

■ 高等院校精品教材

功率集成电路技术 理论与设计

洪 慧 韩 雁 文进才 陈科明 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

功率集成电路技术理论与设计

洪 慧 韩 雁 文进才 陈科明 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

功率集成电路技术理论与设计 / 洪慧等编著.

—杭州: 浙江大学出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-308-08849-7

I. ①功… II. ①洪… III. ①集成电路—电路理论
②集成电路—电路设计 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 134477 号

功率集成电路技术理论与设计

洪 慧 韩 雁 文进才 陈科明 编著

责任编辑 邹小宁

封面设计 俞亚彤

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.25

字 数 480 千

版 次 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-08849-7

定 价 36.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

专用术语中英文对照

功率集成电路	Power Integrated Circuit (PIC)
片上系统	System on a Chip (SoC)
高压功率集成电路	High Voltage Integrated Circuit (HVIC)
智能功率集成电路	Smart Power Integrated Circuit (SPIC)
片上功率系统	Power System on a Chip (PSoC)
双极-CMOS-DMOS	Bipolar-CMOS-DMOS (BCD)
沟槽隔离	Trench Isolation (TI)
绝缘衬底上的硅	Silicon-On-Insulator (SOI)
弱化表面场	Reduced Surface Field (RESURF)
工艺计算机辅助设计	Technology Computer Aided Design (TCAD)
超结	Superjunction (SJ)
集成门极换流晶闸管	Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)
大功率晶体管	Giant Transistor (GTR)
可关断晶闸管	Gate Turn-off Thyristor (GTO)
MOS 控制晶闸管	MOS Controlled Thyristor (MCT)
绝缘栅双极晶体管	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)
静电感应晶体管	Static Induction Transistor (SIT)
静电感应晶闸管	Static Induction Thyristor (SITH)
横向双扩散 MOS 管	Lateral Double-diffusion MOSFET (LDMOS)
纵向双扩散 MOS 管	Vertical Double-diffusion MOSFET (VDMOS)
横向绝缘栅双极晶体管	Lateral Insulated Gate Bipolar Transistor (LIGBT)
横向 MOS 门控晶闸管	Lateral MOS Controlled Thyristor (LMCT)
V 形槽 VMOS 管	Vertical V-groove MOSFET (VVMOS)
U 形槽 VMOS 管	Vertical U-groove MOSFET (VUMOS)
场板	Field Plate (FP)
场限环	Field Limiting Ring (FLR)
轻掺杂	Lightly Doping Drain (LDD)
横向变掺杂	Variation of Lateral Doping (VLD)
静电放电	Electrostatic Discharge (ESD)
安全工作区	Safe Operation Area (SOA)
漏极扩展	Drain-Extended (DE)
智能电压扩展	Smart Voltage Extension (SVX)



微机电系统	Micro Electro Mechanical System (MEMS)
金属场板	Metal Field Plate (MFP)
阻性场板	Resistive Field Plate (RFP)
半绝缘多晶硅	Semi-Insulating Polycrystalline Silicon (SIPOS)
注氧隔离	Separation by Implantation of Oxygen (SIMOX)
硅片直接键合	Silicon Wafer Direct Bonding (SDB)
外延层转移	Epoxy Layer Transfer (ELTRAN)
可制造性设计	Design For Manufacturing (DFM)
电路分析高级模块	Circuit Analysis Advanced Application Module (CA-AAM)
脉冲宽度调制	Pulse Width Modulation (PWM)
功率因数校正	Power Factor Correction (PFC)
零电压开关	Zero-Voltage Switching (ZVS)
等离子显示器	Plasma Display Panel (PDP)
液晶显示器	Liquid Crystal Display (LCD)
扭曲向列	Twisted Nematic (TN)
超扭曲向列	Super Twisted Nematic (STN)
双层超扭曲向列	Dual Scan Tortuosity Nomograph (DSTN)
薄膜晶体管	Thin Film Transistor (TFT)
时控逻辑电路	Clocked-CMOS (C ² MOS)



前 言

功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC)作为电力电子技术和微电子技术相结合的产物,被广泛运用于电力电子、通信与网络、计算机与消费电子、工业与汽车电子等诸多应用领域。近十多年来,随着各种先进半导体材料制备技术、集成电路制造工艺以及新型功率器件的不断涌现,功率集成电路技术得到了实质性的提升和快速发展,成为引发“第二次电子革命”的关键技术之一。迄今已有一系列 PIC 产品运用于人类社会的生产和生活当中,包括电源管理电路、电机驱动电路、平板显示驱动电路、电子镇流器电路和智能功率 MOS 开关等。

功率集成电路总的技术发展趋势是工作频率更高、功率更大、功耗更低和功能更全,但是在集成工艺兼容、功率器件结构、电热效应和功率器件库模型建立等方面仍面临着很多挑战。高等院校微电子专业、电力电子专业等相关领域的硕士研究生、博士研究生和高年级本科生以及从事此领域工作的研究人员、工程技术人员,都迫切需要系统地掌握功率集成电路的设计原理和设计方法,全面了解最新的功率集成电路工艺水平以及发展趋势,为设计、制造更为先进的功率集成电路产品打下坚实的基础。为此,我们编写了这本书。

本书以介绍功率集成电路的基本设计原理为主线,结合已有的研究基础分别从功率器件原理、功率集成电路工艺、工艺仿真和器件仿真、电路设计和版图绘制等方面来阐述功率集成电路的设计理论。本书着重现有的主流功率集成电路相关技术,在理解功率集成电路基本设计原理的基础上,追求内容的系统性、实用性和先进性,力求读者能尽快接轨并掌握现有主流功率集成电路技术,产生兴趣与共鸣。

全书共分八章。第 1 章介绍功率集成电路的概况和发展趋势。第 2 章介绍基本功率器件(LDMOS、VDMOS 和 LIGBT 等)基本理论和一些功率器件技术的发展状况,最后给出一个高压 LDMOS 器件的设计实例。第 3 章主要介绍功率集成电路工艺,包括工艺概况、隔离技术和终端技术,着重介绍目前主流 BCD 工艺的种类、发展现状、研究进展和 SOI 技术。第 4 章主要介绍工艺仿真和器件仿真工具 TCAD 在功率集成电路中的运用,介绍 TCAD 的发展概况、主流软件、工艺仿真、器件仿真、器件建模以及仿真实例。第 5 章介绍基本功率集成电路模块,着重介绍功率集成电路不同于一般集成电路的电路结构、模块特点、工作机理以及具体电路,并介绍几个广泛使用的典型功率集成电路产品。第 6 章介绍功率集成电路版图设计需要考虑的侧重点,包括隔离方法、温度梯度影响、噪声、寄生效应以及整体布局等方面。第 7 章至第 8 章分别介绍智能功率集成电路(SPIC)和高压集成电路(HVIC)的设计特点和设计实例,包括整体框架、电路设计、器件设计、工艺流程及版图设计。为使读者能较好的理解、掌握并运用这些基础理论和设计方法,第 2,3,4,7,8 章均给出了具体的设计实例以供参考。

本书是在浙江大学韩雁教授的主导下,由洪慧、文进才和陈科明编写完成,洪慧完成第

1,3,7,8 章节内容的撰写,文进才完成第 4,5,6 章节内容的撰写,陈科明完成第 2 章节内容的撰写,韩雁教授修改完善和最终定稿。书中设计实例和参考资料来源于浙江大学微电子与光电子研究所多年的研究和技术积累,同时借鉴了杭州电子科技大学微电子 CAD 所器件结构及建模研究的一些成果。浙江大学微电子与光电子研究所从 20 世纪 70 年代起就开始从事半导体高压大功率器件方面的研究工作,在 VDMOS、IGBT 等高压大功率器件研发方面取得很好的成果。90 年代开始,浙江大学微电子与光电子研究所开始从事功率集成电路相关的研究工作,积累了许多功率集成电路设计与流片经验。杭州电子科技大学微电子 CAD 所在 CMOS、BJT 和功率器件结构及建模建库方面开展了大量研究工作,为本书提供了很多参考资料。本书在这些研究成果的基础上综合而成,因而在此特别感谢两个研究所的师生团队为本书出版所做的巨大贡献,尤其感谢梁剑、刘剑、胡惊、韩成功、张斌、张世峰、胡佳贤、戴一平、方绍华、吴滔、姚云龙、王皇等研究人员,本书采用了他们的许多一手资料、设计成果以及技术文档等。本书还引用了功率集成电路相关领域的专家学者及其相关机构的科研论文、研究报告、产品介绍和用户手册等,在此一并表示深深的谢意。

由于作者水平所限,书中的错误及不完善之处敬请同行专家和广大读者提出宝贵意见。

编著者

2011 年 5 月于杭州

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 功率集成电路概念	(1)
1.2 功率集成电路发展历程	(2)
1.3 功率集成电路技术特点	(4)
1.4 功率集成电路开发流程	(5)
1.5 功率集成电路存在的挑战和机遇	(7)
参考文献	(7)
第 2 章 基本功率器件	(10)
2.1 功率器件发展概况	(10)
2.2 可兼容功率器件	(14)
2.2.1 LDMOS 器件	(14)
2.2.2 VDMOS 器件	(25)
2.2.3 IGBT 器件	(35)
2.3 几种功率器件比较	(43)
2.4 功率器件技术的发展	(44)
2.4.1 沟槽(Trench)技术	(44)
2.4.2 超结(Superjunction)理论	(48)
参考文献	(51)
第 3 章 功率集成电路工艺	(54)
3.1 基本功率集成电路兼容工艺概况	(54)
3.1.1 NMOS-DMOS 兼容工艺	(54)
3.1.2 CMOS-DMOS 兼容工艺	(55)
3.1.3 Bipolar-CMOS-DMOS 兼容工艺	(57)
3.2 功率集成电路的隔离技术	(59)
3.2.1 自隔离	(59)
3.2.2 PN 结隔离	(60)
3.2.3 介质隔离	(61)
3.2.4 隔离技术比较	(62)
3.3 功率集成电路中功率器件的终端技术	(63)

3.3.1	弱化表面场技术	(63)
3.3.2	场限环技术	(65)
3.3.3	表面变掺杂技术	(65)
3.3.4	轻掺杂技术	(65)
3.3.5	场板技术	(66)
3.3.6	场板技术在高压 VDMOS 终端结构中的应用实例	(66)
3.4	功率集成电路主流工艺——BCD 工艺	(70)
3.4.1	BCD 工艺概念	(70)
3.4.2	BCD 工艺的种类和发展现状	(70)
3.4.3	BCD 工艺的最新研究进展	(75)
3.5	更先进的功率集成电路工艺技术——SOI 技术	(76)
3.5.1	SOI 材料的制备	(77)
3.5.2	SOI-BCD 工艺特点	(80)
3.6	智能功率集成电路(SPIC)工艺实例	(82)
3.6.1	SPIC 工艺特点	(82)
3.6.2	SPIC 工艺流程及步骤	(82)
3.6.3	SPIC 可实现器件	(87)
3.7	高压功率集成电路(HVIC)工艺实例	(87)
3.7.1	HVIC 工艺特点	(87)
3.7.2	HVIC 工艺实例 1——单晶硅 BCD 工艺	(87)
3.7.3	HVIC 工艺实例 2——SOI 工艺	(92)
	参考文献	(96)

第 4 章 功率集成电路工艺和器件仿真 (98)

4.1	工艺与器件仿真(TCAD)概念及发展概况	(98)
4.2	TCAD 仿真软件简介	(100)
4.2.1	TSUPREM-4/MEDICI/DAVINCI 软件	(100)
4.2.2	ISE-TCAD 软件	(101)
4.2.3	ATHENA/ATLAS 软件	(102)
4.3	工艺仿真	(102)
4.3.1	TSUPREM-4 的工艺模型	(102)
4.3.2	TSUPREM-4 的使用和举例	(106)
4.4	器件仿真	(114)
4.4.1	MEDICI 的计算方程和物理模型	(115)
4.4.2	MEDICI 的使用和举例	(117)
4.5	器件建模	(143)
4.5.1	功率器件模型简介	(143)
4.5.2	IC-CAP 软件简介	(143)
4.5.3	建模流程	(144)

参考文献	(147)
第 5 章 基本功率集成电路模块	(149)
5.1 功率集成电路组成	(149)
5.1.1 智能功率集成电路(SPIC)	(154)
5.1.2 高压功率集成电路(HVIC)	(156)
5.1.3 功率集成电路(PIC)与普通集成电路(IC)的区别	(160)
5.2 电平位移模块	(161)
5.2.1 典型电平位移电路	(161)
5.2.2 薄栅氧器件电平位移电路	(161)
5.2.3 全厚栅氧器件电平位移电路	(163)
5.3 栅驱动模块	(164)
5.4 保护电路——过流、过热和过/欠压保护电路	(165)
5.4.1 过流保护电路	(165)
5.4.2 过热保护电路	(168)
5.4.3 过/欠压保护电路	(170)
参考文献	(171)
第 6 章 功率集成电路版图设计	(173)
6.1 功率集成电路版图特点	(173)
6.1.1 温度梯度	(173)
6.1.2 噪声	(174)
6.1.3 闩锁效应	(175)
6.1.4 寄生参数	(176)
6.1.5 终端结构	(176)
6.1.6 隔离间距	(176)
6.2 隔离版图设计考虑	(177)
6.2.1 PN 结隔离版图设计	(177)
6.2.2 自隔离版图设计	(178)
6.2.3 SOI 隔离版图设计	(179)
6.3 整体版图布局	(179)
参考文献	(179)
第 7 章 智能功率集成电路(SPIC)的设计	(181)
7.1 智能功率集成电路设计要点	(181)
7.1.1 功率器件集成	(181)
7.1.2 功率器件结构	(181)
7.1.3 器件隔离	(182)
7.1.4 工艺流程选择	(183)

7.1.5 关键工艺参数	(183)
7.2 PWM 开关电源智能功率集成电路的设计实例	(183)
7.2.1 开关电源原理及开关电源 IC	(184)
7.2.2 开关电源 IC 的电路模块	(187)
7.2.3 开关电源 IC 的 BCD 工艺流程	(194)
7.2.4 PWM 开关电源 IC 的版图设计	(198)
7.3 荧光灯驱动智能功率集成电路的设计实例	(199)
7.3.1 高频照明原理及电子镇流器 IC	(199)
7.3.2 荧光灯驱动 IC 的电路模块	(204)
7.3.3 荧光灯驱动 IC 的 BCD 工艺流程	(219)
7.3.4 荧光灯驱动 IC 的版图设计	(223)
参考文献	(223)
第 8 章 高压集成电路(HVIC)的设计	(225)
8.1 高压集成电路的设计考虑	(225)
8.1.1 工艺流程选择	(225)
8.1.2 功率器件关键参数确定	(227)
8.1.3 关键工艺参数的折衷	(227)
8.2 等离子显示(PDP)驱动高压集成电路的设计实例	(228)
8.2.1 PDP 显示系统及其扫描驱动 IC	(228)
8.2.2 PDP 扫描驱动 IC 的电路模块	(230)
8.2.3 PDP 扫描驱动 IC 的 BCD 工艺流程	(239)
8.2.4 PDP 扫描驱动 IC 的版图	(248)
8.3 液晶显示(LCD)驱动高压集成电路的设计实例	(250)
8.3.1 LCD 显示系统及其数据驱动 IC	(251)
8.3.2 LCD 数据驱动 IC 的电路模块	(254)
8.3.3 LCD 数据驱动 IC 的工艺流程	(265)
8.3.4 LCD 数据驱动 IC 的版图设计	(265)
参考文献	(266)
附录 1 SPIC BCD 工艺 IC 设计相关文件	(269)
附录 2 HVIC BCD 工艺 IC 设计相关文件	(280)

第 1 章

绪 论

自 20 世纪 50 年代以来,受应用领域、工艺条件和成本等多方面影响,半导体产业技术逐渐向两个方向发展:一个是以集成电路为主的微电子技术,其单片集成的器件越来越多,单个器件功率越来越小;另一个则是以大功率半导体分立器件为主的电力电子技术,单个器件功率越来越大,耐压也越来越高。现在两种技术都发展到了相当成熟的阶段,为我们的工业生产、交通运输及日常生活等带来了很大的便利,已成为电子工业中两个重要的产业分支。

但是,随着应用领域的不断扩大和需求的不断提高,很多应用领域希望集成电路能够处理更大的功率,或者功率器件能集成更多的控制和处理功能,这就给已有的半导体产业提出了很大挑战。随之,微电子技术和电力电子技术这两个重要分支有机地相互渗透、相互结合,就出现了目前被称之为功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC)的新技术^[1]。它既具有一定的功率处理能力,又能进行功率控制、信号处理和与外界进行“信息”通信,因而广受电子工业界的青睐。

近十多年来,随着各种先进的半导体材料制备技术、集成电路制造工艺以及新型功率器件技术的不断涌现,功率集成电路技术得到了实质性的提升和快速发展^{[2]~[6]}。与分立器件相比, PIC 不仅在电路性能、可靠性和功耗方面有很大的优势,而且在降低成本、减小体积和减轻重量等方面也有着巨大的潜能。迄今已有一系列 PIC 产品问世,包括电源管理电路、电机驱动电路、平板显示驱动电路和智能功率 MOS 开关等^{[7],[8]}。

随着系统集成度越来越高, PIC 为单芯片系统(System on a Chip, SoC)和机电一体化提供了关键的接口电路,它将信息采集、处理和功率控制合为一体,从而能推动电子工业的进一步发展,是引发“第二次电子革命”的关键技术之一。面对当今信息社会、环境和生活需求的不断提高, PIC 也需要不断发展来适应时代的要求。PIC 总的技术发展趋势是工作频率更高、功率更大、功耗更低和功能更全。因此 PIC 在集成兼容、电热效应和功率器件库模型建立等方面仍面临着很大挑战。

1.1 功率集成电路概念

功率集成电路(PIC)是指将功率器件、控制电路、信号处理和通信接口电路等集成在同一芯片中的特殊集成电路。按照早期的工艺发展,功率集成电路主要分成两类:一类是高压功率集成电路,简称 HVIC(High Voltage Integrated Circuit);另一类是智能功率集成电路,简称 SPIC(Smart Power Integrated Circuit)。通常 HVIC 是指多个高压器件与低压模拟或逻辑电路的集成,其功率器件一般是多路并行的,处理电流能力相对较低,常用于平板

显示器驱动、照明和中小功率电源等中；而 SPIC 是指一个(或几个共漏或共集)功率器件与控制 和保护电路的集成,电流容量相对较大,常用于电压转换/调节器、汽车功率开关和电机驱动等中。但随着 PIC 的不断发展,处理电流能力越来越大,系统集成度也越来越高,SPIC 和 HVIC 在工作电压、实现功能上都难以区分,界限也变得越来越模糊,现在已习惯于将它们统称为智能功率集成电路(SPIC)或者功率集成电路(PIC)^{[9],[10]}。

PIC 目前已被广泛地运用于通信与网络、计算机与消费电子、工业与汽车电子等诸多应用领域,其典型的应用领域如图 1.1 所示。从图中可以看出,一般低压低电流(电流 $<1\text{A}$ 且 电压 $<30\text{V}$)的 PIC 主要应用于消费类电子,如音响功放、LED 驱动和 LCD 驱动等;中等电 流或中等电压($1\text{A}<\text{电流}<100\text{A}$,或者 $100\text{V}<\text{电压}<1000\text{V}$)的 PIC 是目前发展的主流,也 是现在 PIC 应用最为广泛的领域,目前主要应用于各种马达驱动器、电子镇流器和开关电源等,能大大提高这些电子产品的性能,降低它们的成本、重量和体积;对于更高电压、更大 电流需求的 PIC 而言,需要具有更大电流电压处理能力的功率器件,目前技术还不是很成 熟,正处在进一步探索阶段。

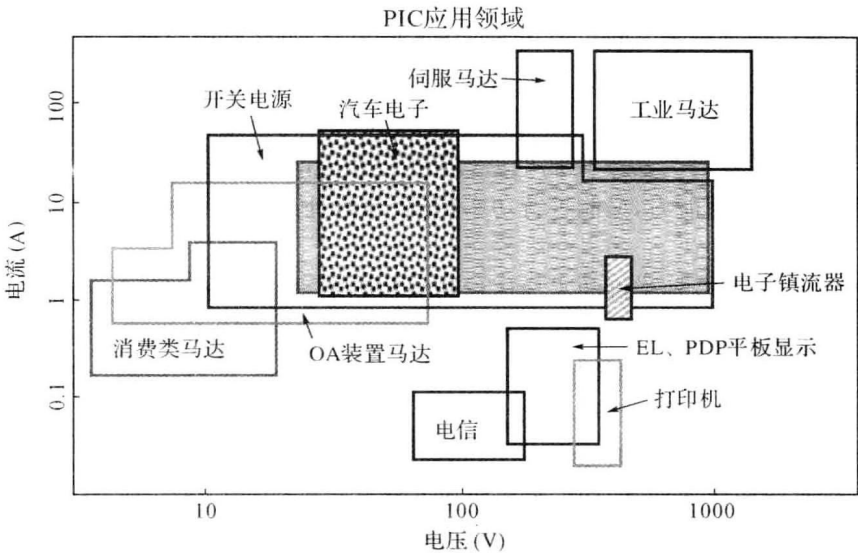


图 1.1 功率集成电路的典型应用领域^[11]

1.2 功率集成电路发展历程

过去的三十多年,功率集成电路取得了令人难以置信的进展。特别是近些年,随着新型功率器件和工艺技术的发展,无论从马达驱动到分布式电源,还是从汽车电子到家用电器,到处都能见到功率集成电路飞速发展的例证。在不断的技术更新和市场需求的影响下,功率集成电路还将一直发展下去。

PIC 最早出现于 20 世纪 70 年代后期。1980 年 C. Cini 等人就实现了带有过温、短路和过载等保护功能的功率集成电路,它是一款 B 类双音频功率放大器,最高可输出 20W 功率,主要用于汽车电子系统,这是早期比较典型的功率集成电路^[12]。该芯片采用 PN 结隔离工

艺技术,其功率器件的集电极通过 N+ 埋层以及深磷注入引出到表面。由于当时电子系统大多采用双极型器件,驱动双极型器件需要很大的电流,而且驱动和保护电路也较复杂,因而该放大器将众多分立器件集成在同一芯片上,减少了系统中的元器件数、互连数和焊点数,不仅减小了系统的体积、成本和重量,而且也提高了系统的稳定性和可靠性。不过当时的 PIC 虽然在系统稳定性、性能、功耗和成本等方面比分立器件改进很多,但是受双极型器件电流驱动和电路复杂等特点的影响,其应用领域受到很大程度的限制。

20 世纪 80 年代,功率 MOSFET、IGBT 等新型器件相继问世,不仅克服了双极型器件存在的缺点,而且具有输入阻抗高、栅控特性好、驱动功耗低和保护电路简单等优点,这给 PIC 带来了进一步发展的契机。但是由于受当时工艺水平和成本的制约,PIC 主要还是应用于高成本高性能的军事和通信领域当中,其民用也集中在一些中高端的汽车、计算机和电源等领域。进入 20 世纪 90 年代之后,随着工艺水平和设计能力的不断提高,PIC 在性能提高的同时成本也得到进一步降低,各式各样的 PIC 产品如雨后天春笋般不断涌现出来,其应用范围也不断扩大,成为目前半导体行业发展最为迅速的类别之一。

图 1.2 给出日本东芝(Toshiba)公司在不同时期开发的同一类型 PIC 产品的芯片照片,这可以从某一侧面反映 PIC 的发展状况。随着时间的不断推移,在输出相同功率的情况下,很显然 PIC 芯片面积越来越小。1991 年,早期 PIC 采用的是改进型 BiCMOS V 形槽工艺,由于特征尺寸比较大($6\mu\text{m}$),所以简单的低压控制部分电路就占据一半芯片面积;随着微电子技术和电力电子技术的发展,器件设计、隔离技术、功率器件集成技术等方面都有了进一步的提高,1994 年开发的 PIC 芯片就是采用了沟槽隔离(Trench Isolation)来隔离功率器件和低压电路,由于横向 LIGBT 与低压器件良好的介质隔离,能避免大电流引起的闩锁效应,PIC 的稳定性有了进一步提高;到 2001 年,相同输出功率的 LIGBT 在版图面积方面有了进一步缩小,PIC 在差不多的面积下集成了更多的低压控制功能以及保护电路。

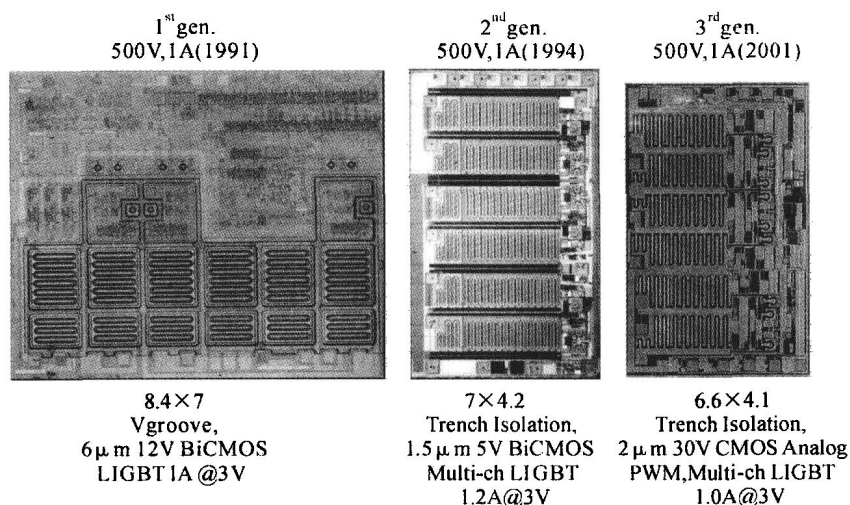


图 1.2 Toshiba 公司在不同时期开发的同一类型 PIC 芯片^[1]

目前已有一系列 PIC 产品应用在各个电子领域中,包括 MOS 智能功率开关、半桥或全桥驱动器、电源管理和平板显示驱动等电路。一些国际著名公司在功率集成电路领域处于

领先地位,如 ST Microelectronics(ST)、Texas Instruments(TI)、International Rectifier(IR)、National Semiconductor(NS)、Power Integrations(PI)、ON Semiconductor(Onsemi)和 Intersil 等公司。这些公司开发的 PIC 产品已被广泛使用,例如 PI 公司的 TOP-Switch 系列、TINY-Switch 系列和 Link-Switch 系列,为中小功率的开关电源电路提供了良好的解决方案;IR 公司的 IR21XX 系列,是良好的半桥功率驱动 MOS IC,是电子镇流器等电路的核心部件;还有 ST 公司的电子镇流器控制驱动 L6574 等。

高性价比、兼容 CMOS 工艺、内置高压大电流功率器件和高集成度始终是 PIC 发展的研究热点。随着高集成度 BCD(Bipolar-CMOS-DMOS)工艺以及 SoC 设计方法的不断发展,PIC 的下一个目标就是将功率处理电路和 SoC 电路完美地结合在一起,从而系统地解决功率问题,这就是片上功率系统(Power System on a Chip,PSoC)新概念。

1.3 功率集成电路技术特点

功率集成电路是以半导体功率器件和集成电路整合一体为技术依托的一种特殊 IC。层出不穷的新技术,不仅保证了 PIC 技术向更新的方向飞速发展,而且为 PIC 应用范围的拓展提供了更大的可能性。

对于功率集成电路而言,其主要完成的功能有功率处理、低压控制和接口通信等,其所需的基本电路和器件类型如图 1.3 所示。从中可以看出,PIC 要实现这些功能必须首先解

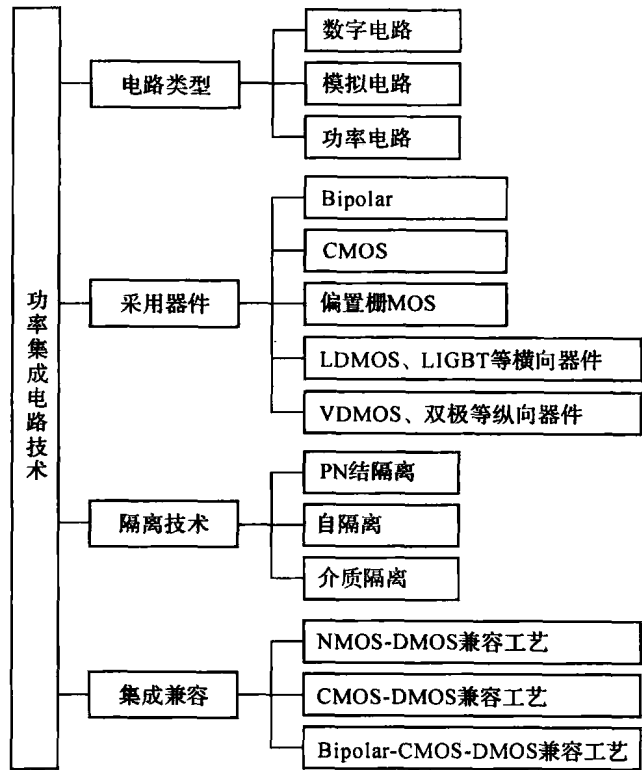


图 1.3 功率集成电路技术组成

决一系列兼容性问题,不仅要实现高压和低压之间的兼容,还要实现数模混合电路和功率电路的兼容、制造功率器件和制造普通器件(Bipolar、CMOS、LDMOS、VDMOS 和 LIGBT 等)工艺的兼容。为了控制成本,还必须考虑到光刻层次的兼容,尽量使用同种掺杂实现不同器件的工艺层次。PIC 的功率处理意味着电热问题也是需要着重考虑的。功率器件的选择和布局将极大地影响其他电路模块的性能,这就需要在版图设计方面对电热问题进行统筹安排;同样,功率电路驱动电流能力处理是否恰当也极大地限制了整体电路性能的发挥;等等,诸如此类,不一而足。因此,PIC 兼容技术的解决与否,以及解决的质量好坏、水平高低,将直接影响着 PIC 的性能、成本、速度和功耗。

为了更好地解决 PIC 的兼容问题,目前采用了很多工艺技术和手段。其中 BCD 技术是一种最主要的工艺技术和手段。它是一种兼顾双极、CMOS 和 DMOS 结构的单片 IC 制造技术,可以较好地解决 PIC 的这些兼容问题;同时通过采用其他一些工艺手段,达到更好地解决 PIC 兼容问题的作用。例如,采用隔离技术可以有效地实现器件之间的隔离,实现高压之间、器件之间的兼容;采用 RESURF(Reduced Surface Field)技术可以更有效地实现高压横向功率器件和低压控制电路的兼容;场板技术则可以更好地提高器件耐压,提高高压器件的兼容性;而 SOI(Silicon on Insulator)技术能提供一种更为理想的隔离效果。目前这些技术均已被广泛运用于 PIC 的设计和制造当中^[13]。

1.4 功率集成电路开发流程

对于 PIC 而言,它的低压控制电路设计和一般的 IC 设计流程一样没有显著区别,但是一旦涉及功率器件,在完成一般设计基础上还必须考虑其他一些问题。对于有现成工艺可利用的情况,一般需要根据具体工艺对功率器件进行结构和尺寸上的调整,从而满足最优化设计,而这离不开工艺仿真软件(Technology CAD, TCAD)的帮助;对于没有相近工艺可用的,就需要进行新工艺开发,包括流程设计、参数调整、器件优化和设计规则制定等一系列与工艺相关的探索,这些都给 PIC 开发带来很大难度,造成 PIC 开发周期长、研发成本高等问题。

图 1.4 给出 PIC 开发的大致流程。对于开发一个新的 PIC 工艺技术方案而言,首先要确定这项工艺技术方案的应用背景和工艺需求,然后根据其应用背景合理地设计工艺流程。当确定好工艺方案和流程之后,就可以根据工艺流程进行工艺设计,即对具体的工艺参数和器件结构进行设计和仿真;然后,在生产线上按照设计好的工艺参数对所有器件进行流片验证,同时依据工艺过程中检测出现的工艺偏差,进行工艺调整直到所有器件达到设计要求;完成以上步骤之后,就可以确定详细的设计规则、提取器件参数形成工艺文件和单元库文件(高压器件和低压器件);然后就可以进行针对系统需求的 PIC 电路设计和版图设计。与一般 IC 相比,PIC 还需要对过热、过流、过/欠压等一系列可能存在的问题进行考虑。实际过程中,由于新工艺的不稳定性、偏差等一系列问题,需要进行多次调整才能完全达到预先设计的目标。在实际 PIC 开发过程中为了节省成本和缩短时间,往往会直接根据工艺仿真的结果进行 PIC 电路和版图的设计,而将工艺验证和芯片流片放在一起进行调整。相对而言,这样的难度会更大。

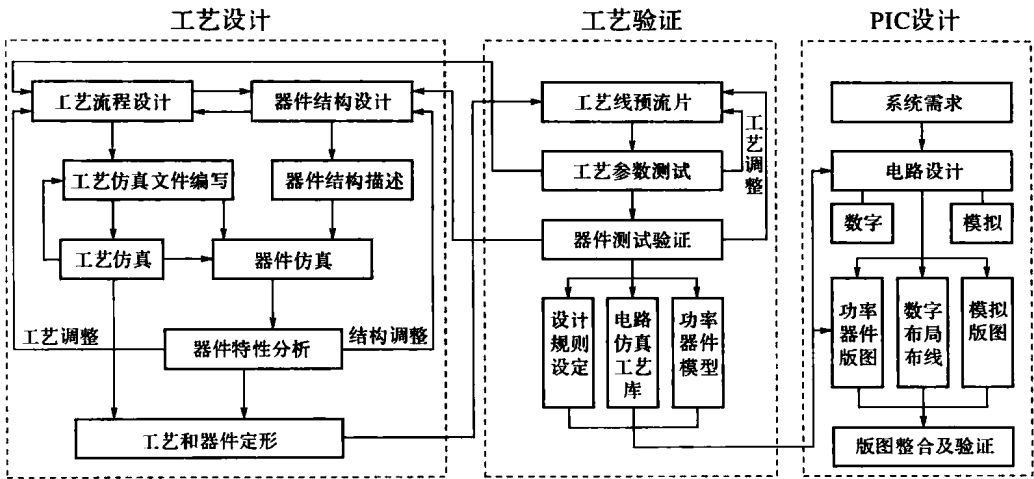


图 1.4 PIC 的设计流程

在工艺稳定的情况下,为了缩短研发周期,一般将工艺和电路设计分开。在稳定的BCD工艺基础上建立一系列器件(包括功率器件)的模型库、低压数/模控制电路单元、高压功率器件IP核等,电路设计人员以此为基础进行系统的PIC设计。基于标准模型库的PIC设计流程如图1.5所示。依照此流程图,建立适合PIC的仿真环境,并进行相应的电路和版图实现。

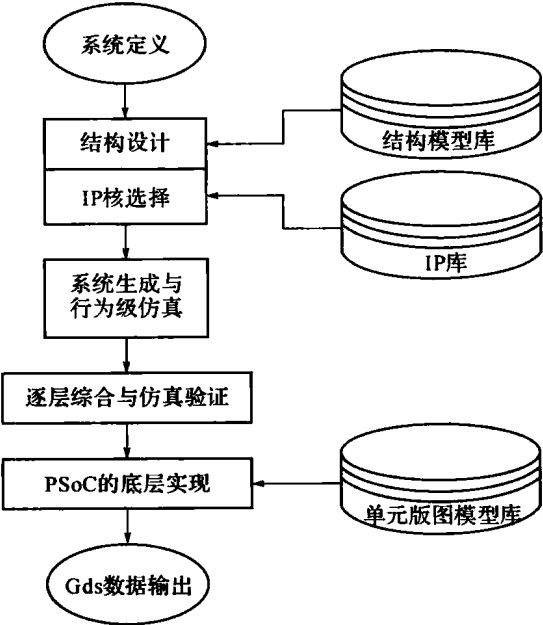


图 1.5 基于标准模型库的 PIC 设计流程^[14]