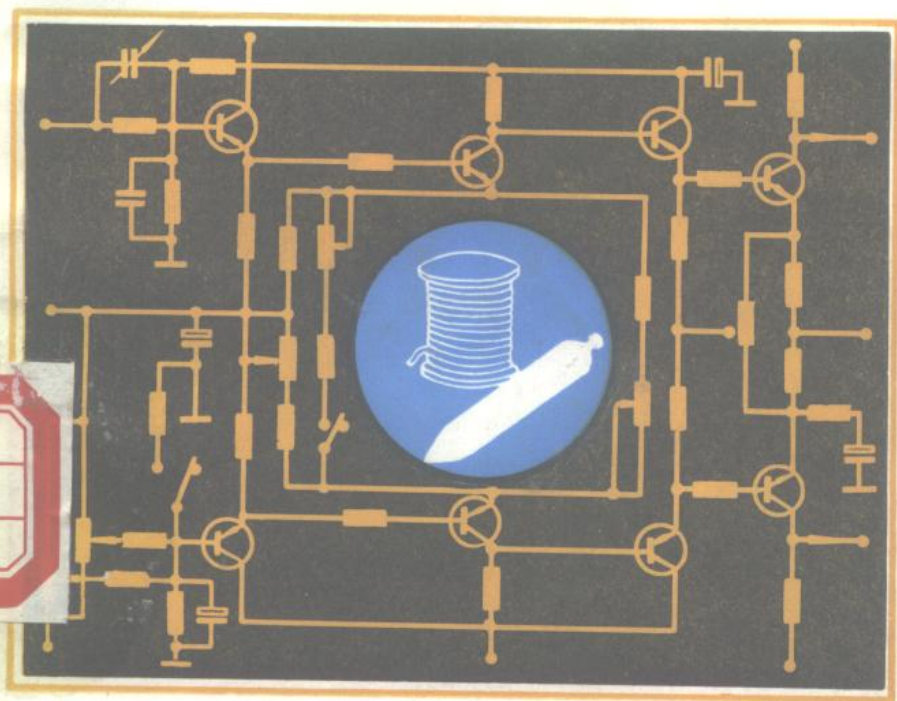




电子工业工人初级技术教材(十)

无线电通用材料

电子工业工人技术教材编写组 编



国防工业出版社

电子工业工人初级技术教材(十)

无线电通用材料

电子工业工人技术教材编写组 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分四章，第一章介绍金属导电机理、性能及其在电子工业中的应用；第二章介绍有关半导体的基本概念、晶体结构和缺陷、硅及锗等常用半导体材料；第三、四章分别介绍绝缘材料和磁性材料的有关知识。

本书列有生产实践中常用材料的若干图、表，可供电子工业青壮年工人阅读及技术人员参考。

MS/09

电子工业工人初级技术教材(十)

无线电通用材料

电子工业工人技术教材编写组 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092¹/₃₂ 印张9¹/₄ 197千字

1987年8月第一版 1987年8月第一次印刷 印数：0,001—8,400册

统一书号：15034·2621 定价：1.45元

前 言

为了适应电子工业青、壮年工人的专业技术培训的需要，按照部颁《电子工业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》的要求，我们组织有关单位分别编写了《无线电知识》、《无线电识图与制图》、《无线电通用材料》、《无线电钳工装配工艺》、《无线电测量与仪器》、《电工》、《电子线路》、《脉冲技术》、《微波技术》、《机械制图》、《化学知识》等十一门工人初级技术基础理论课教材。

这套教材可作为电子工业四级工以下青、壮年技术工人培训用书，也适用于未经过专业培训、具有初中文化水平的干部、工人自学参考。

《无线电通用材料》一书在编写过程中，得到国营北京第二无线电器材厂、国营江南无线电器材厂和国营北京电子管厂的大力支持，在此表示感谢。

本书二、四两章由杨模诗编写，一、三两章由朱家淇编写，张国仁同志提供了部分初稿，全书由徐守淞审阅。

在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业工人技术培训的需要，在文字叙述上简明扼要、通俗易懂。但由于时间仓促，又缺乏经验，书中难免有不妥之处，我们诚恳希望读者提出宝贵意见。

电子工业工人技术教材编写组

目 录

第一章 导电材料	1
第一节 金属导电机理	2
第二节 金属及合金的性能	9
第三节 金属和合金在电子工业中的应用	59
第四节 其它导电材料	81
第二章 半导体材料	90
第一节 基本概念	90
第二节 常用半导体材料	128
第三节 晶体结构和缺陷	135
第四节 硅单晶锭	145
第五节 硅单晶片	157
第六节 硅外延片	162
第七节 锗	168
第八节 砷化镓	179
第三章 绝缘材料	187
第一节 绝缘材料的电性能	187
第二节 绝缘材料的一般性能	195
第三节 气体绝缘材料和液体绝缘材料	199
第四节 固体绝缘材料	201
第四章 磁性材料	259
第一节 基本知识	259
第二节 软磁材料	269
第三节 硬磁材料	284
第四节 其它磁性材料	290

第一章 导电材料

避雷针可以把闪电导入地下，各种导线可以传输电流和电讯号，干电池中的电解质和石墨电极、日光灯管中的气体等，都能够导电。凡属于导电的实体或媒质，通称为导体。导线、电解液、石墨电极和受激气体，都可用作导体。

构成导体的材料称为导电材料。常见的导电材料有金属、石墨、电解质以及气体。绝大多数金属和石墨为固态导电材料；汞（水银）、熔融盐和电解质溶液属于液态导电材料；气体一般不导电，只是在高电压或射线等的激发下，才能成为导体。

电子工业使用的导电材料应能满足下列要求：

1) 电导率范围要宽。传输电线要用高电导率材料制作，而标准电阻器则须用高电阻率材料制作；

2) 电阻温度系数要小，以保证用它所制作的导体不受温度变化的影响；

3) 要具有一定的机械强度和良好的加工性能，以便准确、迅速地做成一定形状的导体，并保证它在使用过程中不致损坏；

4) 耐蚀性要好，要能承受恶劣气候和环境的作用；

5) 要有良好的传热、散热和耐热性，以便及时导出导体或仪器仪表中的热量；自身发热后也不致烧坏而丧失原有的性能；

6) 热胀冷缩要小, 以保证尺寸的精确性;

7) 接触电位要适当。在各种接头中, 不同导电材料间的接触电位值要小; 而在热电偶中, 却要求这个值尽量高些, 以提高其灵敏度。

金属及其合金作为导电材料, 在电子工业中用得最多; 石墨是碳的一种结晶形式, 多用于电机中; 电解质以离子形式传送电流, 常用于电池和电镀液中。

第一节 金属导电机理

当金属丝两端加有不同电位(电压)时, 电子就会发生流动, 形成电流。

金属的导电性取决于它的结构和性能。现介绍如下:

一、原子结构

金属是一种物质。物质由分子组成, 分子又由原子组成。原子则由原子核和围绕原子核旋转的电子组成。原子核和电子的关系很像太阳和围绕它运转的九大行星, 见图 1-1。电子绕原子核的运动与此很相似, 但速度很高(接近于光速, 数量级约为 10^{10} 厘米/秒), 其形状如同光点迅速转动形成光圈一般。一组电子运动的轨迹可构成一个球状壳体, 这个壳体叫做电子层或电子主壳层。原子核外分布着一个个“主壳层”, 主壳层中又套着分壳层; 分壳层中才是某一个电子运动的特定轨道。为了说明电子运动的规律, 用主量子数 n , 角量子数 l 和磁量子数 m 分别表示主壳层、分壳层和某个电子的具体轨道。 n , l 和 m 都只取整数。

主量子数 n 限定某一电子群活动在哪一个主壳层上, 决

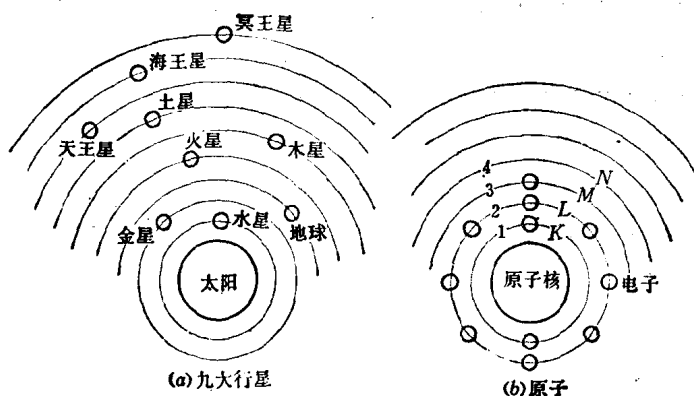


图1-1 九大行星和原子
(a) 太阳和九大行星；(b) 原子。

定着这个主壳层离原子核有多远。从原子核出发，由近到远的各主壳层分别叫做第一壳层 ($n=1$ ，又称K壳层)，第二壳层 ($n=2$ ，又称L壳层)，第三壳层 ($n=3$ ，又称M壳层) 和第四壳层 ($n=4$ ，又称N壳层)，等等。

角量子数 l 表示主壳层中的分壳层数 (电子亚层数)。电子亚层的多少随主壳层而不同，可按照 $l = n - 1$ 进行推算。在K壳层中， $n=1$ ， $l = 1 - 1 = 0$ ，只有一个值 (这个值为零)，故只有一个分层 (亦称s亚层)；在L壳层中， $n=2$ ， $l = 2 - 1 = 1$ ，有0, 1两个值； $l=0$ 是s亚层， $l=1$ 则是p亚层；在M壳层中， $l = 3 - 1 = 2$ ， l 有三个值：0, 1及2； $l=0$ 为s亚层， $l=1$ 为p亚层， $l=2$ 为d亚层，等等。

磁量子数 m 更深入地表示亚层中的轨道数。亚层轨道数由角量子数 l 决定： $m = |l|$ 。 l 由负值 ($-l$) 依整数递升到相应的正值 ($+l$) 的全部项数，就是亚层中的轨道数。

例如 $l = 0$ 时, $m = 0$, 只有一个值 (零), 它表明: s 亚层只有一个轨道 (s 轨道); $l = 1$ 时, $m = |1|$, 即有 -1 , 0 及 $+1$ 三个值, 它表明: p 亚层共有三个轨道 (p_x , p_y 和 p_z); $l = 2$ 时, $m = |2|$, 有 -2 , -1 , 0 , $+1$ 和 $+2$ 五个整数项, 也就是 d 亚层有五个轨道, 等等。

自旋量子数 m_s 所表示的是电子自旋的方向。它只有两个: 或正旋, 或反转。每一个轨道只能容纳自旋方向相反的两个电子, 因为它们好像电流方向相反的螺线管, 其磁场正好相反, 能够相互吸引。

有了上面的四个量子数, 就容易掌握电子离核的远近, 具体运动的轨道和确切位置, 以及它的自旋状态。在 K 壳层中, 有一个亚层 (s 亚层), 一个轨道 (s 轨道), 最多可充入两个电子 (叫 s 电子, 表示为 s^2)。在 L 壳层中, 有 s 和 p 两个亚层; s 亚层有一个轨道 (s 轨道), 可充入两个电子; p 亚层有三个轨道 (p_x , p_y 和 p_z), 每个轨道最多可充入两个电子 (p 电子), 共可充入 6 个电子 (p^6)。在 M 壳层中, 有 s 、 p 和 d 三个亚层, 其中 d 亚层上有 5 个轨道, 最多可充入 10 个电子 (d^{10}), 等等。请注意, 当轨道数多于充入电子数时, 每个电子首先以相同的自旋方向占据空轨道, 只有空轨道中都有了一个电子后, 新来的电子才以反向自旋的方式充入已有一个电子的轨道。

二、能量和能级

同一个物体从高处落下, 离地心越远, 其势能越大。同样, 如果以原子核作地心, 原子核外电子层就好像地面上层层高楼, 离原子核近的, 能量低, 离原子核远的, 能量依次

增高。显然，在不同电子壳层上活动的电子掉落到原子核上去的能量不相同；就是在同一个主壳层中，亚层不同，能量也不完全相同，如图 1-2 所示。

具有不同能量的各个主壳层称为能级。由图 1-2 可见，离原子核越远的主壳层，其能级越高。每一个主壳层中相应的分层（电子亚层）叫做分能级，分能级的能量也有差异，靠近原子核的能量稍低些，但相差并不大。

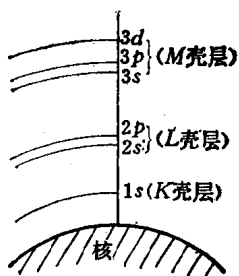


图 1-2 原子核及核外电子层

既然各个壳层都有能级，它们就像木梯子的级档，两档间是空的，两个能级之间也没有电子。换句话说，每两个主壳层或电子亚层间都存在着能量禁区，电子不能在其中停留，只能跳越；从低能级往高能级（即从里向外）跳越时，外界必须给它施加能量（激发），这就叫做电子的跃迁；反过来跳越时，电子就会把外界激发它所需要的能量，以光或电磁波的形式发射出来，通常见到的夜光表，它的“光”往往就是这样产生的。

电子在不受激发时，与地面上的物体一样，总处在能量最低的能级上。也就是在往原子核外空轨道上注入电子时，它首先总是进入低能级壳层和轨道，只是在低能级轨道充满后，才逐次填入较高的能级。

三、固态和能带

气体物质在温度降低到一定值时，其杂乱无章运动着的

原子就会逐步排列起来，通过液态而变成固态晶体。用作导体的金属，除汞之外，在室温下都是这种固态晶体。金属晶体好像钢丝搭成的密积格架，由大量原子按一定格式（如体心立方等空间构型）紧密堆积而成，如图 1-3 所示。这些原子构成晶体的点阵。点阵上的原子处在不停的振动中，互相之间好似以弹簧相连一般。

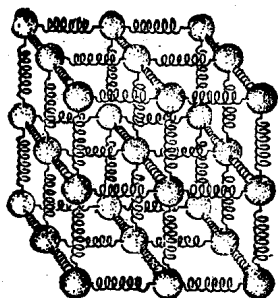


图1-3 晶体结构示意图

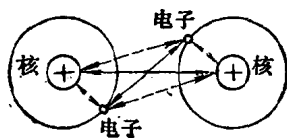


图1-4 相互靠近的两个原子间的综合作用

实线—同性电荷间的相互排斥，
虚线—异性电荷间的相互吸引。

当相邻的两原子彼此靠紧而组成晶体时，它们的能级就会发生变化。因为这时原子核和电子间势必要发生同性电荷间相互排斥和异性电荷间相互吸引的综合作用，如图 1-4 所示。这样作用的结果，如果吸引力大于排斥力，那么，两个原子外层相应的电子壳层势必发生相互重叠现象，使它们互相渗透而扩大壳层领域。两个原子因互相靠近而使电子能级展宽的过程叫作能级的分裂。能级分裂而产生的重叠区域，扩展了相应能级的范围，扩大了电子活动的区域，这个区域称作允带。相邻两壳层的允带间依然存在电子无法进入的区

域，这些区域称为禁带。禁带与允带交错即成为能带^①。

单个原子的核外只存在着能量范围很窄的能级，电子在相应的能级上运动；只是在两个或更多的原子组成密集的晶体时，它们之间相应的能级间才会因为分裂而产生允带。由图 1-5 可以看出，当一个钠原子 (b) 向位于原点处的另一个钠原子 (a) 靠拢时，其各个能级（主壳层和亚壳层）就会逐渐分岔，向上、下扩展。实际上每立方厘米晶体中，大约含有 $10^{22} \sim 10^{23}$ 个原子，互相挤在一起，便使上下扩展的各个相应壳层的能级靠得很近，而出现几乎连续的能量区域（允带）。图 1-5 表明，当 (b) 原子由很远的地方 r 向 (a) 原子接近（自右至左）时，各能级便逐渐形成喇叭状（阴影），当它们的距离接近到 r_0 时， $3s$ 和 $3p$ （两个亚层）的能级就会发生重叠而形成 M 壳层的允带。离核越远的能级发生重叠的距离 r_0 越大，也就是说，在两个原子距离较远时就能重叠。高能级主壳层也可能与低能级主壳层发生部分重叠。这种情况

常在 M 壳层以外发生，如 $3d$ 和 $4s$ 之间就存在着这种重叠。允带由不同原子相应的能级组成，它包括着各种原子的相应能级，尽管这些相应能级的能值也有差别，但

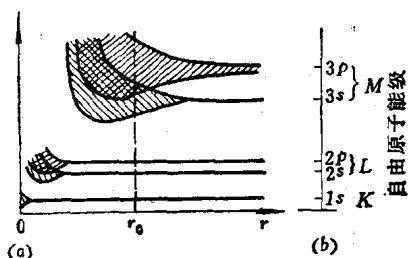


图1-5 钠原子(b)向(a)靠拢时，能级的分裂和固体能带谱的形成
 r_0 —钠金属晶体中的原子间距。

① 有的资料把允带和允、禁带交错的带谱统称为能带。为便于学习，本书只将带谱叫作能带。

基本上可以看成是连续不断的。因此，允带比能级宽得多。

由图 1-6 可以看出，允带宽度随能值的增高而变大，而禁带宽度则越来越窄。对于最外电子层，即价电子层（带），其能量禁区的宽度几乎等于允区的宽度。比价电子带能量更高的第一个空带称为导带。导带与价电子带间也存在着禁带，如图 1-7(a) 所示。

在金属晶体中，由于各点阵原子挤得很紧，它们的价电子层便形成了很宽的允带，而且能带中的导带与价电子带间

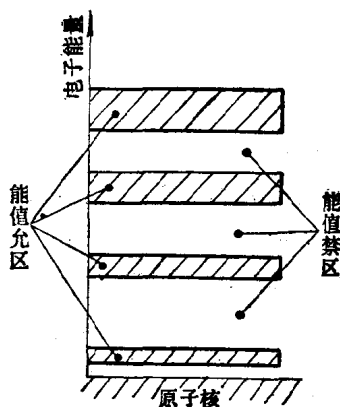


图 1-6 晶体能带示意图

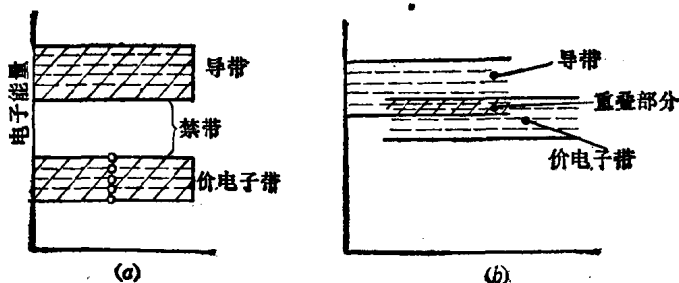


图 1-7 能带与导电现象

(a) 价电子带、禁带及导带；(b) 金属中导带和价电子带的重叠。

发生重叠，不夹杂禁带，使价电子可以在宽阔的允带上自由活动，成为自由电子，如图 1-7(b) 所示。自由电子不再属于哪一个点阵上的原子，而为整个晶体所共有。一旦在金属晶体上加上电场，自由电子就会沿着电场的反方向，在

价带和导带中曲折地流动而形成电流。因此，金属可以成为良好的导体，导引电子的流动。金属一般都是导体，其根本原因就在于此。

显然，如果禁带很宽，价带中的价电子很难跳进（跃迁入）导带，结果就不可能导电，这类物质就是绝缘体。禁带适中，导带中有小量电子、价带中有少量空穴的物质，可能有有限的电导性，称为半导体。

第二节 金属及合金的性能

一、金属的一般性能

1. 电性能

1) 电阻率 在一定电场作用下，金属晶格中的自由电子，以一定加速度向电场反方向流动时，常常受到晶格点阵原子的阻挡。各种材料的阻挡程度各不相同。一般用电阻 R （欧）表示对电流的阻挡程度。对于某一种材料所做的导线，可以量出它的长度 l_1 和截面积 s_1 ，并测出其两端间的电阻值 R_1 ，如图 1-8(a) 所示。若截面积扩大为 s_2 ，长度缩短为 l_2 ，

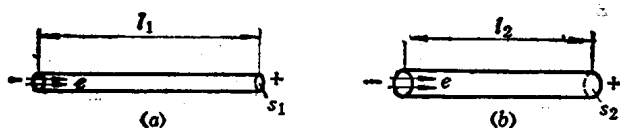


图1-8 金属导线的电阻值与长度、截面积的关系

(a) 电阻值为 R_1 时；(b) 电阻值为 R_2 时。

则阻值变为 R_2 ，见图 1-8(b)。不管导线的长度和截面积怎样变化，只要用同一种材料制作，它的电阻值就一定也跟着

变化，即：

(1) 电阻值与导线两端的长度 l 成正比，导线越长，电阻值越大；

(2) 电阻值与导线截面的面积 s 成反比，导线截面积越大，电阻值越小。

也就是说，电阻值与 l/s 成正比， l/s 越大，导线越长越细，其电阻值就越大；反之则越小，即

$$R \propto \frac{l}{s} \quad (1-1)$$

$$\frac{R}{\frac{l}{s}} = \text{常数} = \rho \quad (1-2)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (1-3)$$

$$\therefore \rho = R \cdot \frac{s}{l} \quad (1-4)$$

这个比例常数 ρ 在电学上就叫做电阻率，亦称电阻系数。显然， ρ 的大小只与材料种类和加工状况有关。因此，各种金属元素的 ρ 值互不相同；就是同一种金属，加工状况不同时， ρ 值也会不同。

2) 电阻率的单位 电子工业中常采用下列单位衡量电阻率：

(1) 欧·厘米及微欧·厘米。当 R 以欧， s 以厘米²， l 以厘米为单位时，式 (1-4) 表明， ρ 的单位应为欧·厘米²/厘米 = 欧·厘米。

当 R 以微欧 ($=10^{-6}$ 欧)， s 以厘米²， l 以厘米为单位时， ρ 的单位为微欧·厘米。

(2) 欧·毫米²/米。当 R 以欧, s 以毫米², l 以米为单位时, ρ 的单位应为欧·毫米²/米。

绝缘材料一般用欧·厘米作单位; 金属导体因为电阻率太小, 常常用微欧·厘米计算; 各种导线因为细(截面积很小)而长, 用欧·毫米²/米表示其电阻率更加方便。

3) 电导率 物体传送电流的本领称为电导。它的大小常用电导率 γ 表示。电导率亦称电导系数, 是电阻率的倒数

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1-5)$$

其单位是 (欧·厘米)⁻¹、姆欧/厘米 (Ω/cm) 或米/欧·毫米²。电阻率越小的材料, 其电导率越大。

在实际应用中往往以 20°C 时的退火工业纯铜的电阻率 (0.017241 欧·毫米²/米) 作为标准, 规定其电导率为 1 (100%) 称为 1 IACS (“国际退火纯铜标准”)。其它金属的电导率就以其电阻率与标准铜电阻率之比的百分数表示。例如, 硬拉铜的电导率为 98% IACS, 锡磷青铜为 (10~25)% IACS, 等等。

4) 接触电位 当两种金属搭接在一起时, 电子易于从自由电子数多、电子云密度大、核吸引力小的金属中跳出, 并转移到另一金属中去。电子由金属中逸出(跳出)时所需要的最小能量叫作逸出功, 一般以电子伏为单位。各种金属的逸出功不同, 金属越活泼, 电子越易逸出, 逸出功越小。

金属逸出电子后, 负电荷减少, 正电荷相对增加。当两种金属相接触时, 逸出功小的金属, 电位升高, 形成正电位; 逸出功大的则形成负电位, 从而在接触处产生电位差。金属接触时, 由于电子转移而产生的电位差, 称为接触电位差。

常用金属的逸出功，按下列顺口溜逐次增大：Al、Zn、Sn、Cd、Pb、Sb、Bi、Hg、Fe、Cu、Ag、Au、Pt、Pd。排在前面的金属（如Al）与它后面的金属（如Cu）接触时，电位总是升高，呈正电位，如图1-9所示。而且相接触的两种金属，其逸出功相差越大，接触电位差也就越大。因此Al-Au的接触电位大于Al-Cu。



图1-9 Al与Cu接触时

电子的转移

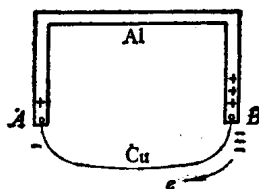


图1-10 Al-Cu热电势示意图

金属受热时电子活泼性变大，接触电位差变大。如果将Al-Cu的两端分别焊接起来，如图1-10所示，并将B端加热，则B端Al、Cu中的自由电子都要被激化，并获得较高的能量。结果从Al跑到Cu中去的电子数大量增加，使B端Al的电位显著升高；A端虽也有接触电位差，但Al的电位升高不多。这样，B端Al的正电位就会远大于A端，B端Al中的电子便不断注入Cu中，经过A端和Al再流回B端，而形成电流。由两种金属接触时两端受热不同所引起的电位差，叫做热电动势（或温差电势）。

A、B两端的温度差越大，两种金属单位容积中的电子数相差的倍数就会越多，热电动势也就越大，越容易测量。利用这个性质，选取热电动势很大的金属对，把两端焊起来，就能做成热电偶（或热偶）。通过测量热偶两端的电位差，可间接测量温度。铂（Pt）-铂铑（Rh）、铜-康铜和铬镍-铝