

# 晶体管发明70周年纪念

姬 扬

(中国科学院半导体研究所 100083)

1947年12月23日,美国贝尔实验室正式地成功演示了第一个基于锗半导体的具有放大功能的点接触式晶体管,标志着现代半导体产业的诞生和信息时代的开启。晶体管可以说是20世纪最重要的发明,到今天已经整整70年了。

严格地说,晶体管泛指一切单个半导体元件,经常用来指代半导体材料制成的三极管、场效应管,等等。它的英文名字是 transistor,来自于 trans-resistance(即 transfer resistance),也就是所谓的“跨阻”,指的是输出端电压变化与输入端电流变化的比值(单位是欧姆),反映了输入对输出的影响能力。晶体三极管进入中国的时候,真空三极管还在广泛使用,晶体三极管的巨大成功使得晶体管不仅特指与英文原名 transistor 似乎关系不大的晶体三极管,更是泛指了所有的单个半导体元件。

## 晶体管的诞生

在晶体管诞生之前,电信号的放大主要是通过电子管(真空三极管)。这种器件是1907年由德福雷斯特(L. Forest)发明的,其实质是在1904年弗莱明(J. Fleming)发明的真空二极管的阴极和阳极之间添加了另一个电极(所以称为“三极管”),从而实现了电流的放大功能,后来又因为“反馈”概念的引入而进一步改善了器件性能。真空三极管制作起来很困难、寿命很短,而且体积大、耗能高、易损坏,严重限制了其应用范围,人们一直希望能够用固态器件来替换它。一个简单的想法(但是在当时很难实现)就是,往半导体整流器(二极管)里放置一个栅极。1938年,德国的希尔什(R. Hilsch)和珀尔(R. Pohl)把三个电极插入溴化钾晶体里,成功地演示了

第一个基于色心的晶体管模型,可惜其工作频率只有1 Hz甚至更差。此后,其他人也做过一些尝试,但是都没有成功。

1945年,贝尔实验室计划针对几种新材料(包括硅和锗)进行有目标的基础研究(类似于我们现在说的“应用基础研究”),以了解其潜在的应用前景。为此成立了“半导体小组”,肖克利(W. Shockley)是组长,成员包括巴丁(J. Bardeen)和布拉顿(W. Brattain)。肖克利和巴丁都是理论物理学家,而布拉顿则是实验物理学家(图1)。起初的工作是基于肖克利偏爱的金属-半导体结构,在多次尝试失败之后,巴丁认识到半导体的表面缺陷有着非常不利的影响,必须找到“钝化”表面(消除缺陷)的方法。从1947年11月起的短短几个月时间里,他们取得了重大的进展,终于实现了第一个半导体晶体管。

实际上,这个时期发明了两种全然不同的晶体管:巴丁和布拉顿在1947年12月发明了点接触式晶体管(图2),把间距为50  $\mu\text{m}$ 的两个金电极压在锗



图1 从左到右,巴丁(1908~1991)、肖克利(1910~1989)和布拉顿(1902~1987)。他们的关系并不像照片里显示的这么融洽

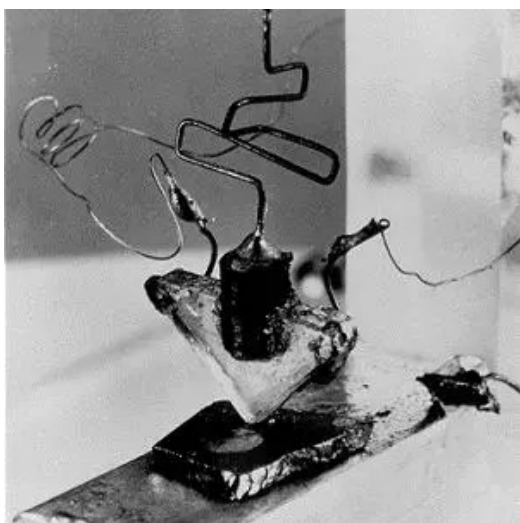


图2 巴丁和布拉顿发明的点接触式晶体管

半导体上,微小的电信号由一个金电极(“发射极”)进入锗半导体(“基极”)、被显著放大,并通过另一个金电极(“集电极”)输出,这个器件在1kHz的增益为4.5;一个月后,肖克利发明了三明治结构的双极性结式晶体管,最外面的两层是N型半导体,中间则是P型半导体,但是直到1950年,蒂尔(G. Teal)和斯帕克斯(M. Sparks)才制作出锗基NPN结式晶体管。从实用的角度来看,点接触式晶体管的产量非常有限,不能算是商业上的成功;结式晶体管却使得现代半导体工艺成为可能,为许多半导体公司的兴起做出了重大贡献。1956年,巴丁、布拉顿和肖克利因为晶体管的发明而获得了诺贝尔物理学奖。晶体管发明的历史其实很复杂,牵扯到科学和技术、团体和社会之间的微妙关系,详细的描述可以参阅科学史专著①和科普书籍②③。

### 晶体管发明之前的半导体科技

第二次世界大战刚刚结束两年,晶体管就被成功地研制出来了。为什么是这个时候?为什么不能更早些呢?因为半导体科技的发展是材料、物理和器件这三者相互促进、相辅相成的结果:为了制作性能好的器件,需要了解材料的物理特性以及相应的物理过程和规律,而这又需要可靠的仪器来测量质量足够好的材料。此前的条件还不够成熟。

半导体科学研究始于19世纪初叶,那时候研究的都是自然界里的材料(矿石晶体):1833年,法拉第(M. Faraday)在研究硫化银的电导时,第一次观察到电阻的负温度系数;1873年,史密斯(W. Smith)在体材料硒中发现光电导效应;1874年,布劳恩(K. Braun)在一些金属硫化物表面发现了整流效应;1876年,亚当斯(W. Adams)和戴伊(R. Day)在硒材料里发现了光伏效应;1879年,霍尔(E. Hall)发现了现在所谓的“霍尔效应”,并在某些材料中发现了带有正电荷的载流子。也就是说,在晶体管发明之前70年,人们已经发现了半导体材料的几大基本特性:电阻率的负温度系数和光电导效应(都是体材料的效应),光伏效应和整流效应(某种半导体与其他材料之间的接触效应),存在正电荷的载流子(这就是半导体中的“空穴”)。

在这个时期,人们既不理解决定材料特性的基本理论,也不能自己制备高质量的材料,表征技术也很粗糙,只能用试错法来摸索。此后的研究取得了一定的进展,特别是发明了基于金属-半导体材料接触的整流器,在无线电通讯中发挥了重要作用,布劳恩也因此(与马可尼一起)获得了1909年的诺贝尔物理学奖。

真正的转折出现在1926年新量子力学理论诞生以后。1931年,英国的威尔逊(A. Wilson)将量子理论应用到晶体里,提出了能带理论,终于能够解释金属、半导体和绝缘体在导电性上的差别,能隙决定了半导体的特性。1932年,他又提出了杂质能级和缺陷能级的概念,为理解掺杂半导体的导电机理做出了重大贡献。1939年,他出版了《半导体与金属》(*Semi-conductors and Metals*)。1939年,苏联的达维多夫(A. Davydov)、英国的莫特(N. Mott)和德国的肖特基(W. Schottky)独立提出了势垒理论,解释金属-半导体接触的整流效应。1940年,塞兹(F. Seitz)出版了《现代固体理论》(*The Modern Theory of Solids*)。至此,晶体管的基础理论工作就齐全了。

与此同时,半导体材料的生长技术也有了长足的进步。在20世纪40年代,垂直冷却法被用于硅和锗,并首次观察到了p-n结。拉晶法和逐区精炼法也是在那个时期提出的,并且从锗熔液和硅熔液里拉出了单晶。贝尔实验室的欧尔(R. Ohl)和蒂尔一直致力于提纯锗和硅以及制备大块单晶的工艺。

布拉顿曾经学习过量子力学,早在30年代就在贝尔实验室工作,尝试过肖克利的想法、用氧化亚铜制作半导体放大器,也多次尝试过实现固体三极管的可能性,但是都没有成功。到了二战结束的时候,理论和材料准备好了,器件也就水到渠成了。1947年12月,布拉顿和巴丁终于成功地发明了点接触式晶体管。当时还有其他人也在做这件事情,即使贝尔实验室做不出来,其他地方也能做出来。比如说,1948年4月,马塔利(H. Mataré)和维尔克(H. Welker)在法国独立地发明了点接触式晶体管。

### 晶体管发明以后

从20世纪50年代起,晶体管开始逐渐替代真空电子管,并最终实现了集成电路和微处理器的大批量生产。

起初,晶体管和晶体管化的设备并不受欢迎,因为它太贵了。但是美国军方很感兴趣,因为军用设备对便携性、可靠性和耐用性有着特殊的要求。在50年代的大部分时间里,正是美国军方的支持才让年轻的晶体管产业生存下来。1957年,苏联卫星“斯普尼克”上天,正式掀起了美苏太空竞赛的序幕。1961年,美国肯尼迪总统宣布“在1970年以前把人送到月球上”。与苏联相比,美国的火箭技术略微落后一些,所以减轻重量就更有必要了,所有的电子设备都尽可能地是用晶体管。以晶体管为基础的半导体产业也因此而突飞猛进。集成电路成为了这个时期的主角。

在晶体管诞生以后的十年里,出现了很多新型的晶体管。1950年,日本的西泽润一(J. Nishizawa)和渡边宁(Y. Watanabe)发明了结式场效应晶体管

(JFET)。1952年,基于晶体管的助听器 and 收音机就投入市场了。1954年,贝尔实验室的坦恩鲍姆(M. Tanenbaum)制备了第一个硅晶体管;同一年,跳槽到德州仪器公司的蒂尔实现了商业化的硅晶体管。1956年,通用电气公司发明了晶闸管。在这个时期,晶体管化的电子线路是通过导线把单个半导体元件连在一起的,已经初步展示了半导体器件的威力。以电子计算机为例,第一台通用电子计算机ENIAC是在1946年投入使用(图3),1956年退役,它使用了大约2万根真空三极管,占用了一间大房子(167平方米),耗电150kW,计算能力仅为每秒钟进行5000次加减法(20位的十进制数)。1954年,贝尔实验室开发了第一台晶体管化的计算机TRAD-IC,使用了大约700个晶体管和1万个锗二极管,每秒钟可以执行1百万次逻辑操作,功率仅为100瓦。1955年,IBM公司开发了包含2000个晶体管的商用计算机。

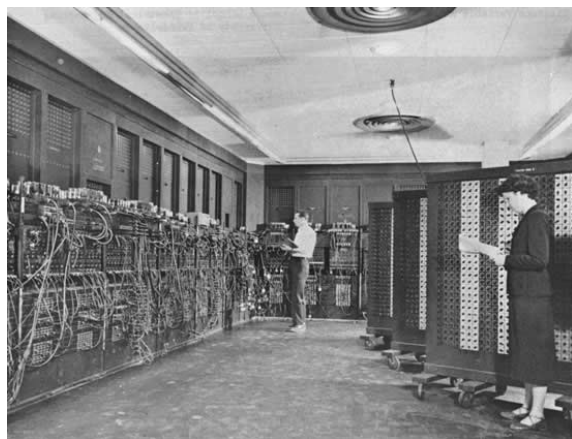


图3 第一台通用电子计算机ENIAC

单个半导体元件虽然很有用,但是,如果能够把几个晶体管结合在同一块半导体材料上,肯定会更有用的。在20世纪50年代,很多人都有了这个念头,但是第一个实现了这个想法的是德州仪器公司的基尔比(J. Kilby)。1958年9月12日,他制作了第一个锗片上的集成电路(图4),其中的晶体管和被动元件是用金丝连接起来的。1959年,仙童公司的诺伊斯(R. Noyce,他后来创立了英特尔公司)提交

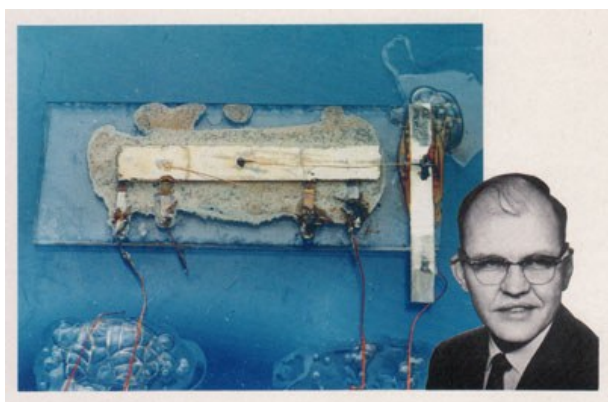


图4 基尔比(1923~2005)和他制作的第一片集成电路

了平面工艺的专利,用铝作为导电条制备集成电路。从此,集成电路的时代开始了。2000年,基尔比因为发明了集成电路而荣获诺贝尔物理学奖。

接下来的十年,晶体管的进展就更加迅猛了。简单举几个例子吧。1959年,贝尔实验室的卡恩(D. Kahng)和艾塔拉(M. Atalla)发明了金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET),这是1925年李林菲尔德(J. Lilienfeld)提出的场效应晶体管概念的具体实现;1967年,卡恩和施敏(S. M. Sze)制作了浮栅型 MOSFET,为半导体存储技术奠定了基础。1965

年还发生了一件大事,仙童公司的摩尔(G. Moore,他也是英特尔的创始人之一)提出了摩尔定律(Moore's law,图5):集成电路上可容纳的元器件的数目,约每隔18~24个月便会增加一倍,性能也将提升一倍(摩尔定律起初说是每年翻一番,十年后改为两年翻一番)。这个定律本来是描述此前半导体产业发展的经验公式,结果竟然奇迹般地揭示了此后五十多年信息技术进步的速度。为了协调半导体产业的发展,从90年代起,国际半导体产业界开始筹划研究路线图,包括美欧日韩及中国台湾等半导体产业发达的国家和地区。从1998年开始,半导体技术国际路线图(International Technology Roadmap for Semiconductors)每两年发布一次。然而,2016年发布的新的路线图,首次不再强调摩尔定律,而是超越摩尔的战略(More than Moore strategy):以前是芯片先行、应用跟随(应用跟着芯片走),今后则是芯片为应用服务。

自摩尔定律诞生以来,半导体科技和产业的发展日新月异、突飞猛进。1969年,贝尔实验室的博伊尔(W. Boyle)和史密斯(G. Smith)发明了电荷耦合

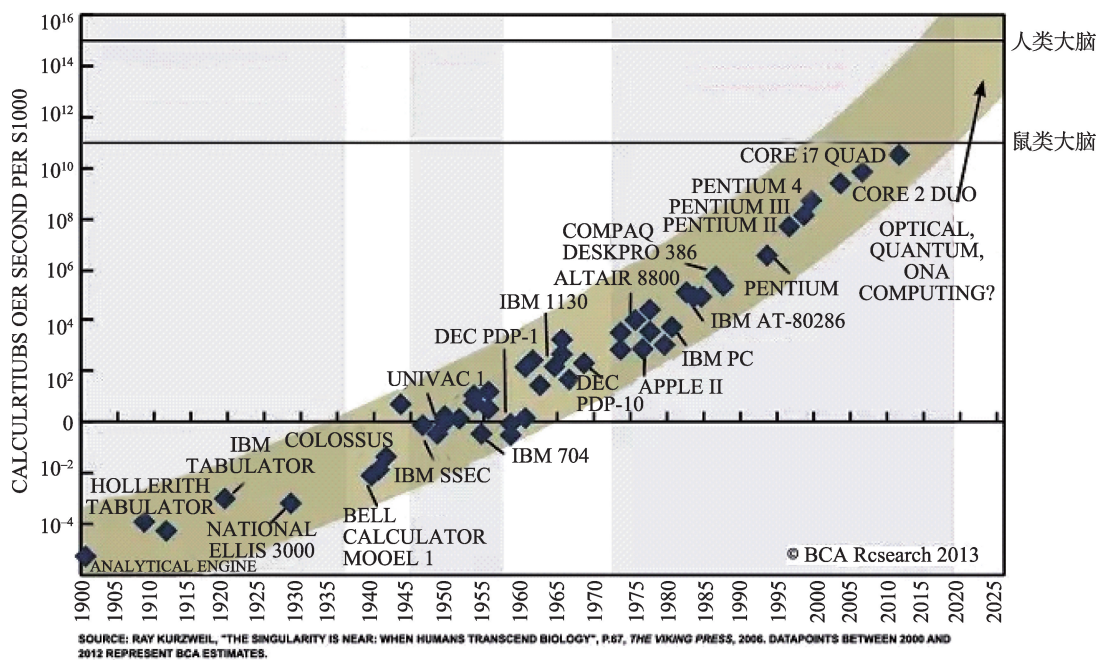


图5 摩尔定律(1900~2020)

器件(CCD),并最终引发了照相技术的大革命,使用了一百多年的照片被淘汰了,每个人的手机上有摄像头了。1971年,英特尔公司推出了第一批4位的商用微处理器 Intel 4004(具有2300个晶体管),1972年更是推出了8位的商用微处理器 Intel 8008(具有3500个晶体管),起初是导致了袖珍计算器的普及,进而导致了个人电脑的出现。1976年,克雷公司推出了Cray-1超级计算机,运算速度达到了惊人的2.5亿次。此后,苹果个人电脑、IBM兼容机、互联网的出现和发展,终于把我们带到了大数据的时代,发生在2016年的两大代表性事件就是:阿尔法狗(AlphaGo)战胜围棋世界冠军李世石;“神威·太湖之光”夺得超级计算机世界排行榜的第一名,每秒可以实现9.3亿亿次的浮点运算。这些进展肯定不可能在这篇短文里描述了。表一汇总了诺贝尔物理学奖授予给半导体科技的情况,让大家浮光掠影地感受一下。

接下来就转而谈谈半导体科技在中国的发展过程。

### 中国的半导体科技

晶体管发明的时候,中国还处于解放战争时期。新中国建立以后,许多半导体科技专家相继回国,开始了中国半导体科技的征程。以黄昆、谢希德、林兰英、王守武、汤定元、洪朝生、高鼎三、成众志为代表的老一辈科学家们为我国半导体事业的人才培养和产业发展做出了巨大的贡献。

1956年,中国物理学会主办了“半导体物理讨论会”,并于1957年出版了《半导体会议文集》。这次盛会拓展了国内半导体事业,对我国半导体科学技术的发展产生了深远的影响,最终促使半导体科学技术列入我国《十二年科学技术远景规划》,成为五十七项任务之一。科学规划委员会还提出了“发展计算技术、半导体技术、无线电电子学、自动学和远距离操纵技术的紧急措施方案”并得到了批准。

1956~1958年,我国创办了第一个五校联合半导体专业,开始自主培养半导体科技人才。1962年

举行了全国第二次半导体学术会议。自1979年起,全国半导体物理学术会议每两年召开一次,第21届会议2017年在南京大学召开。这些会议以及国内其他的半导体科技学术会议,促进了国内半导体研究领域的学术交流,帮助大家了解国际重大前沿领域的发展动向,有效地提升了国内半导体科技领域的研究水平。

在材料和器件方面,我国的科研人员也做出了成绩。1957年,拉出了锗单晶,研制了锗晶体管;1959年,硅单晶;1962年,砷化镓(GaAs)单晶;1962年,研制硅外延工艺;1965年,硅基晶体管;1966年,TTL电路产品出现,标志着我国已经能够制作小规模集成电路。

从20世纪70年代起,我国陆续建成投产了以国营东光电工厂(878厂)和上海无线电19厂为代表的几十家集成电路工厂。1976年,中国科学院计算所研制成功1000万次大型电子计算机。改革开放以后,更是加速引进国外先进技术。在每一个五年计划期间,都制定了半导体科技特别是集成电路技术的发展战略并进行科技攻关。

2000年,国务院发布了《鼓励软件产业和集成电路产业发展的若干政策》。从此,国内成立了多家国家级IC设计产业化基地和包括中芯国际在内的很多半导体科技公司,英特尔、三星等国外公司也在中国建厂。然而,也是在此时期,中国半导体集成电路芯片进口迅速增加,现在每年的进口总额超过了两千亿美元(约人民币1.5万亿),甚至超过了石油。2014年,国家大基金成立,标志着政府对以集成电路为代表的半导体科学技术的重视,但是具体效果还有待观察,而且这几年来也多次传来消息说,中国在海外并购半导体企业时受到了外国政府以国家安全为由的各种阻挠。

回顾新中国六十多年的发展历史,我们可以看到,国家一直非常重视半导体科学技术,建立了半导体研究和生产的体系,并形成了一个基本的框架,为国民经济建设和国防事业服务。但是,由于

表1 一滴水中看世界:从诺贝尔物理学奖看半导体科学的发展

1909年,布劳恩因为无线电报的发明而与马可尼一道获得了诺贝尔奖,布劳恩的贡献包括半导体整流效应的发现,对于信号检测非常重要
1956年,巴丁、布拉顿和肖克利因为晶体管而获奖
1973年,江崎玲於奈因为半导体中的隧穿效应而获奖
1977年,莫特和安德森因为非晶半导体而获奖
1985年,克利钦因为量子霍尔效应而获奖
1998年,劳克林、斯托默和崔琦因为分数量子霍尔效应而获奖
2000年,阿尔弗雷夫、克罗默和基尔比因为电子学和光电子学方面的贡献而获奖
2009年,高锟因为光纤而获奖,博伊尔和史密斯因发明电荷耦合器件CCD图像传感器而获奖
2010年,盖姆和诺沃肖洛夫因石墨烯获奖
2014年,赤崎勇、天野浩和中村修二因蓝光二极管获奖

国民经济水平的限制,国家对半导体研究的投资毕竟不能跟西方发达国家相比(相当大的人力物力财力需要投入到两弹一星这样保障国家根本安全的领域)。改革开放以来,我国与国际水平的差距却越来越大了。原因大约有这么几个:优秀青年人才被发达国家“挖走了”,留在国内的也大多选择经济收入更好的行业;随着老一代科研人员的退休,许多学校的半导体专业都萎缩了;科研模式的变化也有一定的影响,除了为军工服务的一些研究所以外,科学院和大学里的研究开始从以前的团体作战模式逐渐变化为科研个体户模式,原先有着整体规划的教研室和课题组都逐渐消亡或者名存实亡了;产业界的研究更关注短期成效,对半导体科技研究的长期投入不感兴趣。最近十年以来,国家对半导体科技的重视程度日益增大,但是要想看到成效,仍然需要更多的投入和时间。

## 总结

回顾晶体管诞生以来国际半导体科技发展的七十年历史,我们不难看到,基础科学研究对国民经济和国防安全有着重大意义,而科技产业的需求反过来又进一步推动了基础科学研究的进步,2014年获得诺贝尔物理学奖的白光LED就是一个很好的例证,而且正在为全球性的节能减排工作做出重

大的贡献。

对于半导体科技这种关系国计民生的高投入、高产出的重大领域,没有长远的规划、没有充分的投入,是不会有如意的结果。现在,中国经济已经有了巨大的进步,完全有能力而且也有必要投入半导体研究:重新规划大学院系的教学模式、重新设计项目课题的研究方式、重新协调科研与生产的关系,“十年生聚,十年教训”,二十年后,无论是科研还是生产,中国应该有着最强大的半导体事业。

① Riordan, M., and L. Hoddeson, *Crystal Fire: The Birth of the Information Age* (W. W. Norton, New York, 1997).

② 《硅星球:微电子学和纳米技术革命》约翰·D·克雷斯勒 著,张溶冰 张晨博 译,上海科技教育出版社,2012年。

③ 《半导体的故事》,约翰·奥顿 著,姬扬 译,中国科学技术大学出版社,2015年。

