

# 第1章

点石成金

## 1.1

### 法拉第初识半导体<sup>[1]</sup>

---

地质学家们说,硅是我们地壳成分中含量仅次于氧的元素,坚硬的岩石、漫天遍地的黄沙、覆盖地球数百米深的土壤层,其中都含有大量的硅。

我们现在知道了,硅是一种半导体。千百年来,硅以及其他的半导体公主们,像一个个沉睡的美人,如童话故事《睡美人》中的奥罗拉公主那样,静静地躺在黄土和岩石中,等待菲利普王子来唤醒她。

英国物理学家迈克尔·法拉第(Michael Faraday, 1791—1867)第一个揭开了半导体材料的美丽面纱。法拉第不同于那个年代大多数玩科学的贵族学者,他生于一个贫苦的铁匠家庭,只读过2年小学,后来却成为一名著名的科学家。法拉第奋发图强的精神,为我们树立了一个自学成才的杰出典范。据说在爱因斯坦书房的墙壁上,挂了3幅科学家的肖像:牛顿、麦克斯韦和法拉第。

法拉第为生活所迫,13岁就当报了童,后来在一个订书匠的铺子里打工,因此有机会读很多的书。法拉第于茫茫书海中探索出他的科学之路,将人生的小舟驶向那一片他毕生钟爱的领域——电和化学。

法拉第的老师是汉弗里·戴维(Humphry Davy, 1778—1829),但这两个人的关系中却包含了许多一言难尽的故事。法拉第于戴维,既是学生和助手,又是雇员和仆人;戴维于法拉第,既是发现千里马的伯乐,却又因嫉妒,成为压制千里马不让其跑远的小人!

戴维也是一位伟大的科学家,是在元素周期表中发现了最多种元素的人。当年,是戴维将法拉第从一个书籍装订工变成了皇家学院实验室助手。尽管助手的

薪金并不高于订书工的,但这份工作却为法拉第的科学研究开辟了一条阳光大道。紧接着,戴维带着这个助手兼仆人遍游欧洲。一路上,戴维那个自认为血统高贵的夫人对法拉第颐指气使,大伤法拉第的自尊心。

后来,法拉第做出了许多重大发现。特别是有一个戴维失败了实验,却被法拉第成功地完成了!那是通电导线在磁场中旋转的实验,实际上也就是说,法拉第造出了世界上第一台电动机的雏形!法拉第的成功令戴维忐忑不安,这位大科学家的虚荣心受到了严重挫伤。戴维不能接受洗瓶子的小实验员超过自己的事实,嫉妒之蛇缠住了他的心灵,使他做出了对法拉第的诬陷:他指责法拉第剽窃另一位物理学家沃拉斯顿的成果。之后,即使法拉第在科学界的声望已经大大超过了戴维,但在戴维的打压下,他仍处于“墙内开花墙外香”的境地。法拉第在皇家学院仍然是一个拿着低薪的小小实验员!大多数科学家,包括沃拉斯顿在内,都为法拉第鸣不平,联名推荐法拉第成为皇家学院会员。在皇家学院会员选举为法拉第投票的时候,戴维再一次地表现出小人之举,投了唯一的反对票。

法拉第拥有高尚的人格,他一直把戴维当作恩师,即使到了耄耋之年,还经常指着戴维的肖像说:“这是一个伟大的人啊!”

戴维于1829年,51岁时就英年早逝。也许他后来良心发现,在他逝世前几年,疾病缠身之时,他提名推荐法拉第担任自己曾担任过的职务——皇家学院实验室主任。据说在戴维临终时,别人问及什么是他一生中最重要的发现时,他没有列举周期表里那些被他发现的元素,而是自豪地说:“我最伟大的发现是发现了法拉第!”

而法拉第平生最伟大的发现又是什么呢?应该是他1831年发现的电磁感应现象。因为这是发电机的基础,从此开辟了电气时代的新纪元。

现代的人无法想象,如果没有电,世界将会是什么样子?也不知道在另一个星球上,如果存在另一种高等生物构建的文明社会,它们是不是也使用“电”这个玩意儿。

不管是上帝赋予的必然,还是某种偶然,从认识“摩擦生电”,到“电”真正登上

人类的生产和生活舞台，众多科学家的努力功不可没。其中，法拉第的贡献可以说最为显著。

戴维去世后，法拉第这匹千里马摆脱了缰绳的羁绊，自由自在地驰骋于天地之间。法拉第从 1831 年开始从事纯粹的科学研究。他夜以继日地工作，做了无数的实验，从各个角度探讨电、磁、物质之间的关系，写下了大量的报告，汇集在《电学实验研究》这部巨著中。因为他杰出的贡献，法拉第被后人誉为最伟大的实验科学家。

科学研究不仅需要科学家投入时间和精力，富有勇气，有时甚至还须冒生命的风险。富兰克林在下雨天放风筝，将雷电从风筝线上引下来，以证明打雷闪电是大气中的电产生的。无独有偶，法拉第则制造过一次人工雷电。法拉第研究静电屏蔽时，做了一个后人称为“法拉第笼子”的东西，也就是一个大立方体状的金属架子，上面铺了一层铜网。铜网加上高压电后，噼噼啪啪、火花四起，令人心惊肉跳，法拉第却微笑着站在里面，他以此来证明金属中的电荷聚集在表面上，向大家演示静电屏蔽的作用。

因为法拉第未受过正规教育，数学基础欠缺，所以他在发展电磁理论方面受到了限制，将此殊荣留给了麦克斯韦。不过，也可能正因为数学不够好，法拉第对物理概念理解得特别透彻、精辟，极富创造力，他用场的概念挑战牛顿的绝对真空和超距作用理论，提出“实物粒子，就是力场的中心奇点”的观念，并认为各种力，如电、磁、光、引力等，都应该可以在场的相互作用、相互转化中统一起来。

法拉第所生活的年代，早已有了导电金属与不导电绝缘体的划分，人们却还不知道半导体为何物。法拉第在研究金属导电性的时候，偶然观察到了硫化银导电的一个异常现象。

在《电学实验研究》(*On Conducting Power Generally*)中，法拉第写道：“我最近遇到一个非同寻常的现象，这种现象与温度对金属组织的影响是截然相反的。对硫化银来说，电导率随温度上升而上升，关灯后，电导率随温度下降而下降。”

上文法拉第的记录中用的是“电导率”，换成电阻来叙述，就是说硫化银的电阻

随着温度的上升而降低。而人们知道,大多数金属的电阻是随着温度的升高而升高的。因为随着温度升高,金属晶格的振动加剧而阻碍自由电子的移动,从而导致电阻的增大。但硫化银的表现却相反。如此看来,硫化银应该代表了这样一类物质:它们具有一定的导电性(热敏性),但又不同于金属,这就是我们现在所熟知的半导体。

在法拉第对电磁理论作出的诸多贡献中,这个被他首次发现的物质特性,只是一个很不起眼的小东西。法拉第对此现象感到奇怪,却并未特别在意。半导体睡美人的面纱,被法拉第轻轻地抖动了一下,揭起一角,又轻轻地盖上了。

## 1.2

### 敏感的公主们

---

法拉第发现半导体硫化银的导电性随温度上升而增加,而 100 多年后的今天,我们把它归纳到半导体的特性之一,即热敏性。

其实,我们现在知道,像硅这样的半导体公主们,她们最大的特点就是敏感性。一般情况下,她们不导电,禁止电流通过身体,如同绝缘体。但是,就像法拉第第一次所观察到的,如果条件改变了,温度升高了,她们的导电性会增加,便有可能允许电流通过。这也就是我们称她们为“半导体”的原因。除热敏性之外,半导体的敏感特性还有光敏性、整流性以及掺杂性。我们在这一节中讲述光敏性。

继法拉第之后,法国物理学家 A. E. 贝克勒尔(A. E. Becquerel, 1820—1891)发现了光生伏特效应。

贝克勒尔一家四代人中出了 5 位物理学家(图 1.2.1)。图 1.2.1 中的几个人,除贝克勒尔的兄长去世早,不广为人知外,其余人都成就不凡。A. E. 贝克勒尔的父亲曾在拿破仑麾下服役,滑铁卢战役之后专攻科学,曾促进了电化学的创立,也是率先研究电发光现象的物理教授; A. E. 贝克勒尔的儿子亨利·贝克勒尔,因发现天然放射性现象,与居里夫妇分享了 1903 年的诺贝尔物理学奖;他的孙子后来也是法国颇负盛名的物理学家。

物理学告诉我们,电和光都是能量的某种存在方式,这两种能量会互相转换。电转换成光的现象在大自然中经常可以看到,比如带电的大气放电时产生的闪电。科学家在实验室里研究放电现象时,经常观察到的火花和闪光等,也是电能转换成

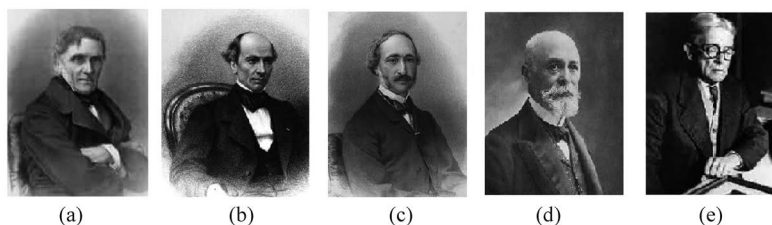


图 1.2.1 贝克勒尔物理世家

(a) 安托万·塞萨尔·贝克勒尔(Antoine César Becquerel, 1788—1878), A. E. 贝克勒尔的父亲; (b) 路易斯·阿尔弗雷德·贝克勒尔(Louis Alfred Becquerel, 1814—1862), A. E. 贝克勒尔的兄长; (c) A. E. 贝克勒尔; (d) 亨利·贝克勒尔(Henri Becquerel, 1852—1908), A. E. 贝克勒尔的儿子; (e) 吉恩·贝克勒尔(Jean Becquerel, 1878—1953), A. E. 贝克勒尔的孙子

光能的例子。但是,从光到电的现象就不是那么普遍了。贝克勒尔物理世家电光闪烁,他们不是研究光,就是研究电。当时,A. E. 贝克勒尔的父亲就是从化学角度来研究电发光现象的。父亲研究从“电”到“光”,儿子则进一步地想,光是不是也能产生电呢?果然不出所料,1839年,19岁的A. E. 贝克勒尔在他父亲的实验室里,第一次观察到了这种现象。

A. E. 贝克勒尔将氯化银放在酸性溶液中,用两片浸入电解质溶液的金属(铂)作为电极,见图 1.2.2。贝克勒尔发现,当有阳光照射时,两个电极间会产生额外的电压。这不就是“光”转换成了“电”吗?贝克勒尔将此现象称为光生伏特效应(简称光伏效应),这是历史上首次发现的半导体的第二个敏感特征。

贝克勒尔发现的是液体中的光伏效应,也被称为贝克勒尔效应。到 1883 年,亚当斯等人在金属和硒片上发现了固态光伏效应,并制成了第一个“硒光电池”<sup>[2]</sup>。

1873 年,英国的史密斯同样使用硒晶体做实验,发现这种材料在光照下导电性增加,这是半导体又一个与光照有关的特性:光电导效应。从此,对光特别敏感的半导体——“硒”公主登上了历史舞台。

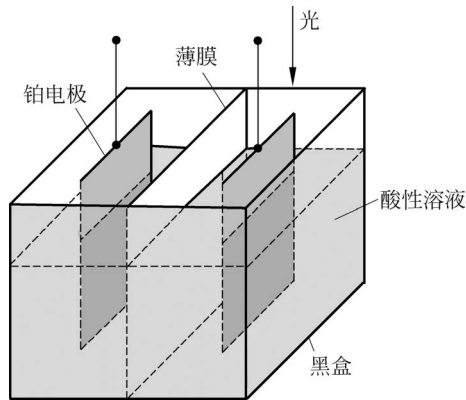


图 1.2.2 光生伏特效应

从现代物理学的观点来看,刚才叙述的半导体的两个特性,光伏效应及光电导效应,与 1887 年德国物理学家赫兹发现的光电效应(也称外光电效应),在物理本质上是相关的。我们可把它们都归类于半导体的光敏性,也可以统称为光电效应。

外光电效应<sup>[3]</sup>最早是被德国物理学家赫兹发现的。赫兹用两个锌质小球做实验,当他用光线照射一个小球时,发现有电火花跳过两个小球之间。如果用蓝光或紫外线照射,电火花最明显。这个现象后来(1905 年)被爱因斯坦从量子力学的观点加以解释,并使爱因斯坦得到了 1921 年的诺贝尔物理学奖。

与贝克勒尔家族类似,赫兹一家也有好几位物理学家(图 1.2.3)。发现光电效应的海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)和发现电磁波的赫兹是同一个人。鲁道夫·赫兹虽然只活了 36 岁,但他的两个发现都举足轻重:电磁波的发现证明了麦克斯韦电磁理论的正确性,而光电效应的发现对量子理论的创立及发展功不可没。

鲁道夫·赫兹的侄子古斯塔夫·路德维希·赫兹(Gustav Ludwig Hertz, 1887—1975)也是物理学家。他是量子力学的先驱,1925 年诺贝尔物理学奖获得者。路德维希·赫兹的儿子卡尔·赫尔穆特·赫兹(Carl Hellmuth Hertz, 1920—1990)则发明了医疗用超声波技术和喷墨打印技术。

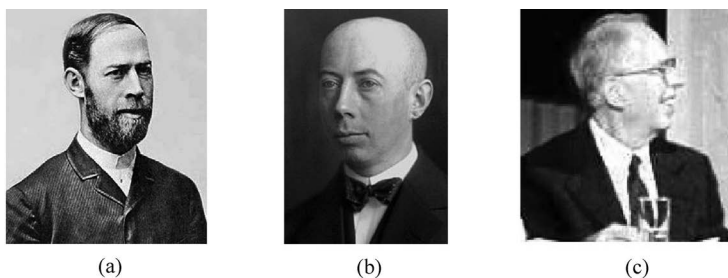


图 1.2.3 赫兹一家的 3 位物理学家

(a) 海因里希·鲁道夫·赫兹；(b) 古斯塔夫·路德维希·赫兹；  
(c) 卡尔·赫尔穆特·赫兹

赫兹当时发现的是金属的外光电效应，而半导体也能产生外光电效应。统而言之，光电效应指的是因光照而引起物体电学特性的改变。半导体的光电效应分为光电子发射效应、光电导效应和光伏效应。第一种发生在物体表面，即外光电效应。后两种发生在物体内部，称为内光电效应。

图 1.2.4 说明了半导体中几种光电效应的异同点（注意：在图中提前使用了尚未介绍的半导体中电子的能带图。我们将会在第 2 章中简述固体的能带理论。对此不熟悉的读者，可在学过能带理论之后，再返回来重新阅读下面的段落）。

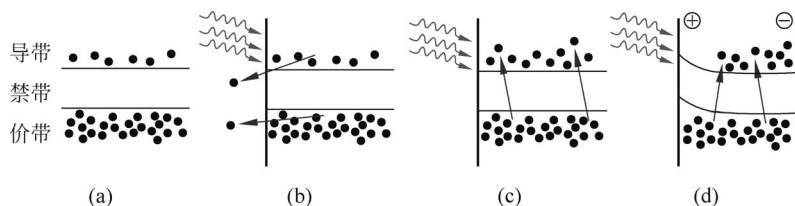


图 1.2.4 半导体的光电效应

(a) 光照前；(b) 光电发射(外光电效应)；(c) 光电导效应(内光电效应)；  
(d) 光伏效应(内光电效应)



半导体材料无光照时,导带上有很少的自由电子。在光照射情况下,低能量的电子吸收了光子能量,从键合状态过渡到自由状态。如果光子的能量足够大,使得电子能够逸出物质表面而发射出去,这便是被赫兹所观测到的光电发射效应,或称外光电效应。如果低能级的电子吸收了光子能量后,并未被发射,而只是被激发跃迁到导带中,则大大地增加了自由电子的数目,从而增强了物质的导电性。这种现象称为光电导效应。更进一步,如果被光照射的物质材料不均匀,或由两种不同的物质层构成,这时,两种物质在光照下产生的导电性能变化不一样,使得自由电子偏向于离开一种物质而聚集到另一种物质,由此而形成电位差,这便是 1839 年首次被贝克勒尔观察到的光伏效应。