

庄文君 李玉兴 编著

集成电路布图设计自动化

上海交通大学出版社

集成电路布图 设计自动化

庄文君 李玉兴 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书是一本介绍大规模和超大规模集成电路(LSI/VLSI)布图设计自动化基本理论和方法的专著。

全书共分九章。前三章介绍了布图设计自动化的发展现状、主要的设计模式以及设计对象的描述方法。第四、五章讨论了各种自动布局设计方法。第六、七章介绍了面向线网及面向布线区域的各种布线设计方法。第八章讨论了数据库在布图设计中的应用。最后一章概述了布图设计自动化系统的构成及各子系统的作用。全书既介绍了历史上布图设计的主要理论和方法,又着重讨论了当前最新的一些研究成果,并附有详尽的参考文献目录。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生或研究生的参考书、专业选修课或研究生课的教材,也可供从事计算机设计和研制、集成电路的设计和研制、软件算法的研究和应用的有关科技、工程技术人员参考。

集成电路布图设计自动化

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1934弄19号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂排印

开本 850×1168 1/32 印张 13.625 字数 351000

1986年8月第1版 1986年10月第1次印刷

印数 1—3300册

统一书号: 15324·194 科技书目: 132-258

定 价: 2.60 元

前 言

在集成电路的发展进入超大规模时代的今天, 计算机辅助设计和设计自动化已成为集成电路发展必不可少的支柱之一。布图设计自动化是其中重要的一个组成部分。近十年来, LSI/VLSI 的布图设计自动化的研究和应用引起了人们极大的重视, 与此同时, 布图设计自动化的理论、方法与实际应用也得到了相当快的发展。为了适应我国 LSI/VLSI 布图设计自动化研究、应用以及教学的需要, 我们结合国内研究工作的实践(包括作者在这方面的的工作), 并综合了国内外在研究和应用中的主要理论和方法, 编著了这本布图设计自动化的专著。希望在这方面对我国的工作和教学有所裨益。

本书内容共分九章, 分述了布图设计自动化方面的主要模式和主要的设计理论与方法。本书一方面着眼于布图设计自动化技术的应用, 对布图设计系统各部分的主要方法作了较为全面的介绍; 另一方面为了更好地适应研究、教学的需要, 对布图设计自动化中有代表性的各种算法, 包括历史的发展过程以及国内外研究的一些最新成果也作了介绍。

本书初稿第一、二、三、四、五、六、七和九章及附录由庄文君同志撰写, 第八章及第三章的一部分内容由李玉兴同志撰写。李玉兴同志并对前六章内容进行了文字修订和整理工作。全书最后的审定由庄文君、李玉兴共同完成。李玉兴同志为本书的出版作了大量的工作。

本书的主要内容, 作者曾在清华大学、上海交通大学、安徽大学及电子工业部雷达局等单位, 对研究生及高年级本科生作过讲授; 对有关的科研、教学、工程技术人员也作过较系统的介绍。

本书由中国科学院半导体研究所王守觉研究员审阅，并得到上海交通大学林栋梁教授的关心和支持，在此谨表示衷心的感谢。由于限于作者的水平、书中错误和疏漏在所难免，作者恳切地希望使用本书的读者批评指正。

1984 年 12 月

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 布图设计自动化的发展现状及重要性	(1)
1.2 布图设计自动化的定义及其目标	(8)
1.3 布图设计自动化的复杂性及研究方法	(12)
第二章 布图设计的主要模式及其特点	(19)
2.1 传统设计方式	(19)
2.2 多元胞设计模式	(20)
2.3 门阵列模式	(24)
2.4 任意元模式	(29)
2.5 可编程序逻辑阵列模式	(30)
2.6 其它布图设计方式	(32)
2.7 分级设计方式	(39)
2.8 各种布图设计方法的应用	(42)
第三章 布图设计自动化对象的定义及描述方法	(46)
3.1 单元描述	(46)
3.2 联结关系及其描述方法	(51)
3.3 系统描述	(55)
第四章 初始布局方法	(64)
4.1 引言	(64)
4.2 对联结法	(69)
4.3 成群展开法	(72)
4.4 “内—外”联结度法	(75)
4.5 群法	(77)
4.6 多元胞模式的初始布局方法	(81)
4.7 门阵列的二维初始布局	(87)
4.8 边生长的等分接点法	(92)

4.9	初始布局方法评价	(98)
4.10	本章附录一关于分配问题(二分图最大匹配问题)的算法	(105)
第五章	改善布局的方法	(111)
5.1	引言	(111)
5.2	对交换方式的迭代改善布局方法	(112)
5.3	链式交换方式	(138)
5.4	组合交换方式	(145)
5.5	改善布局方法评价	(153)
第六章	面向线网的布线方法	(157)
6.1	引言	(157)
6.2	李氏算法	(158)
6.3	其它面向线网的布线方法	(188)
6.4	布线的顺序处理	(201)
6.5	分层及通孔最小化算法	(211)
6.6	面向线网布线方法小结	(217)
第七章	面向布线区域的布线方法	(220)
7.1	布线区域的划分	(221)
7.2	总体布线方法	(224)
7.3	通道区布线算法	(242)
第八章	数据库及其在设计自动化中的应用	(287)
8.1	数据库概述	(287)
8.2	数据的组织和管理	(293)
8.3	数据库的逻辑结构和设计方法	(303)
8.4	数据描述语言和数据库管理系统	(319)
8.5	数据库的发展	(325)
第九章	布图设计系统概述	(328)
9.1	布图设计系统的硬件配置	(329)
9.2	初始信息的准备及正确性验证	(332)
9.3	人机交互子系统及其功能	(341)
9.4	实体化处理及正确性验证	(355)
9.5	本章小结	(377)

参考文献	(379)
附录	(400)
英—中名词对照表	(400)
中—英名词对照表	(415)

第一章 引 论

1.1 布图设计自动化的发展现状及重要性

一、布图设计自动化的发展现状

近年来,集成电路技术取得了显著的进展。其主要标志是,单片集成度的迅速提高和单门(逻辑电路)平均价格的显著降低。从七十年代以来,集成度的提高大约是每两年翻一番。目前存贮器的集成度已是六十年代中期的一万倍。国外已研制成功 256K RAM 电路和 32 位单片微处理机。由于集成电路的发展已迈入了超大规模集成电路(VLSI)的时代,这势必促使以电子计算机为代表的电子设备迅速地向着超小型化、高集成度、高可靠性的方向发展。大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路已被广泛地应用于计算机、自动控制、通讯、雷达、测量、家用和医用电子设备等各个方面,它们已成为现代电子技术发展的一个极其重要的基础。

随着 LSI/VLSI 规模、品种、数量的不断发展,其设计自动化的问题也就愈来愈受到人们广泛的关注。人们已经从实践中得到了一个无庸置疑的结论:LSI/VLSI 的进一步发展(尤其是随机逻辑电路)离开设计自动化(DA)或计算机辅助设计(CAD)将寸步难行。近十几年来,许多国家的研究机构、高等院校以及有关的公司都不断投入巨额资金,开展对 LSI/VLSI 设计自动化、CAD 的理论和方法、以及实用系统等进行研究和开发,并且已经在系统描述(system description)、系统分析及分划(system analysis and division)、逻辑模拟(logical simulation)、电路分析(circuit analysis)、工艺模拟(process simulation)、器件模拟(device simulation)、布图设计(layout)、自动测试(automatic test)以

及数据库 (data base) 等方面得到了相当大的发展。图 1.1 为 LSI/VLSI 计算机辅助设计系统的示意图。由于设计过程中课题的繁多和问题的复杂, 许多方面目前离开真正的自动化设计还有不少距离。但即使如此, 在这些方面也已广泛地利用计算机进行辅助设计, 特别是在设计验证等方面, 计算机已成为一个必不可少的工具。

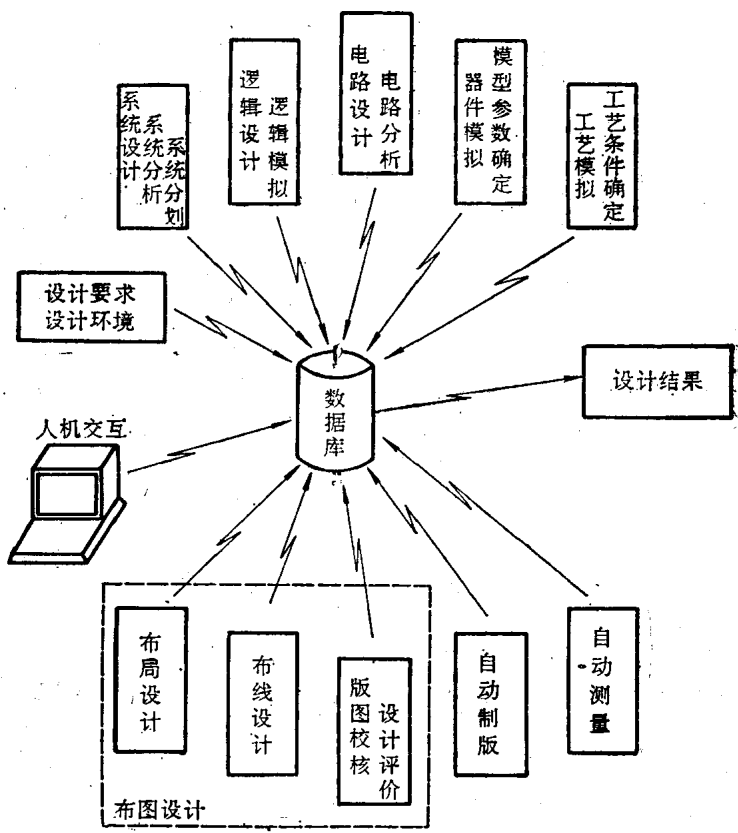


图 1.1 LSI/VLSI 设计系统示意图

二、布图设计自动化的重要性

布图设计是整个集成电路设计过程中与产品研制和生产直接相关的一个设计过程,它直接关系到 LSI/VLSI 的设计周期、成本、正确性和产品质量,而且也是人工设计中费时最长和差错率最高的设计步骤之一。正因为如此,它也就成了近年来在设计自动化方面发展最快、自动化程度最高的领域之一。

布图设计自动化在 LSI/VLSI 发展中的重要性,主要表现在下述两个方面:

1. 设计周期短、成本低、效率高

据报道,英特尔公司在设计 INTEL 8080 微处理机时,采用人工方式设计,总共化费 40 人年,设计费用为 2 千万美元。后来设计的二个微处理机也分别用去了 10 人年。HP 公司设计一台 32 位微处理机(含 45 万个元件),化费 60 人年。图 1.2 表明,在人工设计时,设计周期是与设计规模的 2~3 次方成正比的。因此,对于 10 万个门(gate)左右的随机逻辑来说(属于 VLSI),人工设计将几乎是不可能的。由此看来,必须采用设计自动化或计算机辅助设计,才能满足 LSI/VLSI 的研制及生产的需要。

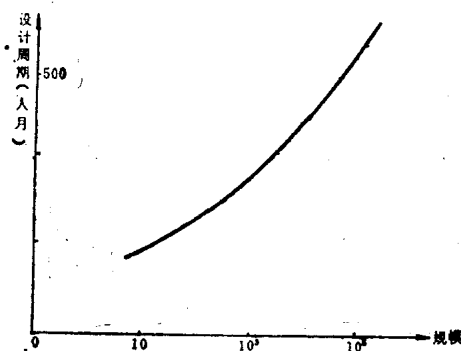


图 1.2 人工设计周期与设计规模关系示意图

目前已开发的布图设计系统的设计效率,与人工设计相比可以提高一个数量级以上。这一点,可以从下面三个有代表性系统的设计能力上看起来:

(1) 美国 IBM 公司

使用 IBM 公司 EDS 系统,设计一台含 5000 门的微处理机,设计周期为 20 人月,设计过程在一台 IBM370/168 机上实现。其中布图设计共化费机时 376 分钟,如图 1.3 所示。如果设计 700 门左右的电路,设计周期为 7 人天。

(2) 美国 BELL 实验室

BELL 实验室设计一台 32 位 CMOS 微处理机(含 10 万晶体管),设计周期为 15 个人月,如图 1.4 所示。若设计规模为 500 单元(cell)的电路,其设计周期仅为 5~7 人天。

(3) 日本 NTT MASAHIRO 电子通讯实验室

日本 NTT MASAHIRO 电子通讯实验室设计 32 位 CMOS 微处理机(含 7.8 万个晶体管),其设计周期为 2 个人月,如图 1.5 所示。

同时应该指出,这些设计系统的设计质量已基本上可与人工设计相匹敌。

2. 易进行设计正确性验证

由于人工设计或人机交互式设计方式,主要是依据设计者的经验和专业素养,而无一定的方法可言,再加上极其繁杂的数据处理工作(仅就 4K RAM 而言,全部版图数据可达 36 万),这就难免出现这样那样的差错。按一般规律,如果 1000 个晶体管的布图设计第一次的成功率为 2^{-1} ,那么 35 万个晶体管的第一次设计成功率则仅为 2^{-230} ,其一次成功率几乎为 0,由此可见差错率是相当高的。同时此类错误也相当难检查,在有些情况下甚至是不可能的。采用设计自动化技术进行布图设计,必然遵循一定的方法,数据可由计算机统一管理。与此同时,可发展一系列相应的正确性验证的手段,从而就可基本上解决设计正确性的验证问题,

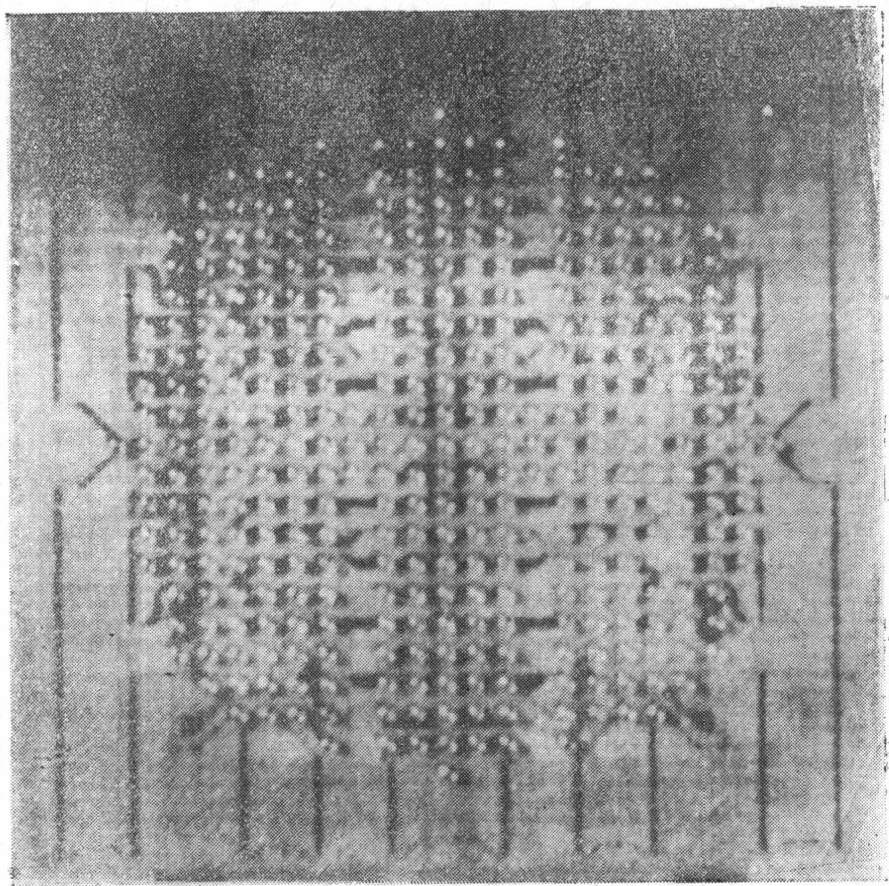


图 1.3 IBM 公司含 5000 门的微处理机设计

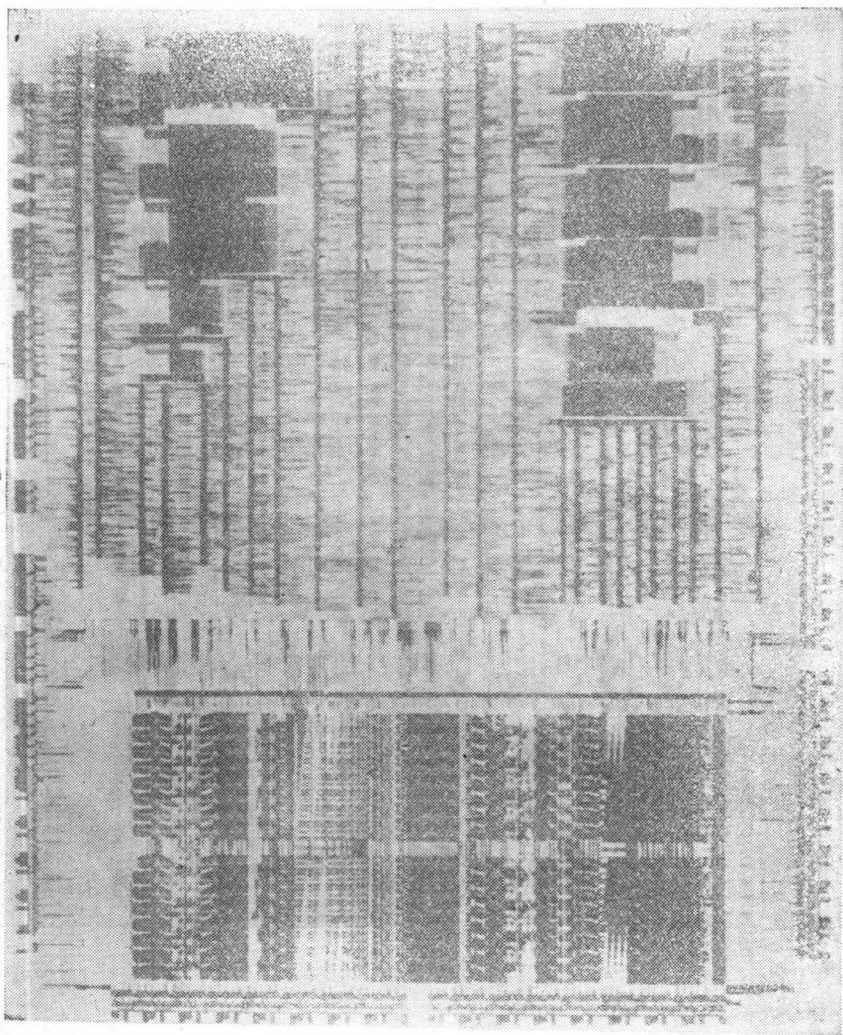


图1.4 BELL 实验室 32 位 CMOS 微处理机设计

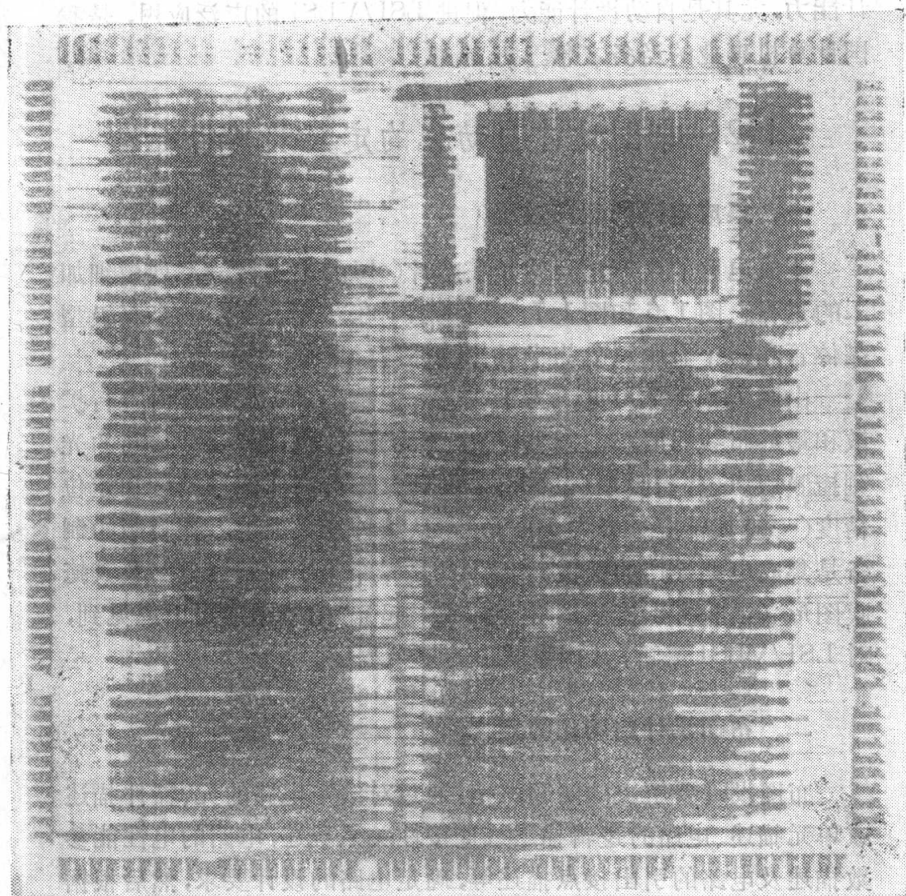


图 1.5 日本 NTT MASAHIKO 电子通讯实验室 32 位 CMOS 微处理机设计

大大提高设计成功率。

由此可见,设计自动化(包括布图设计自动化)是发展 LSI/VLSI 必不可少的基础和手段。我国的 LSI/VLSI 研制和生产虽然起步较晚,但是完全有可能尽快赶上去。为此,发展独立的设计能力,尤其是自动设计能力,促进 LSI/VLSI 的广泛应用,是我国计算机事业的当务之急。

1.2 布图设计自动化的定义及其目标

一、集成电路的生产过程

集成电路的生产过程就是在芯片(chip)上进行一系列微细加工的过程。图 1.6 和图 1.7 分别显示了在芯片上制作一个双极型晶体管和一个金属氧化物半导体晶体管(MOS)的过程。

由图 1.6、1.7 可见,为了在芯片上精确确定的区域内进行扩散和最终布线的要求,必须进行多次的光刻,也即需要一整套的光刻掩膜版。这些掩膜版(mask)要求具有相当高的图形精度和定位精度(一般其精度量级为 10^{-6}m)。从某种意义上讲,掩膜版的制备是集成电路生产的关键。图 1.8 是一个 RS 触发器电路及其掩膜图形(已将多层掩膜图形套画在一起)。由此图形可以想见到,对 LSI/VLSI 来讲,其掩膜图形的复杂程度。

二、布图设计自动化的定义

布图设计要解决的问题就是:通过对给定电路的元、器件描述或单元描述、电路的逻辑描述或连接性关系描述,电路的电性能参数描述及电路的引出接点描述等,确定电路的设计要求,然后根据采用的集成电路工艺条件,将电路的描述自动地转变为集成电路制造所需要的掩膜图集。简言之,布图设计就是根据电路和工艺的要求自动完成芯片上元、器件或单元—功能块的安置,并实现它们之间所需要的互连。上面提到的生产工艺条件是指工艺类型、

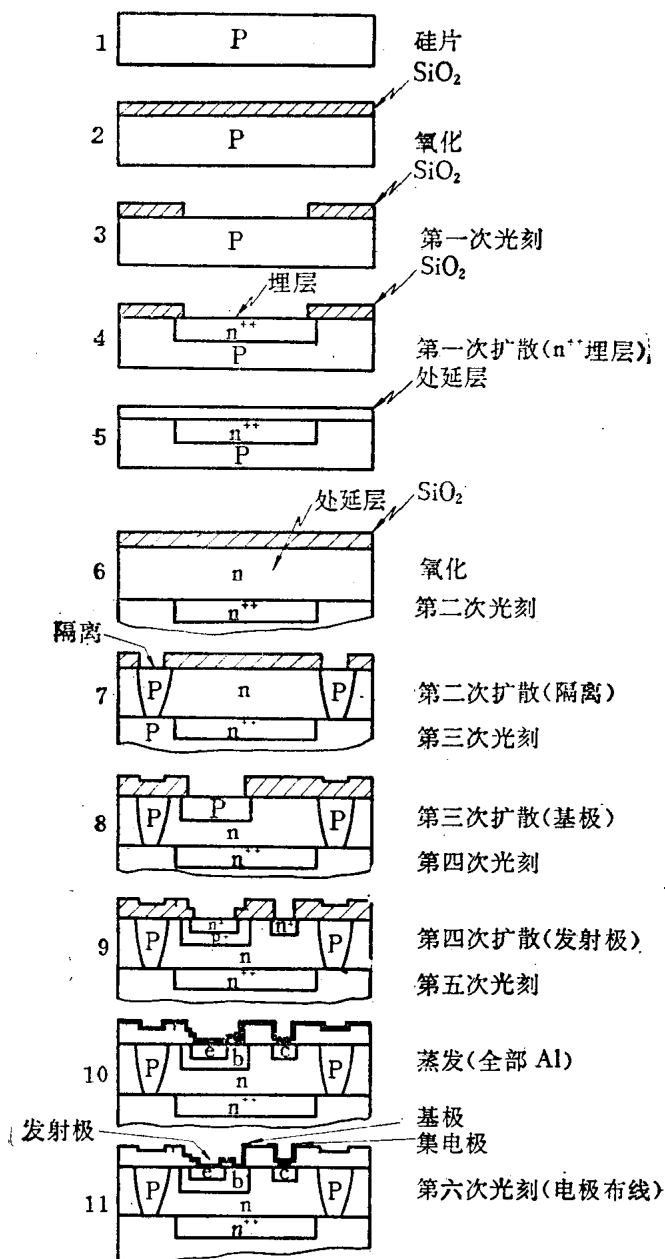


图 1.6 集成电路双极型晶体管制造工艺(PN 结隔离)