



全国高技术重点图书·微电子技术领域

洪先龙 严晓浪 乔长阁 著

微电子学丛书

超大规模集成电路 布图理论与算法

科学出版社

73.755
363

微电子学丛书

超大规模集成电路 布图理论与算法

洪先龙 严晓浪 乔长阁 著

科学出版社

1998

D023/05

内 容 简 介

本书根据集成电路芯片版图设计的流程,介绍了自动设计中各个阶段的布图算法,包括布图规划和布局算法、总体布线算法、区域布线算法、通道布线算法以及走线道分配、通孔最少化等其它布图算法。

本书覆盖面广,内容由浅入深,并适应了当前集成电路向细线条、大规模和高性能发展的要求,既可作为大专院校计算机系和电子工程系从事VLSI设计和VLSI CAD的研究生的教材或教学参考书,也可作为从事VLSI CAD技术研究和开发人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超大规模集成电路布图理论与算法/洪先龙等著. -北京:科学出版社,1998

(微电子学丛书)

ISBN 7-03-006572-7

I. 超… II. 洪… III. 超大规模集成电路-电路布图
IV. TN47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 04426 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年10月第一版

开本: 850×1168 1/32

1998年10月第一次印刷

印张: 12 1/2

印数: 1—2 000

字数: 317 000

定价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《微电子学丛书》编委会

顾问：黄 昆 林兰英 谢希德 王守武 王守觉
 童志鹏 李志坚 姜均露 王寿云

主 编：王阳元

编 委：（以姓氏笔画为序）

马俊如	万 群	王芹生	王永文	王阳元
王忠烈	仇玉林	白 丁	李佑斌	许居衍
许振嘉	陈星弼	陈 贤	汤小川	严晓浪
张义门	张利春	张 敏	郑敏政	宗祥福
洪先龙	俞忠钰	钱佩信	唐璞山	徐元森
徐雅文	徐筱棣	黄 敞	梁春广	梁骏吾
韩汝琦	熊和生	魏 玲	魏道政	

秘 书：赵宝瑛

《微电子学丛书》序

微电子学是源于并脱胎于固体物理和无线电电子学的一门新兴的边缘性技术学科. 历史地说, 1948 年晶体管的发明、1958 年采用硅平面工艺的集成电路的诞生和 1971 年微处理器的出现是微电子学发展史上的几个重要里程碑. 经过 46 年的发展, 微电子产业已成为战略性的基础产业, 微电子科学技术已成为现代科学技术的关键技术基础. 据统计, 现在世界上 GNP 的 65% 与微电子技术有关. 二次大战后, 美国正是抓住了以微电子技术为基础的电子信息技术, 使其经济起飞的. 日本和亚洲一些国家和地区也都是抓住了这一点而使其经济振兴. 按预测, 一直到 2020 年, 世界集成电路产业的产值仍将以年增长率 13% 的速度增长; 技术上也仍保持着集成度年增长率为 46% 的速度继续发展. 到 2000 年以微电子为基础的电子信息产业将成为世界第一大产业. 因此, 微电子科学技术将是 20 世纪下半叶直到 21 世纪上半叶科学技术竞争的焦点. 谁掌握了微电子技术, 谁就掌握了主动权. 当前, 微电子产业规模和技术水平已成为衡量一个国家综合实力的主要标志. 日本有人提出, 把半导体工业总产值占工农业总产值的 0.5% 作为进入信息社会的标志是不无道理的.

当前, 我国微电子产业和科学技术的发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展的需要. 我国集成电路的市场份额只占世界集成电路市场的 0.33%, 与我国社会主义大国地位极不相称. 国内市场的占有率, 无论是品种还是数量, 也只占 20% 左右. 我国微电子产业和科学技术的落后面貌已成为我国四个现代化建设的制约因素. 党和国家的领导已把发展微电子作为一项战略措施放到了突出的地位. 在这样的形势下, 编写出一套高质量的、反映世界微电子学发展前沿和我国微电子科学技术成果的丛书, 必将促

进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

这套丛书不同于一般的通俗读物和科普读物,也不同于大学教材,它将是一套反映微电子学主要研究领域里学科发展前沿问题的著作,以满足微电子学领域里的研究部门、教育部门和产业部门的需要,成为工作在第一线科技人员的参考书。当然它也可成为大学生和研究生的教学参考书。我们要求每本著作都要具有科学性、先进性和实践性,而整套丛书又要有系统性。我们计划在“八·五”期间开始出版,到2000年前要出20来本,2000年后还要继续搞下去,使其成为跨世纪的产物。这个工作的意义不亚于建一个工厂,建一个研究所。

倡议编写这套丛书是国防科工委微电子专业组、全国ICCAD专家委员会和ICCAT专家委员会的部分专家们,他们的倡议得到了全国各有关单位微电子专家的支持和赞同,从而形成了一个报告。这个报告得到当时任机械电子工业部电子科学研究所所长童志鹏教授的批准。因此,当我们庆贺微电子丛书开始出版的时候,要特别感谢童志鹏教授的睿智。编写丛书的倡议还得到了国家计委科技司,国防科工委科技委、预研局、四局,国家科委基础研究高技术司,原机械电子工业部微电子与基础产品司和科学出版社等有关领导的支持,使出版这套丛书的愿望得以实现。我们在这儿谨向上述领导部门表示由衷的谢意。

1991年8月2日至8月3日在北戴河召开了第一次丛书编委会,讨论并制订了出版计划,经过近三年的努力,丛书终于与读者见面了。我们以喜悦的心情,迎接它的诞生。

我们要感谢老一辈的科学家,我们的老师和有关领导部门的负责人,他们应聘担任丛书编委会的顾问,这对于保证丛书的学术质量将是十分重要的。我们相信,在他们的关心、支持和指导下,丛书的出版必将能达到预期的目的。

担任本丛书编委的都是一批活跃在微电子领域科研、生产和教育单位的中青年科技专家,我们团结在一起,互相切磋、共同探索,必能攀登一个又一个科学高峰。

“书山有路勤为径,学海无涯苦作舟.”愿为丛书的出版而耕耘不息.

我们期望得到同行们的更多指正,更多支持.

王阳元

1994年5月于北京大学

前 言

当今信息时代,电子信息技术作为强大的社会生产力,在推动经济发展、社会产业结构和生活方式的变革中的作用日益增长.在电子信息技术中,集成电路(IC)被称为现代工业的“食粮”,起着十分重要的作用.它是电子信息技术发展的核心和基础.据报道,世界国民生产总值的增值部分的 65%与 IC 有关.电子信息技术和 IC 产业的水平已经成为衡量一个国家综合国力的重要标志.

自从 1958 年集成电路诞生以来,已经历了小规模集成(SSI)、中规模集成(MSI)、大规模集成(LSI)的发展阶段,目前已进入超大规模集成(VLSI)和特大规模集成(ULSI)阶段,是一个“System on Chip”的时代.以最普遍的个人计算机微处理器为例,第一代 16 位的 8086 芯片中,共容纳了约 2.8 万个晶体管,到了 32 位以上的 586 计算机微处理器(如“奔腾”),芯片内的晶体管元件数目已经高达 500 万以上.目前商业化半导体芯片制造技术的主流已经达到 $0.35\mu\text{m}$ 的线宽,预计今后发展的趋势是 $0.15\mu\text{m}$ 甚至 $0.1\mu\text{m}$ 以下,即集成电路已进入深亚微米工艺时代.集成电路技术迅速向着更高集成度、超小型化、高性能、高可靠性的方向发展,一个芯片上可集成高达几亿,甚至几十亿个晶体管.集成电路技术的飞速发展除了工艺技术、设备和材料等因素外,计算机辅助设计技术的进步也是一个不可忽视的原因.并且,随着集成度的提高,芯片内部晶体管数目越来越多,使得集成电路设计的复杂性也越来越高.人们已经从实践中得到了一个毋庸置疑的结论:VLSI 的进一步发展离开设计自动化(DA)和计算机辅助设计(CAD)将寸步难行.

集成电路设计包括了功能设计、逻辑设计、电路设计、版图设计、设计验证和制造等过程.在整个设计过程中,版图设计(或称为物理设计)是其中重要的一环,它是在几十平方毫米的硅片上完成

线条只有零点几个微米的上百万个器件的整个电子系统的设计. 物理设计也是 VLSI 设计中最费时的一步, 它要把每个元件的电路表示转换成几何表示. 同时, 元件间的连线也要被转换成几何连线图形. 我们把电路的几何表示叫作版图, 而把版图的设计称为布图. 版图设计要符合与制造工艺有关的设计规则的要求.

由于布图的复杂性, 整个布图过程往往被分成包括划分、布图规划、布局、总体布线、详细布线和压缩等若干子步骤, 每一步骤完成布图的一部分. 此外, 对布图对象作某些限制也会有利于简化问题. 根据布图对象的不同, 可有标准单元、门阵列、门海和积木块等设计模式. 目前, 对标准单元、门阵列和门海等规则版图结构的设计模式, 现有的设计自动化系统根据用户给出的单元和它们之间的连接信息以及设计目标和约束条件, 可自动生成芯片物理版图. 系统的设计能力可达每个芯片集成几十万到上百万个门.

CAD 工具已具有相当高的水平, 并广泛用于电子产品设计的各个阶段, 尤其在版图设计自动化方面, 目前已有多种 CAD 工具服务于不同设计模式的版图设计中, 布图设计的自动化程度在整个集成电路设计过程中是最高的. 但设计技术仍落后于工艺的发展, CAD 工具仍落后于设计的要求. 目前的集成电路工艺, 线条宽度可达 $0.5 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 单片集成度可达几十万门. 在 $0.8 \mu\text{m}$ 工艺时, 连线延迟已与门延迟相当, 布图时如不考虑连线延迟就很难保证芯片的电路性能. 但目前的布图工具都只考虑芯片面积、布通率和布图时间. 新推出的设计方法和组装技术, 如现场可编程门阵列 (FPGA) 和多芯片模块 (MCM), 也对 CAD 布图算法和工具提出了新的要求. 因此, VLSI 布图技术的进一步研究及其产品的开发仍然是当前微电子产业的一个重要方面.

版图设计自动化涉及的几何图形很简单, 包括矩形、直角多边形和连线. 但布图算法涉及了图论、组合优化、线性规划、非线性规划以及运筹学等. 布图算法的实现则又要涉及到版图的数据结构和数据管理. 本书将着重讨论版图设计自动化中的算法以及与之有关的实现技术, 即数据结构和数据管理.

我们将根据布图设计的流程,从第四章开始分章节逐个阶段地介绍各阶段中的布图算法,包括布图规划和布局算法、总体布线算法、区域布线算法、通道布线算法以及走线道分配、过点分配、通孔优化等其它布图算法.在叙述布图算法之前,为了使读者对布图对象、布图要求、算法所用到的数学基础有一定的了解,我们在第一章简略介绍了 VLSI 的设计过程、布图设计流程、布图方法及布图策略;在第二章介绍集成电路的制造工艺、基本器件结构和版图数据的表示;在第三章介绍布图算法的数学基础,包括图论、算法复杂性、计算几何和运筹学以及常用的数据结构.

书中的不少内容是我们多年来在多项国家自然科学基金和国家重点科技攻关项目研究中所取得研究成果的总结.本书不仅覆盖了 VLSI 布图各个领域,而且对亚微米和深亚微米工艺下的性能驱动布图问题和求解技术进行了系统的阐述.我们曾在清华大学计算机科学与技术系和杭州电子工业学院 CAD 研究所为研究生开设 VLSI 布图理论和算法课程,并编写了讲义,本书是在该讲义基础上补充改写而成.它可以作为大专院校计算机系和电子工程系从事 VLSI 设计和 VLSI CAD 的研究生的教材或教学参考书.同时,它也是致力于 VLSI CAD 技术研究和开发的科技工作者和工程师的一本科技参考书.

限于水平,书中缺点和错误在所难免,敬请指教.

作 者

1997 年 6 月于清华大学

目 录

《微电子学丛书》序

前言

第一章 超大规模集成电路布图问题、布图方法及

版图设计自动化 (1)

1.1 VLSI 设计流程 (2)

1.2 布图设计过程 (4)

1.3 芯片费用和电性能的估计 (6)

1.4 布图模式 (7)

1.4.1 全定制设计模式 (8)

1.4.2 标准单元设计模式 (11)

1.4.3 门阵列设计模式 (13)

1.4.4 门海设计模式 (15)

1.4.5 现场可编程门阵列 (16)

1.4.6 不同设计方法的比较 (18)

1.5 系统封装的物理设计 (19)

1.5.1 印制电路板 (20)

1.5.2 多芯片模块 (20)

1.5.3 圆片规模集成 (21)

1.5.4 各种封装方法的比较 (21)

参考文献 (22)

第二章 VLSI 器件的设计和制造以及布图对象

的描述 (23)

2.1 集成电路制造工艺 (23)

2.2 设计规则 (25)

2.3 基本器件的版图实例 (27)

2.3.1 非门 (27)

2.3.2 与非门 (28)

2.4	工艺制造中的其它因素	(28)
2.4.1	等比例缩小	(29)
2.4.2	寄生效应	(29)
2.4.3	延迟计算	(30)
2.4.4	噪声和串扰	(31)
2.4.5	功耗	(32)
2.5	集成电路版图的几何表示	(32)
2.5.1	CIF 格式	(33)
2.5.2	EDIF 格式	(35)
2.6	单元的拓扑描述和网表描述	(40)
	参考文献	(42)
第三章	VLSI 布图的数学基础及数据结构	(43)
3.1	图的基本术语及基本数据结构	(43)
3.1.1	基本术语	(43)
3.1.2	图的基本数据结构	(45)
3.2	算法及算法复杂性	(47)
3.2.1	算法问题及算法复杂性	(47)
3.2.2	几种求解 NP-困难问题的方法	(49)
3.3	基本算法	(53)
3.3.1	图论算法	(53)
3.3.2	计算几何算法	(73)
3.3.3	基于运筹学的算法	(75)
3.4	基本数据结构	(90)
3.4.1	版图数据的基本操作	(90)
3.4.2	链表结构	(91)
3.4.3	基于 Bin 的结构	(93)
3.4.4	邻接指针	(94)
3.4.5	角勾链	(95)
3.4.6	四叉树	(100)
3.4.7	各种版图数据结构的比较	(101)
3.4.8	自动布图中模块和网表的数据结构	(102)
3.4.9	树的数据结构	(105)
	参考文献	(111)

第四章 布局与布图规划	(113)
4.1 布局中的线长估计	(114)
4.1.1 最小斯坦纳树	(115)
4.1.2 最小生成树	(115)
4.1.3 最小链	(115)
4.1.4 源到漏端的最小连接	(116)
4.1.5 完全图	(116)
4.1.6 边界框	(116)
4.1.7 半周长	(116)
4.1.8 二次线长	(117)
4.1.9 单树干斯坦纳树	(117)
4.2 布局的目标函数	(118)
4.2.1 基于连线总长的目标	(118)
4.2.2 基于割线的目标	(119)
4.2.3 基于最大密度的目标	(119)
4.2.4 复合目标函数	(120)
4.2.5 实例与比较	(120)
4.3 初始布局	(121)
4.3.1 单元的安置	(122)
4.3.2 基于联结度的布局方法	(125)
4.3.3 基于结群的布局方法	(128)
4.4 改善布局	(134)
4.4.1 改善布局的目标函数	(135)
4.4.2 基于对交换的迭代改善	(136)
4.4.3 基于最小割的交换	(139)
4.5 BBL 模式下的布局改善	(143)
4.5.1 布局结果的图表示	(143)
4.5.2 迭代改善	(146)
4.6 基于数学规划方法的布局迭代改善	(147)
4.6.1 问题定义	(148)
4.6.2 求解方法	(150)
4.6.3 算法分析	(152)
4.6.4 划分策略的进一步讨论	(154)

4.6.5	最终布局	(157)
4.7	基于模拟退火方法的布局算法	(159)
4.8	布图规划	(161)
4.8.1	布图规划、布局与分级设计	(161)
4.8.2	布图规划问题定义	(163)
4.8.3	布图规划过程	(164)
4.8.4	布图规划算法	(165)
	参考文献	(180)
第五章	线网布线	(182)
5.1	迷宫算法	(183)
5.1.1	基本的迷宫算法	(184)
5.1.2	迷宫算法的改进	(188)
5.1.3	迷宫算法的比较	(191)
5.1.4	迷宫算法中提高布线效率的方法	(192)
5.1.5	多端线网布线	(197)
5.1.6	多层布线	(198)
5.2	线探索法	(198)
5.3	布线顺序的影响及其处理	(201)
5.3.1	布线顺序的影响	(201)
5.3.2	布线顺序的处理方法	(203)
5.4	整体布线	(204)
	参考文献	(207)
第六章	总体布线	(209)
6.1	总体布线问题	(209)
6.1.1	总体布线图	(209)
6.1.2	总体布线问题定义	(211)
6.2	总体布线算法的分类	(213)
6.2.1	串行算法	(215)
6.2.2	并行算法	(216)
6.3	总体布线图上的斯坦纳树算法	(216)
6.3.1	基于最短路径的算法	(217)
6.3.2	基于最小代价生成树的算法	(217)
6.3.3	基于可分离性的算法	(219)

6.3.4	基于非矩形边斯坦纳树的算法	(222)
6.3.5	Dreyfus-Wagner 算法	(223)
6.3.6	最小化最大权重边的斯坦纳树算法	(225)
6.4	总体布线算法	(227)
6.4.1	串行布线和拆线重布算法	(227)
6.4.2	基于加权的斯坦纳树算法	(229)
6.4.3	基于整数规划的方法	(230)
6.4.4	基于网络流的总体布线算法	(234)
6.4.5	基于拥挤度分析的并行层次迭代布线算法	(243)
	参考文献	(247)
第七章	通道布线	(250)
7.1	通道布线问题	(251)
7.2	通道布线的定义和约束关系	(253)
7.2.1	通道布线	(253)
7.2.2	通道布线中的水平和垂直约束	(254)
7.3	常见的几种通道布线算法	(257)
7.3.1	左边算法	(258)
7.3.2	狗腿算法	(259)
7.3.3	合并算法	(260)
7.3.4	贪婪算法	(264)
7.3.5	层次式通道布线算法	(266)
7.3.6	双层布线算法的比较	(269)
7.4	开关盒布线问题	(270)
7.4.1	定向布线	(271)
7.4.2	最终布线	(274)
7.5	多层布线	(276)
7.5.1	三层布线	(276)
7.5.2	多层布线算法	(279)
7.6	其它布线问题	(280)
7.6.1	L 形通道布线	(280)
7.6.2	单元上布线	(281)
	参考文献	(290)
第八章	其它布图问题	(293)

8.1	通孔最少化算法	(293)
8.1.1	通孔最少化一般图模型	(293)
8.1.2	通孔秩及多度通孔	(296)
8.1.3	秩边权和图模型边权计算	(298)
8.1.4	通孔最少化算法	(298)
8.2	统一通孔最少化和线长最小化层分配算法	(300)
8.2.1	线长优化的一般方法	(300)
8.2.2	最少通孔和最小线长分层的无向图表示	(301)
8.2.3	若干工程实际中要考虑的问题	(302)
8.2.4	算法及实验结果	(303)
8.3	走线道分配算法	(305)
8.3.1	总体布线树的映射	(307)
8.3.2	多行走线道分配	(308)
8.3.3	单行走线道分配	(312)
8.4	过点分配算法	(317)
8.4.1	问题描述	(318)
8.4.2	线网分类	(319)
8.4.3	费用函数的构造	(321)
8.4.4	过点分配算法	(323)
	参考文献	(324)
第九章	高性能布图算法	(326)
9.1	时延和功耗双重驱动布局算法	(326)
9.1.1	延迟模型	(328)
9.1.2	问题定义	(329)
9.1.3	求解拉格朗日问题	(331)
9.1.4	功耗和时延双重驱动布局	(336)
9.2	时延驱动斯坦纳树算法	(336)
9.2.1	基于 Dreyfus-Wagner 的斯坦纳树算法	(337)
9.2.2	构造性力指向斯坦纳树算法	(341)
9.3	时延驱动总体布线算法	(343)
9.3.1	基于线网时延驱动总体布线算法	(344)
9.3.2	基于关键路径时延驱动总体布线算法	(345)
9.4	同时到达的时钟布线技术	(348)

9.4.1	时钟系统及其布线问题	(348)
9.4.2	时钟树的时延计算方法	(351)
9.4.3	时钟布线算法	(353)
9.5	减小关键路径延迟的回路布线法	(357)
9.5.1	互连线延迟模型	(358)
9.5.2	RC 网孔电路延迟计算	(360)
9.5.3	回路布线延迟分析	(360)
9.5.4	实验结果	(365)
9.6	电源网与地网布线	(367)
9.6.1	电源/地线网的布线	(367)
9.6.2	约束条件及目标函数的规划	(369)
	参考文献	(373)