

“十二五”国家重点图书出版规划项目

SEMICONDUCTOR DEVICES

Physics
and
Technology
(3rd Edition)



半导体器件 物理与工艺

[美]施 敏 李明达 著
王明湘 赵鹤鸣 译

第三版



苏州大学出版社
Soochow University Press

“十二五”国家重点图书出版规划项目

SEMICONDUCTOR DEVICES

Physics
and
Technology
(3rd Edition)

半导体器件 物理与工艺

[美]施 敏 李明远 著
王明湘 赵鹤鸣 译

TU303
62

第三版

 苏州大学出版社
Soochow University Press

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理与工艺/(美)施敏,李明逵著;
王明湘,赵鹤鸣译. —3版. —苏州:苏州大学出版社,
2014.4

“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-5672-0554-3

I. ①半… II. ①施…②李…③王…④赵… III.
①半导体器件—半导体物理②半导体器件—半导体工艺
IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 061567 号

半导体器件物理与工艺(第三版)

[美] 施 敏 李明逵 著

王明湘 赵鹤鸣 译

责任编辑 苏 秦 周建兰

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市十梓街1号 邮编:215006)

丹阳市兴华印刷厂印装

(地址:丹阳市胡桥镇 邮编:212313)

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 35.75 字数 830 千

2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5672-0554-3 定价:65.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换
苏州大学出版社营销部 电话:0512-65225020
苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

纪念 John L. Moll 教授(1921—2011)

是他引入了硅作为半导体器件最重要的材料

致 谢

在写作本书时,承很多人给予我们宝贵的协助.首先,我们要对台湾交通大学、台湾孙逸仙大学表示感谢,没有这两所学校的支持,我们将无法完成本书的写作.作者施敏想感谢台湾 Etron 科技公司资助的杰出讲座教授席位为本书的写作提供了条件.

在修订本书时,我们得到了很多人的帮助,我们从本书评阅人的意见中受益良多,他们分别是:台湾海洋大学的C.C.Chang教授;长庚大学的L.B.Chang和赖朝松教授;UMC公司的O.Cheng博士和T.Kao先生;TSMC公司的S.C.Chang博士和Y.L.Wang博士;台湾孙逸仙大学的T.C.Chang教授;台湾交通大学的T.S.Chao、H.C. Lin、P.T.Liu和T.Wang教授;东海大学的J.Gong教授;台湾“清华大学”的C.F.Huang和M.C.Wu教授;台湾高雄大学的C.J.Huang和W.K.Yeh教授;台湾大学的J.G.Hwu、C.Liu和L.H.Peng教授;台湾“中央大学”的J.W.Hong教授;台湾成功大学的W.C.Hsu和W.C.Liu教授;台湾中兴大学的Y.L.Jiang和D.S.Wuu教授;台湾中正大学的C.W.Wang教授;Transcom公司的C.L.Wu博士和原相科技公司的Y.H.Yang博士.

令我们受惠良多的还有协助我们编辑书稿的N.Erdos先生.书中所有来源于其他出版机构的图片,都经版权所有者的同意,即使所有图片都经过调整和重绘,我们仍然非常感激他们的授权.在John Wiley & Sons出版社方面,我们想感谢D.Sayre和G.Telecki两位先生,他们鼓励我们这个再版计划.作者李明逵想感谢他的女儿Ko-Hui为本书提供课后习题及解答.最后,我们想感谢各自的妻子Therese Sze和Amanda Lee在本书写作中的支持和协助.

施 敏 李明逵

于台湾新竹、高雄

2010年8月

译者序

本书作者施敏先生是国际著名的半导体器件专家和教育家,他是中国工程院、美国国家工程院和台湾“中央研究院”三院院士,他早年任职于美国贝尔实验室,发明并实现了世界上第一个非挥发半导体存储器(Non-Volatile Semiconductor Memory, NVSM)。1991年,因在电子器件领域做出的基础性及前瞻性贡献,他荣获 IEEE 电子器件最高荣誉奖(J. J. Ebers 奖)。作为一名教育家,施先生著述丰厚,特别是《半导体器件物理》(Physics of Semiconductor Devices)是全世界工程及应用科学领域最畅销的书籍之一,被翻译成六种语言,发行超过百万册,被引用两万多次,有“半导体界圣经”的美誉。译者本人在科研和教学工作中,也常常参考施先生的著述。

《半导体器件物理与工艺》(Semiconductor Devices Physics and Technology)是施先生为大学本科微电子相关专业的学生所著的一本教科书,同时也适合于从事微电子技术研发的人员作为参考书,主要介绍半导体器件的工作原理和集成电路的制造工艺。第一版成书于1985年,1992年曾由北京大学王阳元院士主持翻译出版。第二版成书于2002年,由苏州大学翻译出版。中文第二版自2002年出版以来,经历了多次重印,被国内高等院校广泛采用,得到了读者极高的评价。2013年,本书的英文第三版问世,此次简体中文版仍由苏州大学翻译出版。相比于第二版,内容又有了很大的增删和更新,以适应本领域的最新进展。

译者长期担任半导体器件和集成电路工艺的教学工作,并且在薄膜晶体管的器件研究方面有丰富的积累,此次承担施先生书稿的翻译工作,是一份荣幸更是一份责任。在本书的翻译工作中,为了力求完美,做到行文风格和内容的统一,在中文第二版的基础上,对全书进行了重译,对正文、习题、图表、公式、物理记号、附录、索引等内容都做了详尽细致的修订,在反复的校对和修订中,真正做到了咬文嚼字和字斟句酌。对于原著中个别或有商榷之处,以译者注的形式作了标注。译者倾尽全力,力求为广大读者展现出施先生原著的风采。

本书出版之际,正值我国建设创新型国家的决定性阶段。作为信息社会基础的微电子技术,带动了一批战略新兴产业的崛起,助推着世界科技革命和产业变革。半导体器件和工艺的相关知识是微电子技术的基础,掌握该知识对于从事相关专业的的工作至关重要。若本书的翻译出版能够帮助有志于从事微电子技术研发工作的朋友们,那将是我们最大的荣幸。

最后,要感谢苏州大学出版社为本书出版所做的大量细致的工作。译者的研究生参与了翻译初稿的准备工作,他们是陈威、陈杰、周晓梁、徐杰、王佳佳、王明、龚祯宁、何荣华和吕萍,译者的同事张冬利博士和陈俊博士参与了译稿的初校工作,在此也对他们的帮助表示感谢。本书的出版,凝集着大家的辛勤汗水,但仍难免有疏失之处,敬请广大读者予以批评指正,谢谢!

译者于苏州大学
2014年1月15日

前 言

第三版更新内容

本书介绍了现代半导体器件的物理原理和其先进的制造工艺技术。它可以作为应用物理、电机工程、电子工程和材料科学领域的本科学生的教材，也可以作为研究生、工程师、科学家们了解最新器件和工艺技术发展的参考资料。

第三版的更新内容

- 改写并更新了 35% 的篇幅，增加了许多章节内容讨论当今的热门议题，如 CMOS 图像传感器、FinFET、第三代太阳能电池和原子层沉积技术 (atomic layer deposition)。另外，我们删除或减少了某些不重要的章节，以维持全书的篇幅。
- 鉴于 MOSFET 及其相关器件在电子领域的重要性，我们将该部分内容扩展为两个章节。我们也将光电器件相关内容扩展为两个章节，因为它们对通信和新能源领域具有重要意义。
- 为了改善每个主题的易读性，含有研究生程度的数学或物理概念的章节被省略或移至附录之中。

章节主要内容

- 首先，第 0 章对主要半导体器件和关键工艺技术的发展作一个简短的历史回顾。接着，本书分为三个部分。
- 第 1 部分 (第 1、2 章) 描述半导体的基本特性和它的传导过程，尤其着重在硅和砷化镓两种最重要的半导体材料上。第 1 部分的概念将贯穿于全书，了解这些概念需要现代物理和微积分的基本知识。
- 第 2 部分 (第 3~10 章) 讨论所有主要半导体器件的物理过程和特性。从对大部分半导体器件而言最关键的 p-n 结开始，接下来讨论双极型和场效应器件，最后讨论微波、量子效应、热电子和光电子器件。
- 第 3 部分 (第 11~15 章) 则介绍从晶体生长到掺杂等工艺技术。我们介绍了制造器件时的各个主要步骤，包含理论和实际两个方面，并以集成器件的工艺技术为重点。

主要特色

每一章包含下列特色：

- 以对主要内容的概括开头，并列出的主要学习目标。
- 第三版包含了许多例题，以演示在特定问题中基本概念的应用。

- 每章最后有总结,阐述重要的概念并帮助学生在做作业前复习该章内容。
- 本书有约 250 个课外作业问题,各章部分习题的参考答案在本书后面的附录 L 中。

课程设计选择

第三版对课程设计提供了极大的弹性。本书涵括了足够的内容,可以提供一整年的器件物理及工艺技术课程。以每周三节课,两个学期的课程为例,可以在第一学期教授第 0~7 章,第二学期教授剩下的第 8~15 章。对三学期的课程而言,则可以将课程分为第 0~5 章、第 6~10 章和第 11~15 章。

一个两学期的课程则可以在第一学期时教授第 0~5 章,第二学期时教师可以有数种选择。例如,选第 6、12~15 章来专门介绍金氧半晶体管(MOSFET)和它的工艺技术;或选择第 6~10 章来介绍所有主要的半导体器件。对一学期的半导体器件制造工艺课程而言,教师可以选择第 0.2 节和第 11~15 章。

一个一学期的课程可以用第 0~7 章来教授基础半导体物理和器件;或用第 0~3、7~10 章来教授微波和光电子器件;如果学生已经对半导体有一些初步的认识,第 0、5~6、11~15 章可以用来教授亚微米金氧半场效应晶体管的物理和工艺技术。当然还有很多其他的课程设计,可以随教学进度和教师的选择而定。

教材提供

- 教师手册:其中有完整的作业解答可提供给大专院校采用本书作为教材的教师。
- 可以提供本书中使用的图表的电子版,更多信息可以参考出版社网址: www.sudapress.com。

目 录

第0章 引言	
0.1 半导体器件	(1)
0.2 半导体工艺技术	(6)
总 结	(13)
参考文献	(13)

第1部分 半导体物理

第1章 能带和热平衡载流子浓度	
1.1 半导体材料	(16)
1.2 基本晶体结构	(19)
1.3 共价键	(23)
1.4 能带	(24)
1.5 本征载流子浓度	(29)
1.6 施主与受主	(33)
总 结	(38)
参考文献	(39)
习 题	(39)

第2章 载流子输运现象	
2.1 载流子漂移	(43)
2.2 载流子扩散	(50)
2.3 产生与复合过程	(53)
2.4 连续性方程	(58)
2.5 热离化发射过程	(63)
2.6 隧穿过程	(64)
2.7 空间电荷效应	(65)
2.8 强电场效应	(67)
总 结	(71)
参考文献	(72)
习 题	(73)

第2部分 半导体器件

第3章 p-n 结	
3.1 热平衡状态	(77)
3.2 耗尽区	(81)
3.3 耗尽电容	(86)
3.4 电流-电压特性	(90)
3.5 电荷存储与瞬态响应	(99)
3.6 结击穿	(101)

3.7 异质结	(107)
总 结.....	(109)
参考文献.....	(109)
习 题.....	(110)
第 4 章 双极型晶体管及相关器件	
4.1 晶体管的工作原理	(113)
4.2 双极型晶体管的静态特性	(118)
4.3 双极型晶体管的频率响应与开关特性	(125)
4.4 非理想效应	(130)
4.5 异质结双极型晶体管	(133)
4.6 可控硅器件及相关功率器件	(137)
总 结.....	(144)
参考文献.....	(144)
习 题.....	(145)
第 5 章 MOS 电容器及 MOSFET	
5.1 理想的 MOS 电容器	(150)
5.2 SiO ₂ -Si MOS 电容器	(157)
5.3 MOS 电容器中的载流子输运.....	(163)
5.4 电荷耦合器件	(165)
5.5 MOSFET 基本原理.....	(169)
总 结.....	(180)
参考文献.....	(180)
习 题.....	(181)
第 6 章 先进的 MOSFET 及相关器件	
6.1 MOSFET 按比例缩小.....	(183)
6.2 CMOS 与 BiCMOS	(194)
6.3 绝缘层上 MOSFET(SOI 器件).....	(199)
6.4 MOS 存储器结构.....	(203)
6.5 功率 MOSFET	(211)
总 结.....	(212)
参考文献.....	(213)
习 题.....	(214)
第 7 章 MESFET 及相关器件	
7.1 金属-半导体接触.....	(218)
7.2 金半场效应晶体管(MESFET)	(228)
7.3 调制掺杂场效应晶体管(MODFET)	(235)
总 结.....	(240)
参考文献.....	(241)

目 录

目 录

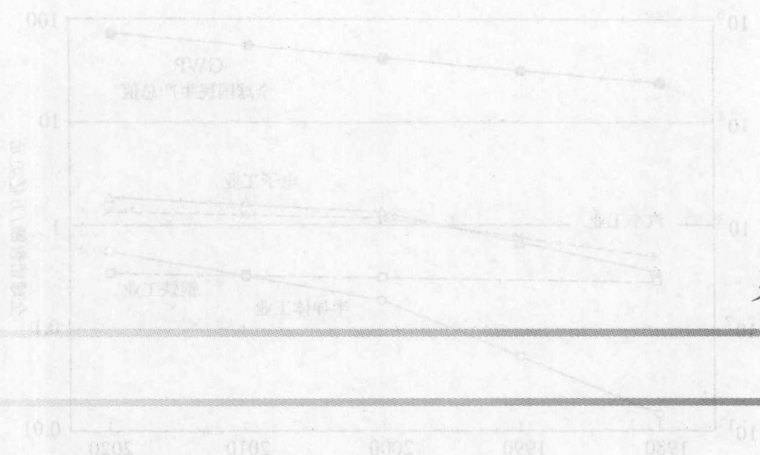
习 题	(242)
第 8 章 微波二极管、量子效应和热电子器件	
8.1 微波频段	(245)
8.2 隧道二极管	(246)
8.3 碰撞离化雪崩渡越时间二极管	(248)
8.4 转移电子器件	(251)
8.5 量子效应器件	(256)
8.6 热电子器件	(260)
总 结	(263)
参考文献	(264)
习 题	(265)
第 9 章 发光二极管和激光器	
9.1 辐射跃迁和光吸收	(267)
9.2 发光二极管	(272)
9.3 发光二极管种类	(277)
9.4 半导体激光器	(288)
总 结	(304)
参考文献	(305)
习 题	(306)
第 10 章 光电探测器和太阳能电池	
10.1 光电探测器	(309)
10.2 太阳能电池	(322)
10.3 硅及化合物半导体太阳能电池	(328)
10.4 第三代太阳能电池	(333)
10.5 聚光	(337)
总 结	(338)
参考文献	(338)
习 题	(340)
第 3 部分 半导体工艺	
第 11 章 晶体生长和外延	
11.1 融体中单晶硅的生长	(343)
11.2 硅的悬浮区熔工艺	(349)
11.3 砷化镓晶体的生长技术	(352)
11.4 材料特性表征	(356)
11.5 外延生长技术	(362)
11.6 外延层的结构和缺陷	(369)
总 结	(373)

目 录

参考文献.....	(374)
习 题.....	(375)
第 12 章 薄膜淀积	
12.1 热氧化.....	(378)
12.2 化学气相淀积介质.....	(384)
12.3 化学气相淀积多晶硅.....	(393)
12.4 原子层淀积.....	(396)
12.5 金属化.....	(398)
总 结.....	(408)
参考文献.....	(408)
习 题.....	(409)
第 13 章 光刻与刻蚀	
13.1 光学光刻.....	(412)
13.2 下一代光刻技术.....	(424)
13.3 湿法化学腐蚀.....	(429)
13.4 干法刻蚀.....	(432)
总 结.....	(444)
参考文献.....	(444)
习 题.....	(446)
第 14 章 杂质掺杂	
14.1 基本扩散工艺.....	(449)
14.2 非本征扩散.....	(456)
14.3 扩散相关过程.....	(460)
14.4 注入离子的分布.....	(462)
14.5 注入损伤与退火.....	(469)
14.6 注入相关工艺.....	(474)
总 结.....	(479)
参考文献.....	(480)
习 题.....	(481)
第 15 章 集成器件	
15.1 无源元件.....	(486)
15.2 双极型晶体管技术.....	(490)
15.3 MOSFET 技术.....	(497)
15.4 MESFET 技术.....	(510)
15.5 纳电子学的挑战.....	(513)
总 结.....	(517)
参考文献.....	(518)

目 录

习 题·····	(519)
附录	
附录 A 符号列表 ·····	(522)
附录 B 国际单位制(SI Units) ·····	(524)
附录 C 单位前缀 ·····	(525)
附录 D 希腊字符表 ·····	(526)
附录 E 物理常数 ·····	(527)
附录 F 重要元素及二元化合物半导体材料的特性(300K 时) ·····	(528)
附录 G 硅和砷化镓的特性(300K 时) ·····	(529)
附录 H 半导体中态密度的推导 ·····	(530)
附录 I 间接复合的复合率推导 ·····	(533)
附录 J 对称共振隧穿二极管透射系数的计算 ·····	(535)
附录 K 气体的基本动力学理论 ·····	(537)
附录 L 各章部分习题的参考答案 ·····	(539)
索引·····	(541)



第0章

引言

- ▶ 0.1 半导体器件
- ▶ 0.2 半导体工艺技术
- ▶ 总结

身为应用物理、电气工程、电子工程或材料科学领域的一名学生,你可能会自问,“为什么要学习半导体器件”。理由是,电子产业是世界上规模最大的产业,而半导体器件正是这个产业的基础.要更深入地了解电子学的相关课程,拥有半导体器件的基础知识是很有必要的.此外,这些知识还可以使你对基于电子技术的信息时代(information age)有所贡献.

本章将包括以下主题:

- 半导体器件的4种基本结构(building block)
- 18种重要的半导体器件以及它们在电子应用中所扮演的角色
- 23种重要的半导体技术以及它们在器件制造工艺中所扮演的角色
- 半导体器件向高密度、高速、低功耗和非挥发性(nonvolatility)发展的技术趋势

0.1 半导体器件

图0.1显示了以半导体器件为基础的电子产业在过去30年内的销售额以及到2020年为止的预期销售额.另外,全球国民生产总值(gross world product, GWP)以及汽车、钢铁和半导体产业的销售额也列在图中^[1,2].我们可以看出,从1998年开始,电子产业的销售额已超过汽车产业的销售额.如果这种趋势持续下去,电子产业的销售额将于2020年达到2万亿美元,并占全球国民生产总值的3%.可以预期,在整个21世纪,电子产业将始终是世界上规模最大的产业.作为电子产业的核心,半导体产业在21世纪初超越了钢铁产业,并将于2020年占电子产业销售额的25%.

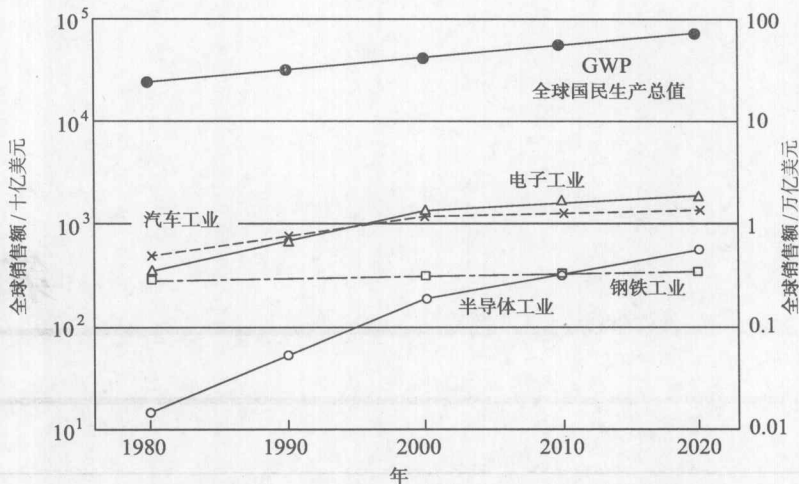


图 0.1 1980~2010 年的全球国民生产总值(GWP)及电子、汽车、半导体和钢铁产业的销售额,并外插至 2020 年^[1,2]

► 0.1.1 器件的基本结构

人类研究半导体器件已经超过 135 年^[3]. 至今大约有 18 种主要的器件类型以及 140 种与其相关的器件^[4]. 然而,所有这些器件均可由少数几种基本结构组成.

图 0.2(a)所示的结构是由金属和半导体两种材料紧密接触所形成的金属-半导体(metal-semiconductor)界面(interface). 早在 1874 年即有人研究这种基本结构,开创了半导体器件研究的先河. 这种界面可以用作整流接触(rectifying contact),使电流只能沿单一方向流过;或者也可以用作欧姆接触(ohmic contact),使电流可以双向通过,且落在接触界面上的压降很小,甚至可以忽略. 我们可以利用这种结构制作很多有用的器件. 例如,利用整流接触作为栅极(gate)、利用欧姆接触作为源极(source)和漏极(drain),我们可以得到一种很重要的微波器件(microwave device),即金半场效应晶体管(metal-semiconductor field-effect transistor, MESFET).

第二种基本结构是由 p 型(带正电的载流子)和 n 型(带负电的载流子)半导体接触形成的 p-n 结(junction),如图 0.2(b)所示. p-n 结是大部分半导体器件的关键结构,其理论模型是半导体器件物理的基础. 如果我们结合两个 p-n 结,亦即加上另一个 p 型半导体,就可以形成一个 p-n-p 双极型晶体管(bipolar transistor). 它发明于 1947 年,为整个电子产业带来了空前的冲击. 而如果我们结合三个 p-n 结就可以形成 p-n-p-n 结构,这是一种叫作可控硅(thyristor)的开关器件(switching device).

第三种基本结构是由两种不同半导体材料形成的异质结界面(heterojunction interface),如图 0.2(c)所示. 例如,我们可以用砷化镓(GaAs)和砷化铝(AlAs)接触来形成一个异质结. 异质结是高速器件和光电器件的关键组成部分.

图 0.2(d)所示为金属-氧化物-半导体(metal-oxide-semiconductor, MOS)结构,这种结构可以看作是金属-氧化物界面和氧化物-半导体界面的结合. 用 MOS 结构作为栅极,再用两个 p-n 结分别作为源极和漏极,我们就可以制作出金氧半场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET). 对于集成电路而言,要将数以万计的器件整合于同一个集成电路芯片(chip)中, MOSFET 是最重要的器件.

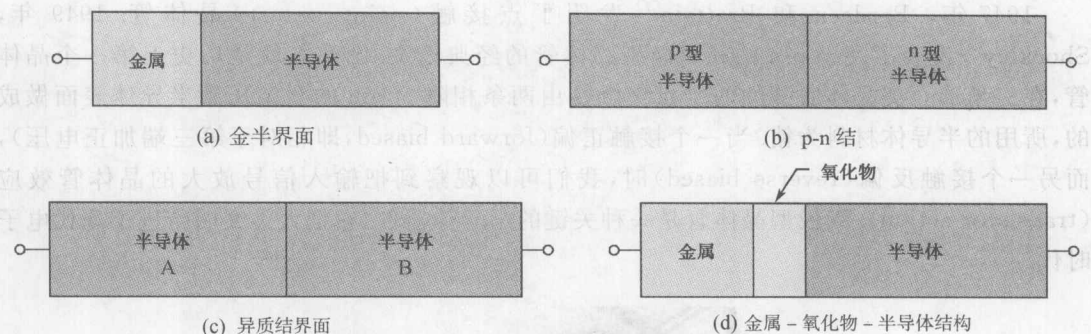


图 0.2 器件基本结构

► 0.1.2 主要的半导体器件

表 0.1 按时间先后顺序,列出了一些主要的半导体器件,其中,加上标 b 的是两端器件,其他的是三端或四端器件^[3]。最早开始系统研究半导体器件(金属-半导体接触)的是 Braun^[5]。1874 年,他发现金属和金属硫化物(如铜铁矿 copper pyrite)的接触电阻与外加电压的大小及极性有关。1907 年, Round^[6]发现了电致发光效应(用于发光二极管, light-emitting diode, LED)。他观察到,在碳化硅晶体两端外加 10V 的电压时,晶体会发出黄色的光。

表 0.1 主要半导体器件

公元	半导体元件 ^a	作者/发明者	参考文献
1874	金属半导体接触 ^b	Braun	5
1907	发光二极管(LED) ^b	Round	6
1947	双极型晶体管(BJT)	Bardeen、Brattain 及 Shockley	7
1949	p-n 结 ^b	Shockley	8
1952	可控硅器件(Thyristor)	Ebers	9
1954	太阳能电池 ^b	Chapin、Fuller 及 Pearson	10
1957	异质结双极型晶体管(HBT)	Kroemer	11
1958	隧道二极管(Tunnel Diode) ^b	Esaki	12
1960	金氧半场效应晶体管(MOSFET)	Kahng 及 Atalla	13
1962	激光器 ^b	Hall 等	15
1963	异质结激光器 ^b	Kroemer、Alferov 及 Kazarinov	16、17
1963	转移电子二极管(TED) ^b	Gunn	18
1965	雪崩渡越时间二极管(IMPATT Diode) ^b	Johnston、Deloach 及 Cohen	19
1966	金半场效应晶体管(MESFET)	Mead	20
1967	非挥发半导体存储器(NVSM)	Kahng 及施敏	21
1970	电荷耦合器件(CCD)	Boyle 及 Smith	23
1974	共振隧穿二极管 ^b	张立纲、Esaki 及 Tsu	24
1980	调制掺杂场效应晶体管(MODFET)	Mimura 等	25
2004	5nm 金氧半场效应晶体管	Yang 等	14

注: 上标 a 表示:

MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor;

MESFET: Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor;

MODFET: Modulation-Doped Field-Effect Transistor.

上标 b 表示的是两端(two-terminal)器件,其他的是三端或四端器件^[3]。

1947年, Bardeen 和 Brattain^[7] 发明了点接触(point-contact)晶体管. 1949年, Shockley^[8] 发表了关于 p-n 结和双极型晶体管的经典论文. 图 0.3 就是历史上第一个晶体管, 在三角形石英晶体底部的两个点接触是由两条相隔 $50\mu\text{m}$ 的金箔压到半导体表面做成的, 所用的半导体材料为锗. 当一个接触正偏(forward biased, 即相对于第三端加正电压), 而另一个接触反偏(reverse biased)时, 我们可以观察到把输入信号放大的晶体管效应(transistor action). 双极型晶体管是一种关键的半导体器件, 它把人类文明带进了现代电子时代.

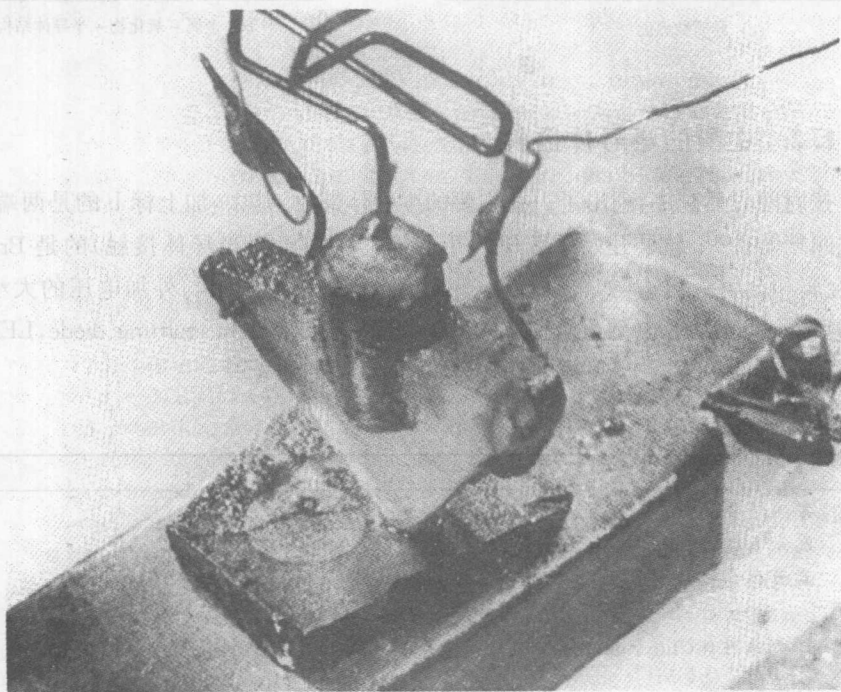


图 0.3 历史上第一个晶体管^[7](由贝尔实验室提供照片)

1952年, Ebers^[9] 为用途广泛的开关器件, 即可控硅器件(thyristor), 提出了一个基本模型. 1954年, Chapin 等人^[10] 发明了以硅 p-n 结制成的太阳能电池(solar cell). 太阳能电池是目前获得太阳能最主要的技术之一, 它可以将太阳光直接转换成电能, 且对环境无害. 1957年, Kroemer^[11] 提出了用异质结双极型晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)来改善晶体管的特性, 这种器件有可能成为最高速的半导体器件. 1958年, Esaki^[12] 观察到重掺杂(heavily doped)的 p-n 结具有负阻特性, 这个发现促成了隧道二极管(tunnel diode)的问世. 隧道二极管以及相关的隧穿现象(tunneling phenomenon)对欧姆接触和穿过薄膜的载流子输运很重要.

1960年, Kahng 及 Atalla^[13] 发明了 MOSFET. 对于先进的集成电路而言, MOSFET 是最重要的器件. 图 0.4 就是第一个用热氧化硅衬底做成的器件. 它的栅长(gate length)是 $20\mu\text{m}$, 栅氧化层(gate oxide)厚度是 100nm , 两个小孔是源极和漏极的接触孔(contact hole), 而中间狭长的区域是由铝蒸发穿过金属掩模版(metal mask)形成的铝栅电极(aluminum gate). 虽然目前 MOSFET 已经缩小(scaled down)到纳米尺度, 但是当初第一个 MOSFET 所采用的硅衬底和热氧化生长的氧化硅, 仍然是目前最常用的组合. MOSFET 及其相关的集成电路占有半导体器件市场 95% 的份额. 最近, 沟道长度只有 5nm 的