



“十一五”国家重点图书出版规划项目

光电技术与系统精品丛书

微电子与光电子集成技术

Microelectronic and Optoelectronic

• • Integrated Techniques

陈弘达 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

TN4/73

2008

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金

“十一五”国家重点图书出版规划项目
光电技术与系统精品丛书

微电子与光电子集成技术

陈弘达 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

微电子技术与光电子技术紧密结合,相互渗透,必将推进信息技术及相关的高新技术进入新的发展阶段。本书共分为9章,从技术基础和实际应用的角度出发,着重对微电子与光电子集成技术相关的工艺基础、基本原理和关键集成技术进行了详细阐述,主要内容包括光发射器件、光电探测器、光波导器件、光电子专用集成电路、硅基光电子集成回路、甚短距离光传输技术以及微电子与光电子混合集成技术等。

微电子与光电子集成技术的实用化进程,必将为21世纪科学技术的发展作出重大贡献。然而,微电子与光电子集成技术是信息技术发展的一个崭新方向,虽然各项关键技术的发展取得了一定的进步,但还存在诸多难题需要进一步解决和完善。

本书主要为从事集成光电子和光通信等相关技术研究的科研人员提供参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微电子与光电子集成技术/陈弘达著. —北京:电子工业出版社,2008.1

(光电技术与系统精品丛书)

ISBN 978-7-121-05150-0

I. 微… II. 陈… III. ①微电子技术 ②光电子技术 IV. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第155029号

责任编辑:王春宁 特约编辑:王占禄

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:448千字 插页:2

印 次:2008年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

发展光电技术
造福祖国人民

周炳琨

丛书编委会

名誉顾问

王大珩 中国科学院院士、中国工程院院士、中国科学院研究员

主任

张以谟 天津大学教授

委员 (排名不分先后)

母国光 中国科学院院士, 南开大学教授

王启明 中国科学院院士, 中国科学院研究员

金国藩 中国工程院院士, 清华大学教授

周立伟 中国工程院院士, 北京理工大学教授

黄尚廉 中国工程院院士, 重庆大学教授

叶声华 中国工程院院士, 天津大学教授

倪国强 北京理工大学教授

宋菲君 中国科学院研究员

秘书长

丁伯瑜 中国光学学会副秘书长, 北京理工大学教授

联络委员

许楷 电子工业出版社策划编辑

王春宁 电子工业出版社高级策划编辑

序 言

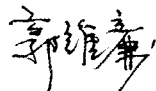
当前科学技术发展的规律和发展的趋势充分表明，21 世纪是一个信息化时代。

与信息化相关的信息科学技术是由其两大基础性支柱微电子技术和光电子技术构成的。微电子技术和光电子技术都有其各自的特点：微电子技术以电子为信息载体，由微型器件构成的电路具有易于控制、灵活性强的特点，以硅基材料为基础的 CMOS IC 技术已发展到 VLSI, ULSI 甚至 GLSI ($>10^9$ 个器件) 的阶段，其制造工艺先进、成熟、集成度高、成本低；而光电子技术以光子为信息载体，以光速在三维空间中传播，不相互干扰，频率高，传递信息量大、保密性好。由于两种技术的特点具有互补性，故将微电子技术与光电子技术相互结合，相互渗透会取得最佳的效果。例如光纤通信、光互连都是二者相互结合成功的范例。光纤通信是应用了光子传递信息量大和保密性好的特点，而光互连是利用了光子在三维空间传播时不相互干扰的特点。因此可以认为微电子技术和光电子技术相结合是今后信息技术的一个重要发展方向。两大技术的结合主要体现在微电子集成技术和光电子集成技术的结合上。将微电子器件与光电子器件有机地结合在一起构成光通信、光互连、光信息处理、光网络等各种复杂的信息系统是我们追求的最终目标。目前对实现这个目标最大的障碍和不幸就是作为微电子集成最理想的材料硅却是一个不理想的发光材料，而且造成硅发光很弱的原因是带有根本性难以改变的能带结构——间接带隙。对于这个现实，从事信息技术研究的科学工作者并未气馁或灰心，而是将它看做一个新的挑战。从多方面掀起研究热潮，克服了多个难题，在微电子集成和光电子集成相结合的研究方面得到了较大的突破。这主要包括：硅基发光的研究，特别是与 CMOS 工艺兼容硅基发光的研究；与 CMOS 工艺兼容新型光子器件，如硅基高速光调制器、激光器的研究；与 CMOS 工艺兼容光发射、光接收专用集成电路的研究；硅基光互连的研究；SOI 光波导的研究；硅衬底与化合物衬底键合的研究；微电子器件与光电子器件混合集成的研究等。这些研究工作的成果为微电子与光电子集成进一步的发展奠定了良好的基础。

中国科学院半导体研究所研究员陈弘达同志所写的专著《微电子与光电子集成技术》与同类书相比具有以下特色：（1）该书概括了近几年来上述微电子集成与光电子集成相结合领域的最新研究成果；（2）该书在内容编排上将微电子集成和光电子集成有机地融合在一起；

（3）该书是作者多年来科研成果的结晶。其中 SEED、VCSEL 与 CMOS 工艺兼容的光收发专用电路、硅基发光、甚短距离光传输模块等技术都是陈弘达同志取得的具有应用价值的科研成果，将这些科研成果总结成书，更体现了专著的特点。

总之，该书是一本全面、系统地论述微电子与光电子集成技术的专著，可作为同行科学工作者、有关学科或专业研究生、本科生的一本很好的参考书。谨此作序并予以推荐，不当之处请指正。



2007 年 10 月于天津大学

前 言

随着现代社会信息化和科学技术的高度发展,超大容量信息的高速处理、交换、存储、传输是目前世界各国普遍高度重视的研究热点之一。以微电子技术为基础,以计算机技术和通信技术为代表的电子信息技术带来了一场彻底改变人类生活和工作的信息革命。目前,微电子技术发展非常迅速,电路功能齐全,性能完善,价格低廉,集成制造工艺相当成熟,在信息处理和存储方面具有极强的优势。正迅速发展着的另一门高新技术——光电子技术能够高速超大容量传输信息,并具有实时、高速并行处理与交换信息能力,与微电子技术紧密结合,相互渗透,相互补充,构成微光电子集成系统,广泛地应用于信息技术领域,将成为 21 世纪信息技术的重要支柱,推进人类社会信息化和光电子高新技术产业化更快地向更高的水平发展。

《微电子与光电子集成技术》全书共分为 9 章,第 1 章首先对微电子技术的各种工艺基础、光电子技术的各种关键器件和相关加工工艺进行了简单介绍,并对微电子与光电子集成技术的发展过程进行回顾。

第 2 章对光发射器件及相关技术进行了全面阐述。其主要内容包括光发射器件理论基础、半导体发光二极管、半导体激光器,以及 VCSEL 激光器相关的关键技术。

第 3 章对光电探测器的基础理论和相关性能参数进行了全面分析,对各种结构的探测器进行详细介绍。硅基光电探测器作为一种新的发展方向,文中从双极型工艺和 CMOS 工艺两方面进行了重点阐述。锗硅光电探测器和光电探测器阵列在本章中也有所涉及。

用于连接各种光电子器件的光波导在光电子技术中起着举足轻重的作用。第 4 章从实际应用的角度出发,对其基本理论要点进行了简单介绍,着重对 SOI 光波导器件的设计和制作进行了较详细的分析。

在微电子与光电子集成技术中,光电子专用集成电路是重要的组成部分,微电子技术的设计方法及技术在此能充分体现。第 5 章介绍了光电子专用集成电路涉及到的关键技术——光发射器驱动电路和光接收器前置放大电路等相关技术。

硅基单片光电子集成回路是一种电输入、光传输、电输出的互连系统。第 6 章内容重点介绍了硅基光电子集成回路相关的关键技术,主要包括集成回路系统、集成硅基光发射器、集成硅基光波导和集成硅基光电探测器。

甚短距离光传输技术是微电子与光电子集成技术的应用之一。甚短距离光传输技术涵盖了光通信领域的诸多方面,不仅可以采用单个 VCSEL 芯片作为光源,而且其发射和接收模块中还可以封装多个激光器芯片阵列和探测器阵列,构成一维、多维光发射阵列和光接收阵列,其传输介质趋向于采用新型的宽带多模光纤,为了进一步扩大容量,在多个窗口采用粗波分复用技术等。因此,第 7 章介绍了甚短距离光传输的基本概念和涉及到的关键技术。

微电子与光电子混合集成是指光子器件和电子器件根据各自器件的材料结构和制作工

艺的不同，分别制作在不同的芯片上，最后通过焊接和封装等技术固化组合在一起。如何使光电子技术与微电子技术充分融合，共同发挥优势，是发展微光电子集成系统的关键所在。目前，微光电子集成智能像素（Smart Pixels）作为微电子与光电子混合集成技术重要内容，已经在功能和性能方面均取得了重大进展。第 8 章对相关技术进行重点介绍。

最后，本书对微电子与光电子集成技术进行了展望。可以预言，微电子与光电子集成技术的实用化进程，必将使光电子集成回路芯片，以及相关的高新技术进入新的发展阶段。光电子技术和微电子技术的紧密结合将为 21 世纪信息技术的发展作出重大贡献。

本书的编写是本课题组多年来科研成果的结晶，包含了刘海军、黄北举、顾明、张旭、代晓光、左超、裴为华、申荣铉、孙增辉、高鹏、贾久春、许兴胜、阚强、陈雄斌、唐君、鲁琳、周毅、刘金彬、张宇和董赞等同志的辛勤工作，天津大学毛陆虹教授、天津工程师范学院崔世钢教授和天津工业大学牛萍娟教授为本书的编写提供了大力支持，中国科学院半导体研究所相关科研人员提供了很大的帮助，在此表示感谢。

特别感谢天津大学张以谟教授、郭维廉教授和中国科学院半导体研究所吴荣汉研究员给予的悉心指导，郭维廉教授还特意为本书写了序言。感谢中国科学院半导体研究所刘忠立研究员和清华大学黄翊东教授对本书提出的宝贵意见。本书相关的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目“硅基单片光电子集成回路（OEIC）的关键技术及相关理论研究”（项目编号：60536030）的支持，对此深表谢意。在本书出版过程中，电子工业出版社的王春宁和许楷两位编辑给予了极大的帮助，在此一并表示感谢。

作者最后要感谢“国家科学技术学术著作出版基金委员会”和“电子信息科技专著出版专项资金”对本著作出版的资助。

微电子与光电子集成技术是信息技术发展的一个崭新研究方向，虽然各项关键技术的发展取得了一定的进步，但还存在诸多难题需要进一步解决和完善。本书从技术基础和实际应用的角出发，总结了作者多年来对微电子与光电子集成技术方面的研究成果和经验，在突出基本概念和基本原理的基础上，参考国际最新的技术发展进程，力求深入浅出、通俗易懂，希望能够对集成光电子领域的科研工作者有所帮助。由于作者水平有限，尽管做了很大努力，书中难免有错误、遗漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

联系信箱：hdchen@red.semi.ac.cn。

2007 年 10 月于北京

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 微电子技术简介	(1)
1.1.1 双极型微电子技术简介	(1)
1.1.2 MOS 微电子技术简介	(4)
1.1.3 Bi-CMOS 微电子技术简介	(7)
1.1.4 SOI 微电子技术简介	(8)
1.2 光电子技术简介	(9)
1.2.1 光发射器件简介	(10)
1.2.2 光接收器件简介	(11)
1.2.3 光波导器件简介	(12)
1.2.4 太阳能电池	(13)
1.2.5 电子图像显示器件	(14)
1.3 工艺与制备	(15)
1.3.1 MBE 工艺	(15)
1.3.2 MOCVD 工艺	(17)
1.3.3 氧化	(19)
1.3.4 化学气相沉积 (CVD)	(20)
1.3.5 刻蚀	(20)
1.3.6 光学光刻	(23)
1.3.7 离子注入	(27)
1.3.8 金属化	(29)
1.4 微电子与光电子集成技术简介	(30)
参考文献	(31)
第 2 章 光发射器件及集成技术	(32)
2.1 光发射器件理论基础	(32)
2.1.1 晶体结构	(32)
2.1.2 能带结构	(34)
2.1.3 杂质能级	(36)
2.1.4 半导体发光基础理论	(39)

2.2	光发射二极管	(41)
2.2.1	概述	(41)
2.2.2	半导体光发射二极管的基本结构	(42)
2.2.3	发光二极管性质	(44)
2.2.4	硅基光发射二极管	(46)
2.3	半导体激光器	(59)
2.3.1	半导体激光器分类	(60)
2.3.2	异质结激光器	(61)
2.3.3	分布反馈激光器 (DFB-LD)	(62)
2.3.4	量子阱激光器	(63)
2.3.5	硅基半导体激光器	(64)
2.4	垂直腔面发射激光器 (VCSEL)	(65)
2.4.1	VCSEL 的理论分析	(66)
2.4.2	VCSEL 的总体结构设计	(71)
2.4.3	VCSEL 中反射镜的设计	(72)
2.4.4	VCSEL 光腔的设计	(76)
2.4.5	几种典型的 VCSEL 结构及其制作工艺	(77)
	参考文献	(82)
第 3 章	光接收器件及集成技术	(84)
3.1	光电探测器理论基础	(84)
3.1.1	半导体中的光吸收	(84)
3.1.2	光生载流子	(86)
3.2	光电探测器性能参数	(90)
3.2.1	量子效率和响应度	(91)
3.2.2	频率响应	(92)
3.2.3	噪声和探测度	(92)
3.3	基于 III-V 族半导体材料的光电探测器	(94)
3.3.1	PIN 型光电探测器	(95)
3.3.2	APD 光电探测器	(103)
3.3.3	MSM 光电探测器	(107)
3.3.4	GaN 基紫外光电探测器	(107)
3.4	基于硅基双极型工艺的光电探测器	(112)
3.4.1	与标准双极工艺兼容的集成光电探测器	(112)
3.4.2	修改双极工艺条件下的集成光电探测器	(114)

3.5	基于硅基 CMOS 工艺的集成光电探测器	(118)
3.5.1	基于标准 CMOS 工艺的集成光电探测器	(119)
3.5.2	定制 CMOS 工艺下的 PIN 光电探测器	(126)
3.5.3	BiCMOS 工艺下集成光电探测器	(131)
3.6	锗硅光电探测器	(133)
3.7	光电探测器阵列	(136)
	参考文献	(139)
第 4 章	光波导器件及集成技术	(144)
4.1	光传输的理论概述	(144)
4.1.1	线光学理论	(144)
4.1.2	电磁场理论基础	(151)
4.2	光波导基本结构	(157)
4.3	SOI 光波导	(160)
4.3.1	SOI 光波导结构	(160)
4.3.2	光波导的折射率及损耗系数	(163)
4.3.3	硅光波导中损耗的分类	(164)
4.3.4	硅中的光调制机制	(166)
4.4	光波导器件制作技术	(167)
4.4.1	SOI 基片的制备	(167)
4.4.2	SOI 波导工艺特点简介	(169)
4.5	硅基电光调制器件简介	(171)
4.5.1	硅基电光调制器分类	(171)
4.5.2	光相位调制器	(173)
	参考文献	(184)
第 5 章	光电子专用集成电路	(186)
5.1	光电子专用集成电路设计	(186)
5.2	光发射器驱动电路	(187)
5.2.1	光纤通信系统中光发射器的驱动电路	(187)
5.2.2	照明系统中光发射器的驱动电路	(192)
5.3	光接收器前置放大电路	(194)
5.3.1	跨阻前置放大器的频率响应	(198)
5.3.2	跨阻前置放大器的相位和群延时	(199)
5.3.3	跨阻前置放大器的噪声和灵敏度	(201)
	参考文献	(205)

第 6 章 硅基光电子集成电路	(206)
6.1 硅基光电子集成电路 (OEIC) 概述	(206)
6.2 集成硅基光发射器	(208)
6.2.1 光发射机参数	(208)
6.2.2 LED 发射器	(209)
6.2.3 LD 光发射机	(211)
6.3 集成硅基光波导	(216)
6.3.1 场氧化结构做光波导	(216)
6.3.2 金属间光波导	(218)
6.3.3 磷硅酸玻璃光波导	(219)
6.4 集成硅基光电接收器	(221)
6.4.1 SiGe 工艺单片集成光电接收器	(222)
6.4.2 CMOS 工艺单片集成光电接收器	(222)
6.4.3 BiCMOS 工艺单片集成光电接收器	(225)
参考文献	(226)
第 7 章 甚短距离光传输模块及相关技术	(228)
7.1 甚短距离光传输技术 (VSR) 简介	(228)
7.1.1 VSR 的定义和标准	(229)
7.1.2 VSR 在网络体系中的位置	(230)
7.1.3 VSR 技术的基本工作形式	(231)
7.1.4 VSR 技术的主要特点	(231)
7.1.5 VSR 技术发展历史、研究现状和发展趋势	(232)
7.2 并行光传输模块及关键技术	(233)
7.2.1 并行光发射模块	(233)
7.2.2 并行光接收模块	(239)
7.2.3 光纤传输技术	(241)
7.2.4 粗波分复用 (CWDM) 技术	(250)
参考文献	(256)
第 8 章 微电子与光电子混合集成技术	(257)
8.1 微光电子集成智能像素概述	(257)
8.1.1 智能像素中的光子集成器件及集成技术	(258)
8.1.2 智能像素的应用	(261)
8.2 SEED 智能像素	(264)

8.2.1	SEED 器件	(264)
8.2.2	SEED 智能像素总体设计	(266)
8.2.3	SEED 智能像素制备工艺	(269)
8.3	SEED 列阵研制	(271)
8.3.1	适合于倒装焊结构的量子阱外延材料	(271)
8.3.2	含 DBR 反射结构的量子阱外延材料	(273)
8.3.3	SEED 列阵设计与制备	(276)
8.3.4	SEED 器件特性测量	(278)
8.3.5	SEED 器件模式调整技术	(280)
8.4	智能像素电路设计与模拟	(283)
8.4.1	智能像素电路特点	(283)
8.4.2	智能像素接收电路	(284)
8.4.3	智能像素驱动电路	(285)
8.5	智能像素集成技术基础工艺	(287)
8.5.1	硅 V 形槽制备技术	(287)
8.5.2	SEED 列阵光纤耦合	(287)
8.5.3	倒装焊钢柱电镀制备技术	(288)
8.6	微光电子集成智能像素发展前景	(288)
8.6.1	智能像素性能评估	(288)
8.6.2	SEED 智能像素与 VCSEL 智能像素比较	(290)
8.6.3	微光电子集成智能像素的实用化	(290)
8.7	小结	(291)
	参考文献	(293)
第 9 章	微电子与光电子集成技术展望	(296)
9.1	混合光电子集成技术	(297)
9.2	单片光电子集成技术	(297)
9.3	应用展望	(298)
附录 A	缩略语	(300)

第 1 章 概 述

近代电子信息技术的发展可以分为电子计算机技术、微电子技术、光电子技术 3 大分支。其中电子计算机技术发展时间最长，最为成熟。从 1946 年第一台计算机诞生到现在，已经过去 60 多年了，在这期间，计算机以惊人的速度发展着，首先是晶体管取代了电子管，继而是微电子技术的发展，使得计算机处理器和存储器上的元件越做越小，数量越来越多，计算机的运算速度和存储容量迅速增加。如今，电子计算机技术已经成为电子信息技术中最为重要的环节，而微电子技术则成为电子信息技术中的基础。在过去的 50 多年中，微电子技术一直随着摩尔定律飞速发展。根据该定律，芯片上可容纳的晶体管数目每 18 个月便可增加一倍，即芯片集成度每 18 个月翻一番。而微电子技术正是依据这一定律不断推进电子信息技术的高速发展。光电子技术的发展历史与微电子技术几乎相同。近年来，光电子技术正成为世界各国抢占科技优势的焦点。

目前，随着微电子技术的飞速发展，微电子技术人员面临着数据传输速率、带宽、功耗等多方面的挑战。而将微电子技术与光电子技术结合起来解决这些问题，正逐渐形成一种新兴的微电子与光电子集成技术。近年来，微电子与光电子集成技术正成为各国科学家研究的热点。

1.1 微电子技术简介

在过去的几十年中，以硅材料为主要加工材料的微电子技术一直是推动电子信息技术发展的主要力量。可以说，微电子技术是 20 世纪改善人类生活的最主要的科学技术。经过 50 多年的飞速发展，微电子制造技术已经比较成熟。从开始的几微米技术到现在的 $0.13\ \mu\text{m}$ 技术，微电子制造工艺集成度越来越高，成本越来越低。目前，95 nm 甚至 35 nm 微电子制造技术也已经在某些制造厂商的生产线上实现。微电子技术是人类历史中最重要科学技术之一，在将来相当长的一段时间内，微电子技术仍将会扮演更加重要的角色。

目前的微电子制造技术可以分为 4 个方面：双极型制造工艺、MOS 制造工艺、Bi-CMOS 制造工艺和 SOI 制造工艺。

1.1.1 双极型微电子技术简介

双极型制造工艺是早期集成电路产品所应用的唯一工艺。随着微电子工艺的发展，双极型工艺逐渐被 MOS 工艺所代替。在 20 世纪 70 年代，CMOS 工艺逐渐成为主流微电子制造工艺。在过去的 30 多年中，CMOS 工艺有了很大的发展，但是双极型工艺始终没有较大的

进步。由于双极型工艺过程复杂、成本高、集成度低，在现代的超大规模集成电路中已经很少单独使用。但是，双极型工艺速度快、较大的电流驱动能力等特点是 CMOS 工艺所达不到的。在某些情况下，作为 CMOS 工艺的补充，双极型工艺仍然被少量地使用。

双极型三极管是双极型工艺的典型器件。双极型三极管是由两种载流子参与导电的半导体器件，它由两个 pn 结组合而成，是一种电流控制电流源器件（CCCS）。根据三极管三极掺杂杂质不同，双极型三极管可以分为 NPN 型三极管和 PNP 型三极管，如图 1-1 所示。以 NPN 型三极管为例，集电极电流和基极电流流入三极管，发射极电流流出三极管，流进的电流等于流出的电流。发射区掺杂浓度高，基区掺杂浓度低且很薄，而集电结面积较大，是保证三极管能够实现电流放大的关键。

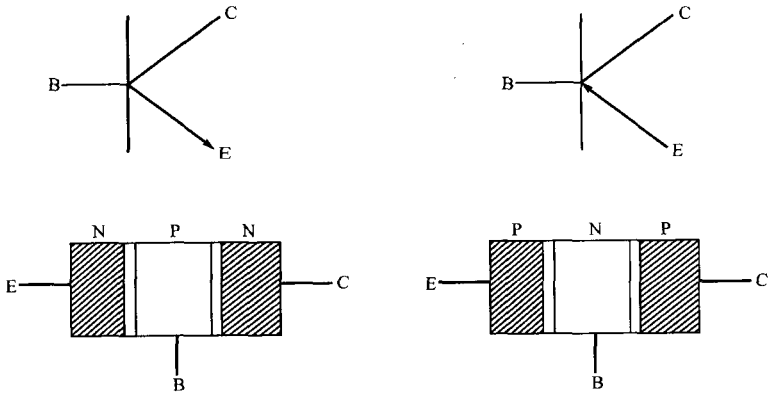
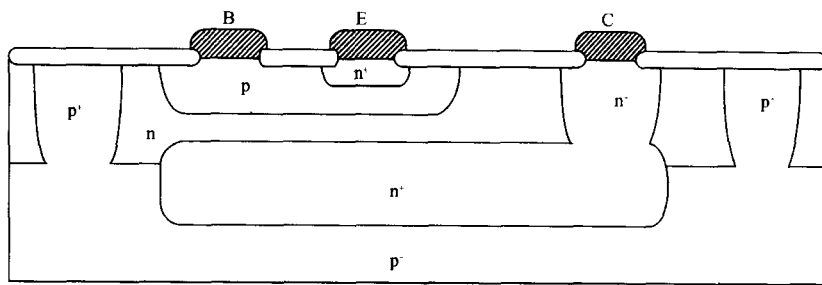


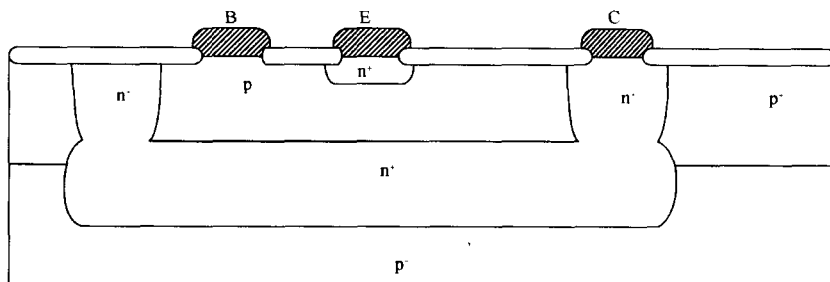
图 1-1 NPN 与 PNP 双极型三极管电路图与结构示意图

双极型制造工艺可以粗略地分为两类：一类在元器件间需要做电隔离；另一类在元器件间不需要做电隔离，而只需自然隔离。大部分双极型工艺都采用第一种做法，在元器件间做电隔离。电隔离的方法有很多，如 pn 结隔离、全介质隔离及 pn 结-介质混合隔离。在早期的标准双极型工艺中，都是采用 pn 结来隔离各个三极管间的集电极。采用 pn 结隔离分为三种结构：（1）标准下埋集电极三极管（SBC），（2）集电极扩散隔离三极管（CDI），（3）三重扩散三极管（3D）。

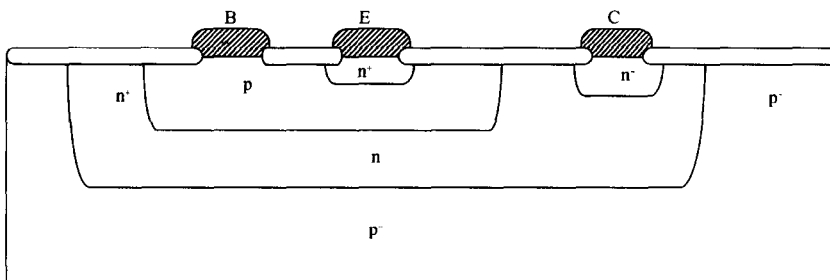
如图 1-2 (a) 所示，在 SBC 工艺中，集电极区域由一个重掺杂 n^+ 埋层和一个轻掺杂 n 型外延层构成。集电极间的隔离由与衬底相连的 p 型扩散区来实现。基极和发射极区域在隔离层结构制作以后通过扩散得到。图 1-2 (b) 展示的是 CDI 工艺，整个器件区域由一个 n^+ 环包围，这个 n^+ 环与下埋 n^+ 层相连，这样三极管就被由集电极和衬底构成的 pn 结与外界隔离开来。3D 工艺如图 1-2 (c) 所示，集电极、发射极、基极均是由注入工艺实现的。pn 结隔离通常使得晶体管的尺寸较大，因此使得双极型工艺不适合在现代的超大规模集成电路中应用。



(a) 标准下埋集电极 (SBC) 工艺



(b) 集电极扩散隔离 (CDI) 工艺



(c) 三重扩散 (3D) 工艺

图 1-2 3 种 pn 结隔离工艺截面图

典型的 pn 结隔离的双极型工艺流程复杂，总的工序一般有 40 多道。这里以标准下埋集电极 (SBC) 工艺的主要的工艺流程为例进行介绍，如图 1-3 所示。

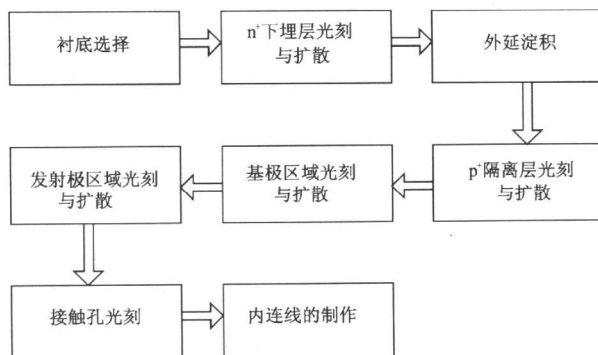


图 1-3 SBC 双极型工艺主要流程

1.1.2 MOS 微电子技术简介

MOS 场效应晶体管是金属-氧化物-半导体场效应晶体管的简称，它通过改变外加电压产生的电场强度来控制其导电能力。MOS 场效应晶体管不仅具有双极型三极管体积小、重量轻、耗电少、寿命长等优点，而且还具有输入阻抗高、热稳定性好、抗辐射能力强、噪声低、制造工艺简单、便于集成等特点。因而，在大规模及超大规模集成电路中得到了广泛的应用。

与双极型三极管不同，MOS 晶体管是电压控制元件，参与导电的只有一种载流子，因此称其为单极型器件。MOS 晶体管可以分为增强型晶体管与耗尽型晶体管两种。根据沟道掺杂不同，又可分为 N 沟道增强型晶体管、P 沟道增强型晶体管、N 沟道耗尽型晶体管和 P 沟道耗尽型晶体管四种。图 1-4 展示了 N 沟道增强型和耗尽型两种晶体管的结构示意图。

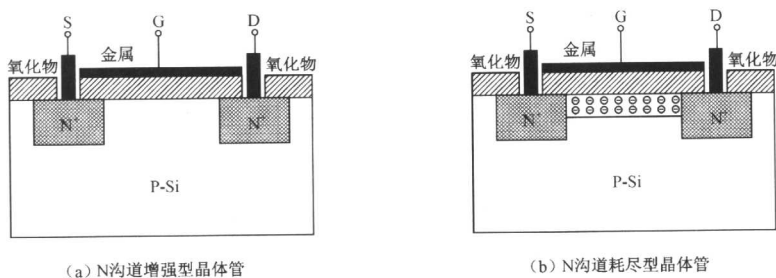


图 1-4 N 沟道增强型和耗尽型晶体管结构示意图

图 1-4 中显示的 G、D、S 分别叫做 MOS 晶体管的栅极、漏极和源极。从图中可以看出，增强型晶体管与耗尽型晶体管的区别在于，耗尽型晶体管存在原始导电沟道，而增强型晶体管没有原始导电沟道。

对于增强型晶体管，当 $U_{GS}=0$ 时，漏源之间相当于两个背靠背的 pn 结，无论 U_{DS} 的值大小如何都不会在 D、S 间形成电流 i_D ，即 $i_D=0$ ；当 U_{GS} 较小时，虽然在 P 型衬底表面形成