

知识经济溯源与随想——晶体管效应发现 50 周年回顾*

Review on the 50th Anniversary of the Discovery of the Transistor Effect

许居衍

(中国半导体行业协会顾问, 中国工程院院士

无锡 214061)

晶体管实在太吸引人了,好像有说不完的新鲜话。我在从事半导体 40 年经历中,越来越感到半导体技术总在不断地发展、成熟,每脱了一层皮,就又年青一次,就像雪莱的一句诗所说的:“大地象蛇一样,焕然一新。”^[1]半导体的发展,彻底打破了历史上所谓的“工业 30 年成熟论”。半导体技术不仅在人类第四次经济长波(40 年代初至 90 年代初)中起到了技术推动作用,而且在第五个经济长波的上升期(终止至 2020 年左右),通过网络化和多媒体化,对世界未来经济的高涨,正日益明显地担负着重要的长波技术载体作用。

晶体管效应的发现,显露了高技术管理的意义

肖克莱(William Shockley)这位后来的诺贝尔奖得主,在 1936 年获得 MIT 博士学位后,在当时任贝尔实验室研究部经理凯利(M. J. Kelly)的游说下,进入贝尔实验室工作。“二战”中,曾一度离开;战后,又是凯利动员他重返贝尔实验室,并安排担任固体物理分部半导体研究小组负责人。与肖克莱同年获得普林斯顿大学博士学位的巴丁(John Bardeen)和 1929 年毕业于明尼苏达大学并一直在贝尔实验室工作的布莱顿(Walter Brattain)被同时安排到肖克莱手下工作。

肖克莱是一个既有坚实理论基础,又有实践素质,且对新鲜事物极其敏感的“奇才”。但是,在他辉煌的青中年时代,却有过两次致命的失利:一次在 1947 年,他当时因主要投身于半导体场效应机理研究而没能亲自参与巴丁与布莱顿两人在 1947 年 12 月 16 日导致晶体管效应发现的实验,从而使他失去了 1948 年 6 月晶体管发明专利的授与权。他若不是勇于面对现实,大胆创新,提出了可称之为晶体管奠基性工作的面结型晶体管理论,很可能也就与 1956 年的诺贝尔物理奖失之交臂了。另一次是

在 1956 年,他在获奖后敏感到晶体管的巨大工业前景,创立了肖克莱半导体实验室,企图建立世界上最好的半导体公司。但是,由于他缺乏领导艺术和固守锗晶体管的方向,遂使他手下慕名而来年轻有为的“八大金刚”相继离去。这些年轻人后来创立了被誉之为“硅谷 IC 大学”的仙童公司以及由它衍生出来的、至今仍赫赫有名的集成电子公司(Integrated Electronics),即 Intel 公司。

随着年轻人的离去,肖克莱最终也只好放弃了那短暂的美好愿望,带着深沉的遗憾,成了斯坦福大学的教授。

肖克莱的辉煌和失利,反衬出高技术管理的重要意义。早在 1956 年,肖克莱在接受诺贝尔奖时的演讲中,就曾提到晶体管效应的发现跟贝尔实验室四个人有关,这四个人“都是从研究部经理相继晋升为贝尔实验室总裁的”。肖克莱说,他们坚持选题有“特定”的目标,即“产生有用器件的目标”,并说“这些目标强烈地影响着我从事晶体管效应的发现”。四位领导人中的一位就是凯利。凯利不愧为是一位“帅才”,他不仅能从自己所特长的电真空专业局限中走出来,作出了旨在获得改进的和全新的固态器件研究的决策,而且知人善任,把长于理论的巴丁和长于实验的布莱顿集中到肖克莱名下,组成了最佳的“黄金搭档”。后来有人议论,“二战”期间(1941 年)贝尔实验室就研制成功了硅二极管,而与之息息相关的三极管研究工作之所以停顿多年,原因就在于凯利当时尚未找到以肖克莱为首的这种“黄金搭档”。

凯利的管理品质导致了肖克莱的辉煌成就,而缺乏管理才能的肖克莱在出人头地后创办第一个半导体公司时,也同样物色到了“八大金刚”,组成了“黄金搭档”,但结果却因肖氏缺乏管理才能而惨败了,这个事实极其深刻地说明了高技术管理对于发展高技术的重要意义。

* 此文系作者在纪念晶体管发明 50 周年会议上书面发言基础上改写而成。

半导体技术的发展打开了 知识经济的大门

巴丁在N型半导体片上做探针点接触实验中,意识到并最终从理论上预见到,两个探针点之间的距离小于25微米时,有可能产生电流倍增现象。然而,在半个世纪前,探针点本身的加工精度却远远大于这个尺度,因此根本无法实现这种小距离的探针接触。在巴丁计算结果的吸引下,布莱顿凭借他作为一个实验物理学家的经验与灵感,用一种巧妙而极为简单的方法实现了,从而导致晶体管效应的发现。这个事实表明,半导体技术从一开始就是一种在科学理论指导下的实践,从而把人类传统的旧认知链条,即“生产→技术→科学”颠倒了过来,开始了现代科学技术产业化的认知过程:科学研究→技术开发→产品研制→工厂生产→销售服务。

半导体产品的学科基础是半导体物理学。半导体材料具有机、电、光、热、磁等丰富多彩的物理属性,利用这些属性可制造不同功能的半导体产品。例如,利用其机械学属性可以制造机械敏(感)器件,而利用电学、光学、热学、磁学等属性,就可以制造电敏、光敏、热敏、磁敏器件等等;而且在上述每一类物理属性中,由于物理效应不同,又可制成功能不同的器件,例如电学属性中的势垒效应可用来制造二极管。此外在上述每一类功能器件中,又由于采用的材料结构和工艺参数不同,可制成电子学特性不同的系列化产品,例如二极管就有整流、检波、变容、参放等名目繁多的产品类别。以上是属性的纵向应用,事实上更重要的则是对这些属性、效应的综合应用,正是这种综合应用导致了千姿百态的品谱系列。例如,半导体的电学属性与机械学、光学、热学、磁学属性的综合与组合应用,产生了压电、光电、热电、磁电等器件;对电学属性中少子效应与势垒效应的综合应用,产生了众多的半导体器件;而对半导体器件的组合应用,则产生了成千上万种的集成电路(见图1)。这些情况说明,类型繁杂、品种繁多的半导体产品都是建筑在对半导体物理属性的开发应用上^[2],从而为产品创新奠定了基础。因此在某种意义上讲,半导体技术史实质上就是人类对半导体物理属性的开发、应用史。

人类对材料物理属性的开发既表现在产品设计阶段,也表现在产品制造与应用阶段。半导体产品的设计,例如专用集成电路(ASIC),从用户提出电性能要求到版图布局设计,经过了工艺与器件结构设计、电路构思、逻辑综合与模拟以及“束”(电子束、光束等)笔绘制等过程,甚至在形式上也跟文学艺术劳动过程相似,完全是一种“硅上知识创作”。半导体产品的制造涉及机、电、光等多种学科,结合

了超纯、超精、超细、超净等多种技术,又是一种“知识的综合”;半导体产品的应用上到宇航,下至衣、食、住、行,几乎无所不及,一种现场可编门阵(FPGA)电路,就可以依据需要创作出无数应用产品,表现出了极为显著的“知识再创作”特点。半导体产品的这些知识创新特点,大大促进了半导体技术的革新发展。

效应的器件应用:二极管、三极管……

- 二极管:整流、检波、混频、变容……
- 整流:高压、低压、大电流……
- 三极管:微波功率、高频高速、低频低噪声……
- 微波功率:连续波、线性、脉冲……

器件的集成创新:存贮电路、微机电路……

- 存贮电路:DRAM、E²PROM……
- DRAM:4Mb、16Mb……
- 微机电路:MPU、MCU、MPR……
- MPU:386、486……

图1 半导体物理纵向应用例:电学效应

注:作为对照,横向应用则指电学、机械、光学、热学、磁学效应之间的组合应用,如电与光组合成了光电子学系统。

半导体材料物理属性的多样性及其器件应用的知识创作性,导致了半导体技术的动态变化特征。自1947年发明晶体管以来,大约每过十年就有一次划时代的技术进步。而这些进步在市场上的反应则是产品更新换代越来越频繁,一代产品(如DRAM)退出市场,另一代产品(虽仍是DRAM)却又以全新的面貌出现在用户面前,从而导致同类型的一种电子产品(如模拟电视)即使过时了,但在半导体的创新引导下,又得以新生(如数字电视)。半导体技术经常处在未来冲击之中,从而导致了半导体产业的一系列演变。特别自80年代以来,由于ASIC的发展,逐渐改变了“重制造”、“轻应用”的产业发展格局,改变了一个轮子(如何造)粗,一个轮子(如何用)细的产业结构,工业进步的冲动由工艺革新更多地转向应用创新,工业附加值由依靠工艺技术更多地转向依靠设计技术。这是因为半导体技术就像是开采多年的“金矿”:“进尺日深,难度日增”,因而使得人们更倾向于已采“金子”的推广应用,从应用上创造更多效益,使得半导体工业进一步从单纯的“工艺技术”(DRAM)驱动更多地转向“应用技术”(ASIC)驱动;而芯片制造业投资的高度增长则从另一个角度促进了“没有半导体制造线(Fabless)公司”的大量兴起,并因此刺激了“没有半导体产品的委托加工(Foundry)业务”的发展(见图2)。Fabless和Foundry的兴起,推动了“虚拟制造”、“虚拟企业”和“中场(生产配套件)企业”的发展,从而使得半导体产业日益演变成为一种典型的“知识产业”:从形式关系上看,Fabless好像是“著作者”,而Foundry则成了“出版商”。

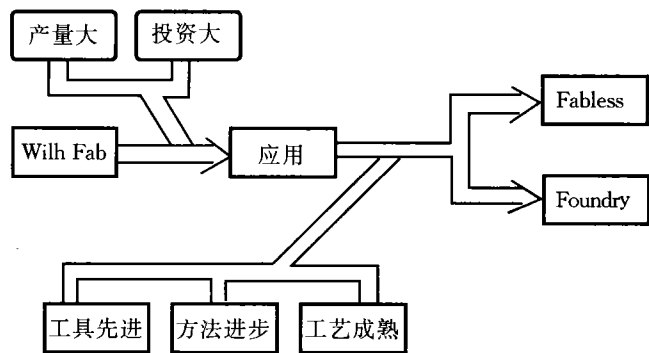


图2 半导体产业结构按价值链分化

注：半导体价值链包括半导体与系统知识、设计、制造、封装等技术以及销售、服务等环节。有线、有产品(Wilh Fab)企业生产规模与投资规模均大，要求大量应用，并因而导致 Wilh Fab 分化为 Fabless 和 Foundry。

从以上介绍中可以看到，半导体技术与依赖于有形资本的传统技术不同，它在地球上蕴藏最丰富而又最便宜的石英砂基础上，经过知识活动，使价值在每一个价值链中都得到成十倍地增长，从砂子到电路制品，其间价值上升千万倍(见图3)，从而使得财富从自然资源拥有者大跨度地转移到掌握“创意”的知识人手中，并由此改变了人类社会的经济增长方式和商业服务形态。这些情况表明，半导体技术的兴起必然伴随着“知识经济”的到来。

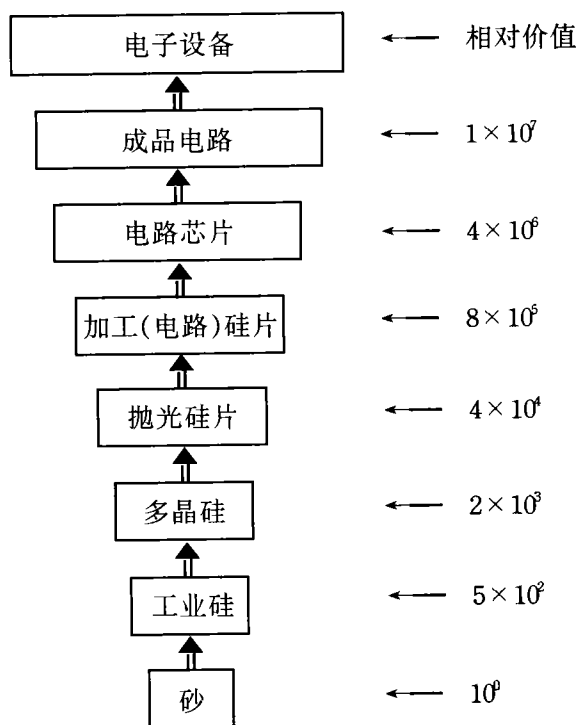


图3 半导体硅制造过程中的知识升值

注：1995年各部分销售额：电子设备为8000亿美元，半导体产品为1477亿美元，半导体材料为190亿美元。

战略工业的属性改变了 国家行为的特征

贝尔实验室在发现晶体管效应后，专利局很快就批准并授予巴丁和布莱顿的发明专利权。但是，直到1948年6月30日，贝尔实验室才在《时代》周刊上公布经过严密审查的简短消息。此后，尽管贝尔实验室向企业界转让并实施了该发明专利，但迟至1964年，即经过了近20年的时间，晶体管产量才达到3亿只。这个事实表明，半导体技术从一开始就处在国家控制之中。

如果说早期人们对晶体管效应的发现还仅仅是一种“新奇”的话，那么自60年代以来，半导体的战略地位则日益被人们所共识。

半导体材料的物理属性为半导体知识创新奠定了基础，而半导体的知识性与创新性则导致半导体技术与市场的动态变化，使之带有很大的风险性。但是，半导体又是一种基础核心技术，具有很强的渗透性、带动性和倍增性效应，因而使得半导体成了一种国际竞争的战略性产业(见图4)。半导体技术所具有的知识性、创新性、渗透性、带动性、倍增性、风险性、竞争性、国际性和战略性等十大特点，高度代表了当今高技术的所有特征。

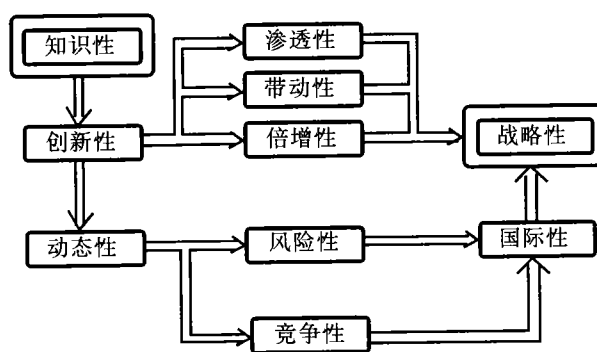


图4 半导体技术的战略特征

半导体技术的战略性可以从美、日1989年发表的一本书和一份内部报告中得到充分的表露^[3]。日本先出了一本书，叫《日本可以说“不”》。它论述了这样一个观点，即“不管美、苏如何继续扩充军备，只要日本说一声停止出售半导体芯片，他们就会陷入一筹莫展的境地”。这本书“引起了太平洋两岸的震动”，日本在一年内就重印了十次，美国也急忙译出，一印再印，广为发行，并因此导致作者“准备起诉”美国侵犯著作权权益的违法行为。11月1日，美国国家半导体咨询委员会向总统和国会呈送了

一份报告,叫《危机中的战略工业》。这份报告针对《日本可以说“不”》的论据,忧心忡忡地提到:“美国半导体工业正陷入严重困境,从而使整个电子领域以及与国家安全所依靠的优势,都将遭到威胁”。报告分析指出:“对美国来说,半导体工业具有战略地位。它是信息时代的基础,对消费类电子工业、计算机工业、通信工业以及其它在其产品中大量应用电子技术的工业都起着决定的作用”,“如果美国没有强大的本国半导体工业,将给外国竞争对手以可乘之机,并据此控制美国从半导体得到的经济利益和其他利益。”据此,报告敦促美国政府采取得力措施,振兴美国半导体工业。

美、日两国在这场争夺战略工业控制权竞争中,表达了两个很有意义的时代信息。

其一,进一步生动地表达了知识创新对于发展高技术产业的重要意义。

日本甚至韩国的半导体存储器至今仍居世界首位,但是近些年来以微处理器所代表的逻辑设计却顺应了“数字经济”的潮流,这种在更高层次上的创新把美国推向了高技术产业高峰,重新掌握了主动权,因而出现了以下的变化“程式”^[4]:“追求微细加工技术,以优良制造工艺在大生产中赢得高额利润的日本”在辉煌一时之后,又把繁荣交还了“致力逻辑创新设计,以高附加价值产品在中赢得高额利润的美国”。这可以说已形成了一种“顺者昌,逆者衰”的态势。

其二,由知识创新性所引发的潜在战略价值,则导致国家行为的重大变化。

日本对半导体企业的控制力比美国强得多,但是后者的高技术产业反而比前者发达得多,这是因

为在进入知识经济时代后,国家与企业的关系发生了根本变化。正如托夫勒在他的《第四次浪潮》中所指出的:在高技术国际化形势下,“国家的独立与经济财富依赖于由企业提供的技术创新和对世界的控制”;对高新技术知识的渴求使人才成为最奇贵的资源,国家间的人才争夺战迫使政府在加大教育投资的同时,制定吸引人才与稳定人才的国际性政策;企业间的技术创新战迫使政府在提供企业制度创新环境的同时,制定加强财政鼓励与R&D投资的政策。“现在各个国家几乎都在做同样的一件事”,即动员国家拥有的资源,安排国家R&D活动并使企业参与国际研究计划,统筹国家市场,优惠税收,改善商业环境,将国家资源转向于促进企业的R&D活动,以帮助企业在世界范围内掌握竞争的主动权。

半导体技术的发展,加强了而不是削弱了国家与企业间的新联姻:企业为迎接世界化的挑战并使自己世界化,需要国家在世界范围内提供支持帮助;而高技术企业的世界化,又为国家的独立发展提供了坚实的基础。

参考文献

- [1]许居衍,寻思足迹:记我国第一个集成电路专业研究所的成长,微电子学,V01. 20,1990(2)
 - [2]许居衍,微电子产业的动态特征及其影响,西安电子科技大学学报,V01. 22,1995(1)
 - [3]石原慎太郎、盛田昭夫,日本可以说“不”,军事科学出版社,1990;美国国家半导体咨询委员会送总统和国会的报告:危机中的战略工业
 - [4]许居衍、郑荏,国际半导体工业发展态势分析,科技导报,1996(7)
- (责任编辑 蔡德诚)

(上接第28页)

杉碱甲、芹菜甲素、钩藤碱等的实验或临床研究中,认为具有一定的开发前景。但工作均待深入。

针灸疗法也值得探索,头针取双侧语言区、晕听区;耳针取心、脑、皮质下及内分泌穴;体针取丰隆、间使、大椎、肾俞、人中、内关、风池穴等,一般强调辨证选穴,特异性选穴需待探索。

任何治疗方法都应通过记忆力标准进行评价,心理及行为测验亦不可少;多中心、高质量药理信息不可无;还应当从反应时间角度检测整体注意力受损是否改善。此外,坚持接受治疗和中断治疗的治疗反应者数量应有据实的报告和说明。临床医生的印象当然是重要的,但主要应以CIBIC(Clinician's interview-based impression of changes)量表作判别依据,还应有更多客观的指标配合评定。

8. 需要综合探讨、协调解决的问题

(1)老年性痴呆命名需要统一;(2)我国流行病

学底数不清,需要全国协作开展;(3)要修定出能真实反映国人AD的量表,这需要我国神经科学会或老年医学会牵头组织,集中、统一地讨论修定,以达成共识;(4)致病机理研究队伍太小,卫生行政部门应予以重视,予以解决;(5)应多方位研究发病机理,但目前应有所侧重,应关注探索国人AD的相关基因及分子水平的作用机理等;(6)AD模型,尤其是转基因模型的完善;(7)建立对AD早期诊断具有一定特异性的指标;(8)敏感性、非创伤性诊断方法(如PET)的研究力度应加强;(9)目前对治疗药物开发投入力度明显不足,应予加强;(10)应将神经细胞/神经突触可塑性观念引入新药研制策略;(11)中医药治疗开发性研究现尚停留在一般水平上,需重点加强开发;(12)应从国家、社会及社区防治体系考虑,建立相应的社会/家庭照料体系。

(责任编辑 蔡德诚)