

第二讲 半导体的基本概念

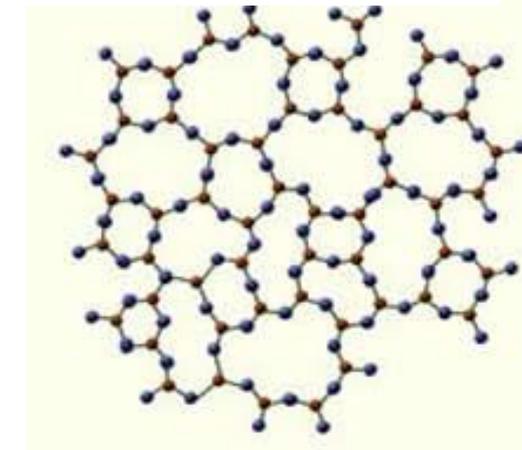
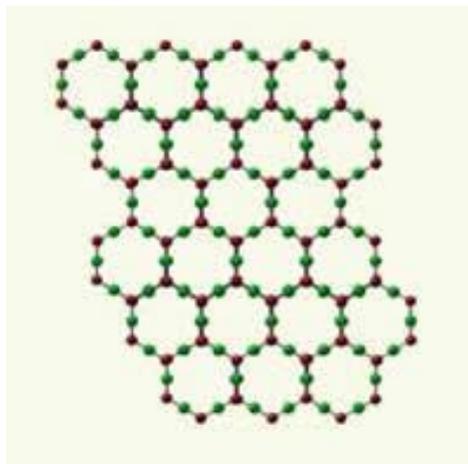
半导体的概念和基本理论是1931年由A. H. Wilson提出的。。。

一、A. H. Wilson的划时代工作

20世纪初，由于x射线技术的发展使人们对固体（晶体）的认识进入了一个新的阶段，30年代固体电子理论（能带论）和晶格动力学也逐步建立。

**固体可分为两大类：
晶态和非晶态**

长程有序性
短程有序性

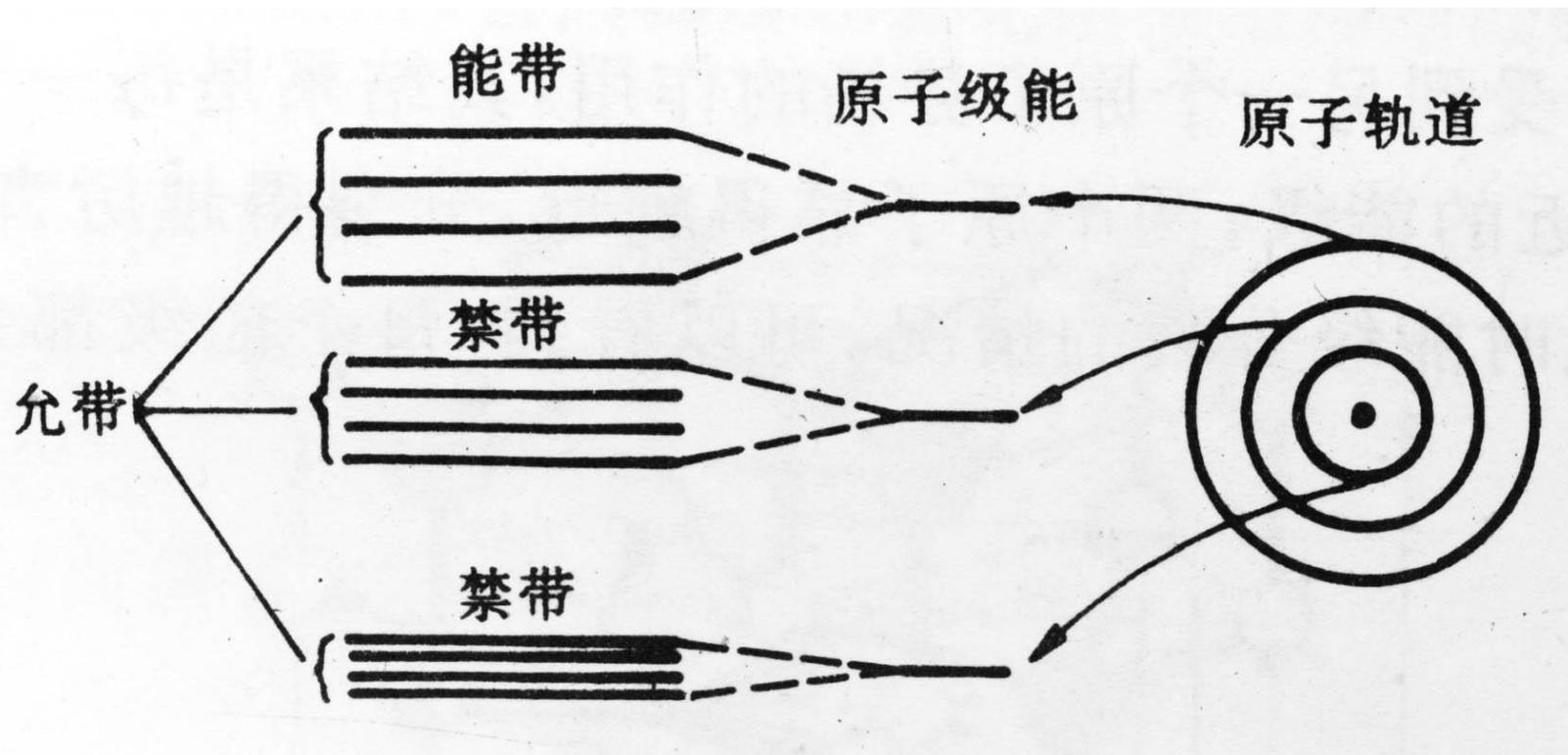


半导体单晶材料和其他固态晶体一样，是由大量原子周期性重复排列而成，而每个原子又包含原子核和许多电子。具有规则的外形和固定的熔点。

非晶态固体：无规则的外形和固定的熔点，内部结构也不存在长程有序，但在若干原子间距内的较小范围内存在结构上的有序排列——短程有序

一、A. H. Wilson的划时代工作

原子到晶体： 能级 \longrightarrow 能带



一、A. H. Wilson的划时代工作

1931年，A. Wilson有关半导体能带理论的经典论文的发表，则开创了半导体理论研究的先河。

458

The Theory of Electronic Semi-Conductors.

By A. H. WILSON, Emmanuel College, Cambridge.

(Communicated by P. A. M. Dirac, F.R.S.—Received June 18, 1931.)

Introduction.

The application of quantum mechanics to the problem of metallic conduction has cleared up many of the difficulties which were so apparent in the free electron theories of Drude and Lorentz. Sommerfeld* assumed that the valency electrons of the metallic atoms formed an electron gas which obeyed the Fermi-Dirac statistics, instead of Maxwellian statistics, and, using in the main classical ideas, showed how the difficulty of the specific heat would be removed. He was, however, unable to determine the temperature dependence of the resistance, as his formulæ contained a mean free path about which little could be said.

F. Bloch† took up the question of the mechanics of electrons in a metallic lattice, and showed that if the lattice is perfect an electron can travel quite freely through it. Therefore so long as the lattice is perfect the conductivity is infinite, and it is only when we take into account the thermal motion and the impurities that we obtain a finite value for the conductivity. On this view all the electrons in a metal are free, and we cannot assume, as we do in the classical theory, that only the valency electrons are free. This does not give rise to any difficulty in the theory of metallic conduction, as the direct proportionality between the conductivity and the number of free electrons no

Theory of Electronic Semi-Conductors.

277

I am indebted to Professor Dennison for helpful criticism, and also to Dr. C. P. Snow and Mr. E. V. Whitfield for the benefit of their knowledge of certain points. Some checking of calculations was done by Mr. C. O. Pringle, who is receiving a grant from the Department of Scientific and Industrial Research, to whom I would like to take this opportunity of expressing my thanks.

The Theory of Electronic Semi-Conductors.—II.

By A. H. WILSON, Emmanuel College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received August 25, 1931.)

Introduction.

In a previous paper* it was shown that the quantum theory of conduction leads naturally to a division of crystals into conductors and insulators, and various properties of insulators were worked out. Since that paper was written, experimental material has come to my notice which necessitates an extension of the theory to include the effect of impurities, as it appears that impurities dominate the electrical properties of the semi-conductors. As the substances which show a negative temperature coefficient of the electrical resistance fall into two main classes, it will be as well to define what we mean by an electronic semi-conductor. In the first place, there are substances such as silicon which

一、A. H. Wilson的划时代工作



图 1-12 绝缘体、半导体和导体的能带示意图

(a) 绝缘体；(b) 半导体；(c) 导体。

导电的微观机制

一、A. H. Wilson的划时代工作

本征激发：价带电子激发成为导带电子的过程

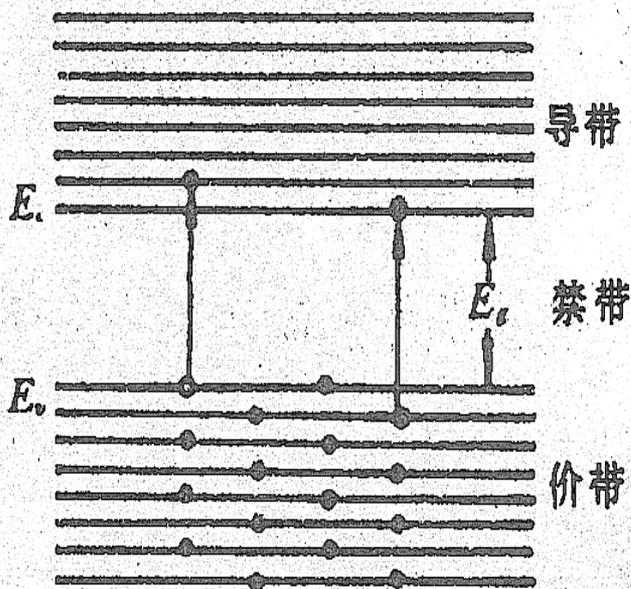


图 1-13 一定温度下半导体的能带

左图是一定温度下半导体的能带示意图。图中●代表电子，它们在绝对零度时填满价带中所有能级， E_v 称为价带顶，它是价带电子的最高能量。

在一定温度下，价电子有可能依靠热激发，获得能量脱离共价键，在晶体中自由运动，成为准自由电子。它们也就是能带图中导带上的电子。脱离共价键所需的最小能量就是禁带宽度 E_g ， E_c 称为导带底，它是导带电子的最低能量。

$$E_g = E_c - E_v$$

END

一、A. H. Wilson的划时代工作

半导体导电的温度特性

(14) for the whole range with negligible error. Hence the conductivity σ is given by

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{J_x}{F(Ga)^3} = \frac{16\pi^{1/2}\lambda e\beta^{5/2}(N/G^3)}{3h\kappa^2 a^2 \Theta^2 k^{3/2} T^{5/2}} \int_0^\infty \rho^3 e^{-\frac{\beta\rho^2}{kT}} d\rho \\ &= A(N/G^3) T^{-3/2}\end{aligned}\quad (15)$$

$$= B(N_0/G^3)^{1/2} T^{-3/4} e^{-\frac{W_2-W_1}{2kT}}, \quad (16)$$

where A and B are complicated constants. Equation (15) gives the variation of σ with the number of free electrons, and equation (16) the variation of σ with the temperature and with the amount of impurity.

gives rise to the very surprising result expressed by (16). Formula (15) therefore holds for any semi-conductor, independently of whether the conduction is intrinsic or due to impurities, while (16) is different in the two cases. In fact, if the conduction is intrinsic

$$N \propto T^{3/2} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

and so

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (16A)$$

where ΔW is the minimum energy difference between the bands 1 and 2.

--- Wilson, A. H., "The Theory of Electronic Semiconductors." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A133 (October, 1931), pp. 458-491, Vol. A134 (November, 1931), pp. 277-287.

一、A. H. Wilson的划时代工作

对于没有掺杂的半导体，导带中的电子浓度与禁带宽度的关系可以推导得到：

$$n_0 = n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-E_g/2kT)$$

而电导率为：

$$\sigma = n_0 q \mu \quad \mu \text{是迁移率}$$

金属 --- 随温度上升，电子浓度变化不大，但由于晶格散射增强，迁移率下降，所以电阻率呈现正的温度系数。

半导体 --- 随着温度的上升，虽然迁移率也降低，但电子浓度的急剧增加占据了主导地位，导致半导体的电导率上升（即电阻率下降），**呈现负的温度系数。**

半导体区别于金属的一个重要特征！

*** 此处提到迁移率的问题，待后面再进一步讨论**

二、电子和空穴

随着电子的发现，人们对霍尔效应有了深入的理解。而量子力学和能带论的发展，使得人们意识到半导体中有两种类型载流子-**电子和空穴**。

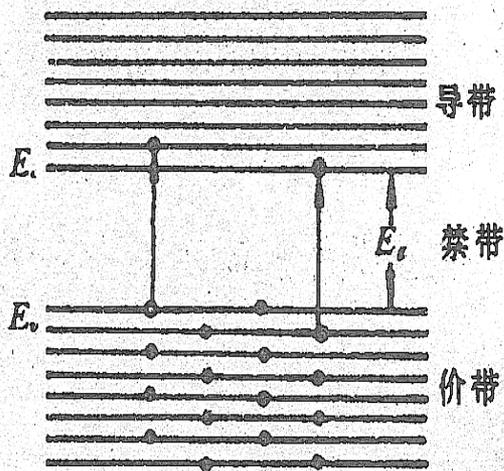


图 1-13 一定温度下半导体的能带

半导体的导电涉及两个能带（导带和价带）。在一定温度下，价带顶部附近有少量电子被激发到导带底附近，在外电场作用下，导带中电子便参与导电。同时，价带缺少了一些电子后也呈不满的状态，因而价带电子也表现出具有导电的特性。

--- 价带电子的导电作用可以用空穴导电来描写

二、电子和空穴

填入这个电子后，价带又被填满，总电流应为零，所以：

$$J + (-q)v(k) = 0$$

$$J = qv(k)$$

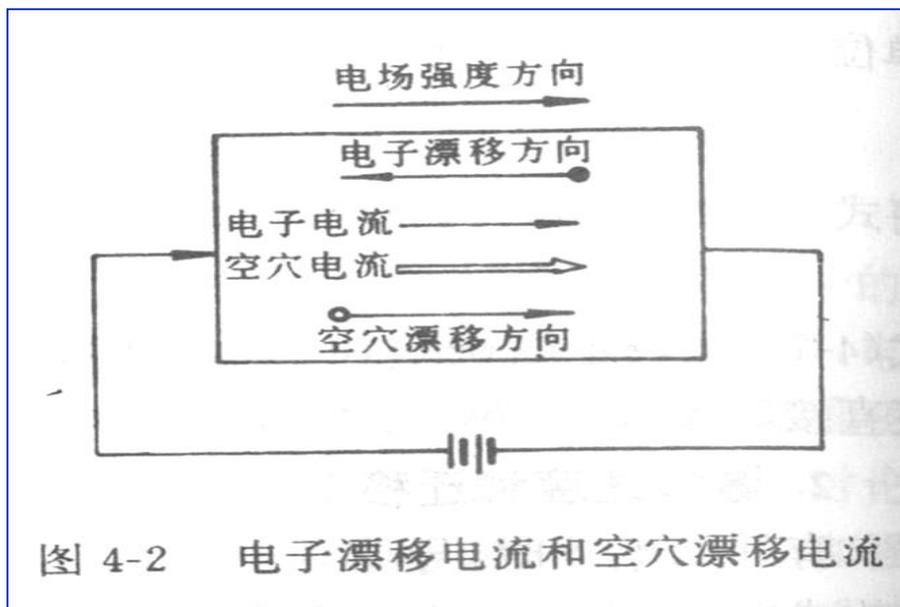
所以，当价带k状态空出时，价带电子的总电流，就如同一个带正电荷的粒子以k状态电子速度v(k)运动时所产生的电流。引进这样一个**假想的粒子 - 空穴**后，便可以很简便地描述价带（未填满）的电流。

引入空穴概念后，就可以把价带中大量电子对电流的贡献用少量的空穴表达出来。

对于一块理想的本征半导体（没有任何杂质和缺陷）

在一定温度下，电子从价带由于本征激发跃迁至导带，同时在价带中产生空穴。由于电子和空穴是成对产生的，导带中电子的浓度 n_0 应等于价带中空穴的浓度 p_0 ，即有： $n_0 = p_0$ 。

二、电子和空穴



- 半导体中载流子有两种：
电子和空穴

存在电子和空穴的漂
移运动，运动方向相反

- 电子和空穴漂移运动
所形成的电流均沿电场
方向

故：半导体导电 = 电子导电 + 空穴导电

二、电子和空穴

考虑到半导体中有电子和空穴两种载流子，则对霍尔效应中霍尔符号的正负性就很容易理解了。

霍尔系数的表达式 --- 一种载流子传导

$$\begin{aligned} N: \quad \vec{F}_L &= -q \vec{v} \times \vec{B} \\ &= -q v_x B_z \vec{j} \\ F_e &= -q E_y \vec{j} \quad (E_y \text{为负}) \\ E_y &= -v_x B_z = R_H J_x B_z \\ J_x &= -nq(-v_x) \\ R_H &= -\frac{1}{nq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P: \quad \vec{F}_L &= q \vec{v} \times \vec{B} \\ &= -q v_x B_z \vec{j} \\ F_e &= q E_y \vec{j} \\ E_y &= v_x B_z = R_H J_x B_z \\ J_x &= pq v_x \\ R_H &= \frac{1}{pq} \end{aligned}$$

三、掺杂

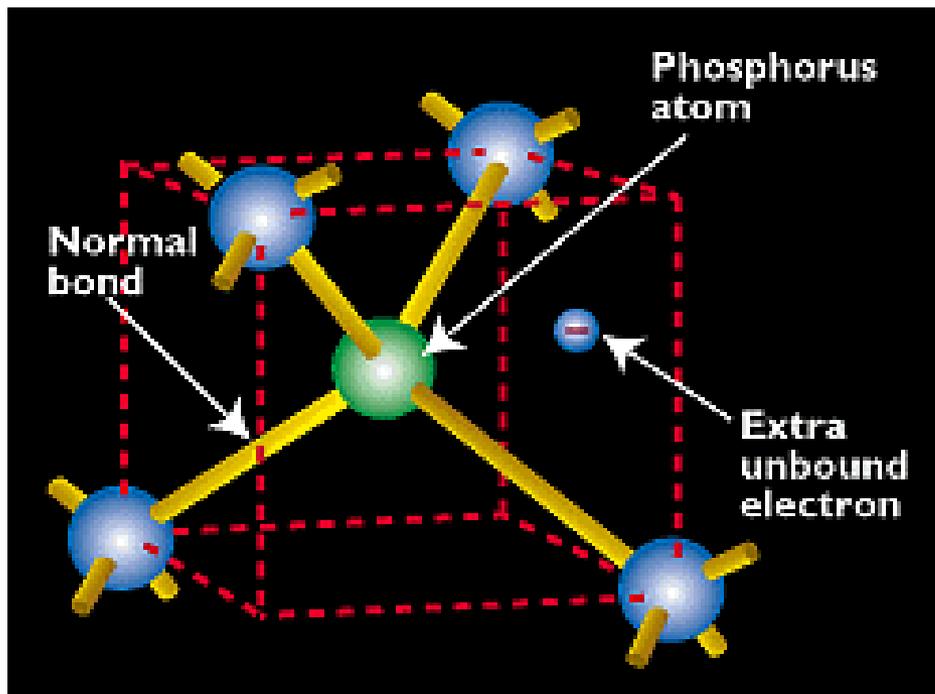
半导体导电是电子和空穴共同作用的结果，是否可以获得以电子或以空穴导电为主的半导体材料呢？

**这就是掺杂技术
来获得n型或者p型半导体材料**

掺杂是为了控制半导体性质而人为掺入某种异于半导体母体原子的化学元素的原子。

三、掺杂

硅中掺磷(P)的情况:



当一个磷原子占据了硅原子的位置，由于磷原子有五个价电子，其中四个与周围四个硅原子形成共价键，还剩余一个价电子。同时，磷原子所在处也多余一个正电荷。所以磷原子替代硅原子后，其效果是形成一个正电中心 P^+ 和一个多余的价电子。这个多余的价电子就束缚在正电中心 P^+ 周围。

在正电中心周围的那个多余的价电子受到的束缚作用比共价键的束缚作用弱得多，只要很少的能量就可以使它挣脱束缚成为导电电子在晶格中自由运动，这就是**杂质电离过程**。

三、掺杂

硅中掺磷(P)的情况:

V族杂质磷在硅中电离时，能够释放电子而产生导电电子并形成正电中心，**称它们是施主杂质或 n型杂质**。它释放电子的过程叫做施主电离。

在纯净的半导体中掺入施主杂质，施主杂质电离后，导带中的导电电子增多，增强了半导体的导电能力。通常把主要依靠导带电子导电的半导体称为**电子型或n型半导体**。

三、掺杂

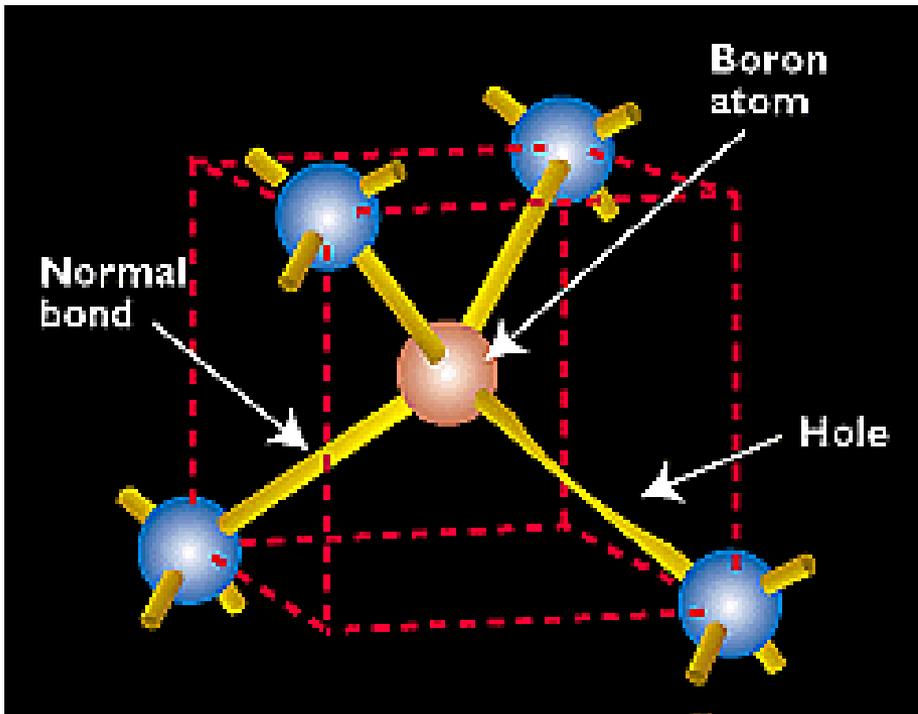
硅中掺硼(B)的情况:

当一个硼原子占据了硅原子的位置，由于硼原子有三个价电子，当它与周围四个硅原子形成共价键时，还缺少一个价电子，必须从别处的硅原子中夺取一个价电子。于是，在硅晶体的共价键中产生了一个空穴。同时，硼原子接受一个电子后成为带负电的硼离子(B^-)，称为负电中心。所以硼原子替代硅原子后，其效果是形成一个负电中心 B^- 和一个空穴。

带负电的硼离子和带正电的空穴之间有静电引力作用，所以这个空穴受到硼离子的束缚，在硼离子附近运动。不过，这种束缚是很弱的，只需很少的能量就可以使空穴挣脱束缚成为在晶体的共价键中自由运动的导电空穴。

三、掺杂

硅中掺硼(B)的情况:



因为III族杂质在硅中能够接受电子而产生导电空穴，并形成负电中心，所以称它们为**受主杂质或p型杂质**。空穴挣脱受主杂质束缚的过程称为受主电离。

在纯净的半导体中掺入受主杂质后，受主杂质电离，使价带中的导电空穴增多，增强了半导体的导电能力。通常把主要依靠空穴导电的半导体称为**空穴型或p型半导体**。

二、掺杂

问题：

---当半导体中同时掺入施主和受主杂质时，半导体的导电类型是什么？

当半导体中同时存在施主和受主杂质时，半导体究竟是n型还是p型就要看哪一种杂质浓度大。因为施主和受主杂质之间有相互抵消的作用，通常称为**杂质的补偿作用**。

四、半导体中的迁移率

半导体中存在电子和空穴，因此半导体的总电流密度可以描述为：

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p = (nq\mu_n + pq\mu_p) \mathbf{E}$$

其中 μ_n 、 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率

利用霍尔效应实验，人们不仅可以区分载流子的符号、载流子浓度。如果同时测量沿着样品（纵向）的电压降和电流，可以得到材料的电阻率和**载流子的迁移率**。

四、半导体中的迁移率

我们知道，霍尔系数

$$R_H = -1/nq$$

而电导率为：

$$\sigma = n_0 q \mu$$

$$(J = \sigma E)$$

所以：

$$|R_H| \sigma = \mu$$

μ 就是载流子的迁移率：

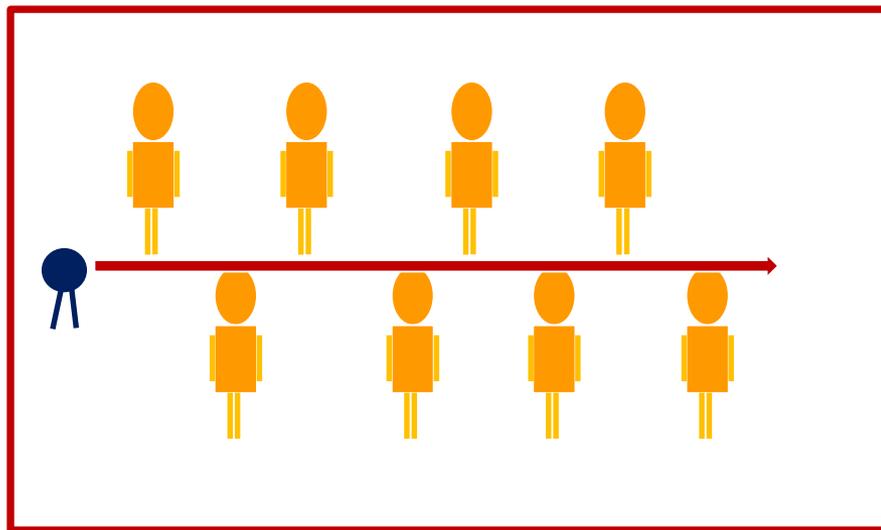
表示单位场强下的载流子的漂移速度

单位：m²/Vs 或 cm²/Vs

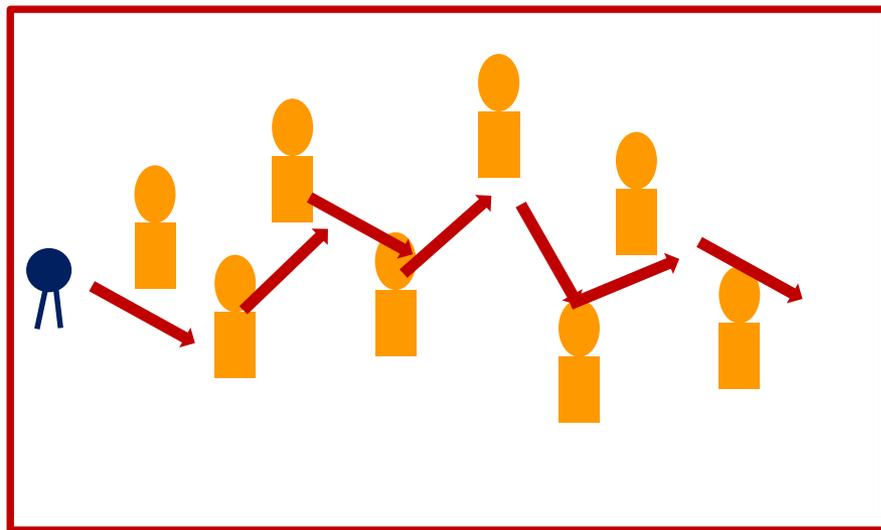
一般取正值

四、半导体中的迁移率

在绝对零度时，晶格原子都没有热振动，故此在完美晶体中电子的迁移率可以无穷大，因为没有什么可以阻挡电子的运动。但在一定温度下，晶格原子做热振动，电子在运动时就会受到散射，温度越高，散射越强，迁移率就会越低。



$T = 0\text{K}$



$T > 0\text{K}$

四、半导体中的迁移率

对于金属

迁移率会随着温度上升而单调下降。

对于半导体

迁移率会随温度的变化关系略复杂一些。

电离杂质散射：

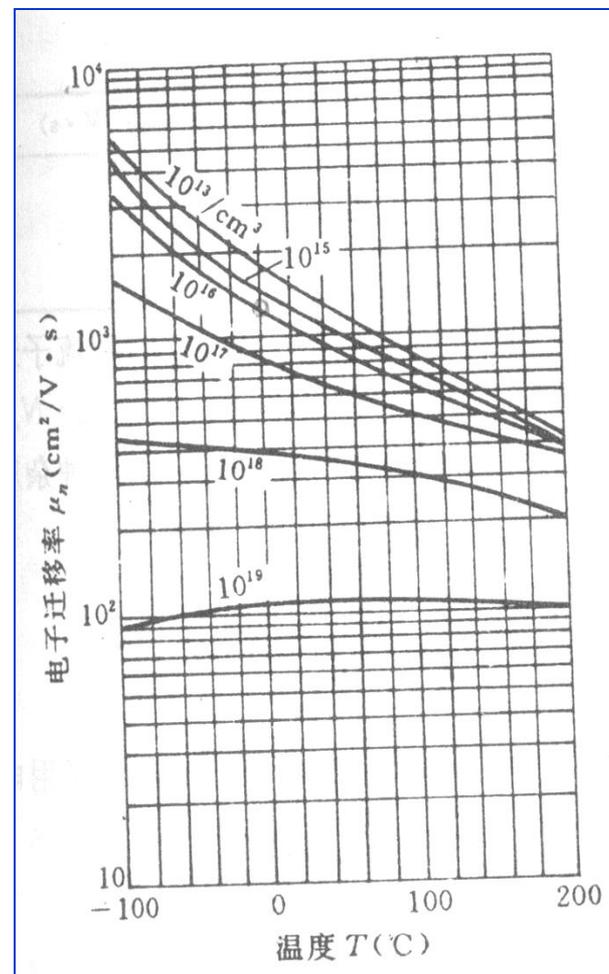
$$\tau_i \propto N_i^{-1} T^{3/2}$$

声学波散射：

$$\tau_s \propto T^{-3/2}$$

光学波散射：

$$\tau_o \propto \left[\exp\left(\frac{h\nu_l}{k_0 T}\right) - 1 \right]$$



总体上，不考虑杂质的作用，迁移率会随温度上升而下降，这就是为什么金属的电阻率会随着温度上升而增大的原因；但对于半导体，由于随温度上升，导电载流子浓度的快速增加使得迁移率的下降的影响几乎可以忽略。因此，半导体的电阻率具有负温度系数。

第二讲 总结

Hall效应家族的不断壮大与荣耀

量子霍尔效应

The Nobel Prize in Physics 1985



Klaus von Klitzing
Prize share: 1/1

德国物理学家克利青(Klaus von Klitzing, 1943-)等在研究极低温度和强磁场中的半导体时发现了量子霍尔效应。

The Nobel Prize in Physics 1985 was awarded to Klaus von Klitzing
"for the discovery of the quantized Hall effect".

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

第二讲 总结

Hall效应家族的不断壮大与荣耀

The Nobel Prize in Physics 1998



Robert B. Laughlin
Prize share: 1/3



Horst L. Störmer
Prize share: 1/3



Daniel C. Tsui
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 1998 was awarded jointly to Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer and Daniel C. Tsui *"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations"*.

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

分数量子霍尔效应

美籍华裔物理学家崔琦 (Daniel Chee Tsui, 1939-) 和美国物理学家劳克林 (Robert B. Laughlin, 1950-)、施特默 (Horst L. Störmer, 1949-) 在更强磁场下研究量子霍尔效应时发现了分数量子霍尔效应。

第二讲 总结

近年来，在拓扑绝缘体中又观测到了不需要磁场的反常量子霍尔效应。也引起了人们的很大关注。2016年的诺贝尔物理学奖授予了“材料的拓朴相和拓朴相转变的理论发现”。

The Nobel Prize in Physics 2016



© Trinity Hall,
Cambridge University.
Photo: Kiloran Howard
David J. Thouless
Prize share: 1/2

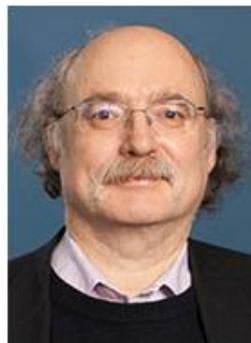


Photo: Princeton
University, Comms.
Office, D. Applewhite
F. Duncan M.
Haldane
Prize share: 1/4



Ill: N. Elmehed. © Nobel
Media 2016
J. Michael Kosterlitz
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2016 was divided, one half awarded to David J. Thouless, the other half jointly to F. Duncan M. Haldane and J. Michael Kosterlitz *"for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter"*.

第二讲 课后研讨题

- 1、请说明金属、半导体和绝缘体为什么导电性质各不相同；
- 2、为什么半导体要掺杂？
- 3、如何实现半导体的掺杂？
- 4、请举例说明半导体材料的应用；