



纳米科学与技术

有机场效应晶体管

胡文平 著

 科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FUND PROJECT

纳米科学与技术

有机场效应晶体管

胡文平 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

有机场效应晶体管是有机电路的基本构筑单元,也是分析有机半导体传输性能的有力工具。基于有机场效应晶体管的显示器、电子纸、射频商标等产品已经走入人们的视野,预示有机场效应晶体管具有巨大的应用前景。本书共分 10 章,系统、全面地介绍了有机场效应晶体管的发展历史,基本概念与原理,材料的选取、制备与表征,晶体管的构筑与实际应用等内容。

本书可供高等院校化学、材料、物理和信息等专业高年级本科生、研究生、教师,研究院所科研人员等阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

有机场效应晶体管/胡文平著. —北京:科学出版社,2011

(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-032062-9

I. 有… II. 胡… III. 有机半导体-场效应晶体管 IV. TN386

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 165188 号

责任编辑:张淑晓 韩 赞 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 8 月第一次印刷 印张: 17

印数: 1—2 500 字数: 320 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明	封松林	傅小锋	顾 宁	汲培文	李述汤
李亚栋	梁 伟	梁文平	刘 明	卢秉恒	强伯勤
任咏华	万立骏	王 琛	王中林	薛其坤	薛增泉
姚建年	张先恩	张幼怡	赵宇亮	郑厚植	郑兰荪
周兆英	朱 星				

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

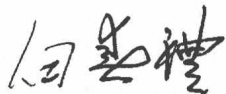
兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养做出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

前 言

1986 年第一个基于聚噻吩的场效应晶体管的问世引起了人们对有机场效应晶体管的广泛兴趣。在短短 20 年间,该领域取得了突飞猛进的发展。例如,薄膜场效应晶体管的迁移率从最初的 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 上升到 $10.0 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 增量已逾六个数量级,有机晶体的迁移率更是超过 $40.0 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。有机场效应晶体管驱动的显示器、电子纸、射频商标等产品也逐步进入人们的视野,这些预示着有机场效应晶体管具有广阔的应用前景。有机场效应材料的特点有:①种类多、来源广,可通过分子设计与合成实现对半导体性能的调控,获得理想的半导体;②有机场效应材料具有良好的柔韧性,可实现全柔性器件和电路,可应用于电子纸等可卷曲产品;③多数有机场效应材料溶于常见的溶剂,因而可采用溶液加工的方法(喷墨打印、旋涂、滴注、微接触印刷等)来制备器件和电路,从而推动打印电子学的发展。

本书共分 10 章,第 1 章详细介绍晶体管在当今生活中的重要性及其发明、发展的历史进程。第 2 章概述有机场效应晶体管的基本结构、工作原理及其相关的基本物理概念。第 3 章主要介绍有机半导体迁移率的基本测试方法、影响半导体内电荷传输的因素及描述电荷传输的基本模型。第 4 章阐述小分子材料在有机场效应晶体管中的应用,分析高迁移率小分子材料的基本要求,以及如何通过改变材料本身的分子结构调控其物理化学性质,指导设计合成出性能更好的材料,特别是空气稳定的 n 型小分子场效应材料。第 5 章分析共轭高分子材料在有机场效应晶体管中的应用,共轭高分子结构对电荷传输的影响,以及高性能聚合物场效应材料的设计合成策略和提高聚合物场效应晶体管性能的途径。第 6 章着重阐述有机场效应晶体管中的绝缘层材料,分析理想有机绝缘层需要具备的条件。第 7 章分析有机场效应晶体管中的界面以及高质量界面的构筑。第 8 章分析有机薄膜场效应晶体管的基本构筑技术及其分析方法。第 9 章介绍有机单晶的生长方法、表征手段及基于单晶场效应晶体管的构筑与电荷传输特性。第 10 章介绍有机柔性器件、印刷器件与电路及其巨大的应用前景。

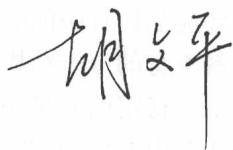
有机场效应晶体管研究的意义是非常明确的。历史告诉我们,真空电子学到微电子学的变革为科学技术的发展、社会的进步(人民生活质量的改善和国防安全)乃至综合国力的提高做出了巨大的贡献。20 世纪 60 年代,日本正是抓住从电子管转型到晶体管这个机遇,及时提出了“半导体立国”的发展战略,一跃成为微电子工业大国。有机场效应晶体管是电子学另一次变革的关键,是实现有机电子学、

柔性电子学、印刷电子学和分子电子学的关键,其研究涉及新材料、新器件、新原理、新技术等诸多方面,有大量的科学问题需要探索,是一门新兴的具有重大应用前景的交叉前沿科学。此外,根据摩尔定律,集成电路上晶体管的数目每 18 个月增加 1 倍,但这种增长不可能永远持续下去。晶体管的几何尺寸正在逼近现行微电子器件尺寸的物理极限。这些逼近物理极限的电子器件的运行不再遵循传统的规律,微电子学和以光刻为基础的微电子器件加工技术面临严重的挑战。如何应对这些挑战,推动电子学的发展,成为 21 世纪初世界范围内所面临的最重大的科学问题之一。有机场效应晶体管有望通过化学组装的方法实现分子尺度器件的构筑,即单分子晶体管的构筑,从而使摩尔定律得以延续,尽管这一领域的发展还处在探索的初步阶段,还很不成熟。

有机场效应晶体管是一个高度交叉、迅速发展的前沿学科,其研究涉及化学、物理、材料、半导体、微电子等多个学科。由于作者知识面和水平的限制,书中不妥和疏漏之处在所难免,恳请专家学者和广大读者批评指正。

本书的撰写得到了作者学生的大力协助,他们的真诚付出对本书的完成是不可或缺的! 特别感谢江浪博士(第 3 章)、孟青博士(第 4 章)、董焕丽博士(第 5 章)、邵伟(第 6 章)、付小龙(第 7 章)、赵广耀(第 8 章)、李荣金博士(第 9 章)、贺宇东(第 10 章)在本书相关章节中的付出。感谢孟青博士对本书的统稿、排版和校对。

谨以此书献给朱道本先生 70 华诞,祝先生身体健康、万事如意!



2011 年 5 月

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

前言

第 1 章 晶体管及其发展历史	1
1.1 引言	1
1.2 晶体管的发展	2
1.2.1 真空三极管	2
1.2.2 点接触晶体管	3
1.2.3 双极型与单极型晶体管	5
1.2.4 硅晶体管	8
1.2.5 集成电路	10
1.2.6 场效应晶体管与金属-氧化物-半导体管	10
1.2.7 微处理器	12
1.3 摩尔定律及其挑战	15
1.3.1 摩尔定律	15
1.3.2 摩尔定律的挑战	15
1.3.3 纳米晶体管与分子晶体管	16
参考文献	18
第 2 章 有机场效应晶体管基本介绍	19
2.1 几个基本的物理概念	19
2.1.1 电子与空穴	19
2.1.2 费米子、费米能级与功函数	19
2.1.3 能级与能带	20
2.1.4 金属、半导体与绝缘体	21
2.1.5 金属-半导体接触	22
2.1.6 肖特基势垒	24
2.1.7 平带电压和阈值电压	24
2.2 有机场效应晶体管	24
2.2.1 有机场效应晶体管的基本结构	25
2.2.2 有机场效应晶体管的基本工作原理	25
2.2.3 有机场效应晶体管的工作模式	27

2.2.4 有机场效应晶体管的能级结构	28
2.3 有机场效应晶体管的基本参数	30
2.3.1 输出与转移特性曲线	30
2.3.2 阈值电压 V_T	31
2.3.3 场效应迁移率	32
2.3.4 电流开关比 I_{on}/I_{off}	33
2.3.5 亚阈值斜率	34
2.4 有机场效应晶体管的优点与应用	34
参考文献	35
第3章 有机场效应晶体管中的电荷传输	37
3.1 引言	37
3.2 有机半导体迁移率的主要测试方法	38
3.2.1 飞行时间法	39
3.2.2 空间电荷限制电流法	40
3.2.3 声表面波法	41
3.2.4 有机场效应晶体管法	42
3.2.5 霍尔效应法	43
3.3 有机场效应晶体管中影响电荷传输的主要因素	44
3.3.1 导电沟道	44
3.3.2 注入势垒	45
3.3.3 分子结构和堆积方式	47
3.3.4 缺陷和杂质	53
3.4 有机场效应晶体管的电荷传输模型	54
3.4.1 能带传输	55
3.4.2 跃迁传输	56
3.4.3 极化子模型	57
3.4.4 多重陷阱捕获与释放模型	59
3.5 总结与展望	61
参考文献	61
第4章 有机小分子场效应材料	65
4.1 引言	65
4.2 有机小分子场效应材料的分类	66
4.2.1 p型有机小分子场效应材料	66
4.2.2 n型有机小分子场效应材料	81
4.3 目前存在的主要问题和发展趋势	87

参考文献	87
第 5 章 共轭高分子场效应材料	98
5.1 引言	98
5.2 高性能共轭高分子场效应材料	99
5.2.1 高性能共轭高分子材料的设计要求	99
5.2.2 p 型共轭高分子材料	101
5.2.3 n 型共轭高分子材料	109
5.2.4 双极性共轭高分子材料	111
5.3 提高共轭高分子器件性能的途径	113
5.3.1 优化共轭高分子材料本身的性能	114
5.3.2 优化溶液成膜工艺和后续处理过程	115
5.3.3 制备共轭高分子单轴取向有序薄膜	116
5.3.4 制备共轭高分子微纳晶	118
5.4 总结与展望	120
参考文献	121
第 6 章 有机场效应晶体管绝缘层材料	127
6.1 引言	127
6.2 无机绝缘层	128
6.2.1 无机绝缘材料	128
6.2.2 无机绝缘层中影响器件性能的因素	132
6.2.3 无机绝缘层的制备	133
6.3 聚合物绝缘层	135
6.3.1 聚合物的介电性能	135
6.3.2 聚合物绝缘层材料	138
6.3.3 聚合物绝缘层中影响器件性能的因素	144
6.4 自组装单/多层绝缘层	145
6.4.1 自组装单/多层绝缘层的发展	146
6.4.2 自组装单/多层绝缘层的材料	149
6.4.3 自组装单/多层绝缘层的制备	151
6.4.4 自组装单/多层绝缘层的应用	152
6.5 展望	154
参考文献	154
第 7 章 有机场效应晶体管的表界面工程	159
7.1 引言	159
7.2 绝缘体/半导体界面	160

7.2.1 界面形貌	160
7.2.2 电学效应	162
7.2.3 自组装单分子层修饰的绝缘层界面	164
7.3 电极/半导体界面	165
7.3.1 接触电阻的测量	166
7.3.2 接触电阻的产生	169
7.3.3 电极/半导体界面	172
7.4 小结	176
参考文献	176
第8章 有机薄膜场效应晶体管的构筑	181
8.1 引言	181
8.2 薄膜的结构、形貌对场效应晶体管性能的影响	181
8.3 溶液法制备有机薄膜	182
8.3.1 旋涂法	182
8.3.2 滴注法	185
8.4 LB膜法	188
8.5 真空沉积法	190
8.6 其他薄膜制备方法	193
8.6.1 区域滴注技术	193
8.6.2 喷墨打印方法	194
8.6.3 自组装分子膜	194
8.7 电极构筑技术	195
8.8 薄膜的分析表征技术	195
参考文献	196
第9章 有机单晶场效应晶体管	198
9.1 引言	198
9.2 单晶及结构	198
9.2.1 单晶、多晶与非晶	198
9.2.2 有机单晶的结构特点	199
9.3 有机单晶的生长方法	199
9.3.1 气相 Bridgman 法	199
9.3.2 物理气相传输法	200
9.3.3 溶液法	202
9.4 有机单晶的结构及形貌控制	203
9.4.1 内因——分子结构	203

9.4.2 外因——生长条件	206
9.5 有机单晶的表征	207
9.5.1 X射线衍射	207
9.5.2 原子力显微镜	207
9.5.3 其他方法	208
9.6 有机单晶场效应晶体管	208
9.6.1 有机单晶场效应晶体管的构筑	208
9.6.2 有机单晶场效应晶体管中的电荷传输	212
9.6.3 有机单晶场效应晶体管中的光诱导过程	216
9.6.4 有机单晶场效应晶体管中的晶体缺陷	218
9.6.5 有机单晶场效应晶体管的性能	219
9.7 有机微纳单晶晶体管	221
9.7.1 有机微纳单晶晶体管的优势	221
9.7.2 有机微纳单晶晶体管的构筑	221
9.7.3 基于有机微纳单晶的高性能逻辑电路	223
9.8 展望	224
参考文献	224
第10章 有机柔性器件、印刷器件与电路	229
10.1 引言	229
10.2 有机柔性器件	229
10.2.1 制作柔性器件的必要条件	229
10.2.2 柔性器件的常见材料	230
10.3 印刷器件	236
10.3.1 印刷的类型	236
10.3.2 印刷器件	238
10.4 有机电路	244
10.4.1 电路的基本单元	244
10.4.2 有机场效应电路	248
10.5 展望	253
参考文献	254

第 1 章 晶体管及其发展历史

1.1 引 言

晶体管是 20 世纪人类最伟大的发明之一,晶体管的背后有着许多有趣的秘密和故事。如果时光倒流几十年,晶体管还没有被发明,那么今天的人们大概还在使用电子管收音机。这种收音机普遍使用五六个电子管,输出功率只有 1W 左右,而耗电却要四五十瓦,功能也很有限。打开电源开关,至少要等一分钟才会慢慢地有声音传出来,收听时还不能保证信号很稳定。

1946 年,美国陆军军械部和宾夕法尼亚大学莫尔学院采用 18 800 个真空管联合研制了世界上第一台计算机,这台命名为 ENIAC(electronic numerical integrator and computer)的计算机高 2.44m、厚 0.92m、长 30.48m,质量达 30t(图 1.1)。再看看我们桌上的台式计算机、口袋中的 MP5,在使用这些现代科技产品时,我们都应该对这些产品的发明者心存谢意。那么,晶体管的发明者是谁呢?他们是美国物理学家威廉·肖克利(William Shockley)、沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)、约翰·巴丁(John Bardeen)。这项影响深远的发明,让他们共同获得了 1956 年度诺贝尔物理学奖。

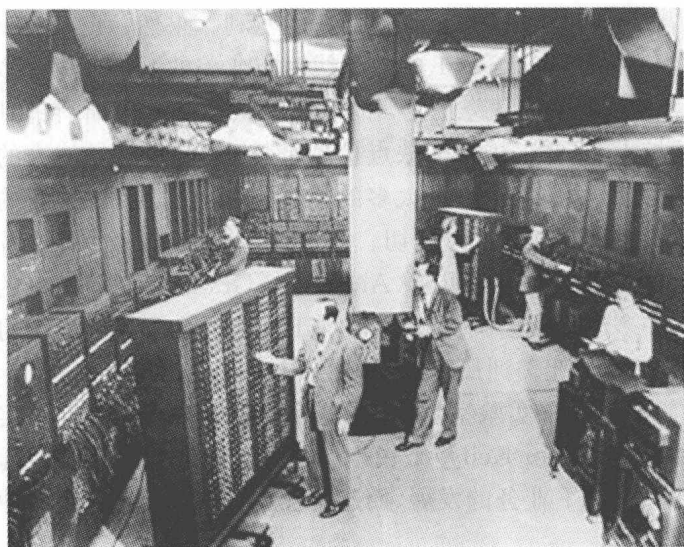


图 1.1 世界上的第一台计算机占据整个大厅(全景图)

事实上,在 20 世纪初,世界上顶尖的科学家都不太愿意从事半导体方面的工作,因为当时半导体的性质、可重复性之差让人望而生畏,同一材料从一个样品到另一个样品其性质可能完全不一样。当时半导体的性质不是取决于半导体本身,而是取决于污染物的种类与数量。而且,这个问题在当时看来根本无法解决,因为当时很难得到高纯和高质量的半导体。泡利(Pauli)曾在 20 世纪 20 年代描绘“半导体物理学”时,形象地说它是“脏”的物理学,“脏”要对半导体物理学当时的遭遇负所有责任。在当时,大家对“雷达”的研究兴趣远比“半导体”高得多,美国政府用于完善雷达所投入的经费比研究原子弹的“曼哈顿”计划所投入的经费还要多得多。

1.2 晶体管的发展

1.2.1 真空三极管

在当时半导体科学普遍不被关注的情形下,贝尔实验室为什么能够关注半导体的研究,关注晶体管的研究呢?这要求我们从美国电话电报公司(AT&T,1877 年成立)的发展说起。贝尔实验室(Bell Lab)作为 AT&T 的一个下属实验室(1925 年成立),其核心任务就是如何进一步提高电话技术,更好地为客户服务。1906 年,德·福雷斯特(Lee de Forest,真空三极管之父,1873~1961)^[1]发明了真空三极管(图 1.2)。这种真空三极管的信号放大功能被 AT&T 一眼看中,AT&T 相信,只要声音信号在电话线的传播过程中能被适时地放大,其传播距离可以说不受限制。因此,AT&T 购买了德·福雷斯特的专利。果然,真空三极管使 AT&T 的业务有了大幅度的扩充,AT&T 的电话线遍布北美的城市乡村。依赖于这一技术,1917 年,AT&T 第一条横跨北美洲的电话线从圣弗朗西斯科铺到了纽约。但是,随着业务的扩大,真空三极管的缺点也越来越明显,其信号放大的可靠性一直不好,同时消耗的能量太多,产生了太多的热量。因此,发展一种新的信号放大器件,对于 AT&T 的发展来说尤为迫切。与此同时,AT&T 面临的另外一个问题是,随着亚历山大·格雷厄姆·贝尔(Alexander Graham Bell)拥有的电话专利^[2]有效期的临近,许多小电话公司竞相成立,AT&T 迫切需要一些新的技术和专利来证明:AT&T 仍然是北美洲最为出色的公司。为此,1925 年,AT&T 专门成立了一个研发部门——贝尔实验室,来完成这个任务。1930 年,贝尔实验室当时的领导者默文·凯利(Mervin Kelly)敏锐地意识到,他们需要一个比真空三极管更好的器件来支撑 AT&T 业务的发展,而这个器件,可能得依赖于那种被称为半导体的奇怪的材料。

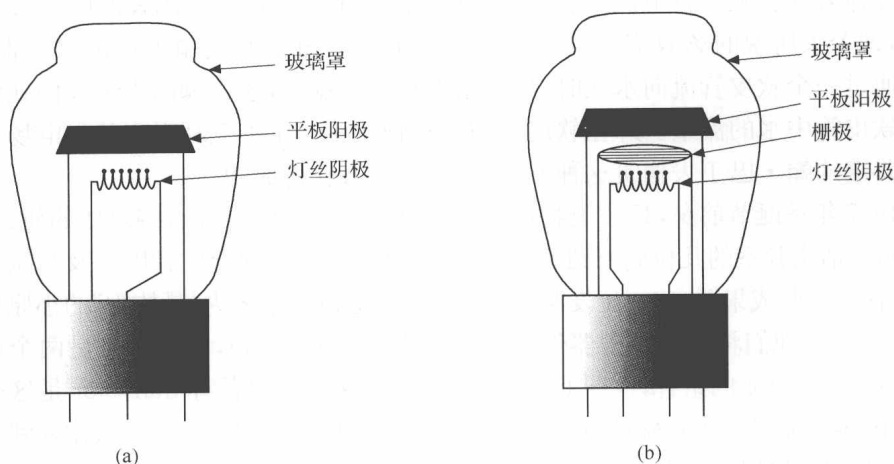


图 1.2 真空二极管[约翰·安布罗斯·弗莱明(John Ambrose Fleming)于 1904 年发明,在真空中通过热离子发射产生电流](a)及真空三极管[德·福雷斯特于 1906 年发明,在栅极上加一个很小的电流,就能极大地改变阴阳极间的电流,从而实现电流的放大](b)

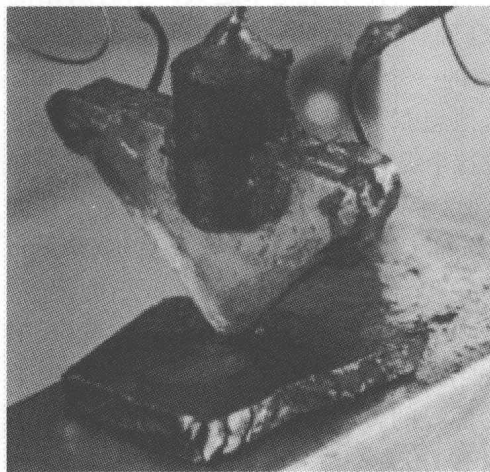
但是,随着第二次世界大战的临近和爆发,默文·凯利的研究计划被打断,雷达和无线电的需求量越来越大,因此整流二极管的需求量越来越大。当时所用的二极管很容易被击穿,美国政府要求科学家研制出一种更好的二极管来满足雷达和无线电的需求。1939 年 2 月,贝尔实验室的一个电化学家拉塞尔·欧勒(Russell Ohl)挑选了一个中间有缝隙的硅晶体,他想探索到底有多大的电流可以通过这个缝隙。奇怪的是,拉塞尔发现电流通过这个缝隙时具有单向导电性,而且在缝隙的地方还发光。他把这个奇怪的发现连同这个硅晶体一起向贝尔实验室的负责人默文·凯利作了汇报。默文·凯利邀请约翰·巴丁和约瑟夫·贝克尔(Joseph Becker)一起来观察,这个奇怪的现象导致了一个伟大的发现,即硅 pn 结的诞生。此后,也是一个很偶然的机会,1942 年,普渡大学卡尔·拉克·霍罗威茨(Karl Lark-Horovitz)领导的课题组中一个名叫西摩尔·本泽(Seymour Benzer)的学生,发现锗单晶具有其他半导体所不具有的优异的整流性能。这两个发现满足了美国政府的要求,也为随后晶体管的发明埋下了伏笔。

1.2.2 点接触晶体管

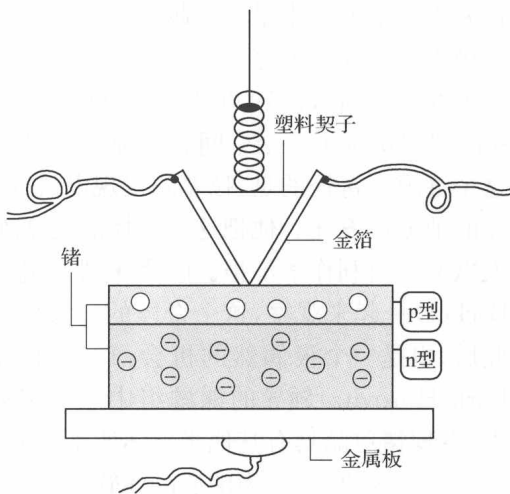
1945 年,第二次世界大战结束,默文·凯利对贝尔实验室的课题研究组进行了大幅度的调整,研制能取代真空三极管的新型电子器件也被重新提上日程,为此,凯利组建了一个固体物理研究组,任命威廉·肖克利(William Shockley)与斯坦利·摩根(Stanley Morgan)领导这个研究组。当时,高纯度的锗单晶被普遍看好,肖克利要求大家注意锗单晶,并提出了一种新的概念器件,即依靠一个强电场

在半导体表面引发一种电流,通过控制电场的强度来控制半导体表面电流大小的器件,即今天所说的场效应器件。我们可以用一个简单的比喻来理解这种器件。当水通过一个软皮管流向水池时,如果用脚踩住软皮管,通过脚的力量我们就可以控制软皮管中水的流量。踩住软皮管的这只脚就相当于肖克利提出的强电场。肖克利要求约翰·巴丁去构筑这种器件,但当时没有获得成功。

1947年圣诞节前夕,37岁的物理学家肖克利写了一张言辞有些羞怯的便柬,邀请贝尔电话实验室的几位同僚到他的实验室,分享他和他的合作者巴丁及布拉顿最近取得的“一些成果”。这三位发明家演示了电流通过一个名为“晶体管”的小原型器件(图1.3)。他们将这个原型器件命名为晶体管(transistor),transistor是两个单词transfer与resistor的组合,也即transfer resistor。这些发明者对transistor是这么解释的,transistor是一个特殊的resistor,当电信号通过这样一个resistor从输入到输出进行转移时,其信号得到了放大。这个晶体管构筑在一个n型的锗单晶之上,锗单晶下面是一个金属板。在锗单晶的上表面形成了一个p型的反型层,在这个反型层之上再放置一个三角形的塑料契子,这个塑料契子用金箔包起来,在连接处用刮胡刀切开,然后固定。两个金箔之间的间隙非常小,大约为 $50\mu\text{m}$ 。尽管用现代标准来衡量,这个器件原始且笨拙,但它在当时却是一个举世震惊的突破。



(a)



(b)

图1.3 肖克利、巴丁及布拉顿发明的第一个晶体管(a)及其示意图(b)

让我们假设将肖克利等的晶体管从中线一分为二,分为左右两个部分,我们看到左右都是一个二极管,如在左右二极管加上一个如图1.4所示的电压,左边的二极管将处于开的状态,而右边的二极管处于关的状态,晶体管可看成两个二极管的结合,它们共用一个底电极。如果将两部分合到一块,栅极合二为一,电压连接不