

§2-3 稳恒电流与稳恒条件

一、 电流的定义

1. 电流的形成

(1) 产生电流的条件

电荷流动形成电流。在宏观范围内，电流就是大量电荷的定向运动。

- **存在载流子**

要产生电流，一方面必须存在可以自由运动的电荷，即载流子，在多数情况中，载流子是电子或某种带电微粒，如正、负离子。

- **存在迫使电荷作定向运动的某种作用**

由于导体对载流子的定向运动具有阻力，要维持电荷的定向运动，这种作用是必不可少的。迫使电荷作定向运动的作用则是多种多样的，有机械作用、化学作用、电作用等等。

(2) 不同材料中的载流子

- **金属导体中电流的载流子是自由电子**

金属中存在大量自由电子，当金属处在电场中时，自由电子因电场力而作定向运动，从而形成金属中的电流，由于电子的质量很小，金属中的电流不会引起宏观上可观察到的质量迁移。

- **电解质溶液中电流的载流子是正负离子**

当酸、碱、盐等电解质溶液处在电场中时，正、负离子因受电场作用而分别向相反的方向作定向运动，从而形成电解质溶液中的电流。从电量迁移的角度看，正电荷向某一方向运动与负电荷向相反方向的运动所产生的效果是相同的。电解质溶液中的电流会引起质量迁移，一般还伴随化学反应。

- **半导体材料中的载流子是电子和空穴**

半导体材料中的载流子是电子（导带中）和带正电的空穴（满带中），电子或空穴在电场作用下形成半导体中的电流。半导体中载流子的密度和定向运动与温度、光照等因素密切相关。

- **导电气体中的载流子是电子和正、负离子**

通常，气体中没有可以自由移动的电荷，故气体没有导电性，是良好的绝缘体。但是，紫外线、X射线、宇宙线以及火焰等所谓电离剂会使气体分子电离，产生电子和正、负离子，从而使气体具有导电性。

(3) 真空中的电流

- **热电子发射**

真空中没有自由电荷，故在一般情况下真空中不会有电流。金属内部的自由电子可以在金属内部自由运动，但它们很难进入真空形成电流。不过随着金属温度的升高，动能大的电子增多，当金属达到灼热时，动能大的电子会很多，从而有大量电子从金属中逸出，这就是热电子发射。热电子发射使真空中出现大量载流子，在外电场作用下形成真空中的电流。

- **隧道电流**

真空两极管中的电流就是由阴极发出的热电子形成的。微观粒子具有贯穿势垒的隧道效应，即使金属的温度不高，电子仍有一定的概率贯穿势垒进入真空，从而可在特定的条件下使真空中形成微弱的隧道电流。

1982年，IBM苏黎世实验室的宾尼（Binnig）博士和罗雷尔（Rohrer）博士及同事们成功地研制出了一种新型的表面分析仪器——扫描隧道显微镜（简称STM），1983年他们又第一次利用STM在硅单晶表面观察到周期性排列的硅原子阵列，这是人类有史以来首次得以直接看到个别的原子。由于这一成就，他们获得了1986年的诺贝尔物理学奖。

扫描隧道显微镜有一个针尖在表面上扫描，样品表面就是原子，针尖和样品之间的距离小于1纳米，就会有隧道电流，这个隧道电流对针尖和样品之间的距离非常敏感，如果我们控制了隧道电流恒定不变，就意味着控制了针尖和样品之间的距离不变，距离不变，针尖就随着表面的起伏而起伏，把针尖高低运动的轨迹记录下来，就得到表面原子的形状，但这只是从原理上说，技术上还很复杂。那原子怎么操纵呢？扫描隧道显微镜的操纵原理是，在针尖上加一个很微弱的电流，这个电流产生一个电场，当两个物体非常接近的时候，会有排斥力，但到一定程度它又会有吸引力，在吸引力的范围内，一般在几个埃的时候，把针尖提上来，原子就跟着上来了，把它放到哪儿它就在哪，这个方法可操纵吸附在表面的原子、分子。

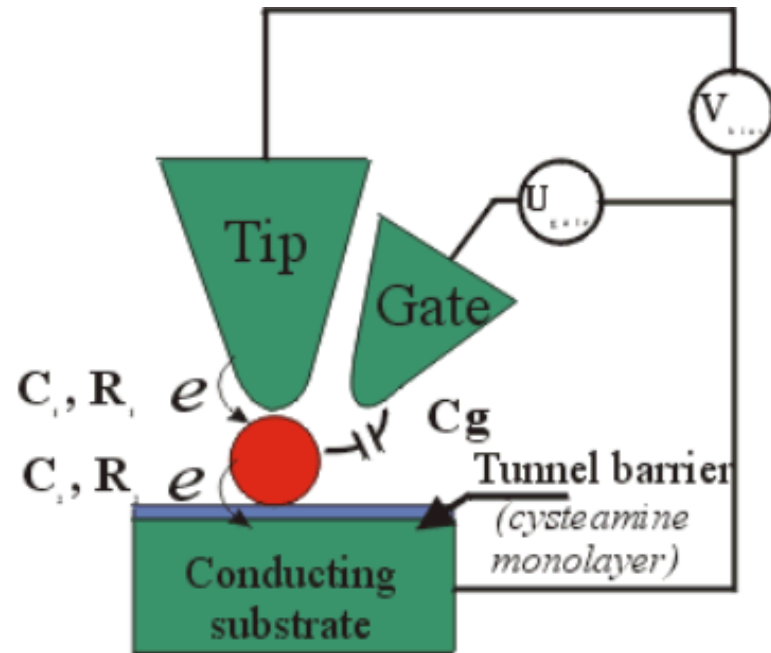
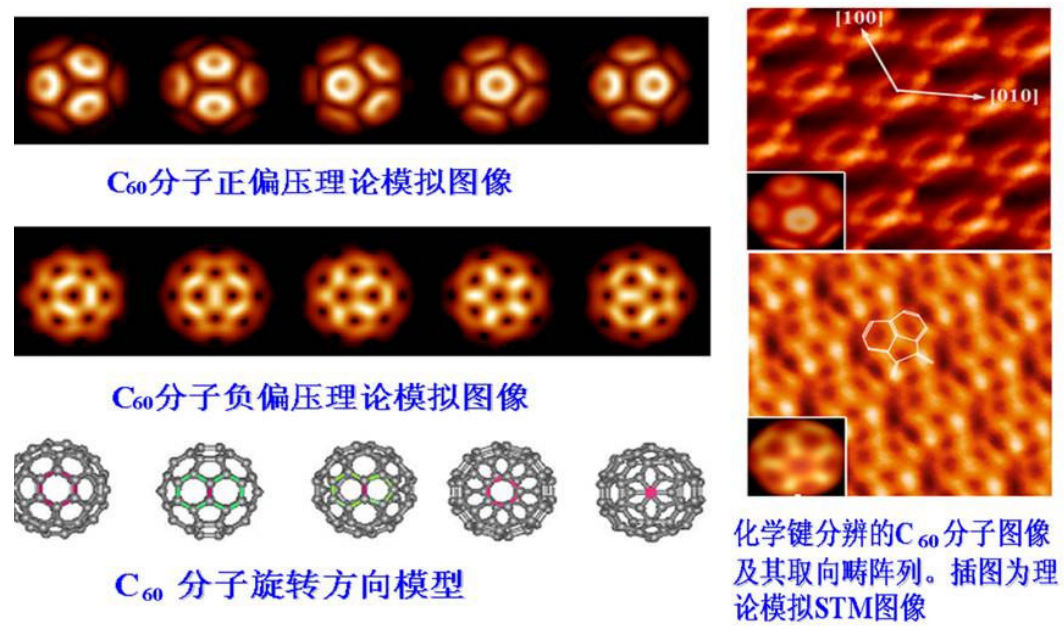


图 2-35 扫描隧道显微镜原理示意图

图 2-36 中国科学技术大学研究者获得的 C₆₀ 分子的 STM 图象

2. 电流的方向

由于电子服从量子力学的规律，即使处于绝对零度附近，金属中的自由电子仍必须分布在一系列能量不同的状态上，因而电子不规则运动的平均速率仍非常大，其数值约为 10^6m/s 。但是，电子的平均速度为零，故电子的不规则运动并不引起宏观上的电流。由于负电荷向某一方向的定向运动所引起的电量迁移与等量的正电荷向相反方向作定向运动所引起的电量迁移等效，加之传统习惯，即使在很多情况下实际的载流子是带负电的电子，但在研究电流时都规定带正电的载流子的定向运动方向作为电流的方向。

二、 电流强度与电流密度

1. 电流强度

(1) 电流强度的定义

电荷的定向运动形成电流，电流强度即单位时间内通过导体任一根截面的电量。设在小的时间间隔 t 通过某一根截面的电量为 Q ，则电流强度为

$$I = \frac{Q}{t}$$

(2) 电流强度的单位

电流强度的单位为库仑 / 秒，称为安培，符号为 A。电流强度常用单位还有毫安 (10^{-3} 安培) 和微安 (10^{-6} 安培)，符号为 mA 和 μA 。

2. 电流密度

用电流强度这个物理量描述导体中有时似乎太“粗糙”。

- (1) 电流强度只表示导体中某一截面的总电流大小，而不能描述电流沿截面的分布情况。
- (2) 电流是有方向的，它指向正电荷运动的方向。导体中各点的电流不仅强弱有别，而且方向也可能不一致。为了描述导体中各点电流的大小和方向，人们引入一个更“精细”的物理量—电流密度。

为给出电流密度的定义，考虑导体中某一给定点 P ，在该点沿电流方向作一单位矢量 \mathbf{n}_0 ，并取一面元 ΔS_0 与 \mathbf{n}_0 垂直，设通过 ΔS_0 的电流强度为 ΔI ，则定义 P 点处电流密度的大小为

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S_0} .$$

由上式可知，所定义的电流密度的单位为安培 / 米² (A · m⁻²) 。

进一步，为了使电流密度能同时表示出 P 点处电流的方向，可将电流密度定义为一个矢量，其大小仍由上式表示，其方向与 \mathbf{n}_0 同向。即电流密度是一个矢量，它的方向表示导体中某点电流的方向，数值等于通过垂直于该点电流方向的单位面积的电流强度。

这样定义的电流密度是空间位置的函数，它细致地描述了导体中的电流分布，称为电流场。为形象地描述电场，对电流场也可以通过引入“电流线”来进行形象描述。电流线即电流所在空间的一组曲线，其上任一点的切线方向和该点的电流密度方向一致。一束这样的电流线围成的管状区域则称为电流管。已知导体中某点 P 的电流密度，可以求得通过该点任一面元的电流强度：

$$\Delta I = \vec{j} \cdot \Delta \vec{S}$$

通过导体任一有限截面 S 的电流强度为：

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{s}$$

三、 电流连续性方程

1. 积分形式

按照电荷守恒定律，电荷的代数和保持不变，电荷只能由一个物体转移到另一个物体，或由物体的某一部分转移到其它部分。因此，如果在导体内任取一闭会曲面 S ，所围区域为 V ，则某段时间内流出波曲面 S 的电量应当等于同一段时间内区域 V 中电量的减少。若在 S 面上规定面积元矢量 $d\vec{s}$ 指向外法线方向，则

$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iiint_V \rho_e dV$$

这是电流连续方程的积分形式，它反映电流分布和电荷分布之间存在的普遍关系，它是电守恒定律的数学表示。

2. 微分形式

电流连续方程的微分形式为

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0$$

3. 电流连续方程的意义

电流连续方程表明，电流线只能起、止于电荷随时间变化的地方，在电流线的起点附近的区域中，会出现负电荷的不断累积，即电荷密度不断减小；而在电电流线的终点的附近的区域中，会出现正电荷的不断积累，即电荷密度不断增加。对于电荷密度不随时间变化的地方，电流线既无起点又无终点，即电流线不可能中断。

由于稳恒电流的电流密度不随时间变化，如果存在电流线发出或汇聚的地方，那么这些地方电荷的增加或减少的过程就将持续进行下去，这必将导致这些地方正电荷或负电荷的大量积聚，从而形成越来越强的电场，电场将阻碍电荷的继续积聚，电流将消失。而对于真正的稳恒电流，必须不存在这种电荷不断积聚的地方，亦即 \vec{j} 对任何封闭曲面的通量必须等于零，即

$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0$$

这就是说，任何时刻进入封闭曲面的电流线的条数与穿出该封闭曲面的电流线条数相等，在电流场中既找不到电流线发出的地方，也找不到电流线汇聚的地方，稳恒电流的电流线只可能是无头无尾的闭合曲线。这是稳恒电流的一个重要特性，称为稳恒电流的闭合性。

四、 稳恒条件

对于稳恒电流，空间任一封闭曲面内的电量保持不变。即对于稳恒电流，在任何地点，其流失的电荷必被别处流来的电荷所补充，电荷的流动过程是空间每一点的一些电荷被另一些电荷代替的过程。否则在空间任一点的电荷积累将导致电流稳恒性的破坏，因此，由电流的连续性方程有

$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

这就是稳恒条件的积分形式，其微分形式为：

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0$$

即电荷的分布不因电流的存在而随时间变化，由它产生的电场亦不随时间变化，这种电场称为稳恒电场，它是一种静态电场。稳恒电场与静电场有相同的性质，服从相同的场方程式，电势的概念对稳恒电场仍然有效。

稳恒电流可以同样用电流线和电流管的概念来描述，稳恒有两个特性：

- (1) 稳恒电流的电流线或电流是闭合的，电流线不可能有起点和终点。
- (2) 沿任一电流管的各截面电流强度都相等。