

第二章 半导体物理与器件

§1 半导体材料及特性

1. 基本概念

固体材料按照导电性可以划分为**导体**、**半导体**、**绝缘体**，可以用**电阻率** ρ 或者**电导率** σ 来衡量：

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\Omega \cdot \text{m}), \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{S} \cdot \text{m}^{-1})$$

其中 1 西门子 $1\text{S} = 1\Omega^{-1}$ 。

另一种分类方式是材料电导率随温度的变化趋势：

- 导体电阻率随温度升高**增大**，
- 半导体电阻率随温度升高**减小**。

具体来说，

- 电导率小于 10^{-10} 即为绝缘体，
- 电导率大于 10^4 即为导体（重掺杂硅： $\sim 10^3$ ），
- 电导率介于 10^{-10} 和 10^4 之间的即为半导体（本征硅： $\sim 10^{-3}$ ）

半导体也有多种类别，习惯上可以按照代数分为

- 第一代：Si, Ge 等元素半导体，
- 第二代：化合物半导体，代表是 GaAs, InP 等 III-V 族化合物半导体，
- 第三代：宽禁带半导体材料 ($> 2.2\text{eV}$)，包括 GaN, SiC, ZnO, Ga_2O_3 等等。

2. 固体结构

固体可以按照微观结构划分为（单）晶体，多晶体和非晶体。

晶体内部是按照一定规律排列的原子，称为晶格，有几种常见的晶体结构：

- 金刚石结构 (Si, Ge),
- 闪锌矿结构 (GaAs, CdTe),
- 纤锌矿结构。

3. 半导体材料的特性

- 温度敏感性：电阻率随温度上升而下降（负温度系数），
- 掺杂效应：掺杂其他元素可以大幅度改变特性，
- 光电效应：光照下电导率增加，部分还能产生电动势和电流，
- 整流效应：部分半导体类似于二极管，只能单向导通。

§2 半导体的能带和导电性

1. 原子的能级和晶体的能带

原子内部电子可能处于不同能级，需要考虑杂化轨道的影响（例如 Si 晶体是 sp^3 杂化）。

对于晶体来说，临近原子杂化轨道重叠，形成成键态（对应价带）和反成键态（对应导带）。由于电子倾向于停留在能量较低的能级，价带电子的能量一般低于导带。

更精确的描述是：

- **价带**是 0K 下被电子填充的能量最高的能带，
- **导带**是 0K 下未被电子填充的能量最低的能带，
- **带隙**，即**禁带宽度**是导带底与价带顶的能量差。

事实上，半导体的许多性质都源于带隙。

2. 能带结构导电特性

- 0K 时电子全部位于价带，价带全满从而没有导电性；而导带中没有自由电子，因而不导电。
- 稍高温下电子接受热振动的能量进入导带，从而使导带导电；与此同时激发的电子原位（空穴）对外表现为带正电，其移动同样可以导电。

利用禁带宽度来对固体材料进行分类：

- 绝缘体的带隙很大 ($> 5\text{eV}$)，
- 半导体的带隙较大，
- 金属没有带隙（价带总是不满）。

注 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ ，常用来表示微观粒子的能量。

微观粒子的平均热运动能量在 kT 量级，其中 $k = 1.381 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 为玻尔兹曼常数。

室温下 $1kT = 0.026\text{eV}$ 。

3. 半导体中的载流子

自由电子和空穴都能够导电。产生自由电子可以通过升高温度或者激光照射等方式。

空穴的移动实质上是价带中电子的转移。

在计算中晶体中载流子的移动不同于真空中的移动：载流子会受到周围原子核和电子的作用力。为了简化运算，常常使用载流子的**等效质量**：

$$a = \frac{F_{\text{ext}}}{m} (\text{真空}) \implies a = \frac{F_{\text{ext}}}{m^*} (\text{晶格内部})$$

4. 半导体中的掺杂

- **杂质**是在半导体中引入新的原子或离子，
- **缺陷**是原子周期性排列的结构被破坏。

这两种问题会在半导体中引入新的能级，从而改变半导体的性质。对杂质实现可控操作就能实现对半导体性质的精确控制。

- **掺杂**杂质一般为替位式掺杂，工艺包括扩散和注入。
 - 杂质浓度是一重要参数：单位体积中掺杂的原子数。

一般的掺杂浓度为 $10^{14} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。相应地硅晶体中原子数为 $5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。

- **本征半导体**就是没有掺杂的纯净半导体。
 - **本征载流子浓度**：自由电子和空穴的浓度相等 $n = n_i = p$ 。
 - 对于 Si 来说，室温下 $n_i \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。这一数值对温度十分敏感。

本征半导体的导电能力只与禁带宽度和温度有关。

- **N 型半导体**是掺入施主杂质的半导体。**施主**能够电离提供自由电子，自身成为正离子。

例如掺入 Si 的 As 为 V 族，其中四个价电子与 Si 成键，剩下的一个电子只需要很低能量就能进入导带。常见的施主包括 **P、As 和 Sb**。

掺杂施主原子会产生新的**施主能级**：由于施主电离产生的离子受正离子吸引能量较低，略低于导带能级（ $\sim 0.04\text{eV}$ ），位于原先的禁带中。

此时自由电子数多于空穴数，电子为**多数载流子**。

- **P 型半导体**是掺入受主的半导体。受主能提供空穴，在接受一个自由电子后称为负离子。

常见的受主包括 **B、Al、Ga、In**（Ⅲ族）。

掺入受主也会产生**受主能级**，略高于价带能级（ $\sim 0.05\text{eV}$ ）。

此时空穴数多于自由电子数，空穴为多数载流子。

随着温度升高，电子在 N 型半导体中从施主能级转移到价带，在 P 型半导体中从价带转移到受主能级。

*电子和空穴的浓度（不要求）

费米能级随掺杂浓度在禁带中上下变化。

- 随施主杂质浓度增加，费米能级向导带靠近，
- 随受主杂质浓度增加，费米能级向价带靠近。

5. 多子与少子的热平衡

在没有光照的条件下，半导体内部始终保持热平衡，并且

$$np = n_i^2.$$

尽管在不同半导体中电子和空穴浓度可能不同 $n \neq p$ 。

6. 电中性 半导体材料始终保持电中性，即正电荷和负电荷恰好抵消。在室温下

$$p + N_D - n - N_A = 0$$

其中 p 导带电子浓度， N_D 施主电离浓度， p 价带空穴浓度， N_A 电离受主浓度。

对于只掺杂施主或受主的半导体分别有

$$n = N_D,$$

$$p = N_A.$$

更精确的描述为

$$n + N_A - p_A = p + N_D - n_D$$

这考虑了施主上的电子浓度 n_D 和受主上的空穴浓度 p_A ，即杂质不完全电离的影响。

在室温下，可以近似为施主或者受主全部电离，而价带电子完全不电离（室温强电离）。

例 Si 中掺入 10^{16} cm^{-3} 的 B，问该半导体的掺杂类型？室温下强电离时电子、空穴浓度？

解 是 P 型半导体。回忆常温下 Si 的本征载流子浓度为 $n_i \sim 10^{10}$ ：

$$p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \quad n = \frac{n_i^2}{p} = 10^4 \text{ cm}^{-3}.$$

7. 半导体中的电导率和迁移率

半导体中的载流子在电场作用下做定向漂移运动产生电流，有

$$j_n = nqv$$

其中 n 是载流子浓度, q 是载流子电量, v 是载流子平均速度。实验显示在弱电场作用下漂移速度和电场强度成正比, 即

$$v = \mu E.$$

另一方面由欧姆定律有

$$j = \sigma E.$$

联立可得半导体的电导率公式

$$\sigma = nq\mu,$$

其中 μ 代表**迁移率**, 是单位电场下载流子做漂移运动的平均速度。

在 Si 中

$$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

$$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

在半导体中有自由电子和空穴两种载流子, 上述公式可以写成

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p, \quad \rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}.$$

由于两种载流子的迁移率数量级接近, 因此半导体电导率主要由多数载流子决定。

在强电下载流子漂移速度将趋于饱和。

8. 半导体中的载流子输运

- 漂移运动: 载流子在电场作用下的输运过程。

区别于热运动 (热运动动能 $= \frac{3}{2}kT$, 300K 下平均速度为 $v_T \sim 10^7 \text{ cm/s}$)。

- 扩散运动: 物质中存在载流子浓度梯度时形成扩散电流。
- 载流子的产生与复合: 受光电等外部因素的影响, 载流子偏离平衡态产生电流。

§3 金属半导体接触与 PN 结

1. 金属-半导体接触

- 功函数: 真空能级和费米能级之间的能量差
- 半导体材料的亲合能: 真空能级和半导体导带底之间的能量差。

金属和半导体的接触可以分成**欧姆接触**和**肖特基接触**, 其中

- 欧姆接触要求接触电阻相较于器件本身电阻可以忽略不计, 可以在提供器件所需电流的同时不影响器件性能。最好情况下 $R_c = 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

制造欧姆接触可以采取**降低势垒**和**重掺杂**两种方式。

2. PN 结 / 二极管

二极管的实质是 PN 结, 其中正极为 P 型半导体, 负极为 N 型半导体。

- 平衡半导体: 未加偏压时 PN 结内部形成电场 (电子从负极向正极迁移, 形成从负极指向正极的电场)。
- 正向偏置: 多数载流子容易通过 PN 结, 可以产生大电流。
- 反向偏置: 少数载流子容易通过 PN 结, 只能产生小电流。

可以用**击穿电压** V_{BD} 和**启动电压** V_{Don} 来近似描述二极管。

光电转换二极管：在无光照条件下与普通二极管相同，在光照条件下产生反向电动势（类似于太阳能电池）。

§4 金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOSFET）

常见的组成部分包括 P 型半导体衬底（接地）、N 型半导体源极和漏极、二氧化硅绝缘层和金属栅极。

其中栅极、绝缘层和 P 型衬底构成一个 NMOS 电容：

- 栅极接负电压时 P 型硅中出现额外空穴，
- 栅极接较小正电压时 P 型硅中空穴与电子结合，出现**耗尽层**；
- 接足够大正电压时 P 型硅表面出现电子，形成**反型层**。

具体来说认为 $V_g > V_t$ 时出现反型层，此时 MOSFET 导通。

- 当 $V_{DS} < V_g - V_t$ 时电流随电压线性变化，
- 当 $V_{DS} > V_g - V_t$ 时电流进入饱和区。

几个相关图标包括

- 转移特性曲线：不同 V_g 下的 I_{DS} ，近似于抛物线（有线性坐标和对数坐标）
对数坐标系小于 V_t 的部分斜率称为**亚域斜率**。
- 输出特性曲线，不同 V_g 下输出的 I_{DS} 随 V_{DS} 的变化趋势。

P MOSFET 的输出特性曲线只需要给所有值都标上绝对值！

具体来说，P MOSFET 衬底接高电位（阻止 PN 结导通）。 V_g 为负时 N 型衬底中产生空穴，导通两侧的 P 型半导体。作图应在第三象限，因为 V_{DS} 和 I_{DS} 均为负。