

# 微电子技术的先导

## 纪念晶体管诞生七十周年

申浩

(首都师范大学物理系 100048)

今天,晶体管在大众的视线里已不多“见”,但却在生活中处处都有,它是20世纪伟大的科学发明之一,并助力了现代电子计算机的发展。第一只晶体管由贝尔实验室的科学家在1947年发明,他们也因此而获得了1956年诺贝尔物理学奖,他们分别是肖克利(W. Shockley,1910~1989)、布拉顿(W. Brattain,1902~1987)和巴丁(J. Bardeen,1908~1991)(图1)。在晶体管诞生70年后的今天,我们回顾它的发明过程,体会在它发明之路上的曲折,看它为何又能以集成电路重要组成元件之一的身份引发微电子技术革命。

### 从真空管谈起

英国物理学家和电气工程师弗莱明(J. Fleming)



图1 晶体管的三位发明者  
肖克利(前)、巴丁(后一)、布拉顿(后二)

在1904年发明了具有检波作用的二极管,这是最早的真空管(或称电子管),并在1910年左右,二极管被用在了电话的开关电路中。为了提高真空二极管检波的灵敏度,美国科学家福瑞斯特(L. Forest)在管内添加了一种栅栏式的金属网,形成电子管的第三个极。这个“栅极”仿佛就像百叶窗,能控制阴极与屏极(即阳极)之间的电子流,只要栅极有微弱电流通过,就可在屏极上获得较大的电流。也就是说,在弗莱明的真空二极管中增加一个电极可做成有放大作用的新器件,福瑞斯特把这个新器件命名为三极管,这样有放大信号作用的真空管就被发明了出来。当时美国电话电报公司已经决定建造一条连接美国东西海岸的跨大陆电话线,急需发展一项新技术以放大电话的信号。当福瑞斯特给电话电报公司演示他的发明后,公司的一名物理学家改进了福瑞斯特的三极管,由此解决了信号放大问题。

不幸的是,让真空三极管同时具备二极管和放大器功能的部件——加热的阴极——也恰恰是它的致命缺陷。真空管的使用需要预热,加热需要一段时间,而且会消耗很多的能量,尤其是当系统内有多个真空管同时工作的时候消耗更大,时间久了管内用作阴极的金属丝常常还会被烧断。这样,真空管的弊端开始显露。

其实1904年发明二极管(真空管)之后,不只是三极管甚至四极管(真空管)、五极管(真空管)相继出现,它们的检波、整流和放大性能大大推动了有线和无线通信、广播和电视的发展(图2)。但是它们的寿命低、体积大、可靠性差和成本高的缺点使科



图2 几种不同的真空管

学家和工程师们十分烦恼。随着真空管慢慢发展了30多年,科学家们越来越觉得真空管对电子科技的迅速发展已经变得不适应了,寻找其他材料来代替真空管,在信号放大之路上变得十分的关键。

### 晶体管发明前夕

在寻找新型材料制作电子器件时,许多科学家们想到了半导体晶体材料。那时,半导体正在取代金属和绝缘体这两翼而占据固体物理学的中心位置,它奇特的性能和已崭露头角的应用激起了人们的兴趣,期待着它能成为新一代电子器件。

人们对半导体的认识比较早,目前知道的最早可以追溯到法拉第(M. Faraday),他在1833年就发现硫化银的导电性随温度升高而增强,当达到最大值后温度若还升高其导电性就反而下降,这和一般的金属导体导电性是不一样的。1839年法国的科学家贝克勒尔(A. Becquerel)发现,光照在半导体上不同的位置可以产生电势差,进而发生电流流动。1873年英国的史密斯(W. Smith)又发现光可以改变半导体的导电性。再后来德国的布劳恩(K. Braun)发现某种情况下辉铅矿作为半导体只在一个方向上产生电流,即发现了半导体的整流作用,这正是真空管就具有的作用。二战期间德国又研究了硫属半导体红外探测器在军事上的应用。美国也在研究锗、硅半导体材料,这两种材料做成的半导体二极管对微波雷达的发展起了重要作用。因此,半导体材料的应用及其特性的广泛研究更加坚定了科学家们努力的方向,即加深对固体物理基础理论

知识的研究。后来,贝尔实验室的巴丁也说过:“除了固有的科学意义外,选择半导体作为一个有希望的领域来开拓,其重要原因是1945年前后,半导体在电子器件中已有了许多日益增长的应用,像二极管、变阻器和热敏电阻等。用半导体做三极管或放大器是有希望的。”

在发明晶体管的理论准备上,量子力学的理论发挥了根本性的作用。量子力学作为一种新的描写微观物质的物理学理论,越来越受到重视,并逐渐发展成为原子物理学、核物理学及粒子物理学等相关学科的理论基础。而且,量子力学的发展还促进了固体物理的研究,比如20世纪30年代前后,“能带论”就是将量子力学应用于固体物理的结果,能带论在研制半导体放大器的过程中具有重要的指导意义。后来在1939年,半导体导电的研究领域又出现新的理论,即P型导电和N型导电。N型导电是指半导体中价电子移动参与导电的过程,但P型导电却不是这样。当半导体中的负电子受热激发离开原先位置时会留下一个空的位置,这个空的位置在体系里就显了正电,这个显正电的空位置叫做“空穴”,邻近的电子会补充进入这个空穴,这样邻近电子在它离开的位置又会生成新的空穴,如此由于电子一直补充,空穴一直移动就会形成正的电流,这种由空穴移动形成的导电就是P型导电。由于导电形式不同,半导体也分为了P型半导体和N型半导体。之后,基于该理论提出的PN结原理也促进了晶体管的发明。

贝尔实验室在确定了大体研究方向后于1936年开始召集相关的精英人才,希望能组成一个固体物理研究小组。实验室研究部指导凯利(J. Kelly)认为,要从半导体中去寻找代替真空管的材料,就有必要聘请固体物理学方面的人才,所以他把目光转向人才辈出的麻省理工学院,发现肖克利是一位很有研究才能的人。当时肖克利刚毕业,正是量子力学逐渐向各个学科渗透的年代,他正好想用量子力学处理固体物理问题,于是他加入了小组并在第二年发起了量子力学研讨会。小组成员还有布拉顿,

他早在1929年就明尼苏达大学物理学博士进入了贝尔实验室,主要研究固体的表面性质。1931年,布拉顿参加过一个理论物理研究班,学习到了一些量子力学的知识,这对他之后的工作很有帮助。小组中还有几位科学家,分别是尼克斯、哈德森和沃尔里奇等。小组建成后,发起人凯利对大家说:“你们可以做你们喜欢的任何项目,你们要做的任何事情对我来说都是对的。”凯利的充分发挥研究人员兴趣、特长和自由创造性的政策,是后来晶体管在该实验室发明出来的重要原因之一。

### 第一只晶体管诞生

小组里最先有做固体放大器的想法的是肖克利,他在1939年想到了用氧化亚铜代替三极管做放大器。三极管与二极管的根本差别就是三极管中有栅极,所以肖克利想在氧化亚铜整流器中加入一个栅极实现放大作用,但是富有实验经验的布拉顿认为这在当时其实是不可能做出来的。之后,由于爆发了第二次世界大战,肖克利和布拉顿去参加了潜艇检测研究,实验室的工作被迫停止。

1944年肖克利和布拉顿回到贝尔实验室继续科研工作,翌年二战将近结束时,原固体物理组进行改组,由物理化学家摩根和肖克利作领导人,并且在肖克利负责下成立了半导体物理小组,小组成员最初有布拉顿、皮尔森、吉布尼和穆尔,随后巴丁加入。这样,在小组的成员中,肖克利和巴丁是出色的理论物理学家,布拉顿和皮尔森是实验物理学家,吉布尼为物理化学家,穆尔主管电子线路方面的工作,如此专业的人才搭配,对晶体管的发明着实起了很大的作用。

在研究固体放大器时,半导体小组采用了理论先行的策略,优先探究半导体及其性质的理论基础,再考虑实验研究和具体的器件发明工作,而理论研究正是肖克利和巴丁两位理论物理学家的专长。肖克利按照简化半导体模型进行计算后得出结论,假如半导体薄膜的厚度与表面空间电荷层厚度差不多,那就可以利用垂直于表面的电场来调制

薄膜的电阻率,从而可以控制表面电流,也就能实现放大作用。这就是肖克利提出的“场效应”理论。肖克利还组织布拉顿等人进行验证过这个原理,但是实验结果和理论之间有很大的偏差,肖克利未能解释出现这种问题的原因,这使场效应原理失去了研究放大器的说服力。后来巴丁反思了场效应实验,意识到这个指导理论是错误的或者说不完全正确,于是他在1946年3月的一次小组会议上提出表面态的概念。这个继场效应之后提出的新理论认为,在外加横向电场作用下,电子被吸引到半导体的表面并被束缚在那里,形成严密的屏蔽,阻止了电场穿透到半导体内部,使存在于内部的正电荷载流子免受影响,而负电荷载流子又被捕获在表面上,不能形成电流。该理论说明表面态的存在使利用场效应原理制成放大器的研究难以实现,也成功地解释了肖克利场效应原理中实验与结论不符的矛盾,它的提出,使人们对半导体表面的认识更进一步。

于是小组的注意力开始转移到处理表面态的问题上。在一次实验中,布拉顿意外的发现,当他把实验系统浸在电解液里时,他所研究的光生电动势大大增强了,并且调节样品和电极之间的电压大小与方向时,光生电动势也会随之改变。布拉顿的实验结果一被发现,小组成员们马上敏锐地觉察到,这就是肖克利曾提出的场效应现象,由于电解液影响了表面的电荷分布,改变了半导体的表面态,所以场效应得以出现。当然,小组成员都没有忘记肖克利曾提出的利用场效应做放大器的想法,他们立刻开始去着手实现这个计划。

此时已经到了1947年11月,肖克利在小组里表现得没有之前那么活跃了,他开始自己在家思考一种别的思路,并去研制固体放大器,但他并没有告诉小组里的其他人。小组的工作重点围绕巴丁和布拉顿展开,11月21日,他们二人开始具体讨论研制半导体放大器的方案。在他们设计的电路中,有一部分是这样的,将一滴蒸馏水滴在了晶体表面作为电解液来改变半导体表面的电荷分布,然后又



用薄石蜡封住的金属针尖穿过晶体表面的水滴插入到硅半导体的表面内,此时半导体器件成功出现了放大效应,但很微弱。在巴丁的建议下改用锗半导体,效果更明显,但实验结果仍然不具有实用价值。因为水容易蒸发,难以维持稳定的表面态,即使改蒸馏水为不易蒸发的硼酸二醇,仍然存在一个问题:由于电解液动作缓慢而导致响应频率过低,这个装置根本不能用来放大人的声音,所以必须想出其他的解决办法。

在接下来的实验中,小组成员注意到电解液下面的锗表面有一层氧化膜,氧化膜是绝缘的,于是布拉顿直接去掉电解液代之的是在这层氧化膜上蒸镀一个金点作为电极,并在金点中央留一小孔可以让针尖穿过与锗表面接触。然而当他们在两极之间加上电压时,出现了意外事故,针尖在金点小孔处发生了放电现象,锗表面流向针尖的电流增大了。原来,在处理之前的电解液的时候,氧化膜已经被破坏了,这个意外使他们的计划不能再顺利进行下去,实验状况一度陷入很糟的境况。但是他们不想放弃,在巴丁和布拉顿认真讨论后,巴丁认为如果在锗晶体表面做成两个点接触并且尽可能的靠近,应该能解决他们遇到的问题。布拉顿听从了巴丁的建议,成功地设计出一种可以实现这个方案的装置。他们找了一个尖锐的三角形塑料片,将一条金箔牢牢地覆盖在两条锐边上,在锐边的顶点用薄薄的刀片将金箔切开成两部分,最后用弹簧把顶点压在锗表面上,这样被切开的两段在顶点处就形成了一个距离很接近的点接触(图3)。12月16日下午,他们的这个实验成功了,这个装置的放大量级可达100倍,并且输出的音频信号还很清晰,于是第一只晶体管诞生。又经过一星期的验证后,最终于12月23日,研究小组在贝尔实验室对内宣布了这个发明,并且现场演示了晶体管的工作过程,在场的人员都十分激动。

之后是晶体管命名以及对外宣布的故事。在确定名字的时候,巴丁和布拉顿求助与贝尔实验室的另一位科学家皮尔斯,皮尔斯在得知原委后,根据



图3 点接触晶体管发明时的装置

电子管的工作特性“transconductance”选取了这个单词的“trans-”部分,又根据电阻器的单词“resistor”组合成“transresistor”,但他们认为这个单词太长了,为了表明晶体管的微小性缩写成了“transistor”,这样名字就定下来了。但由于申请专利和军方原因以及技术保密,晶体管对外宣布的工作推迟了许久,直到1948年6月30日,贝尔实验室最终决定对外公布这个发明。在新闻发布会上,发言人说到:“我们今天所展示的成果代表一个团队合作的范例。”并且用一段话解释了他手中的圆柱形的物体:“我们称之为晶体管,T-R-A-N-S-I-S-T-O-R,因为它是一个电阻器,或者说是可以放大电子信号的半导体装置……它类似于真空放大器,但是他们之间没有相似处。它既非真空,也没有钨丝和玻璃管。它完全是由冰冷的固态物质组成的。”所以晶体管其实并不是“管”,而是由半导体晶体制成的具有真空管作用的固体器件。可惜的是,除了工程界的人员认识到了晶体管可能会带来巨大变革外,媒体对它的发明并没有足够高的热情,比如新闻发布会第二天《纽约时报》对此只在无线电栏目中编辑了寥寥数语,那时人们还没有意识到晶体管将是20世纪非常伟大的科学发明之一。

### 点接触晶体管之后

巴丁和布拉顿申请发明专利的时候,专利代理人分别询问了他们二人有关发明的事情,认为在晶体管发明的过程中两人的贡献是对等的,而且在关

键性的后期实验中肖克利没有参与,于是点接触晶体管的发明人最终只列了巴丁和布拉顿。但是肖克利认为是他领导了整个半导体物理小组,并且使点接触晶体管起作用的场效应也是他在组里最先提出来的,他希望可以把他也列为晶体管的发明人之一。但当专利律师在检索专利档案时发现,场效应概念并不是一个新鲜事物,一位波兰裔的美国科学家于1930年就已经申请了这个专利,且文献中也已出现过,其专利内容与肖克利的场效应原理包含同样的物理过程。肖克利感觉自己在点接触晶体管发明的事情上已经没有了话语权,转而继续思考他正在私下研究的固体放大器,这是一个三层结构类似于“三明治”型的半导体,后来被称作结型晶体管。

结型晶体管不同于点接触晶体管,点接触晶体管相对于结晶体管工艺复杂,于是肖克利设想用P型半导体与N型半导体相联结的方式制成P-N结,用P-N结代替点接触,这样不但工艺简单性能还更稳定,并能大大提高晶体管的使用价值。1948年6月26日,结型晶体管的专利申请在贝尔实验室做了备案,然而由于半导体材料单晶化工艺不成熟使结型晶体管的制作一直没有成功,直到1950年4月才成功做出第一只结型晶体管。点接触晶体管可以说是揭开了晶体管发明的序幕,但结型晶体管由于其更加优越的性能,后来便逐渐取代了点接触晶体管。虽然第一只晶体管的发明人没有肖克利,但可以看出肖克利在贝尔实验室中,从1937年发起量子力学研讨会和1939年最早试图研制半导体器件以代替真空管时起,到1944年之后领导半导体物理小组,基本参与了整个小组发明晶体管的全过程,以及他独立发明结型晶体管,肖克利能与巴丁、布拉顿共同获得诺贝尔奖是当之无愧的。

晶体管发明后首先应用于助听器,后来又被广泛应用于收音机,再之后就是电子计算机了。回想世界上第一台电子计算机的组成,占地面积170平方米,重30吨,其中有18000只真空管。晶体管出现了,人们就可以用晶体管代替这么多的真空管,

它不但比真空管更小、更稳定,而且能耗非常低,还可以在电子线路中的元器件数量也大大增加,这一进步是很大的(图4)。

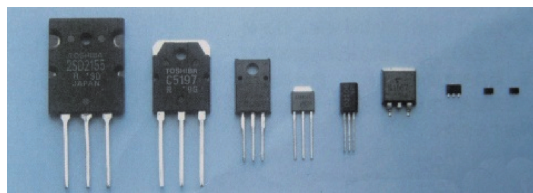


图4 几种不同的晶体管

### 晶体管发明的启示

70年前的1947年,贝尔实验室里发明出了第一只晶体管,就是这样一个小小的半导体器件成为了打开微电子技术大门的第一把钥匙。随着晶体管的广泛应用和半导体工作的普遍化,科学家把成千上万的电子元件集中在同一电路中,最终出现了集成电路。晶体管作为集成电路的关键部件引发了微电子技术革命并大大发展了半导体理论与技术,而且作为当今社会信息化、互联网化以及大数据等高新技术的基础,带动了现代科学技术的快速发展。回顾整个晶体管发明的过程,从真空管显现的弊端引出晶体管代替真空管的设想,到战后巴丁、布拉顿一起做点接触晶体管,再到肖克利独自发明结型晶体管,虽然过程中有一些意外的因素,但小组成员尤其是巴丁和布拉顿的努力探究才是最重要的,因为机会总会给有准备的人。其间涉及多方面的理论知识和技术,不只是现代量子力学理论和半导体能带论发挥了作用,高纯度半导体制作工艺同样十分重要,这里看出了理论与技术的融合在科技发明中的重要作用。还有凯利作为当时贝尔实验室领导,他任由大家发挥其才的管理作风以及人员的搭配,也是在多学科协作下晶体管得以诞生的重要条件。因此,是否未来科学技术进步的道路也像晶体管的发明之路一样,虽曲折但极具意义,多种人才搭配,多学科协作,鼓励人才自由发挥,理论与技术融合,使固有的领域成为创新的土壤,在每一次的偶然发现中分析它必然的原因,推动社会不断向前快速发展。