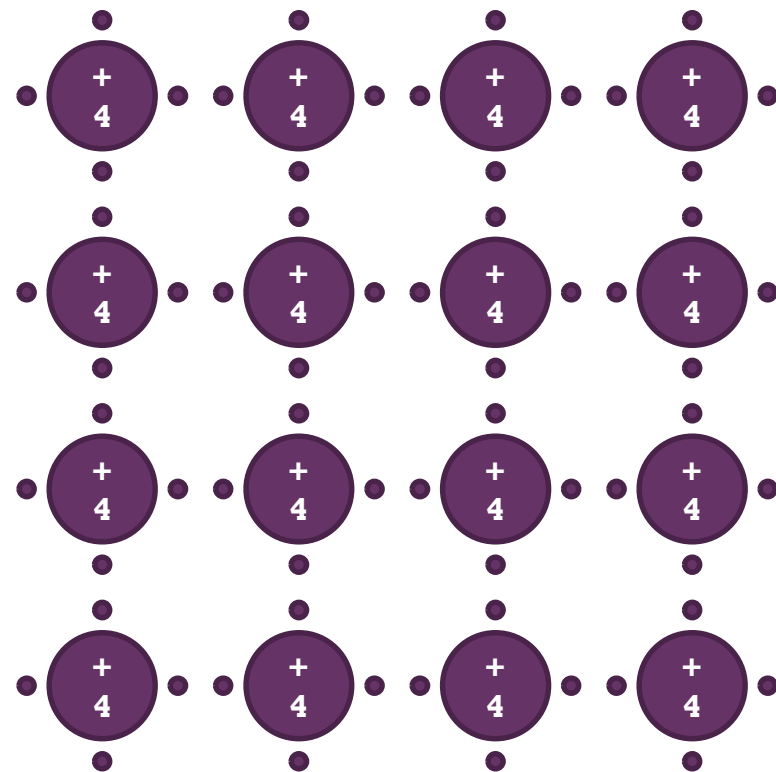
**Ge<sub>32</sub>: 2, 8, 18, 4**

## ■ 半导体Semi-conductor

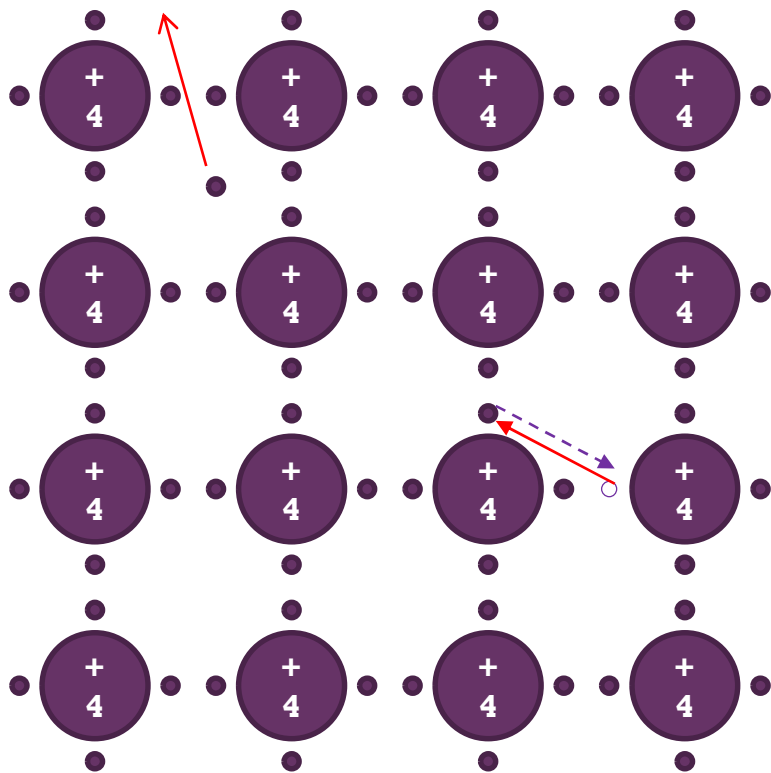
- 主族元素原子价电子数为4时，其稳定性和导电性介于导体和绝缘体之间：如Si，Ge都是半导体元素
- 半导体原子之间以共价键连接

## ■ 本征半导体指纯净的半导体晶体

- T=0K，没有外界影响情况下，价电子被束缚在共价键中，此时半导体不导电



# 电子和空穴



- 环境温度升高，或者半导体晶体受到光照，价电子将获得能量，挣脱共价键束缚，成为自由电子，留下的空位称为空穴 (hole)
- 自由电子带一个负电荷，离开电子轨道后，原子带一个正电荷，可认为这个正电荷就是空穴所带的电荷
- 空穴带正电荷，很容易吸引邻近共价键中的电子填补这个空穴，效果看起来好像是空穴移动了，将其等价于正电荷移动
  - 自由电子、空穴均可移动
- 在外加电场作用下，自由电子定向移动形成电子电流，空穴移动形成空穴电流
  - 本征半导体中的电流是这两种电流之和

# 电导率conductivity

- 电导率 $\sigma$ 是描述材料导电性能的一个参数，导体电导率最大，半导体次之，绝缘体最小

材料	电导率 S/m	备注
银 <b>Silver</b>	$6.30 \times 10^7$	电导率最好的金属材料
铜 <b>Copper</b>	$5.80 \times 10^7$	最常用导体材料，价格低
金 <b>Gold</b>	$4.52 \times 10^7$	不易腐蚀， <b>PAD</b> 焊接点常用
碳 <b>Carbon</b>	$\sim 3 \times 10^5$	石墨
海水 <b>Sea Water</b>	4.8	盐分 <b>35g/kg</b> ， <b>20°C</b>
硅 <b>Silicon</b>	$\sim 10^{-3}$	最常见的集成电路基片
<b>FR4</b>	<b>0.004</b>	常见 <b>PCB</b> 板介质材料， <b>1GHz</b>
玻璃 <b>Glass</b>	$10^{-7} \sim 10^{-13}$	主要成分 <b>SiO<sub>2</sub></b>
空气 <b>Air</b>	$0.3 \sim 0.8 \times 10^{-14}$	
硫 <b>Sulfur</b>	$5 \times 10^{-16}$	无定形硫
聚四氟乙烯 <b>Teflon</b>	$\sim 10^{-23}$	电缆常用介质材料

# 电子导电和空穴导电

- mobility: 迁移率
  - 描述带电离子在物质内部移动能力的参量

$$\mu_e = 0.13 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_h = 0.05 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

$$v = \mu E$$

速度=迁移率\*电场强度

- Conductivity: 电导率

$$\sigma_e = ne\mu_e \quad \sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$$

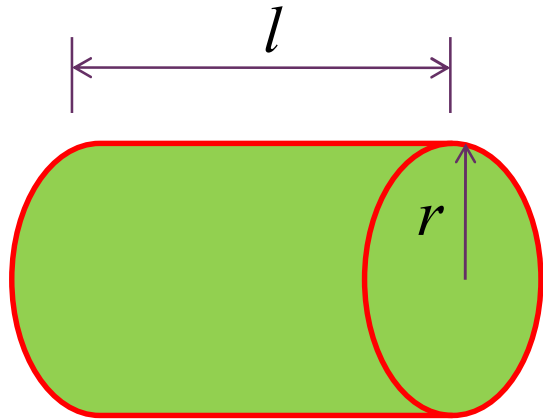
$$\sigma_h = pe\mu_h$$

**n**: 电子浓度  
**p**: 空穴浓度

# 电路基材：导体、绝缘体

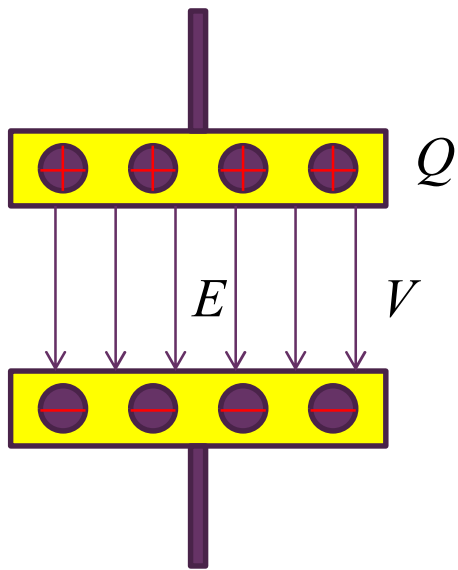
- 电路器件是由导体、半导体和绝缘体构成的某种结构，这种结构和叠加其中的电磁场相互交换能量，形成器件的电特性
  - 端口电压电流所具有的关系为该器件的电特性
- 导体是所有电路器件中都必须用的材料，这是由于电路器件中的传导电流必须通过导体流通，电路器件的连接端口、导线或传输线都是导体连接关系
  - 绝大多数为金属导体材料
- 绝缘体用于支撑导体和半导体材料，使得它们不至于接触，从而形成需要的器件结构。同时绝缘体和电磁场也相互作用，对器件的电特性有重要影响

# 电阻、电容、电感

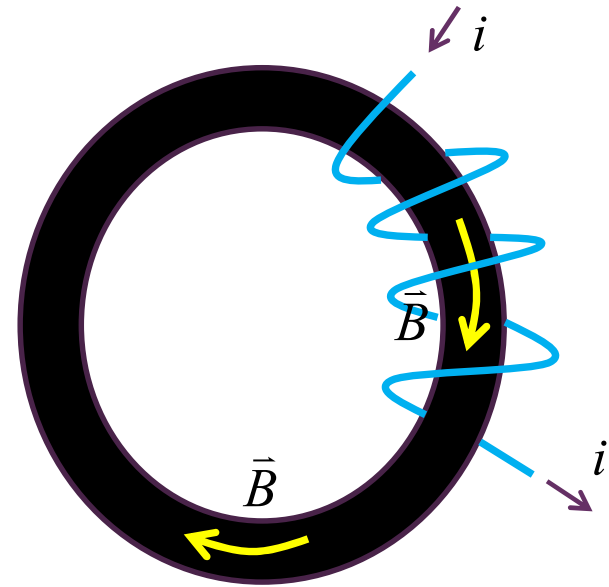


$$G = \sigma \frac{S}{l}$$

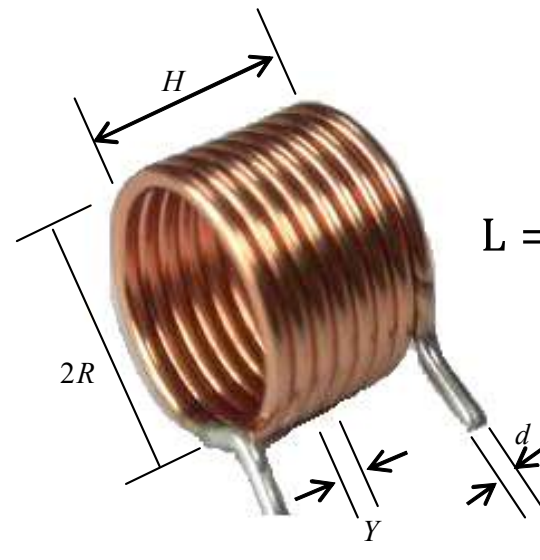
$$R = G^{-1} = \rho \frac{l}{S}$$



$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$



$$L = N^2 \mu \frac{S}{p}$$



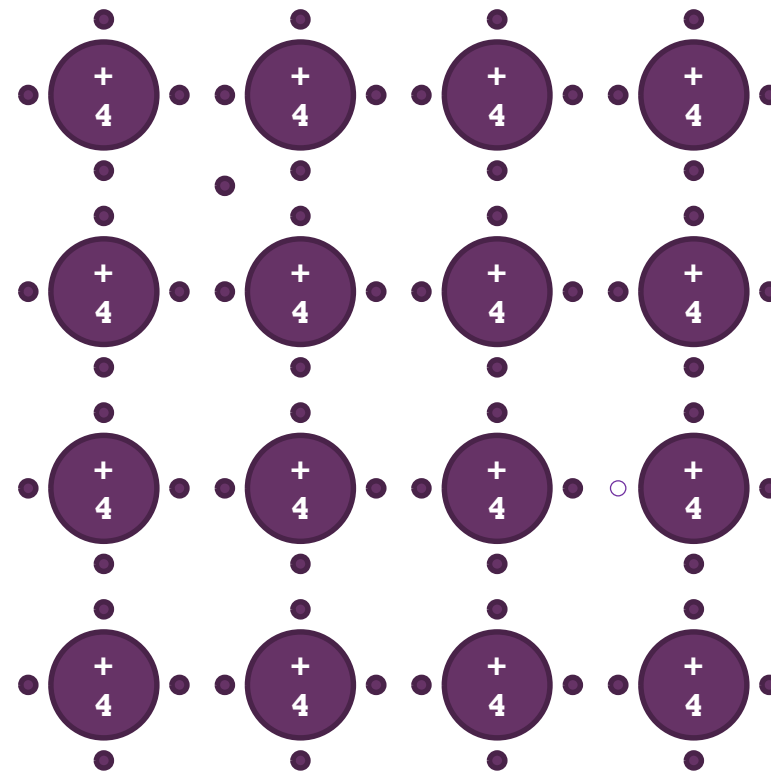
$$L = N^2 \mu_0 \frac{\pi R^2}{H + 0.9R}$$

# 电路基材：半导体

- 半导体是最重要的电路器件晶体管的基材
  - 晶体管电路是本学期课程主要内容
    - BJT和MOSFET
- 半导体被作为晶体管基材的根本原因在于半导体的电子、空穴浓度是可控的，从而它的导电性能可控，于是可以通过调控半导体材料的导电性来实现晶体管的受控特性，从而形成有源器件，具有将直流电能转换为交流电能的能力
  - 外界供能：温度变化、光照
  - 掺杂：调节电子浓度或空穴浓度
    - 不同掺杂半导体连接关系，形成非线性特性
      - PN结，BJT
  - 通过电容结构，极板累积电荷调控半导体导电特性
    - MOSFET

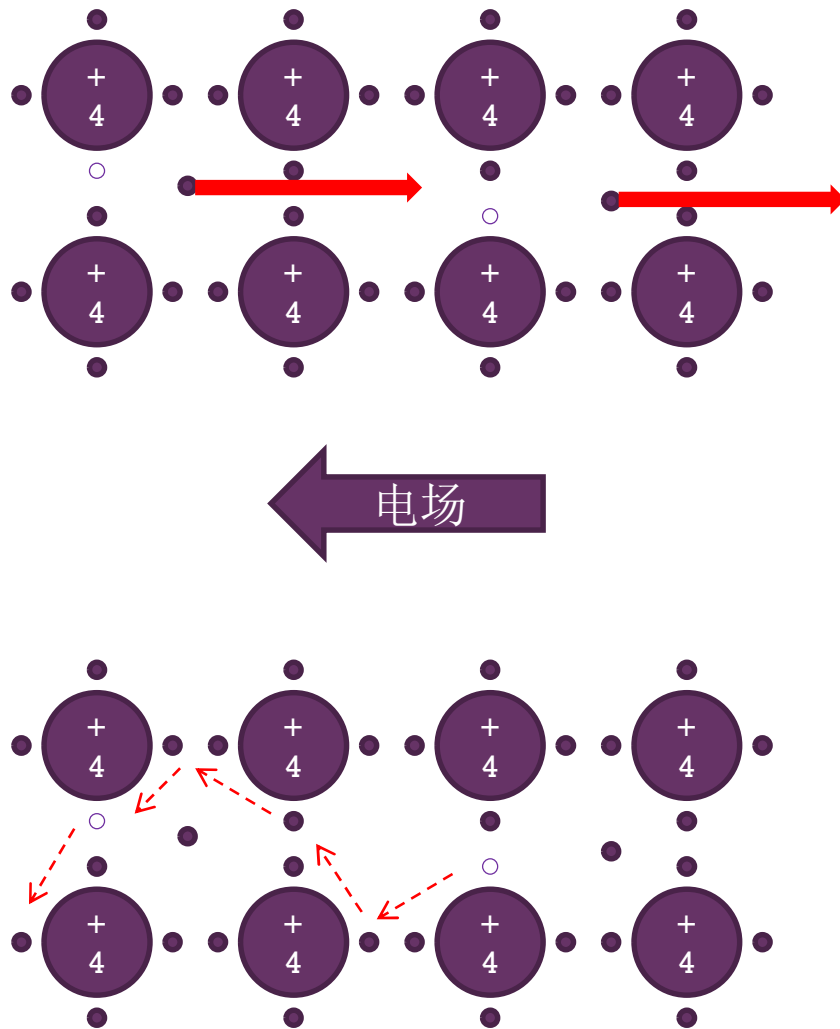
## 2.2 半导体材料

- 硅Si、锗Ge，砷化镓GaAs，碳化硅SiC等是最常用的半导体材料
- 硅Si、锗Ge原子有四个共价电子
  - 硅原子通过共价键结合为硅晶体
  - 室温下，本征半导体中由于存在自由电子和空穴，因而可以导电
  - 热能使得电子和空穴随时产生，但同时也伴随着复合





# 电子电流和空穴电流



- 在一片硅晶体两端施加电压（电场）后
  - 导带内的电子逆电场方向移动，形成电子电流electron current
  - 价带内有空穴，空穴邻近的价带电子受到电场作用，反电场方向移动到空穴位置，在原位置形成新的空穴，犹如空穴在价带朝电场方向运动，故而称其为空穴电流hole current
    - 并非空穴在移动，而是电子在价带移动，电子移动形成新的空穴
  - 晶体内的总电流为电子电流和空穴电流之和

# 掺杂

- 纯净半导体中，自由电子数目少，其本征状态对导电没有太大用处
  - 电导率直接取决于自由电子数目和空穴数目

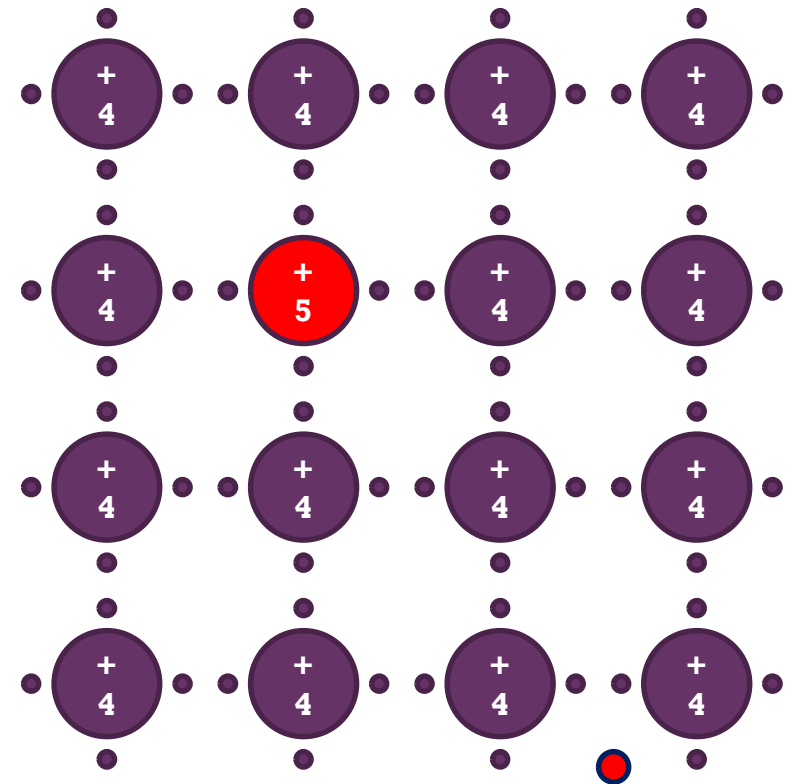
$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad p = n$$

- 可以通过掺杂 (doping) 的方法，即向本征半导体内添加杂质，使得其内部自由电子数目或者空穴数目增加，从而提高其导电性
  - 如果掺杂半导体内的空穴数目多于自由电子，则称为P型半导体 (Positive)  $p \gg n$
  - 如果掺杂半导体内的自由电子数目多于空穴，则称为N型半导体 (Negative)  $n \gg p$

# N型半导体

$$\sigma \approx ne\mu_e$$

- 要想让掺杂半导体内的自由电子数目多于空穴，则添加五价（pentavalent）杂质原子
  - 拥有5个价电子：砷As，磷P，锑Sb
    - 可提供一个电子，故被称为施主（donor）
  - 调整掺杂浓度实现电导率的调整

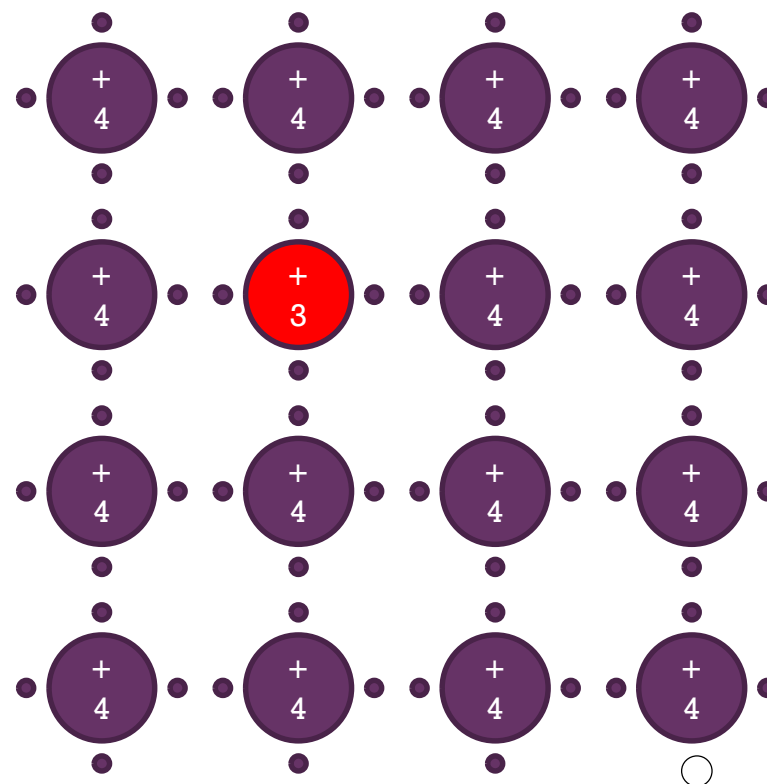


电子是多数载流子，称为多子：**majority carrier**  
 空穴是少数载流子，称为少子：**minority carrier**

# P型半导体

- 要想让掺杂半导体内的空穴数目多于自由电子，则添加三价（trivalent）杂质原子
  - 拥有3个价电子：铝 Al，硼 B，镓 Ga，铟 In
    - 可接受一个电子，故被称为受主（acceptor）
- 调整掺杂浓度实现电导率的调整

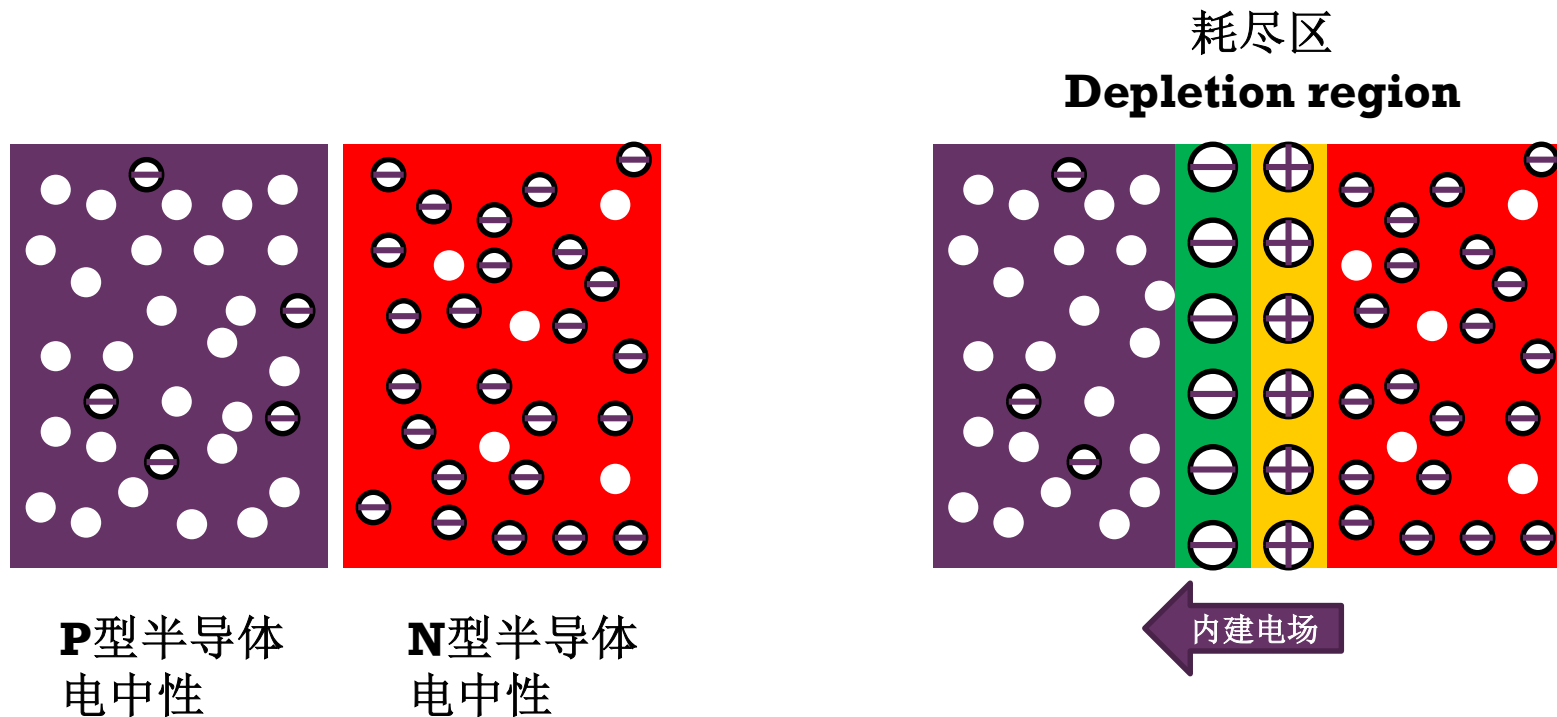
$$\sigma \approx p e \mu_h$$



空穴是**P**型半导体中的多子  
电子是**P**型半导体中的少子

## 2.3 PN结

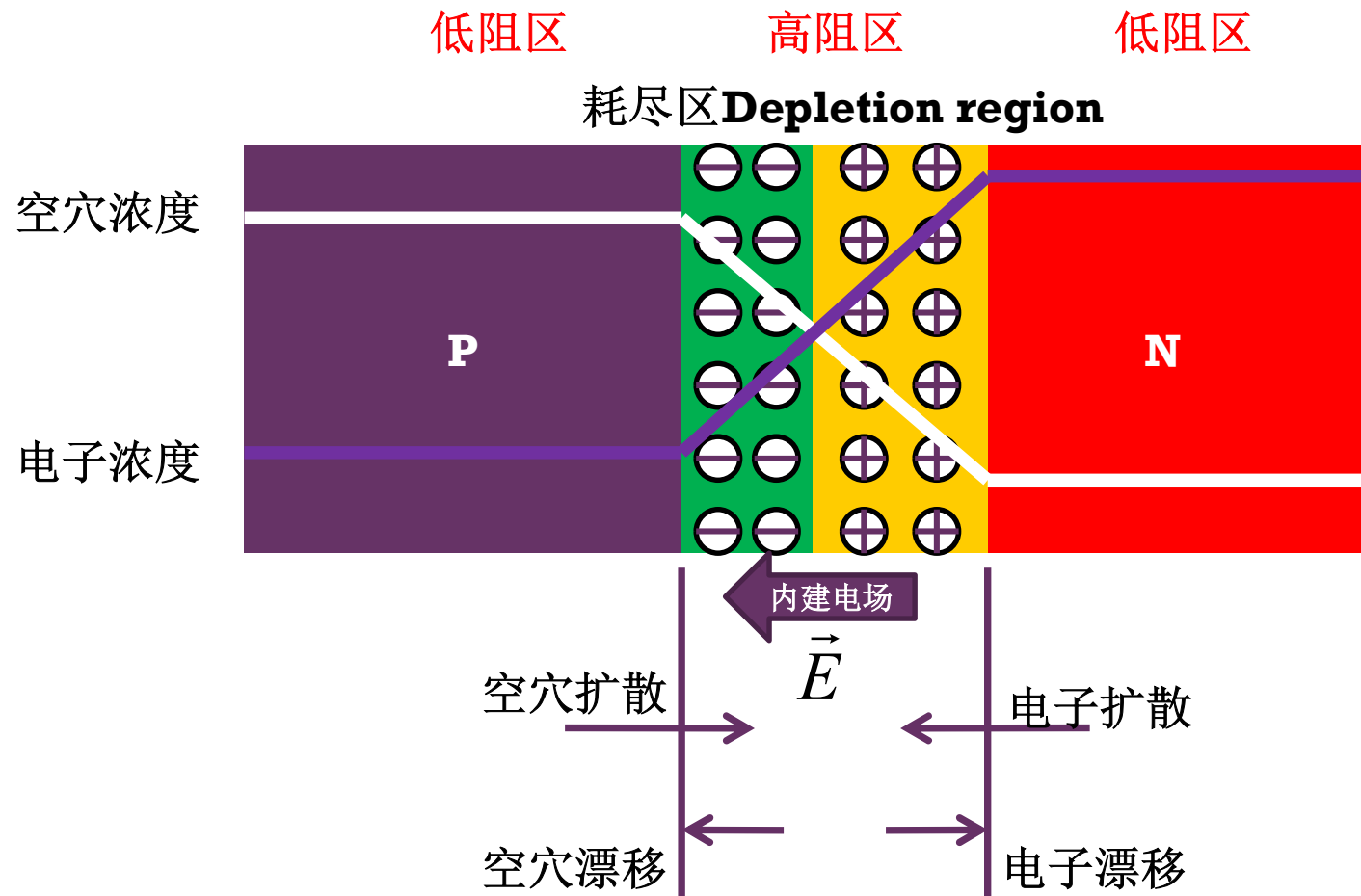
- 当P型半导体和N型半导体接触后，接触面附近则会形成PN结（PN Junction），并可因此形成二极管（diode）特性



- 扩散diffusion
  - 载流子从高浓度区向低浓度区扩散
  - 浓度差导致势差，产生了力，推动载流子运动

## 平衡

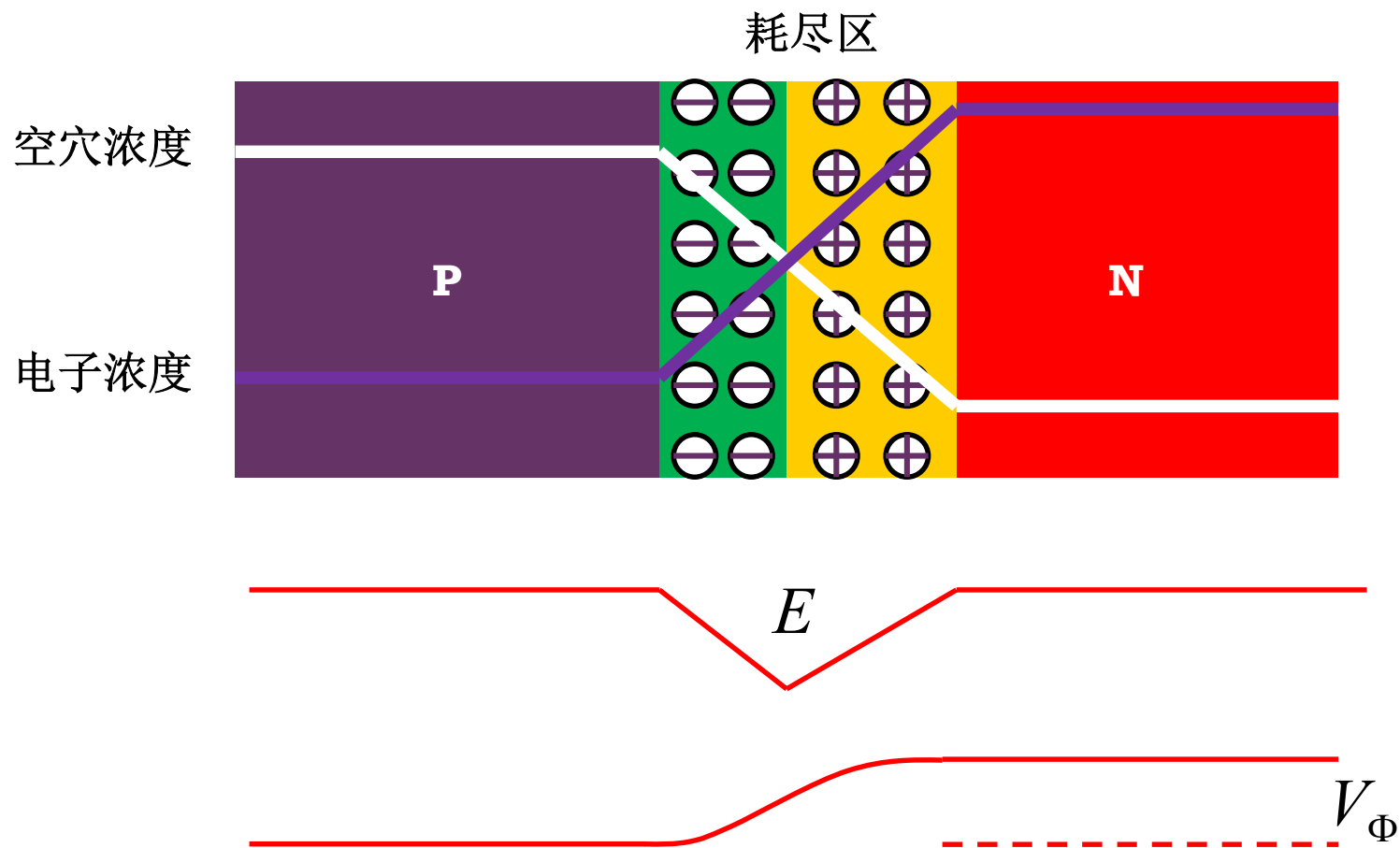
- 漂移drift
  - 在电场作用下，电荷运动
  - 电场导致电势差，产生了力，推动电荷运动



# 内建电位差

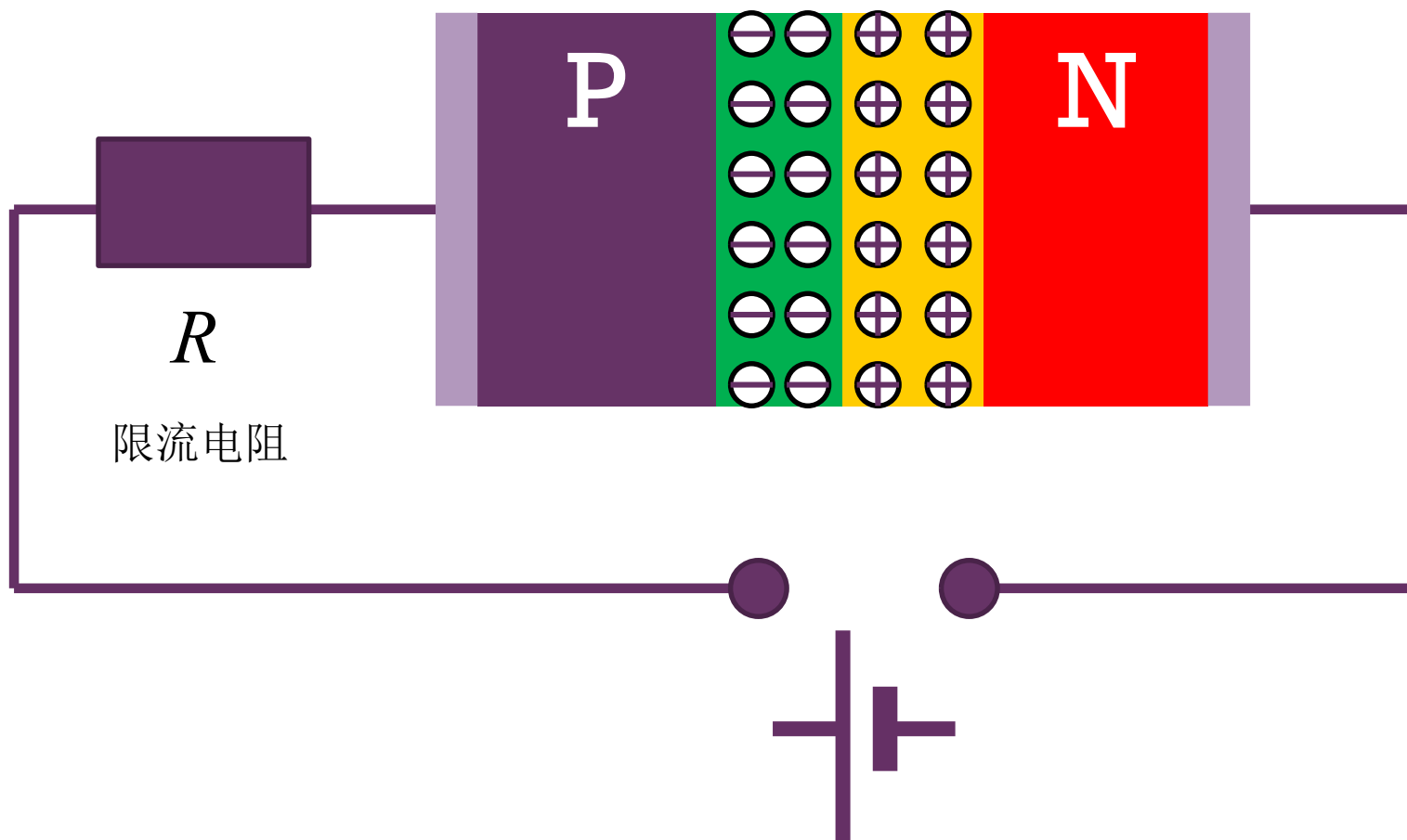
- 内建电场意味着内建电位差 $V_{\Phi}$
- 温度为25°C时
  - 硅PN结 $V_{\Phi} \approx 0.5 \sim 0.7V$
  - 锗PN结 $V_{\Phi} \approx 0.2 \sim 0.3V$

势垒电压



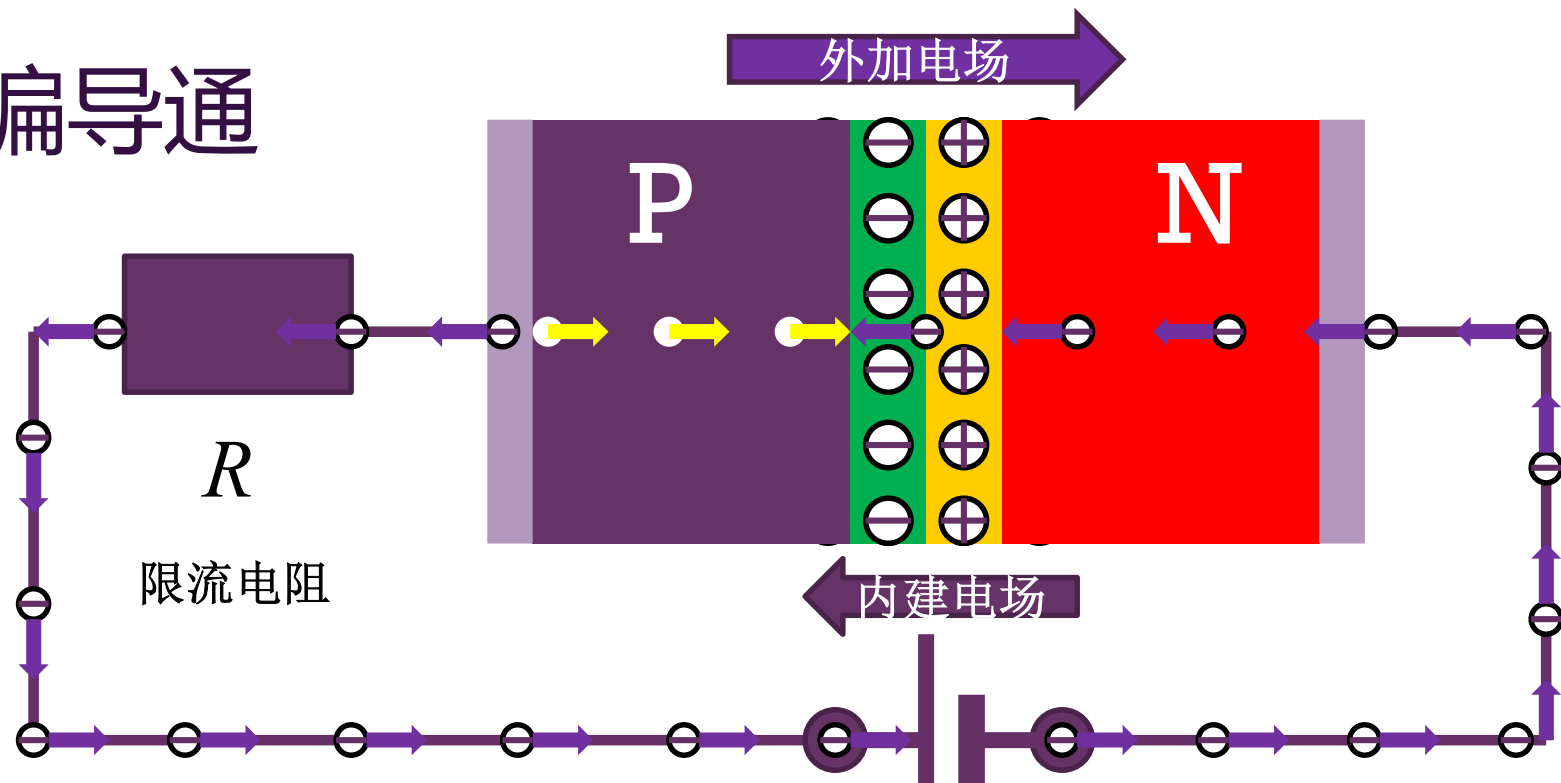
# 正偏forward bias

- 正向偏置





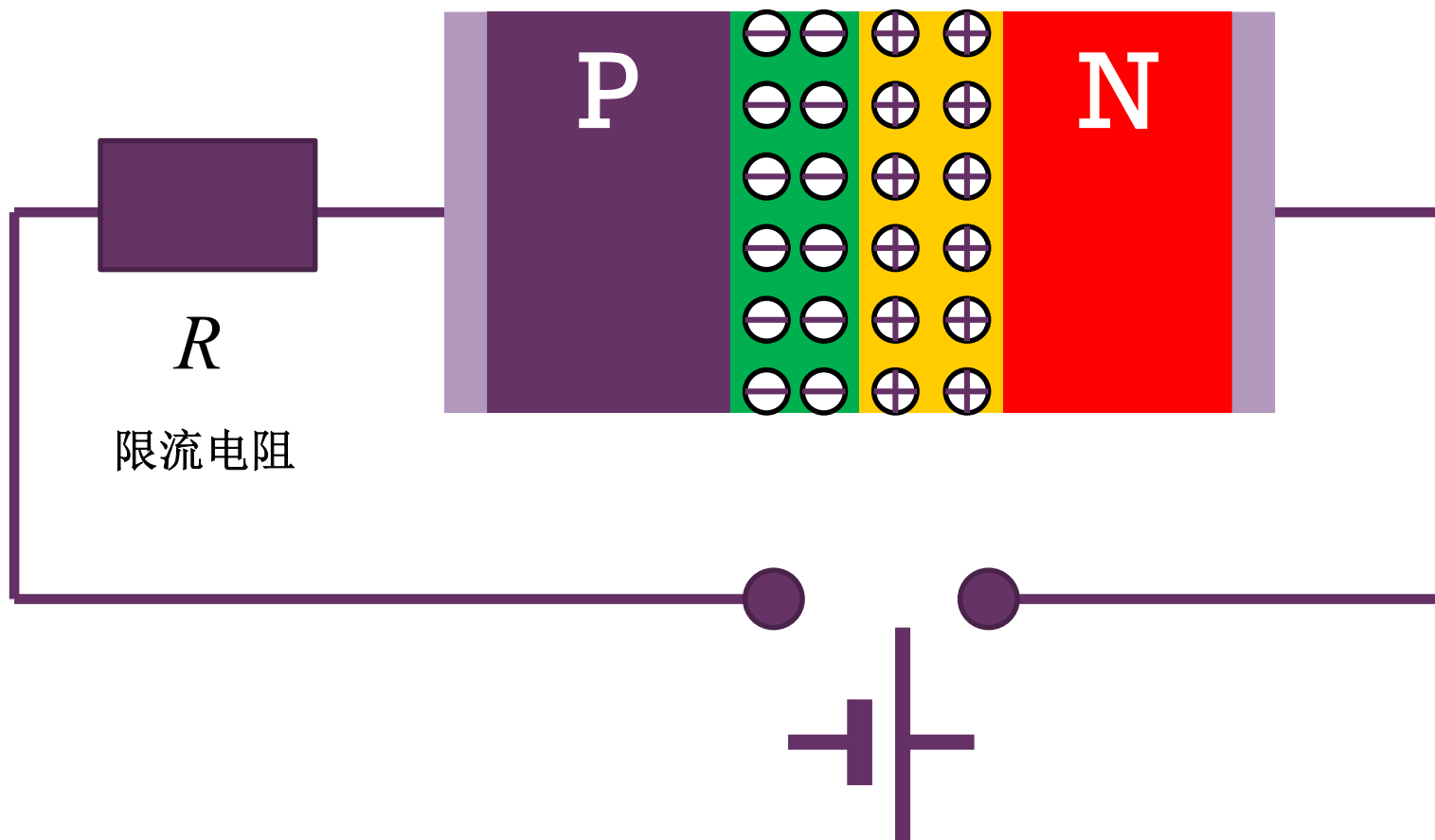
# 正偏导通



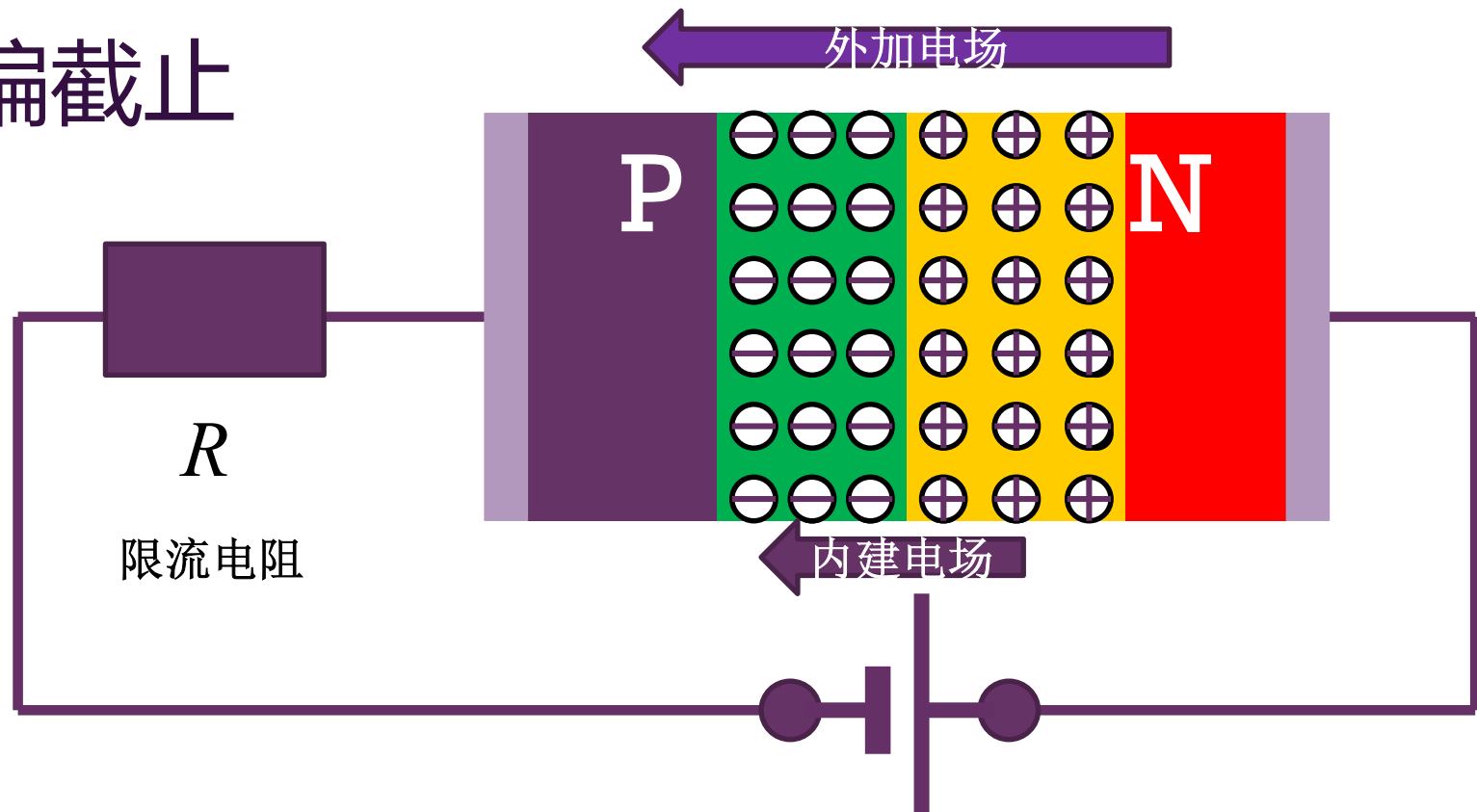
- 正向偏置电压克服内建电位差对多子扩散的阻力，使得多子在耗尽区的扩散得以继续
- 在电源电动势作用下，从电源负极流出的电子，经导线流入N区，经过N区（低阻区），到达结区，电子扩散通过结区，和P区的多子空穴复合
- P区端点每流出一个电子，P区内就生成一个空穴，该空穴在电源电动势作用下，向结区运动，在结区向N区扩散，可以视为和N区扩散过来的电子复合
  - 正向电流是多子扩散电流
- P区端点流出的电子，沿导线移向电源正极
- 限流电阻使得电流不至于太大，过大的电流有可能烧毁PN结

# 反偏reverse bias

- 反向偏置



# 反偏截止



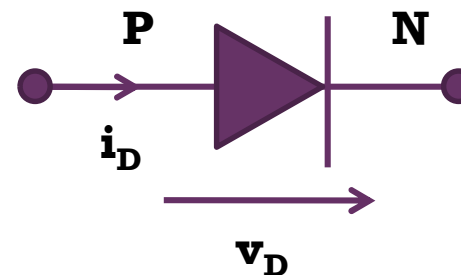
- 电源负极向P区推入电子，从N区抽出电子，电荷在结区积累，使得PN结耗尽区加宽
- 在外加电场作用下，N区空穴向P区漂移，P区电子向N区漂移，存在反向电流
  - 反向电流是少数载流子漂移电流，少数载流子数目少，电流极小，可视为开路
- 二极管呈现高阻特性，限流电阻不起作用

# 反向击穿 breakdown

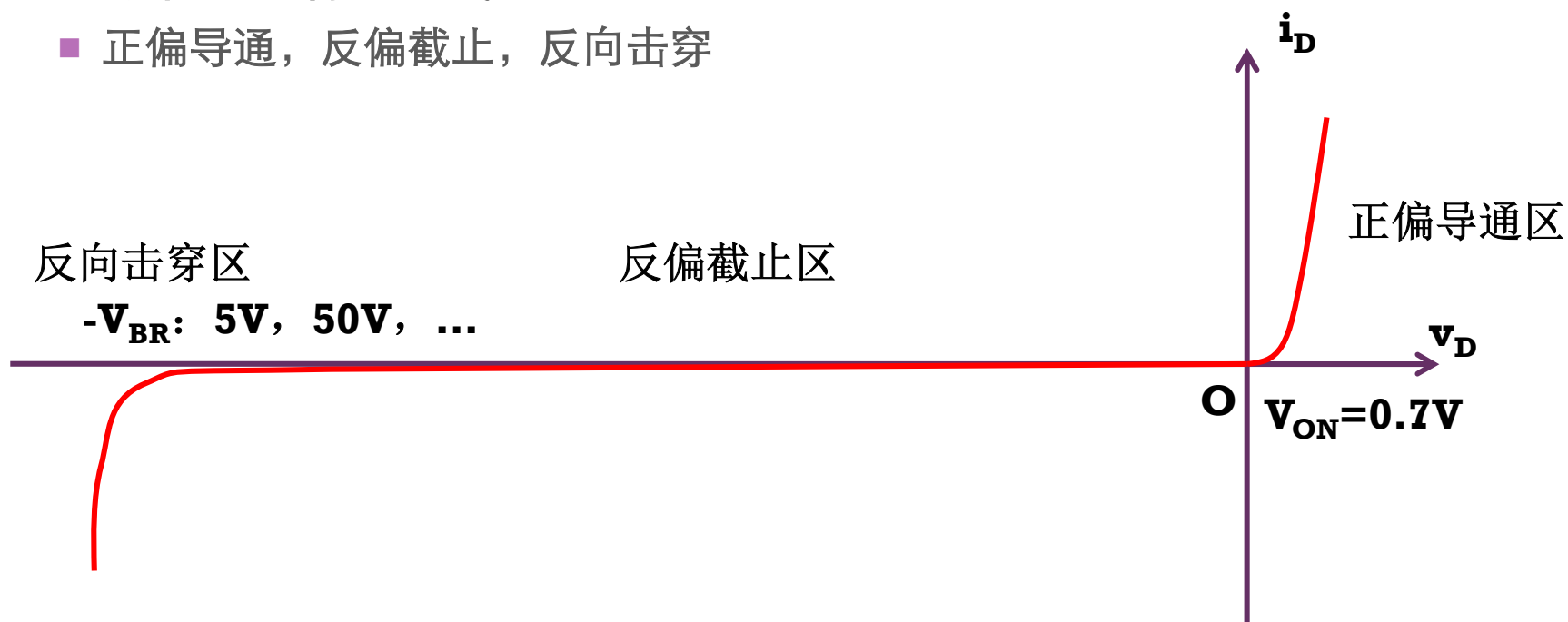
- 持续增加反向电压，PN结则可能**反向击穿**
  - 在未超过允许功率值前，击穿是可逆的
  - 一旦超过，能量转化为热能，热量没有及时耗散出去，则会出现不可逆的**热击穿**
- **齐纳击穿 Zener breakdown**
  - 掺杂浓度高的PN结，结区窄，电场强，易引发齐纳击穿
  - 结区电场足够强，强电场直接将原子的价电子从共价键中拉出来，在结区产生大量的电子空穴对，PN结反向电流急剧增加
- **雪崩击穿 avalanche breakdown**
  - 掺杂浓度低的PN结，结区宽，随着外加反向电压增加，结区电场增强，在尚未引发齐纳击穿时
  - 电子在电场作用下漂移速度越来越快，碰撞结区原子，将结区原子的价电子撞出价带，形成电子空穴对
  - 新生成的电子被强场加速，继续撞击原子，产生更多的电子空穴对
  - 如是1生2，2生4，4生8，犹如雪崩，PN结反向电流急剧增大

# 二极管伏安特性

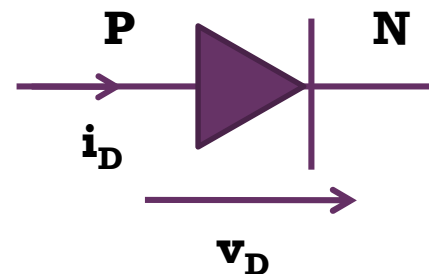
- PN结二极管是将一个PN结封装后的二端器件（单端口网络）



- 二极管伏安特性曲线
  - 正偏导通，反偏截止，反向击穿



# 零偏附近：指数律



- $v_D$  在零附近，伏安特性满足指数律关系
- PN结特性起主导地位

$$i_D = I_{S0} \left( e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right) \quad v_T = \frac{kT}{q} = 26mV$$

$$T = 25 + 273.15$$

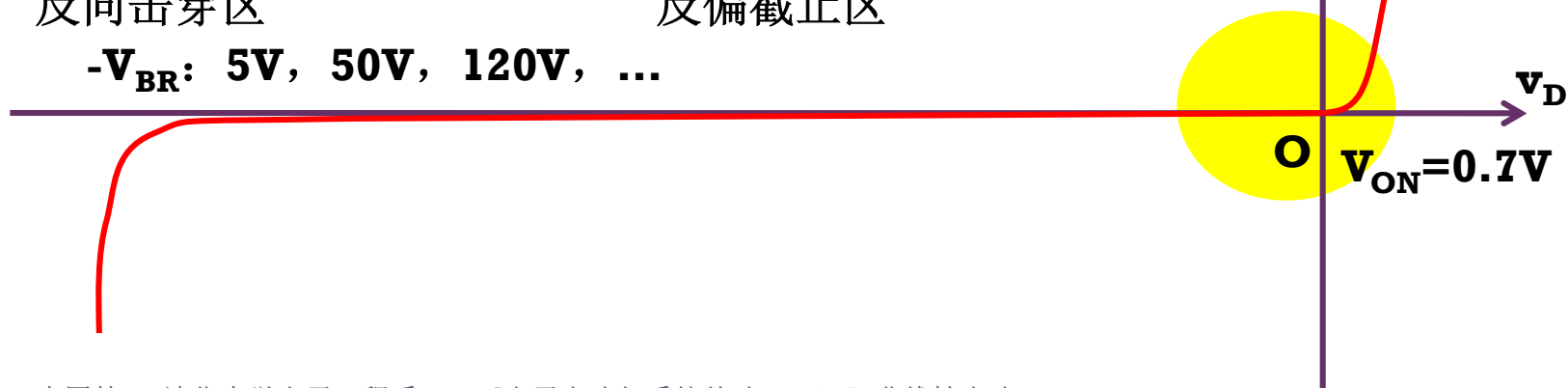
$I_{S0}$ : PN结反向饱和电流: **fA**量级  
 $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ : 玻尔兹曼常数  
 $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ : 基本电荷量

反向击穿区

$-V_{BR}$ : **5V, 50V, 120V, ...**

反偏截止区

正偏导通区



# 热电压

## thermal voltage

- 玻尔兹曼常数  
Boltzmann  
constant
- 联系宏观物理量  
与微观物理量的  
常数

$$\frac{PV}{T} = kN$$

$k=1.38\times 10^{-23}\text{J/K}$ : 玻尔兹曼常数  
 $q=1.6\times 10^{-19}\text{C}$ : 电子电荷量

$T=(25+273.15)\text{K}$ : 室温  
 $v_T=26\text{mV}$

$$qv_T = kT$$

$$v_T = \frac{kT}{q}$$

$$\frac{PV}{N} = kT = 4.11\times 10^{-21}\text{J}$$

视为单个理想气体分子的热能

# 指数律

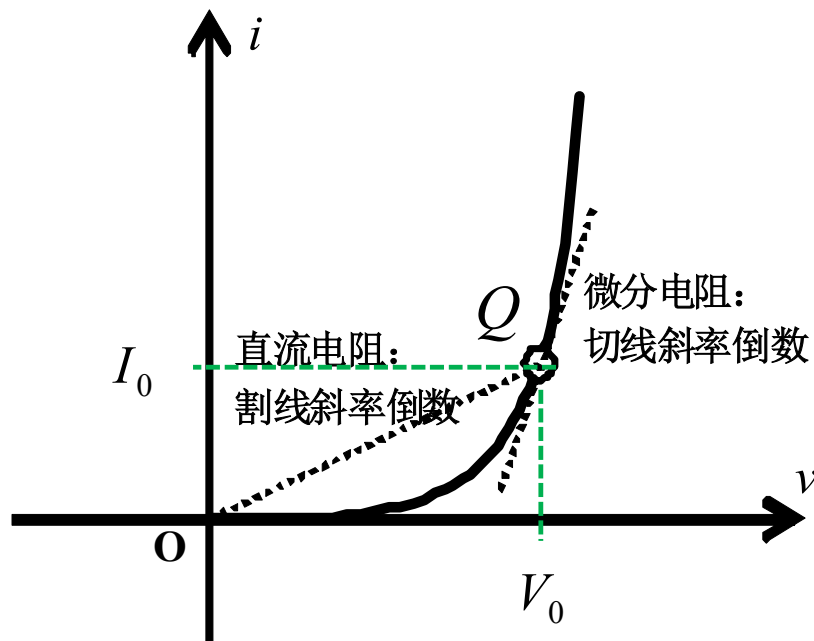
$$i_D = I_{S0} \left( e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right)$$

- 反向偏置电流恒等于反向饱和电流
  
- 正向偏置电流上升极快
  - 0.5V尚是uA量级
  - 0.7V则是mA量级
  - 0.9V则是A量级
  
- 一般认为开启电压为0.7V
  - 恰好近似等于势垒电压

电压 (V)	电流
-0.4	-1.00fA
-0.3	-1.00fA
-0.2	-1.00fA
-0.1	-0.98fA
0	0
0.1	47.85fA
0.2	2.39pA
0.3	0.12nA
0.4	5.69nA
0.5	0.28uA
0.6	13.59uA
0.7	0.66mA
0.8	32.42mA
0.9	1.58A



# 直流电阻和微分电阻



$$r_{ac} = r_d = \left( \frac{di}{dv} \right)_Q^{-1}$$

微分电阻  
交流电阻  
动态电阻

$$R_{DC} = \left( \frac{v}{i} \right)_Q = \frac{V_0}{I_0}$$

直流电阻  
静态电阻

$$i_D = I_{S0} \left( e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right) \quad r_d = \frac{1}{\frac{di_D}{dv_D}} = \frac{1}{\frac{I_{S0}}{v_T} e^{\frac{v_D}{v_T}}} = \frac{v_T}{I_{S0} e^{\frac{v_D}{v_T}}} = \frac{v_T}{i_{D0}} = \frac{v_T}{I_0}$$

# 高正偏电压：体电阻占优

- 启动电压近似等于内建电位差
  - 可以认为二极管两端正偏电压大于内建电位差后，即可克服内部势垒作用，二极管启动导通
- PN结犹如开关，启动前，是高阻状态，启动后则是低阻状态
  - 启动前，二极管特性几乎由PN结指数律特性决定
- 启动后，PN结就是低阻状态，随着正偏电压增加，PN结电阻变得很小，此时，对二极管电流起作用的主要就是PN结两侧P区和N区的欧姆电阻，两个欧姆电阻之和被称为体电阻（bulk resistance）
  - 此时，二极管伏安特性几乎是线性的，线性斜率由体电阻决定

$$R_B = R_P + R_N$$

# 体电阻 线性电阻

- 可以从datasheet中粗略估计体电阻大小，只要假设估计点位于线性段

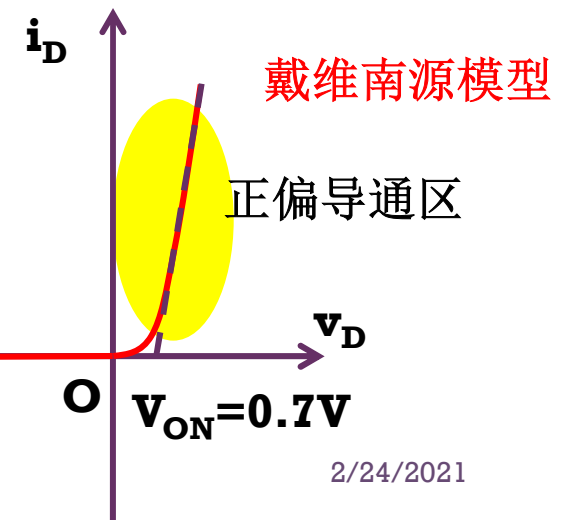
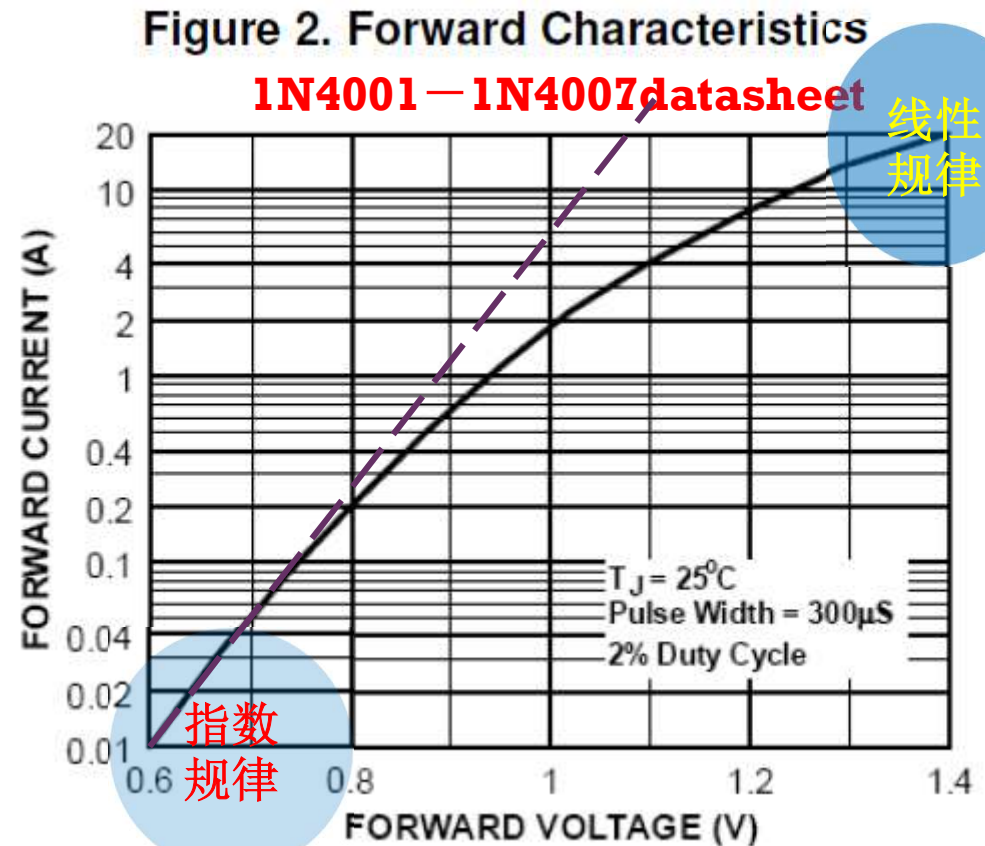
$$R_B = \frac{1.1V - 0.7V}{4A - 0A} = 0.1\Omega$$

电阻太小，正偏导通区可建模为**0.7V**恒压源

反向击穿区

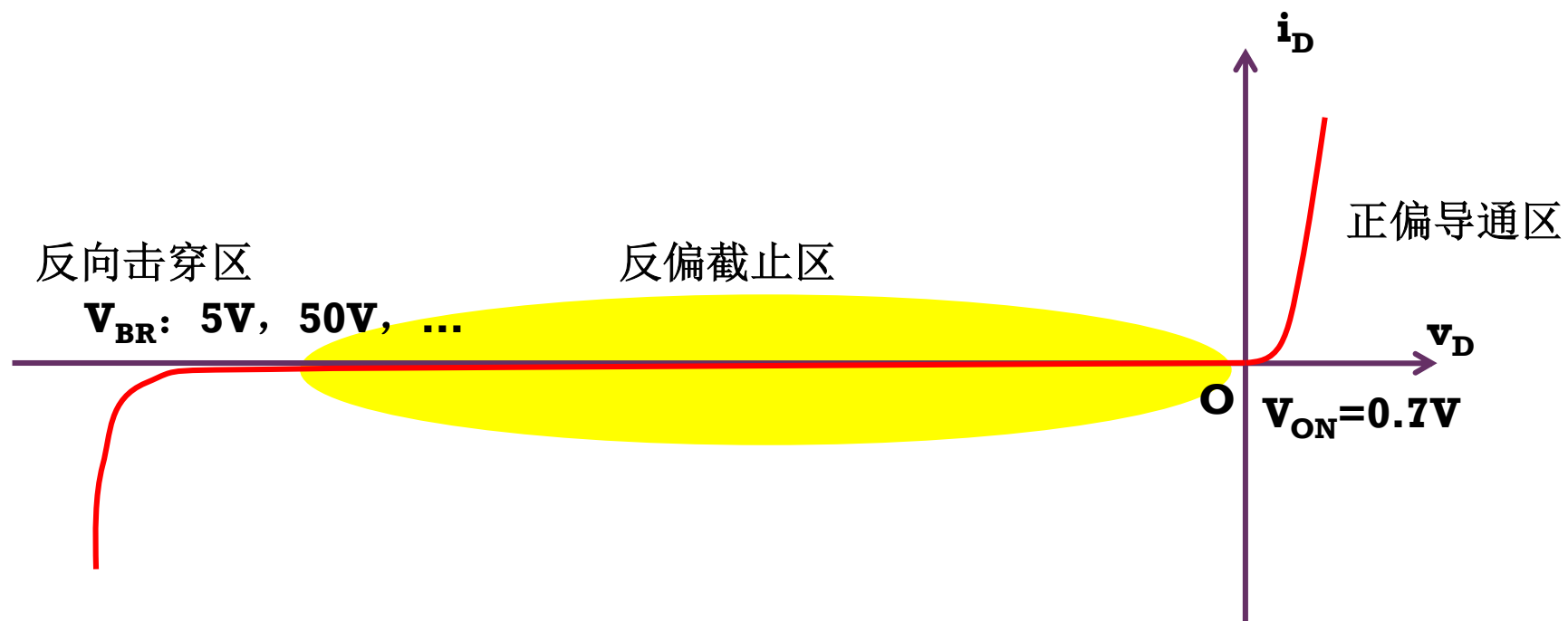
$-V_{BR}$ : 5V, 50V, ...

反偏截止区



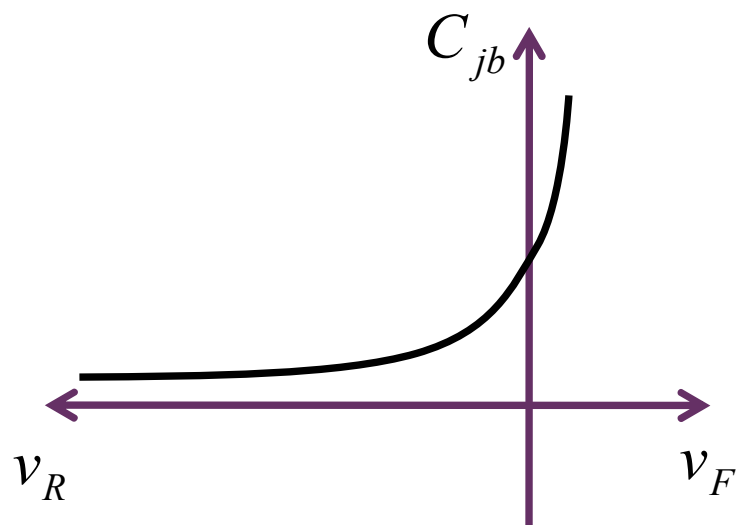
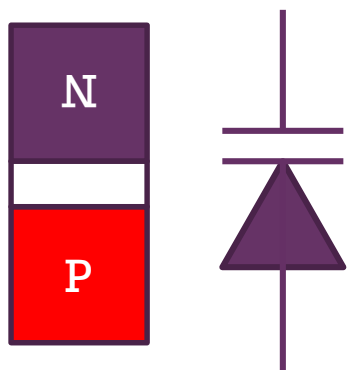
# 反偏截止区

- 反偏截止区
  - 一般设定为开路模型
  - 或者电容模型



# 反偏电容模型

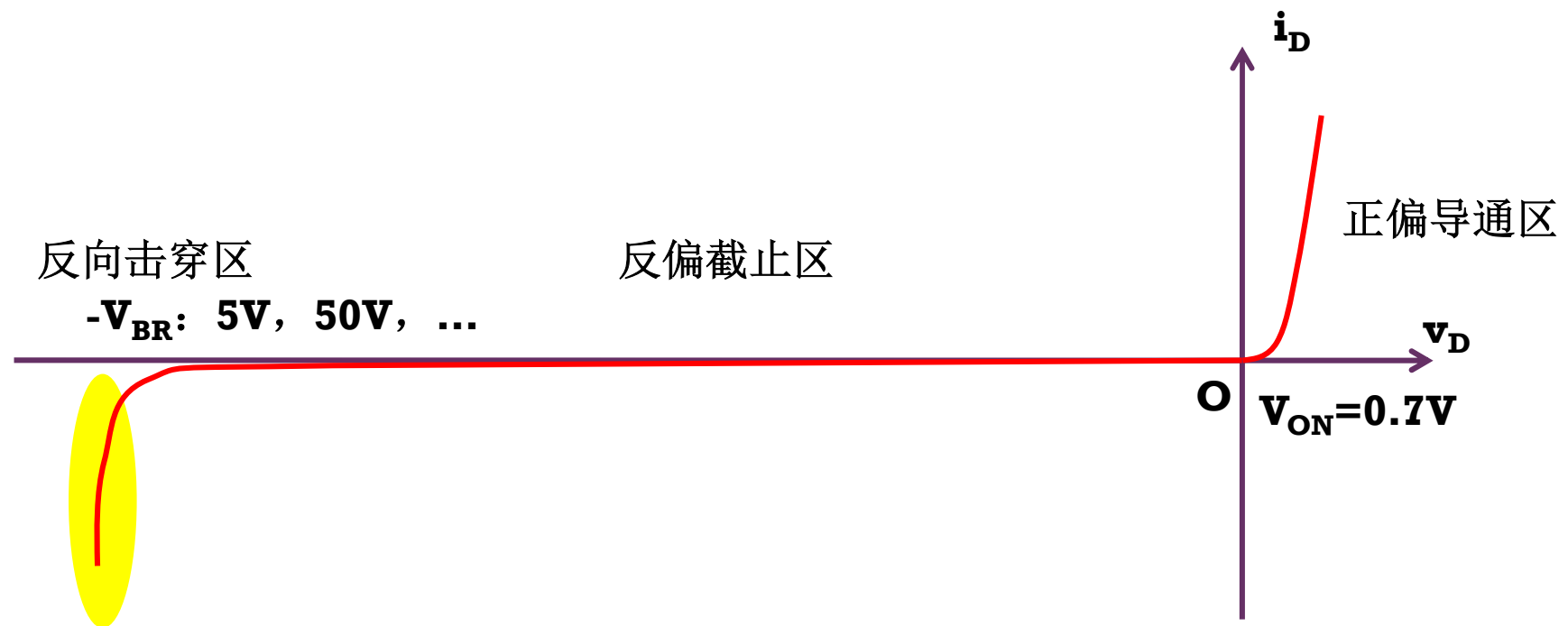
- 可用来实现可变电容
  - 变容二极管



$$C_{jb} = \frac{dQ_D}{dV_R} = \frac{C_{jb0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_\Phi}\right)^\gamma}$$

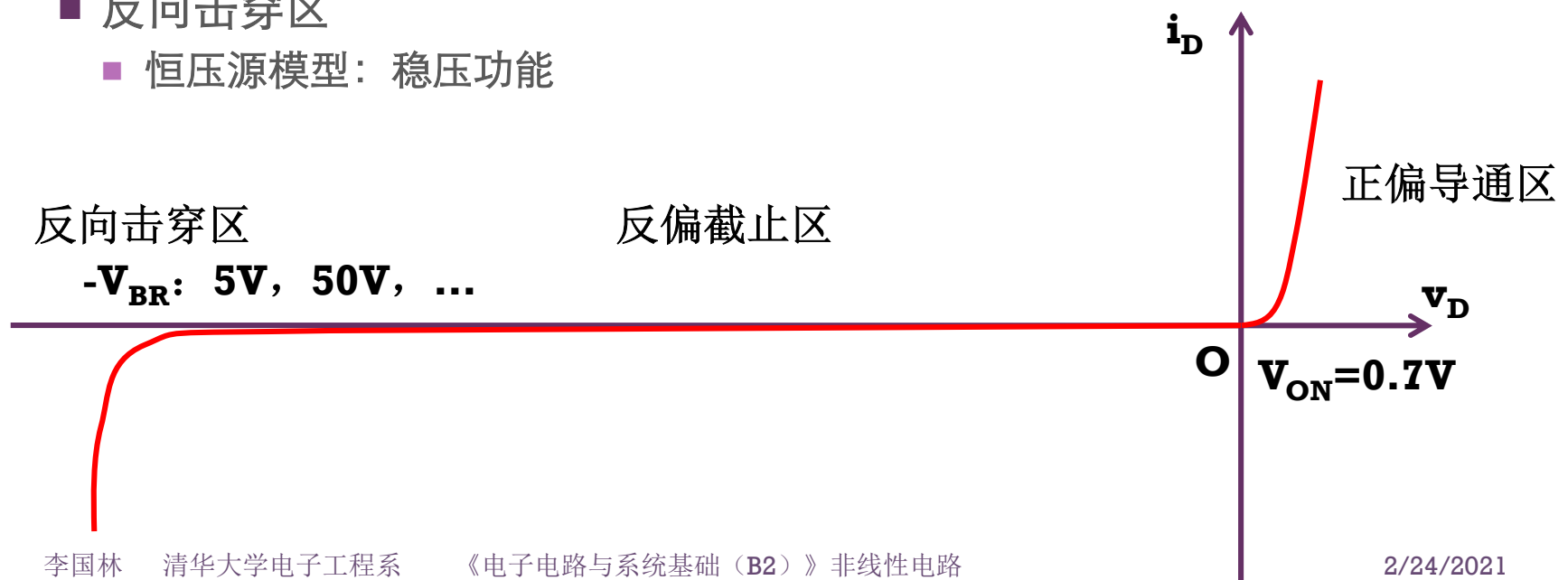
# 反向击穿区

- 一般二极管不应工作在反向击穿区
- 经过特殊设计的二极管，反向击穿区可用于直流稳压
  - 稳压二极管（齐纳二极管，Zener Diode）
    - 可视为恒压源



# 二极管电路模型

- 正偏导通区
  - 戴维南源，0.7V恒压源模型：大信号分析，整流
  - 指数律：小信号分析：微分电阻
- 反偏截止区
  - 开路模型：低频分析：整流
  - 电容模型：高频分析：调谐，变容压控振荡
- 反向击穿区
  - 恒压源模型：稳压功能



# 小结

- 电路器件是实体物质（导体、半导体、绝缘体）的某种结构，器件上施加电压电流，意味着电磁场作用于实体物质，场物质和实体物质相互作用，交换能量，从而在器件端口处形成不同的电压电流关系（伏安特性关系），从而形成不同的器件
  - 电阻器：核心为电阻元件
  - 电容器：核心为电容元件
  - 电感器：核心为电感元件
  - **晶体管：核心为压控流源**
- 人为制作的电路器件力图实现某种理想元件功能，但是由于材料或物理结构导致偏离理想特性
  - 如理想二极管的整流特性是我们期望的特性，但实际特性偏离理想整流特性
- 实际电路不符合仿真电路（分析电路）时，意味着仿真（分析）电路中的器件模型偏离了真实器件，需要为仿真软件提供接近于真实特性的电路模型，才能获得接近真实特性的仿真结果

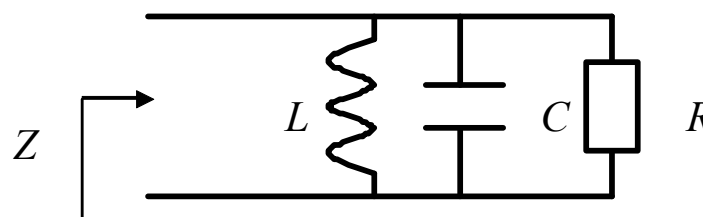


# 作业1 RLC串联谐振和并联谐振腔阻抗

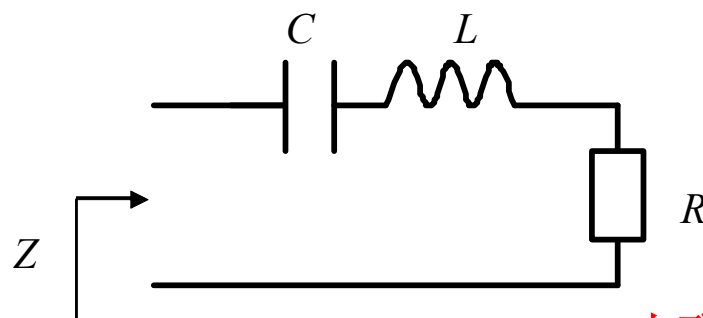
- 复习上学期第9讲  
“RLC” P4-7页内容，  
研究教材P655页“习题8.2”，仿照该习题，
- 写出RLC并联谐振回路和RLC串联谐振回路的端口输入阻抗表达式
- 自编matlab代码，画出端口输入电阻、输入电抗、输入阻抗幅度、输入阻抗相位随频率变化的特性曲线
- 取 $Q=5, 0.5, 0.05$ 三种情况

$$Z(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$$

$$= |Z(\omega)|e^{j\phi(\omega)}$$



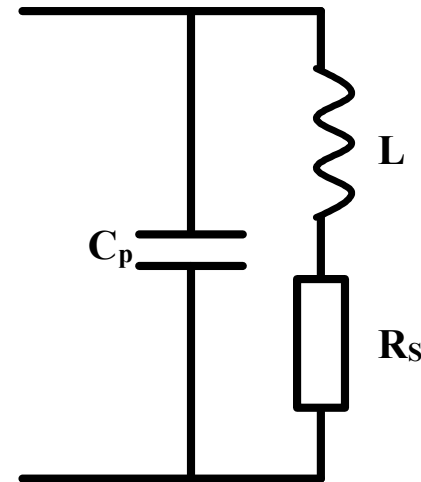
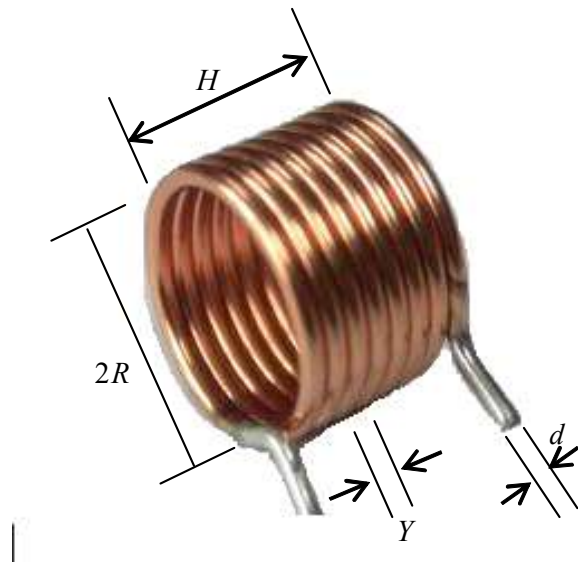
**RLC并联谐振回路**



**RLC串联谐振回路**

## 作业2 空芯电感

- P657 习题8.3 分析给出特定结构的空芯电感的电感量、工作频率范围和寄生电阻大小



## 作业3 电容为何并联用？

- 在很多实际电路中，如PCB板上的电源和地之间往往并联数个不同容值的电容用于电源滤波，请分析说明为什么不用一个大电容替代这些并联电容？
  - 提示：实际电容器的自谐振频率随容值的上升而下降

# 作业4 微分电阻与直流电阻

- 假设某二极管伏安特性在很大范围内都满足指数律关系
  - 该二极管的反向饱和电流 $I_{S0}$ 为10fA
  - 给出直流电流为0.1mA, 1mA, 10mA时对应的直流电压, 以及该直流工作点上的直流电阻和微分电阻
  - 分析直流电阻和微分电阻的变化规律

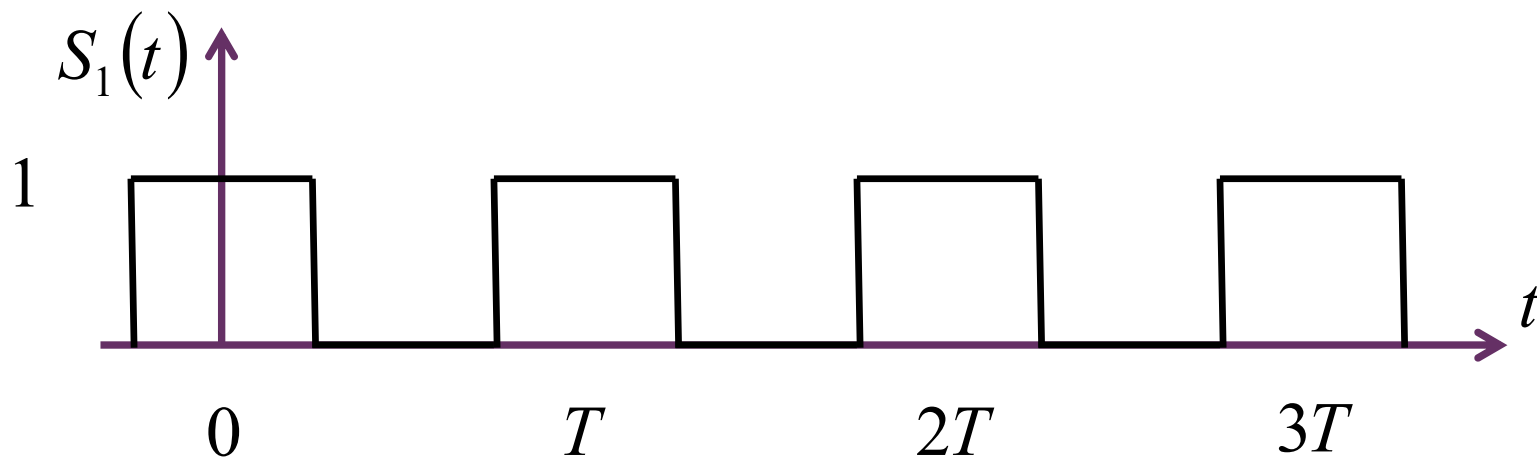
$$i_D = I_{S0} \left( e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right)$$

$i_D$ (mA)	$v_D$	$R_D$	$r_d$
<b>0.1</b>			
<b>1</b>			
<b>10</b>			

# 作业5 开关信号

后面5题属唤醒记忆的复习题，十分简单

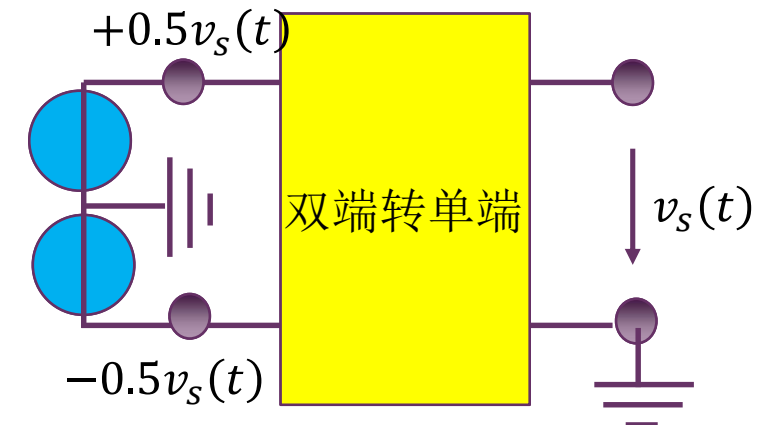
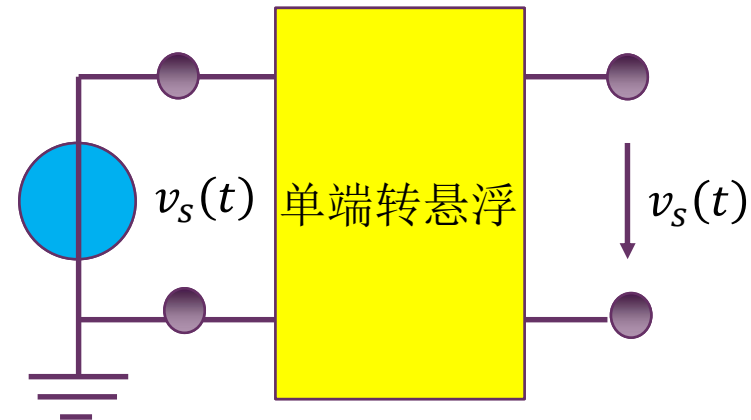
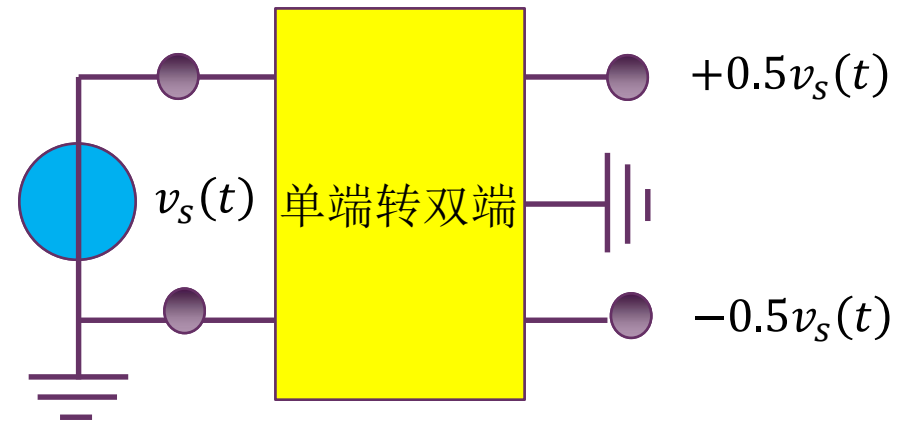
- 复习上学期第4讲“信号分析”内容，并给出方波信号（开关信号） $S_1(t)$ 的傅立叶级数展开表达式



- 定义双向开关信号 $S_2(t) = 2S_1(t) - 1$ ，请画出双向开关信号的波形图，并给出其傅立叶级数展开表达式

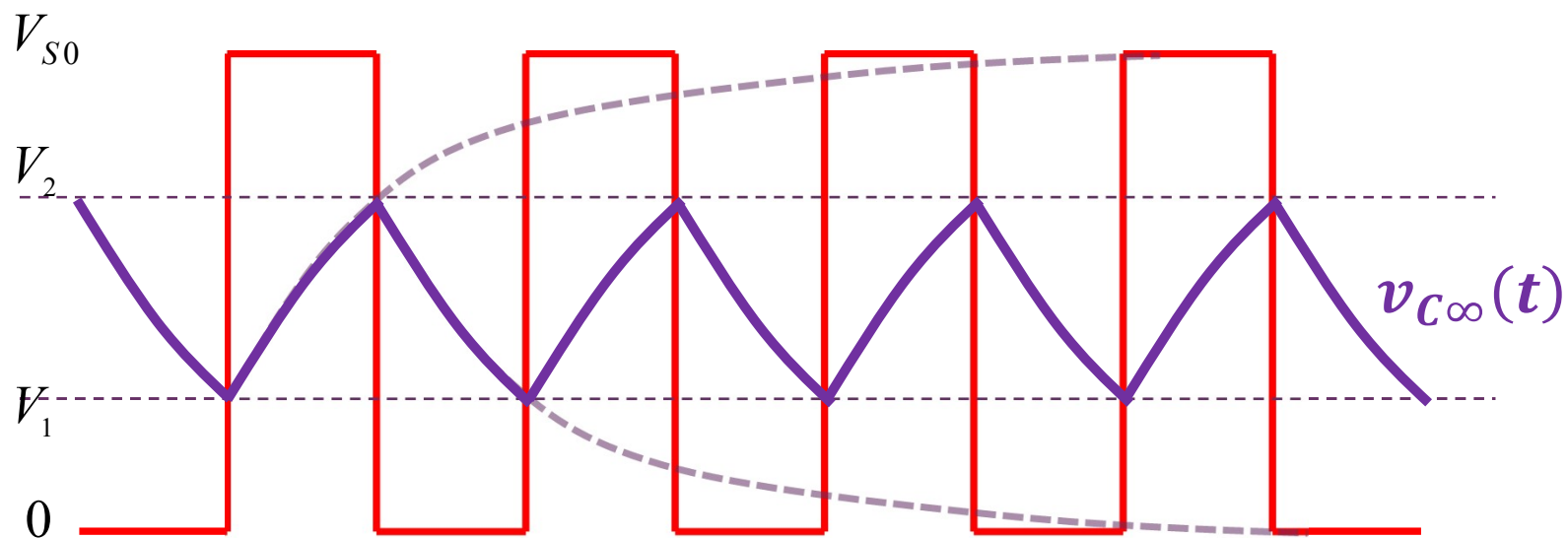
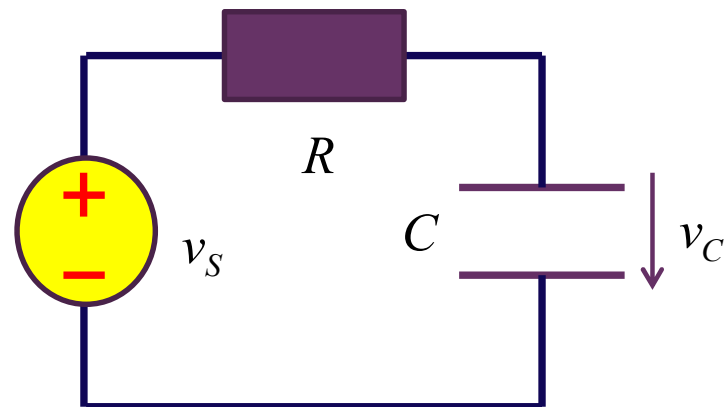
# 作业6 理想变压器 巴伦实现

- 巴伦(balun)是平衡(balance)不平衡(unbalance)转换电路
  - 平衡信号：双端信号（差分信号），两路信号对地，大小相等符号相反
  - 不平衡信号：单端信号，对地的一路信号
  - 悬浮信号：两端之间电压确定，但两端对地电压悬浮（不知道是多少）
- 复习上学期第13讲“典型线性网络”之“理想变压器”内容，用理想变压器实现单端到双端，双端到单端，单端到悬浮信号的转换



# 作业7 电容充放电

- 复习上学期第7讲“时频分析”之“RC分压方波激励”内容，给出方波激励下的电容电压稳态表达式

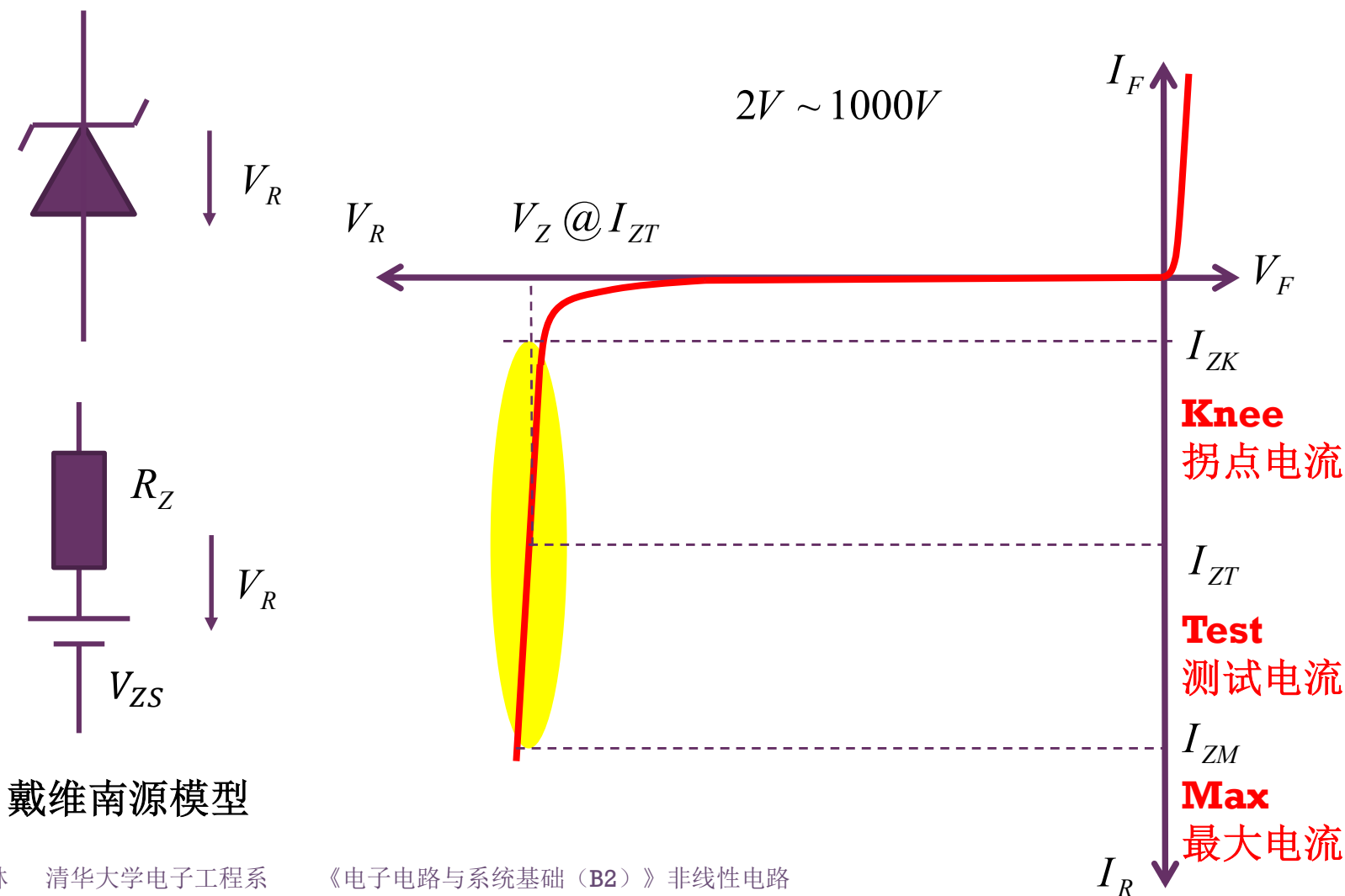


## 作业 8

## 戴维南源建模

- 复习上学期第2讲“电阻与电源”之“带内阻电源”部分内容，为下面的戴维南源建模

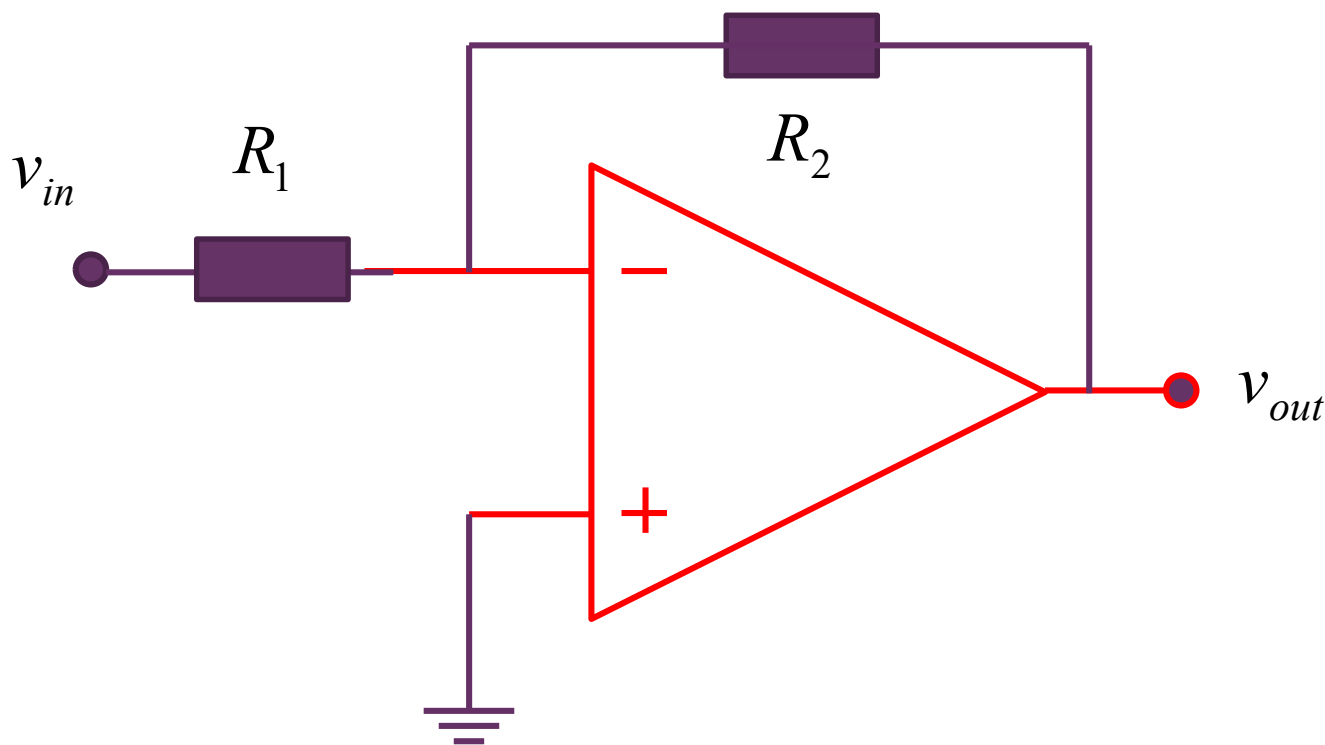
- 已知某工作在反向击穿区的齐纳二极管，其测试电流为49mA，测得该点齐纳电压为5.1V，微分电阻（齐纳电阻）为 $7\Omega$ ，用该测试点的切线替代反向击穿区特性曲线，给出该切线对应戴维南源等效电路（戴维南源电压和源内阻）





## 作业9 运放虚短、虚断特性应用

- 复习上学期第13讲“典型线性网络”之“运算放大器”部分内容，利用理想运放的虚短、虚断特性分析获得如下反相电压放大器的电压放大倍数 $A_v = v_{out}/v_{in}$



# CAD

- 尽快熟悉助教提供的CAD工具，下周开始正式布置仿真作业
- 已经熟悉仿真工具的同学，可以选本次作业中理解有困难的题目，仿真确认你的想法是否正确
  - 练手，熟悉工具使用

# 本节课内容在教材中的章节对应

- P968-972: 附录A8 导体、绝缘体和半导体
- P973-989: 附录A9 PN结二极管
- P654-657: 习题8.2 器件的寄生效应
- P657-658: 习题8.3 空芯电感电路模型
- P473-523: 第六章 电路抽象
  - P488: 电阻; P491: 电容; P495: 电感; P513: 寄生效应