

肖克莱与半导体科学技术的发展*

鲁运庚 高立晟

(临沂师范学院物理系 山东临沂 276001)

摘要 文章介绍了肖克莱的生平事迹及其在物理学上取得的成就,着重论述了他提出的晶体管理论以及据此发明的晶体管对后世的影响,指出肖克莱提出的晶体管理论奠定了今天半导体科学技术发展的基础。

关键词 晶体管,半导体科学技术

SHOCKLEY AND THE DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY

LU Yur Geng GAO Li Sheng

(Department of Physics, Linyi Teacher's College, Linyi, Shandong 276001, China)

Abstract This paper introduces Shockley's life and his achievement in physics. It emphasizes on his transistor theory and the impact of the transistor which is based on his theory. It is believed that the transistor theory of Shockley lays the foundation for the development of today's semiconductor science and technology.

Key words transistor, semiconductor science and technology

1 引言

半导体科学技术是一门年轻的学科,它主要研究半导体材料和半导体器件的性能、机理及其工艺。人们对半导体的研究,最初只是作为固体物理的一个不受重视的部门进行的。20世纪40年代末期发明晶体管以后,半导体科学技术得到了迅速发展,并很快渗透到人类社会生活的各个方面。本文着重介绍晶体管的发明者——肖克莱的生平事迹及其取得的科学成就,特别是其提出的晶体管理论奠定了半导体科学技术发展的基础。

2 肖克莱生平简介

肖克莱(亦译肖克利,William Bradford Shockley,1910—1989),美国著名的物理学家。1910年2月13日生于英国伦敦,父亲W.H.肖克莱是一位采矿工程师,母亲M.肖克莱是一位贤妻良母。1913年前后,肖克莱全家迁往美国的加利福尼亚州。肖克莱在那里接受了中学教育。1928年进入加州理工学院学习,1932年获该院理学学士学位。1936年在麻省理工学院攻读物理学并获博士学位,同年应聘进入

贝尔实验室基础研究部工作,从事固体物理研究。第二次世界大战爆发后,肖克莱于1942年参加政府组织的国防科学研究,并担任美国海军反潜艇运筹学小组主任。1945年担任国防部长办公室专家顾问。战争结束前回到贝尔实验室,任固体物理研究组主任。1948年发现了对于晶体管的发明有重要意义的“场效应”。1949年与J.海因斯合作进行了能够直接确定锗中少数载荷子的迁移率和寿命的实验(海因斯-肖克莱实验),并与H.苏尔合作,发现了磁场对空穴和电子浓度的影响。同年,预言了实现具有P-N结的三极管的可能性,导出了P-N结中总电流密度的公式(肖克莱方程),并根据自己的P-N结理论,提出了P-N-P型晶体管。1951年,他预言了半导体中的饱和效应,提出确定有效质量的方法^[1]。1952年以后,提出结型场效应管(JFET)的基本理论,即向一块高纯度的半导体材料中加入一定量的杂质,以便影响材料中电子的迁移率,并使它有可能制成一种小型的层状器件,在这种器件中部分流过的小电流可用以控制在另一部分流过的大得多的电流,因而产生放大效应。根据这一理论,在1953年制成结型场效应管。1954年,他兼任加利福尼亚

* 2000-04-10收到初稿,2000-08-14修回

理工学院客座物理学教授,同年兼任国防部武器系统鉴定组副主任.1955年,建立了半导体公司并建立肖克莱半导体实验室.1958年成为加利福尼亚斯坦福大学的物理学教授.1958年至1960年间任肖克莱晶体管公司经理.1963年成为斯坦福大学第一位波尼托夫工程学和应用科学教授,1965年出任贝尔实验室总裁顾问.1974年退休,1989年谢世^[2].

肖克莱的研究领域较为广泛,包括固体能带、铁磁畴、金属塑性、晶粒边界理论、有序-无序合金、半导体理论应用和电磁理论等.一生获专利90多项,发表论文逾百篇^[3].著有《半导体中的电子和空穴》(《Electrons and Holes in Semiconductors》)一书.该书总结了对半导体中物理过程的认识,阐述了晶体管电子学的理论基础.在该书中,作者首次把半导体物理中关于电子运动过程的基本理论、半导体器件分析、设计和电路应用等内容称为晶体管电子学.该书对后世影响甚大,其中采用的一些基本物理概念和理论分析,在后来的半导体物理研究中都得到了广泛的应用^[3].

肖克莱获得过众多的荣誉称号,1956年获得诺贝尔物理学奖.此外尚有布曼奖、巴克利奖、康斯托克奖、霍利奖章等.

3 晶体管的发明及其影响

3.1 电子管及其缺陷

3.1.1 电子管的发明应用

晶体管发明之前,无线电设备中使用的主要是电子管.

早在1883年,爱迪生(Thomas Edison,1847—1931)在发明白炽照明灯时发现,一块烧红的铁会辐射出电子云,这种现象后人称之为爱迪生效应,当时人们并不知道能利用这一效应来做些什么.1904年,英国物理学家弗莱明(John Ambrose Fleming,1849—1945)把爱迪生效应用在检波器上,他在真空中加热的灯丝前加了一块极板,从而发明了第一只电子管,他把这种装有两个极的电子管称为二极管.它不仅用来检测无线电波,而且可用于整流,把无线电所携带的信号还原出来.二极管的发明成为整个电子技术的一个突破口.1906年,美国物理学家德弗莱斯特(L. De Forest,1873—1961)在二极管的灯丝和极板之前加了一个金属栅极,制成第一只真空三极管.三极管与二极管的区别在于,二极管只能把无线电波中的信号还原出来,而三极管则能把无

线电中携带的微弱信号照原样放大,从而实现了电子器件的一大飞跃,使电子管的广泛应用成为可能.

从电子管发明一直到1939年前后,电子器件一直在电子技术领域中占据统治地位,电子管从二极、三极、四极到五极、六极、七极甚至大功率管,电子管家族迅速成长,几乎成为各种电子设备中唯一可用的电子器件.电子管和收音机生产已成为支撑电子工业的重要支柱.年产数百万只电子管的工厂在许多国家建立起来.美国的RCA公司、荷兰的飞利浦公司以及德国的德律风根公司等一些著名的生产电子管的厂商成为现代工业的新贵.

第二次世界大战期间,由于战时的需要,雷达和高频通信技术被广泛应用.电子设备不仅帮助人们侦察潜艇、控制鱼雷和高射炮,而且保障通信畅通,并用于监听或干扰敌方的通信联络.这不仅导致电子管需用量剧增,而且使每一台无线电整机所需电子管数目也大为增加.战争结束后,战时发展起来的电子技术和新型电子装备被大量地、迅速地移植到民用工业部门,致使工业部门的电子装置内部所应用的电子管数目也急剧增加^[4].随着电子管的广泛应用,其缺点也一一暴露出来.

3.1.2 电子管的缺陷

(1) 体积大:早期电子管的形状类似梨形灯泡,其管芯安置在作为芯柱的一根小玻璃管上,由于电子管的体积大,使用电子管做元件制成的一些产品的体积也相应地增大,如1946年制成的埃尼爱克计算机,共使用了18000个电子管,1500个继电器和几千个其他电子元件,体积大约有 90 m^3 ,占地面积约为 150 m^2 ,重约30t.如此庞然大物,显然不利于其推广应用.电子管的体积虽有一个小型化的过程,然而缩小电子管的体积和增大其功率的要求却是相互矛盾的.因为体积小的电子管难以承受较大的电流.

(2) 耗电多:使用电子管制成的雷达、计算机、收音机等,即使处于准备工作状态时,也要消耗大量的电能,这些电能的大部分又多转变成热能而浪费掉.此外,当一台整机包含上千个电子管时,还必须为驱散大量的热能以避免电子管温升过高而煞费苦心.

(3) 性能不稳定、寿命短:最初的电子管,其栅极和阳极都是平板形,从阴极发射的电子中有一部分越出阳极散射到玻璃管壁上,从而导致电子管阳极电流极不稳定.

在电子管的生产过程中,由于真空技术水平的限制,管内的真空度不高,使残留气体分子受到阴极发射出的电子碰撞后,电离成带正电的阳离子,这些

阳离子被阴极负电位吸引而撞击阴极表面,从而破坏了阴极的结构,缩短了电子管的寿命^[4]。电子管的寿命只有几千小时,最多为1—2万小时。

总之,由于电子管的大量使用,电子管本身固有的弱点逐渐暴露出来,再加上迫切的战时需要,促使许多科研单位和科学家集中精力研制新的电子器件,以克服电子管的缺点带来的不利影响。

3.2 晶体管的发明

20世纪30年代中期,贝尔实验室研究部主任默文·凯利(M. J. Kelly)已经认识到电子管的许多缺点,并认为真空电子管不可能长期使用下去。特别是当电子管的缺点一一暴露出来以后,凯利更认为有必要研制新的电子器件以取代电子管。因而当凯利向肖克莱征询关于研制新一代电子器件的意见时,肖克莱明确表示,只有通过研究半导体,以半导体作为新的电子器件的材料,才有可能实现研制新电子器件的突破。1936年,在凯利的筹备和领导下成立了固体物理研究组,开始研究新的电子器件。

早在19世纪末期,人们发现当用光照射半导体时,半导体的电阻会变小,这种现象被称为光敏效应。后来人们又发现,当给半导体器件通上电以后,电流会沿着其中的一个方向流动,这种现象被称为半导体的整流性。虽然人们尚未完全弄清楚这是怎么回事,却已开始利用这些发现。例如:人们在发现了第一种半导体材料之后,用它做成了光敏电阻;发现半导体材料氧化亚铜后,用它做成交变电流整流器材料和光电池的材料。实际上,在很长的一段时间内,氧化亚铜一直是全部半导体学说的基础。

20世纪30年代,人们利用量子力学的一般原理来研究固体的电子运动过程,逐步建立起一种新的理论,即固体能带论。到这时,人们对半导体中电子的运动规律有了比较深刻的认识。根据固体能带论理论的解释,固体中电子的运动状态,常常分成几个不同的能带而存在,对导电最起作用的两个能带分别是导带和价带。如果固体中的电子总数正好把价带填满而导带完全空的时候,这种固体就是绝缘体;如果价带中留有少量空穴,或者导带中出现少量电子的时候,这种固体就是半导体。固体能带论的出现成为理解包括半导体在内的固体的基本性质和发展半导体技术的重要理论基础。它不仅能说明半导体的导电性质,而且还成功地解释了半导体内掺入杂质后导电能力增加的原因。举例说来,在半导体锗中掺入砷,由于锗原子外层有4个价电子,而砷原子有5个价电子,其中4个价电子与周围其他的锗原

子形成共价键,满足共价键之后,晶格对剩下的那个电子的束缚就很松了,这就意味着晶格场对它的势垒较低,它容易越过势垒而跃入导带中去而成为自由电子。但这时在满带中并没有空穴,这种半导体中导带电子数多于空穴,基本上是电子导电,通常称电子导电的半导体类型为N型半导体;如果在四价锗中掺入三价的杂质,它和锗结合成共价键时就会因缺少一个电子而形成空穴,这时空穴的数目多于电子,这类半导体被称为P型半导体^[5]。如果在同一块半导体材料的一个区域掺入五价元素,另一个区域掺入三价元素,则可在这一块材料上同时形成两个导电区域——P区和N区,而在两个区界面上由于电子或空穴的运动复合而出现一个没有电子和空穴的层区——P-N结。以此为基础研制的P-N结型晶体管,为半导体科学技术的发展奠定了基础。

第二次世界大战爆发后,由于战争对技术的需要,特别是军用电子器件的缺陷,促使美国军方先后组织麻省理工学院、普度大学、贝尔实验室等一批研究机构集中精力研制新的电子器件。从1940年到1943年间,先后研制出多晶硅、硅P-N结等,为后来晶体管的发明做了准备。

为了加强对半导体的基础研究,1944年肖克莱被调回贝尔实验室固体物理研究组,直接领导半导体的研究。在固体物理研究组中集结了理论物理学家、实验专家、物理化学家、线路专家、冶金专家、工程师等各方面的专业人才。他们拟订出了周密的研究和实验方案,以期取得研制半导体器件的突破。

在固体物理研究组中,巴丁(John Bardeen, 1908—)和布拉顿(Walter Houser Brattain, 1902—)具体负责研制新的电子器件。首先利用的是肖克莱提出的“体场效应”方法。即在半导体晶体表面加一个垂直于表面的电场(仿照真空三极管的原理),试图用外电场来控制半导体内的电子运动。由于技术条件的限制,利用这种方法没有达到预期的目的。随后巴丁等人又提出利用表面态理论进行实验。根据表面态理论,表面效应可以引起信号的放大效应。通过多次实验,终于取得了满意的结果。1947年12月16日,巴丁和布拉顿在一块锗半导体表面上安置了两根非常细的金属丝,其中一根是固定的,称为固定针,另一根是可精确移动的探针,在锗片背面焊有一根粗一点金属丝(如图1所示),当在固定针与背面粗金属丝之间施加供电电压时,电流放大了。这正是研究小组所苦苦寻求的电子放大器件,基于军事秘密,这一研究成果没有立即对外宣布。又经过多次

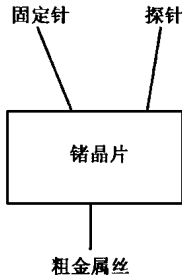


图1

实验,直到1948年6月30日,贝尔实验室才正式对外展示了晶体管.巴丁和布拉顿因此获得专利,肖克莱因为没有直接参与这一实验而与专利无缘.

新的电子器件诞生了.由于它既有电子管的跨导(transconductance)的特性,又有变阻器(varistor)的特性,贝尔实验室的皮尔斯取其前者的“头”(trans-)和后者的“尾”(-istor)合成一个新词 transistor 来命名新的电子器件.我国将其汉译为“晶体管”^[6].巴丁、布拉顿等人实验成功的晶体管,是金属丝和半导体的某一点接触,称为点接触型晶体管.它对电流电压都有放大作用.其缺点则是噪声大,频率低,放大功率小,且性能不稳定.因而要推广应用,还需进一步改进.

1949年,肖克莱提出P-N结理论,以此研究P-N结的物理性质和晶体管的放大作用.如图2所示,当在P型半导体上加正电压时,空穴从上向下

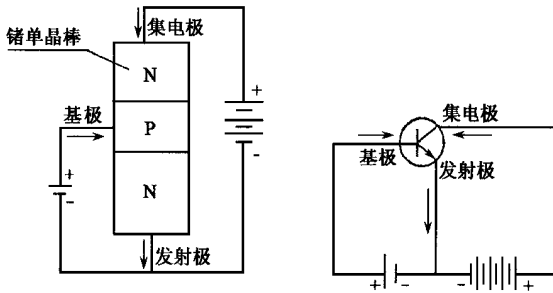


图2

运动,而电子从下向上运动,这时外加载流子大大增加,产生相当大的电流;而当在P型半导体上加负电压时,电流一定从下向上,因为P区无电子,N区无空穴,所以电流很小,这就是著名的晶体管放大效应^[5].由于技术条件的限制,当时未能制成P-N结型晶体管,直到1950年才试制出第一个P-N结型晶体管.这种晶体管成功地克服了点接触型晶体管不稳定、噪声大、信号放大倍数小的缺点.

3.3 晶体管发明的影响

晶体管发明后没有立即引起多大的轰动.1948

年6月,美国《纽约先驱论坛报》的记者在报道中写道,“这一器件还在实验室阶段,工程师们都认为它在电子工业中的革新是有限的”^[7].同年7月1日的《纽约时报》只以8个句子、201个文字的短讯形式报道了晶体管的发明,“在公众的心目中,晶体管不过是实验室的珍品而已.估计只能做助听器之类的小东西,不可能派上什么大用场”^[7].

事实远非如此.从历史发展的角度来看,“自从1904年弗莱明发明真空二极管和1906年德弗莱斯特发明真空三极管以来,电子学作为一门新兴学科迅速发展起来.但是电子学真正突飞猛进,还是从晶体管发明以后开始的.尤其是PN结型晶体管的出现,开辟了电子器件的新纪元,引起了一场电子技术的革命”^[7].而在这场革命中,肖克莱的功绩则是不朽的.

晶体管的发明与改进彻底改变了电子线路的结构.从1950年到1960年间,世界上各主要工业国家纷纷投入巨额的资金,用于研究、开发与生产晶体管和半导体器件.随着电子技术应用的不断推广和电子产品发展的日趋复杂,电子设备中应用的电子器件越来越多.人们迫切希望缩小晶体管的重量和体积.20世纪50年代末,一种新兴技术应运而生,这就是集成电路.它把晶体管、电阻、电容等元件组成的整个电路做在一个芯片上,其功能不再是单纯的放大和开关效应,而是一个电路的功能.

半个世纪以来,半导体科学技术把材料、物理、器件与工艺融为一体,四者相互影响、促进、交叉与渗透,成为完美体现当代科学与技术相互促进与发展新特点的一个典范^[8].然而应该看到,到目前为止,半导体芯片的微型化已接近极限.最先进的超大规模集成电路芯片制造技术所能达到的最小线宽约为 $0.18\mu\text{m}$,即一根头发的5%那样宽.日本将于2000年开始批量生产线宽 $0.13\mu\text{m}$ 的芯片.下一步推出线宽 $0.1\mu\text{m}$ 的芯片.芯片线宽小到一定程度后,线路与线路之间就会因靠得太近而容易互相干扰.通过线路的电流若微弱到只有几十个甚至几个电子参与,信号的背景噪声将大到不可忍受.尺寸进一步缩小,量子效应就会起作用,传统的半导体理论将不再适用¹⁾.半导体技术正日益受到严峻的挑战.

4 结论

回顾晶体管的发明过程可以发现,没有现代量

1) 新华社华盛顿1999年10月10日晚报专电

子力学的建立,没有固体物理中能带理论和导电理论的发展,就不会有晶体管和其他半导体器件的发展.如同电子管遇到挑战产生晶体管,晶体管遇到挑战出现集成电路一样,传统的半导体技术要想获得突破性的进展,就必须使用建立在全新的现代理论基础之上的材料和全新的晶体管设计方法才有可能.传统的半导体技术在遇到前所未有的挑战的同时,不也是面临着一个发展的机遇吗?

参 考 文 献

- [1] (苏) Ю. А. 赫拉莫夫编著,梁宝洪编译.世界物理学家词典.长沙:湖南教育出版社,1988.375[Ю. А. Hela mofu ed. Liang Baohong trans. World Physicists Dictionary, Changsha, Hunan Education Press,1988.375(in Chinese)]
- [2] The New Encyclopedia Britannica, Chicago,1997. see. Shockley item
- [3] 中国大百科全书(电子学与计算机 II).北京:中国大百科全

书出版社,1986.30,857[China Grand Encyclopedia(Electronics and Computer II). Beijing: China Great Encyclopedia Press,1986.30,857(in Chinese)]

- [4] 赵保经编著.无线电电子学史话.北京:科学出版社,1986.254,233[ZHAO Bao Jing ed. A History of Radio and Electronics. Beijing: Science Press,1986.254,233(in Chinese)]
- [5] 潘永祥.自然科学发展简史.北京:北京大学出版社,1984.412,413[PAN Yong - Xiang. A Brief History of Natural Science. Beijing: Peking University Press,1984,412,413(in Chinese)]
- [6] 豫且.科学大观园,1999(7):16,17[YU Qie. The Grand Sight Scope of Science, 1999(7):16,17(in Chinese)]
- [7] 程倩春等编著.二十世纪大发明.北京:北京出版社,1998.83,87,90[CHENG Qian - Chun et al.ed. Main Invention of the 20th Century. Beijing: Peking Publishing House, 1998.83,87,90(in Chinese)]
- [8] 彭英才.物理,1994,23:121 [PENG Ying - Cai. Wuli (Physics),1994,23:121(in Chinese)]

书评和书讯

国家“九五”规划重点图书,跨世纪翻译出版工程

《爱因斯坦全集》

(湖南科学技术出版社陆续出版)

《爱因斯坦全集》中文版是根据美国普林斯顿大学出版社出版的《The Collected Papers of Albert Einstein》德文版精装本翻译的.全集不仅包括爱因斯坦的全部学术论文,还涉及有关和平、宗教、犹太人问题等社会政治言论,还有他与家人及朋友的往来书信,各种听课、备课笔记,讲演、谈话以及其他有关他个人的全部材料.这些材料是迄今为止全世界研究爱因斯坦最权威、最全面的资料,其中许多材料是首次发表.读者可最大限度地追踪爱因斯坦的思想、生活及科学活动,从中领略到科学和文化在现代社会中的深远影响.

已经出版的第一卷[早年时期(1879—1902),赵中立主译]披露了爱因斯坦从诞生到在瑞士专利局就业为止的有关文献,其中包括他的听课笔记以及与家人及朋友的通信,特别有与第一位妻子的51封情书,还有大量珍贵照片.它为爱因斯坦早年生活和智力发展提供了一部文献纪录.

我社将在两年之内陆续推出全集的后续各卷.本书是物理教学、科学史研究者的重要参考文献,每本书后附有图书珍藏号码,限量发行3000册,颇具收藏价值.

《爱因斯坦全集》(第一卷)16开,精装516面,插面10页,全书70克进口双胶纸印刷,1999年10月出版.原价200元,优惠价150元.国内读者购书免收邮资.欢迎踊跃订购!

邮购汇款请寄:长沙市展览馆路66号(410005),湖南科学技术出版社直销部

读者热线:(0731)4441720

传 真:(0731)4420307

开 户 行:长沙市招商银行

帐 号:830-6080482910001

http://www.hnstp.com

e mail:hnstp@hnstp.com