



全国高技术重点图书·微电子技术领域

郝跃 彭军 杨银堂 编著

微电子学丛书

碳化硅宽带隙 半导体技术

科学出版社

73.726
476

微电子学丛书

碳化硅宽带隙半导体技术

郝 跃 彭 军 杨银堂 编著

科 学 出 版 社

2 0 0 0

0040/19

内 容 简 介

本书介绍了碳化硅宽带隙半导体的基本性质,晶体及薄膜生长技术,器件工艺以及在高温、高频、大功率器件等领域的应用.同时也对金刚石以及 GaN 基 III-V 族氮化物半导体作了简单介绍.

本书可作为大学微电子学科专业研究生教材,也可作有关科技人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

碳化硅宽带隙半导体技术/郝跃,彭军,杨银堂编
著.-北京:科学出版社,2000
(微电子学丛书/王阳元主编)

ISBN 7-03-008243-5

I. 碳… I. ①郝…②彭…③杨… III. IV-IV 族
化合物半导体-技术-研究 N. TN304.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 00616 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

科地亚印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 5 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2000 年 5 月第一次印刷 印张:9 1/2

印数:1—1 500 字数:242 000

定价: 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《微电子学丛书》编委会

顾问：黄 昆 林兰英 谢希德 王守武 王守觉
 童志鹏 李志坚 姜均露 王寿云

主 编：王阳元

编 委（以姓氏笔画为序）：

马俊如	万 群	王芹生	王永文	王阳元
王忠烈	仇玉林	白 丁	李佑斌	许居衍
许振嘉	汤小川	陈星弼	陈 贤	严晓浪
张义门	张利春	张 敏	郑敏政	宗祥福
洪先龙	俞忠钰	钱佩信	唐璞山	徐元森
徐雅文	徐筱棣	黄 敞	梁春广	梁骏吾
韩汝琦	熊和生	魏 玲	魏道政	

秘 书：赵宝瑛

《微电子学丛书》序

微电子学是源于并脱胎于固体物理和无线电电子学的一门新兴的边缘性技术学科。历史地说,1948年晶体管的发明、1958年采用硅平面工艺的集成电路的诞生和1971年微处理器的出现是微电子学发展史上的几个重要里程碑。经过46年的发展,微电子产业已成为战略性的基础产业,微电子科学技术已成为现代科学技术的关键技术基础。据统计,现在世界上GNP的65%与微电子技术有关。二次大战后,美国正是抓住了以微电子技术为基础的电子信息技术,使其经济起飞的。日本和亚洲一些国家和地区也都是抓住了这一点而使其经济振兴。按预测,一直到2020年,世界集成电路产业的产值仍将以年增长率13%的速度增长;技术上也仍保持着集成度年增长率为46%的速度继续发展。到2000年以微电子为基础的电子信息产业将成为世界第一大产业。因此,微电子科学技术乃是20世纪下半叶直到21世纪上半叶科学技术竞争的焦点。谁掌握了微电子技术,谁就掌握了主动权。当前,微电子产业规模和技术水平已成为衡量一个国家综合实力的主要标志。日本有人提出,把半导体工业总产值占工农业总产值的0.5%作为进入信息社会的标志是不无道理的。

当前,我国微电子产业和科学技术的发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展的需要。我国集成电路的市场份额只占世界集成电路市场的0.33%,与我国社会主义大国地位极不相称。国内市场的占有率,无论是品种还是数量,也只占20%左右。我国微电子产业和科学技术的落后面貌已成为我国四个现代化建设的制约因素。党和国家的领导已把发展微电子作为一项战略措施放到了突出的地位。在这样的形势下,编写出一套高质量的、反映世界微电子学发展前沿和我国微电子科学技术成果的丛书,必将

促进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

这套丛书不同于一般的通俗读物和科普读物，也不同于大学教材，它是一套反映微电子学主要研究领域里学科发展前沿问题的著作，以满足微电子学领域里的研究部门、教育部门和产业部门的需要，成为工作在第一线科技人员的参考书。当然它也可成为大学生和研究生的教学参考书。我们要求每本著作都要具有科学性、先进性和实践性，而整套丛书又要有系统性。我们计划在“八五”期间开始出版，到2000年前要出20来本。2000年后还要继续搞下去，使其成为跨世纪的出版物。这项工作的意义不亚于建一个工厂，建一个研究所。

倡议编写这套丛书是国防科工委微电子专业组、全国 ICCAD 专家委员会和 ICCAT 专家委员会的部分专家们，他们的倡议得到了全国各有关单位微电子专家的支持和赞同，从而形成了一个报告。这个报告得到当时任机械电子工业部电子科学研究所所长童志鹏教授的批准。因此，当我们庆贺微电子丛书开始出版的时候，要特别感谢童志鹏教授的睿智。编写丛书的倡议还得到了国家计委科技司，国防科工委科技委、预研局、四局，国家科委基础研究高技术司，原机械电子工业部微电子与基础产品司和科学出版社等单位有关领导的支持，使出版这套丛书的愿望得以实现。在此，我们谨向上述领导部门表示由衷的谢意。

1991年8月2日至8月3日在北戴河召开了第一次丛书编委会，讨论并制订了出版计划，经过近三年的努力，丛书终于与读者见面了。我们以喜悦的心情，迎接它的诞生。

我们要感谢老一辈的科学家、我们的老师和有关领导部门的负责人，他们应聘担任丛书编委会的顾问，这对于保证丛书的学术质量将是十分重要的。我们相信，在他们的关心、支持和指导下，丛书的出版必将能达到预期的目的。

担任本丛书编委的都是一批活跃在微电子领域科研、生产和教育单位的中青年科技专家，我们团结在一起，互相切磋、共同探索，必能攀登一个又一个科学高峰。

“书山有路勤为径,学海无涯苦作舟”。愿为丛书的出版而耕耘不息。

我们期望得到同行们的更多指正,更多支持。

王阳元

1994年5月于北京大学

前 言

碳化硅(SiC)由于其独特的物理性质和电子学特性,被认为是制作高温、高频、大功率和抗辐射器件的极具潜力的宽带隙($2.0\text{eV} \leq E_g \leq 7.0\text{eV}$)半导体材料.虽然,制备 SiC 晶体的历史可以追溯到 1893 年,但是真正引起重视还是 1991 年 6H-SiC 以及 1994 年 4H-SiC 单晶材料商品化以后,即 20 世纪 90 年代中后期才使 SiC 得到重大发展.

目前,半导体器件所用材料主要是以 Si 为主的元素半导体,和以 GaAs 等为主的化合物半导体.以 SiC 为代表的宽带隙半导体被称为第三代半导体材料.众所周知,硅器件难以在高于 250°C 的高温下运行.特别是当高的工作温度与大功率、高频,及强辐射环境条件并存时,硅器件就无法“胜任”.所以在发展硅器件的同时,人们一直努力探索 SiC 半导体材料.半导体器件的先驱者、双极型晶体管的发明人肖克莱早在 1959 年关于 SiC 的第一次国际会议上就发表评论,对 SiC 的潜力及发展非常关注.他说:“今天,电子学领域可能有两个特别重要的问题:一是小型化,使器件变小、变复杂和变快的过程;另一个是与新环境有关的问题,如较高的温度和抗辐射.”“目前,最大的困难是如何解决高温问题.”他从探索新的半导体材料的角度提出:“合乎逻辑的顺序是:Ge, Si, SiC, C, …”他认为 SiC 的化学键非常强,适合于制作高温器件.但是他告诫:“教训是不应草率地放弃,也不应总是幻想在新的彩虹末端寻找黄金.”“需要对 SiC 材料作广泛、深入的研究.或许有一天,大的 SiC 单晶很容易生长,这些都需要作不懈的努力.”

航空航天、核能仪器、人造卫星、太空探测和地热勘探,以及汽车电子学、自动化、雷达与通讯等领域要求电子系统能够在 350°C 甚至更高的温度条件下工作.像 SiC 这样的宽带隙半导体正是人

们所追求的高温半导体材料. 不仅如此, 研究还发现, SiC 在大功率、高频和抗辐射领域也很有应用潜力. 这表明 SiC 是一种能够在极端条件下使用和具有极端特性的新一代宽带隙半导体材料.

金刚石、Ⅲ-V 族氮化物也是很有希望的宽带隙半导体材料, 但是, 与其相比 SiC 在制造工艺上有着自身的优势: 可以采用成熟的平面工艺技术, SiC 的热氧化物也可作为掩蔽膜、钝化层和绝缘栅等. 而且, 一些重要的Ⅲ-V 族氮化物的结构与 SiC 具有良好的相容性, 如 AlN、GaN 与 6H-SiC 的晶格失配分别仅为 1% 和 3%, 所以, 一旦 SiC 技术与Ⅲ-V 族氮化物技术结合起来, 就可以开拓新型的电子器件. 在 6H-SiC 衬底上成功制作出 GaN LED, 这足以表明 SiC 材料在新一代高性能电子器件的开发应用中将扮演极其重要的角色.

在“八五”和“九五”期间, 西安电子科技大学微电子研究所先后承担了国家多项有关 SiC 的科研项目, 对 SiC 材料制备技术与设备、器件模拟与设计、关键器件工艺技术进行了持续的研究, 取得了一系列成果. 同时, 还开设了相应的研究生课程, 编写了教材. 本书就是在此基础上完成的, 书中主要介绍目前发展最迅速、比较成熟的宽带隙半导体碳化硅的基本特性、单晶体和薄膜生长技术、应用潜力以及器件制作特点, 同时也对金刚石、Ⅲ-V 族氮化物作简要介绍. 出版这本书, 目的是进一步加快这方面专门人才培养的步伐, 促进我国高温半导体领域的研究与发展, 为迅速步入世界先进行列作出我们的努力.

本书由郝跃撰写第一章、第二章和第五章, 彭军撰写第三章、第四章, 并整理附录部分, 杨银堂撰写第六章并审阅了前三章; 朱作云审阅了后三章, 并提出了许多宝贵的意见. 对此作者表示诚挚的感谢. 信息产业部电子科学研究院, 中国人民解放军总装备部电子信息基础部等部门的领导对本研究工作给予大力支持, 在此一并表示衷心的感谢. 由于 SiC 是目前发展最迅速的宽带隙半导体材料, 新发现层出不穷; 也由于作者水平有限, 书中难免还存在一些缺点和错误, 殷切希望批评指正. 作者希望读者能关注宽带隙半

导体技术的发展,使这一技术能更充分为我国国防和国民经济建设发挥更大作用.

作者

目 录

《微电子学丛书》序

前言

第一章 SiC 半导体材料及其性质	(1)
1.1 应用潜力巨大的极端电子学材料	(1)
1.2 SiC 的基本性质	(6)
1.3 SiC 多型的结构	(14)
1.4 电子有效质量各向异性对霍尔因子的影响	(19)
1.5 4H-SiC 中电子的有效质量	(24)
1.6 SiC 多型的基态性质	(27)
参考文献	(29)
第二章 SiC 单晶体的生长	(31)
2.1 Acheson 法和 Lely 法	(31)
2.2 可控的同质多型现象及同质多型的选择性	(41)
2.3 SiC 单晶的质量评价与缺陷	(49)
参考文献	(70)
第三章 SiC 薄膜的生长及其机理	(72)
3.1 SiC-Si 的异质外延生长	(72)
3.2 SiC-Si 异质外延生长的模拟与实验	(75)
3.3 CVD 法生长 SiC 的热动力学相图	(85)
3.4 SiC 的同质外延生长	(103)
3.5 6H-SiC 分步外延的生长机理	(107)
3.6 蓝宝石复合衬底上的异质外延	(115)
3.7 各种衬底上 SiC 外延薄膜的比较	(130)
3.8 薄膜缺陷	(135)
参考文献	(140)
第四章 品质因数与宽带隙半导体的应用	(143)
4.1 半导体器件的物理极限与品质因数	(144)

4.2	用于电力器件的 6H-SiC、3C-SiC 和 Si 的比较	(153)
4.3	4H-SiC、GaAs 和 Si 的射频 MESFET 功率器件的比较	(167)
4.4	金刚石及 SiC 在微波及毫米波功率器件中的应用	(171)
4.5	SiC 光电器件与传感器	(183)
4.6	SiC 紫外线光电二极管	(190)
	参考文献	(196)
第五章 SiC 器件工艺		(199)
5.1	局部外延	(200)
5.2	氧化/钝化	(202)
5.3	刻蚀	(217)
5.4	掺杂	(228)
5.5	互连、接触与隔离	(233)
	参考文献	(249)
第六章 GaN 基 III-V 族氮化物宽带隙半导体		(251)
6.1	III-V 氮化物的基本性质和结构的多型性	(251)
6.2	氮化物晶体薄膜的生长	(252)
6.3	氮化物器件工艺技术	(257)
6.4	氮化物合金的性质	(260)
6.5	III-V 氮化物的作用	(262)
6.6	碳化硅-氮化铝结构	(266)
	参考文献	(267)
附录 碳化硅的主要数据		(269)

第一章 SiC 半导体材料及其性质

1.1 应用潜力巨大的极端电子学材料^[1]

SiC 半导体材料是自第一代元素半导体材料(Si)和第二代化合物半导体材料(GaAs、GaP、InP 等)之后发展起来的第三代宽带隙(WBS)半导体材料. 这类材料主要包括 SiC、C-BN(立方氮化硼)、GaN(氮化镓)、AlN(氮化铝)、ZnSe(硒化锌),以及金刚石薄膜等.

SiC 材料由于具有宽带隙、高临界击穿电场、高热导率、高载流子饱和和漂移速度等特点,在高温、高频、大功率、光电子及抗辐射等方面具有巨大的应用潜力,许多国家相继投入了大量的资金对 SiC 进行了广泛深入的研究,并已在 SiC 晶体生长技术、关键器件工艺、光电器件开发、SiC 集成电路制造等方面取得了突破,为军用电子系统和武器装备性能的提高,以及抗恶劣环境的电子设备提供了新型器件.

对电子技术关键发展方向状况的分析表明,除信息处理系统的基础元器件迅速发展以外,在超高频和光电子领域,被称为“极端电子学”器件正在“雪崩”似地增长.

“极端电子学”器件的概念是指极端条件下使用的器件以及具有极端特性的器件. 极端电子学器件可有条件地分为相互联系的三类器件:

- (1) 在高温,辐射和具有腐蚀性环境条件下使用的器件;
- (2) 在超高压和超高电流密度电子系统中使用的器件;
- (3) 在超高功率-频率指数电子系统中使用的器件.

极端电子学器件以 SiC、GaN 基氮化物(包括 AlN、InN、BN 等)以及金刚石等宽带隙半导体作为它的基础材料.

Si 器件的特性及使用存在很大的局限性. 图 1.1 给出 SiC 与 Si 材料的基本参数以及对电子器件极端特性影响的比较. 可以看出, 除个别参数(如电子迁移率)外, SiC 材料的品质全面优于 Si. 从 80 年代末到 90 年代初, 工业上兴起对极端电子学的兴趣, 促进了在极端条件和领域使用的 SiC 材料与器件的飞速发展.

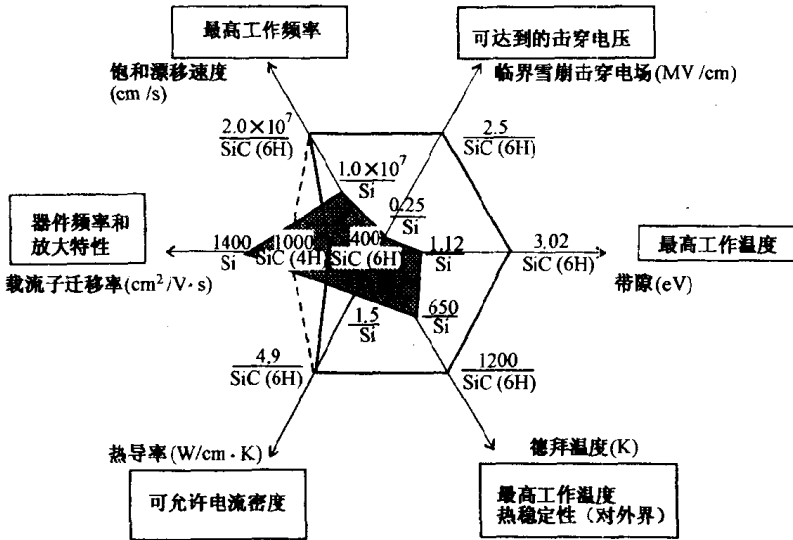


图 1.1 SiC 与 Si 材料的基本参数及对极端特性影响的比较

SiC 材料具有同质多型特性. 3C-SiC、6H-SiC 和 4H-SiC 是这种材料族中比较成熟的宽带隙半导体. SiC 多型中, 3C-SiC 唯一具有闪锌矿结构. 它具有高熔点、高热导率、高临界击穿电场和高饱和漂移速度等优秀的物理和电学性质. 它的电子迁移率是 SiC 中最高的, 其高热导率和高临界击穿电场预示着可以得到高的器件密度, 所以 3C-SiC 是高温、大功率和高速器件的首选材料.

6H-SiC 具有宽的带隙, 在光电子学、高温电子学、抗辐射电子学和高频大功率器件领域具有应用价值. 光电子器件包括短波发光器件和光电器件. 高温器件几乎包括从 pn 结到场效应晶体管、集成电路的所有 SiC 器件. 抗辐射 SiC 器件可以大大增强军事电子系统的生命力. 6H-SiC 制作的高频大功率器件能使固态电路的功率密度至少提

高 4 个数量级,并大大地提高这些器件的工作温度。

4H-SiC 的带隙比 6H-SiC 更宽,电子迁移率接近 3C-SiC。随着高质量单晶材料制备技术上的突破,它被认为是大功率器件方面最有前途的 SiC 材料^[2]。

近年来,基本的 SiC 压敏电阻和传统的 SiC 发光二极管已得到发展。在迫切需要制造工作于极端条件的设备的情况下,人们发现 SiC 半导体器件在航空航天的综合工程、核动力工程、矿物开采与加工、化学工业、汽车制造业等领域有着广泛的应用前景(表 1.1),因而从 20 世纪 90 年代开始对这种化合物半导体的兴趣日益增大。表 1.2 示出了 SiC 材料的特性及优先发展的领域。

多年来对 SiC 的研究主要集中在以下几个方面:

(1) 高质量、低成本、低缺陷密度的 SiC 单晶衬底材料和薄膜材料的制备;

(2) 高均匀的掺杂技术;

(3) 优良的互连技术、欧姆接触和整流接触技术;

(4) 优化的器件设计和加工技术;

(5) 高质量、低界面态的介质膜生长和淀积技术;

(6) 可靠性技术(目前在 650°C 工作时,器件的工作寿命极短)。

在 SiC 研究方面已取得的主要成就如下:

(1) SiC 的同质多型和异质多型结构的可控合成理论;

(2) 生长大体积 SiC 晶体的多种改良的 Lely 方法,例如“ДЭТИ 方法”就是其中之一;

(3) 包括局部外延和腐蚀过程的 SiC 器件微小化加工原则;

(4) 在蓝宝石上生长异质外延 SiC 薄膜(类似在蓝宝石上生长硅)的方法,它保证元件间的有效绝缘;

(5) 一系列新的 SiC 器件,包括压敏电阻、多色光二极管、核辐射和紫外辐射传感器、极端条件下使用的温度和压力传感器等。

在 SiC 器件的发展中还存在着许多制约因素:

(1) 获得均匀、低缺陷密度、同质多型的高纯或重掺杂的大体

表 1.1 SiC 器件的“研究-应用”领域

应用领域	研究趋势			
	组成： 模拟和数字的 无线电的光电 子系统	组成： 动力和高电压 能源系统	组成： 检测系统	表面处理中的 保护功能
国防和武器系统				
航天器	●	○	●	●
航空技术	●	○	●	●
核能设备	○	●	●	●
加工制造和利用 核废料设备	○	○	●	●
雷达系统	●	●	▲	▲
通讯设备	●	●	▲	▲
工业和民用系统				
石油和矿物开采	○	○	●	●
汽车, 铁路和航 空运输业	○	●	●	●
雷达和通讯	●	●	▲	▲
化学和食品工业 设备	▲	▲	●	●
精密制造业	○	○	●	●
医学和生态学	●	○	●	●

注：● 表示需要且可实现；○ 表示具有应用前景；▲ 表示是否需要目前未定。

表 1.2 SiC 特性及优先发展领域

功能参数 特性 SiC 器件种类	高温	抗辐照	抗化学 腐蚀	高电压	强电流	高放大 系数	超高频	超高速	光波段
光电子器 件(发射器, 接收器,指示 器光偶)	★	★	★					★	★
超高频电 子器件(振荡 器,放大器)	★	★		★	★	★	★	★	
强电子器 件(整流器, 稳压器,换能 器)	★	★	★	★	★			★	
模拟电子 器件(放大 器,变换器)	★	★			★	★	★	★	
数字器件 (交换机,逻 辑和存储装 置,运算器件 等)	★	★		★				★	★
传感器	★	★	★					★	★
功能电子 学器件,复杂 信号处理,加 工装置	★	★					★	★	★
自发射电 子学器件(冷 阴极器件及 以它为基础 的装置)	★	★		★	★			★	

注:★表示以 SiC 为基础的器件范围内优先发展的方向。