

点石成金

1.1 法拉第初识半导体^[1]

地质学家们说,硅是我们地壳成分中数量仅次于氧的元素,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,后来却成为一个著名的科学家。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,

挂了三幅科学家的肖像：牛顿、麦克斯韦和法拉第。

法拉第被生活所迫，13岁就当了报童，后来在一个订书匠的铺子里打工，因此也使他有机会读很多的书。后来，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水域——电和化学。

法拉第的老师，是汉弗里·戴维(H. Davy, 1778—1829)，但这两个人的关系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，后来当了几回陷害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20岁的书籍装订工变成了他的皇家学会实验室助手。尽管这个工作的薪金并不高于订书工，但却为法拉第的科学研究开辟了一条阳关大道。紧接着，戴维带着这个助手加仆人遍游欧洲。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，使他有那种被中国人叫做“忍受胯下之辱”的感觉。

再后来，法拉第做出了许多重大发现。特别是有一个戴维失败了的实验，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个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，只是“墙内开花墙外

香”的状况。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，戴维再一次地表现小人之举，投了唯一的一张反对票。

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，50 岁时就英年早逝。也许他后来也良心发现，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担任过的职务——皇家学院实验室主任。另外，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，他没有列举那些周期表里被他发现的元素，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，它们是不是也是使用“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，一连串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，这匹千里马摆脱了绳索的羁绊，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的研究。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,写下大量的报告,汇集在《电学实验研究》那部巨著中。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。

科学研究不仅需要时间和精力的投入,还需要勇气,有些科学家甚至付出生命的代价。富兰克林冒着危险,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,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,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 1833 年《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。因为温度升高，会使得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，硫化银应该代表了某些另一类物质：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做出的诸多贡献中，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，揭开一角，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，而一百多年后的今天，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，禁止电流通过她们的身体，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。这也就是为什么我们将她们称为“半导体”的原因。除了热敏性之外，半导体的敏感特性还有光敏性、整流性，以及掺杂性。我们在这一节中叙述光敏性。

继法拉第之后，法国物理学家 A. E. 贝克勒尔（Alexandre-

Edmond Becquerel, 1820—1891)发现了光生伏特效应。

贝克勒尔一家四代人中出了五个物理学家,见图 1.2.1。A. E. 贝克勒尔是中间一位,其余是:

Antoine César Becquerel(1788—1878), A. E. 贝克勒尔的父亲。

Louis Alfred Becquerel(1814—1862), A. E. 贝克勒尔的兄弟。

Henri Becquerel(1852—1908), A. E. 贝克勒尔的儿子。

Jean Becquerel(1878—1953), A. E. 贝克勒尔的孙子。



Antoine César

Louis Alfred

A.E. Becquerel

Henri

Jean

图 1.2.1 贝克勒尔物理世家

图 1.2.1 中的几个人,除了第二位贝克勒尔去世早,不广为人知外,其余的都成就不凡。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，如果有阳光照射时，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，这是历史上最早被发现的半导体的第二个敏感特征。

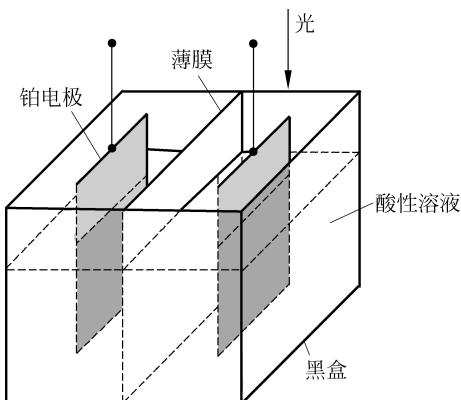


图 1.2.2 光生伏特效应

贝克勒尔发现的是液体中的光生伏特效应，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”^[2]。

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。

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^[3]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。

和贝克勒尔家族类似,赫兹一家也有好几个物理学家(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。

海因里希·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。

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。总而言之,光电效应指的是因光照而引起物体电学特性的