

从软电离质谱到化学键和电阻 ——弱电场下电荷在相变中的运动规律

罗杰鸿

(广东安纳检测技术有限公司, 广东省 广州市 511450)

摘要: 弱电场下电荷在气相、液相、固相等不同状态下(相变)的移动规律, 对我们理解离子源、质谱仪、电泳、电阻、导体、半导体、超导现象等具有重要意义。

关键词: 弱电场; 电荷; 相变

From Soft Ionization Mass Spectrometry to “Chemical bond” and
resistance, semiconductor, superconductivity -- The Law of Charge
Motion in Phase Transition under Weak Electric Field

Luo Jiehong

(Guangdong Anna Testing Technology Co.,Ltd)

Abstract: The movement law of charge in different states (phase transition, for example, gas phase, liquid phase and solid phase, etc.) under weak electric field is important for us to understand ion source, mass spectrometer, electrophoresis, resistance, conductor, semiconductor, superconductivity phenomenon, etc.

Keywords: Weak electric field; Charge; phase transition

弱电场下电荷在气相、液相、固相等不同状态下(相变)的移动规律, 对我们理解离子源、质谱仪、电泳、电阻、导体、半导体、超导现象等具有重要意义。本文尝试对这些实验现象进行一些理论上的探讨, 为我们理解电荷在不同的相状态下的移动规律提供一些新的看法和思路。

1 原子核与电子之间的作用力与“化学键”

我们可以计算出两个电荷之间的大约距离(图 1),

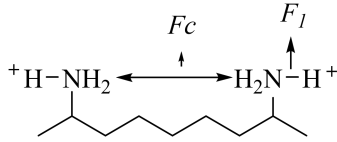


图1 计算两个电荷之间的距离

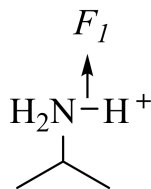
$$F_c = F_1 \cong k \frac{q_1 q_2}{r_i^2} \quad (1)$$

$$r_i \cong \left(\frac{k q_1 q_2}{F_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中 F_c 是库仑力, k 是库仑常数, r 是分析物半径. 当 $F_1=100\text{pN}$, $q_1=q_2=1.6 \times 10^{-16}\text{C}$, r 超过 1.5nm , 这个距离大约是相隔 4-6 个氨基酸, 与实验保持一致[1] (两个 R-NH_3^+ 之间大约相隔 4-6 个氨基酸, 由于蛋白质的螺旋折叠结构, 大约相隔为 1000Da , 约 8-12 个氨基酸, 其中氨基酸的螺旋长度大约为 0.15nm)。也就是说, 一个半径为 r 的分析物, 最大容纳的 H^+ 数目为:

$$N \cong \frac{r}{r_i} = \frac{r}{\left(\frac{k e_1 e_2}{F_1} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

如果有力作用在“化学键”的两端, 当作用力超过一定数值时“化学键”就会断裂。 F_1 从哪里来? 比较容易理解的是, F_1 来自于电子和原子核之间的库仑力。原子核和电子相互吸引的库仑引力 (F_c) 是形成“化学键”(图 2)的重要因素。现代建立的分子轨道理论[2]、价键理论[3]等, 大致认为电子是自旋相反成对的, 但电子是互相排斥的, 如果一个电子占据了两个正电荷的原子核中间的某个位置, 另外一个电子则不能离得太近。从我们的计算中看出, 真空度是会对电荷的移动造成影响的, 尤其是电荷能够对周围的某些物质具有牵引作用。电子围绕原子核并不是类似恒星那样的圆周运动, 而是出现在原子核周围的某个位置。毋庸置疑的, 真空度对微粒的运动具有影响。



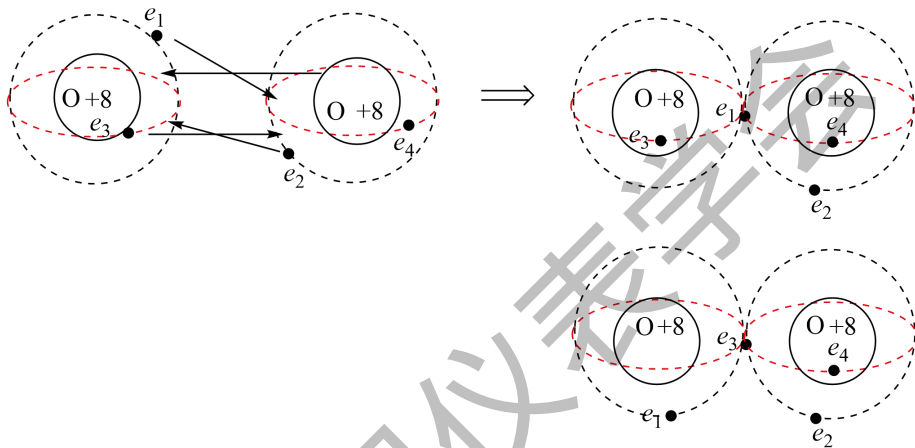
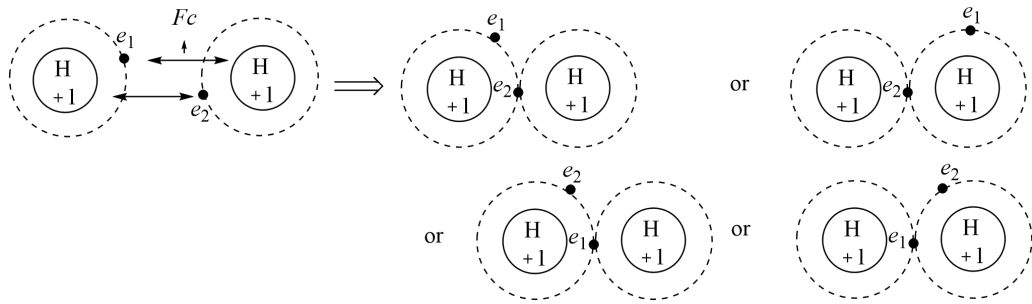


图2 原子核与电子的相互吸引形成化学键

在弱电场中，电子等电荷，在空气移动得比较快，在液体移动慢一点，在固体移动得更慢，在气体中，定向移动速率的数量级为 10m/s 以上，而在固体定向移动速率的数量级仅为 10^{-5}m/s [4]。电荷对周围的物质具有牵引作用，例如在质谱中观察到氯化钠离子的团簇（图3）[5]，我们认为，电荷对周围某些物质具有牵引作用的这种现象，在气相、液相、固相都是存在的，只是在固相状态时，金属键或者其它的键合作用，使得原子核并不能自由移动。例如，电子能够对周围的原子核牵引，周围的原子核也对另外的电子有牵引作用，依此类推。由于电子在固相移动得比较慢，这种相互的作用更容易达到平衡。这样的一个过程，是否是形成了“库珀对[6]”，有待研究，我们用图4描述这个过程。

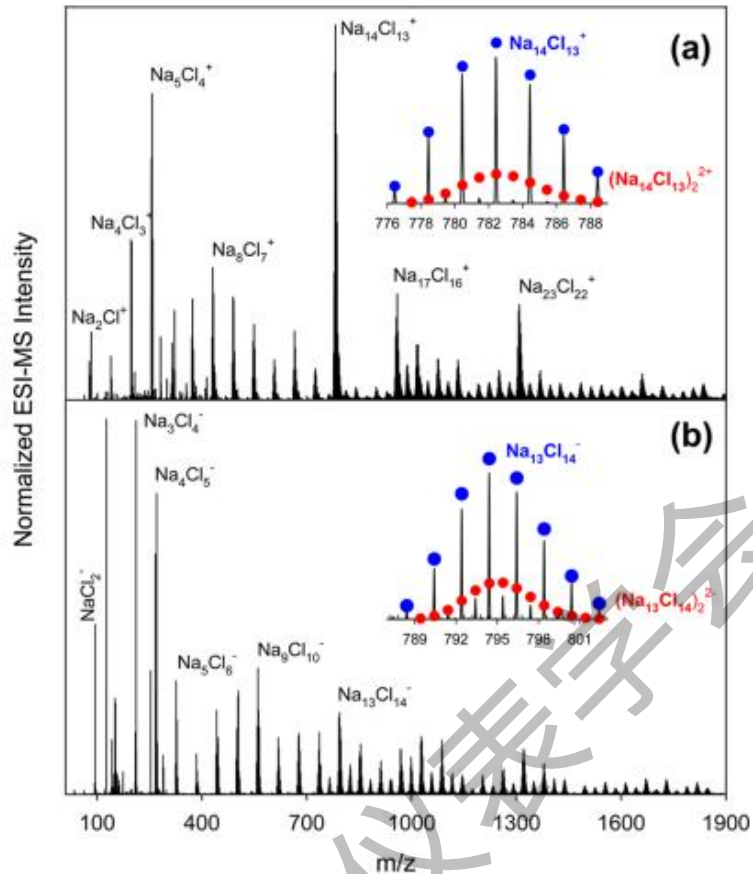


图3 质谱观察到的氯化钠团簇离子[5]

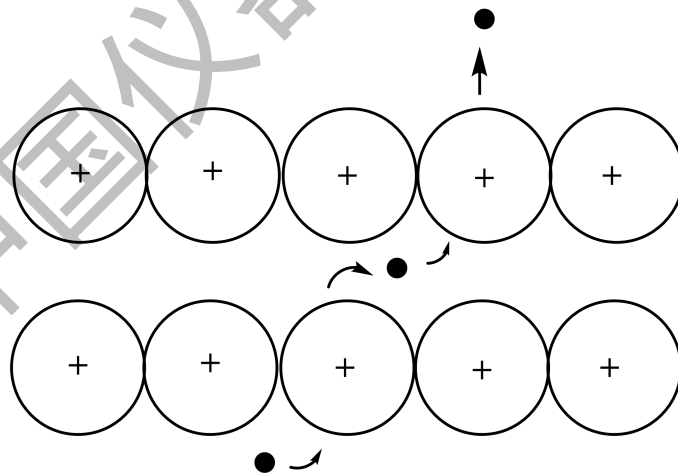


图4 电荷互相牵引

2 导体、半导体、绝缘体

原子核外围（K、L、M、N、O、P、Q、R等电子层）的电子排布遵循 $2n^2$ ，第一层K的电子排布为2，第二层L的电子为8，第三层M的电子排布为18，往后依次为32，32等等。如果把外围电子层看作球壳，那么在第一层K的空间内，只能排布2个电子，而电子

间是互相排斥的。L 层比 K 层的空间更大，能够容纳 8 个电子，他们是互相排斥的，M、N 等层依此类推。因此，如果在对应的电子层，电子数目 $<2n^2$ ，是未完全填充状态，此时，外来电子能够填充到相应的电子层，直到达到电子数目 $2n^2$ 为止，这些可以容纳外来电子的空间或者轨道，可以看作是“空穴”。

当导体导电时，靠近电场的原子核的外围电子由于库仑力的作用，脱离原子核向电场移动，形成电子空缺的轨道。此时相邻原子核的电子，可以通过上述原子核与电子相互吸引形成的“化学键”，跃迁到具有电子空缺轨道的邻近原子核上。如图 5 所示。按照原子半径的数量级大约是 10^{-10}m ，电子移动速率的数量级为 10^5m/s ，可以看出，电子每秒大约经过 10^5 个原子核的核外电子层。

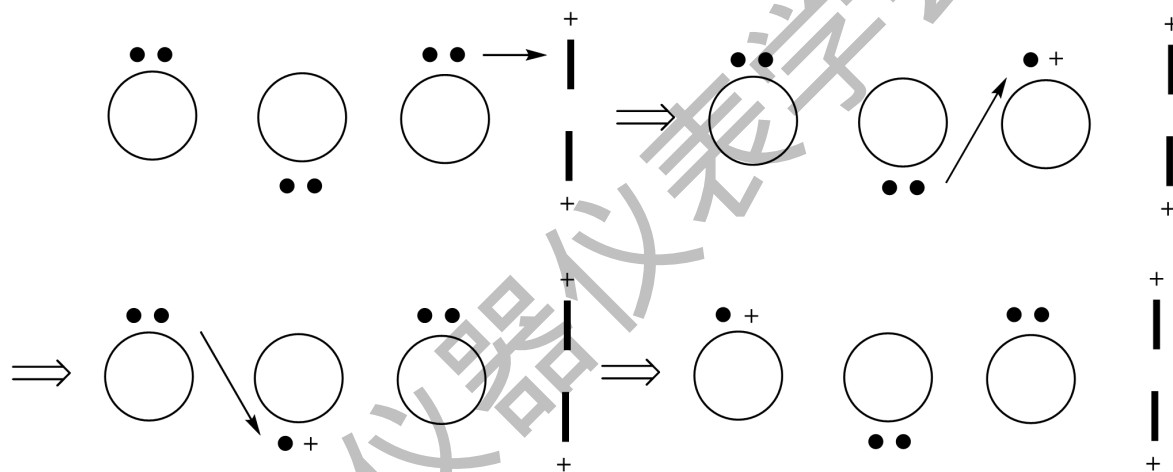


图 5 电子在核外电子层移动

电子摆脱原子核形成自由电子所需要的电场强度 E 是比较大的（可以用原子的第一电离能和原子半径大致估算一下数量级。用电离能=电场做的功，即 $W=qEl$ ，长度取原子半径。经过估算， E 大约是在 $10\sim 1000\text{ V/nm}$ 之间。也可以利用 $q_1E=kq_1q_2/r^2$ ，进行估算），因此电子大部分情况下被固定在核外电子层运动。如果产生导电效应，除了有能够自由移动的未成键电子外，还需要原子核外围电子层能够容纳新的外来电子，因此。我们总结出导体、半导体、绝缘体的特征。

2.1 导体

导体具有以下特征：1.外围电子层有未成键的自由电子。2. 外围电子层的包括成键电子在内的所有电子数目没有到达填充电子的最大数目，例如 $2n^2$ ，可以为电子的跃迁提供多余的空间。

以金属钠为例，金属钠原子外层电子为 1 个，当 2 个金属钠原子结合在一起时，外层电子数目为 $1+1=2 < 2n^2=2 \times 3^2=18$ ，而且这 2 个电子并没有成键，因此，具有导电性。电子可以在钠电子层第 3 层，即 M 层之间移动，实现导电。同理，金属铝外层电子数目为 $3+3=6 < 18$ ，同样能够导电[7]。

电荷在导体移动规律的示意图见图 6。靠近正极的电子向正极移动，造成邻近原子形成带正电的空缺，接着，相邻原子的外层电子，通过互相吸引形成的“化学键”，跃迁到带正电的原子的外层，依此规律电子发生移动，最后由负极补充缺失的电子，实现整体电子移动（导电）。图 7 是导体通过“化学键”跃迁的细节图。

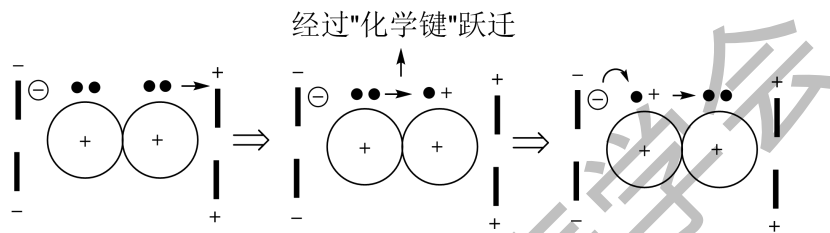


图 6 导体实现导电的原理

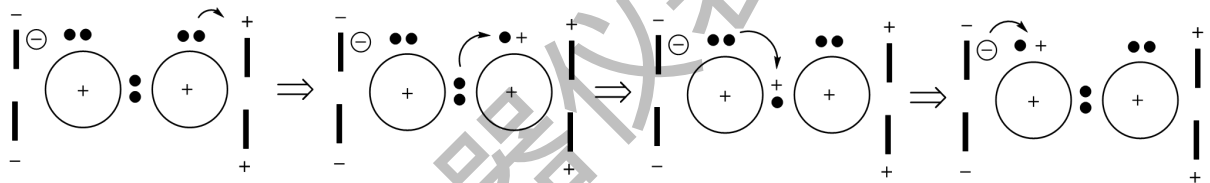


图 7 导体通过“化学键”跃迁的细节图

2.2 半导体

半导体的特征理论上为满足上述的条件 2，不满足条件 1。以 Si 为例，硅的外层电子数目为 4，4 个电子都成键，被束缚在原子核之间参加成键，不能自由移动。但外层电子总数为 $4+4 < 18$ ，外层电子层尚有空间可以容纳更多的电子，电子可以在外层电子层进行跃迁。因此，Si 为半导体。我们认为，在外电场（负极）的作用下，外电场的电子进入 Si 的外电子层（外层电子总数为 $4+4 < 18$ ，尚有足够空间容纳足够的电子），导致 Si 的外电子层电子处于充盈状态，电子有向正极移动的倾向，而且外来电子的进入，进一步削弱 Si 已经成键的 4 个键的稳定性，这样一定程度增加了 Si 的导电性能（相对金刚石而言）。

可以看出，往 Si 添加 III-V 族化合物等掺杂物质，可以改变 Si 的导电性。图 8 是半导体半导体内电子移动的规律，图 9 是半导体通过“化学键”跃迁的细节图。

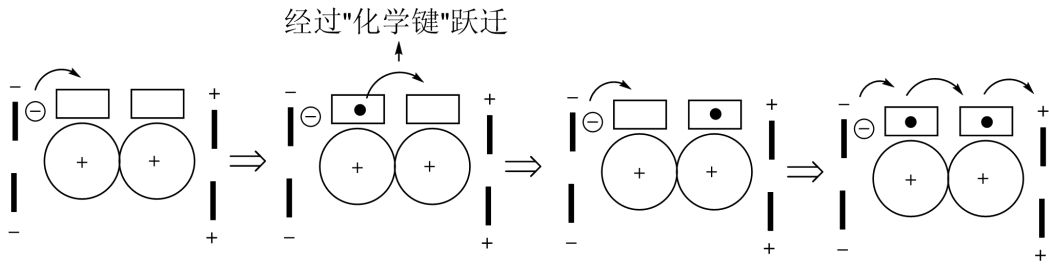


图 8 半导体内电子移动的规律

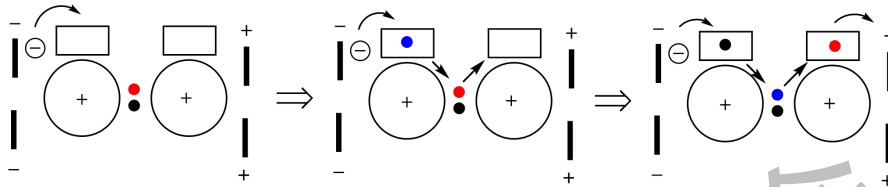


图 9 半导体通过“化学键”跃迁的细节图

掺杂分为 P 型掺杂与 N 型掺杂。N 型掺杂以 Si 掺杂磷为例，结果示意图如图 10 所示。

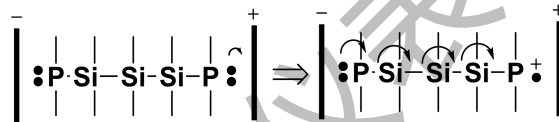


图 10 N 型掺杂

磷的孤对电子，一定程度增加了电子移向正极的能力，由于孤对电子增加了电子的密度，电子流向正极的倾向也增加了。

P 型掺杂以 Si 掺杂硼为例，结果示意图如图 11 所示。硼外层可以容纳一定数量 (8-N) 的电子，一定程度增加了电子流向硼外层空穴轨道的倾向。

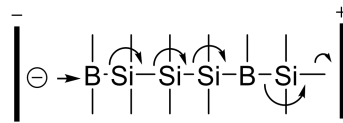


图 11 P 型掺杂

2.3 绝缘体

绝缘体的外围电子都已经成键，或者不能自由移动。同时，相邻的原子的电子轨道已经填满，不能为电子跃迁提供多余的空间。以金刚石为例，外围 4 个电子都已经成键，没有可移动的电子，同时，外围电子数目 $4+4=8$ ，达到第二层 L 层的最大填充数目，所以为绝缘体，图 12 为绝缘体电子移动规律示意图。但金刚石的同素异形体石墨却是例外，石墨只有 3 个电子成键，还有 1 个电子是自由电子，而外围电子为 $4+3=7$ ，没有达到 8 电子结构，因此，电子可以在碳原子的外层 L 进行移动，实现导电。

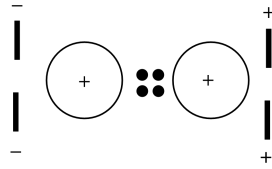


图 12 绝缘体电子移动规律示意图

绝缘体在击穿电压下会被击穿导电，例如金刚石的击穿电压为大于 10mV/cm (10^{-6}V/nm)，而根据 $W=qEl$ ，C 原子的半径为 0.086nm ，取金刚石的第一电离能 30eV ，则 E 为 349V/nm ($10\sim 1000\text{V/nm}$ 之间)，可以看出，使得金刚石原子电离第一个电子所需的 E ，大于击穿电压。我们认为，在一定的条件下（例如足够强的电势 E ），绝缘体成键的电子也能移动产生导电。因此，绝缘体并不一定是完全“绝缘”。

2.4 总结

从上述的各自特征，可以看出，原子与原子之间的成键状态，外层是否有能够移动的自由电子，外层电子是否填满，都直接影响物质的导电性能。物质倾向于形成离子键，则成键电子越容易在负电性强的原子核外运动，导致导电能力的减弱，因此，导电能力 $\text{ZnS} < \text{CdSe} < \text{HgTe}$ 。

3 电阻

原子核通过互相吸引电子形成“化学键”，有的电子处在两个原子核中间，其它电子由于排斥力，只能分布在其它轨道上。处在原子核之间的电子，形成的“化学键”可以看作 σ 键。通过这些电子在原子核外层的移动，实现导电。可以看出，电阻的主要形成原因是：1. 电子从 A 原子核进入到 B 原子核外层时，需要克服 A 原子核的引力，这时，B 原子核存在着吸引力，抵消一部分或者全部 A 原子核的引力，2. 电子进入到 B 原子核时，需要经过“化学键”，而如果“化学键”距离较远，存在着一定的原子“间隙”，电子需要克服“间隙”之间的能垒而做功，3. 电子进入到 B 原子核时，受到 B 原子核外层电子的排斥力作用（虽然 B 原子核外层轨道并非填满状态），这时，电子需要克服这些阻力而做功（主要为电场 E 吸引电子做功）。

从图 7 和图 9 看出，虽然半导体、导体都是通过“化学键”进行电子的跃迁，但明显地，半导体的“共价性”更多，电子束缚在原子核中间的概率更高，电子的移动能力比导体的弱，因此，导体的导电能力比半导体强。电子通过“化学键”跃迁的容易程度，可以用现代的能带理论[8]的“能带隙”来表示。电子与原子核的碰撞，更多体现为电子与核外电子层形成的“场”进行碰撞，或者互相排斥作用。

3.1 温度对电阻的影响

温度能够影响原子核的无规则运动速度，同时也能影响电子的无规则运动速度。大部分情况下，随着温度的增大，两个原子核的无规则运动速度增大，电子的无规则运动速度也增大，导致原子核与电子的距离发生变化，原子间隙也随之变化，两个原子核与相互作用的电子之间的作用力发生变化。在一定温度范围内，原子间隙变化不大的情况下（导体体积变化不大），A、B 两个原子核的电子的无规则运动速度增大，导致电子从 A 原子核进入到 B 原子核外层时，受到的 B 原子外层电子排斥力的概率增大了，总体的排斥力增大了，导致电子跃迁到 B 原子核的情况变得更困难了，因此电阻发生变化。

我们认为，在一定温度范围内（导体体积变化不大，原子间隙变化不大），原子核比较大，其相对无规则运动速度对电子移动影响小于核外电子层电子（按照我们的模型，是最外层的电子）对跃迁电子的影响。因此，我们主要讨论核外电子层电子对跃迁电子的“点电荷电场碰撞”影响。其中，点电荷周围的场为

$$Eq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (4)$$

自由电子气模型[9]认为，根据能量按自由度均分的原理，电子气有 3 个自由度，每个电子具有平均热运动为 $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ ，其中均方根速度为 $\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ ，正比于 \sqrt{T} （此方程与欧姆第二定律不符，因为经典模型认为晶格离子是固定不变的，没有热振动），我们的模型认为，一定温度范围内，在原子间隙变化不大的情况下，电阻真正产生的主要原因并不是自由电子与原子核碰撞，而是跃迁电子和核外电子层的电子在原子核外层由于排斥而产生“碰撞”（点电荷电场的碰撞）。因为温度不但对跃迁电子产生影响，也对核外电子产生影响，因此，跃迁电子与核外电子等上述两个电子碰撞的概率，正比于 $\sqrt{v^2} \times \sqrt{v^2} = v^2 = \frac{3kT}{m}$ 。在一定温度范围内，温度越高，两个电子碰撞的概率越高，跃迁电子移动受到的阻力越大，电阻越大。电阻在一定温度范围内正比于温度 T 。

对于半导体来说，虽然也面临着总体排斥力的增大，但“空穴”上的电子（“空穴”上的电子指的是，负极向未填满电子层移动的电子）跃迁到另外原子核的概率也随温度升高而变大了，同时，半导体不能移动的成键电子在温度升高的作用下，跃迁到另外原子核的概率也变大了（进入核外层的跃迁电子的无规则运动对成键电子的稳定性也产生一定的削弱作用）。半导体的电阻，取决于“空穴”上的电子和成键电子在温度作用下，跃迁到另外原子核的概率，

也取决于另外原子核外层电子的总体排斥力，因此，半导体随温度的变化，电阻变化的规律是比较特殊的。

4 超导

对电阻的原理进行探讨，可以使得我们对超导现象有进一步的认识。我们认为，电子是通过原子核与电子相互吸引形成的“化学键”在不同原子间进行跃迁，并且受到核外电子的排斥。如果核外的电子，受到原子核的吸引，比较稳定地固定在原子核中间位置（如图 2 所示），作为电子传递移动的桥梁，有助于超导的形成。同时，电子在移动的过程中，受到核外电子的排斥越小，也有利于超导。低温和高压，都有利于减少核外电子的排斥作用，因为低温和高压下，核外电子的无规则运动减弱。同时，我们认为，“化学键”具有一定的共价性，有利于超导，因为一定的共价性，形成“化学键”的电子更容易稳定在两个原子核之间，例如金属 Be。

从迈斯纳效应[10]推测，电子是通过正电荷互相牵引，自旋相反组成一对对而移动的。图 13 提出电子通过化学键跃迁并且牵引前进的假想图。图 13 是从单个电子角度描述，而图 14 是电子互相牵引同步前进的示意图。

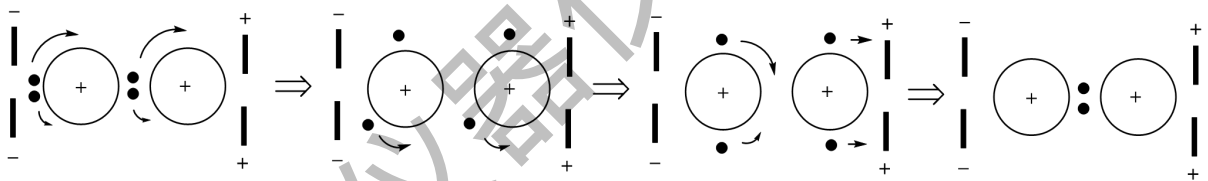


图 13 电子通过化学键跃迁并且牵引前进的假想图

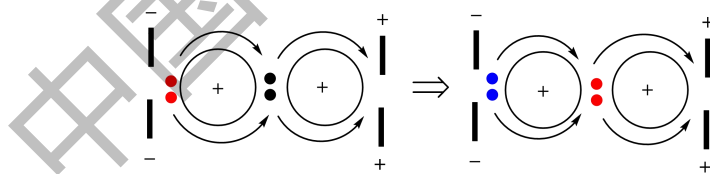


图 14 电子互相牵引同步前进的示意图

5 同位素效应的一些探讨

超导温度 T_c 与原子质量 M 存在关系 $K=T_cM^a$ (K 是常数), 该方程与软电离质谱中 $Z=aM^b$ 相近。其中笔者给出 a 在匀速状态下的计算公式,

$$a = \frac{32 \left(\frac{2\pi RT}{3\mu} \right)^{1/2} \rho v \left(\frac{3}{4\pi \rho_a N_A} \right)^{2/3}}{3F_1} \quad (5),$$

如果电荷与分析物的加合物并不处在匀速状态下运动，则

$$r^2 \cong \frac{3F_1}{32\left(\frac{2\pi RT}{3\mu}\right)^{1/2}\rho v} \quad (6)$$

$$Ma = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_a N_A \cong \frac{4}{3}\pi \left(\frac{3ZF_1}{32\left(\frac{2\pi RT}{3\mu}\right)^{1/2}\rho v}\right)^{3/2} \rho_a N_A \quad (7)$$

$$Z \cong \frac{32\left(\frac{2\pi RT}{3\mu}\right)^{1/2}\rho v \left(\frac{3Ma}{4\pi\rho_a N_A}\right)^{2/3}}{3F_1} \quad (8)$$

$$Z = aMa^{2/3} \quad (9)$$

$$a \cong \frac{32\left(\frac{2\pi RT}{3\mu}\right)^{1/2}\rho v \left(\frac{3}{4\pi\rho_a N_A}\right)^{2/3}}{3F_1} \quad (10)$$

因此， a 需要满足一定的条件，否则电荷与分析物之间的作用力（氢键，范德华力等）

可能被破坏。 $a < \frac{32\left(\frac{2\pi RT}{3\mu}\right)^{1/2}\rho v \left(\frac{3}{4\pi\rho_a N_A}\right)^{2/3}}{3F_1}$ 时，作用力被破坏。

如果把电子看作与质子一样的电荷（电子和质子的大小比较接近），晶格里的正电荷原子核看作“分析物”，则电子在向正极移动的过程中，能够牵引正电荷原子核向正极移动（由于金属键等作用，正电荷原子核很难移动）。在软电离质谱中， a 的数值与电荷、分析物之间的作用力存在关联，从 a 的计算公式看出， a 与 F_1 成反比。笔者进行大胆的猜想，电子与正电荷原子核之间的相互作用，与 T_c 存在着关联，但 T_c 是否与这个相互作用的作用力成反比，有待我们进一步研究。

笔者用 ΣF_i 表示电子与原子核的作用力之和。则 $T_c \propto \frac{K}{(\Sigma F_i)^\beta}$ ，其中 K 为常数。

电子与原子核的作用力，主要为库仑力，万有引力等。实现超导时，电子与原子核相关作用力非常小，才能使得电场 E 做功少，从而导致电阻非常小。因此，我们推测，在一定的温度下（在温度 T_c 上下一定范围内）， ΣF_i 与电阻存在关联， ΣF_i 越小，电阻也越小。电阻 $R \propto \Sigma F_i$ 。

从公式 $K=TcM^a$ 推测，与质量 M 有关的是万有引力，笔者在这里提出一个假说，在 $<Tc$ 的温度下，库仑力大幅度减少，电子与原子核的作用力主要依靠万有引力。对比库仑力与万有引力的大小，可得，

$$F_c = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (11),$$

其中， q_1 是电子的电荷量， q_2 是原子核的电荷量。

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (12)$$

其中， m_1 是电子的质量， m_2 是原子核的质量。

则 $\frac{F_c}{F_g} = \frac{kq_1q_2}{Gm_1m_2}$ ，以一个质子与中子数相同的原子核 ($n=$ 质子数= n 中子数) 进行

计算 (质子的质量为 $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，中子的质量为 $1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子有质量为 $9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$)，得到，

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{kq_1q_2}{Gm_1m_2} = \frac{9 * 10^9 * (1.6 * 10^{-19}) * n * (1.6 * 10^{-19})}{6.67259 \times 10^{-11} * 9.10953 \times 10^{-31} * n * (1.675 \times 10^{-27} + 1.673 \times 10^{-27})} = 2.2 \times 10^{39},$$

可以看出，如果 ΣF_i 与电阻存在关联 (电阻 $R \propto \Sigma F_i$)，当温度从高于 Tc 变为低于 Tc 时，电子与原子核相互作用的实际库仑力大幅度减少，会导致电阻大幅度降低。如果库仑力降低为 0，则万有引力仅为原来库仑力的 $\frac{1}{2.2 \times 10^{39}}$ 。当库仑力大幅度减少，甚至减少到 0，电阻 R 将 \propto 原来数值的 $\frac{1}{2.2 \times 10^{39}}$!

电子与原子核相互作用的实际库仑力是由于什么原因而减少？可能的原因是，当温度从高于 Tc 变为低于 Tc 时，电子自旋相反配对，在原子核外的另外一个电子 (受到牵引的库珀对电子) 的库仑排斥力，部分抵消了正电荷原子核的库仑吸引力，导致电子与原子核相互作用的实际库仑力的减少。相互作用的实际库仑力的大幅减少，导致电阻的大幅度降低，在实验上，比 $10^{-12} \Omega \text{ cm}$ 这个数量级低十几个数量级 (例如 $10^{-32} \Omega \text{ cm}$)，可以认为电阻为 0。

基于以上推测和假说，结合笔者的方程以及电阻模型，笔者给出本实验室关于超导的形成原因：导体在导电时，由于电子向正极迁移，导致核外电子层的电子是一个一个地通过核外电子层，从而产生导电作用。核外电子层如果容纳 2 个或者 2 个以上的电子同时迁移，是比较困难的，需要一定的条件 (例如高压、低温，甚至可能需要克服一定的能垒)。当温度

高于 T_c 时，由于原子核核外电子层的电子的无规则运动等各种不同效应，原子核外层只允许 1 个电子进入，这个电子形成了导电。当温度高于 T_c 时，也是由于原子核核外电子层的电子的无规则运动等各种不同效应，阻碍了 2 个电子进入原子核的外层，阻碍了“库帕对”的形成。当温度低于 T_c 时，原子核外层电子的无规则运动减弱（可能包含其它在低温下呈现的特征），导致 2 个电子能够进入原子核的外层，形成“库帕对”进行导电。这 2 个通过晶格互相作用的电子对，由于 2 个电子之间的排斥作用，降低了电子与原子核的实际库仑作用力，导致电阻的大幅度下降（电阻 $R \propto \Sigma F_i$ ），从而形成超导。上述的原子核外层，是指笔者电阻模型中能够产生导电的原子核未完全填充电子层。

高压超导的情况与上述类似。高压的作用能够使得 2 个电子进入原子核外层进行导电，形成“库帕对”。

6 展望

本文建立了导体、半导体、绝缘体的模型，提出电阻和超导的可能产生原因，并且根据模型推算出电阻在一定温度范围内与温度成正比。电阻的真正形成原因，有待我们继续研究，对于理解超导等具有重要意义。

参考文献

- [1] 汪聪慧. 有机质谱技术与方法, 中国轻工业出版社, 中国, 2011, pp. 162—164.
- [2] 刘子豪. 分子轨道理论概念：基础与拓展[J]. 大学化学, 2023, 38(05): 335-340.
- [3] 李承钧. 分子轨道理论和价键理论的比较[J]. 孝感学院学报, 1994(00): 67-71.
- [4] 徐宁. 电流产生的微观机制探讨[J]. 中学物理, 2015, 33(23): 30.
- [5] Konermann L, McAllister R G, Metwally H. Molecular dynamics simulations of the electrospray process: formation of NaCl clusters via the charged residue mechanism[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2014, 118(41): 12025-12033.
- [6] 欠掺杂的氧化物超导体正常态存在超导库珀对[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3269.
- [7] 晏成和. 我的物理发现(1-30)[DB/OL].
<https://blog.sciencenet.cn/blog-73066-1372313.html>, 2023.1.17.
- [8] 李安昌. 浅谈金属键的能带理论[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 1989(01): 83-88.
- [9] 应发宝. 从微观机理视角分析导体电阻本质[J]. 中学物理教学参考, 2016, 45(17): 31-34.
- [10] 段丁梨. 高温超导体电阻对温度的依赖性及迈斯纳效应研究[J]. 科技风, 2018(25): 202.