

功率集成电路

陈景银 叶润涛 编著

(超大面积集成电路)

浙江大学出版社

功率集成电路

(超大面积集成电路)

陈景银 叶润涛 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

功率集成电路(亦称超大面积集成电路)完全可与大规模、超大规模集成电路相比拟,亦是半导体集成电路发展的技术焦点之一。它将是一种模拟集成技术、数字集成技术和功率处理技术集成于一体的电路,由此将会引起一场新的电子学革命。

本书全面、系统、深入地讨论、分析它的基本工作原理,并初步涉及其热设计问题。全书共10章,主要介绍3部分内容:第1部分着重介绍功率集成电路中元器件的结构、特性、等效电路与常用图形;第2部分详细介绍了各种功率集成电路的基本工作原理、具体电路,以及与之相关的工艺、设计的综合分析,并列举其应用实例;第3部分初步介绍功率集成电路的热设计(热对称设计)问题。

本书可作为高等院校半导体专业、微电子专业、电子类专业以及无线电、电子应用技术、科学仪器等专业的教科书和教学参考书;亦可作为从事功率集成电路研究、开发、生产和应用的科技人员、专业教师和研究生的技术参考书。

功 率 集 成 电 路

(超大面积集成电路)

陈景银 叶润涛 编著

责任编辑 陈子饶

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社电脑排版中心排版

德清第二印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16开 19.75印张 506千字

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-308-01510-6/TN·032 定价:11.50元

前 言

功率集成电路(亦称超大面积集成电路)诞生于 60 年代末,随着数字集成技术的发展而问世,至 80 年代,它已成为与大规模、超大规模(甚大规模)集成电路(LSI、VLSI、ULSI)并行发展的一种极其重要的集成电路。最近几年,由于微电子技术与功率电子技术的紧密结合,功率集成电路的发展异常迅速,出现了一种模拟集成技术、数字集成技术和功率处理技术集成于一体的智能化电路,即智能化功率集成电路。有人预言,由此将引发出一场新的电子学革命。这场新的电子学革命将是微电子学革命的继续和发展,其影响不会低于微电子学。这样,功率集成电路的开发与应用将成为半导体集成技术发展的又一里程碑。

功率集成电路之所以重要是因为无论何种电子系统最终都离不开将所处理的信息功率化,因此,世界各国半导体公司(厂家)的注意力逐渐从 LSI、VLSI 转移到功率集成电路,相继开发出品种繁多的应用于国防、国民经济、人民生活等各个领域的新产品,取得显著的经济与社会效益。这方面我国起步较晚,而与先进国家相比,还有一段距离,但在功率集成电路的开发与应用中仍取得了很大进展。

在教学、科研中,我们有幸涉足这一领域,并在工作过程中感到:从某种意义上来说,功率集成电路难于 LSI、VLSI。因为它不仅需要 LSI、VLSI 的一整套制造工艺,而且还须着重考虑散热等诸多问题,即须从电路、版图、工艺、封装等方面的综合考虑。为此,设想写一本能反映功率集成电路整个概貌的书,其目的在于抛砖引玉,从中引起各方人士兴趣、参与,使我国功率集成电路的发展更上一层楼。具体地说,希望能给从事功率集成电路研究、教学、生产、应用人员以及在校学生有所帮助,并能为促进我国功率集成电路的发展尽一点菲薄之力。经过几年艰辛劳动,今天终于变成现实,取名为《功率集成电路》的专著奉献给广大读者。

本书侧重介绍各类别功率集成电路的基本工作原理、具体电路、以及与之相关的工艺、设计的综合分析。力求内容丰富、尽可能接近实际、文字简练,便于读者阅读参考,亦可作为有关教材。

参加本书编写工作的还有:赵家玲、陈筠、刘志弘、傅玉秀,并为本书提供过资料及其热情而有益帮助的有关人员,谨此一并表示衷心感谢。

由于水平有限,书中错漏之处难免,请读者批评指正。

作 者

1994 年 4 月于杭州

目 录

绪论	1
第1章 结构和元件	6
§ 1.1 PIC 中的电隔离技术	6
1.1.1 结隔离技术	6
1.1.2 介质隔离技术	7
1.1.3 电荷控制隔离技术	7
1.1.4 微细晶体群隔离技术	8
1.1.5 腐蚀——填充隔离技术	8
§ 1.2 PIC 中的双极晶体管	9
1.2.1 集成 npn 晶体管	10
1.2.2 集成 pnp 晶体管	17
§ 1.3 PIC 中的二极管	25
1.3.1 普通二极管	25
1.3.2 集成稳压(齐纳)管	25
§ 1.4 PIC 中的结型场效应晶体管	26
1.4.1 JFET 的伏安特性	26
1.4.2 集成 JFET 的小信号等效电路	28
1.4.3 集成 JFET 的设计	28
1.4.4 集成 JFET 常用几何图形	29
§ 1.5 PIC 中的无源元件	29
1.5.1 电阻器	30
1.5.2 电容器	38
第2章 双极型功率集成电路的电路基础	41
§ 2.1 npn 差分放大器	41
2.1.1 npn 差分放大器的基本工作原理	41
2.1.2 npn 差分放大器的电压增益	42
2.1.3 npn 差分放大器的共模抑制比	44
2.1.4 npn 差分放大器的失调和漂移	45
2.1.5 npn 差分放大器的直流传输特性及跨导	49
§ 2.2 pnp 差分放大器	51
2.2.1 pnp 差分放大器的电路形式	51
2.2.2 pnp 差分放大器的改进	52
§ 2.3 恒流源及其有源负载	53
2.3.1 恒流源的电路形式	53

2.3.2	电源电压和环境温度变化时恒流源的稳定性	58
2.3.3	恒流源的输出电阻	60
2.3.4	有源负载	62
§ 2.4	功率放大器	63
2.4.1	单管功率放大器	64
2.4.2	推挽功率放大器	66
第3章 双极型线性集成稳压器		73
§ 3.1	双极型线性集成稳压器的基本工作原理及其结构	73
§ 3.2	双极型线性集成稳压器的电参数	74
3.2.1	集成稳压器性能与动态参数	75
3.2.2	集成稳压器中的最主要参数的分析与计算	77
§ 3.3	基准电压源	81
3.3.1	硅稳压管基准电压源	81
3.3.2	双极型晶体管带隙基准电压源	84
§ 3.4	启动电路	88
3.4.1	二极管启动电路	89
3.4.2	晶体管启动电路	90
§ 3.5	保护电路	90
3.5.1	过流和短路保护	90
3.5.2	热保护	92
3.5.3	调整管安全工作区保护	93
§ 3.6	双极型线性集成稳压器的典型电路分析	95
3.6.1	三端固定式集成稳压器	95
3.6.2	三端可调式集成稳压器	100
3.6.3	高精度可调式集成稳压器	104
§ 3.7	线性集成稳压器的效率	107
第4章 双极型开关集成稳压器与集成控制器		108
§ 4.1	开关型稳压器的基本工作原理	109
4.1.1	输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的关系	110
4.1.2	滤波器的计算	111
4.1.3	开关稳压器工作频率 f 的计算	113
§ 4.2	斜坡发生器	115
4.2.1	恒流源式的不对称斜坡发生器	115
4.2.2	串联式的不对称斜坡发生器	116
4.2.3	并联式的不对称斜坡发生器	118
§ 4.3	电压/脉宽变换器和死区时间控制比较器	119
4.3.1	U/W 变换器	119
4.3.2	死区时间控制比较器	121

4.3.3	U/W 变换和死区时间控制比较器	121
§ 4.4	双极型数字电路	122
4.4.1	分相器	122
4.4.2	锁存器	123
4.4.3	I^2L 电路	124
§ 4.5	保护电路	126
4.5.1	过流保护	127
4.5.2	热保护	129
4.5.3	过、欠压保护	130
§ 4.6	双端输出式集成脉宽控制器	131
4.6.1	CW494 的基本工作原理	131
4.6.2	CW494 电路分析与计算	132
4.6.2	CW494 的应用	135
§ 4.7	单端输出式集成脉宽控制器	135
4.7.1	CW1842/3842 的基本工作原理	137
4.7.2	CW1842/3842 电路分析与计算	138
4.7.3	CW1842/3842 的应用	140
§ 4.8	开关集成稳压器	140
4.8.1	CW296 的基本工作原理	141
4.8.2	CW296 的应用	143
第 5 章	双极型功率集成运算放大器	145
§ 5.1	功率集成运算放大器的一般概念	145
5.1.1	功率集成运算放大器的组成与要求	145
5.1.2	功率集成运算放大器的电参数	146
§ 5.2	功率集成运算放大器的输入放大级	148
5.2.1	达林顿差分放大器	148
5.2.2	互补差分放大器	149
5.2.3	超 β 管差分放大器	149
5.2.4	场效应晶体管差分放大器	149
§ 5.3	功率集成运算放大器的频率特性和频率补偿	150
5.3.1	单级放大器的频率特性	150
5.3.2	多级放大器的频率特性	152
5.3.3	多级放大器闭环工作时的稳定性	153
5.3.4	集成运算放大器的相位补偿技术	155
§ 5.4	功率集成运算放大器的大信号瞬态特性	159
5.4.1	大信号阶跃响应	160
5.4.2	压摆率(或转换速度) SR	163
§ 5.5	保护电路	166
5.5.1	热保护	166

5.5.2	过流和短路保护	167
5.5.3	输入级的保护	167
5.5.4	中间级的保护	168
§ 5.6	功率集成运算放大器的典型电路分析	168
5.6.1	$\mu\text{A}791$ 功率集成运算放大器	168
5.6.2	F3094 跨导型功率集成运算放大器	174
第 6 章 双极型集成音频功率放大器 177		
§ 6.1	集成音频功率放大器的一般概念	177
6.1.1	集成音频功率放大器的基本要求	177
6.1.2	集成音频功率放大器的组成	180
6.1.3	集成音频功率放大器的主要电参数	180
§ 6.2	噪声的抑制	181
6.2.1	噪声的基本概念	181
6.2.2	电路内部人为造成干扰的抑制	186
6.2.3	电路内部噪声的抑制	186
§ 6.3	高保真度(失真度)	190
6.3.1	频率响应(线性失真)	191
6.3.2	非线性畸变(非线性失真)	194
§ 6.4	保护电路	199
6.4.1	电源电压 U_{cc} 过冲保护	200
6.4.2	二次击穿与电源极性反接保护	200
6.4.3	过流保护	200
6.4.4	过热保护	201
§ 6.5	集成音频功率放大器的典型电路分析	203
6.5.1	DG810 单声道集成音频功率放大器	2-3
6.5.2	$\mu\text{pc}1185\text{H}$ 双声道集成音频功率放大器	208
第 7 章 工业用的功率集成电路 213		
§ 7.1	伺服电动机简介	213
7.1.1	交直流伺服电动机	213
7.1.2	步进电动机	215
7.1.3	无刷直流电动机	216
§ 7.2	驱动与控制电动机的基本工作原理	217
7.2.1	驱动与控制伺服电动机的基本工作原理	217
7.2.2	驱动与控制步进电动机的基本工作原理	219
§ 7.3	功率开关放大器	221
7.3.1	单管功率开关放大器	221
7.3.2	半桥功率开关放大器	222
7.3.3	全桥功率开关放大器	223

§ 7.4 功率开关放大器的静态分析	227
7.4.1 半桥功率开关放大器	227
7.4.2 全桥功率开关放大器	231
§ 7.5 保护电路	232
7.5.1 电压保护	232
7.5.2 过流与短路保护	234
7.5.3 热保护	235
§ 7.6 L293 四通道半桥式驱动器集成电路简介	236
7.6.1 L293 四通道半桥式集成驱动器的基本工作原理	236
7.6.2 L293 的基本应用	236
第 8 章 MOS 功率集成电路	239
§ 8.1 模拟集成电路中的 MOSFET	239
8.1.1 MOSFET 的小信号特性	239
8.1.2 MOSFET 模型	243
8.1.3 MOSFET 的二级效应	244
8.1.4 集成小功率 MOSFET 的结构与几何图形	245
8.1.5 功率 MOSFET	246
§ 8.2 MOSIC 中的寄生效应	250
8.2.1 场区寄生 MOSFET	250
8.2.2 寄生双极型晶体管	251
8.2.3 寄生 pnpn 效应	251
8.2.4 寄生电容	252
§ 8.3 有源电阻和恒流源电路	252
8.3.1 有源电阻	252
8.3.2 恒流源电路	254
§ 8.4 MOS 单级放大器	258
8.4.1 NMOS 单级放大器	258
8.4.2 CMOS 单级放大器	259
§ 8.5 MOS 差分放大器	260
8.5.1 MOS 差分对管的主要性能	261
8.5.2 CMOS 差分放大器	262
8.5.3 NMOS 差分放大器	265
§ 8.6 MOS 基准电压源	265
8.6.1 NMOS 集成基准电压源	265
8.6.2 CMOS 集成带隙基准电压源	268
§ 8.7 保护与切断电路	271
8.7.1 过流保护	271
8.7.2 切断电路	272
§ 8.8 CMOS 线性集成稳压器	273

8.8.1	CW7663 和 CW7664 线性集成稳压器电路原理简介	275
8.8.2	CW7663 和 CW7664 的基本应用	275
§ 8.9	CMOS 功率集成运算放大器	276
8.9.1	CMOS 功率集成运放输出级电路之一	276
8.9.2	CMOS 功率集成运放输出级电路之二	277
第 9 章	BiMOS 和高压集成电路	280
§ 9.1	BiMOS 技术简介	280
§ 9.2	高压晶体管	282
9.2.1	双极型高压晶体管	282
9.2.2	MOS 高压晶体管	285
§ 9.3	CMOS 高压集成电路	286
9.3.1	200V CMOS 高压集成电路	286
9.3.2	500V CMOS 高压集成电路	287
§ 9.4	双极型高压集成电路	287
9.4.1	高压集成电路的电路考虑	287
9.4.2	双极型高压集成电路举例	288
§ 9.5	BiMOS 功率/高压集成电路	289
第 10 章	功率集成电路热设计的考虑	292
§ 10.1	功率集成电路版图设计	292
10.1.1	芯片上的温度分布	292
10.1.2	热耦合系数 α_T	293
§ 10.2	高温对 PIC 可靠性的影响	296
10.2.1	高温对互连布线的影响	296
10.2.2	高温对某些表面效应的影响	297
10.2.3	其它影响	297
§ 10.3	PIC 封装的热设计初步	298
10.3.1	热传递方式	298
10.3.2	热阻分析与估算	299
10.3.3	散热结构设计初步	302
参考文献		304

绪 论

一、功率集成电路发展概况

1948年发明了晶体管,它替代电子管为基本有源器件的电子设备,在体积、重量、功耗、可靠性、寿命等诸方面都大大前进了一步。1952年,为进一步缩减电子设备的体积与重量,以便大幅度地减少焊点数目,提出了集成电路的设想。经过几年努力,于1958年成功地用单根硅棒制成一个相移振荡器。这是世界上第一块集成电路,并成为微电子技术发展的里程碑。从此,打破了半个世纪以来电子线路的旧概念,开创了集成电子学的新时代。在此基础上,经10年左右的理论发展与工艺实践,在1967年4月,人们在一块米粒般大小的硅单晶片上成功地集成包含1千多个晶体管的大规模集成电路(LSI),使得电子设备的性能指标全面地被刷新,并由此促进了其它各个科学技术分支的发展。1977年4月,美国人在一块面积为30平方毫米的硅单晶片上集成了13万多个晶体管的超大规模集成电路(VLSI)。同年,日本人在一块面积为 6.1×5.8 平方毫米的硅单晶片上研制出包含15万6千多个晶体管的超大规模集成电路。目前,它已进入甚大规模集成电路(ULSI)。

虽然人们早已认识到模拟集成电路的重要使用价值,但在60年代前半期,由于当时尚未建立起适应模拟集成电路特点的一整套工艺基础和线路设计思想,故未能正式登上集成技术的舞台,其品种只限于早期的集成运算放大器和某些专为宇航与军用电子装置配套的线性放大器。60年代末,大规模集成电路研制成功,实现了集成电路的技术突破;模拟集成电路完整的设计思想和基本单元电路的确立,使得模拟集成电路开始迅速涌入市场,从而成为与数字集成电路并行发展的另一个集成电路分支。

1967年诞生的世界上第一块功率集成电路(Power Integrated Circuits 缩写为PIC),其输出功率为1~2W,它们是音频集成功率放大器和集成稳压器。从此,开辟了功率集成电子学的新领域。功率集成电路是根植于上述集成技术、并继承和融合了上述集成电路和分立大功率晶体管的设计技巧和制作技术基础上发展起来的。70年代后,随着大规模向超大规模集成电路发展过程中,使得半导体集成技术日臻完善,PIC才正式登上实用舞台,输出功率达数拾瓦的集成音频功率放大器开始上市。这样,在电子设备小型化、集成化的征途上又形成了高难制作的模拟集成电路门类。

PIC之所以重要是因为无论何种电子系统最终都离不开将所处理的信息功率化,同时,与

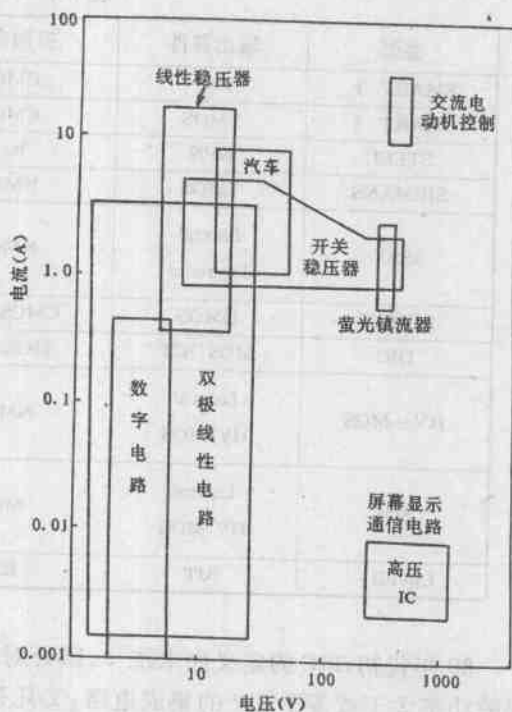


图 0.1 PIC 部分应用示意图

分立元件的线路相比, PIC 具有性能稳定、尺寸小、价格低等优点, 因而广泛应用于各种家用电器、汽车、飞机、导弹、卫星通讯、雷达、计算机、屏幕显示、电动机驱动与控制等各种功率控制场合。例如, 汽车和飞机上原先采用分立线路时, 仅其联线就有几百磅重, 而改用 PIC 后其联线重只剩下几十磅, 像这样例子是枚不胜数。由此可见, 它不仅成本低, 而且又大大缩减了体积和重量。因此, 功率集成电路具有巨大的应用市场, 其部分应用可用图 0.1 来说明。

众所周知, 双极型晶体管是电流控制型器件, 其电流增益小, 当传送大电流时需要大的基极电流, 相应地须采用复杂的驱动电路, 特别是在感性负载情况下, 还需要量大而又昂贵的吸收回路。因此, 双极功率器件不易与逻辑控制电路同时加以集成。但是, 70 年代初期问世的功率 MOS 器件给功率集成电子学开辟了新路。因为功率 MOS 器件是一种电压控制型器件, 具有输入阻抗高、电流转换所需控制功率小等优点, 所以, 它的驱动电路简单, 易于集成, 使 PIC 取得长足进展。特别是进入 70 年代末期, 人们将超大规模集成电路一整套成熟的制作技术用于功率电子器件的制作中, 使得功率电子器件技术有了一个飞速发展, 出现了一大批适合 PIC 的功率半导体器件, 如 GTR(功率晶体管)、VDMOS(纵向双扩散 MOSFET)、IGBT 或 IGT(绝缘栅双极晶体管)、MCT(MOS 控制的晶闸管)、LDMOS(横向双扩散 MOSFET)等。就这类功率半导体器件而言, 它们都是采用类似集成电路的微细加工技术, 将一些承受电流能力小的基本单元集成在一起构成的, 不过这些基本单元之间只是简单的并联关系, 集成的结果将是一个器件而不是一个电路。因此, 人们将这类功率器件称为功率集成器件(PID)。

正由于 PIC 具有巨大的应用市场, 世界各国的主要半导体公司(美国的 Motorola、IR、GE 等; 日本的 NEC、TOSHIBA 等; 意大利的 SGS、西德的 Siemens 都致力于 PIC 的开发与应用, 它们生产的 PIC 的器件技术如表 0.1 所示。

表 0.1 PIC 的器件技术

类型	输出器件	控制电路	隔离	最大电压	最大电流
SMART-I	PNP	CMOS	J,I	60~400V	>5A
SMART-II	TMOS	CMOS	J,I	60~400V	>5A
STEEL	NPN	BJT	J,I	<60V	>5A
SIEMANS	TMOS	NMOS	P 阱	>400V	>5A
SSSX	Lateral Thyristor	NMOS	P 阱	>400V	>5A
BIDFET	DMOS	CMOS, BJT	J,I	60~400V	<0.5A
DIC	MOS/BJT	MOS, BJT	D,I	>400V	0.5~5A
HV-MOS	Lateral HV-MOS	NMOS	J,I	>400V	<0.5A
SOS	Lateral HV-MOS	MOS	D,I	>400V	<0.5A
LINER-	BJT	BJT	J,I	60~400V	0.5~5A

80 年代初, PIC 的定义尚未统一。国外对此解说纷纭, 但可概括为如下三种: ①凡是电路的耗散功率大于或等于 5W 的集成电路; ②凡是电路的输出电流大于或等于 0.5A 的集成电路; ③应以集成电路中功率晶体管在整个芯片中所占据的管芯几何尺寸作为衡量标准, 如 40% 以上。国内对此解说比较单一, 凡是单块集成电路正常工作时电路本身功耗超过 1W 的, 都称为

功率集成电路。

自从世界上第一块 PIC 问世以来, PIC 的输出功率逐年在增大, 相应的芯片面积亦逐年在加大。从 80 年代起, 它向集成功率系统 (IPS) 亦就是向智能化方向发展, 如图 0.2 所示。特别是近几年来, 人们运用微电子技术和功率电子技术将模拟或数字的传感/控制/保护功能与功率器件集成在一起, 成功地开发出智能 (初级阶段) 功率/高压集成电路, 给以往的 PIC 增添了新的活力和内容。这样, 功率集成电路将是一种模拟集成技术、数字集成技术和功率处理技术集成于一体的电路, 人们预期它的出现将引起一场新的电子学革命。这场新的电子学革命将是微电子学革命的继续和发展, 其影响可能不会低于微电子学。

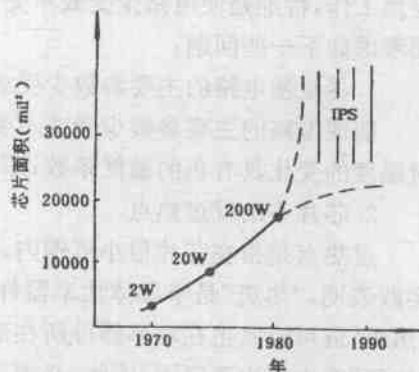


图 0.2 PIC 的发展趋势

二、PIC 分类

(一) 按工艺结构分类

1. 半导体功率集成电路 (单片式功率集成电路)

主要着眼于中小功率应用, 其产品水平大致为: 耐压 50~1200V, 输出电流 1~100A, 功率可达数千瓦, HVIC 最高研究水平为 1200V/20A。

按组成电路的有源器件不同, 单片式亦可分为全双极型、全 MOS、兼有双极型与 MOS 晶体管等数种。

按输出功率器件的结构分, 单片式可分为垂直和水平两种。

按电路的耐压, 它可分为高压和低压两种。

2. 混合功率集成电路

所谓混合功率集成电路就是整个电路中各种不同元器件, 分别采用不同的工艺手段制造而成。这种不同的工艺手段总称为混合集成工艺, 它包括厚、薄膜工艺和半导体集成工艺。

(二) 按功能和用途分类

功率集成电路的主要类别列于表 0.2。

实践表明, 单片与混合功率集成电路各有优缺点, 应该相互借鉴、取长补短、互相渗透、共同发展。但是, 本书只限于讨论单片 (半导体) 功率集成电路, 而不涉及混合式功率集成电路。

三、功率集成电路面临的主要问题

PIC 除了数字、模拟集成电路和功率晶体管相同的共性外, 还呈现出它本身固有的特点。

表 0.2 功率集成电路分类

功率集成电路									
各种集成功率系统	交流电动机控制电路	直流电动机驱动电路	高压功率集成电路	各种功率开关电路	集成射频功率发射电路	集成功率变换电路	集成伺服放大器	集成功率运算放大器	集成稳流器
集成线性稳压器	集成开关稳压器	各种集成低频功率放大器	集成音频功率放大器						

(一) 电路设计问题

PIC的最主要特征是:其电路内部有较大的耗散功率。因此,PIC的设计主要应围绕电路的发热问题,即在达到所要求的输出功率前提下,如何尽可能地降低电路内部的功耗,使电路稳定地工作,特别是使电路少受或不受外界某些应用条件或环境因素的影响。要做到这一点,必须考虑如下一些问题:

1. 尽量使电路的主要参数少受或不受温度的影响

要使电路的主要参数少受或不受温度的影响,就必须使电路在无信号输入时,其静态电流对温度的变化具有负的温度系数,即温度升高,其静态电流减小。否则,将使电路失效或烧毁。

2. 芯片不出现过热点

过热点是指在芯片很小范围内,温度远远超过电路的极限工作温度($175\sim 200^{\circ}\text{C}$)的热斑。实践表明,“热斑”是半导体功率器件可靠性的宿敌,因此必须防止“热斑”的产生。在PIC中,“热斑”最可能发生在功率器件所在部位。因为功率器件的各基本单元所承受电流的不均匀是“热斑”产生的主要原因。因此,必须采取措施使各基本单元所承受电流一样(均匀),以防止“热斑”的产生。

3. 热稳定性问题

PIC的热稳定性问题不仅牵涉到电路中功率器件自身的结构设计,还涉及功率器件和大功率电阻在芯片中的位置布局 and 热耦合等问题。

4. 电源抑制比高

在实际应用中,电源电压总会出现不同程度的变化,PIC应仍能稳定地工作。为此应附设某些必要的稳定电路即提高电源抑制比,以提高电路稳定度。

5. 消除寄生振荡

为充分发挥PIC的功能,一般将电路的增益设计得较高,因而,寄生振荡往往也伴随着出现。所以,必须采取措施以消除杂散的交流耦合,从而消除寄生振荡。

综上所述,应采取各种措施,使PIC能在不同工作条件下仍能可靠、稳定地工作。

(二)功率器件(npn、pnp、MOS)的制作

功率器件不仅决定于PIC的输出功率容量而且还关系到整个PIC的工作稳定性及其效率。实践表明,在PIC中,它是最难制作的一种器件。由于集成电路的局限性,其电压、电流容量都比不上分立功率器件。为了改善功率器件的电性能,除考虑各种隔离技术外,还开发了各种器件技术,如电场缓和技術、互补化技术和BiMOS复合技术等。将它们引入到PIC中,以提高PIC的功率处理能力。

(三)芯片面积与成本的折衷考虑

扩大电路的输出电流或提高电路的工作电压都可增大电路的功率容量,从而导致电路芯片面积的增大。实践表明,电路的合格率与芯片面积不是一种简单的反比关系,而是具有某一函数成反比的关系。亦就是说,随着电路芯片面积的加大,其合格率将是成倍地下降,相应的成本亦是急剧地上升。还需指出:扩大芯片面积以求增大电路的输出电流时,只有当电流分布均匀为前提,否则就毫无意义。

究竟采用何种结构有利要视具体情况而定。因此,对PIC来说,必须对其耐压、输出电流和芯片面积三者之间予以很好权衡,即对芯片面积和制造成本求得最佳折衷。

(四)保护措施

对于PIC,除了保证正常稳定工作外,还必须考虑到工作时可能出现的瞬时过载情况。例如,输出过载时的电流将超过正常值的数倍,这时如果没有保护装置,那么电路可能被烧毁或

者性能恶化。又如,PIC 在运行时,内部产生的热量将对器件的性能产生严重的影响。众所周知,器件的失效率是结温的指数函数,寿命和工作温度的关系是温度每升高 10℃,寿命大约以 2 的因子下降。因此,为防止器件高温失效,必须有过热保护。由上可知,为防止种种瞬时情况的发生,必须设置过热、过流和过压等保护电路。

(五)管壳封装问题

PIC 封装和管壳的重要性并不亚于芯片的设计制造。因为 PIC 的热量散发和电路工作的热稳定性是与其管壳封装休戚相关的。

目前,PIC 的管壳封装形式有多种,如双列直插式、单列双排直插式(多瓦数)和功率管封装等。其中,带有散热器的双列直插式管壳的热阻最小可达 5℃/W。

综上所述,PIC 还比较年青,有待进一步完善和提高,但它完全可与 LSI、VLSI 相比拟。从某种意义上来说,PIC 的难度胜过 LSI、VLSI,因此,它是半导体集成电路发展的技术焦点之一。

1980 年前,无疑是 LSI、VLSI 的天下,但 PIC 领域的崛起无疑亦是一件值得庆幸的事。从 80 年代起,由于 PIC 具有巨大的应用市场,世界上有名的科研单位和厂家把目标瞄准了 PIC,并投入了大量人力、物力,其发展相当迅速,品种越来越多,功率亦越来越大,芯片面积随之亦越来越大,目前已成为与 LSI、VLSI 并行发展的一种极其重要的集成电路。对应于芯片面积而言,PIC 又可称为大面积、超大面积集成电路(LAI、VLA1)。近年来,由于微电子技术与功率电子技术紧密结合,直接导致智能(初级阶段)功率/高压集成电路的出现(图 0.3),给已往的 PIC 增添了新的活力和内容。这样,功率集成电路的开发和应用将成为集成技术发展的又一里程碑。

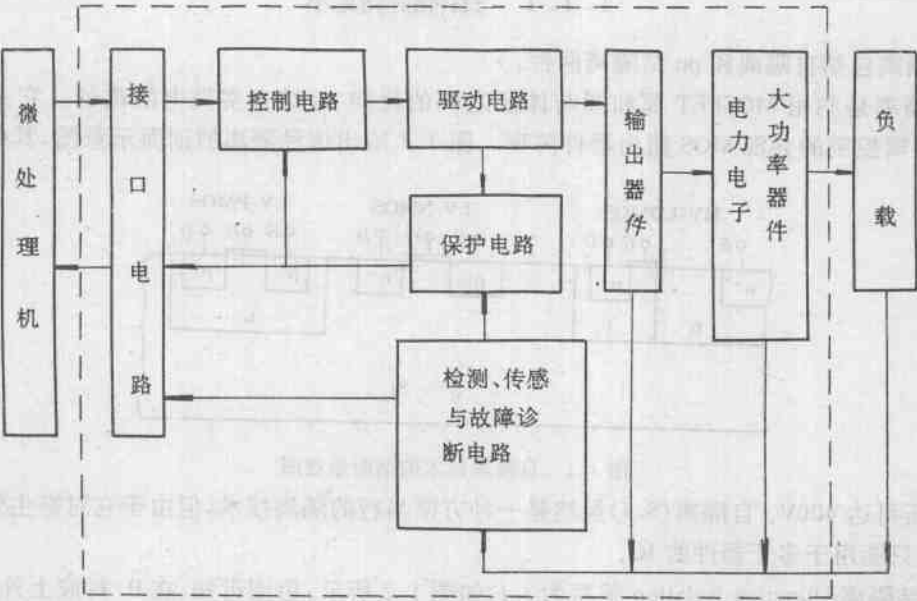


图 0.3 单片式智能化功率/高压集成电路结构框图

第 1 章 结构和元件

由于 PIC 种类繁多,不仅不同的 PIC 所需电隔离技术(工艺流程)有所不同,而且相同的 PIC 所包含的元器件亦有所不同。因此,若将所有 PIC 的结构和元件都在本章加以讨论,就显得内容繁杂而篇幅大。为避免之,将有些内容归入相适章节,使之有机结合,更有利于讲清问题。例如:PIC 中的 MOSFET 将在第 8 章“CMOSPIC”中叙述;又如 BiMOS 复合功率器件将在第 9 章“BiMOS 和高压 IC”中叙述,等等。

§ 1.1 PIC 中的电隔离技术

随着 PIC 中功率器件的高压、大电流化,它所产生的电压、电流噪声也不断增大。这些噪声集中在同一芯片内将会导致控制电路的误动作。因此,PIC 中功率器件之间、功率器件与控制电路之间的电隔离显得尤为重要。不同的 PIC,其电隔离技术亦有所不同。对某种 PIC 而言,当电隔离技术确定后,其整个工艺流程亦随之而确定,因此只要弄懂各种电隔离技术,就可大致知道其制作过程。与普通 IC 相比,PIC 中的噪声大、电场区宽度大,为此而开发了如下几种所特有的电隔离技术。

1.1.1 结隔离技术

结隔离包括自隔离和 pn 结隔离两种。

自隔离是利用 MOSFET 源和漏与体区之间的反向 pn 结来实现电隔离的。它主要用于 CMOS 逻辑控制的共源 MOS 输出器件阵列。图 1.1 给出该种隔离的剖面示意图,其中输出器

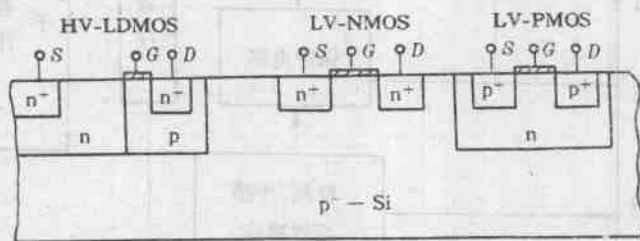


图 1.1 自隔离技术的剖面示意图

件的耐压可达 400V。自隔离(S.I)虽然是一种方便易行的隔离技术,但由于它对寄生效应的敏感性,故只能用于多子器件的 IC。

pn 结隔离(Junction Isolation 缩写为 J.I)如图 1.2 所示。由图可知,在 P⁻衬底上外延一层 n 型外延层,再扩 P⁺隔离墙,从而实现其电隔离,其中 n⁺ 隐埋层是用来减小器件的串联电阻和增大横向 pnp 晶体管的电流增益。该种隔离技术的隔离电压一般为 60V,其极限值为 200V。随着功率器件耐压的提高,外延层厚度相适增厚,要扩通 20μm 以上所需的时间较长。为缩短时间,开发了对通隔离扩散,如图 1.3 所示,它的电压容量可达 200~400V。值得注意,为减小芯片面积,图 1.2 亦可实现对通隔离,但需增加工序。

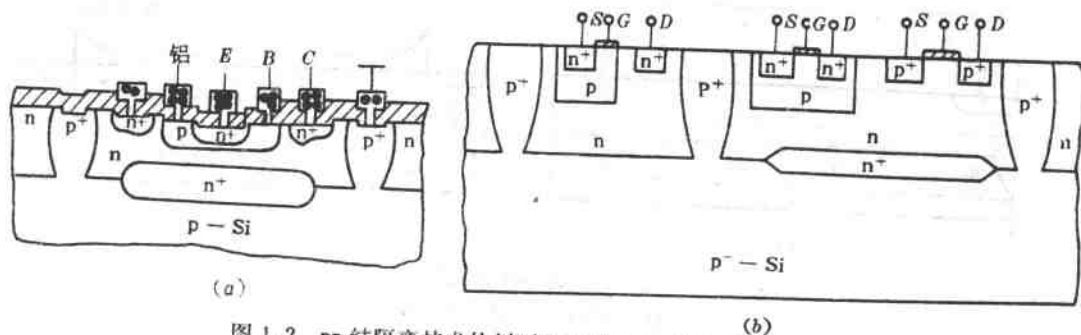


图 1.2 pn 结隔离技术的剖面示意图 (a) 双极型; (b) MOS。

由自隔离和 pn 结隔离技术制作的 PIC, 当温度升高时, pn 结的反向漏电流增大, 从而导致器件之间发生相互影响, 并且在某些情况下将发生闩锁现象。由此可见, 结隔离的性能较差, 但工艺较简单。

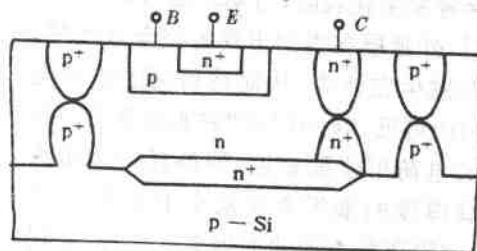


图 1.3 对通隔离技术的剖面示意图

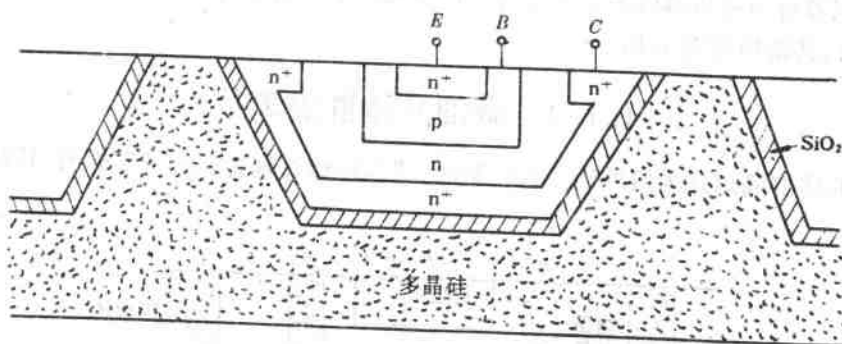


图 1.4 介质隔离技术的剖面示意图

1.1.2 介质隔离技术

介质隔离 (Dielectrical Isolation, 缩写 D.I) 如图 1.4 所示。由图可知, 采用介质隔离既可减小寄生电容, 又可避免隔离扩散, 以减少辐射对隔离系统的影响, 所以它是一种性能优异的隔离技术, 其耐压高达 1000V 以上。此外, 隔离区占有面积比 J.1 小, 如 J.1 的隔离区宽度 D 与耐压间关系为 $D \approx 0.1 (BV)^{2/3}$, 若 $BV = 400V$ 时, J.1 的 D 为 $110\mu m$, 而介质隔离的 D 通常只有 $10\mu m$ 。但是, 介质隔离工艺复杂, 而且 SiO_2 导热性差, 因此, 仅当电路要求寄生电容小或抗辐射性能强或耐压高时, 才会采用该项技术。

1.1.3 电荷控制隔离技术

电荷控制隔离技术实际上是 pn 结隔离加上立式夫 (Resurf) 原理。Resurf 原理如图 1.5 所示。当外延层 n 的电荷单位面密度为 $Q_{total} = \int N(x) dx > 1.2 \times 10^{12} cm^{-2}$ 时, 外延层部分被耗尽,