



[美] 施 敏 主编

Modern Semiconductor
Device Physics

现代半导体 器件物理



科学出版社

[美] 施 敏 主编

Modern Semiconductor
Device Physics

现代半导体
器件物理



科学出版社

图字：01-1999-2769

内 容 简 介

本书是1981年版《半导体器件物理》的续编。书中详细介绍了近20年来经典半导体器件的新增功能及新型半导体器件的物理机制。全书共八章，内容涉及先进的双极晶体管和异质结器件，金属-半导体接触及各种场效应晶体管，功率器件、量子器件、热电子器件、微波器件、高速光子器件，以及太阳能电池等。各章末除附有习题外还给出了尽可能多的参考文献。书后附录提供了符号表、国际单位制基本单位、物理常数、晶格常数最新值，以及元素半导体，二元、三元化合物半导体和绝缘体的特性。

本书可作为应用物理、电子工程、电机、材料科学领域大学本科生及研究生教材，也可供在半导体器件领域工作的科学家与工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代半导体器件物理/[美]施敏(S. M. Sze)主编;刘晓彦、贾霖、康晋锋译. -北京:科学出版社, 2001

书名原文: Modern Semiconductor Device Physics, John Wiley & Sons, Inc.

ISBN 7-03-009059-4

I. 现… II. ①施…②刘…③贾…④康… III. 半导体器件-物理性能
IV. TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第84511号

Edited by S. M. Sze

MODERN SEMICONDUCTOR DEVICE PHYSICS

Copyright © 1998 by John Wiley & Sons, Inc.

本书由Wiley授权,根据英文版翻译

版权所有,翻印必究

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>

源海印刷厂印刷

科学出版社出版发行 各地新华书店经销

*

2001年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2001年6月第一次印刷 印张: 27 $\frac{3}{4}$

印数: 1—2 000 字数: 524 000

定价: 48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

中文版序

《现代半导体器件物理》与我的前著《半导体器件物理》(1969年第一版,1981年第二版)在内容上互为补充,它们都由 John Wiley & Sons 公司出版。这本新书的内容涵盖了半导体器件领域最近的发展状况,而前著《半导体器件物理》则提供了各种器件的工作原理基础和器件特征。

《半导体器件物理》的第一版和第二版已分别在 1972 年和 1987 年被辽河实验工厂情报资料室(东北工学院印刷厂印刷)和黄振岗先生(电子工业出版社出版)译成中文出版。自 1969 出版以来,《半导体器件物理》已被引用 1200 余次,是工程和应用科学领域同期发表的工作中被引用次数最多的(ISI Press, Philadelphia)。

我很高兴地获知,《现代半导体器件物理》已由王阳元教授领导的北京大学微电子所中的一个小组译成中文。我相信该中译本将会被中国的半导体界很好地接纳。

中国正处于其电子工业快速增长的关键时刻。预计,到 2010 年,中国在消费电子产品方面的销售额将与美国持平;到 2020 年该销售额将是美国的五倍。在全球,电子工业仍将是最大的工业;在 2020 年电子产品的全球销售额将超过五千亿美元。

由于半导体器件是电子工业的基础,因此,对电气和电子工程、应用物理和材料科学专业领域的学生来说,了解器件的工作原理是非常重要的。我希望这本新书是研究生的一本有用的教科书,我还希望该书能成为在微电子和相关领域开展研究、开发工作的有关人员的参考书。

台湾交通大学联华电子讲座教授
施教(S. M. Sze)

中译本序

1998年春,施敏教授应北京大学微电子所所长王阳元教授的邀请,来北京参加北京大学一百周年校庆,带来了刚刚出版的“Modern Semiconductor Device Physics”(S. M. Sze, John Wiley & Sons, Inc., 1998)一书,我们研究小组中的三位青年博士读到以后,爱不释手,决定把它译成中文奉献给读者。

施敏教授写书是很有名的。他写的“Semiconductor Device Physics”(S. M. Sze, John Wiley & Sons, Inc., 1969; and Second Ed. 1981)是这一领域的经典著作,自出版以来,始终被世界各大学作为教科书或教学参考书广泛采用。该书在中国,1972年就被译成中文(当时大陆的学者并不认识施敏教授,把作者姓名译成史西蒙)。从此,施敏教授的《半导体器件物理》,如同在世界各大学一样,也成了中国大学广泛采用的经典教科书。该书内容丰富、概念清晰、说理透彻,是它如此受到青睐的原因。三十年来在中国培养出来的半导体器件和微电子学方面的专业人才,几乎都读过施敏教授的这本书,从中受益匪浅(当然也包括我们研究小组的这三位博士)。施敏教授的学术成就是很卓著的,他在金属-半导体接触、微波和光电器件、亚微米 MOSFET 技术等领域的研究都作出了开创性的贡献。特别是他发明的非挥发性半导体存储器,如电可擦除的可编程只读存储器(EEPROM)和快闪存储器(Flash Memory),作为关键的存储器件已经广泛地应用到移动通讯、笔记本电脑、智能 IC 卡、数字相机、便携式电子系统中。施敏教授是北京大学的兼职教授,多次来北京大学微电子所讲学,他的在学术上能不断创造新思想的学风,在青年学生和教师(当然也包括我们研究小组的这三位博士)中有着非常好的印象,也激励着他们去不断地探索。

正如施敏教授所说,这本《现代半导体器件物理》是他的《半导体器件物理》(1981年版)一书的最新补充。随着微电子技术的迅速发展,半导体器件的特征尺寸已进入超深亚微米乃至亚 0.1 微米,在原理、结构和制造工艺方面有许多重大突破,同时出现了许多新型半导体器件,如量子器件等。《现代半导体器件物理》一书,对近二十年来半导体器件的发展成果,做出了非常成功的总结与提炼,并给出了国际半导体器件发展的最新进展和动态,因此是半导体器件领域的一本非常优秀的著作,我相信,它必将会成为大学相关专业的教科书和从事相关领域工作的工程师的参考书。

三位译者中,刘晓彦翻译了第三、五、八章,并对全部译稿进行了初审和统稿,贾霖翻译了第一、二、六、八章,康晋锋翻译了第四章和附录。毕竟三位译者都比较

年轻,知识面还不够宽,文字表述缺少经验,因而在翻译过程中常有力不从心的感觉,为此,邀请了八位朋友,他们都是各个半导体器件领域的专家,他们分别审阅了这本书的译稿,提出了许多重要的宝贵意见,为保证译稿的学术水平作出了贡献。为此,我们要向虞丽生、夏建白、孙钟林、王舒民、王子滨、张兴、赵宝瑛、黄如教授表示衷心的感谢。还要感谢中国科学院科学出版基金和科学出版社对这本译著的出版给予的资助和支持。孙雷、陈松涛、刘弋波在文字处理、编写索引等方面做了许多具体的工作,也一并表示感谢。

译稿不妥之处,敬请批评指正。

韩汝琦

2001年3月于燕园

序

在过去的 50 年中,电子工业的长足发展对我们的社会产生了无法估量的影响。目前,电子工业已成为世界上规模最大的工业,其全球市场份额已经超过了 10 000 亿美元。半导体器件是电子工业的基础,为满足电子工业的巨大需求,该领域的发展十分迅速。与此相适应的是,有关半导体器件的文献资料也呈爆炸式增长,从 20 世纪 50 年代的每年仅有几篇文献发表到现在的每年发表文献 10 000 余篇。

1981 年, Wiley-Interscience 出版社出版了《半导体器件物理》第二版。该书对所有经典半导体器件的物理机制和工作原理做了全面阐述。此后,又有超过 120 000 篇的半导体器件方面的文献发表。为了使读者能了解这些进展,我们邀请了一批半导体器件领域中的世界知名学者共同撰写了本书。书中详细阐述了 1981 年以来经典器件新增强的功能及新型器件的物理概念。需要指出的是,经典器件的基本物理机制并没有本质的改变,因此,第二版《半导体器件物理》中 80% 的内容仍然有效。为了使本书篇幅适中,我们将不加推导地直接使用第二版《半导体器件物理》中的结果,也不再重复其中的内容。所以,本书实际上是第二版《半导体器件物理》的一个补充。

编写本书的目的是作为应用物理、电机与电子工程、材料科学等领域研究生的教材,同时也可以作为在半导体器件领域里工作的工程师和科学家的参考书使用。我们已假设读者对第二版《半导体器件物理》(Wiley, 1981)中讲述的器件工作原理有了基本的了解。对那些不熟悉第二版《半导体器件物理》的读者,这两本书可以同时学习。在这种情况下,我们假设读者已经学习过本科生使用的标准的半导体器件方面的教科书,如《半导体器件:物理与工艺》(Wiley, 1985)等。

在本书的写作过程中,我们得到了许多人的支持和帮助。首先,要感谢我们的学术和工业研究机构的主管们,没有他们的帮助,这本书是不可能写出来的。本书审阅人的建议使我们获益匪浅,这些审阅人是: M. Barnett 博士(the University of Delaware), R. J. Beresford 教授(Brown University), R. Bhat 博士和 C. E. Zah 博士(Bell Communications Research), C. Y. Chang 教授(台湾交通大学), K. Chang 教授(Texas A&M University), L. Larson 教授(the University of California, San Diego), M. Mastrapasqua 博士和 K. K. Ng 博士(Lucent Technologies), B. J. Moon 博士(Vitesse Semiconductor Corporation), L. D. Partain 博士(Varian Associates), P. P. Ruden 教授(the University of Minnesota)以及 R. J.

Trew 教授(Case Western Reserve University)。

我们还要感谢 N. Erdos 先生对书稿所做的技术编辑工作。感谢 T. W. Sze 夫人准备了附录, P. L. Huang 女士、C. C. Chang 女士、L. T. Chou 女士、H. T. Chua 女士和 A. Y. W. Wong 女士准备了索引。我们还要感谢台湾交通大学 Spring Foundation 提供了基金资助。我还要特别感谢台湾 United Microelectronics Corporation(UMC)提供了 UMC Chair Professorship 基金, 以及香港科技大学的殷勤招待和香港大学为本书写作提供的良好工作环境。

S. M. Sze(施敏)

执笔者简介

P. M. 阿斯贝克(Asbeck)

加州大学圣迭戈分校, 电子与计算机工程系, California, USA

B. J. 巴莱加(Baliga)

北卡罗来纳州立大学功率半导体研究中心, Raleigh, North Carolina, USA

S. 钱德雷斯卡(Chandrsekhar)

朗讯科技, 贝尔实验室 Crawford Hill 实验室, Holmdel, New Jersey, USA

H. 艾西尔(Eisele)

密歇根大学电气工程和计算机科学系, Ann Arbor, Michigan, USA

T. A. 菲杰尔德利(Fjeldly)

挪威科技大学物理电子系, Trondheim, Norway

M. A. 格林(Green)

新南威尔士大学光电专业研究中心, Kensington, New South Wales, Australia

G. I. 哈达德(Haddad)

密歇根大学电气工程和计算机科学系, Ann Arbor, Michigan, USA

S. J. 希莱尼斯(Hillenius)

朗讯科技贝尔实验室, Murray Hill, New Jersey, USA

T. P. 李(Lee)

贝尔通讯中心光电技术研究中心, Red Bank, New Jersey, USA

S. 卢莱伊(Luryi)

纽约州立大学石溪分校电子工程系, Stony Brook, New York, USA

M. S. 舒尔(Shur)

Rensselaer 理工学院电气、计算机和系统工程系, Troy, New York, USA
施敏(S. M. Sze)

台湾交通大学电子工程系, 新竹, 中国台湾

A. 扎拉维斯基(Zaslavsky)

布朗大学工程系, Providence, Rhode Island, USA

作者简介

施敏，男，中国工程院外籍院士，美国工程院院士。台湾交通大学教授，台湾纳米器件实验室主任，北京大学兼职教授。在金属-半导体接触、空间电荷区的碰撞电离、微电子工艺等领域做出了开创性的贡献。是非挥发性半导体存储器、肖特基MOSFET等多种半导体器件的发明人。著有《半导体器件物理》等11部学术专著，其中《半导体器件物理》一书是工程和应用科学领域的三部经典专著之一。

译校者简介

刘晓彦，女，毕业于北京大学计算机系，获博士学位。现为北京大学微电子所副教授，目前主要从事显示类专用集成电路设计，超深亚微米半导体器件模型、模拟及新型器件结构的研究。

贾霖，男，毕业于北京大学物理系，获博士学位。现在美国加州大学圣迭戈分校工作，目前主要从事集成电路工艺等的研究。

康晋锋，男，毕业于北京大学计算机系，获博士学位。现为北京大学微电子所副教授，目前主要从事深亚微米和纳米半导体器件物理和工艺、集成电路新材料、铁电存储器技术方面的研究工作。

韩汝琦，男，北京大学微电子所教授，博士生导师。长期从事固体物理、半导体物理、半导体器件物理的教学和研究工作，有较高的学术造诣。著有《半导体物理基础》、《晶体管原理与设计》、《非晶态物理》、《固体物理学》等，发表论文80余篇，曾获全国高校优秀教材国家级特等奖和国家科技进步二等奖。

责任编辑：魏玲
封面设计：王浩

目 录

中文版序

中译本序

序

执笔者简介

引言	1
1 双极晶体管	9
1.1 引言	9
1.2 双极晶体管的工作原理	11
1.3 硅双极晶体管	26
1.4 异质结双极晶体管	31
1.5 双极晶体管模型	51
1.6 总结与展望	56
习题	59
参考文献	60
2 化合物半导体场效应晶体管	63
2.1 引言	63
2.2 肖特基势垒和欧姆接触	65
2.3 GaAs MESFET	69
2.4 异质结场效应晶体管(HFET)	82
2.5 栅极漏电流	89
2.6 新型化合物半导体 FET	90
2.7 总结与展望	98
习题	100
参考文献	103
3 MOSFET 及其相关器件	106
3.1 引言	106
3.2 MOSFET 的按比例缩小	107
3.3 CMOS/BiCMOS	110
3.4 可靠性	119

3.5	SOI 和三维结构	122
3.6	存储结构	125
3.7	低压/低功耗器件	131
3.8	总结与展望	133
	习题	136
	参考文献	137
4	功率器件	140
4.1	引言	140
4.2	功率整流管	141
4.3	功率 MOSFET	155
4.4	绝缘栅双极晶体管	167
4.5	MOS 栅控晶闸管	179
4.6	碳化硅功率器件	184
4.7	总结与展望	185
	习题	186
	参考文献	186
5	量子效应和热电子器件	192
5.1	引言	192
5.2	共振隧穿(RT)结构	194
5.3	热电子结构	220
5.4	器件应用	233
5.5	总结与展望	245
	附录 5.A 态密度和费米积分	247
	附录 5.B 在具有散射的超晶格中的漂移速度	248
	附录 5.C 接触和超晶格	249
	附录 5.D 相干晶体管基区输运	250
	习题	251
	参考文献	254
6	有源微波二极管	262
6.1	引言	262
6.2	渡越时间二极管	269
6.3	共振隧穿二极管	282
6.4	转移电子器件	288
6.5	总结与展望	303
	习题	305
	参考文献	306

7 高速光子器件	311
7.1 引言	311
7.2 激光器的设计及其基本工作原理	313
7.3 量子阱和应变层量子阱激光器	325
7.4 高级激光器结构和光子集成电路(PIC)	330
7.5 光接收器和光电集成电路	341
7.6 总结与展望	350
附录 7.A 线宽公式的推导	350
附录 7.B 应变层单量子阱激光器的透光载流子面密度和微分增益的 近似表达式	353
习题	354
参考文献	356
8 太阳电池	362
8.1 引言	362
8.2 太阳光辐射和理想的能量转换效率	364
8.3 硅太阳电池:单晶、多晶和非晶	370
8.4 化合物半导体电池	384
8.5 组件	392
8.6 总结与展望	398
习题	399
参考文献	402
附录 A 符号表	407
附录 B 国际单位制(SI 单位)	409
附录 C 单位词头	409
附录 D 希腊字母	410
附录 E 物理常数	410
附录 F 300K 的晶格常数	411
附录 G 重要的元素和二元半导体性质	412
附录 H Si 和 GaAs 在 300K 的性质	413
附录 I III-V 族三元化合物半导体的性质	414
附录 J SiO ₂ 和 Si ₃ N ₄ 在 300K 的性质	416
索引	417

引言

施敏

台湾交通大学，新竹，中国台湾

半导体器件物理文献

早在 1874 年，人们就开始了半导体器件的研究^[1, 2]。然而，直到 1947 年朗讯 (Lucent) 科技公司所属贝尔实验室(前身为 AT&T 贝尔实验室)的一个研究小组发明了双极晶体管后^[3, 4]，半导体器件物理的研究才有了根本性的突破。双极晶体管及其相关的半导体器件构成了当今全球市场份额最大的电子工业的基础。

与电子工业的成长同步，半导体器件方面的文献也如雨后春笋般地涌现。图 1 给出了器件方面文献每年的发表数量^[5]。图 1 的资料来源于 INSPEC 数据库。这个数据库建于 1969 年。1969 年以前发表的器件方面文献的总数估计约为 2500 篇。如果器件文献的发表也有通常的生命周期特性(即由初生、成长、饱和，到最终下降)的话，那么，初生期占了约 3/4 个世纪(从 1874 年到 1947 年)。1947 年以后，进入到成长期。最初的快速增长持续了 27 年。这一时期，文献的年发表量每两年就翻一番。到 1974 年，文献年发表量达到 3000 篇。至此，以往的 100 年间发表的器件文献总数达到 13 000 篇。1974 年以后，成长在继续，但速度降了下来，文献年发表量每 12 年翻番，到目前为止，发表的文献超过了 150 000 篇。

我们预计，成长期将至少持续到 21 世纪初叶。如果成长速度保持不变，到 2000 年，文献总量将接近 220 000 篇；到 2005 年，总数将达到 350 000 篇。我们的确应该强烈地意识到，我们拥有数量多么庞大的半导体器件方面的文献。

器件构件

在《半导体器件指南》^[6]一书中，定义了 67 种主要的半导体器件及其相关的 110 多个变种。然而，所有这些器件都可以由图 2 所示的少数几种器件构件来组成。

图 2(a)示出了金属-半导体界面，这是在金属和半导体之间形成的一种紧密接触。这种构件是第一个被研究的半导体器件(1874 年)。这种界面可用作整流接触，即肖特基势垒，或用作欧姆接触。我们可以用这种界面构成许多有用的器件，

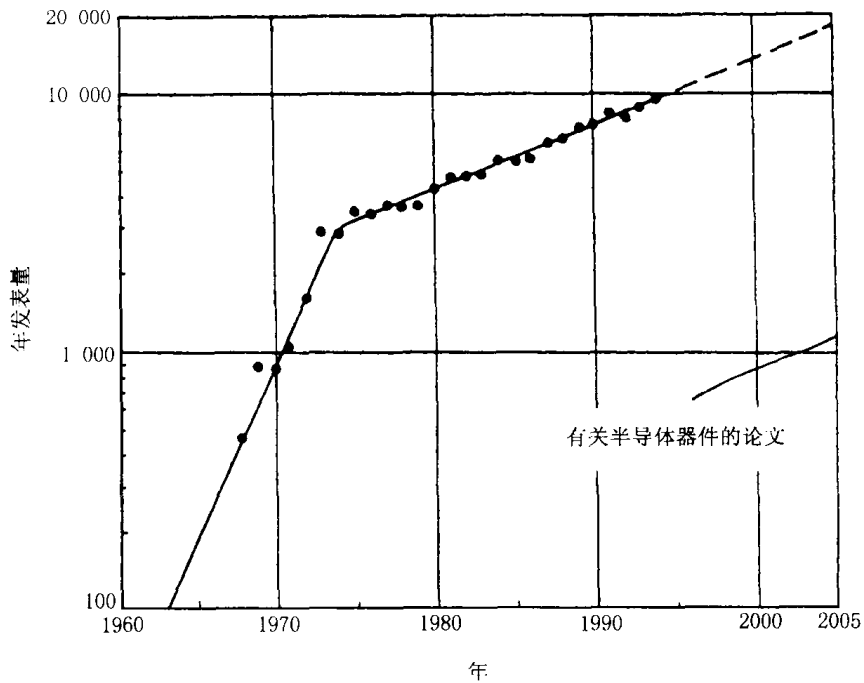


图 1 半导体器件文献的年发表量

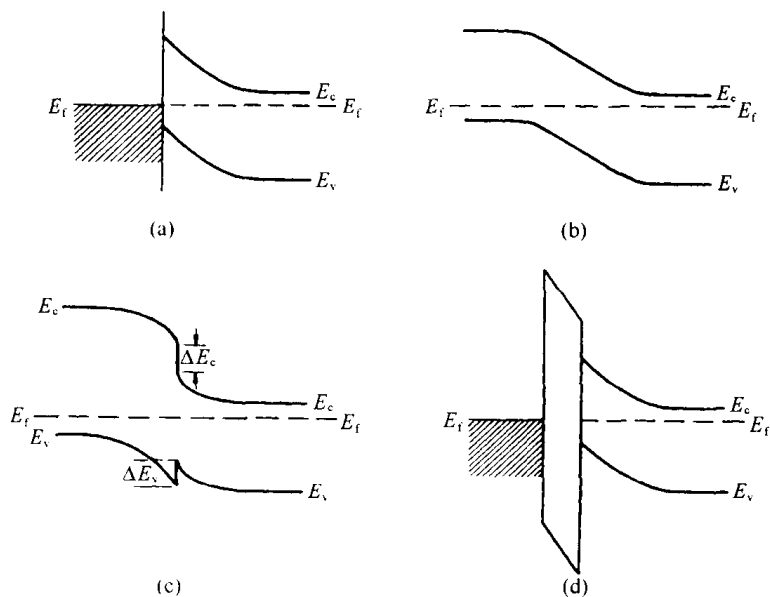


图 2 (a)金属-半导体界面(b)p-n 结(c)异质结界面(d)MOS 结构

例如，用一个整流接触作栅，用两个欧姆接触分别作源、漏，就可以得到一个 MESFET。

第二个构件是 p-n 结[图 2(b)]。它是在 p 型和 n 型半导体之间形成的“结”。若再加一层 p 型半导体,将两个 p-n 结结合起来,就构成了 p-n-p 双极晶体管。p-n-p 晶体管发明于 1947 年,它开创了现代电子学的新纪元。如果我们将三个 p-n 结结合起来构成一个 p-n-p-n 结构,就得到了晶闸管。

第三个构件[图 2(c)]是异质结界面,即在两种不同的半导体之间形成的界面。如果用带有两个异质结界面的 n-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/p-Al_xGa_xAs 结构,就可以做成双异质结激光器。另一个重要的例子是共振隧穿二极管(RTD),它是由四个异质结,如 GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs 构成的。

图 2(d)示出的是金属-氧化物-半导体(MOS)结构(如果氧化物用绝缘体替代,就是 MIS 结构)。这种结构可视为一个金属-氧化物界面和一个氧化物-半导体界面的结合。甚大规模集成电路(ULSI)中最重要的器件 MOSFET,就是由一个 MOS 结构作栅,两个 p-n 结作源和漏形成的。

我们采用以下的技术来制造这些构件:(1)用金属化过程来形成金属-半导体接触和金属-氧化物界面(这是 MOS 结构的一部分);(2)用离子注入或杂质扩散方法来形成 p-n 结;(3)用外延方法,特别是分子束外延(MBE)和金属有机物化学汽相沉积(MOCVD)方法,来形成异质结;(4)用氧化或薄膜淀积方法来形成氧化物-半导体界面^[7,8]。

主要里程碑

图 3 按时序标示了一些重要的半导体器件的发明时间,列在右边的是两端器件,列在左边的是三端器件和四端器件。最早对半导体器件(金属-半导体接触)作系统研究之人当属 Braun,他在 1874 年注意到电阻对外加电压极性的依赖以及表面导电的机制^[1]。1907 年,Round 发现了电致荧光现象(发光二极管,LED)。当他在—块金刚砂晶体上的两点间加上电压时,观察到晶体发出了黄光^[9]。1938 年 Schottky 提出,金属-半导体接触中的势垒起源于半导体中稳定的空间电荷,而非由于一个化学层的存在。这个模型现在被称作肖特基(Schottky)势垒^[10]。

1947 年,Bardeen 和 Brattain 发明了点接触晶体管^[3]。紧接着,1949 年 Shockley 发表了关于 p-n 结和双极结型晶体管的经典性文章^[4]。晶体管的问世,对电子工业产生了无法估量的影响。三位发明者因此获得了 1956 年诺贝尔奖。随后,在 1952 年,Shockley 提出了结型场效应晶体管,这是第一个半导体场效应器件^[11]。同年,Ebers 发展了晶闸管的基本模型,而晶闸管是用途最多的开关器件之一^[12]。基于光伏效应的太阳能电池,首先由 Chapin、Fuller 和 Pearson 于 1954 年做出来,他们利用扩散形成的硅 p-n 结,获得了 6% 的转换效率^[13]。从长远的用途来看,太阳能电池是从太阳获得能量的主要器件。

1957 年,Kroemer 建议采用异质结双极晶体管来提高发射极的效率^[14],这种