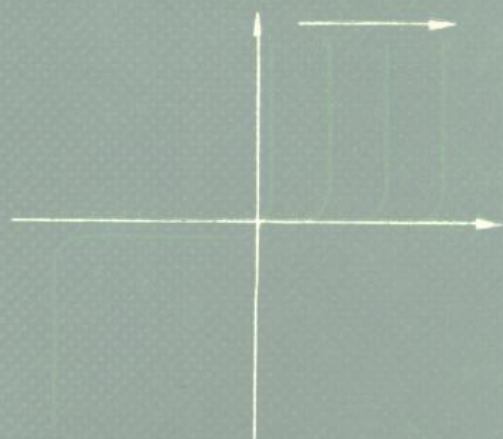


〔美〕 B. J. 巴利伽著



SILICON POWER FIELD CONTROLLED
DEVICES AND INTEGRATED CIRCUITS

硅功率场控器件和
功率集成电路



机械工业出版社

硅功率场控器件和 功率集成电路

【美】 B. J. 巴利伽 著

王正元 刘长吉 译

顾廉楚 校



机械工业出版社

内容摘要 本书从介绍硅材料的新进展(如: 中子嬗变掺杂(NTD)、电子辐照控制少子寿命等)以及高电压器件的表面造型等技术入手, 着重介绍了功率结栅场效应晶体管、MOS 栅场效应晶体管、场控二极管、功率达林顿晶体管、集成双极晶体管、集成场效应晶体管、MOS 门极晶闸管等多种功率场控器件的基本原理、设计考虑以及器件的结构与制造特点。这些器件属于功率集成电路的范畴, 其制造工艺既概括了以晶闸管为代表的第一代功率半导体器件向大电流、高电压方向发展所积累起来的各种经验, 又综合了制造大规模集成电路而发展起来的外延、化学气相沉积(CVD)、离子注入、投影光刻等新技术的成就。本书的内容比较新颖, 参考资料丰富。

本书可供从事功率半导体器件研制和应用的工程技术人员、科研人员及大专院校有关专业的师生、研究生参考。

**Silicon Power Field Controlled Devices
and Integrated Circuits**
B. JAYANT BALIGA, ACADEMIC PRESS, 1981

硅功率场控器件和功率集成电路

[美] B. J. 巴利伽 著

王正元 刘长吉 译

顾廉楚 校

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 5 1/2·字数 140 千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0.001—2.037·定价 1.90 元

统一书号: 15033·6424

译者的话

本书是根据美国贝尔实验室组织编写的“应用固体科学”丛书第二卷第二册(1981年底第一版)翻译的。该丛书以介绍材料和器件研究中的最新进展为目的,聘请相应领域中的专家撰写而成。这些著作是作为已发表的教科书或一般性著作、论文的内容补充,综合整理,并加以评述,有较高的参考价值。

本书作者B. J. 巴利伽(Baliga)是美国通用电气(GE)公司研究发展中心功率半导体器件研究室的负责人。近年来,他在发展、研制硅功率场控器件和硅功率集成电路方面有所建树。本书出版后,他又在美国电气及电子工程师学会(IEEE)发行的《电子器件汇刊》等杂志上发表了多篇有关的文章,又取得了一些新的成果。

众所周知,功率半导体器件是现代电力电子技术的基础。在六十年代、七十年代中,以晶闸管(可控硅)为代表的第一代功率半导体器件,由于它们能根据要求来控制其导通相位,故在把交流电变为直流电的整流技术中取得了巨大成功。但是,它们必须在阳极电流过零时才能关断,因此在直流供电的场合下,例如直流斩波技术和把直流电变成交流电的逆变技术中应用,就不得不采用LC振荡换流电路进行强迫关断,这将带来很大不便。于是,既能控制导通,又能控制关断的第二代功率半导体器件(如:GTR——巨型晶体管,GTO——可关断晶闸管以及各种功率场控晶闸管或场效应晶体管等)应运而生。预期,它们及用它们组成的新型直流斩波调速器和交流变频调速器,在八十年代、九十年代将会蓬勃发展。这新一代产品的结构,属于功率集成电路的范畴。正如本书作者在书中所说:“功率集成电路被定义为任何在一个芯片上单片地集成两个或更多个功率器件,或者把一个功

IV

率器件同一个小功率的控制电路相集成的情况。”其制造工艺既概括了第一代功率半导体器件向大电流、高电压方向发展所积累起来的各种经验，又综合了制造大规模集成电路而发展起来的外延、化学气相沉积(CVD)、离子注入、投影光刻等新技术的成就。

本书从介绍硅材料的新进展以及高电压器件的表面造型等技术入手，着重介绍各种功率场控器件的基本原理、设计考虑以及器件的结构与制造特点。本书的内容比较新颖，参考资料丰富。相信，这些对于从事功率半导体器件研制和应用的工程技术人员、科研人员及大专院校师生、研究生会有裨益。

本书由北京变压器厂王正元、刘长吉同志翻译，清华大学顾廉楚副教授校阅。限于水平，有不妥或错误之处，望读者指正为盼。

译 者

1985年8月

序 言 (摘译)

自从第一个采用 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 系统的MOS晶体管问世以来,已经二十多年了。该系统的奥妙在于热生长的 SiO_2 膜具有较高的介电强度,而且它们的界面能容纳数量可以被控制的界面态。这两个条件,对于一个合格的MOS晶体管来说是最基本的要求。以MOS为基础的集成电路,同硅平面工艺相结合,正以工业革命以来从未有过的规模影响着我们的日常生活。MOS电路的性能随着精密刻线印刷术的出现而得到稳步提高,可以预期它会胜过双极晶体管电路。“应用固体科学”丛书的出版,正是紧跟这些令人振奋的发展而审慎地择编了多种评论著作,但它们还是显得有些零散。目前,以对已有出版物增补的形式作综述性介绍,时机业已成熟。这里,包括了最近五年期间表现得非常成熟的MOS器件物理,以及几乎每天都在改进的器件加工工艺的最新情况。

.....

MOS集成电路的主要应用一直是在小功率电路(即存贮器和逻辑电路)方面。功率集成电路发展的最新成就有希望打开另一个重要领域。所以本书叙述了为实现硅功率集成电路所需的特殊考虑。由B. J. 巴利伽撰写的本书系统地研究了功率器件的基本物理过程和相关的技术。这也许会对想即刻应用这些器件的实用科研人员和工程师比较适用。此外,本书的写作带有入门指导的特色,作为一本教科书也许是合适的。

.....

编者非常感谢做出了贡献的作者。他们刻苦的努力、个人的献身精神,使得本书的出版成为可能。最后,编者还要感谢贝尔实验室,他们为丛书的编辑提供了方便,特别要感谢丹尼斯·麦格鲁(Denise McGrew)先生所表现出的编辑技能。

道旺·卡恩(Dawon Kahng)

目 录

译者的话

序言 (摘译)

第一章 绪论	1
第二章 硅材料的限度	9
§ 1 电阻率	10
§ 2 迁移率	22
§ 3 寿命	33
第三章 击穿现象	46
§ 4 雪崩击穿	47
§ 5 突变结	49
§ 6 线性缓变结	50
§ 7 结的边缘造型技术	52
§ 8 基极开路的晶体管的击穿	67
§ 9 结的制造	70
§ 10 结的钝化技术	74
§ 11 结的隔离方法	76
第四章 结栅场效应晶体管	79
§ 12 基本的器件物理	80
§ 13 设计考虑	95
§ 14 器件结构及其制造	97
第五章 MOS栅场效应晶体管	103
§ 15 基本的器件物理	104
§ 16 设计考虑	113
§ 17 器件结构及其制造	117
第六章 场控二极管	122
§ 18 基本的器件物理	123
§ 19 设计考虑	133

§ 20 器件结构及其制造.....	135
第七章 功率集成电路	142
§ 21 功率达林顿晶体管.....	142
§ 22 集成双极晶体管.....	146
§ 23 集成场效应晶体管.....	150
§ 24 热力学考虑.....	156
第八章 最新发展.....	159
§ 25 MOS 栅晶闸管	159
§ 26 双极结型场效应晶体管.....	161
参考文献.....	163

第一章 绪 论

自从五十年代初开发结型晶体管以来,硅器件的额定值已经有了稳步增长。这些器件的功率控制容量,在越来越高的频率下,得到不断提高,为它们的应用开辟了新的领域。今天,硅功率器件的销售额业已超过十亿美元,并且预计今后还会继续稳步增长。功率器件的应用,已从商用和军用的小功率级扩大到工业用的大功率级。这些器件的工作频带包括从工频(60Hz $\ominus$)到100 kHz的很宽范围。近两年来,供市场上出售的某些最新的器件,使得硅功率器件的应用范围已超过1MHz。此外,已经证实,正在工业实验室中研制的硅功率器件,其性能可在高达1GHz频率下工作。

目前,这些器件的应用已扩大到日常生活用品及工业部门两个广阔的领域内。硅功率器件已经在诸如烤面包炉、搅拌器、电冰箱、电灶、洗衣机、电视机和收音机等家庭用具以及调光设备中,占据了一定地位。在今后几年内,预期在汽车电子设备领域内还会开展一场革命,把这些器件目前在汽车自动点火系统中的应用,推广到其他固态控制器(例如,挡风玻璃雨刮、燃油喷射系统以及防滑控制器^[1]等)中。在工业领域里,这些器件对电力的产生、分配、输送系统和工业加工设备产生极大的影响^[2,3]。它们的应用已经从某些机床、卷扬机、港口起货机等电动机控制扩展到运输系统,其中包括铁路机车和电车。除此之外,还有固态不间断电源,目前已广泛应用于医院、航空运输控制系统以及无线电台和电视台。功率器件的广泛应用范围示于图1。图中表示了系统的额定功率与器件工作频率的关系。该图还给出了功

$\ominus$ 美国的工频为60Hz。——译者注

率器件目前一些典型应用领域的示例。该图还举例说明, 在很宽的功率及频率范围 (从GHz频率但要求功率水平较低场合的应用, 直到低频下要求每只器件的功率控制容量高至1MW场合的应用) 内, 都要使用功率器件。

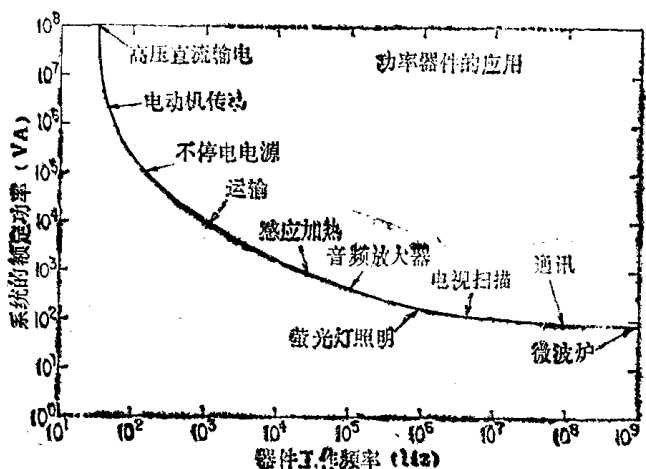


图1 功率半导体器件的应用范围

虽然, 双极型晶体管在五十年代初就已研制成功^[4], 但是, 第一只功率可控硅整流器^①一直到1957年12月才进行商业性介绍。此后, 许多新的功率器件得到发展, 同时, 功率器件的应用不仅迅速扩大到工业装备中, 而且还渗透到供日常消费者使用的民用器具中。今天, 供电力电子设备设计者采用的、许多不同类型的双极型器件示于图2中。该图还表示出这些器件的剖面及其端子间的伏安特性。作为讨论对象, 这里将只考虑三端的功率开关器件 (诸如整流二极管、齐纳二极管、肖特基二极管及双向二极管(Diac)等两端功率器件也可在大功率情况下使用。另一类为工业应用所感兴趣的重要器件是金属-氧化物压敏电阻(MOVs),

① 可控硅整流器(Silicon Controlled Rectifier)是美国通用电气公司开发初期定的商品名。现统称为硅晶体闸流管(Silicon Thyristor), 简称“晶闸管”。

——译者注

器 件	结 构	伏安特性	图形符号
普通晶闸管 (习称普通可控硅整流器——SCR)			
不对称晶闸管 (习称不对称可控硅整流器——ASCR)			
可关断晶闸管 (习称可关断可控硅整流器)(GTO)			
双向晶闸管 (TRIAC)			
双极型功率晶体管			

图2 双极型功率器件及其端子间特性一览表

A—阳极 K—阴极 G—门极 c—集电极 b—基极 e—发射极

它主要是用来抑制功率切换时产生的瞬态高电压。然而，三端器件含有一个门极，它能够用来控制流过功率器件的电流，因而它们作为能有效地控制负载功率的电路元件而具有重要的意义)。除了双极型功率晶体管外，图2所示的其他双极型三端功率器件都包含一个基本的四层结构，它由掺杂的p型和掺杂的n型半导体区交替组合而成。在这种pnpn结构的阳极端上施加一个正向

电压时,就形成如图 2 所示的晶闸管双稳态特性。由于器件从阻断状态转换到导通状态可以用一个外加门极电流源来触发,这一类器件就可以用来控制流向任何与之相配的(例如电动机之类)负载的电流。事实上,晶闸管已经成为电力工业中的一位“主力队员”,并且已在各种不同领域(从小功率的电动机传动直到超大功率的高压直流输电系统)内得到应用。然而,尽管它们的功率控制容量范围很宽,但是这些器件仍局限于较低频率下的应用。这种只能局限于低频工作的原因,主要是由于这些器件从导通状态转换到非导通状态,或者说转换到电流阻断状态时的速度太慢。因此,近二十年来,许多设计上的革新都在力图改善这些器件的关断速度。一方面,发展了降低这些基区中载流子寿命的方法。寿命的降低固然成功地减小了电流关断的瞬态过程时间,但却导致电流导通时器件正向压降的显著增加。这样,就要兼顾转换速度和电流通过期间器件中的功率损耗两者的要求。因而这些器件的最大转换速度被限制在10kHz以下。另一方面,改进器件的结构也可以提高关断速度。其中一条途径就是采用图 2 所示的不对称晶闸管。在这种结构中,晶闸管中常规均匀掺杂的 n 基区由一个两层 n 基区所代替。结构上的这种变化使得用来承受器件工作电压所需的基区厚度大大减薄;反过来,这又使电流导通期间的正向压降降低。于是,可以允许采用更低的基区少子寿命,从而提高这些器件的转换速度。应该注意到,这种转换速度的提高,是在牺牲反向阻断能力的情况下得到的。另一条改善这些器件转换速度的途径是,采用一种负的门极电流,在关断期间带走器件 p 基区中的电荷。这样可以缩短换流时器件关断所需的时间。转换速度的提高取决于两个方面:即由门极电流带走一部分电荷,以及基区中的载流子通过复合而消失。这种门极辅助关断的革新途径已经推广到可关断晶闸管(GTO)中,在该器件中甚至当阳极电压极性仍为正时,也能把阳极电流关断。但是,这需要比较大的负门极电流,并且要求门极区同阴极区呈指状交错配置。这些器件的设计与制造方面的进展,促进它们能在更高频

率下应用。今天已有适用于工作到10kHz的器件。目前,对于需要更高转换速度的应用来说,大功率双极型晶体管在使用中仍占优势。然而,像V型沟道“金属-氧化物-半导体”场效应晶体管(MOSFET)这样的单极型器件已经挤入到某些双极型晶体管的市场了。

这些功率器件的功率控制容量及其工作的频率范围示于图3。在低频范围内,现有的功率晶闸管的额定值远比其他器件的额定值大。现在,这些器件被广泛应用于高压直流输电系统。对于这种应用,重要的是使串、并联器件的数目达到最少,而又满足所希望的系统额定值。这就要求不断提高单只器件的最大工作电压和最大电流控制容量。器件额定值方面的这种改善在很大程度上受到能否获得高质量硅片的限制。低氧、无缺陷、区熔、高电阻率硅的发展情况示于图4。画在同一图上的还有大直径晶闸管

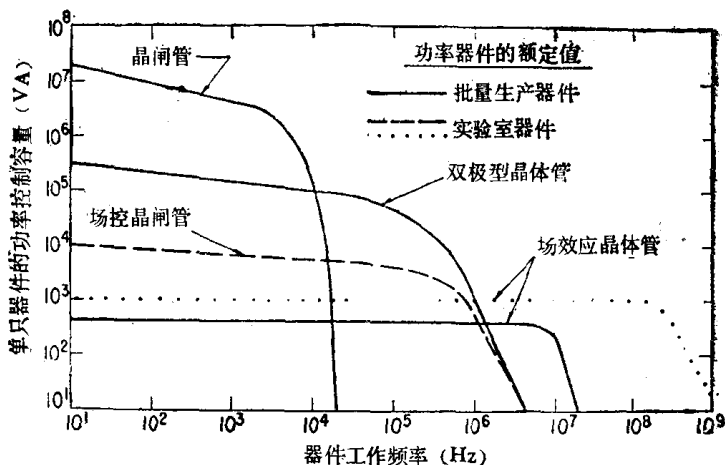


图3 功率半导体器件的频率和额定值范围

的发展情况。一般地说,大面积晶闸管的生产总要比大直径硅的生产滞后几年时间。这也许是因为加工能力的发展需要一定时间。目前,由中子嬗变掺杂提供的具有均匀电阻率的大直径硅单晶的出现,又加速了这些器件额定值的增长。今天,已经可以用单只器件来控制3000A电流,阻断5000V电压了。

再来看图3, 可以看到功率晶体管也已发展到具有相当可观的功率额定值。单只功率晶体管的电压额定值已经超过2000V, 但它的电流水平比较低, 为1或2A数量级。对于频率超过10kHz的大电流应用, 单片的功率达林顿晶体管得到了发展, 它已经能够控制几百安电流, 工作到400V。尽管在市场上可以买到的某些双极型功率晶体管有相当快的速度, 但它们的速度终究还要受到基区和集电极区中的少数储存效应的限制。因此, 在超过1MHz频率的情况下, 单极型场效应晶体的性能就胜过双极型器件。目前, 这种类型的器件已经达到600V击穿电压和大约1A电流控制容量。还有, 正如图3虚线所示, 实验室研制的器件已经发展到能够在超过100MHz频率下工作。此外, 有一种称之为场控晶闸管的新型功率器件正在一些实验室中研制。这些器件的优点在于: 在大电流密度下的正向压降比晶闸管和晶体管(包括场效应晶体管)都低, 而又有同双极晶体管可比的转换速度。虽然这些器件的发展还处于实验室阶段, 可以预期在不久的将来,

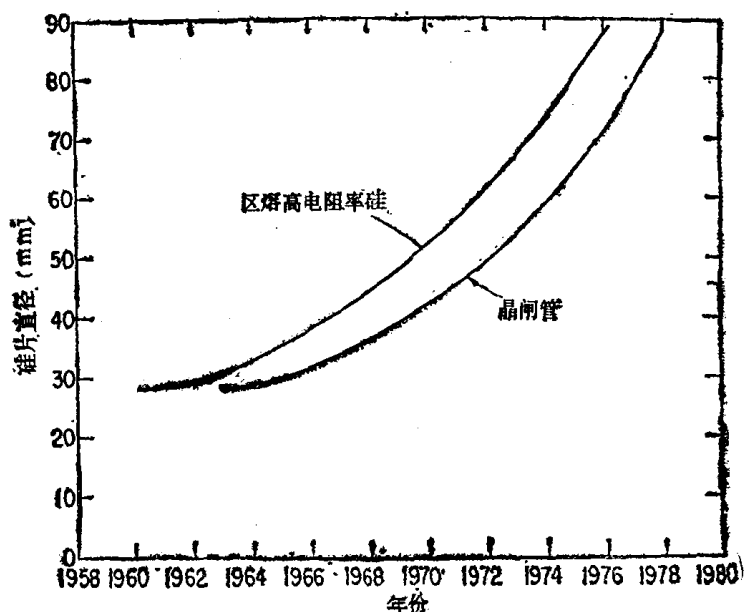


图4 硅片及随之研制的大面积晶闸管的发展过程

它们必定会冲击双极型晶体管的市场。

如上所述,当前在应用中占优势的功率器件仍是功率晶闸管和功率双极型晶体管。这些器件的工作物理过程,在近二十年来出版的有关功率器件的两本书中^[5,6]已详细介绍过。所以,本书就不再叙述这些器件。而本书将集中介绍新一类器件的工作物理过程,这些器件都是基于场控原理来实现其特性的。

目前正在为电力工业研制的三种器件都属于功率场控器件。它们是MOS栅场效应晶体管、结栅场效应晶体管以及场控晶闸管。由于这些器件的特性在很大程度上受到制造该器件的技术的影响,这里还将讨论各种器件的结构及其制造技术。本书的原意在于使读者对这些器件工作的物理过程有一个基本的理解。出于这种考虑,作者假定读者已很熟悉基本的半导体晶体管物理学,例如在研究生水平的教科书^[7,8]中所介绍的那些内容。此外,本书将重点讨论器件制造中的崭新技术,以使读者逐渐熟悉器件工艺的当前水平。然而,必须记住,在美国、日本,还有欧洲的许多工业实验室里,正在这个领域中继续进行深入的研究。预期在不久的将来会研制出许多新器件。希望本书能为读者跟踪这些令人鼓舞的发展打下一个基础。除了这些场效应器件之外,本书还将讨论功率集成电路的进展。这里再次说明,由于在家用器具的控制和汽车电子设备方面应用这些器件具有巨大兴趣,预计将来会有非常迅速的发展。

本书分为三个主要部分来介绍。第一部分评述与功率器件工作有关的硅的性质。在这部分要讨论决定功率器件特性的四种重要材料性能,即电阻率、自由载流子的迁移率、少数载流子的寿命、以及雪崩击穿过程。此外,在这部分的最后,还要对pn结的表面造型技术进行广泛讨论。必须着重强调,所有功率器件都工作在高电压下;特别是,本书中的讨论仅限于工作在高于100V电压的器件。为了达到这样高的工作电压,有必要对器件结的边缘进行适当造型和钝化,因为对于一种设计适当的器件结构而言,边缘处的电场强度总要比体内的更高。其结果,器件的工作

电压受器件最薄弱处发生击穿所限，因而就被每个器件采用的结区表面造型所决定。鉴于这种考虑，在单极型场效应晶体管里，采用适当的结区表面造型，是一项特别紧迫的需要。正如本书后面所展示的，它的通态电阻随设计击穿电压的2.5次方增加。因此，这些器件的击穿电压由于器件边缘的电场过强而造成的任何下降，都会导致产生较高的通态电阻，从而使得电流输运能力随之下降，同时导致器件增加额外功耗，这样使器件的封装更为困难。对这种重要因素的认识，已为文献中研究和报道过的许多结区表面造型技术所证实。

第二部分转而讨论功率场控器件。在这部分中叙述了三种功率场控器件。它们是功率结栅场效应晶体管、功率 MOS 栅场效应晶体管以及功率场控二极管。在每种情况下，首先讨论决定器件电流大小的器件的基本物理过程，随后讨论为得到最佳器件特性所需要的特殊设计考虑。确定设计规范之后，再描述具体的器件结构及其制造工艺。至于器件结构及其制造工艺对器件特性的影响，在整个这一部分中都是始终要特别予以强调的。

第三部分是关于功率集成电路的内容。对于本书的目的来说，功率集成电路被定义为任何在一个芯片上单片地集成两个或更多个功率器件，或者把一个功率器件同一个小功率的控制电路相集成的情况。虽然在这一部分，为了解释具体的设计问题，讨论了功率集成电路的某些特例，但重点仍将是对功率器件设计方面的考虑，以使它们更适于集成化。由于把模拟电路或逻辑电路同功率器件相集成的优点之一是使器件的过电流或过热得到保护，故这里有一段讨论了功率器件的安全工作范围，以及设计芯片时在热设计方面的考虑。

第二章 硅材料的限度

本章将阐述与后面几章要讨论的功率器件的工作有关的硅的某些性质。本章 § 1 中将讨论硅片电阻率与掺杂浓度之间的关系。虽然至今仍在广泛采用由欧文(Irwin)^[9]确立的电阻率与掺杂之间的关系,但是由穆斯蒂(Mousty)等人^[10]进行的测量,对这种关系提出了修正。此外,这一节还要讨论一种制作均匀掺杂硅片的新技术,它可以用来改进制造功率器件用的原始材料。这种技术是利用吸收热中子来使硅嬗变成磷[⊖]的,业已证明它能改善功率器件的击穿特性,而且使器件击穿电压及其通态正向压降之间在设计上的兼顾得到改进。可以预期,这种技术终将专门用来制备供制造功率器件所需的原始材料。

在本章的 § 2 中将讨论硅中自由载流子的迁移率。自由载流子的迁移率在决定双极型器件中的电流方面虽然也起着一定作用,但这种作用通常毕竟是属于第二位的。与此相反,在确定单极型场效应器件中的电流时,迁移率则起着决定性作用。所以,本章的这一节将讨论迁移率同掺杂浓度、环境温度、电场强度以及表面处的散射效应之间的关系。本书的后几章中,将要讨论单极型场效应晶体管,那时将叙述迁移率的这些变化同器件特性的关系。

本章 § 3 中将叙述硅中少数载流子[⊖]的寿命。硅是一种间接带隙半导体。在室温下,导带极小值和价带极大值之间相差 1.11eV。由于有这个较宽的禁带存在,电子-空穴对的复合和产

⊖ 中子嬗变掺杂硅(Neutron Transmutation Doped Silicon),通常简称为NTD-Si。——译者注

⊖ 通常把“少数载流子”简称为“少子”,“多数载流子”简称为“多子”。——译者注