

第二章 稳恒电流



§ 2-1 物质的电性质

一、物质电性质分类

1. 导体、绝缘体与半导体

各种物质电性质的不同，早在 18 世纪初就为人们所注意了。1729 年，英国人格雷（Stephen Gray）就发现金属和丝绸的电性质不同，前者接触带电体时能很快把电荷转移或传导到别的地方，而后者却不能。

由于不同原子内部的电子数目和原子核内的情况各不相同，由不同原子聚集在一起构成的不同物质的电性质也各不相同，甚至有的差别很大。即使是由相同原子构成的物质，由于所处的环境条件（如温度、压强等）不同，电性质也有差异。

电阻率（用符号 ρ 表示）是可以定量反映物质传导电荷能力的物理量，在数值上等于单位横截面、单位长度的物质电阻。物质的 ρ 越小，其转移和传导电荷的能力越强。

通常人们把物质分为 3 类：

(1) 导体

转移和传导电荷能力很强的物质，或者说电荷很容易在其中移动的物质；导体的电阻率约在 $10^{-8}\Omega\text{ m}\sim 10^{-6}\Omega\text{ m}$ 之间。

导体有固态物质，如金属、合金、石墨、人体、地等；有液态物质，如电解液，即酸、碱、盐的水溶液等；也有气体物质，如各种电离气体。此外，在导体中还有等离子体和超导体。

(2) 绝缘体

转移和传导电荷能力很差的物质，即电荷在其中很难移动的物质；绝缘体的电阻率一般为 $10^6\Omega\text{ m}\sim 10^{18}\Omega\text{ m}$ 。

绝缘体同样有固态物质，如玻璃、橡胶、塑料、瓷器、云母、纸等。

有液态物质，如各种油；

也有气态物质，如未电离的各种气体。

(3) 半导体

介于这两者之间的物质；半导体的电阻率约为 $10^{-6}\Omega\text{ m}\sim 10^6\Omega\text{ m}$ 。

半导体物质有硅、锗、蹄以及一些金属化合物等。

2. 等离子体

(1) 什么是等离子体

等离子体是部分或完全电离的气体，由大量自由电子和正离子以及中性原子、分子组成。等离子体在宏观上是近似电中性的，即从宏观上说，所含的正电荷与负电荷几乎处处相等。

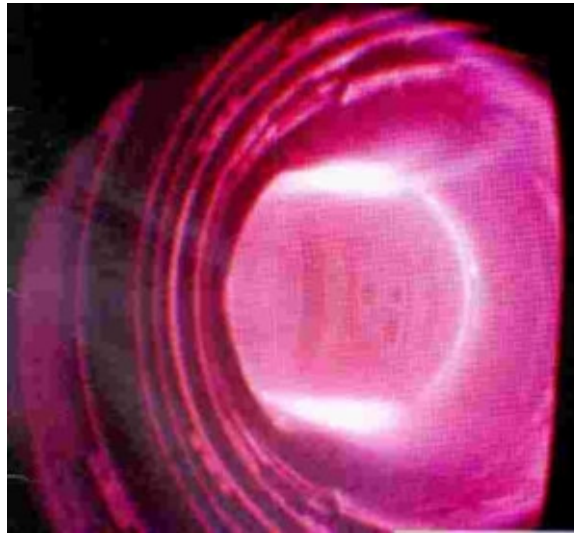


图 2-1 美国普林斯顿大学 PPPL 托克马克中的等离子体

(2) 离子体如何形成

任何物质由于温度不同将处于不同的聚集状态。固体加温溶解成为液体，液体加温沸腾成为气体。温到几万度、几十

万度甚至更高的温度，则不仅分子或原子的运动十分剧烈，而且原子中的电子也已具有相当大的动能，足以摆脱原子核的束缚成为自由电子，于是原子电离，成为自由电子和正离子。这种部分电离（带电粒子的数量超过千分之一）或完全电离的气体，就是等离子体。

(3) 物质的第四态

从物质聚集态的顺序来说，等离子体居于固体、液体、气体之后，位列第四，所以等离子体又称为物质的第四态。所谓物质的不同聚集态，从微观上说，就是构成物质的微观粒子排列的有序程度不同。

固体（晶体）中的粒子规则地周期性地排列，远程有序，使固体具有确定的形状和体积。液体分子在小范围内规则排列，近程有序，使液体具有一定体积且不易压缩，但又易流动或相对移动从而无一定形状。气体分子作无规则热运动，使气体既无固定形状和体积，又易流动和压缩。

在等离子体中，不仅未被电离的中性分子自由地热运动，而且电离产生的电子和正离子也都自由地热运动，所以等离子体是有序度最差的聚集态。

物质各种聚集态在一定条件下的转化，就是物质有序度的改变，从固体到液体再到气体和等离子体，有序度逐步被破坏。有序度对物质的性质有重大影响，区分固体、液体、气体的原因正在于此。把部分或完全电离的气体单独命名为等离子体，也正是因为等离子体与气体的性质很不相同。

(4) 等离子体间的力

普通的气体由中性原子、分子组成，其间的相互作用是分子力，这是一种短程相互作用，只在分子相距很近（即碰撞）时才需要考虑，相距较远即可忽略，由此，在气体不太稠密时主要是二体碰撞，多体碰撞极少。

在等离子体中，中性原子分子之间的作用已退居次要地位，整个系统受带电粒子的运动支配。带电粒子之间的相互作

用主要是 Coulomb 力，这是一种与距离平方成反比的长程力，每个带电粒子往往同时与许多带电粒子发生作用（集体相互作用），并且带电粒子的运动还将受到外加电磁场的强烈影响。

从电性质上看，由于它主要是由可自由运动的电子和正离子组成，所以是导电性能极好的良导体。这种由大量电子和正离子组成的物质系统宏观上是电中性的，任何局部正电荷或负电荷的偶然集中都将会被附近移来的相反电性电荷立即中和，从而恢复电中性。所有这些，都决定了等离子体具有一系列区别于气体的独特性质和研究方法。

（5）等离子体是宇宙物质存在的主要形态

在地球上，常见的是气体、液体和固体，等离子体很少见，这是因为地球表面的温度太低，通常并不具备产生等离子体的条件。然而，在特定的环境和条件下，地球上也能产生等离子体。例如，在两极上空，由于太阳活动和地球磁场的作用，高空大气会电离形成稀薄等离子体，美丽的极光就是两极上空等离子体的辐射产生的。例如，在雷雨季节，云层各部分之间或云层与地面之间的高电压会使大气击穿电离形成等离子体，等离子体的辐射产生壮观的闪电。例如，霓虹灯鲜艳的色彩，就是其中氖或氩等离子体产生的。此外，例如在日光灯、火焰或氢弹爆炸时也都有等离子体，围绕地球的电离层也是等离子体。

与地球不同，在宇宙中，恒星（例如太阳）是高温电离形成的等离子体，稀薄的星云和星际物质则是由辐射电离形成的等离子体，在宇宙中 99.9% 的物质是等离子体，如太阳风、恒星和星云等（如图 2-2, 2-3, 2-4）。



图 2-2 漂亮的北极光

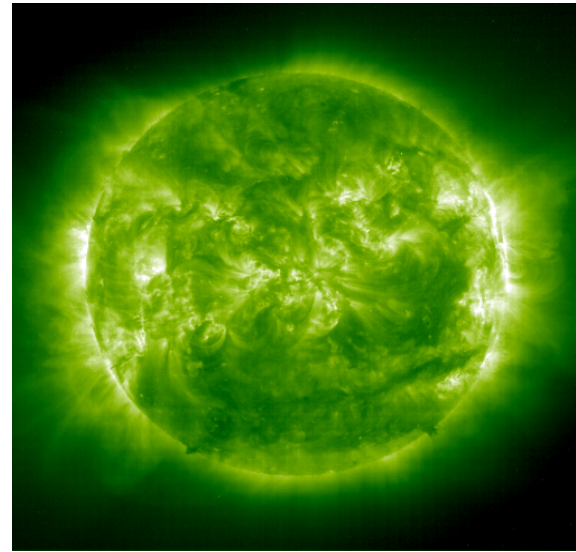


图 2-3 太阳风

图 2-4 宇宙中的星云



(6) 核聚变

众所周知，轻核的聚变可以获得取之不尽用之不竭的能量，为了实现可控热核反应而不是热核爆炸，需要解决一系列难题。例如，聚变只能在几百万度或更高的温度下进行，在这种温度下任何固体都将熔化而无法作为装载的“容器”，为此，人们采用磁场来约束等离子体，迫使等离子体的全部带电粒子按一定队形运动而不与固体器壁接触。然而，又出现了等离子体的不稳定性问题，它使得约束无法维持到实现反应所需的时间。所以，为了解决等离子体的磁约束问题，不仅需要设计各种磁场位形，建立巨大而复杂的托卡马克装置，图 2-1 就是托卡马克中的等离子体；图 2-5 是合肥的中国科学院等离子体研究所的正在建造的新一代超导托卡马克 HT-7U 装置。

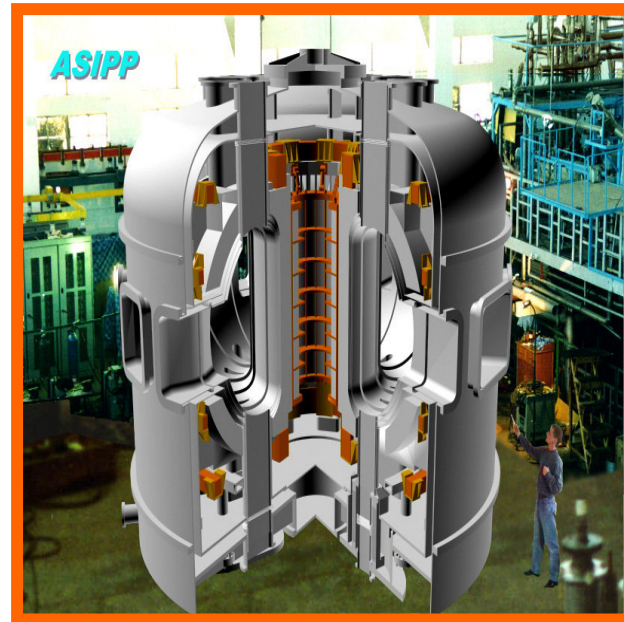


图 2-5 中国科学院合肥等离子体研究所的超导托卡马克 HT-7U 装置

3. 超导体

(1) 什么是超导体

某些金属或合金的温度降到接近绝对零度时，其电阻突然变为零或接近于零，这种现象称为超导电现象。

现代超导重力仪的观测表明，超导态物体的电阻率必定小于 $10^{-28} \Omega \cdot \text{m}$ ，远远小于正常金属迄今所能达到的最低电阻率 $0^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，因此，可以认为超导态的电阻率确实为零。图 2-6 是超导厚薄膜的微观电镜图象。

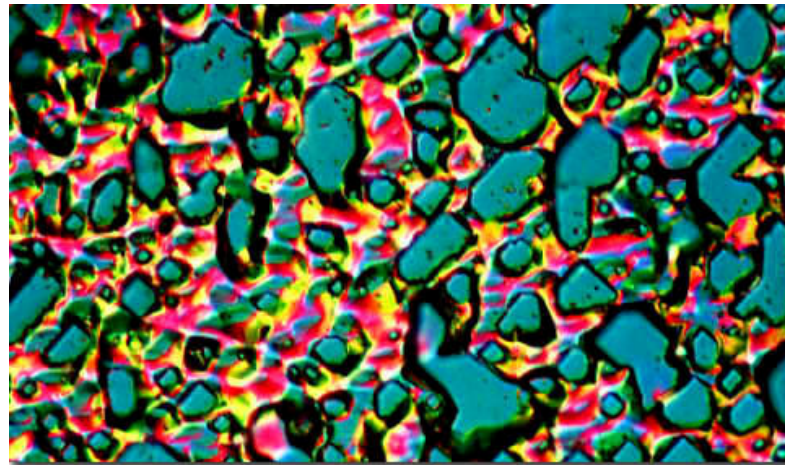


图 2-6 超导厚薄膜的微观电镜图象

(2) 超导体的发现

超导体首先由荷兰物理学家开默林-昂纳斯 (**Kamerlingh-Onnes Heike** 1853-1926) 图 2-7) 于 1911 年发现。昂纳斯长期从事低温物理的研究，是他首先打开了低温世界的大门，他创建的莱顿实验室是世界著名的低温物理研究中心之一。他第一个

实现了氢气的液化，接着又实现了氦气的液化。1911年，他发现的水银样品在温度 $4.22\text{ °K} \sim 4.27\text{ °K}$ 时电阻消失，接着他又发现其他一些金属也有这种现象。昂纳斯因在低温的获得和低温下物性的研究而获得1913年诺贝尔物理学奖。

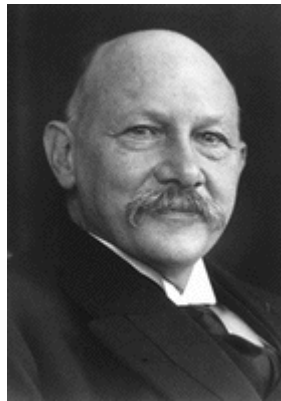


图 2-7 超导体的发现者荷兰物理学家开默林—昂纳斯

(3) 转变温度

正常导体转变成超导体的温度称为转变温度。大量的研究表明，除汞外有几十种元素、数千种合金和化合物都具有超导性。由于处在超导态的导体的电阻接近零，电流在超导体中一旦形成，便能经久不衰地持续下去，而无需电场的作用。

(4) BCS 理论

1957年美国物理学家巴丁 (J.Bardeen)、库柏 (L.N.Cooper) 和施瑞弗 (J.R.Schrieffer) 三位理论物理学家 (图 2-8) 提出了超导的微观理论简称 BCS 理论 (以三人名字第一个字母命名的理论)，他们三人因此而获得 1972 年诺贝尔物理学奖。按照这一理论，超导的转变温度不会高于 30 °K ，这一结论使本来已经萧条的超导物理变得更加沉闷。



图 2-8 BCS 理论的提出者美国物理学家巴丁、库柏和施瑞弗

(5) 高温超导

1986 年，瑞士物理学家贝德诺兹 (J.G.Bednorz) 和米勒 (K.A.Muller) 教授 (图 2-9) 发现了新的超导材料——氧化物超导体，能在较高的温度下获得超导性，打破了 BCS 理论的禁锢，两人荣获 1987 年诺贝尔物理学奖。



图 2-9 瑞士物理学家贝德诺兹和米勒

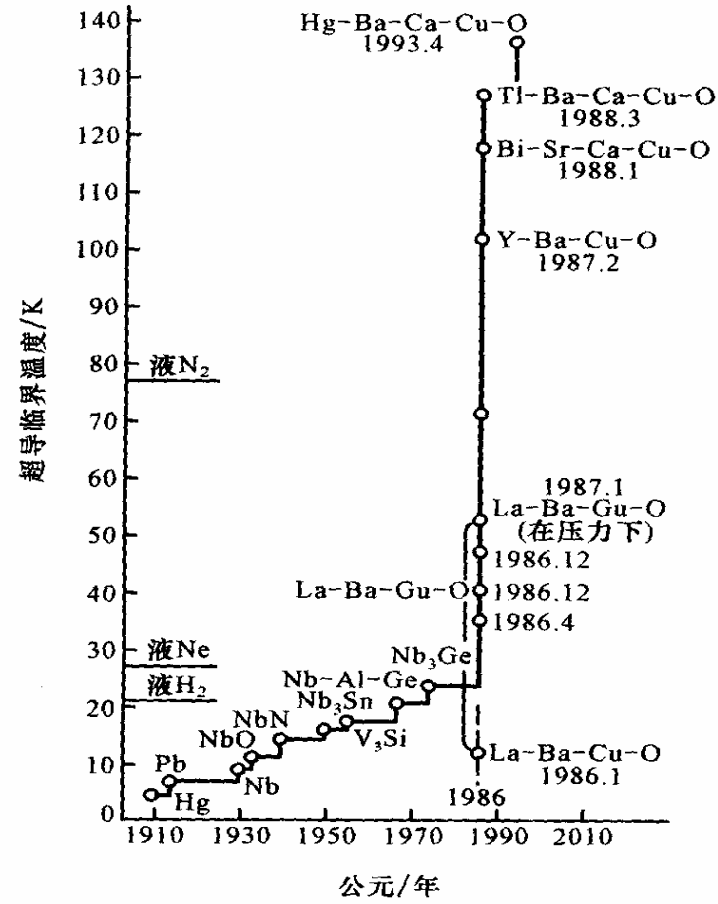


图 2-10 超导临界温度 T_c 提高的历史

1986年12月和1987年1月初，中国科学院物理所赵忠贤教授等宣布，Sr-La-Cu-O系统的 $T_C=48.6\text{ °K}$ ，Ba-La-Cu-o系统的 $T_C=46.3\text{ °K}$ ，1987年2月16日美联社报道美国朱经武教授等获得起始转变温度为 98 °K 的超导材料。1987年2月24日中国科学院物理所宣布，赵忠贤教授等已制成起始超导温度高于 100 °K ，中点转变温 92.8 °K ，零电阻温度为 78.5 °K 的超导材料 $\text{Ba}_x\text{Y}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$ 。1988年1月22日日本宣布Bi-Sr-ca-Cu-O超导材料的 T_C 约为 105 °K 。1988年3月美国宣布Tl-Ba-Ca-Cu-O超导材料的 T_C 为 125 °K 。1993年4月发现Hg-Ba-Ca-Cu-O超导材料的 T_C 为 134 °K 。图2-10表示了超导临界温度 T_C 提高的历史。

上述可以在液氮温区工作的高 T_C 超导材料的发现，为超导技术的实用开辟了广阔的前景，对科技和生产将产生深刻的影响，图2-11是日本正在开发的测试磁悬浮列车；图2-12欧洲CERN正在建造的世界最大的加速器LHC中的超导磁体。2002年9月上海磁悬浮列车首次试车成功，设计时速达 505 km/h ，总投资30亿元，将于2003年初试运行。

近些年来，高温超导的研究成了世界各国科学家的一个热门课题，主要包括三个方面：

- (1) 进一步寻找高临界参数的超导新材料；
- (2) 阐明高 T_C 氧化物超导体的物理机制；
- (3) 开发新超导体的技术应用，如研制高 T_C 的高温氧化物超导实用线材或带材，发展制备高质量超导薄膜的技术，利用高温氧化物超导材料制造各种电子元件和器件等。



图 2-11 日本的测试磁悬浮列车



图 2-12 欧洲 CERN 正在建造的世界最大的加速器 LHC 中的超导磁体

二、静电场中的导体—静电平衡

1. 处于静电平衡的导体的性质

(1) 处于静电平衡的导体的主要性质

- 导体中的自由电荷的分布保持恒定，即自由电荷分布不随时间变化；即：

$$\frac{\partial \rho(x, y, z)}{\partial t} \equiv 0$$

- 导体内电场强度处处为零，导体外的电场为静电场；即：

$$\vec{E}|_{\text{导体内}} \equiv 0$$

(2) 载流导体和静电平衡导体的区别

一旦导体中存在电荷运动即电流时，导体将脱离静电平衡状态。一般来说，随时间变化的电流有可能改变导体中自由电荷的分布，从而使电场随时间变化，这种情况比较复杂。

对不随时间变化的电流即稳恒电流，导体中电荷分布不会随时间变化，所产生的电场仍为静电场。当然，即使在稳恒情况下，载流导体和静电平衡导体也有着本质区别。静电平衡时，导体显示出彻底的“抗电性”，表现为导体内电场强度必须处处为零（图 2-13）。而载流导体则不同，导体内存在着非零的电场，它与电流之间的依赖关系满足一定的实验规律，该规律反映了导体的导电性质。另外，电流既是电荷的定向运动，它本身应满足电荷守恒定律；而静电场本身也具有特定的规律。

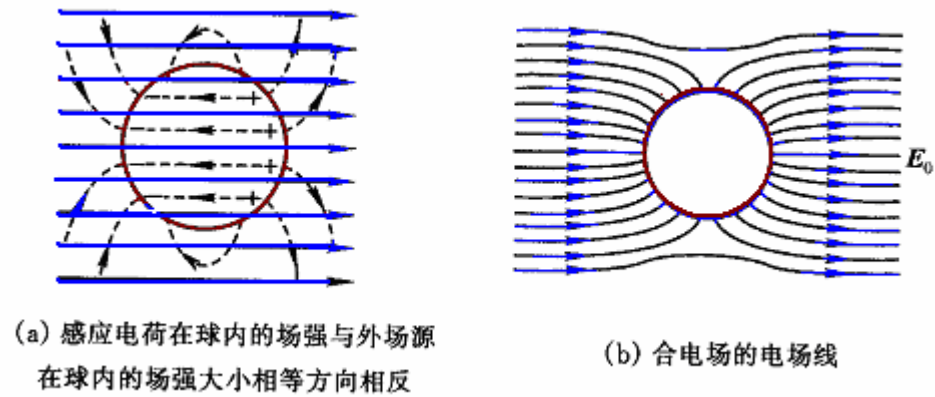


图 2-13 静电场中的导体球内部和周围的电场分布

2. 导体上的电荷分布

(1) 静电平衡时，电荷只分布在导体的表面，导体内部体电荷密度处处为零。

导体表面电荷的电荷层一般只有 1 至 2 个原子的厚度（如图 2-14 所示）。若初始时刻，导体内电荷不为零，则导体内的电荷将按指数衰减，在很短的时间内（约 10^{-14} 秒），导体达到静电平衡。

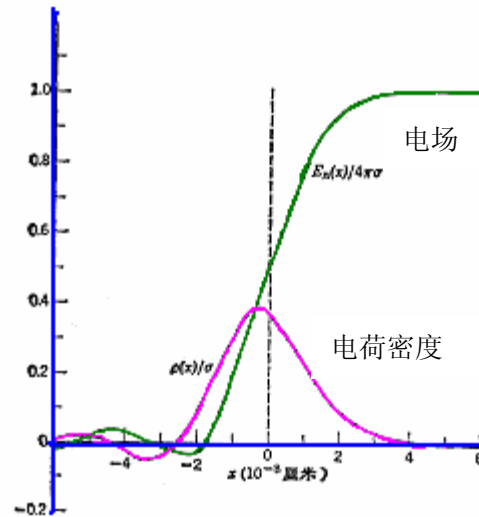


图 2-14 导体表面电荷分布和电场法线分量的分布，导体在 $x>0$ 区域，大部分电荷分布在 $\pm 2\text{A}$ 以内。

(2) 导体表面的电荷分布非常复杂。

导体表面的电荷分布与导体的几何形状、导体所带的总电量以及周围其它场源和导体有关。

孤立导体，表面电荷分布只与导体的形状有关：凸的地方，面电荷密度大，凹的地方，面电荷密度较小（图 2-15）。与内外表面的曲率有关，但并不存在唯一的函数关系。



图 2-15 面电荷密度分布示意图

20 世纪 50 年代，前苏联科学家朗道在《连续介质电动力学》中介绍了用正交曲线坐标系求解椭球导体表面电荷分布的例子，对椭球导体：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

得到其表面电荷分布为：

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi abc} \left(\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

对于一些表面具有简单几何形状的导体，可以找到面电荷密度与曲面曲率之间的函数关系。但一般情况下，面电荷密度与曲面曲率之间并不存在单一的函数关系。

(3) 导体外靠近其表面的地方的电场与表面垂直，其场强大小为 σ/ϵ_0 。

证明：反证法，假设在导体表面某处的电场与其表面不垂直，那末在那里的电场便有一平行于导体表面的分量，这将会引起导体表面电荷的横向运动，违背了导体达到静电平衡这一前提。所以静电平衡下的导体表面电场处处与表面垂直。

为求其场强大小，作图 2-16，在导体表面取面元 ΔS ，过它的周线作一柱面，使其侧面与导体表面垂直，两底面分别位于导体表面的两侧，取该柱面为高斯面，设面电荷密度为 σ 。由于导体内 \mathbf{E} 为零，高斯面处于导体内侧部分的电通量为零。至于高斯面的外侧部分，侧面的高 Δh 趋于 0，对通量没有贡献。于是，

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{内}} E \cdot ds + \int_{\text{外}} E \cdot ds + \int_{\text{侧}} E \cdot ds = E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\epsilon_0}$$

故

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

有空腔的导体，空腔内表面无电荷分布，导体腔内电场强度为零。

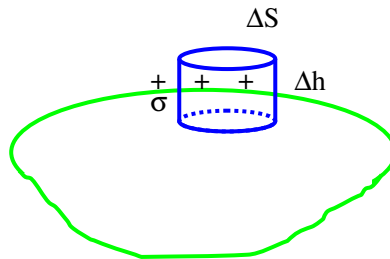


图 2-16 用高斯定律计算导体面电荷分布

3. 静电屏蔽

(1) 腔外不影响腔内

即空腔外的导体和场源不影响空腔内的物体，因为空腔内表面无电荷分布，导体腔内电场强度为零，如图 2-17，这就是静电屏蔽。

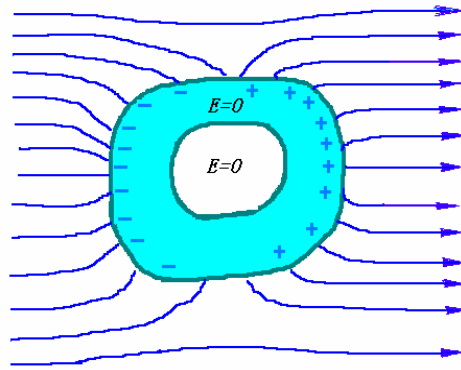


图 2-17 腔内无电荷

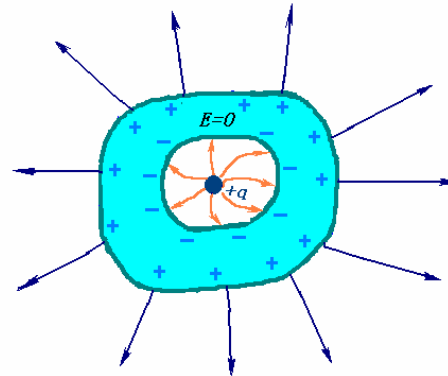


图 2-18 腔内有电荷

(2) 腔内却影响腔外

即空腔内有带电体时，由于静电感应，空腔内表面和外表面将会出现感应电荷，腔外的电场分布随之发生变化，如图 2-18。

(3) 对接地空腔，腔内腔外互不影响

将导体壳接地时，当腔内无电荷时，腔外电场不能影响腔内，当然腔外电场也不影响腔内。若腔内有电荷如图 2-19

所示，记空腔内区域为 A ，导体壳的外部区域为 B ，并设 B 区不存在其它带电体。考虑到 B 区远离导体壳的地方应和大地等电位，故不妨把大地看成是一个包围 B 区的导体壳。这样，大地、导体壳和接地导线一道又构成一个新的导体壳；对该导体壳而言， B 成为腔内， A 成为腔外部，见图 2-20。于是有： B 区的电场 $E=0$ ，它不受 A 区带电体的影响；换句话说，导体壳接地可以消除腔内（ A 区）带电体对腔外（ B 区）电场的影响。

一个有趣的例子是，为保证高压线带电检修工人的安全作业，工人全身穿戴金属丝网制成的衣、帽、手套和鞋子，即均压服。均压服相当一个导体壳，对人体起到电屏蔽作用，它大大减弱了高压线电场动人体的影响，保护作业工人不致受到伤害。

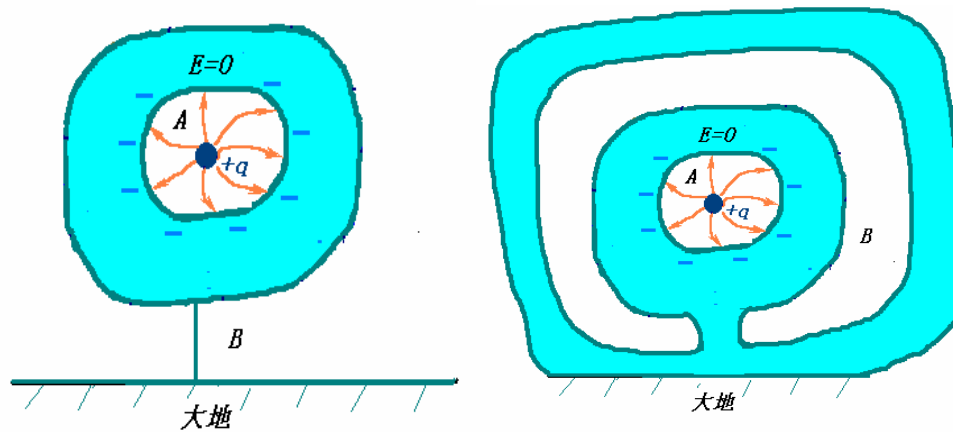


图 2-19 腔内有电荷，导体腔接地

图 2-20 等效图

三、导体在静电场中性质的应用

导体的以上的各种性质得到广泛的应用，如避雷针、场致发射显微镜、静电屏蔽、感应起电机等。

1. 避雷针

高层建筑物上的避雷针利用了导体尖锐部分表面曲率大， σ 大的性质。

因为导体表面电场 E 与 σ 成正比。 σ 大则 E 大，且垂直于导体表面，强大的电场使空气击穿，也就是空气中残留的自由电荷（电子或离子）被强电场加速，获得足够大的能量，当它们在激烈运动过程中撞上空气分子或某些原子时，就使其电子被打出来（电离），从而产生大量新的离子，空气便变得易于导电。

在雷雨时节，大块的云顶部带正电，而底部则有过剩的负电，于是在接近地面时，地面感应产生正电。云底部与地面距离 3 至 4km，其电荷大到足以使云与地面之间产生一个 20 或 30MV 甚至达到 100MV 的电势差。如果没有避雷针，地面与云间累积电荷产生的高电势差会把空气击穿，共产生大规模的放电，这就是雷击（图 2-21）。

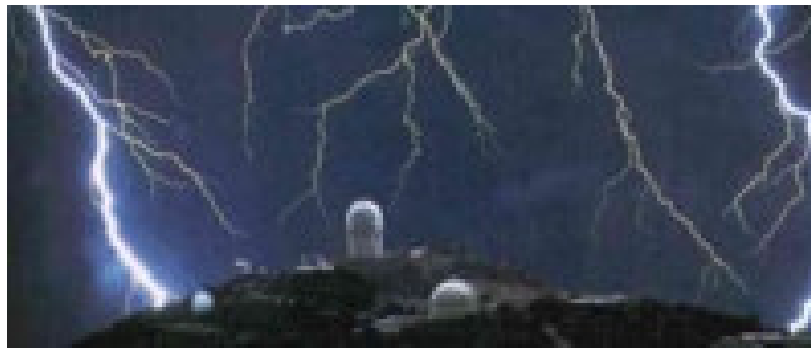


图 2-21 地面与云间产生大规模的放电，这就是雷击

如果装上避雷针，则避雷针尖端 σ 比其它地方大许多，便率先把周围空气击穿，使云与地面电荷不断中和，避免电荷累积和大规模的放电所带来的危害（如图 2-22）。

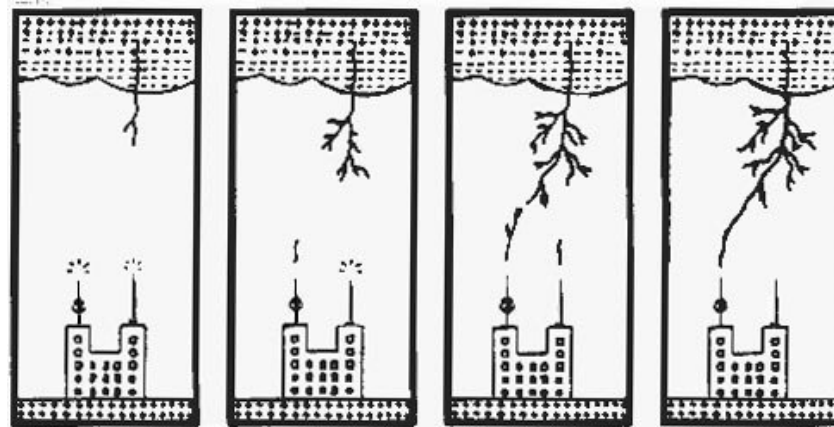


图 2-22 避雷针工作原理

2. 场致发射显微镜

场致发射显微镜也是依赖金属尖端上所产生的强电场，原理如图 2-23：中间一根细小的金属针，其尖端的直径约为 1000\AA ，被置于一个先抽成真空后充进少量氦气的玻璃泡中。泡内壁镀上一层十分薄的荧光质导电膜，在这荧光膜与金属针之间加上一个非常高的电压，当一个氦原子与针尖碰撞时，那里极强的电场会把氦原子中一个电子剥去，剩下带正电的氦离子。随即氦离子沿着场线跑至荧光壁，撞击荧光膜引起发光，与示波器、电视机显象管中的情况类似（其差别是显象管中是电子撞击荧光膜引起发光）。那些到达荧光膜某特定点上的氦离子，在很高的近似程度上，可以看作是发源于径向场线的另一端，这样，我们根据荧光膜的发光点的位置就可以推断出金属尖端的个别原子的位置。利用这一装置，把需要研究的金属作成针状样品放入这一设备中，便可获得荧光膜上斑点图样，进一步分析出待测样品的原子排列（图 2-24）。

用这种正离子场致发射显微镜，有可能获得高达二百万倍的放大率，比最好的电子显微镜的放大率还要高（如图 2-25）。

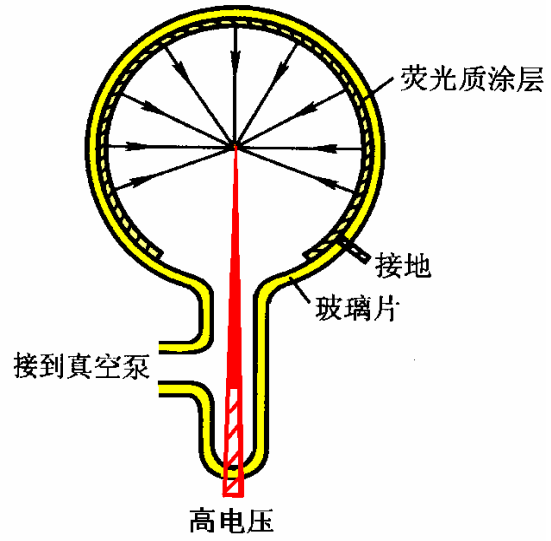


图 2-23 场离子显微镜原理



图 2-25 一台场致发射扫描式电子显微镜(分辨率 1.0nm,放大率 6.5×10^5)

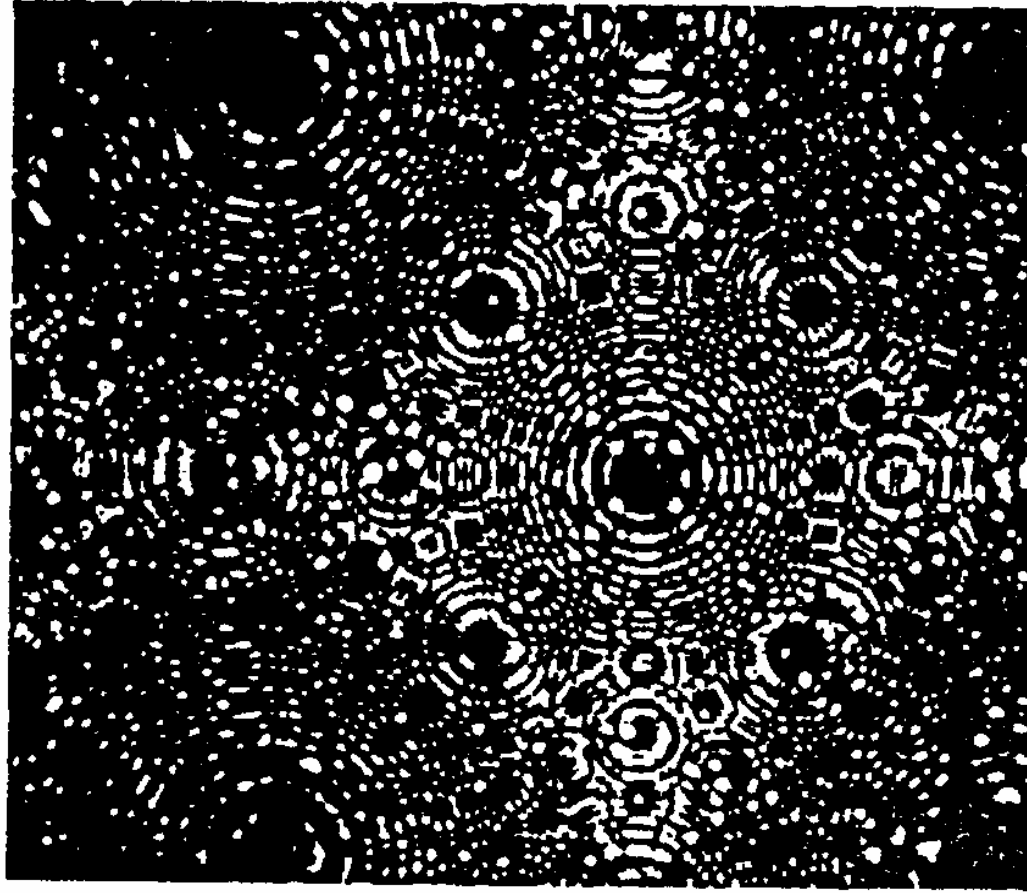


图 2-24 钨针尖的 FIM 图象

3. 范德格拉夫起电机

范德格拉夫 (Van der Graff) 起电机可用于加速带电粒子，原子核物理研究中用的静电加速器就是用范德格拉夫起电机制成的。起电机的结构示意图如图 2-26 所示，其中 A 为直径可达数米的空心导体球，放在绝缘圆柱 C 上。圆柱内有橡胶或丝织的传送带 B，它套在两个定滑轮 D 和 D' 上，依靠电动机带动，将按箭头方向运转。E 是金属针尖，接在几万伏的直流电源的正极上，通过尖端的电晕放电使传送带带正电。F 为另一针尖，与导体球壳相连。当传送带上的正电荷随带传送到针尖 F 附近时，通过尖端放电使金属球 A 带正电。这样随着传送带不停运转，A 球的电量越来越多，电势不断升高。但由于绝缘物的漏电，电势不可能无限升高，一般可达到 10^7 V 左右。在绝缘圆柱内，有一与传送带平行的真空管道通往空心导体球，如果把带电粒子注入管道，粒子在管道中被加速成高能粒子，然后通过管道引至进行实验的地方，目前在半导体工业中把小型范德格拉夫起电机用于离子注入技术。

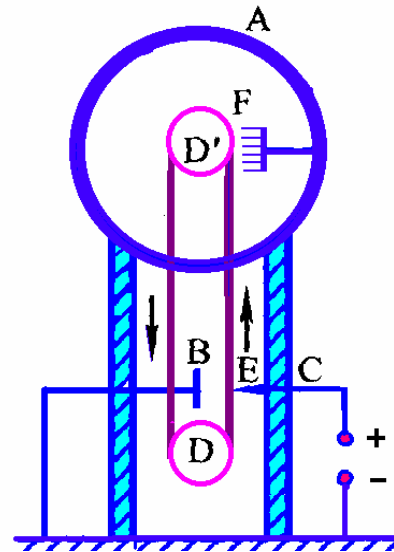


图 2-26 范德格拉夫起电机示意图



图 2-27 范德格拉夫起电机是科技馆中的经典展示项目