



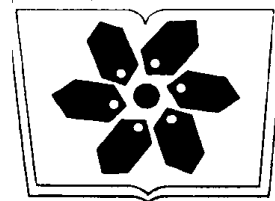
全国高技术重点图书·微电子技术领域

Basic Material
Physics
For Semiconductor
Devices

· 半导体器件的 · 材料物理学基础 ·

陈治明 王建农 著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

半导体器件的 材料物理学基础

陈治明 王建农 著

科学出版社

1999

内 容 简 介

半导体材料物理学是半导体材料学、半导体物理学和半导体器件物理学的交叉。它研究材料制备与加工过程对材料物理特性的影响以及材料特性与器件特性之间的联系。本书侧重于从器件的角度研究半导体材料的基本物理问题, 主要内容包括半导体材料的基本物理参数及其与器件特性的关系; 根据器件对材料基本属性的要求建立评价材料适用程度的品质因子, 并由此讨论器件的材料优化问题; 从充分发挥材料潜力、改善器件工作特性的角度介绍与杂质工程和能带工程有关的一些重要问题以及在器件制造过程中常用的一些材料特性检测方法与技术。

本书可作为大学电子类专业研究生的“半导体材料物理学”课程的教材和其他相关课程的辅助教材, 也可供在半导体器件与微电子学领域、材料科学与工程领域以及应用物理等领域从事实际工作的工程技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件的材料物理学基础 / 陈治明, 王建农著. —北京: 科学出版社, 1999.5

ISBN 7-03-007299-5

I. 半… II. ①陈… ②王… III. 半导体材料-物理性能
IV. TN304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02760 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年5月第一版 开本: 787×1092 1/16

1999年5月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1-1 500 字数: 547 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

73.7'
4

谨以此书献给

中国半导体材料科学的奠基人和开拓者

林兰英院士的八十华诞

前 言

在科学技术的发展进程中，材料永远扮演主角，起着决定一代社会科技水平的关键作用。在与现代信息社会的科技成就息息相关的千万种材料中，半导体材料的作用尤其如此。试想20世纪后50年的所有重大科技成就，有哪一件没有直接或间接受益于半导体？就现代信息社会对材料的依赖程度而言，又有哪一种材料能与半导体材料相比拟？

半导体材料在现代信息社会中的特殊地位，还表现在较少有别种材料是像半导体材料那样需要使用者对之有入微的认识、作精细的加工。现代信息处理与传递技术的每一个进步，都与人们对半导体材料认识的加深和微细加工能力的提高有关。于是，半导体材料物理学这样一门新的边沿学科就应运而生。

半导体材料物理学是半导体材料学、半导体物理学和半导体器件物理学的交叉。它研究材料制备与加工过程对材料物理特性的影响以及材料特性与器件特性之间的联系，因而既是材料科学家感兴趣的，也是从事半导体器件与集成电路制造工作的高级工程技术人员和研究人员所关心的一门学问。因为器件是由材料制造成的，材料特性是器件性能的基础。然而，半导体材料的特性又是那样地易于变化，制备条件、器件制造过程中的工艺条件，乃至器件使用中的某些情况，都会导致材料特性在一定范围内改变。一种器件理想特性的实现，不但与原始材料的固有特性有关，也与材料的加工历史和使用情况有关。因此，从实用的角度看，半导体材料物理学对器件研制人员的重要性更为突出。本书侧重于从器件的角度研究半导体材料的基本物理问题，故名为“半导体器件的材料物理学基础”。

本书共五章，各章的基本内容如下：

1. 概括介绍半导体技术的发展历程和半导体材料的基本特征及制备方法，以使从事某一专门半导体器件的研究或制造工作的读者对半导体技术与半导体材料的总体情况有一个大致的了解。

2. 讨论半导体材料的3个基本物理参数，亦即电阻率、迁移率、少数载流子寿命与器件的阻断电压、导通电阻、开关时间等基本特性之间的关系，及其在器件制造过程和器件工作过程中的变化。这3个参数，是半导体的所有物理参数中最容易变化，又对器件特性影响最大的基本参数。在器件的设计制造工作中，需要精确计算、严格控制。因此，作为半导体器件的一个最基本的材料物理问题，我们着重于讨论这3个参数的物理本质和物理模型，解决这些参数在器件的特性模拟中如何精确表示的问题。在这一章中，硅材料作为讨论的主要对象，二极管、晶体管和 MOSFET 等基本器件作为分析材料与器件特性之间关系的依托。

3. 目前，硅是用得最多、最典型的半导体材料。在现代技术中，还没有哪种技术对单一材料的依赖程度赶得上电子技术对于硅的依赖。但是，这种依赖究竟是材料属性决定的，还是材料制备与加工技术水平的限制决定的？正如砷化镓在光电子技术和微波技术中的优

势远非硅可相比一样，电子器件，尤其是功率器件，是否就以硅材料最适宜呢？这无疑是一个学术性很强的深层次材料物理问题。我们将在第三章讨论这个问题。这一章侧重于建立器件基本特性与材料基本属性之间的关系。所谓材料基本属性，是指诸如禁带宽度、临界雪崩击穿电场强度、电子饱和速度，以及热导率等这样一些依材料而别，在器件制造过程和器件工作过程中不会变化或变化甚小的性质。根据器件基本特性与材料基本属性之间的关系演绎出来的所谓材料品质因子，是由某几个材料基本属性参数唯一决定的，它反映了材料对这种器件的适合程度。这种研究将向我们预示材料与器件联袂发展的方向。在讨论器件的材料品质因子的基础上，我们还在这一章中概略介绍宽禁带半导体中受到广泛关注的碳化硅的主要性质、碳化硅材料及其器件研究的基本情况和最新进展。

4. 半导体技术长足进步的一个重要标志，是从仅能对材料所含杂质与缺陷的精确控制，发展到也能对材料的禁带宽度实现精确控制，即从器件设计与制造的单纯杂质工程发展到杂质工程与能带工程并重的阶段。第四章在侧重讨论两个与大功率器件有关的杂质工程问题，即材料制备过程中的均匀掺杂问题和器件工艺过程中的深结形成问题之后，讨论能带工程的两个基本问题，即半导体固溶体和半导体超晶格问题，简略介绍它们的基本原理及其应用。

5. 对于材料特性在加工过程中的变化，必须用恰当的检测手段进行诊断。材料特性的检测分析以及器件制造过程中的某些中间测试手段既自成体系，也可作为材料物理学的一个重要组成部分。我们在第六章介绍一些在器件研制过程中会用到的材料测试分析方法，根据用途，按电阻率测试、少子寿命测试、深能级测试、光学常数测试、光电特性分析、结构分析、组分分析，分门别类加以介绍。内容侧重于测试分析原理，并引用了一些实例，以加深理解。

本书可作为向研究生开设“半导体材料物理学”课程的教材和其他相关课程的辅助教材，也可供在半导体器件与微电子学领域、材料科学与工程领域以及应用物理等领域从事实际工作的工程技术人员和研究人员参考。

本书完成时恰逢我们的导师、中国半导体材料科学的奠基人之一、著名科学家林兰英院士80华诞。林先生为发展我国的半导体材料科学与技术，呕心沥血，备尝艰辛凡50余年，至今仍在该领域的前沿领军奋战，曾被《光明日报》记者誉为生长晶体的“晶莹种子”。林先生的“籽晶”精神将永远激励我们为祖国半导体事业这颗“晶体”的生长奋斗不息。为此，我们愿将此书如一朵小花作为生日礼物敬献给她。

本书承蒙中国科学院半导体研究所王占国院士和西安交通大学罗晋生教授等专家推荐，获准由中国科学院科学出版基金资助出版。作者在此谨向他们以及其他审阅过书稿并提出宝贵意见的专家和中国科学院科学出版基金委员会表示最诚挚的感谢。

在本书从讲稿到书稿的转变过程中，得到中国科学院半导体研究所研究员、博士研究生导师石寅博士的指教和帮助，得到陈开亚女士、余明斌博士以及学生们在文字处理和图形绘制等方面程度不同的帮助，作者亦在此向他们一并致以衷心感谢。

陈治明 王建农

1998年6月18日

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲

卢鸣谷

总干事：罗见龙 梁祥丰

委员：（以姓氏笔划为序）

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁	刘 杲
卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉樨	陈芳允	陈能宽	罗见龙	周炳琨
欧阳莲	张兆祺	张钰珍	张效祥	赵忠贤	顾孝诚
徐修存	谈德颜	龚 刚	梁祥丰		

《全国高技术重点图书·微电子技术领域》
编审委员会

主任委员：王守武

委 员：王阳元 王守觉 李志坚 林兰英 龚兰方

目 录

前言

第一章 半导体材料概论	(1)
1.1 半导体技术发展概况	(1)
1.2 半导体材料综述	(9)
1.3 半导体材料制备概述	(26)
参考文献	(50)
第二章 半导体材料的基本特性参数	(51)
2.1 迁移率	(52)
2.2 载流子密度和电阻率	(81)
2.3 少数载流子寿命	(101)
参考文献	(130)
第三章 半导体材料的器件适性	(131)
3.1 双极器件的材料品质因子	(132)
3.2 单极器件的材料品质因子	(140)
3.3 热品质因子	(149)
3.4 功率器件的优选材料	(162)
参考文献	(185)
第四章 杂质工程和能带工程	(187)
4.1 掺杂与掺杂均匀性	(187)
4.2 嬗变掺杂	(196)
4.3 外加磁场下的单晶生长技术	(208)
4.4 半导体固溶体	(223)
4.5 量子阱效应与半导体超晶格	(229)
参考文献	(245)
第五章 半导体材料测试与分析	(247)
5.1 电阻率与杂质浓度测试	(247)
5.2 少数载流子寿命测试	(295)
5.3 深能级测试	(313)
5.4 光学常数测试	(325)
5.5 光电特性分析	(338)
5.6 组份分析	(345)
5.7 结构分析	(353)
参考文献	(359)

第一章 半导体材料概论

1.1 半导体技术发展概况

在人类社会即将进入21世纪的时候，高新技术（hightech）这个新名词悄然流行。在所有被称得上高新技术的技术中，半导体技术应该说是当之无愧的了。半导体工业直至本世纪50年代才萌芽，倚仗科技进步的最新成果而获得惊人成就，反过来又成为所有高新技术赖以诞生和发展的基础。半导体技术之成其为高新技术，还表现在它一方面对人类精神文明和物质文明的进步起着无法估量的作用，一方面又难以让常人对其有恰当的认识，甚至不能像导弹和航天器之类的高新技术产品那样给人以感性的了解。在50年代，很少有非专业人士知道半导体这个名词，更谈不上对它有正确的理解，以至于到60年代半导体收音机大量涌入普通家庭时，半导体成了半导体收音机的代名词。30年后的今天，人们仍习惯于把这种只装备有为数不多半导体器件的简单装置称作半导体，而对风行于世的、具有成百上千乃至难以数计半导体器件的录音机、电视机、计算机，反而没有多少人能把它们同半导体自然联系起来。现在，除了边远乡村，已很少有与半导体器件无缘的家庭，拥有数百万以上半导体器件而毫无觉察的家庭已不在少数。据统计，世界人均晶体管占有量1997年已达1000万只，2002年将超过1亿只。人们完全可以用半导体器件的拥有量来判断一个家庭、一个办公室，乃至一个机构的现代化程度。有人把半导体技术在本世纪社会与科技进步中的作用，与蒸汽机在上个世纪所起的作用相比，把受半导体技术推动的信息社会的到来称之为第二次工业革命的开始。其实，半导体技术的发展现仍处于上升时期，准确评价其历史作用的时间也许还没有到来。

关于半导体科学与技术的起源，研究科技发展史的专家们目前已追根溯源到大约150~200年以前。1833年法拉第发现硫化银（Ag₂S）电阻率的温度系数为负值，是目前所知对物质的半导体特性的最早发现。在这方面的早期发现还应包括碳化硅（SiC）在可见光范围的电致发光，这是意大利的马可尼（Marconi）公司在1907年左右的开创性工作。这家公司后来成为生产半导体产品的世界著名公司之一。1920年左右出现的硒（Se）整流器是半导体材料的最早应用。早期应用中最著名的还有在二次世界大战后期将氧化亚铜（Cu₂O）点接触二极管用于检波。在1950年左右出现锗（Ge）二极管和晶体管¹⁾之前，硒和氧化亚铜独占半导体应用领域近30年，相当于从发现晶体管效应到超大规模集成电路（VLSI）问世所经历的时间。但前30年的发展远不如后30年，更不如

1) 晶体管一词是我国科技翻译界少有的、且现已无法更改的失当翻译名词之一。原词 transistor 由 transfer 和 resistor 复合而成，并无晶体之意。当时的人们或许只是因其为晶体制成，并受具有类似特性的真空三极管命名方式的影响，才授其此名。然而，随着非晶半导体材料的实用化，使用非晶半导体材料制作的 transistor 的问世，难免使晶体管一词的使用陷于尴尬境地。

VLSI 问世以来这 20 年左右的时间。

晶体管是在美国 Bell 实验室发明的。后来以晶体管的主要发明人闻名于世的肖克莱 (W. Shockley)、布拉顿 (W. H. Brattain) 和巴丁 (J. Bardeen)，都从二次世界大战开始前即在该实验室的固体物理研究小组从事半导体材料的研究工作。肖克莱和布拉顿着重从事氧化亚铜整流器的肖特基势垒理论研究。从 1939 年到 1945 年，肖克莱曾陆续提出过一些场效应晶体管的设计方案，但相应的实验一直没有取得成功。直到 1947 年 11 月 17 日，布拉顿的一个实验才终于证明场效应确有可能起作用。紧接着，巴丁和布拉顿又在同年 12 月 16 日试制成功双点接触式晶体管。1947 年的这一个月在半导体技术发展史上被称作“神奇之月”，它标志着一个新时代的开始。大约又过了一个月，肖克莱提出了 pn 结理论和结型晶体管理论，并与替尔 (G. K. Teal) 等人一起，于 1950 年将结型晶体管试制成功。替尔后来在达拉斯的得克萨斯仪器公司率先制成硅晶体管，而在此之前的晶体管都是锗管。晶体管可以像真空管一样把电子信号放大，但工作电流很小，不产生很多热量，体积也比真空管小得多。这种器件的重要性立即引起大家的重视，尽管谁也没有预见到它后来对人类进步将要产生那样巨大的革命性影响。这个发明被誉为“本世纪的主要发明”。晶体管于 1952 年开始商业应用，第一批晶体管装置是助听器。4 年后，当肖克莱及其主要合作者于 1956 年因发明晶体管而获得诺贝尔奖时，已有 20 家公司在生产晶体管，肖克莱半导体实验室是其中之一。

肖克莱时常对“那些最具创造性的人受雇于人时都得不到足够的酬劳”这一客观事实耿耿于怀，因而在 1955 年脱离 Bell 实验室，从美国东海岸回到西海岸他的故乡 Palo Alto，创办了属于自己的高科技产业——肖克莱半导体实验室^[1]。在这个实验室里汇集着从美国东部的一些著名实验室慕名而来的八个才华横溢的青年人，他们十分仰慕肖克莱在科学界的盛名，但不久之后就因为发现很难与之合作共事而相继离去。肖克莱当时热衷于他的 pnpn 二极管研究，而不采纳这些青年人对发展平面工艺、研制集成电路的建议。这些人退出肖克莱半导体实验室后，在工业家谢尔曼·费尔柴尔德 (S. Fairchild, IBM 公司的最大私人股东，其父是 IBM 的创始人) 的支持下，于 1957 年创办了费尔柴尔德半导体公司 (中译者亦常将之意译为仙童半导体公司)。硅器件是该公司的唯一研究对象和产品，而其他公司还兼营锗器件。1959 年，这八人当中的诺依斯 (R. Noyce)、穆尔 (G. Moore)、赫尔尼 (J. A. Hoerni) 对平面工艺的研究取得成功，为半导体进入集成电路时代奠定了基础。肖克莱的半导体实验室则由于他的这八个崇拜者的另立门户而一蹶不振，最后以解散告终，未能实现他要为自己的非凡创造能力讨回足够酬劳的梦想。肖克莱 1963 年重返学术岗位，成为斯坦福大学的荣誉教授。

以上这些历史事件发生在人们现在称之为硅谷的那个地方。硅谷在半导体科学与技术的发展史中具有举足轻重的地位。肖克莱半导体实验室虽然如流星般转瞬即逝，但它为硅谷的形成与发展揭开了序幕。而且，由肖克莱半导体实验室的青年骨干们创立的费尔柴尔德公司，又进一步加速了硅谷的形成。在硅谷鼎盛时期的近 70 家半导体公司中，有半数是其直接或间接后裔，在硅谷之外从事半导体研究与开发的人中也有很多曾在那里工作过。因此，肖克莱对半导体事业的贡献，并不仅仅是发明了晶体管。

如果我们把晶体管的问世作为半导体工业的起点，集成电路的问世则预示着信息时

代的到来。集成电路不仅使以通信技术和计算机技术为代表的电子工业产生质的飞跃，而且改变了人类的生活方式和工作方式，赋予本世纪末人类文明新的内涵。半导体集成电路技术的发展很快，从1959年诺依斯申请硅集成电路的第一个专利开始，只经过了不到20年的时间，在70年代后期即进入了超大规模集成（VLSI）电路时代。VLSI的完整含义实际上包含了规模和功能两个方面的内容。在规模上，VLSI一般包含百万个以上元件、线条宽度至少在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 以下。最早被称作VLSI的器件是在1978年制成的64 k DRAM，其集成规模已超过10万个元件（芯片面积为 $36\ \text{mm}^2$ ），线宽 $2\ \mu\text{m}$ 。1986年左右问世的16 M DRAM的集成规模则已超过3000万个元件，线条宽度缩小到亚微米级。日立公司1991年推出的64 M DRAM集成了1.4亿个元件，而日立公司和NEC公司1995年推出的1 G DRAM的集成元件数则高达10亿。在功能上，VLSI技术使系统设计方法得以付诸实施，制成系统集成产品。例如，将存储器、微处理器、图形处理器以及必要的专用集成电路（ASIC）集成为单片系统。系统集成产品不但具有高度的可靠性，还可产生许多新的功能。数字信息处理系统的单片集成使信号处理的速度极大提高；容错计算系统的集成可实现极高的可靠性，使之得以满足航天、核能等高新技术的需要；而阵列计算系统的集成则可创造出许多新的人工智能功能。

目前，VLSI技术仍在不断向前发展，集成度平均每一年半增长一倍，线条宽度已缩小到 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下，1996年的工业水平已达到 $0.35\ \mu\text{m}$ 。同时，SONY公司宣称已开发出 $0.18\ \mu\text{m}$ 光刻技术，贝尔实验室则宣布 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下CMOS技术已开发成功。人们已开始用ULSI¹⁾来称呼更高集成水平的超大规模集成电路。表1.1列举了美国半导体工业协会（SIA）对硅微电子技术发展水平的部分预测，这些数据或可帮助我们加深对超大规模集成电路深刻含义的理解。

硅材料的大直径和完美结构生长技术是集成电路取得长足进步的基础，对制造分立器件和中小规模集成电路的硅片可以不那么特别严格要求的一些材料品质指标，例如微缺陷和并非有意掺入的伴生杂质的痕量浓度，对制造VLSI的硅片就必须严格限定其所能

表 1.1 硅微电子技术发展水平预测

内 容	1998年	2001年	2004年	2007年	2010年	典型产品
最小特征尺寸 (μm)	0.25	0.18	0.13	0.10	0.07	
集成规模 (器件数/ cm^2 芯片)	7M	13M	25M	50M	90M	微处理器
	4M	7M	12M	25M	40M	逻辑电路
信息容量 (bit/芯片)	256M	1G	4G	16G	64G	DRAM
信息容量 (bit/ cm^2 芯片)	6M	20M	50M	100M	300M	SRAM
芯片时钟 (高性能) (MHz)	450	600	800	1000	1100	微处理器
芯片面积 (cm^2)	3.0	3.6	4.3	5.2	6.2	微处理器

1) 我国微电子学界将VLSI称作超大规模集成电路，是半导体技术的发展常常让人们始料未及的又一例证。very high large scale 原本就没有“超”的意思。随着ULSI的问世，VLSI看起来有必要改称甚大规模集成电路，正如VHF表示甚高频，UHF才表示超高频一样。

容许的最高指标。为了提高集成电路的成品率，降低生产成本，各国的 VLSI 生产厂商竞相采用大直径硅片。最初，制作 VLSI 芯片的硅片直径只有 3 英寸¹⁾，到 80 年代即增大到 6 英寸，目前已增大到 8~10 英寸。12 英寸硅片 VLSI 工艺预期本世纪末将投入生产运行，2001 年将达到拉制 16 英寸特大直径硅单晶锭的能力。

集成电路的另一个发展方向是大功率电路集成 (PIC, 简称功率集成电路)，或称超大面积集成 (VLAI) 电路，也常常有人根据其功能称为 Smart power。这一类集成电路是专指包含了功率控制、信号处理，以及自保护单元电路的单片集成电路，且电路中或者要有额定电流不小于 0.5 A 的功率元件，或者要有额定电压超过 50 V 的功率元件。模块和混合集成电路不属此列，某些功能比较简单的高压集成电路也不属此列。

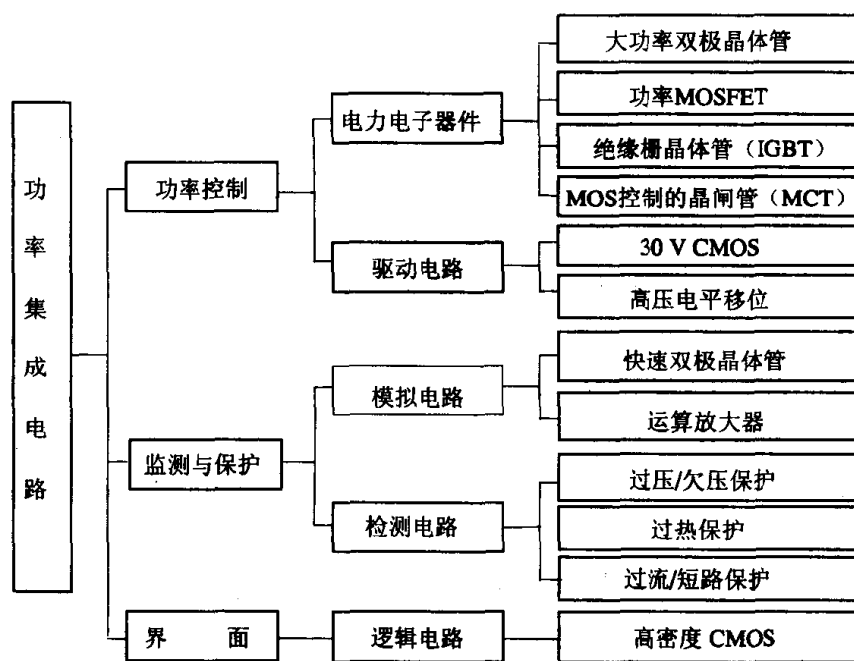


图1.1 功率集成电路的基本功能及构成

典型的 Smart power 一般由接口、监测与保护、以及功率控制这样三个基本的功能单元构成，如图 1.1 所示。其接口功能需要用一个逻辑电路来进行编码与译码，以对中央微处理器的指令作出反应，并将有关 Smart power 芯片及其负载的信息反馈给中央微处理器。监测与保护分别由检测电路和模拟电路来执行，可对过热、过流、过压和欠压等电路异常情况作出迅速反应。由于短路时的 di/dt 非常高，这种电路一般由频率响应极快的快速双极晶体管构成。功率控制电路包含功率器件和驱动电路两部分。功率器件多采用具有高输入阻抗的功率 MOS 或利用 MOS 原理控制开关状态的 IGBT 等。

Smart power 的市场发展很快，从 1992 年到 1996 年，年平均增长率达到 20.3%，4 年翻了一番，如表 1.2 所示。从这张表中还可看出 Smart power 的主要应用领域及其在这些应用领域中的市场变化情况。办公自动化与计算机周边设备 (OA) 是 Smart power 的最

1) 1 英寸 \approx 2.54 厘米 (下同)。

大市场，但增长速度目前已有减缓的趋势，年平均增长率只有 12.4%，低于 Smart power 的年平均总增长率。分析认为这与办公设备和计算机的小型化和低功率化发展倾向有关。随着 VLSI 的电源电压逐渐从 5 V 降至 3.3 V 乃至 1.6 V，功率集成电路的部分市场将逐渐被功率较低的大规模集成电路取代，而原本是为办公自动化开发使用的 Smart power 电路技术，将转而满足“傻瓜”相机、激光唱盘 (CD) 和激光视盘 (VCD) 等消费电子产品的需要，使消费电子产品的 Smart power 市场增长速度加快。汽车工业对 Smart power 的需求量正在迅速增长，其年平均增长率超过 Smart power 的总平均增长率，达到 32.5%。使用 Smart power 可以解决汽车电子系统越来越复杂所引起的许多问题，使用范围已不限于汽车发动机的控制系统，也用于传动、定向和煞车系统，而线路错综复杂的车身电子功能，比如窗户升降、门镜调整以及指示灯的控制等等，还为 Smart power 市场的增长留着更大的希望。Smart power 在工业电子技术领域的市场潜力也很大，年平均增长率也超过了 Smart power 的总平均增长率，达到 27.8%。该领域产品开发的目标，瞄准的是诸如电子镇流器、电机控制器、开关式电力变换器之类的大规模市场。

表1.2 Smart power 的市场分布及其年度增长情况 (单位: 百万美元)

	1992	1993	1994	1995	1996
总 计	878.6	1060.5	1284.1	1553.3	1838.6
汽车电子	123.9	171.6	229.2	303.4	381.5
通 讯	88	103.6	122.1	143.8	169.4
航空航天	42	49	56	65	76
工业电子	148.7	190	242.9	310.4	396.7
办公设备	304	344	396	451	486
消费电子	172	202.3	237.9	279.7	329

材料工艺的进步，同样是功率集成电路开发和发展的基础。实现功率集成，首先要解决功率器件与微电子电路的隔离问题。目前使用的隔离方法主要有 pn 结隔离、自隔离和介质隔离三种。采用前两种隔离方法的功率集成电路的高温特性都不够好，因为隔离结的反向漏电流会随着结温的升高而增大，使各隔离器件在高温下的相互干扰加重。介质隔离是指用氧化硅或氮化硅进行的隔离。由于这些材料有很好的热稳定性，介质隔离是功率集成电路特别是高压集成电路的优选方式。硅在绝缘衬底上的外延生长技术 (SOI) 和硅片直接键合技术 (SDB) 的开发和应用，使这个问题得到了比较完满的解决。

Smart power 的兴起还与电力半导体器件的结构微型化和 MOS 化发展趋势有关。功率 MOSFET 和使用 MOS 原理控制状态转换的 IGBT 与 MCT 等新型功率器件的迅速发展，使功率器件的门极驱动电路大大简化，实现了真正的“弱电”控制“强电”。同时也提供了将纵向结构的功率器件与横向结构的逻辑或模拟控制电路、传感器、保护电路等进行单片集成的可能性。

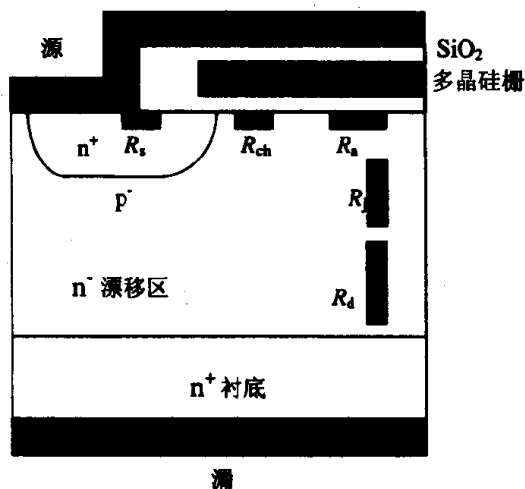


图 1.2 功率 MOSFET 的结构单元简图及其导通电阻的主要构成

功率 MOSFET 的额定电流受其通态电阻 R_{on} 消耗功率的限制。因此，降低 R_{on} 成为提高功率 MOSFET 电流控制能力的关键。图 1.2 表示功率 MOSFET 的一个基本结构单元，其 R_{on} 的主要组成部分示意地标于其中。在这些电阻构成中，源扩散区电阻 R_s 、沟道电阻 R_{ch} 和表面累积层电阻 R_a 与器件的结构尺寸有关，其大小受加工精度的限制。微电子技术的进步，对降低这些电阻起到了重要的作用。利用微电子技术的精细加工工艺，可以有效地缩短功率 MOSFET 结构单元的重复长度，使上述电阻分量减小，从而使总电阻减小，如图 1.3 所示。对一个耐压 50 V 的功率 MOSFET，当使用 2.5 μm

μm 技术来设计制造时，其多晶硅栅的光刻窗口不能小于 15 μm ，相应的单位面积器件通态电阻（通态比电阻）为 $1.2 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 。但若改用 1.25 μm 微细加工技术，即便多晶硅栅的光刻窗口尺寸不变，由于结构单元的重复距离可以大大缩短，通态比电阻将缩小一半，降低到 $0.6 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ [2]。

在 VLSI 技术长足进步的十年间，功率 MOSFET 通态比电阻随之降低了近一个数量级，取得了很大的进步。然而值得注意的是，这一进展已逼近了硅器件的理论极限。因为通态电阻中的另外一些主要成分，其中最主要的是漂移区电阻 R_d ，其大小因器件额定电压对材料电阻率及漂移区长度的要求而定。这是功率 MOSFET 难以同时获得大电流和高耐压能力的固有原因。为了进一步降低通态电阻，只有突破硅材料的限制，采用新的半导体材料来制造 MOSFET 和其他功率器件，以获得性能更加优越的产品。我们将在第三章中证明，MOSFET 的导通电阻与材料的禁带宽度或临界击穿电场强度的三次方成反比。于是，对碳化硅和金刚石等禁带很宽、击穿电场很高、同时又具有高热导率的半导体材料的研究，在 90 年代初再一次受到关注。这些材料的高导热性，不仅对功率器件，也对超大规模集成电路的性能具有极大的改良作用。尽管目前使用这些材料制作的器件还很难见到，但随着它们在制备与加工技术方面的逐渐成熟，性能优异的碳化硅、金刚石半导体器件与集成电路必将很快实现实用化。我们可以满怀信心地预言，碳化硅和金刚石等宽禁带材料的兴盛时期不会比 21 世纪初叶更远。

在以硅为主要材料的微电子技术和电力电子技术长足发展的同时，以砷化镓等化合物为主要材料的半导体光电子技术也得到了飞速的发展。半导体光电子技术主要包含发

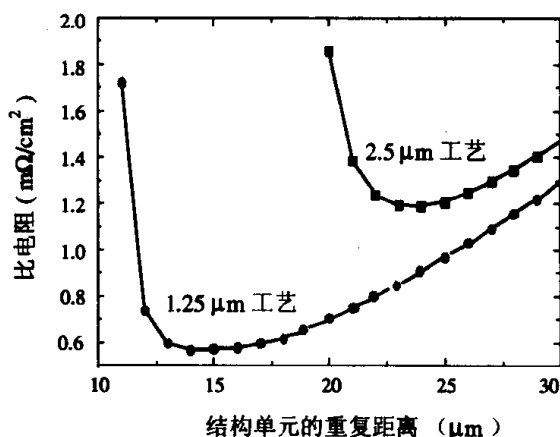


图 1.3 50V 功率 MOSFET 的比电阻同结构单元的重复距离及工艺水平的关系

光技术、光敏感技术和太阳能电池技术三个方面。半导体发光的实际应用主要指利用某些半导体材料的优良电致发光特性制造发光二极管(LED)和半导体激光器。这些发光器件与日常生活中使用的热辐射或白炽光源的主要差别在于光谱的覆盖面大小不同。半导体发光器件的单色性较强。LED的光谱宽度一般在10~50 nm范围;激光器的单色性更好,可窄到0.1 nm以下。最早发现的具有电致发光特性的半导体材料是碳化硅,但最早进入实用化的却是砷化镓和磷化镓等III-V族材料。1962年砷化镓激光二极管的问世,拉开了对III-V族材料特别是砷化镓、磷化镓和磷化铟以及它们的固溶体等研究开发的序幕。这些材料被称之为继锗、硅之后的第二代半导体。第三代半导体是指氮化铝、氮化镓以及金刚石和碳化硅之类的宽禁带化合物,这些材料在短波光电子器件、高频大功率器件和耐高温器件方面具有远胜于硅与砷化镓的优势,目前正在形成研究与开发的热点。其中,氮化镓已经从材料研究阶段进入器件研究阶段。氮化镓二极管、氮化镓MESFET以及氮化镓LED等新器件已经面世。

图1.4是半导体发光二极管发展历程的一个大致记录,也比较清楚地反映了GaAs和GaP等第二代半导体材料和GaN等第三代半导体材料的关系。图中,以爱迪生发明的第一只灯泡作为亮度比较的标准,以帮助我们了解半导体发光二极管的水平。

砷化镓材料的应用不仅开创了硕果累累的光电子时代,还将固体电子器件的工作频率扩展到毫米波和微波频段;而以碲镉汞II-VI族固溶体等为代表的所谓第四代半导体材料则进一步将器件的工作频率扩展到红外波段,使信息的处理与传递由电发展到光,为光子技术的发展创造了条件;同时,磷化铟等光电特性兼优材料在制备技术上的成熟,使得光电集成成为现实,极大地促进了现代通讯技术和信息产业的发展。

光电集成是半导体科学与技术发展的必然产物。其典型产品是光电子单片集成电路(OEIC),主要应用于光通讯和光计算机。OEIC是半导体发光器件(光源)、光波导与光检测器以及电子电路的集成系统。除了光-电信号相互转换功能以外,OEIC还具有光

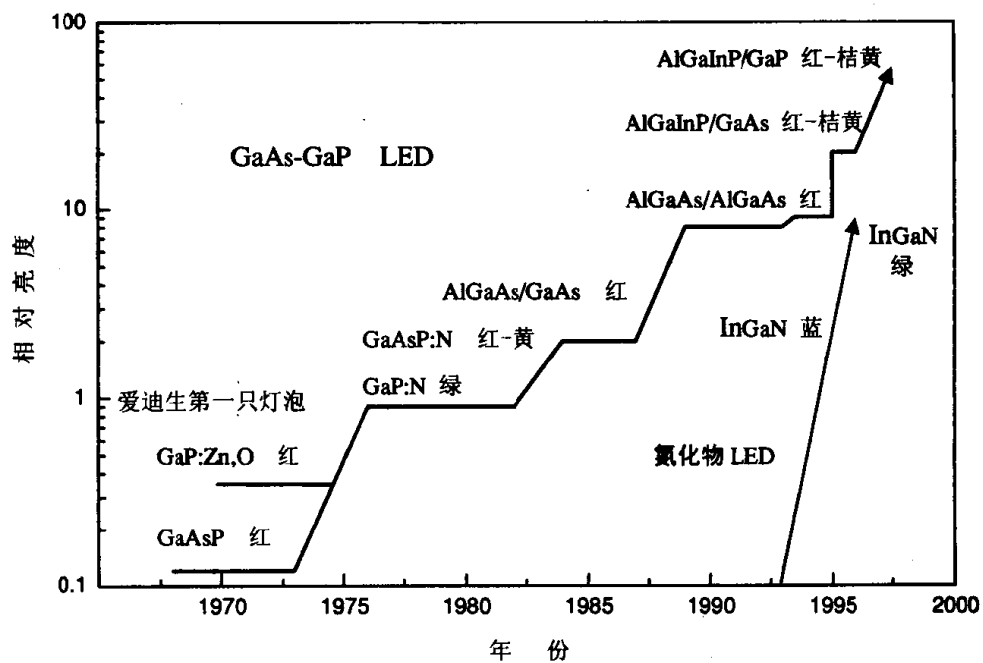


图 1.4 半导体发光二极管的发展历程

电子逻辑、光开关、光信号存储等多种全新的器件功能，并能同时处理多路信号，因而采用 OEIC 的信号接收机和发射机具有很高的信号处理能力，其响应速率在 1995 年左右即已达到 10 Gbit/s。OEIC 材料以砷化镓、磷化铟等 III-V 族化合物及其固溶体材料为主。在微电子和电力电子领域获得巨大成功的硅，因其光量子效率不高而一直被认为不是一种理想的光电子材料，但它对 1.3~1.6 μm 红外光的高度透明性及其加工工艺的高度成熟，对光电子集成的研究者们仍具有很大的吸引力，特别是在锗硅合金及其应变量子阱的光电可调制性以及多孔硅的高效可见发光能力被发现之后，硅材料在光电子学领域的应用研究遂受到重视。

半导体材料的另一个重要分支是非晶半导体。对非晶体半导体的研究开始于 50 年代，前苏联的科学家们对硫系玻璃的光电特性产生了浓厚兴趣。到 60 年代中后期，美国的 Ovshinski 发现某些硫系玻璃具有非破坏性开关效应，使非晶半导体第一次引起人们的重视。但是，由于硫系玻璃的不稳定性和不可掺杂性，这个研究热点未能维持太久。使非晶半导体的研究真正形成一种声势，并逐渐付诸应用，应归功于英国 Dundee 大学的 Spear 研究室。他们在用场效应方法研究不同来源非晶硅膜态密度分布的基础上，于 1975 年首先对用辉光放电法制备的非晶硅实现了灵敏的磷、硼替位掺杂，使其室温电导率的改变达到 10 个数量级，成为非晶半导体理论和实验研究的一个重要转折点。这是一个十分令人鼓舞的成就。它改变了非晶半导体研究长期进展迟缓、前途渺茫的沉闷局面。对非晶硅实现有效掺杂的一个最直接的结果，是用这种材料制成了低成本的太阳能电池。有关非晶硅太阳能电池的报道从 1976 年起即开始在公开出版物和学术会议上出现。到 80 年代初，商业市场上就出现了用这种电池装备起来的电子计算器和手表等产品。在非晶硅太阳能电池的刺激和带动下，对非晶半导体基础理论的研究，以及对其在多种领域中的应用前景的研究，倾刻之间就在世界范围内蓬勃开展起来，成为半导体领域里一个发展很快的新兴学科。除太阳能电池以外，非晶硅的器件应用还包括用于驱动液晶显示器的薄膜场效应管阵列、用于复印和激光打印的感光鼓以及其他光敏器件、光电转换器件、存储器和其他敏感元器件等。

半导体科学与技术进步的另一个重要里程碑是超晶格半导体研究的兴起。超晶格这个新概念是 IBM 公司的日裔科学家江崎和华裔科学家朱兆祥于 1970 年提出来的^[3]。超晶格理论和技术的成熟，使半导体技术从杂质工程时代进入了能带工程时代，即我们不但可以通过杂质来控制半导体材料的电导率和少数载流子寿命，还可以通过材料尺寸的控制来“剪裁”其能带结构。能带工程的另一重要内容是固溶体技术，即通过固溶体组分的控制来实现能带结构的可控调整。这些技术在异质结器件和量子阱器件方面的应用，极大地改善了器件的工作特性，丰富和扩大了半导体材料的应用。

半导体科学技术的进步，在今后一个相当长的历史时期内仍会继续保持其突飞猛进、日新月异的势头，新材料、新器件、新工艺还会不断涌现，理论也还会不断发展。伴随着半导体技术的发展而兴起的信息产业到下世纪处将成为世界第一大产业，信息产业的蓬勃发展不但改变了社会，改变了人们的生活，也改变了意识形态。本世纪末的哲学家开始把信息同物质和能量一样视为宇宙三大要素，甚至认为生物的进化实质上植根于信息的进化，由此可见半导体技术对人类进步的影响是何等的广泛而深远。