



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

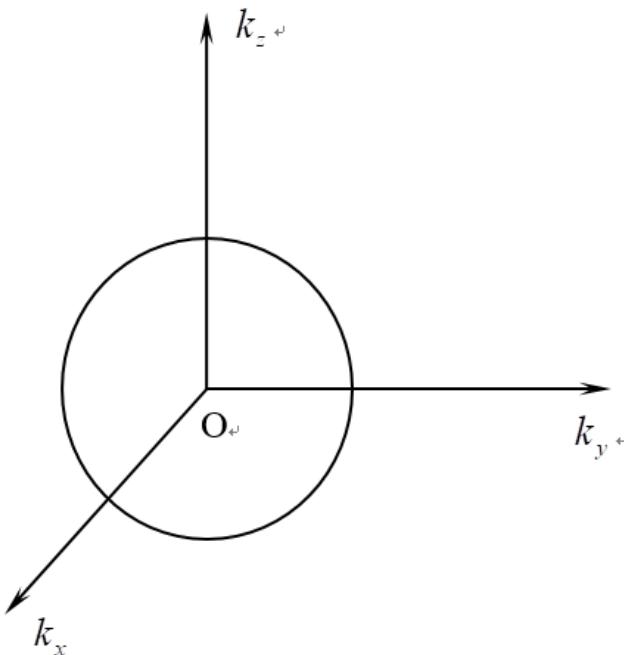
$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{ik \cdot r} \quad E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

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

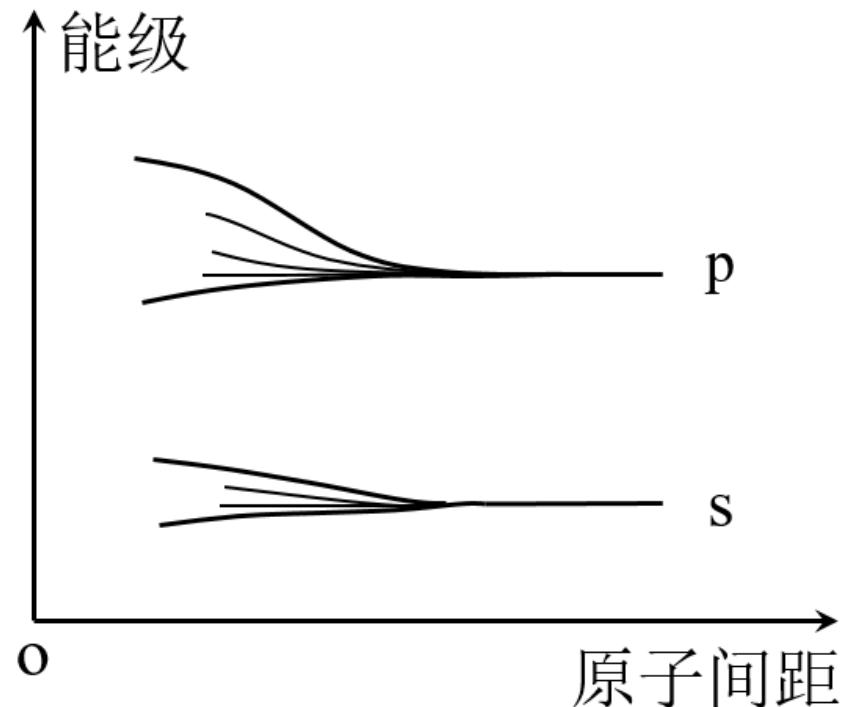
电子所能占据的最高能量称为**费米能**，用 E_F 来表示

二、能带的产生

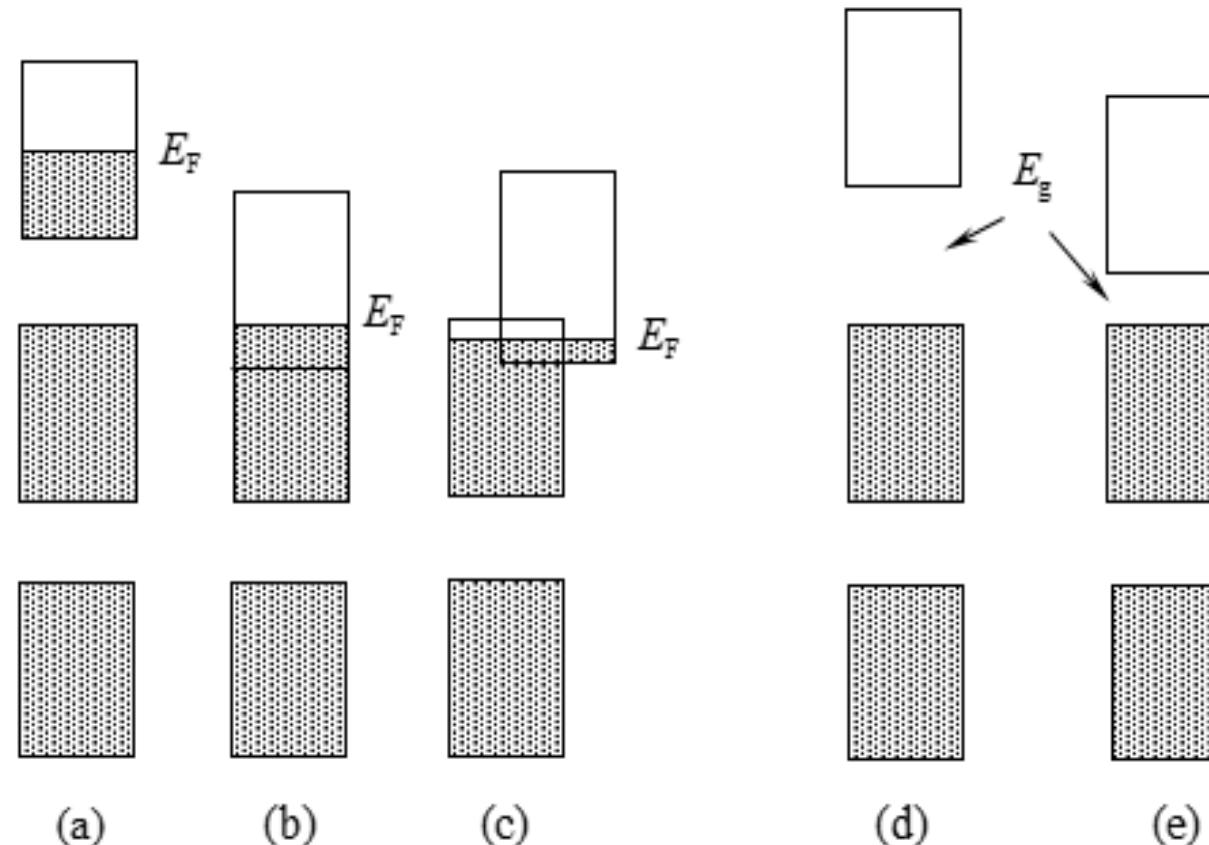
晶体中孤立原子的能级（如：s能级，p能级，d能级等）是简并的

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

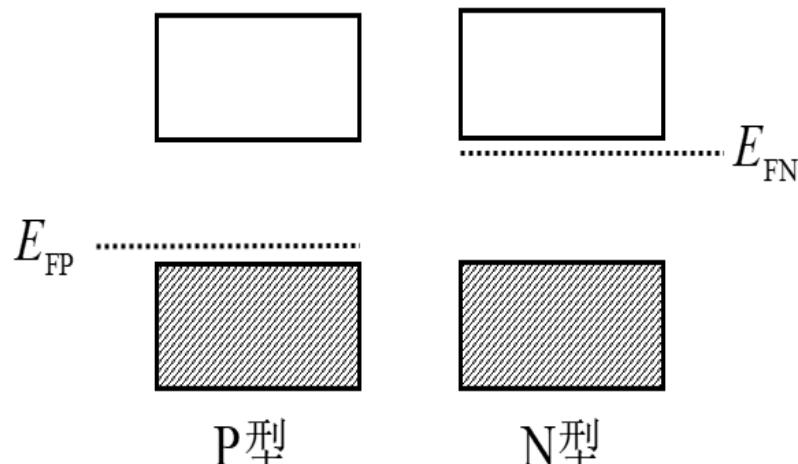
(a)、(b) 金属; (c) 半金属; (d) 绝缘体; (e) 半导体

四、PN结的物理原理

1、P型半导体和N型半导体

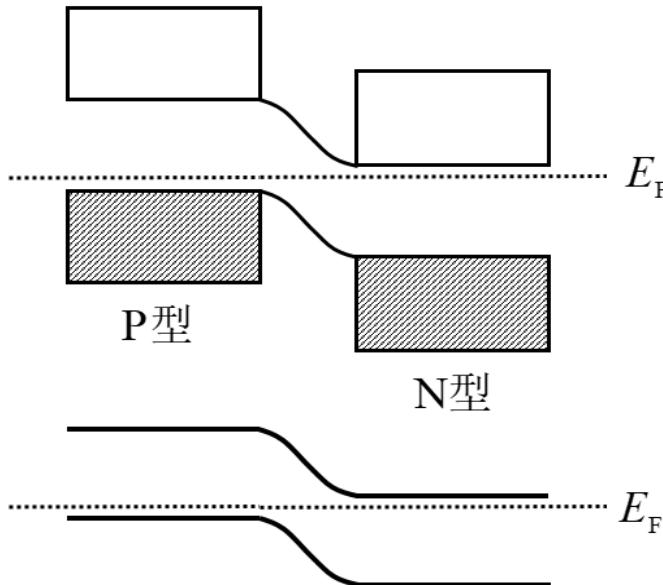
半导体通过适当掺杂，可形成P型半导体和N型半导体，多数载流子分别为空穴和电子。

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

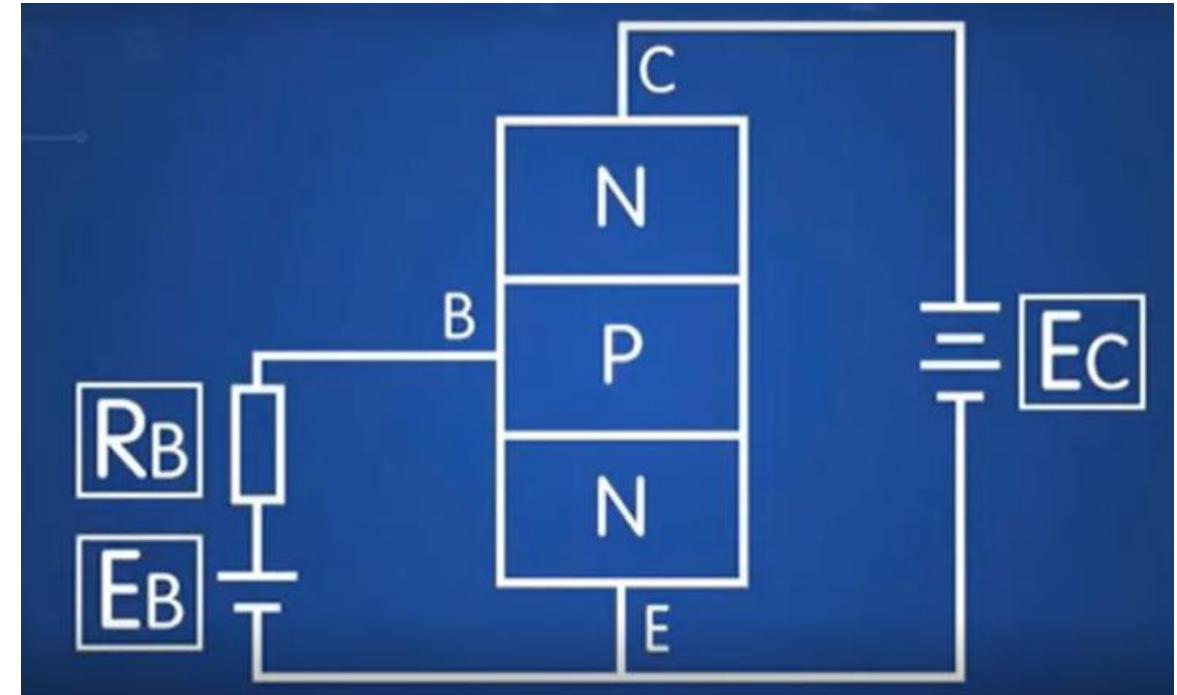
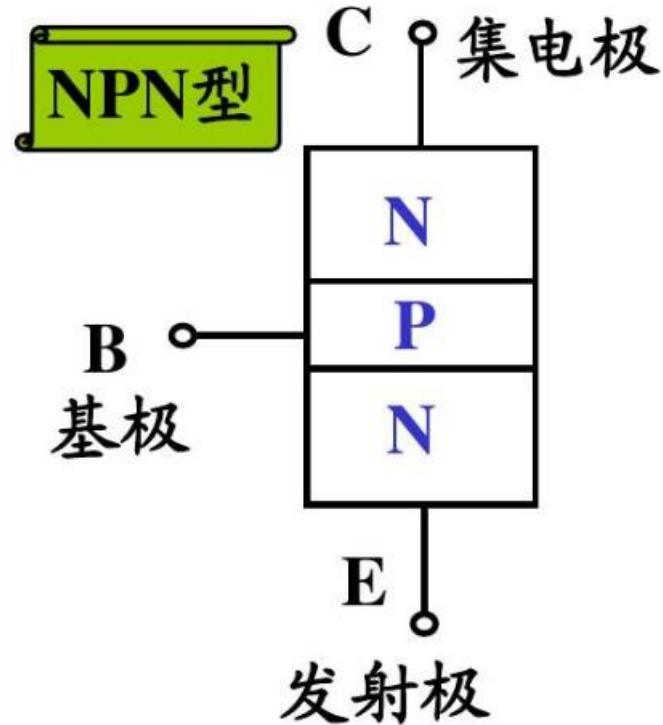
PN结两端加正向电压，
N区的电子向P区扩散，
有大的正向电流。

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

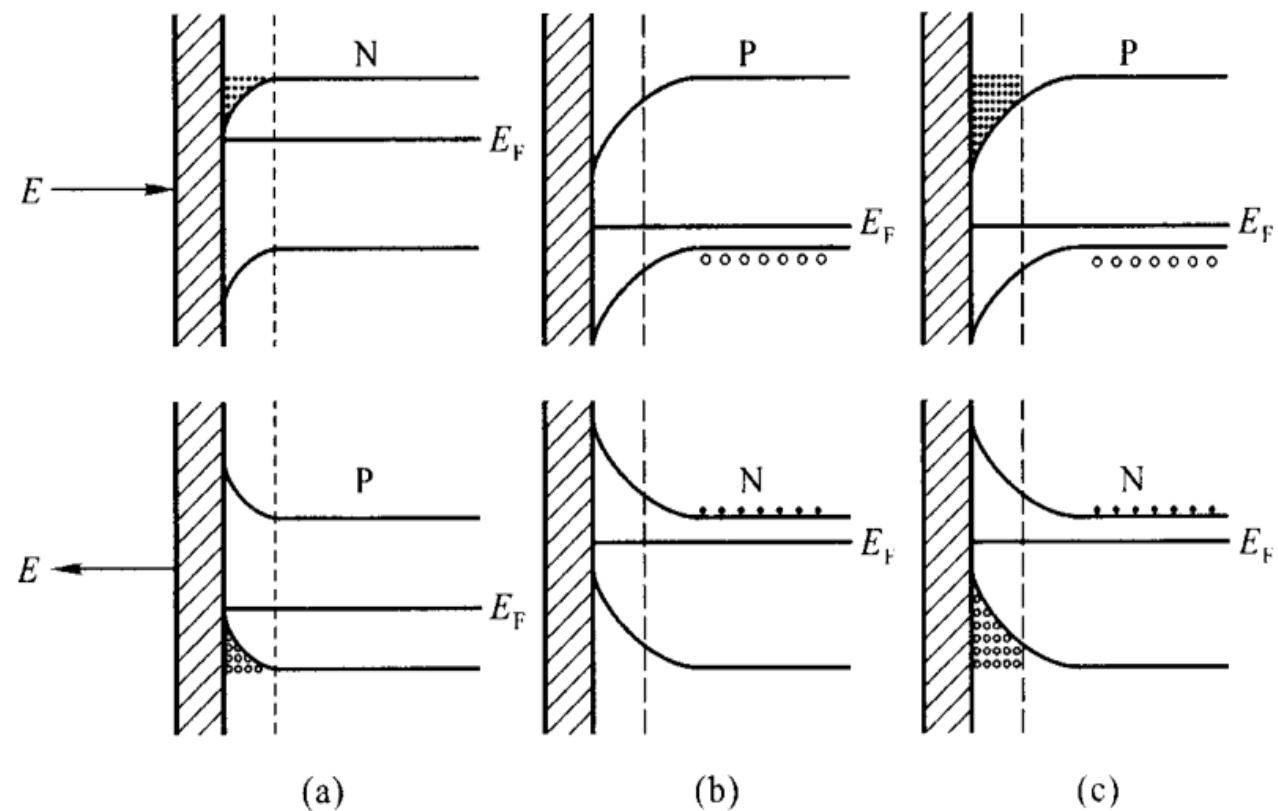
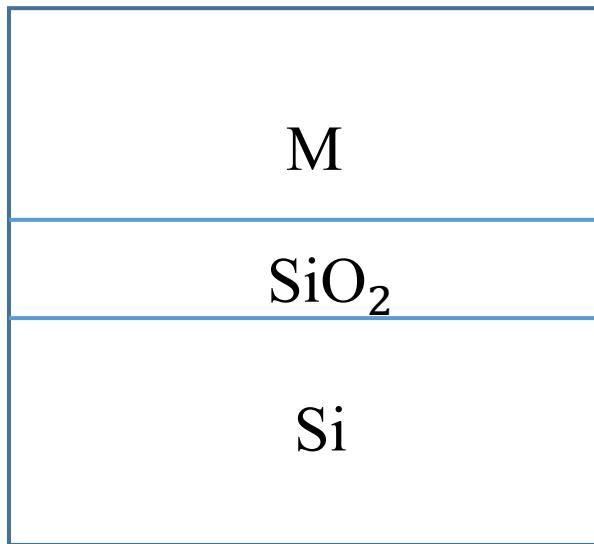
三极管，具有电流放大作用，是电子电路的核心元件。



六、场效应管（MOS管）的物理原理

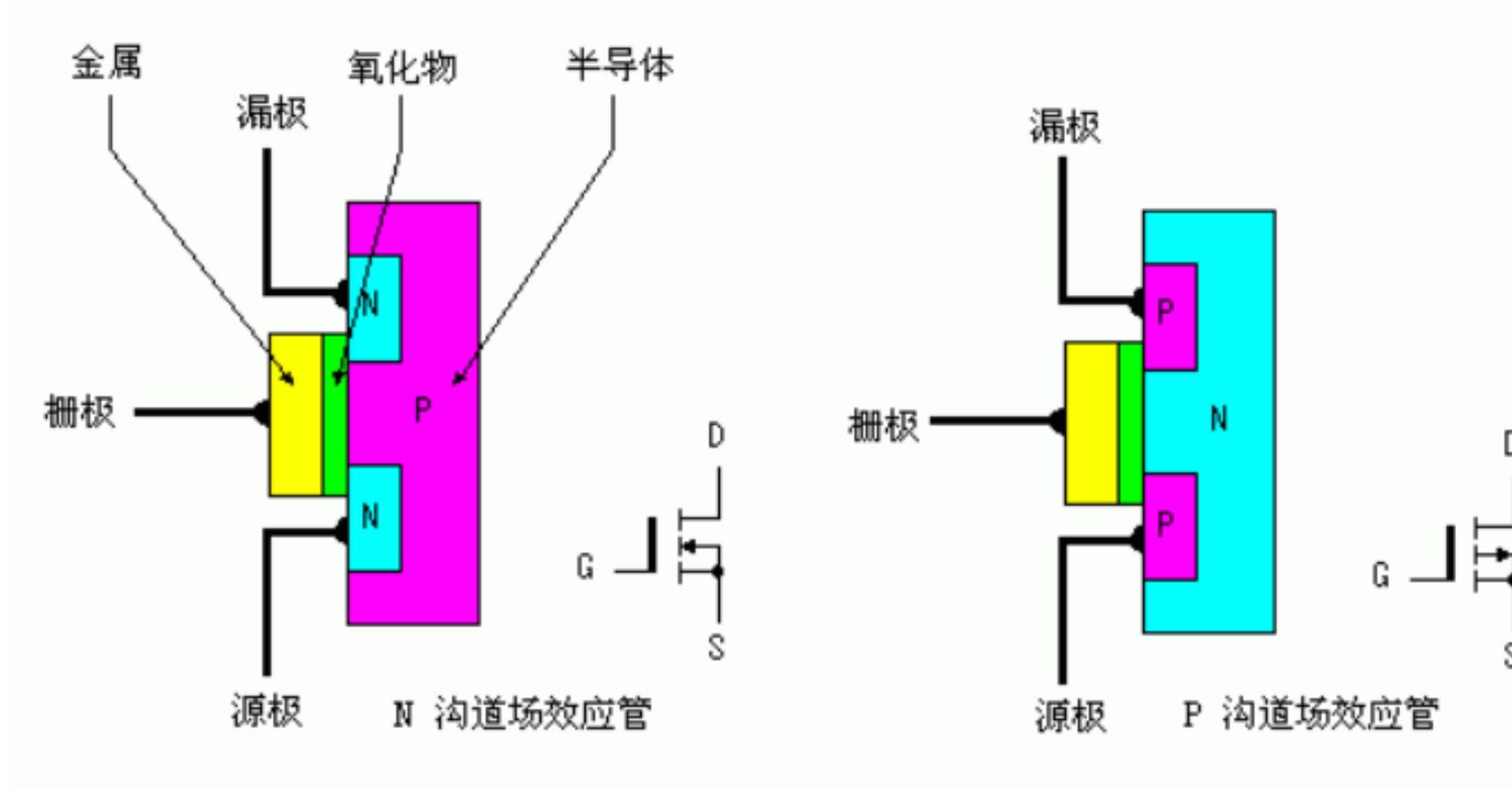
1、MOS结构

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。

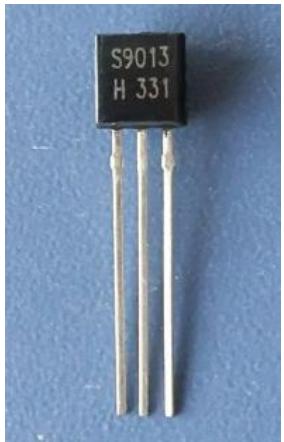


2、MOS管

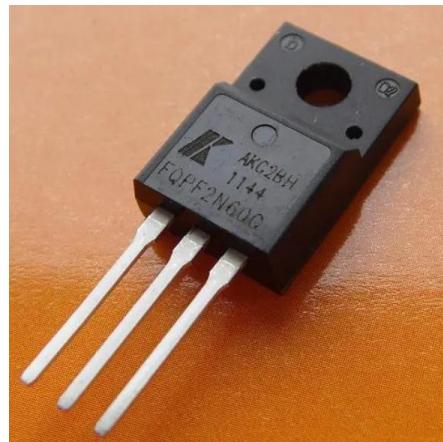
利用上面的MOS结构，可以制成MOS管



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、卢森楷，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！