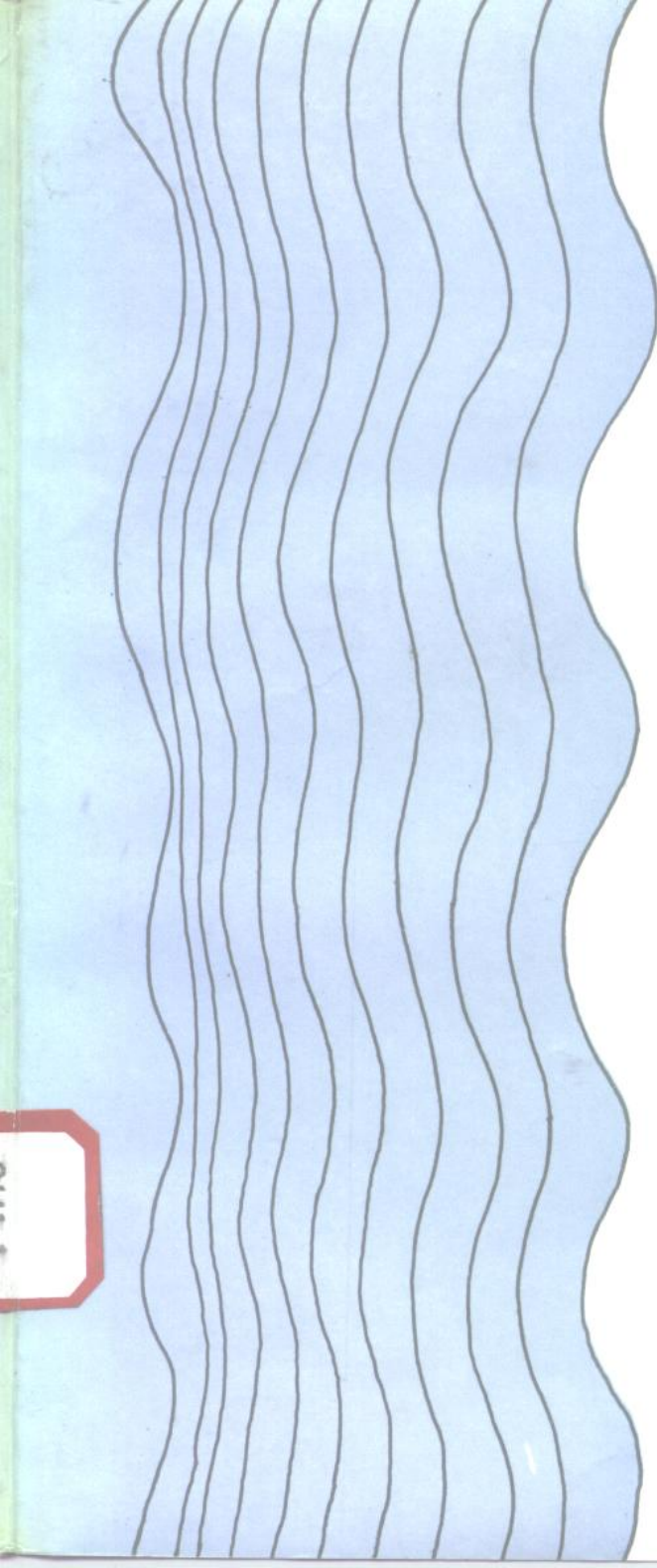


静电技术原理

鲍重光 编

北京理工大学出版社



静电技术原理

鲍重光 编

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

本书主要论述静电技术的物理基础及各种应用,重点介绍带电的基本过程、人工荷电以及静电引起的力学作用。对电除尘、电摄影、液体带电、EHD现象、驻极体及静电生物效应等进行了论述。该书内容详实,文字流畅,可读性强,反映了当代应用静电学的先进水平,是作者20多年从事静电技术研究与教学工作的结晶。

本书适用于应用物理、电工、机械、应用力学、精密仪器、物理生物等专业的本科生、研究生的教材,亦可作为从事静电技术科研工作的科技人员参考。

静 电 技 术 原 理

鲍 重 光 编

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

清华大学印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 12.125 印张 315 千字

1993 年 8 月第一版 1993 年 8 月第一次印刷

ISBN 7-81013-841-3/TN·45

印数: 1-1600 册

定价: 5.80 元

前 言

从摩擦带电现象的发现，直到今日能源、环境、生命等众多渗透着高技术领域的科学发展过程中，静电现象和静电技术的研究走过了数百年的历程，终于形成了一个与众多学科有着千丝万缕联系的、古老而又年轻的研究和技术应用体系。因而，静电技术原理进入理工科大学应用物理系的教学内容之中，乃是顺理成章之举。

对于应用物理系的学生来说，如何在所学的物理知识与诸多应用技术之间架起一座桥梁，以更加突出科学技术是第一生产力这一特点，无疑是十分重要的。而从另一个角度看，对于理科的学生来说，详细地论述各种技术工艺过程，也并非本课程的目的。况且，时至今日，静电技术的每一个分枝（电除尘、电摄影、粉体喷涂、生物工程等）都足以形成一个相对完整的体系。在有限的学时之中，要涉及到它的每一方面，显然是不现实的。基于以上两方面的考虑，决定了在学习本课程时，学生的主要精力应放在理解各种技术过程的物理基础，提高分析思考解决实际问题的能力方面。从这个意义上讲，这本教科书在内容上，尽量避免繁琐的数学推导及纯理论的叙述方法，重点放在发挥物理系学生的特长、扩宽思路、掌握实质内容的方面。

按照一般的观点，静电现象包括放电现象和力学现象两个方面，而从技术的角度去划分，又可以分为应用技术和防灾技术两大部门。根据教学计划的安排，《静电技术原理》课程是以力学现象为中心，阐述应用技术原理为目的的。有关放电的内容将由《气体放电物理》、有关防灾技术的内容将由《静电安全工学》、有关静电测量的内容将由《静电测量》的课程及实验去完成。这

些课程的有机组合,可望赋予学生对静电技术较全面系统的了解。

本书第一章至第三章以荷电和力学现象为中心,阐述了各种静电应用技术共通的物理基础。此后的第四章至第八章则分述了电除尘,电摄影,液体带电及 EHD 现象、驻极体以及静电生物效应的基本原理。在教学中,还涉及到臭氧的发生及应用、静电粉体喷涂、喷撒农药等诸多方面的内容,各部分均有相应的例题及习题。成书过程中,因篇幅有限,这些部分已全部删除。由授课教师视具体情况再作相应的增删。为了培养学生的自学能力,书末附有部分参考文献目录,以为进一步了解详细内容之用。

本书是在近年为应用物理系高年级学生及研究生讲授静电技术原理课程的基础上整理而成的。由于编者学识有限,加之本学科内容发展迅速,在短短数月内仓促成书,错误及不当之处在所难免,热情期望读者批评指正。

最后,谨向在平日教学及成书过程中给予指导和帮助的北京理工大学应用物理系静电研究室各位老师深表感谢。

编 者

1992.7

目 录

第一章 固体带电的基本过程	(1)
§1. 金属间的接触和分离	(1)
1.1 热激发	(5)
1.2 隧道效应	(6)
1.3 分离过程和最大电荷密度	(7)
§2. 金属与绝缘体的接触和分离	(8)
2.1 金属与绝缘体的接触	(8)
2.2 金属与绝缘体的分离过程	(15)
§3. 反复带电	(16)
3.1 带电量增加的机制	(16)
3.2 抑制带电量增加的效应	(24)
3.3 带电层的厚度	(27)
第二章 人工荷电	(30)
§1. 电晕荷电	(30)
1.1 场致荷电	(30)
1.2 扩散荷电	(42)
1.3 场致荷电与扩散荷电的比较	(47)
§2. 反电离现象	(49)
§3. 双极性荷电	(56)
3.1 场致荷电	(57)
3.2 扩散荷电	(61)
3.3 利用双极性离子探针探测荷电空间状态的测定	(61)
§4. 其它荷电方法	(67)
第三章 带电粒子引起的力学现象	(77)
§1. 静电力的分类及其特征	(77)
1.1 静电力的种类	(77)

1.2 静电力与其它种类力的比较·····	(83)
§2. 静电力引起的静力学现象·····	(85)
2.1 因库仑力产生的附着和凝聚·····	(86)
2.2 因电像力引起的附着·····	(88)
2.3 因梯度力引起的附着·····	(90)
2.4 因约翰孙-拉贝克力产生的附着和凝聚·····	(91)
2.5 粉尘层的静电附着和凝聚·····	(93)
2.6 珠串形成力产生的粒子凝聚·····	(95)
§3. 静电力引起的动力学现象·····	(96)
3.1 粒子在真空直流电场中的运动·····	(97)
3.2 粒子在交变均匀电场中的运动·····	(112)
3.3 交变四极场中带电粒子的运动·····	(117)
§4. 电帘对带电粒子行为的控制·····	(127)
4.1 电帘的基本原理·····	(127)
4.2 电帘的分类·····	(129)
4.3 电帘特性的初步解析·····	(130)
4.4 电帘的若干应用·····	(146)
第四章 电除尘的物理过程·····	(150)
§1. 电场和电流·····	(154)
§2. 粉尘的荷电·····	(164)
§3. 除尘效率·····	(179)
§4. 妨碍电除尘过程的现象·····	(187)
4.1 反电离现象·····	(187)
4.2 防止反电离的措施·····	(193)
4.3 再飞散现象·····	(202)
4.4 其它危害现象·····	(205)
第五章 电摄影·····	(207)
§1. 电摄影的基本过程·····	(207)
1.1 带电过程·····	(208)
1.2 主要子系统的简单模型·····	(213)
§2. 潜像的形成·····	(219)

2.1	感光体应具有的特性	(220)
2.2	光生载流子和电荷输送	(225)
§3.	显影	(237)
3.1	驱动力的特性	(242)
3.2	显影能力的基本方程	(251)
§4.	撒粉法和电泳显影	(253)
4.1	撒粉法	(253)
4.2	电泳显影法	(256)
§5.	磁刷显影	(260)
5.1	绝缘性磁刷显影 (IMB) 的模型	(261)
5.2	导电性磁刷显影 (CMB) 的模型	(269)
第六章	液体带电和 EHD 现象	(273)
§1.	液体的带电机理	(274)
1.1	液体的导电与弛豫	(274)
1.2	界面偶电层	(280)
1.3	界面动电现象	(284)
§2.	液滴的带电	(293)
2.1	自然带电	(294)
2.2	强制荷电	(296)
2.3	水滴除尘概要	(303)
§3.	电流体力学现象	(305)
3.1	介电液体内部的电场和力	(305)
3.2	EHD 现象	(312)
3.3	EHD 现象的应用	(322)
第七章	驻极体	(331)
§1.	驻极体现象	(331)
§2.	驻极体的热释电流 (TSC)	(341)
第八章	静电生物效应	(350)
§1.	植物细胞产生的电位	(350)
§2.	电场对植物的影响	(357)

§3. 细胞操作中的静电技术.....	(359)
3.1 细胞的操作及分离.....	(360)
3.2 静电诱导细胞融合及遗传基因的导入.....	(367)
参考文献	(375)

第一章 固体带电的基本过程

固体带电过程是考察静电现象的基础。对带电过程进行简单的复习，为以后各章的学习，无疑会起到承上启下的作用。

我们知道，固体绝缘体带电，有以下四种主要原因：①与其它物质的接触；②电荷的释放；③接收外来电荷；④物质内部电荷的位移以及偶极子取向和固定。我们体验得最普遍的摩擦带电，属于①的范畴，也是本章主要考虑的内容。其中，发现得最早的是接触带电现象，然而由于电介质性质的解析十分困难，以及物质表面现象的复杂性，对接触带电机理的阐明却较为迟缓。这里所指的接触带电，除了单纯的摩擦带电之外，还包括利用与表面接触的电极向物体注入电荷的过程。②指的是由物质表面释放出荷电粒子（电子发射等）时产生的带电现象。包括紫外线或短波长电磁辐射引起的光电子发射、强电场作用下的电子发射（场致发射）、高温下的热电子发射等。③指的是直接以电子束或离子束对粒子荷电的过程。因其带电易于控制，故在工业技术中得到广泛的应用。其中，尤以非均匀电场下的电晕荷电，成为静电应用技术中不可缺少的方法，也是第二章中论述的基本内容。以上三种带电过程，主要是表面带电的现象，而④则为体积带电现象，与前三者有根本的不同，称为驻极体，将在第七章中论及。

§1. 金属间的接触和分离

我们知道，当两个物体经历了接触和分离的过程之后，将会带上电荷。也就是说，当两个物体接触时，如果它们的电化学势

有差异，则以此为驱动力，因隧道效应或热激发，载流子将由一方物体向另一方移动，其结果，在表面处将形成偶电层，当偶电层的电位差正好补偿了原始电势差之差时，达到平衡状态。在分离过程中，偶电层的各个表面将随之分离，从而，两个面间的电位差增加，载流子将朝着电势恒定的方向再分布。这里所说的载流子，一般情况下应为电子（空穴）以及正、负离子。但由于离子仅在某些特定的条件下才存在，且难于考虑其隧道效应，故在固体的接触带电中，可以认为起主导作用的载流子为电子。

在金属内部，存在着许多自由电子。图 1-1 给出钠的孤立原子 (a) 以及钠晶体 (b) 中的电子能级。

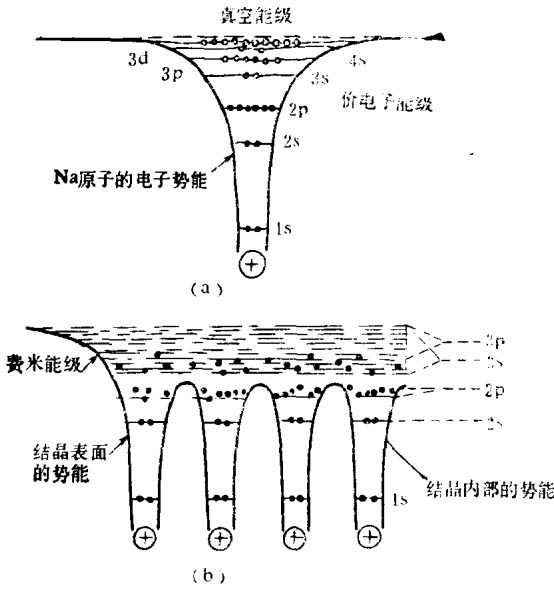


图 1-1 钠的电子能级

(a) 孤立的钠原子 (b) 钠晶体

图 1-1(a) 中，以真空能级作为势能的基准，“○”表示可能的电子状态，“●”表示电子。当原子形成晶体时，其势能受

到相邻原子的影响，形成如图 1-1(b) 那样的能带结构。自由电子在形成能带的 N 个能级当中，遵循泡里不相容原理而进行分布。在温度 T 时，电子占据能量为 E 的能级的几率 $f(E)$ ，可由费米分布函数

$$f(E) = \frac{1}{\{\exp[(E - \mu)/kT] + 1\}} \quad (1-1)$$

给出。这里， μ 为费米能级， k 为玻尔兹曼常数。

图 1-2 表示 $f(E)$ 和 E 的关系随温度变化的情况。

在绝对零度时，电子由下方逐个填满各个能级，直至费米能级为止，在 μ 以上处完全不存在电子。当温度上升时，占据 μ 以上能级的电子数目增加，相应地在 μ 以下的能级中产生空位，存在 μ 处的几率为 $1/2$ 。

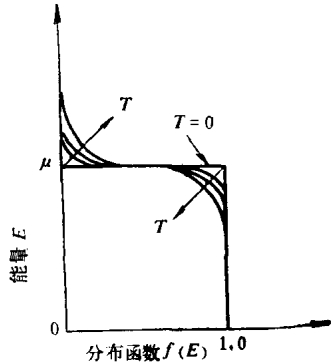


图 1-2 费米分布函数

图 1-3(a) 给出两种不同金属 M_1 和 M_2 的能带。这里， μ_1 和 μ_2 分别为 M_1 和 M_2 的费米能级，斜线表示到此为止有电子存在，它以上的能级略去未画出。金属种类的不同，可以由其费米能级的不同表征出来。它们与真空能级之能量差 W_1 和 W_2 ，分别表示各自金属的功函数。

由图 1-3(b) 看出，功函数的不同，是因金属的种类，即原子间距离、价电子数以及轨道的形状等决定的。从实验上，可以根据爱因斯坦光电效应的极限频率 ν_0 (严格地说，应在绝对零度下) 求出。若普朗克常数为 h ，则 $h\nu_0$ 为金属的功函数。

由图 1-3(b) 看出，功函数的不同，是因金属的种类，即原子间距离、价电子数以及轨道的形状等决定的。从实验上，可以根据爱因斯坦光电效应的极限频率 ν_0 (严格地说，应在绝对零度下) 求出。若普朗克常数为 h ，则 $h\nu_0$ 为金属的功函数。

在图 1-3 中， $-e\varphi(x)$ 为电子的静电势能。如图 1-3(a)，接触前的静电势为零。当两种金属如图 1-3(b) 那样接触时，电子由费米能级较高的 M_1 移向较低的 M_2 ，穿过界面发生电子的

移动, 由此产生的静电势补偿了费米能级的差, 直到双方的费米能级达到同一水平时, 电子停止移动而趋于平衡。其状态如图 1-3(c) 所示。

两种金属接触时, 移动的电子也遵循费米-狄拉克统计。同时, 电荷的分布应满足泊松方程

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1-2)$$

其中, $\varphi(x)$ 为电位, ρ 为体电荷密度, ϵ 为介电常数。该式意味着在有 ρ 的地方, 电位 φ 的曲率与 ρ 的大小成比例地变大。但实际上由于金属的自由电子数以及态密度极大, 仅需表面处极薄的一层就足以供给充分的电子进行

交换, 因而, 金属中电荷分布的厚度 (x 方向) 很薄, 可以认为电荷仅分布于相对的两个表面上。也就是说, 在间隔为 d 的两个表面上, 分别带有相等表面电荷密度 σ_1 及 σ_2 的正负电荷, 形成偶电层, d 大约在 1nm 左右。

根据图 1-3(c), 记偶电层的电位差为 V 时, 应有

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \frac{\epsilon_g}{d} V = \frac{\epsilon_g}{d} \frac{W_2 - W_1}{e} \quad (1-3)$$

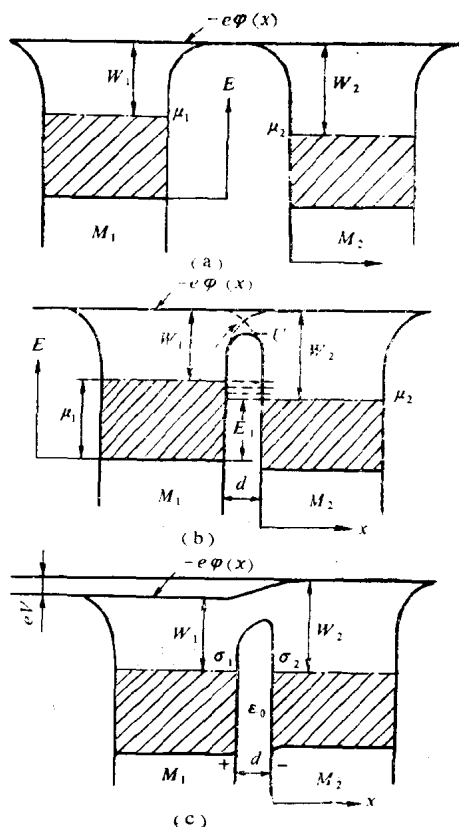


图 1-3 二种金属的接触平衡过程
(a) 接触前 (b) 接触后 (c) 平衡后

这里, ϵ_g 为间隙的介电常数。根据此式, 电子移动产生的偶电层的电位差, 其大小等于初始费米能级之差, 即功函数之差除以电子的电量。并且, 偶电层的电荷密度由偶电层的电位差和间隙的大小来决定。例如, 当金 (Au) 与铂 (Pt) 接触时, 实测得 $W_{\text{Au}} = 4.8[\text{eV}]$, $W_{\text{Pt}} = 5.3[\text{eV}]$, 假定间隙为 $10 \text{ \AA}$, $\epsilon_g \approx \epsilon_0 \approx 9 \times 10^{-12}[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$ 时, 偶电层的电位差为 $V = 0.5[\text{V}]$, 电荷密度 $\sigma = 4.5 \times 10^{-2}[\text{C} \cdot \text{m}^{-2}]$ 。

电子穿过接触面移动, 可以有两种途径。一是因热激发而越过势垒; 另一种是通过量子力学的隧道效应穿通势垒。

1.1 热激发 两金属表面接近时, 如图1-3(b) 那样, 其间的势垒高度 U 随间隙 d 的减小而降低。这时, 在金属内的自由电子当中, 满足条件

$$\frac{p_x^2}{2m} > U = \frac{p_{x0}^2}{2m} \quad (1-4)$$

的电子, 将可以越过势垒。其中 m 为电子的质量, p_x 为 x 方向的动量。这就是一种金属向另一种金属的热电子发射。设表面处的反射率为 R , 则此时的发射电流密度 i_1 为

$$i_1 = (1 - R) \frac{e}{m} \int_{p_{x0}}^{\infty} p_x n(p_x) dp_x \quad (1-5)$$

这里, $n(p_x)$ 为金属内具有动量 p_x 与 $p_x + dp_x$ 之间的电子数。利用固体物理中的近似计算可得

$$i_1 = (1 - R) \frac{4\pi e^2 m k^2}{h^3} \cdot T^2 \exp\left(-\frac{U - \mu}{kT}\right) \quad (1-6)$$

这里, $4\pi e^2 m k^2 / h^3 = A$, 称为热电子发射的 Dashmann 常数。表 1-1 给出温度 $T = 300^\circ\text{K}$ 下, 对各种 $U - \mu$ 计算得到的热发射电流密度 i_1 。这里取 $R = 0$ 。

表 1-1 热电子发射电流密度 $i(T=300^\circ\text{K})$

$U-\mu[\text{eV}]$	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
$i_1[\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}]$	2.0×10^5	3.7×10^3	2.3×10^{-2}	4.7×10^{-11}	2.0×10^{-28}	1.5×10^{-80}

(U 为势垒高度, μ 为费米能级)

1.2 隧道效应 根据量子力学的隧道效应, 在图 1-3(b) 中, M_1 中具有较 μ_2 高的能量的电子, 将可以穿越到 M_2 当中。这一情况在图中用虚线表出。对高度 U 、厚度 d 的方形势垒, 以能量 E 的电子撞击时, 其透射系数 $D(E)$ 为

$$D(E) = \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{h}\right)\sqrt{2m(U-E)}d\right] \quad (1-7)$$

$U-E=1.5\text{eV}$ 时, 对各种 d 计得的 D 如表 1-2 所示。

表 1-2 隧道效应的透射系数 ($U-E=15\text{eV}$)

$d(\text{\AA})$	1.0	2.0	5.0	10	20	50	100
D	2.9×10^{-1}	8.1×10^{-2}	1.9×10^{-3}	3.6×10^{-6}	1.3×10^{-11}	5.6×10^{-28}	3.2×10^{-55}

(U 为势垒高度, E 为电子能量, d 为势能壁的厚度)

两种金属接触的瞬间, 因隧道效应由 M_1 流向 M_2 的电流密度为

$$i_2 = (1-R) \frac{e}{m} \int_0^\infty p_x D_{12}(p_x) n_1(p_x) g_2(p_x) dp_x \quad (1-8)$$

这里, $D_{12}(p_x)$ 、 $n_1(p_x)$ 以及 $g_2(p_x)$ 分别为在 p_x 与 p_x+dp_x 之间, 电子由 M_1 移向 M_2 的透射系数、 M_1 中的电子数以及 M_2 中空着的电子状态数, R 为势垒处电子波的反射率。

用适当的近似计算^[1], 可以得到

$$i_2 = (1-R) \left[e(U-\mu_1) / 2\pi d^2 h \right] \times \exp\left[\left(-\frac{4\pi}{h}\right)\sqrt{2m(U-\mu_1)}\cdot d\right] \quad (1-9)$$

设 $R = 0$, $U - \mu_1 = 1[\text{eV}]$, $d = 10[\text{\AA}]$, 可以计算出 $i_2 \approx 2.2 \times 10^4 [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$ 。与表 1-1 的 $U - \mu = 1[\text{eV}]$ 时的 i_1 相比要大得多。因此, 在接触过程中, 电子的移动几乎都是由隧道效应引起的。Harper^[2] 认为, 隧道效应的有效范围大约在 1.25nm 左右。作为一个例子, 设接触电位差为 $1[\text{V}]$, 按 (1-3) 式, σ 的值为 $7.08 \times 10^{-3} [\text{C}/\text{m}^2]$ 。

1.3 分离过程和最大电荷密度 当两种物体分离时, 偶电层中的正负电荷层将随着物体移动。这时, 如果各层的电荷能够原封不动地保持住, 则随着偶电层厚度的增大, 其电位差将变大。当充分离开时, 可以观测到相当高的电位。但实际上在分离时, 偶电层的电荷将会或多或少地中和或逸散, 剩下的部分才是其真实带电量。这种中和或逸散在分离过程当中以及分离之后均会发生, 形成通过接触界面的电荷倒流 (中和) 以及在物体中电荷的再分布 (逸散)。一般而言, 该过程是朝着达成新的平衡状态、即到处的电势相同的方向进行。

我们先来考虑电荷倒流引起的中和。接触的两种金属开始分离时, 相对着的表面间隙 d 增大。按照 (1-3) 式, 若表面电荷密度 σ 恒定, 则电位差 V 变大。但如果 d 尚未达到隧道效应的有效范围时, 电位差将维持恒定, 以尽量按照平衡条件而使两种金属的费米能级变为同一水平。这样一来, σ 势必减少。从而, 电子将向相反方向移动。当接触的两个面为平面, 而且微观上亦平坦时, 若两个面保持平行地分离, 则 σ 与 d 成反比例减少。若使金属孤立或绝缘, 则当倒流终了时, 电位将开始上升。

其次来讨论因导电引起电荷的再分布。当金属的某个部分带上电荷时, 电位将相应地上升。而在下一瞬间, 金属的各处又将恢复等电位。与之相应, 电荷在表面上再分布。

设金属中自由电子的浓度为 n , 电子电荷为 $-e$, 金属上的体电荷密度为 $e\Delta n$, 电流密度为 i 时, 按照连续方程有

$$e \left(\frac{\partial \Delta n}{\partial t} \right) = -\text{div } i \quad (1-10)$$

此外，在一般情况下，电流密度可表示为

$$\mathbf{i} = (n + \Delta n)e u \mathbf{E} - e D \text{grad} \Delta n \quad (1-11)$$

这里， u 为迁移率， $\mathbf{E}$ 为电场强度， D 为扩散系数。式中第一项表示传导电流，第二项表示扩散电流。对金属有 $n \gg \Delta n$ ，故

$$\mathbf{i} = n e u \mathbf{E} = \kappa \mathbf{E} \quad (1-12)$$

的欧姆定律成立。其中 κ 为电导率。

设介电常数为 ϵ ，则有

$$\epsilon \text{div} \mathbf{E} = e \Delta n \quad (1-13)$$

故 (1-10) 式变为

$$e \left(\frac{\partial \Delta n}{\partial t} \right) = - \left(\frac{\kappa}{\epsilon} \right) e \Delta n \quad (1-14)$$

$$\therefore \Delta n = \Delta n_0 \exp[- (\kappa/\epsilon) t] \quad (1-15)$$

这里， Δn_0 为最初给予金属的载流子（电子）数。 ϵ/κ 称为弛豫时间，表示在时刻 $t = \epsilon/\kappa$ 时， Δn 变为 Δn_0 的 $1/2.72$ 。金属的弛豫时间在 10^{-17} 秒左右。 κ 越大，即初始的载流子数越多，电荷再分布过程终结得越快。

实际的接触面，从微观上看，总是或多或少地存在着凹凸的部分。从而，面上的各点将不会同时发生分离，已经分离的部分产生的电荷，又将流向尚处于接触状态的部分，从而形成倒流。一句话，金属的高电导率促进了倒流。这就是当金属相互接触时，尽管其偶电层电荷密度极大，但是其带电却极少的理由。

§2. 金属与绝缘体的接触和分离

2.1 金属与绝缘体的接触 对于绝缘体，以 KCl 与 Cr 的接触为例，按照上节的考虑进行计算时，KCl 应当带负电，在 $10^{30}[\text{m}]$ 的厚度上分布着 $10^{-28}[\text{电子}/\text{cm}^2]$ 左右的电荷。事实上，这相当于完全不带电。然而在实验中发现，KCl 与预期相反，可以得到 $10^{-9}[\text{C}/\text{cm}^2]$ 左右的正电荷。实验与计算之间的