

308590

学 自 学 丛 书

物 理 学

下 册

同济大学物理教研组 编



上海科学技术出版社

第 066599

内 容 提 要

本書基本上是根据高等工业学校物理编写組編的“物理学”經過适当的修改补充而成，內容較為精簡扼要。

本書原来是同济大学所办函授学校应用的物理課本。由于考虑到函授学生是以自学为主的特点，在编写內容时，已适当穿插有关学习方法的指导，并且选择了适量的例題、自我檢查題、习题、測驗作业及課堂学习提綱等資料，可供自学时的参考。

物 理 学

(下 册)

同济大学物理教研組 編

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所总經售

开本 787×1092 毫米 1/32 印張 8 5/8 字数 251,000

1959 年 5 月第 1 版 1959 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

印数 1—30,000

統一書号: 13119·288

定价: (十) 0.82 元

目 录

第三章 金属导体中的电子运动和热电子发射	1
§ 3-3-1 自由电子理论	1
§ 3-3-2 金属导体的近代理论——半导体	3
§ 3-3-3 电子从金属表面逸出所需的功 接触电位差	6
§ 3-3-4 温差电现象	9
§ 3-3-5 热电子发射 真空中的电流	11
§ 3-3-6 电子发射的实际应用	12
自我检查	15
习题	15
第四章 电流的磁场	16
§ 3-4-1 基本磁现象	16
§ 3-4-2 磁场 磁感应强度	17
§ 3-4-3 磁力线 磁通量	19
§ 3-4-4 毕奥-沙伐-拉普拉斯定律及其应用	21
§ 3-4-5 电磁系单位	25
§ 3-4-6 磁介质的磁化 磁导率	27
§ 3-4-7 磁场强度 安培环路定律	29
§ 3-4-8 运动电荷的磁场	32
自我检查	35
例 题	35
习 题	37
第五章 磁场对电流的作用	39
§ 3-5-1 磁场对载流导线的作用力——安培定律	39
§ 3-5-2 均匀磁场作用在平面载流线圈上的力矩	41
§ 3-5-3 载流导线间的相互作用力	44

§ 3-5-4 运动电荷在磁场中所受的力——洛伦兹力	45
§ 3-5-5 带电质点荷质比的测定	47
§ 3-5-6 回旋加速器	49
自我检查题	51
例题	51
习题	53
第六章 电磁感应	55
§ 3-6-1 电磁感应现象	55
§ 3-6-2 楞次定律和法拉第电磁感应定律	58
§ 3-6-3 电磁感应现象和能量守恒与转换定律的关系	62
§ 3-6-4 电磁感应现象和电子理论的关系	63
§ 3-6-5 在磁场中转动的线圈中的应电动势和应电流	65
§ 3-6-6 涡流	66
§ 3-6-7 自感现象	68
§ 3-6-8 互感现象 变压器	69
§ 3-6-9 磁场的能量	73
自我检查题	75
例题	75
习题	77
第四次测验作业	78

第 四 編 振动和波动过程

§ 4-0-1 振动和波动过程的研究内容	84
第一章 振动学基础	86
§ 4-1-1 諧振动	86
§ 4-1-2 諧振动中的振幅、周期、频率和周相	89
§ 4-1-3 諧振动的能量	91

§ 4-1-4 同方向振动的合成 拍	92
§ 4-1-5 相互垂直振动的合成	95
§ 4-1-6 阻尼振动	97
§ 4-1-7 受迫振动 共振	98
自我检查题	99
例题	100
习题	101
第二章 波动通論	102
§ 4-2-1 彈性介质中波的产生和傳播	102
§ 4-2-2 波的傳播速度 波長 波的周期和頻率	105
§ 4-2-3 波动方程	107
§ 4-2-4 惠更斯原理	109
§ 4-2-5 波的反射和折射	111
§ 4-2-6 叠加原理 波的干涉	113
§ 4-2-7 驻波	115
§ 4-2-8 波的繞射	117
自我检查题	117
例题	118
习题	119
第三章 电磁振盪和电磁波	121
§ 4-3-1 电磁振盪	121
§ 4-3-2 位移电流	124
§ 4-3-3 电磁波的产生 麦克斯韋电磁場理論	126
§ 4-3-4 赫芝实验 波波夫发明无线电	128
§ 4-3-5 电磁波譜	131
自我检查题	133
习题	133

第四章 光的干涉和繞射 194

§ 4-4-1 关于光的本性的認識发展史概述 194

§ 4-4-2 相干光綫 楊氏干涉实验 196

§ 4-4-3 光程和光程差 薄膜的干涉 199

§ 4-4-4 劈尖的干涉 牛頓环 142

§ 4-4-5 干涉仪 干涉現象在技术上的应用 145

§ 4-4-6 光的繞射現象 147

§ 4-4-7 单縫繞射 148

§ 4-4-8 繞射光柵 繞射光譜 152

§ 4-4-9 倫琴射綫的繞射 155

自我檢查題 158

例題 158

习题 160

第五章 光的偏振 161

§ 4-5-1 天然光和偏振光 161

§ 4-5-2 反射和折射时光的偏振 163

§ 4-5-3 光的双折射現象 163

§ 4-5-4 惠更斯原理在双折射現象中的应用 168

§ 4-5-5 起偏振鏡和起偏振片 171

§ 4-5-6 振动面的旋轉 174

§ 4-5-7 偏振光的干涉及其应用 176

自我檢查題 178

习题 178

第五次測驗作业 179

第五編 原子物理学和原子核物理学

§ 5-0-1 原子物理学和原子核物理学发展簡史 183

第一章 波和粒子	183
§ 5-1-1 热辐射 基尔霍夫辐射定律	186
§ 5-1-2 绝对黑体的辐射定律	189
§ 5-1-3 普朗克的量子假设 普朗克公式	190
§ 5-1-4 光电效应	192
§ 5-1-5 爱因斯坦方程 光子	194
§ 5-1-6 德布罗意公式 物质的粒子性和波动性	196
自我检查题	199
例题	200
习题	201
第二章 原子物理学基础	203
§ 5-2-1 原子的核模型及其实验基础	203
§ 5-2-2 原子光谱的规律性	206
§ 5-2-3 玻耳兹曼原子结构理论	208
§ 5-2-4 原子结构理论的发展	214
自我检查题	220
例题	220
习题	221
第三章 原子核物理学基础	222
§ 5-3-1 天然放射性	222
§ 5-3-2 观察放射性现象的方法	224
§ 5-3-3 原子核转变 中子	226
§ 5-3-4 正电子 人为放射性	229
§ 5-3-5 原子核结构 原子核的结合能	232
§ 5-3-6 原子核能的利用 原子燃料	235
§ 5-3-7 宇宙射线	239
自我检查题	241

例題	241
习题	242
附录	244
一、重要物理恆量	244
二、几种常用单位的換算	244
三、厘米克秒制靜电系单位 (CGSE)、厘米克秒制电磁 系单位 (CGSM) 和米千克秒制电磁系单位 (MKSM) 三单位制中各量的单位的关系	245
課堂学习提綱	246
电子理論	246
电磁現象	250
振动和波动	253
光的干涉、繞射和偏振	257
波和粒子	261
原子物理学与原子核物理学	265

第三章 金屬导电的电子理論

热电子发射

本章內容是以电子理論为基础，研究有关产生电流的微观过程。学习时应着重在定性地理解问题的本质，使对导电性、温差电、热电子发射等现象的起源及其应用有概括的认识。

§ 3-3-1 古典电子理論

在金屬导电的电子理論中，最基本的問題是金屬导电的机构問題。实验指明，当金屬导体中有电流通过时，没有化学变化发生，这說明了金屬导体中的电流和原子的运动无关。从1911到1916年間，俄国物理学家曼节尔史塔姆(Л. И. Мандельштам)、托尔曼(Tolman)和斯蒂华德(Stewart)等首先从实验証实了金屬中的导电机构是自由电子，为金屬导电的电子理論建立了基础。

托尔曼和斯蒂华德的实验装置是一个匝数很多的金屬綫圈，其两端和一电流計相連接；綫圈可繞一通过它的中心并垂直于它的平面的軸很快地轉动着，譬如說 $5000[\text{周}][\text{秒}]^{-1}$ 。当綫圈以勻角速轉动时，电流計的指針不偏轉。但当綫圈很迅速地停止运动时，电流計就指出綫圈中有电流，电流的方向和綫圈轉动的方向相反。电流产生的原因是：当金屬綫圈迅速轉动时，金屬中的带电微粒，因为不断地和固定于金屬中的結晶点陣碰撞，所以获得速度，和結晶点陣一起运动。这时因为带电微粒对結晶点陣沒有相对运动，所以沒有电流。但当綫圈很快停止运动时，結晶点陣停止运动，而带电微粒因为有一定的质量，即有一定的慣性，所以在綫圈停止后还有一个时间要继续运动，这就对結晶点陣有了相对的定向运动，因此形成电流。这时带电微粒是沿着綫圈原来旋轉的方向运动的，但因带負电，所以电流的方向应和綫圈旋轉的方向相反，这些都是实验中观察到的現象。

从线圈停止运动后电流计中通过的电量、线圈的旋转速度及其长度，可以计算出这些形成电流的带电微粒的电量和它的质量的比值。托尔曼最后测得这个比值的量值是

$$\frac{e}{m_0} = 5.273 \times 10^{17} \text{ [静电系电量单位] [克]}^{-1}$$

和用其他方法测得的电子的荷质比的量值十分符合(参看 § 3-5-5)，这证实了金属中形成电流的带电微粒是电子。

要说明金属的电子导电性，必须假定金属中的原子，至少有一部分离解为自由电子和正离子，正离子构成金属结晶点阵，而自由电子则不断地在结晶点阵间作不规则的热运动。这种自由电子满布于金属导体内，称为“电子气”，这就是金属的导电机构。

洛仑兹(Lorentz)首先提出金属的电子理论，他认为电子热运动和理想气体分子的热运动一样，其平均动能也等于气体分子平动的平均动能，

即 $\frac{3}{2}kT$ ， k 为玻耳兹曼恒量， T 为金属的绝对温度。这种自由电子不断地作不规则的运动，不断地和金属结晶点阵相碰撞，在任何一个给定方向的平均速度都为零，因此在平常情形下金属中没有电流。

当金属中有电场时，每个自由电子都将受到电场的作用，使电子沿着电场相反的方向(因为电子的电荷是负的)相对于结晶点阵作匀加速运动。这样，每个电子除了杂乱的热运动外，尚有有规则的定向运动，直到这电子和结晶点阵碰撞为止。碰撞时，电子受到了碰撞力的作用，这个力比电力大得多，而碰撞力的方向对大量电子来说是杂乱无章的，所以在碰撞后的一瞬间，电子的定向运动被破坏了，复成为杂乱无章的热运动。电子在金属导体中的全部运动过程，可以看作是“一段”自由飞行过程的重复。这样，周而复始，在宏观的意义上说，就形成了电流。如果导体内的场强 E 愈大，显然，则电子定向运动的平均速度也大，因此在单位时间内通过单位面积的电子个数也愈多，即电流密度 δ 也愈大。可以证明， E 与 δ 成简单的正比关系，并且两者的方向是一致的，因此得，

$$\delta = \gamma E$$

这就是欧姆定律的微分形式。

由上所述,可知金属导体的电阻,在微观意义上说,是因为电子和晶体点阵的不断碰撞所产生的。又由于电子和晶体点阵相碰撞的结果,晶体点阵不断地获得能量而使热运动加剧,温度升高,这就是电流的热效应的微观本质。

自由电子不但可以作为导电机构,很自然地,我们有理由假定它同时也可以作为导热机构,这说明了金属不但是电的良导体,同时也是热的良导体的原因。

上述理论称为古典电子理论,根据这理论可以定性地解释一些重要的物理现象。但是如果进一步作定量的研究,这理论的缺陷就表现了出来,根据这理论推导所得的结果与实验并不准确相符,在许多问题上,甚至完全不能解释。其原因在于这理论的基础是假设金属中的“电子气”和理想气体具有相同的性质。但事实上,“电子气”与理想气体的性质是不同的,只有在极高的温度(高于 10000°C — 20000°C)下,与理想气体的性质相接近而已,因此在通常温度下,不能给出准确的结论。古典电子理论的根本缺陷,在于它把适用于宏观物体的牛顿运动定律应用到微观的电子运动中去,承认了能量的连续性,因此在许多问题上遇到了不可解决的困难。只有在量子力学中,这些问题才获得满意的解决。

§ 3-3-2 金属导电的近代理论 半导体

上节中我们指出,古典电子理论有根本的缺陷,不能定量地解释导电性现象,只有借助于量子力学而发展起来的近代理论,才能够满意地加以解释。古典理论与量子理论之间的主要区别是:从量子力学的观点看来,电子只能处在有限数目的“许可状态”中;从一个许可状态过渡到另一个许可状态时,能量变化一定的量 ΔE ,这种过渡是飞跃地发生的,不能象古典理论中那样可以稳定地处在任意中间状态中(参看第五编教材)。

与某一许可状态相对应的,有一定的能量数值,称为能级。在单个原子中,电子的许可能级相隔较远,即能量相差较大。在晶体中有许多原子

时,由于原子间的相互作用,最外层的价电子被扰动得很厉害,因此能级分裂成许多彼此相隔很近的能级。这种数目很多、相隔很近的能级组成的许可状态的区域称为能带。一般地说,原子中价电子有若干许可能级,在晶体中就形成相同数目的能带。在两能带之间是电子不能停留的区域,称为禁带(图3-3-1)。

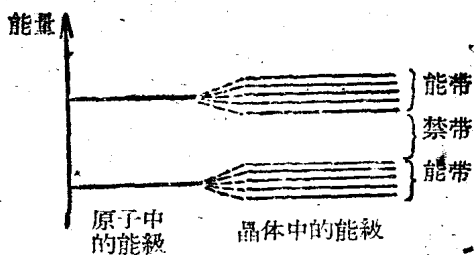


图3-3-1 晶体中电子能级的分裂

按照量子力学的观点,在同一能级中不能够有多于两个的电子,并且这两个电子自旋的转向应该相反。现在我们按电子在能带分布情况的不同,分别讨论晶体的导电性如下:

1. 能带中只有一部分填满了电子(图3-3-2a)。

在这种情况下,由于同一个能带中能级彼此相隔很近,因此在外电场的作用下,电子很容易改变能量而迁移到较高的空能级中去。换句话说,在外电场的作用下,电子能够得到附加的速度而产生定向运动,即产生电流。——这种晶体就是导体。



图3-3-2 电子在能带中的分布

2. 下面的能带填满了电子,而上面的能带中没有电子,中间的禁带很宽(图3-3-2b)。

在这种情况下,下面的能带已经填满,电子的能级无法改变,禁带又很宽,电子很难迁移到上面的能带中去。因此在外电场(如果不太强)的

作用下,不能够改变电子的运动状态。换句话说,外电场的作用并不能使电子得到附加速度而产生定向运动,即不能产生电流。——这种晶体就是电介质。

3. 下面的能带已经填满,上面的能带中没有电子,但中间的禁带相当狭窄(图3-3-2c)。

在这种情况下,由于热运动的影响,一小部分电子能够越过禁带而迁移到上面的能带中去,因此能够产生若干导电性。当温度升高时,能够越过禁带的电子迅速增多,因此导电性也迅速增大,即电阻率迅速降低。——这种晶体就是半导体。

由上所述,根据能带的概念可以满意地解释导体、电介质、半导体等的导电性,同时也可解释半导体电阻率和温度的反常关系。进一步定量研究的结果,证明能带理论也很好地和实验事实相符合。下面,我们将简略地讨论半导体的性质。

值得注意,半导体的导电性有一个特点。当电子从下面填满了的能带迁移到上面的能带后,在下面能带就出现了空的位置——“空穴”,这使得下面能带中的电子也能够参与导电的过程。由于电子在外电场作用下的移动,呈现出“空穴”沿着与电子运动相反的方向移动,即在电场中“空穴”和正电荷的作用相当。由此可见,半导体的导电性具有电子的和“空穴”的两种性质。如果电子导电起主要作用,我们就称它为电子型半导体,记为n型;如果“空穴”导电起主要作用,我们就称它为空穴型半导体,记为p型。这两种

不同类型的半导体,在实际应用时,起着重要的作用。

如果把两种类型半导体连接在一起,如图3-3-3所示。当电场自p指向n时,电子(以 $\circ$ 表示)和“空

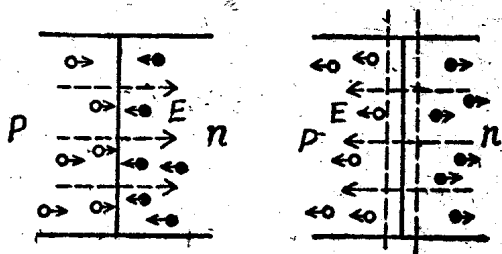


图3-3-3 半导体的整流作用

穴”(以 $\circ$ 表示)相向运动至接触面而互相結合,因而能使电流順利通过;反之,当电势自 n 指向 p 时,电子和“空穴”都离开接触面,中間形成一层缺乏导电机构的絕緣层,因此使电流很难通过。由上所述,可知半导体和两极电子管一样,能起整流作用(参看 § 3-3-6)。

半导体除了能起整流作用外,如果加以适当組合,和三极电子管一样,也能起放大作用。在无线电技术中,半导体不但能完全代替电子管的作用,并且具有体积小、消耗电能少、使用寿命长、便于大量制造等优点。除上述应用外,在精密测量、自动控制等方面,半导体技术目前正在获得愈来愈广泛的应用。在我国这一門尖端性的学科也已获得了飞跃的发展。

§ 3-3-3 电子从金属表面逸出所需的功 接触电位差

我們知道,在通常温度下,金属中的自由电子虽然在不断地作热运动,但并不从金属表面挣脱出来。这个事实表明,在靠近金属的表面,电子受到了阻止它們逃出边界的阻力。这种力的存在是可以理解的,因为在金属体内部,电子四周为其他电子与正离子所环绕,情况是对称的。可是处于金属表面的电子,組成金属体的电荷都分布在它的一边,情况显然是不对称的(或不均匀的)。因此当电子逸出金属表面时,要克服这种不对称性所引起的阻力而作功,这功称为电子的逸出功。

逸出功通常用电子伏特来量度。电子伏特是物理学中一个特殊的能和功的单位,用得很广,它是一个电子经过1[伏特]的电位差时电力所作的功,以符号 eV 表示之,

$$1eV = 4.8 \times 10^{-10} \times \frac{1}{300} [\text{尔格}] = 1.6 \times 10^{-12} [\text{尔格}]$$

一百万电子伏特称为百万电子伏特,用 MeV 表示之。

逸出功的数值可以作为各种不同金属的特征,对大多数的純金属說,其大小在3—4.5[电子伏特]之間,在个别的情形,如鉑,它的逸出功超过5[电子伏特]。

上面我們說明了一种金属的表面情况,現在我們要說明两种金属互

相接触时的情况。在电子理论产生之前,早在 1797 年,伏打 (Volta) 就发现:当两种不同金属互相接触时,在它们之间产生电位差,称为接触电位差。接触电位差的大小随接触金属的不同而异,从十分之几〔伏特〕到几个〔伏特〕。伏打并指出:所有第一类导体(即金属)可以排成一个序列,在这序列中,任何一种金属:若与在它后面的金属相接触便带正电,若与在它前面的金属相接触便带负电,伏打所排的序列如下:

十 鋁、鋅、錫、鎳、鉛、銻、銻、水銀、鉄、銅、銀、金、鉑、鉀一。

接触电位差现象,可以从电子理论的观点得到解释。

设有两种金属 A 和 B,其温度相同,单位体积内的自由电子数目也相同,它们的逸出功分别为 W_A 和 W_B ,并假定 $W_A < W_B$ 。当这两种金属互相接触时,位于接触面两边的作不规则热运动的自由电子,都有一部分可以从一种金属越过接触面而进入另一种金属,因而形成两个方向相反的电子流(单位时间内通过接触面的电子数称电子流)。但因接触面两边是不对称的,电子从金属 A 逸出而转移到金属 B 中比较容易,因此逸出的电子数较多。所以,由金属 A 通过接触面而进入金属 B 的电子流,要大于由金属 B 进入金属 A 的电子流。这就使金属 B 有过剩的电子而带负电,使金属 A 缺少电子而带正电,因而在两种金属之间产生静电性的电位差,同时也出现一个由金属 A 指向金属 B 的静电场,这静电场将阻止电子继续移到金属 B 中去,使从金属 A 到 B 的电子流减小。当在金属 B 中的过剩电子数到达一定数值时,由接触面两边的不对称所引起的作用和静电场的作用互相平衡,两个方向相反的电子流达成动力平衡,这时两金属间静电性的电位差趋于稳定值,以符号 $U'_{AB} (= U'_A - U'_B)$ 表示之。显然这时电子从金属 B 移至 A 时,电力所作的功应等于逸出功之差,即

$$eU'_{AB} = W_B - W_A$$

或

$$U'_{AB} = \frac{W_B - W_A}{e}$$

电位差 U'_{AB} 是在两种金属的接触面附近极薄的一层内作跳跃式的突变的,所以也称为电位跳跃。

在导出上述电位差时,我们假定两种金属中的自由电子密度是相等

的。实际上,两种金属的自由电子密度是可以不同的,这种接触面两边的另一不对称性也可引起电位差。

设 n_A 与 n_B 分别为金属 A 和 B 的自由电子密度,并假定 $n_A > n_B$,那么在接触的两边,金属 A 中“电子气”的压强,就大于金属 B 中“电子气”的压强,因而使由于扩散所引起的从金属 A 到 B 的电子流大于从金属 B 到 A 的电子流,结果在金属 A 和 B 之间又产生一静电性的电位差 U''_{AB} ($=U'_A - U'_B$)。当压强差所引起的作用与过剩电荷所产生的静电场的作用互相平衡时,两个相反方向的电子流达成动力平衡, U''_{AB} 的值趋于稳定,这稳定值可以根据分子运动论证明为:

$$U''_{AB} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

式中 k 为玻耳兹曼恒量, e 为电子电量的绝对值, T 为金属的绝对温度。

金属 A 和 B 之间的接触电位差 U_{AB} ($=U_A - U_B$) 等于上述两种电位差 U'_{AB} 的 U''_{AB} 代数和(在我们所考虑的情况下,金属 A 的电位高于金属 B):

$$U_{AB} = U'_{AB} + U''_{AB} = \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (3-3-1)$$

今设有温度相同的一系列不同性质的金属 A、B、C 和 D 互相串联起来,则各个接触面上的电位差为

$$U_{AB} = \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

$$U_{BC} = \frac{W_C - W_B}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_B}{n_C}$$

$$U_{CD} = \frac{W_D - W_C}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_C}{n_D}$$

把上三式两边分别相加,得

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = \frac{W_D - W_A}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_D}$$

但 $\frac{W_D - W_A}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_D}$ 等于第一种金属 A 与最末一种金属 D 直接接

触时的接触电位差 U_{AD} 。这一结果也是伏打从实验上首先发现的,称为伏打定律,可用文字叙述如下:如果有几种化学成分不同的但温度相同的金属串联起来,两端就发生电位差,这电位差的大小只和两端的两种金属性质有关,而与中间金属性质无关。

设有 A、B、C、D……等若干种金属,串联成一封闭回路,则这回路中的电动势 $\mathcal{E}$ 为各个接触电位差的代数和

$$\mathcal{E} = U_{AB} + U_{BC} + \dots + U_{DA}$$

如果各接触面的温度都相同,则由伏打定律(或应用3-3-1式)得

$$\mathcal{E} = 0$$

所以用同温度的任何不同性质金属串联起来的封闭回路,不能产生电动势。

§ 3-3-4 温差电现象

上节讲过,同温度的任何金属导体不能产生电动势,但在两种不同的金属导线所组成的封闭回路中(图3-3-4),如果两接触点的温度不同,例如把接触点1和2分别浸入高温热源 T_1 和低温热源 T_2 ,那么这回路中就产生电动势。由式(3-3-1),两接触点的接触电位

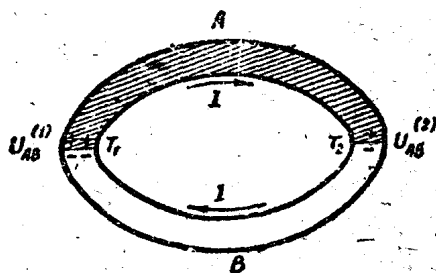


图3-3-4 温差电现象

差 $U_{AB}^{(1)}$ 和 $U_{AB}^{(2)}$ 分别为

$$U_{AB}^{(1)} = \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

$$U_{AB}^{(2)} = \frac{W_B - W_A}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

回路中的电动势就等于 $U_{AB}^{(1)}$ 和 $U_{AB}^{(2)}$ 的代数和。如果 $W_B > W_A$,