

上海市大学教材

物理学

第二册

上海人民出版社

上海市大学教材

物 理 学

(理 科 用)

第 二 册

《物理学》编写组

上海人民出版社

上海市大学教材

物 理 学

(理 科 用)

第 二 册

《物理学》编写组

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 408,000

1976年11月第1版 1976年11月第1次印刷

统一书号: 13171·182 定价: 1.15 元

毛主席语录

千万不要忘记阶级和阶级斗争。

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

目 录

第四章 电流和电场 1

第一节 电流 1

一、电荷 电荷守恒定律 1

二、金属中的电流和真空中的电子流 3

三、气体和液体中的电流 5

四、导体、绝缘体和半导体 7

五、电流强度和电流密度 8

第二节 伏-安特性曲线 10

一、线性和非线性元件 11

二、电阻和电阻率 12

第三节 电场 15

一、电场 15

二、电场强度 场的迭加原理 17

三、电力线 19

四、电场中带电粒子的运动 21

第四节 电势 26

一、电压与电场强度的关系 26

二、电压与电势 28

三、非均匀电场中的电势 29

四、等势面 34

五、静电场力作功的特点 电势能 35

习 题 38

第五章 直流电路 41

第一节 电阻的串联和并联 41

一、电阻的串联 41

二、电阻的并联 45

第二节 万用电表电路的分析 49

一、并联电路的分流作用 万用电表

电流档的分析 49

二、串联电路的分压作用 万用电表电压

档的分析 54

第三节 电动势 全电路欧姆定律 59

一、电源和非静电力 59

二、电源中的能量转化和电动势 62

三、全电路欧姆定律 63

四、电源的端电压 65

五、电源的输出功率 66

第四节 万用电表的电阻档 67

一、万用电表测量电阻的原理 67

二、调零电路与电阻档的计算 69

第五节 多回路电路 基尔霍夫定律 71

一、单回路电路与多回路电路 71

二、基尔霍夫定律 72

三、用基尔霍夫定律解多回路电路问题 75

第六节 直流电桥和电位差计 79

一、直流电桥 79

二、电位差计 82

习 题 85

第六章 静电场中的导体和电介质 89

第一节 导体的电容 89

一、导体的静电平衡与静电屏蔽 89

二、导体的电容 90

三、电容器 91

四、部分电容 92

第二节 电容器 93

一、实用电容器简介 93

二、平行板电容器的电容 94

三、介质在电容器中的作用 97

四、电介质的极化和击穿 98

五、电容器的串并联 102

第三节 球形电容器和柱形电容器 106

一、电通量 高斯定理 107

二、球形和柱形电容器的电容 110

三、球形和柱形电容器中的介质 114

四、电晕 117

五、静电加速器 118

第四节 电容器储能	119	三、磁阻 磁路欧姆定律	170
一、电容器的充放电	119	四、磁屏蔽	173
二、电容器储存的电能量	123	习 题	173
习 题	125		
 第七章 磁场	127	 第八章 电磁感应	177
第一节 磁现象和磁场	127	第一节 电磁感应现象 楞次定律	177
一、简单磁现象	127	一、发电机中的电磁感应现象	177
二、电流的磁效应	129	二、变压器中的电磁感应现象	178
三、磁场	130	三、楞次定律	181
四、磁感应强度与磁感应线	131	第二节 电磁感应定律	182
第二节 磁场对运动电荷的作用——洛伦兹力	132	一、电磁感应定律	182
一、洛伦兹力的方向	132	二、动生电动势	184
二、洛伦兹力的大小	134	三、感生电动势	188
三、磁感应强度 B 的物理意义	135	第三节 正弦交流电的产生	190
第三节 带电粒子在磁场中的运动	137	第四节 变压器	193
一、霍尔效应	137	一、变压	193
二、电荷的圆周运动	139	二、变流	194
三、回旋加速器	141	三、变阻	195
四、磁偏转	142	四、变压器的用途	196
第四节 磁场对电流的作用	144	五、电源变压器中线圈匝数的确定	197
一、磁场对直线电流的作用	144	六、高频高压变压器	199
二、磁场对回路电流的作用	146	第五节 电磁感应现象的应用	199
三、磁电式仪表的灵敏度	148	一、感应加热	199
第五节 电流周围的磁场	149	二、电磁阻尼	201
一、通电长直导线周围的磁场	149	三、电磁驱动	202
二、安培定律	151	四、电子感应加速器	203
三、通电螺线管的磁场	152	第六节 自感应和互感应	204
四、磁感应通量	155	一、自感现象和自感系数	204
五、磁场中的高斯定律	156	二、线圈的自感系数	205
第六节 磁性物质及其磁化	157	三、两线式传输线的自感系数	206
一、磁性物质 磁畴	157	四、互感现象和互感系数	208
二、磁导率 磁场强度	159	第七节 RL 电路的暂态过程 磁场能量	210
三、磁化曲线 ($B \sim H$ 曲线)	161	一、 RL 电路的暂态过程	210
四、磁滞回线	162	二、磁场能量	215
五、磁性材料	163	第八节 变化的电场产生磁场 电磁场	218
六、居里点	166	一、变化的电场产生磁场	218
第七节 磁性物质存在时的安培定律 简 单磁路	167	二、电磁场	220
一、磁性物质存在时的安培定律	167	习 题	222
二、简单磁路	168		
		 第九章 交流电路	225
		第一节 交流电的特征	225
		一、频率和周期	226

二、峰值、有效值和平均值	226	第七节 三相交流电	269
三、位相	229	一、三相交流电的产生	269
第二节 交流电路中的电阻、电感和电容	231	二、三相电源绕组的连接法	269
一、交流电路中的电阻	231	三、三相负载的连接法	272
二、交流电路中的电感	232	四、三相电功率	274
三、交流电路中的电容	234	第八节 异步电动机	276
第三节 电路元件的串联	237	一、异步电动机的构造	276
一、电阻和电感的串联电路	237	二、异步电动机的工作原理	278
二、电阻和电容的串联电路	240	三、异步电动机的使用常识	281
三、 $R-L-C$ 串联电路和串联谐振	242	习 题	283
第四节 复阻抗 交流欧姆定律	246		
一、复数的形式和运算	246	附 录	286
二、交流电的复数表示法	249	一、电磁量的单位制	286
三、复阻抗 交流欧姆定律	250	二、小型变压器的简单设计	289
第五节 交流电的功率	253		
第六节 交流电桥	264		

第四章 电流和电场

电磁运动是物质的一种基本的运动形式,电磁学就是研究物质电磁运动规律的一门学科。在工农业生产中,从动力、照明直至通讯、计量等几乎各个领域都离不开电和磁。此外,电磁学又是一系列重要学科的基础,如电工学、无线电电子学、自动控制和物质结构等都是在电磁学的基础上建立和发展起来的。所以,在生产斗争和科学实验里电磁学占有相当重要的地位。从这一章起我们开始介绍电磁运动的一些基本规律及其在生产和科研中的某些应用。

电和磁之间有着密切的联系,它们是一个统一体的两个侧面。然而,在一定的条件下,根据具体问题的需要,可以分别考察电或磁。所以,在以后几章中我们将先讨论电现象,然后再讨论磁现象以及电和磁之间的相互联系,最后再介绍统一的电磁运动规律。

第一节 电 流

在工农业生产和日常生活中,我们常常会遇到电流。譬如,点亮着的电灯的灯丝里有电流;运转着的电动机的线圈里有电流;输送电能的高压输电线中有很大的电流;各种工作着的电子仪器(如示波器、计算机、收音机等)的电子元件里也有电流。电流是电的一种非常普遍的存在形式。

简单地讲电流就是电荷的流动,它是大量电荷沿一定的方向作宏观运动的结果。在具体研究电流之前,让我们先来简单地介绍一下电荷的概念。

一、电荷 电荷守恒定律

人们对于电的认识,最初来自摩擦起电。在生产劳动的过程中,人们发现经过摩擦的物体能够吸引轻微小物。大家就称处于这种特殊状态的物体为带电体,有时也说物体带上了电荷,简称带电。如果把丝绸摩擦过的一根玻璃棒悬挂起来,再将另一根同样被丝绸摩擦过的玻璃棒去靠近它的一端(如图4-1所示),就能发现两根玻璃棒会相互排斥;如果用一根毛皮摩擦过的硬橡胶棒去接近该悬挂着的玻璃棒,那末两者将相互吸引;但如果将两根被毛皮摩擦过的橡胶棒靠近,则它们之间又会相互排斥。这说明用丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷与用毛皮摩擦过的硬橡胶棒上所带的电荷是两种性质不同的电荷。大量类似的实验证明在自然界里只存在着两种不同性质的电荷,并且同性电荷相斥,异性电荷相吸。通常我们把其中的一种电荷称为正电荷,而把另一种电荷称为负电荷。历史上规定:在室温条件下,光滑的玻璃棒被丝绸摩擦后所带电荷为正电,又称阳电;而把另一种性质不同的电荷,例如

被毛皮摩擦过的硬橡胶棒上所带的电荷称为负电或阴电。

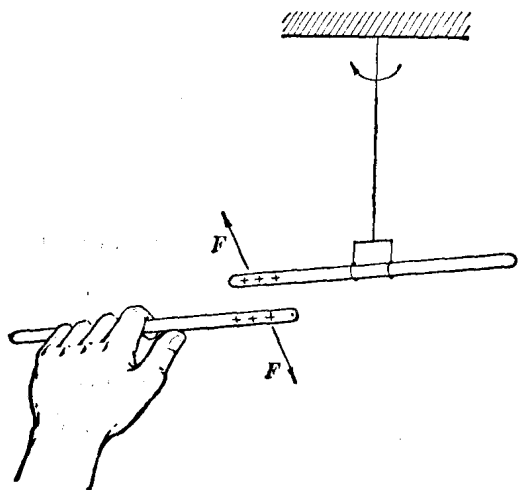


图 4-1 带电玻璃棒之间的相互排斥

摩擦起电现象是非常普遍的，在工业生产中经常会遇到。例如在化学纤维的纺织过程中，当纤维与机件相互摩擦时，纤维就会带电。带电纤维间的相互排斥使纤维容易梳断，因此化学纤维必须加进防静电剂，以消除摩擦起电现象。在生产纸张、塑料薄膜、感光胶卷时，也会因高速拖动薄膜造成的摩擦起电而影响生产。

当带有等量异号电荷的物体相遇时，物体上的正负电荷会相互吸引在一起，这样从总体看来物体就变得不带电，或者说呈电中性。这种现象通常称为中和。正负电荷中和

时往往会产生火花，甚至有“劈啪”声。这种火花放电常常是有害的。例如在通过管道输送干燥的糖、面粉等粉末状物质时，可能会由于摩擦产生的正负电荷的中和而引起爆炸。飞机和直升飞机的螺旋桨，由于在转动时与空气的剧烈摩擦而带上电荷，这些电荷在中和放电时往往会影响飞机的控制和通讯系统。不仅固体有摩擦起电现象，当液体与输送管道和容器发生摩擦或者液体分裂成小液珠时，同样有可能带上电荷。运输汽油的汽车在开动时都有铁链拖在地上，这就是为了让晃动着的汽油所带的电荷可以泄放到大地上去，不致积累起来引起火花放电而使汽油燃烧。很多有机试剂，如苯，在分装过程中所用的器具（如漏斗等）都必须很好地接地，目的也是为了避免因摩擦引起火花放电而造成事故。总之，摩擦起电和随之而来的火花放电是生产中常见的现象，应该给以相当的重视。

“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”为了解释物体的带电现象，这就需要分析物质的内部结构。

物质是无限可分的，一切宏观物体都是由分子组成的，分子是由原子组成的。原子是由一个带正电的原子核和围绕着原子核运动的带负电的电子所组成。原子核还可再分，原子核主要是由带正电的质子和不带电的中子组成。电子所带负电的电量和质子所带正电的电量相同，通常记为 e 。根据实验测定：

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑}^*。$$

在通常情况下，原子中电子的数目和质子的数目相等，原子作为一个整体表现为电中性，因此整个物体也就表现为不带电。当两个物体相互摩擦时，其中一个物体可能失去一些电子而给了另一个物体，或者从另一个物体获得了一些电子（例如，用丝绸摩擦玻璃棒时，一般情况下玻璃棒会给丝绸一些电子），这就破坏了两个物体原来的电中性状态。失去电子的物体，其正电荷总数多于负电荷，呈现出带正电；获得电子的物体，正好相反，其负电荷多于正电荷，从而表现为带负电。所以，从物质内部的电结构来看，无论用摩擦起电还是用其他

* 这里的“库仑”是电量的单位，将在下面介绍。

方法来使物体带电,都不过使物体中原有的正负电荷发生分离,并重新进行分布。

物体的带电来源于物体中电子数的增减,一个物体失去一些电子,必有其他物体获得这些电子。因此,一个孤立体系的电荷总量必定保持不变,这就是电荷守恒定律。它是自然界中基本的守恒定律之一。

二、金属中的电流和真空中的电子流

“运动是物质的存在方式”(《反杜林论》),“除了运动的物质以外,世界上什么也没有”。带电体上的电荷,具体地讲就是电子、质子等带电粒子,都在不断地运动着,在一定的条件下,它们会沿着一定的方向作宏观的迁移运动,这就形成了电流。下面我们具体介绍几种电流。

各种输电线,电动机中的线圈绕组,电子仪器中的联结导线都是用铜、铝、银等金属制成的,这些金属导线中的电流是我们最常见的电流。

在金属原子中,最外层的电子受到原子核的束缚比较弱,当这些原子组成金属导体时,最外层的电子由于受其他原子的影响,故不再束缚在某个原子核周围运动,而是在整块金属中“自由”地运动着。这些电子就是金属导体中的自由电子。以常见的金属铜为例,假定每个铜原子在组成导体时,最外层有一个电子成为自由电子,则在一立方厘米的金属铜里,大约就有 10^{23} 个自由电子。所以,金属中自由电子的数目是非常可观的。在一定的温度下,这些自由电子在金属导体内作不规则的热运动,它们的速率有大有小,这与装在一个钢瓶里的大量气体分子的运动十分相似。因此人们常把金属中的大量自由电子称为“电子气”。在室温时,金属中自由电子的平均热运动速率约为 10^5 米/秒。

金属导体中的自由电子的杂乱热运动并不引起电荷沿某一方向的迁移,所以也不引起电流。但当把金属导体接到电源上时,在导体两端就有一定的电压,外加电压使金属中的自由电子在原来杂乱的热运动上迭加了一个沿着导线从电源负极向正极的定向运动。这种定向运动通常称为漂移运动。金属导线中的电流正是导线中的自由电子在外加电压的作用下作漂移运动的结果。通常将正电荷运动的方向规定为电流的方向。在金属导线中,既然电流是带负电的自由电子定向运动的结果,因此其电流的方向正好与自由电子的漂移运动方向相反。

下面,我们介绍另一种常见的电流——真空中的电子流。它是由灼热的金属或金属氧化物的表面发射出来的电子在真空中作漂移运动而形成的。很多电子器件,如电子管、示波管、电视显象管等都是利用真空中的电子流工作的,这种器件称为电真空器件(图 4-2)。此外,电子显微镜、电子束加工等也都要用到真空中的电子流。现在我们以示波管为例简单地讨论一下这种特殊的电流。

图 4-3 为示波管的结构示意图。在一个抽成真空的管状玻璃泡中装有一系列金属制的电极。管的一端是阴极 K ,它的外形是一个圆筒,中间有加热用的灯丝 F 。阴极顶端涂有能发射电子的金属氧化物,通常是氧化钡 BaO 、氧化锶 SrO 、氧化钙 CaO 的混合物。阴极外面套有中间开有小孔的圆筒状的电极,称为栅极 M 。阴极受热后发射的电子就从栅极小

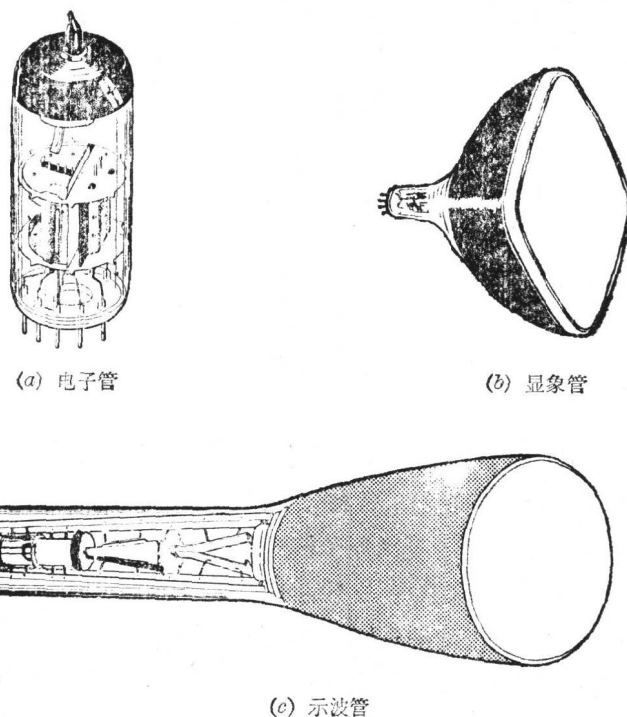


图 4-2 电真空器件

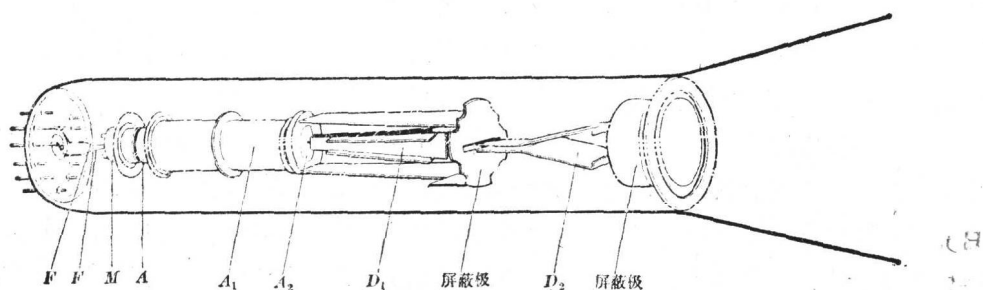


图 4-3 阴极射线示波管的结构示意图

F —灯丝, M —调制栅(阴极 K 在它里面), A —加速极, A_1 —第一阳极, A_2 —第二阳极,
 D_1 —水平偏转板, D_2 —垂直偏转板

孔中出来。相对于阴极来说, 栅极上加的是负电压。改变栅极和阴极间的负电压可以调节通过栅极小孔的电子数, 所以通常又称它为“调制栅”。调制栅的后面是加速极 A , 它是一个和栅极形状相似的圆筒。加速极后面是半径略大的圆柱面状的电极, 称为第一阳极 A_1 。第一阳极后面还有一个半径略小的圆筒状电极, 称为第二阳极 A_2 。相对于阴极来说, 加速极、第一阳极和第二阳极上加的都是正电压。调节这些极上的电压就可使从栅极小孔出来的电子加速, 并会聚到管轴附近形成很细的一束电子流, 打到管子右端的荧光屏上。这个过程称为电子束的加速和聚焦(其原理将在以后介绍)。上述五个电极通常用镍或无磁性不锈钢制成, 并由四根玻璃棒同轴地固定在一起构成一个“电子枪”, 它专门发射射向荧光屏的电子束。

荧光屏是一块涂有荧光物质的玻璃屏,当电子打上去时,就会发光。采用不同的荧光物质可以发出不同颜色的光,例如用钨酸钙(CaWO_4)可发蓝光,用锰激活的硅酸锌($\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$)可发绿光等。当经过聚焦的电子束射到荧光屏上时,就在屏上打出一个很小的亮点。在电子枪和荧光屏之间有两组平板,相互垂直地安置着,分别称为水平和垂直偏转板。从电子枪出来的电子束在到达荧光屏之前要穿过这两组偏转板。改变加在偏转板上的电压可以使电子的运动方向发生相应的变化,从而改变荧光屏上亮点的位置。因此从屏上亮点的运动轨迹可以看出加在偏转板上电压的变化情况。

从屏上反回出来的电子,则通过管壁上的石墨层汇集到第二阳极而流出管外*,和示波管外边的供电电路构成闭合回路,示波管中的电子流就成为整个回路电流的一个组成部分。

阴极在常温下并不发射电子,这是由于阴极中的电子从阴极表面脱出时,必须克服表面上的晶格原子的束缚而作功,这个功通常称为脱出功。因此,只有动能大于脱出功的电子才能克服晶格原子的束缚从阴极中逸出。当灯丝不通电,即未给阴极加热时,由于阴极的温度较低,阴极中电子的热运动不很剧烈,电子的平均动能比较小。动能很大以致可以逸出阴极表面的电子为数极少。这时,即使在各个电极上加上工作电压,由于管内没有可以作漂移运动的电荷,所以管中仍然没有电流。当灯丝通电发热,阴极的温度升高时,阴极中电子的热运动加剧,动能大于脱出功的电子增多,这时就有较多的电子可以逸出阴极表面。当温度足够高时(一般在 1000 K 以上),阴极就显著地发射电子,这种现象称为热电子发射。与金属导体相比,示波管中阴极发射的电子相当于金属导体中的自由电子,这些电子在外加电压的作用下沿管轴作定向运动(从阴极向荧光屏)就形成了示波管中的电流。

三、气体和液体中的电流

不仅金属等固态物质能够导电,在一定条件下气体也可以导电。常见的气体放电灯,如日光灯、霓虹灯、高压汞灯、氙灯(小太阳)等的灯管中都充有一定量的气体,当灯管两端加上一定电压时就有电流流过灯管中的气体,并使气体发光。下面我们来分析气体的导电过程。

在通常情况下气体的分子是电中性的,但在地面放射性元素的辐照以及紫外线和宇宙射线等的作用下,或多或少总有一些气体分子或原子被电离,即原来是电中性的气体分子或原子分离为一个电子和一个带正电的基团(称为正离子)。此外,在有些灯管内,通电的灯丝也会发射电子。当在灯管两端的电极间加上一定的电压时,外加电压迫使这些电子和正离子各向阳极和阴极运动,不过此时灯管内的正离子和电子为数甚少,故所形成的电流十分微弱,在通常情况下可以忽略不计。但是,若灯管中的气体相当稀薄,灯管两端电极上加的电压又足够高,那末电子在向阳极运动的过程中可以获得很大的动能,当这些电子和中性气体分子相碰时,可以使中性分子电离,即所谓碰撞电离(图 4-4)。同时,在正离子向阴极运动时,由于以很大速度撞到阴极上,还可能从阴极表面上打出电子来,这种现象称为二次电子发射。碰撞电离和二次电子发射使气体中出现了大量的电子和正离子。在外加电压作用下

* 为了提高示波管的灵敏度,石墨层有时不与第二阳极相联而加上比第二阳极更高的电压成为第三阳极,这就是“偏转后加速”。

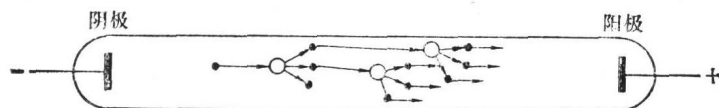


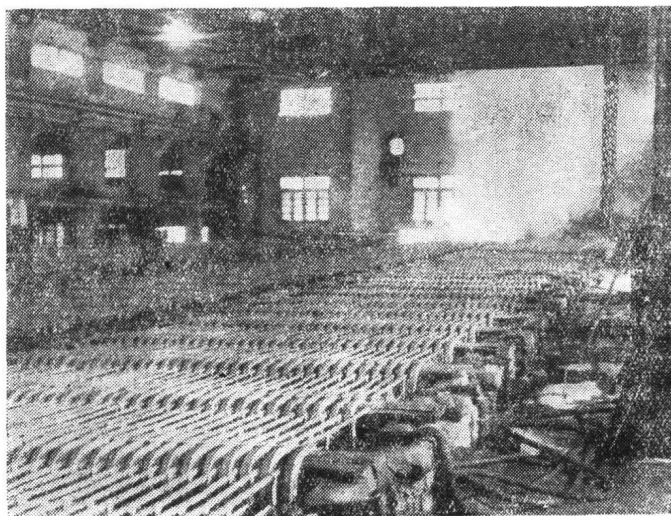
图 4-4 气体的碰撞电离

(图中黑点表示电子,小圆圈表示中性气体分子)

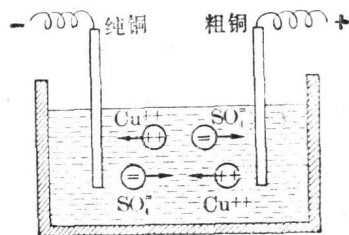
这些电子和正离子向相反方向运动。气体放电灯管中的电流就是这样形成的。

通常,我们把气体在常压下从不导电变为导电的过程称为气体的击穿。雷雨时天空中的闪电就是空气被击穿形成的。在我国历史上,历代劳动人民曾对雷电现象进行了长期的大量的观察,总结出了接近于现代对雷电现象认识的一些规律,这对于认识和改造自然、促进当时生产力的发展起了积极的作用。

下面再简单介绍一下液体中的电流。图 4-5 为工业上的电解炼铜装置。在一个水泥槽里放着硫酸铜(CuSO_4)的水溶液,这些水溶液通常称为电解液。在硫酸铜溶液中放一块纯铜板作为负电极,将另一块待精炼的粗铜板放到溶液中作为正电极,当电源接到这两个铜电



(a) 工业上的电解炼铜



(b) 电解导电

图 4-5

极上时就有电流通过硫酸铜溶液。硫酸铜分子在通常情况下是电中性的,但它在溶液里受水分子的作用就会电离成带正电的铜离子(Cu^{++})和带负电的硫酸根离子(SO_4^-)。它们是硫酸铜溶液能够导电的内在根据。当极板没有和外接电源相联时,铜离子和硫酸根离子与水分子一起在作杂乱的热运动,因而其总电流等于零。但当外电源接上后,正负极板间的外加电压就使铜离子 Cu^{++} 和硫酸根离子 SO_4^- 在热运动上迭加了一定的漂移运动。铜离子向负极运动,硫酸根离子向正极运动(图 4-5b),因而溶液内发生了电荷沿一定方向的迁移,即形成了电流。由于在溶液中有两种电荷沿相反方向运动,所以总电流应该是正离子电流和负离子电流之和。

与固体、气体中的导电情况不同,当液体中有电流通过时就伴随有化学反应。例如硫酸铜溶液中有电流通过时,铜离子迁移到负电极后将从极板上获得两个电子变为铜原子而淀积在电极上,硫酸根离子迁移到正电极后将和粗铜板上的铜原子结合成硫酸铜分子而又溶入水中,并在水溶液里再次电离成铜离子和硫酸根离子。随着电流不断地通过溶液,这个过程也就不断地进行着,作为正电极的粗铜板不断地溶入硫酸铜溶液,而作为负电极的纯铜板则不断地变厚,结果粗铜变成了纯铜。这就是“电解炼铜”的过程。其他的酸、碱、盐的水溶液在导电时也都有类似的化学反应出现。所以这种液体导电有时也称为电解导电。

四、导体、绝缘体和半导体

从上面的分析可知,物体中存在电流的首要条件是物体里有可以作漂移运动的电荷。金属导线中能够有电流就是因为导线中存在大量的自由电子;示波管中有电流是因为管内的热阴极发射了大量可以在管内作漂移运动的电子。电解液(酸、碱、盐的水溶液)以及气体放电灯(如氙灯、氖灯、日光灯等)中的电离气体内都有大量可以自由运动的电子和离子,因此在这些物质内就可以形成电流。我们把能够传导电流的物质称为导体,而把能够在物体内作漂移运动以形成电流的带电粒子称为自由载流子。橡胶、塑料、云母、有机玻璃、纯水、空气等物质,情况正好相反,它们在一般情况下,内部几乎没有自由载流子,所以很难形成电流。通常我们把这些物质称为绝缘体。在各种电气设备中,总是某些部分是导体,另外一些部分是绝缘体。如电动机中的绕组线圈是用漆包线绕成的,漆包线外面的漆是绝缘物,中间的铜线是导体,两组线圈间还夹有其他绝缘物,如绝缘清漆和黄蜡布等。只有这样才能使电流沿着我们所要求的回路流动,电动机也才能正常地工作。

然而,在导体和绝缘体之间并不存在着绝对的界限,在一定条件下,绝缘体也可以转化成导体。气体在一般情况下是良好的绝缘体,但在紫外线、X 射线或外加高电压的作用下可以发生电离而转化成导体。其他的固态绝缘介质也有类似的情况。事实上,在导体和绝缘体之间还有许多称为半导体的物质,它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,而且极易受温度、光照、杂质、压力、电磁场等外加条件的影响。在金属中只有一种自由载流子,即带负电的自由电子参加导电。但在半导体中除了电子以外,还有带正电的“空穴”参加导电,因此在半导体里可以有两种载流子。将半导体接到电源上,电子就向电源的正极、空穴向电源的负极作漂移运动。因此半导体中的电流是由二部分组成:一部分是电子的漂移运动引起的电

子电流,另一部分是空穴的漂移运动形成的空穴电流。当半导体中多数载流子是电子时,我们称之为“N型”半导体;反之,当多数载流子是空穴时就称之为“P型”半导体。利用半导体的这些特性可以制成各种半导体器件,如晶体管、红外探测器、光敏电阻、热敏电阻、应变片、霍尔器件等,它们在现代的电子技术中有着广泛的应用。

五、 电流强度和电流密度

为了形象地表示导体中的电流,可以用图示的方法在导体中画很多线,使每条线上各点的切线方向与该处载流子的漂移运动的方向一致,我们称这种线为电流线。对于金属导线中的电流,情况比较简单(图4-6)。由于导线粗细比较均匀,电流线都是与导线轴平行的直线。这样的电流通常称为线电流。为了定量地比较导线中电流的强弱,我们规定单位时间内通过导线某一截面的电量为该截面处的电流强度,用符号 I 表示。设在 dt 时间内通过某截面的电量为 dQ ,则电流强度为

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (4-1)$$

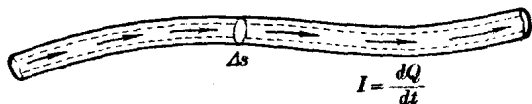


图4-6 金属导线中的电流(线电流)

电流强度的单位是安培*。一般还常用毫安和微安来表示电流强度的大小,它们与安培的关系:

$$1 \text{ 毫安} = 10^{-3} \text{ 安},$$

$$1 \text{ 微安} = 10^{-6} \text{ 安}.$$

在电磁学里有各种单位制,本书采用有理化米千克秒安培制(MKSA 有理制)。在MKSA 制中取长度、质量、时间和电流为基本量,它们的单位分别为米、千克、秒、安培,其他电学量的单位都根据它们与这四个基本量的关系来确定。例如, MKSA 制中的电量单位是库仑,它和电流强度的单位安培之间的关系由式(4-1)可知:

$$1 \text{ 库仑} = 1 \text{ 安培} \cdot 1 \text{ 秒},$$

即导线中的电流强度为1安培时,在一秒内通过导线横截面的电量为一库仑。

在有些情况下,电流是在粗细不均匀的导体甚至是大块的导体中流动,形成所谓体电流。图4-7所示即为几种典型的体电流。图中(a)是点焊机工作时电极处的电流分布。点焊机有两个电极,中间放待焊物件。电流从上电极流向下电极,中间经过比较细的部分。可以看出,各处电流所通过的导体横截面是不相等的。图中(b)表示在一个半球形的接地电极附近的电流。在某些输配电系统中或是运用大电流的情况(如脉冲大电流放电)下,往往在地里埋一金属导体,并用导线将其接到电路上去,使大地成为电路的一部分。这时,电流就如

* 在 MKSA 单位制中规定:在真空中的两根相距一米的无限长的平行细直导线中通以相同的电流,当它们的相互作用力为 2×10^{-7} 牛顿/米时导线中的电流强度即为1安培(参阅第七章电流的磁场)。

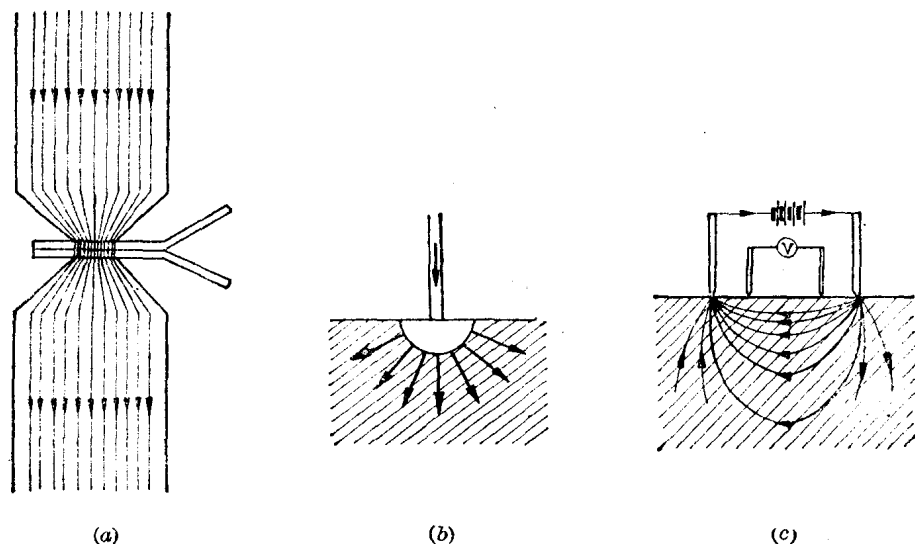


图 4-7 电流在大块导体中的分布情况

图示那样在大地中流动。图中(c)是四探针测半导体材料电阻率的示意图。外侧两根探针通电流 I , 电流在大块材料中流动, 测出中间二根探针之间的电压 V 后, 根据材料中电流的具体分布情况, 由 V 和 I 以及探针间距即可算出材料的电阻率。所有这些例子都告诉我们, 电流在大块导体中流动时, 电流的分布可以是不均匀的。类似的情况在设计固体电子元件时还会经常遇到。所以, 除了一般地了解导体中电流的强弱, 有时还需要更具体地了解导体中电流的分布情况。

为了定量地描述导体中电流的分布情况, 我们引进一个新的物理量——电流密度矢量, 用符号 $\mathbf{j}$ 表示。导体中某一点的电流密度 $\mathbf{j}$, 在数值上等于垂直于该处电荷运动方向的单位面积上的电流强度, 方向为该点电流的方向, 即

$$\mathbf{j} = \frac{\Delta I}{\Delta S} \mathbf{n}^0, \quad (4-2)$$

式中 ΔS 是与电流方向即 $\mathbf{j}$ 的方向相垂直的面积; $\mathbf{n}^0$ 为单位矢量, 其大小为 1, 方向为该点处的电流方向, 亦即正电荷作漂移运动的方向。从上式可看到, 电流密度的单位是安培/米²。在金属导体中, 由于电流是由带负电的载流子产生的, 则 $\mathbf{j}$ 的方向正好与载流子的漂移运动的方向相反(图 4-8)。式(4-2)还可以写成导数的形式:

$$\mathbf{j} = \frac{dI}{dS} \mathbf{n}^0. \quad (4-3)$$

这种形式在计算任意形状导体中的电流分布时比较方便。

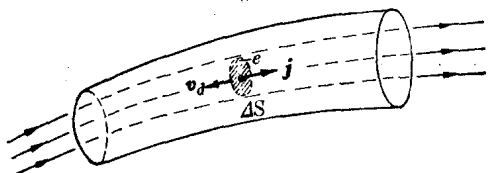
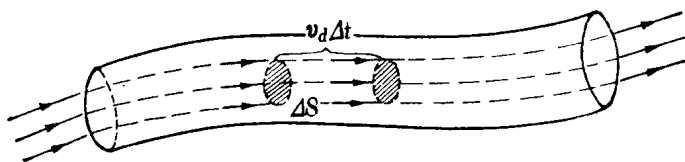


图 4-8 金属导体中的电流密度矢量

我们可以把导体中各处的电流密度 $\mathbf{j}$ 和导体中载流子的密度(单位体积中载流子的数目)以及载流子的漂移运动的速度(简称漂移速度)联系起来。为了简单起见, 我们只以金属导线中的电流为例来进行讨论。如图 4-9 所示, 设电荷在导线中沿垂直于这导线的横截面

图 4-9 电流密度 j 和载流子漂移速度 v_d 间关系

ΔS 的方向运动。导线中自由电子的密度为 n , 它的漂移速度为 v_d , 每个自由电子所带电量为 $-e$ 。在 Δt 时间内自由电子走过的距离

$$\Delta l = v_d \Delta t。$$

在 Δt 时间内通过 ΔS 截面的电量

$$\Delta Q = -ne \Delta S \Delta l = -nev_d \Delta S \Delta t,$$

而通过 ΔS 截面的电流强度

$$\Delta I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -nev_d \Delta S,$$

由式(4-2)可得

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S} n^0 = -nev_d。 \quad (4-4)$$

式(4-4)表明导体中的电流密度 j 等于导体中载流子密度 n 、载流子所带电量 e 和载流子漂移速度 v_d 的乘积, 负号表示由于金属导线中的载流子(自由电子)带负电, 电流密度矢量 j 的方向与自由电子漂移速度的方向相反。这个结论是在均匀导线的情况下导出的, 但可以证明对于一般情况也是正确的。

【例】在直径为 1.63 毫米的铜导线中, 通有 5 安培的电流, 设铜导线中自由电子密度 $n = 8.4 \times 10^{28}/\text{米}^3$, 求导线中自由电子的漂移速度的大小。

解 铜导线的横截面积

$$S = \frac{\pi \phi^2}{4} = 0.021 \text{ 厘米}^2 = 2.1 \times 10^{-6} \text{ 米}^2,$$

铜线中的电流密度

$$j = \frac{I}{S} = \frac{5}{2.1 \times 10^{-6}} = 2.4 \times 10^6 \text{ 安培/米}^2。$$

则由式(4-4)可得自由电子的漂移速度大小为

$$v_d = \frac{j}{ne} = \frac{2.4 \times 10^6}{8.4 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ 米/秒}。$$

金属中自由电子的平均热运动速度为 10^5 米/秒, 因此热运动速度约为漂移速度的 10^9 倍。

第二节 伏-安特性曲线

“外因是变化的条件, 内因是变化的根据”, 物体中有电流存在, 首先是物体内部要有可以作漂移运动的自由载流子, 所以通常只有在导体中才能有电流。然而, 在导体内部要形成电流, 还必须将导体接到一个电源上, 即在导体两端加上一定的电压。这个外加电压就是在导