

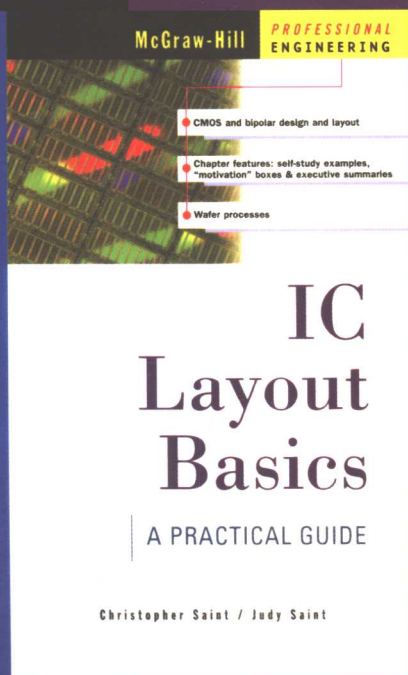
Mc
Graw
Hill Education

国外大学优秀教材——微电子类系列（翻译版）

集成电路版图基础 ——实用指南

(美) Christopher Saint, Judy Saint 著

李伟华 孙伟锋 译



清华大学出版社

国外大学优秀教材 —— 微电子类系列 (翻译版)

集成电路版图基础 ——实用指南

(美) Christopher Saint, Judy Saint 著

李伟华 孙伟锋 译

清华大学出版社

北京

Christopher Saint and Judy Saint
IC Layout Basics: A Practical Guide
EISBN: 0-07-138625-4

Copyright © 2002 by Christopher Saint and Judy Saint.
Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved.
No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a
database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by
Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education (Asia)
Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong
Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of
the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出
版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)
独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版
者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2004-1909

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

集成电路版图基础: 实用指南/(美)塞因特(Saint, C.), (美)塞因特(Saint, J.)著;
李伟华, 孙伟锋译. —北京: 清华大学出版社, 2006. 10
(国外大学优秀教材——微电子类系列(翻译版))
书名原文: IC Layout Basics: A Practical Guide
ISBN 7-302-13371-9

I. 集… II. ①塞… ②塞… ③李… ④孙… III. 集成电路—设计—
高等学校—教材 IV. TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 077345 号

出版者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编: 100084
社总机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 田志明

印刷者: 北京鑫丰华彩印有限公司

装订者: 三河市春园印刷有限公司

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 152×228 印张: 17 字数: 284 千字

版 次: 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13371-9/TN·341

印 数: 1~3000

定 价: 35.00 元

作 者 序

集成电路(IC)版图设计是一个非常新的领域,虽然掩模设计已经有 30 多年的历史,但直到最近才成为一种职业。人们希望从事这个职业,包括大学毕业生和一些希望转行的人们,他们需要了解一些非常复杂的原理。同样地,一些富有经验的版图工程师也发现当代 IC 工艺的复杂性要求他们进一步了解这些基础知识。

包含版图工程师需要了解的所有信息的资料现在找起来已经是非常困难,在关于其他方面工作的一些讨论中略微地介绍了一些关于版图工程师应该了解的基础知识,但涵盖了相关的方方面面的材料尚未发现。

在本书中探讨了相关的内容。我们希望为新的版图设计师们提供他们应了解的所有理论和设计基础知识,使他们成为设计能手,为他们的职业生涯提供参考。我们也希望给那些富有经验的版图设计从业者一个知识的扩展,增加对当今器件与技术的了解。

这本书从基本半导体理论开始介绍,进而阐述了在现代半导体技术中基本器件的发展。在较深的程度上为读者提供了有价值的设计方程以及设计 IC 版图的方法与技术,这些知识将使从事该职业的人们终生受益。

本书的内容以幽默、图示和循序渐进的方式表述^①,在书中关键之处插入了轶事和佐证加以调侃,但丝毫不会影响本书作为高技术资料的水平。

本书内容完整,可读性强,欢迎大家阅读此书:《集成电路版图基础——实用指南》。

Christopher Saint

Judy Saint

^① 这可能是第一本可以躺在床上看的技术书。

译者序

集成电路版图是电路系统与集成电路工艺之间的中间环节,是一个必不可少的重要环节。通过集成电路版图设计,可以将立体的电路系统变为一个二维的平面图形,再经过工艺加工还原为基于硅材料的立体结构。因此,版图设计是一个上承电路系统,下接集成电路芯片制造的中间桥梁,其重要性可见一斑。

随着微电子技术的突飞猛进,新技术、新工艺、新材料不断涌现,设计方法、设计手段、设计理念不断更新,版图设计已从单纯的图形设计发展为需要综合考虑各方面因素的、复杂的设计问题。一个优秀的版图设计工程师不仅需要了解版图设计的技术、技巧,还应该对相关的电路系统问题、工艺问题以及一些重要的物理效应有深刻的理解。

但是,集成电路版图设计也确实令设计者们感到困惑的一个环节,我们常常感到版图设计似乎没有什么“规矩”,设计的经验性往往掩盖了设计的科学性。即使是有多年版图设计经验的人有时也“说不清”为什么要这样或那样设计。在多年的科研与教学实践中,我们感到版图设计方面的问题是最令学生感到无所适从的问题之一。

长期以来,关于集成电路版图设计的知识大部分是作为集成电路原理或 VLSI 设计书籍中的一些章节,专门介绍版图设计知识的文献资料非常缺少。此次清华大学出版社引进并组织翻译有关版图设计的书籍,为集成电路版图设计者提供了非常好的学习与参考资料。虽然工作非常繁忙,我们仍接下了翻译任务,希望本书能够成为微电子行业的从业者学习与了解版图设计基础的实用资料。

本书从基本半导体理论的介绍开始,循序渐进地介绍了基本集成电路单元的版图设计。本书的一个突出特点是:在介绍版图设计的同时说明了为什么要这样设计,使读者知其然,并知其所以然。从本书的内容组织也可以看到,版图设计不是一个孤立的设计环节,它与一系列的技术相关联。本书内容的重点是版图设计的基础知识,对于新入行的从业者,这是一个良好的开端;对于有经验的设计者,本书则可作为对设计经验的回味和思考。

本书由东南大学李伟华和孙伟锋翻译。其中,孙伟锋负责第 1、5、

6、7 章和第 8 章的翻译,李伟华负责第 2、3、4 章以及术语和其他内容的翻译,最后,由李伟华对全书的内容进行校对与整理。在本书的翻译过程中得到了东南大学 MEMS 教育部重点实验室和国家 ASIC 系统工程技术研究中心的老师和同事们的支持与帮助,在此一并表示感谢。

由于水平有限,在对原著的理解方面可能存在不足,希望读者给予批评指正。

译者

2006 年 1 月于东南大学

目 录

第 1 章 电路基础理论	1
1.1 内容提要	1
1.2 引言	1
1.3 基本电路回顾	2
1.3.1 同性相斥,异性相吸	2
1.3.2 基本单位	3
1.3.3 串联公式	4
1.3.4 并联公式	4
1.3.5 欧姆定律	4
1.3.6 基尔霍夫定律	5
1.3.7 电路单元符号	7
1.4 导体、绝缘体和半导体	8
1.5 半导体材料	9
1.5.1 N 型材料	11
1.5.2 P 型材料	12
1.6 PN 结	13
1.6.1 势垒	13
1.6.2 通过势垒的电流	14
1.6.3 二极管	16
1.6.4 二极管应用	17
1.7 半导体开关	18
1.7.1 一个灯开关的例子	18
1.8 场效应	19
1.8.1 场效应晶体管	21
1.9 开关隔离	22
1.10 增强型器件和耗尽型器件	24
1.11 互补型开关	26
1.12 N 阱和衬底接触	27

1.13 逻辑电路	27
1.13.1 用电压表示逻辑状态	28
1.13.2 CMOS 逻辑电路	28
1.13.3 与非门	31
1.13.4 或非门	31
结束语	33
本章学过的内容	34
应用练习	34

第 2 章 硅加工工艺 39

2.1 内容提要	39
2.2 引言	39
2.3 集成电路版图	40
2.3.1 基本矩形	41
2.4 硅晶圆制造	42
2.5 掺杂	45
2.5.1 离子注入	46
2.5.2 扩散	46
2.6 生长材料层	47
2.6.1 外延	47
2.6.2 化学气相沉积	48
2.6.3 氧化层生长	50
2.6.4 溅射	50
2.6.5 蒸发	50
2.7 去除材料层	51
2.8 光刻	51
2.9 芯片制造	53
2.9.1 下凹图形的加工	53
2.9.2 凸起图形的加工	55
2.9.3 平坦化	57
2.9.4 作为掩模的二氧化硅	57
2.10 自对准硅栅	58
结束语	61
本章学过的内容	62

第 3 章	CMOS 版图	93
<hr/>		
3.1	内容提要	93
3.2	引言	93
3.3	器件尺寸设计	94
	3.3.1 SPICE	94
	3.3.2 大尺寸器件的设计	97
3.4	源漏区共用	102
3.5	器件连接技术	105
3.6	紧凑型版图	108
3.7	棒状图	109
3.8	阱连接和衬底连接	115
	3.8.1 阱连接布局	117
3.9	天线效应	119
3.10	多晶硅引线	122
3.11	图形关系	123
	结束语	125
	本章学过的内容	125
	应用练习	125
第 4 章	电阻	129
<hr/>		
4.1	内容提要	129
4.2	引言	129
4.3	电阻概述	130
4.4	电阻的测量	131
	4.4.1 宽度和长度	131
	4.4.2 方块的概念	132
	4.4.3 每方欧姆	135
4.5	多晶硅电阻公式	139
	4.5.1 基本电阻器版图	140
	4.5.2 接触电阻	142
	4.5.3 改变体材料	151
4.6	实际电阻分析	155
	4.6.1 接触区误差	155

4.6.2	体区误差	155
4.6.3	头区误差	156
4.6.4	扩展电阻	158
4.6.5	总电阻方程	161
4.7	实际的最小电阻尺寸	162
4.8	特殊要求的电阻	163
4.8.1	大电阻-低精度	163
4.8.2	小电阻-高精度	166
4.9	设计的重要依据——电流密度	166
4.10	版图误差分析	171
4.10.1	电阻器误差的来源	171
4.10.2	误差要求	171
4.11	基本材料的复用	172
4.12	扩散电阻和多晶硅电阻的比较	175
4.12.1	双层多晶硅	176
4.12.2	Bipolar/BiCMOS	176
	结束语	176
	本章学过的内容	177
	应用练习	177

第5章 电容 183

5.1	内容提要	183
5.2	引言	183
5.3	电容概述	184
5.3.1	电容器的特性	184
5.4	电容值计算	187
5.4.1	表面电容	188
5.4.2	边缘电容	189
5.5	N阱电容器	191
5.5.1	寄生电容	193
5.6	金属电容器	194
5.6.1	叠层金属电容器	195
5.6.2	氮化物介质电容器	195
	结束语	196

本章学过的内容	196
第 6 章 双极型晶体管	197
6.1 内容提要	197
6.2 引言	197
6.3 工作原理	198
6.3.1 基本结构	198
6.3.2 NPN 晶体管工作原理	200
6.4 纵向工艺	203
6.4.1 FET 和 NPN 晶体管的开关特性比较	203
6.4.2 层的结构	204
6.5 NPN 管的寄生效应	206
6.6 PNP 晶体管	207
6.6.1 横向 PNP 管	207
6.7 双极型晶体管版图与 CMOS 版图的区别	209
6.7.1 设计规则的数量	209
6.7.2 黑匣子式的布局	211
结束语	211
本章学过的内容	212
第 7 章 二极管	213
7.1 内容提要	213
7.2 引言	213
7.3 二极管的种类	213
7.3.1 基本二极管	214
7.3.2 由双极型晶体管构造的二极管	214
7.3.3 变容二极管	217
7.4 ESD 保护	218
7.5 特殊版图结构	222
7.5.1 圆形版图	222
7.5.2 梳状结构二极管版图	223
结束语	223
本章学过的内容	224

第 8 章 电感	225
8.1 内容提要	225
8.2 引言	225
8.3 基本电感	226
8.4 传输线	228
8.4.1 直线特性	228
8.4.2 拐角特征化	229
8.5 螺旋电感	231
8.6 电感品质因子	232
8.7 叠层电感	232
8.7.1 射频扼流圈	234
8.8 邻近效应	236
结束语	237
本章学过的内容	238
术语	239
推荐读物和资料	255
培训项目	257

第 1 章

电路基础理论

1.1 内容提要

在本章中,你将看到以下内容:

- 基本电路理论的回顾
- 导体、绝缘体、半导体材料
- 如何制造半导体材料
- 两种半导体材料——P型和N型
- PN结的重要性
- 利用电场制作开关
- 串联两个互补型开关
- 用互补型开关设计一个控制电路
- 如何设计逻辑电路

.....

1.2 引言

大家应该已经熟悉本章前几页所涉及的大部分电路概念以及集成电路(IC)的思想。因此,下面作一个简单的回顾,仅供参考。

集成电路的绝大部分功能都是通过控制电流来实现的,例如控制电流变化、开关电流、或者利用电流产生电压,而这些操作许多是通过**半导体**完成的。

不像普通灯的开关仅有开和关两种状态,半导体开关可以有开、关以及介于开关之间的一些状态,这种半导体开关称为**晶体管**。

在本章中,我们将首先基于半导体材料构建晶体管,然后再利用晶体管组成逻辑电路。

芯片的设计首先是从工艺研发团队开始的,然后是电路设计人员,最后是你——版图工程师。

版图工程师在新的芯片设计制造过程中是必不可少的。如果你具有更丰富的知识、更强的创造性和更高的效率,那么你可以为你的公司节省数百万美元,因为你所设计的芯片在第一次流水后的性能甚至比预期的还要好,或者你设计的芯片版图比其他人员设计的版图尺寸小,或者在芯片生产之前找到并改正那些致命的错误。

一个优秀的版图工程师是公司的宝贵财富,特别是作为芯片产品流水前最后一道工序的 executor。

本书的一些说明

- 图形中垂直方向为材料的宽度,水平方向为材料的长度。
- 如果没有特别说明,电流的流向为自左向右。
- 文中仅用代词“他”和“它”,这并不存在对女性的不尊重。
- 图示仅起到说明作用,为了简便起见,文中的图形与实际工艺制备的图形有所差别。
- 读者可以带着幽默感来读本书,应该在读书和工作中保持乐观的心态,探索那些未知的东西。

1.3 基本电路回顾

下面给出一些基本的电路理论供读者参考,我们认为读者已经熟悉基本的电路公式和概念,因此仅作一些简单的概述,如果需要更加详细的论述请查阅参考书目。

1.3.1 同性相斥,异性相吸

“异性相吸”是非常普遍的现象,具有相反极性的物质相互吸引,而相同极性的物质相互排斥。例如,带有正电荷的原子将会吸引带负电荷的原子;带正电荷的原子排斥带正电荷的原子,而且不论它们之间是否存在一定距离。

异性相吸。

如果这一神奇的自然规律消失了,那么本书提到的所有电路也就

无法工作了。

我很想弄明白相隔一定距离的电子为什么会相互吸引和排斥，弄明白这一现象的根本原因。一个小小的电子怎么会对它周围的电子有“想法”的呢？实际上，正负电荷没有什么区别，仅仅是电子的数量不同而已，但它们怎么会知道这些呢？它们又不会计数。

为什么我们看不到重力？磁铁也不应该工作啊！以前的宇宙到底是怎样的？为什么航空小姐的纸托蛋糕里面需要奶白色的填充物呢？这真是一个迷茫的世界。—Judy

1.3.2 基本单位

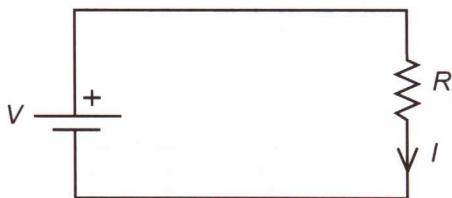


图 1-1 包含电压、电阻和电流的电路示意图。

电压：符号 V ，单位为伏特(V)。

电阻：符号 R ，单位为欧姆(Ω)。

电流：符号 I ，单位为安培(A)。

千米(km)	$\frac{1000}{1}$	1000	$1e^3$
米(m)	$\frac{1}{1}$	1	1
厘米(cm)	$\frac{1}{100}$	0.01	$1e^{-2}$
毫米(mm)	$\frac{1}{1000}$	0.001	$1e^{-3}$
微米(μm)	$\frac{1}{1,000,000}$	0.000001	$1e^{-6}$
纳米(nm)	$\frac{1}{1,000,000,000}$	0.000000001	$1e^{-9}$
皮米(pm)	$\frac{1}{1,000,000,000,000}$	0.000000000001	$1e^{-12}$
飞米(fm)	$\frac{1}{1,000,000,000,000,000}$	0.000000000000001	$1e^{-15}$

1.3.3 串联公式

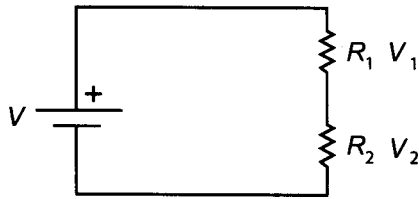


图 1-2 两电阻串联示意图。

串联电路的总电压：

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (V)$$

串联电路的总电阻：

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (\Omega)$$

1.3.4 并联公式

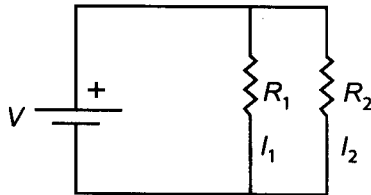


图 1-3 两电阻并联示意图。

并联电路的总电流：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (A)$$

并联电路的总电阻：

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (\Omega)$$

1.3.5 欧姆定律

简单地说，欧姆定律是指电压等于电流与电阻的乘积。

$$V = IR \quad (V)$$

上述关系式可有如下变形：

$$I = V/R \quad (A)$$

$$R = V/I \quad (\Omega)$$

下图给出的三角形可以帮助大家更好地记忆欧姆定律。

- 三角形的顶角始终是电压。
- 三角形的两个底角始终是电流和电阻。
- 看着这个三角形回忆公式。
- 用一个手指盖住希望得到的符号。
- 剩下的两个符号就自动形成想要得到的公式。

难道你不希望所有的公式都如此容易吗？

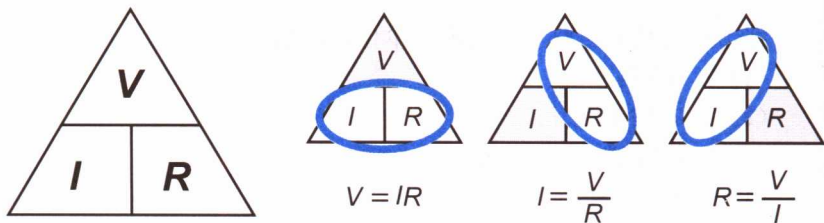


图 1-4 记忆欧姆定律的三角形方法。

1.3.6 基尔霍夫定律

基尔霍夫电压定律：在一个闭环回路中的电压降之和等于该电路外加总电压，也就是说，输入电压的总量等于电路中所有的电压降。

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (V)$$

基尔霍夫电流定律：流出一个节点的所有电流等于流入该节点的所有电流之和。

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (A)$$

这意味着，电路中的任何节点只要有电流流入和流出，则流入、流出的总量一定相等。例如，不可能存在流入的电流量比流出的多的情况。

仅仅去读这些定律是相当枯燥的，但是它们可以转换成代数方程，利用这些方程，我们可以计算未知参量。

这些定律都是非常重要的，利用这些定律解决了许多问题。另外，我们还可以在晚宴上引用这些别致的名字。

还可以考虑把电容和电感等效为电阻，只不过该电阻值对跨接其上的电压的频率敏感。