



# 三极管的物理原理

# 一、费米能

晶体中的大量自由电子构成的系统，借用热力学中理想气体模型的说法，称为**自由电子气**

定态薛定谔方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r})$$

此方程的解为

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

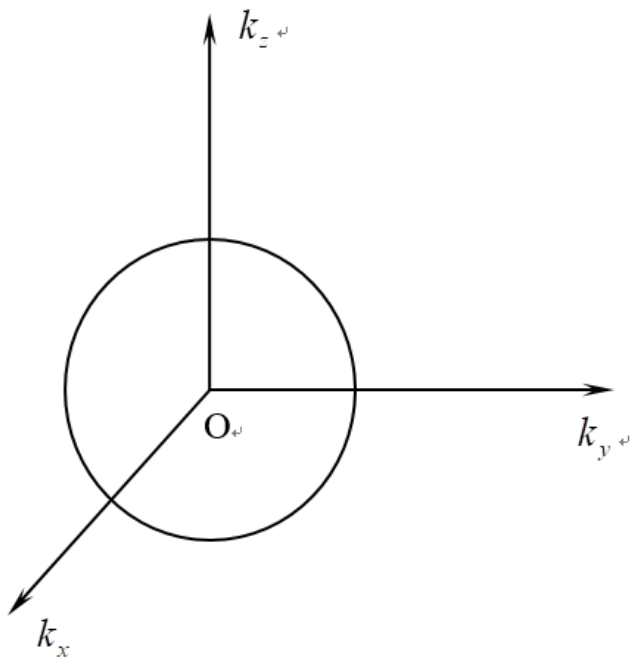
其中  $\mathbf{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j} + k_z \hat{k}$

称为电子波矢，简称波矢

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

能量相等的状态的  $k$  端点组成的面称为**等能面**

显然，自由电子气的等能面为**球面** 球面的半径为  $k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$



由泡利不相容原理，每一个  $k$  状态上只能容纳自旋向上和向下的两个电子

电子始终优先占据能量低的状态，即填充半径较小的等能面内部的状态

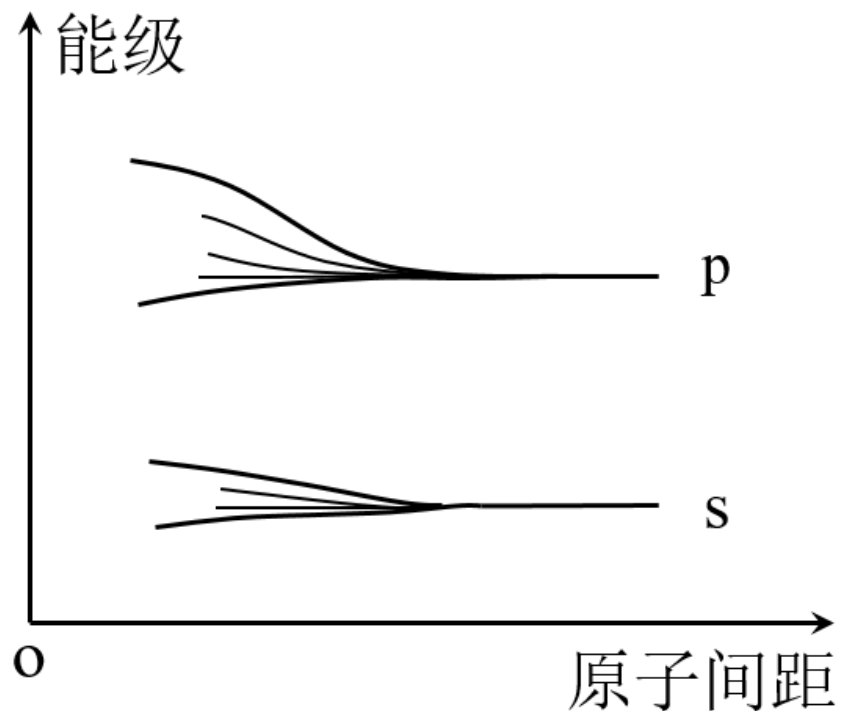
电子所能占据的最高能量称为**费米能**，用  $E_F$  来表示

## 二、能带的产生

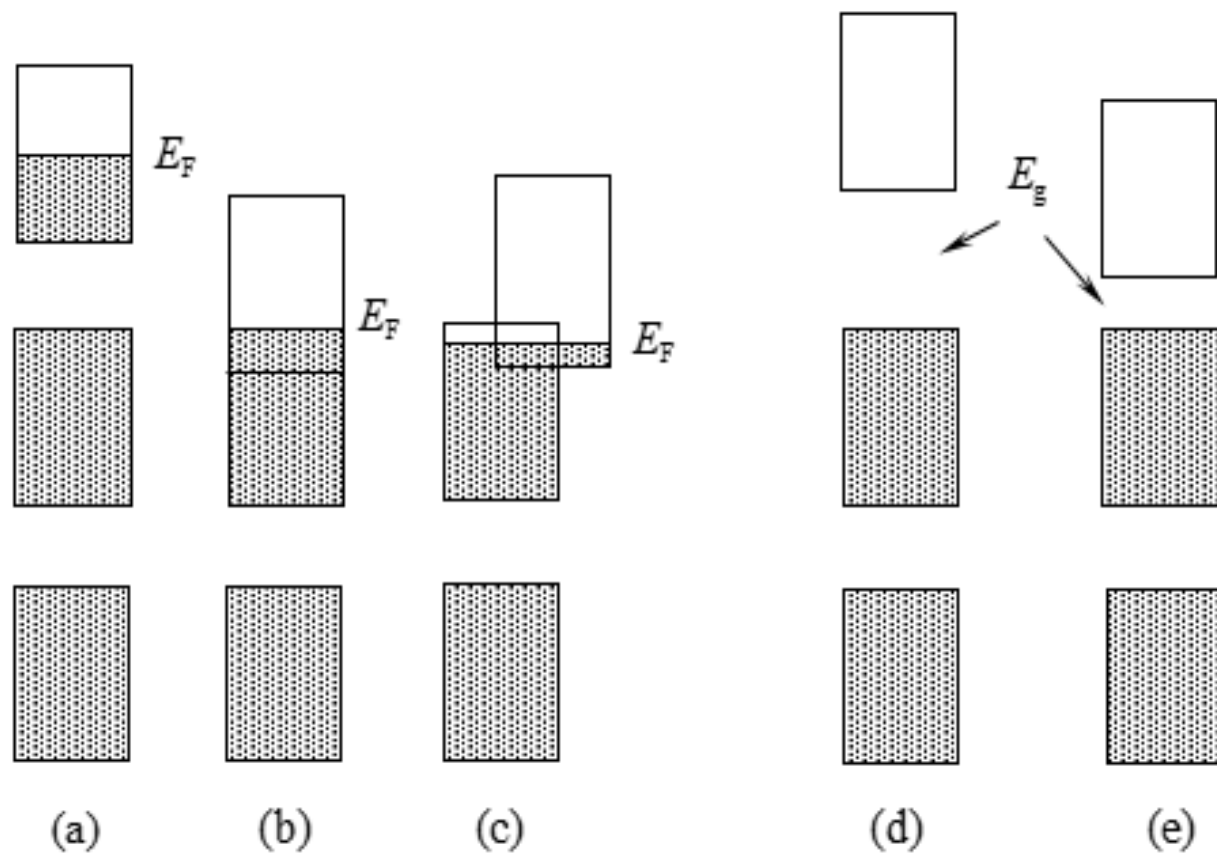
晶体中孤立原子的能级（如：s能级，p能级，d能级等）是简并的

但由于原子间的相互作用，导致波函数交叠，简并的能级发生劈裂，就会形成能带，如：s带，p带，d带等

原子间距越小，原子间相互作用越强，劈裂就越严重，带宽就越大



### 三、导体、半导体、绝缘体的能带结构



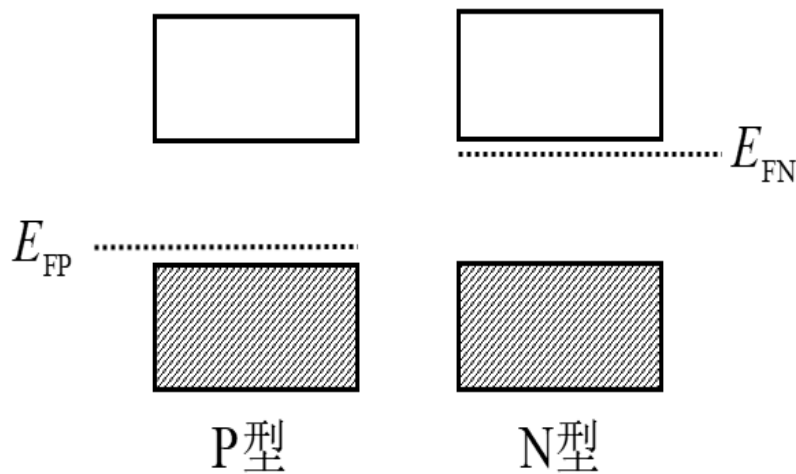
导体（金属、半金属）、绝缘体和半导体的能带结构示意图  
(a)、(b) 金属； (c) 半金属； (d) 绝缘体； (e) 半导体

## 四、PN结的物理原理

### 1、P型半导体和N型半导体

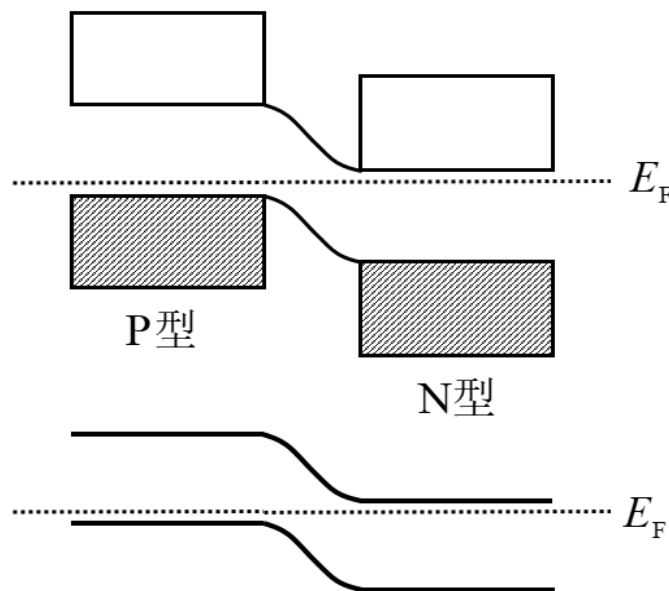
半导体通过适当掺杂，可形成P型半导体和N型半导体，多数载流子分别为空穴和电子。

### 2、P型半导体和N型半导体的费米能



P型和N型半导体的费米能对比示意图

### 3、PN结



PN结两边费米能相等  
及能带弯曲示意图

自建电场导致界面附近能带弯曲，  
直至两区形成**统一的费米能**

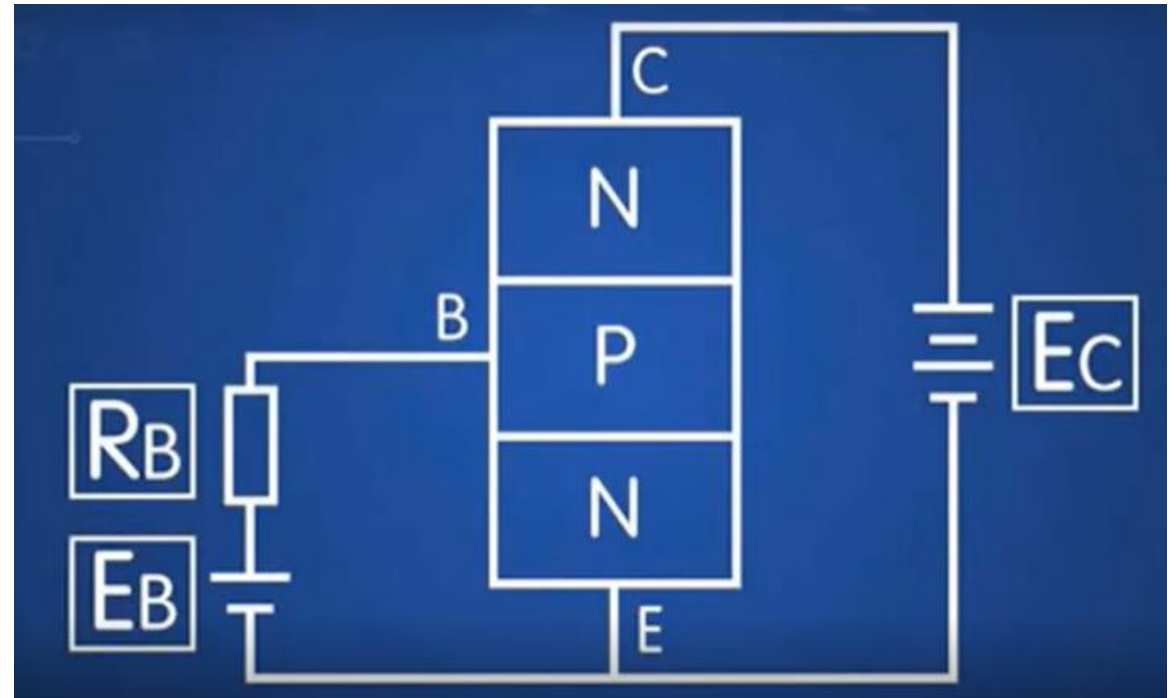
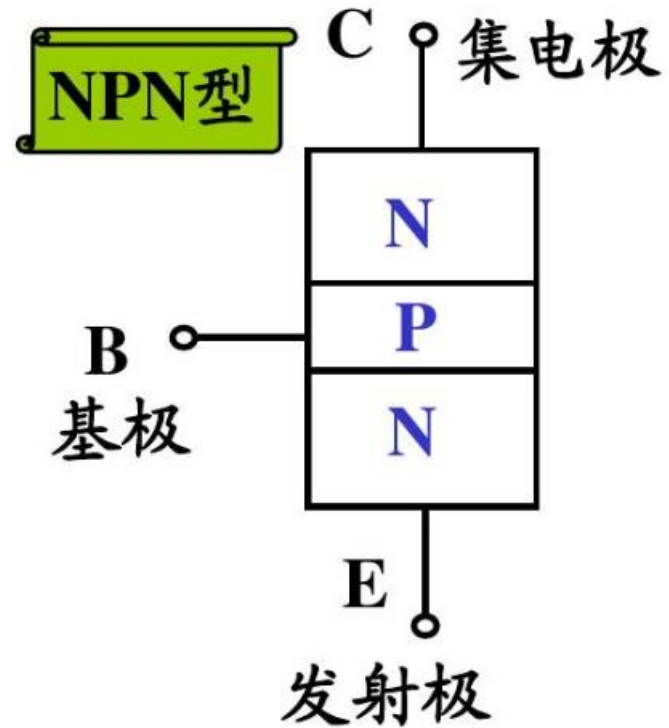
PN结两端加正向电压，  
N区的电子向P区扩散，  
有大的正向电流。

PN结两端加反向电压，  
P区的电子为少数载流子，  
所以反向电流很弱。

PN结的**整流效应**

## 五、三极管的物理原理

三极管，具有电流放大作用，是电子电路的核心元件。

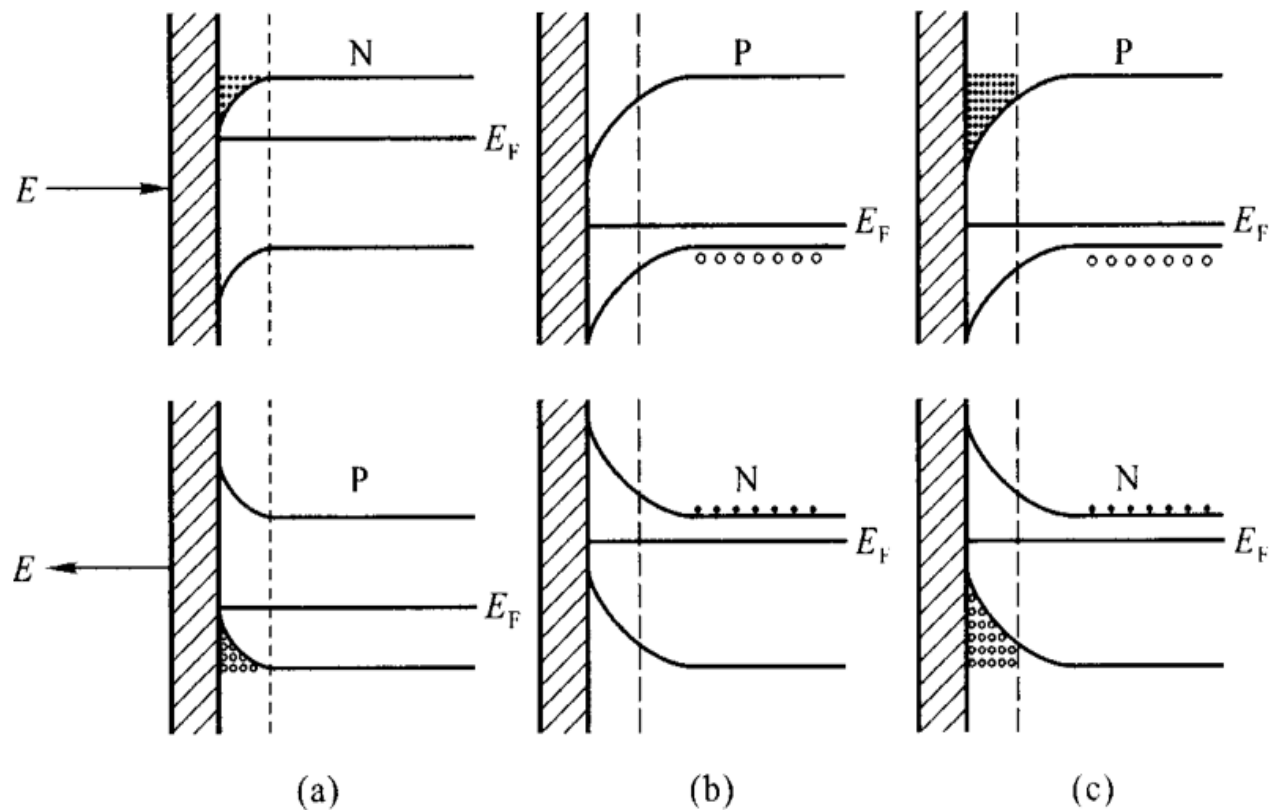
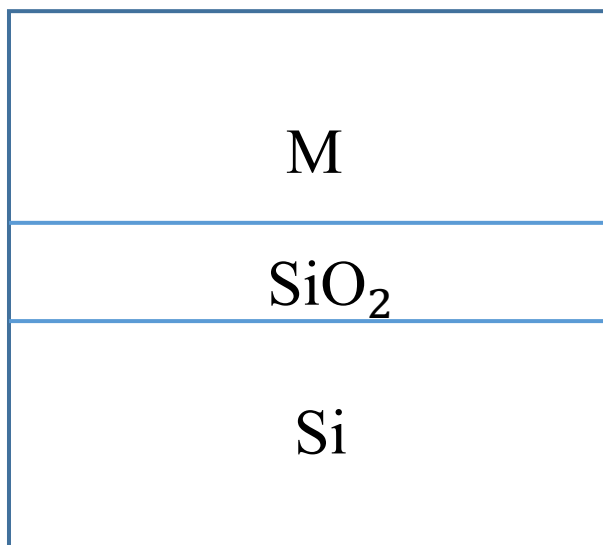




# 六、场效应管（MOS管）的物理原理

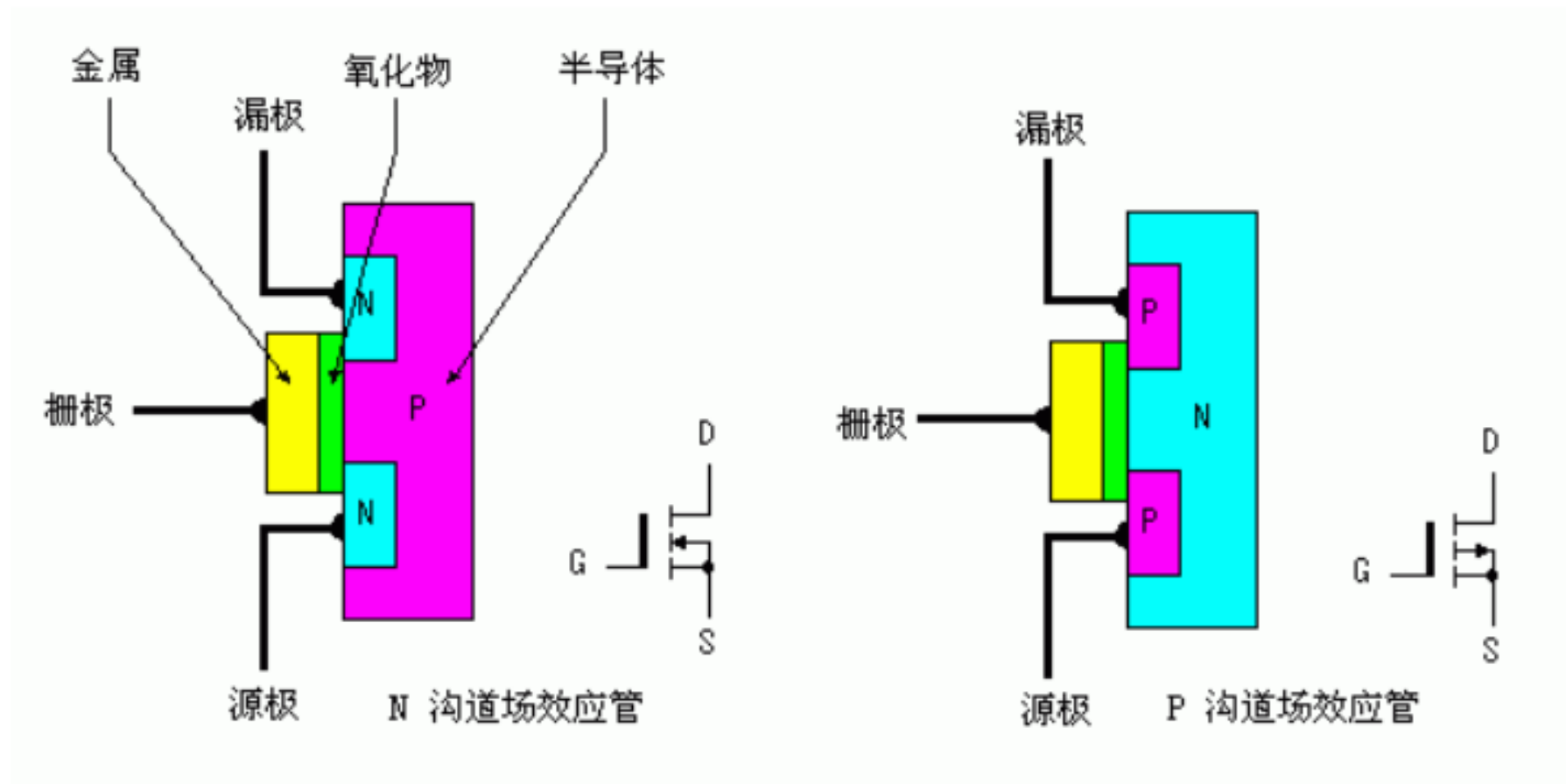
## 1、MOS结构

金属-绝缘体-半导体结构——MIS结构，  
当绝缘体为氧化物时，就形成了MOS结构。

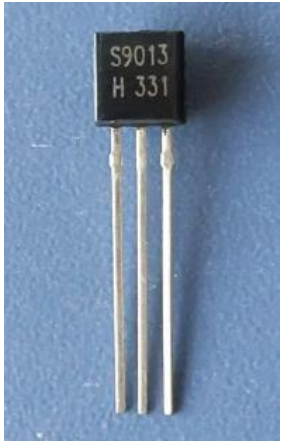


## 2、MOS管

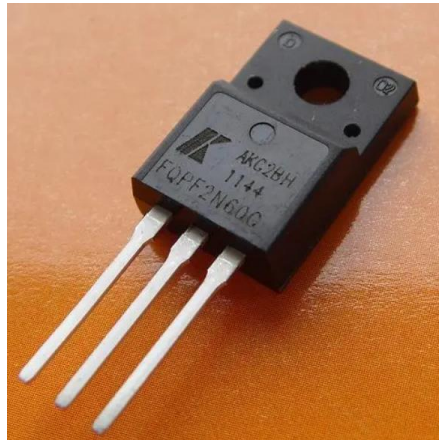
利用上面的MOS结构，可以制成MOS管



## 七、三极管和场效应管（MOS管）的应用



三极管



场效应管



## 八、参考文献

- 1、夏鹏昆，程齐家，大学物理 34（2015）54-58。
- 2、黄海猛，王常旺，肖林昊，大学物理 39（2020）29-32。
- 3、卢森锴，大学物理 27（2008）2-6。
- 4、许少娟，肖传栋，刁立强，大学物理实验 35（2022）112-116。

谢 谢！