

3 微电子学讲座

(日) 渡边 诚 浅田邦博 著
可儿贤二 大附辰夫

超大规模集成电路设计 I 电路与版图设计

科学出版社

内 容 简 介

本书是《微电子学讲座》丛书的第三卷。本丛书第三、四两卷系统地介绍了超大规模集成电路的设计方法。本卷重点介绍计算机辅助设计技术在电路及版图设计中的应用。

本书共五章。第一章概述了超大规模集成电路设计的发展趋势，第二至第五章则分别介绍了作为超大规模集成电路基础的MOS型及双极型基本逻辑电路，电路模拟技术，超大规模集成电路芯片上布局、布线的决定，以及设计结果的验证等一整套版图设计技术。

本书可作为大专院校微电子学、半导体、计算技术、电子工程等专业的教学参考书，也可供从事大规模集成电路设计、计算机辅助设计工作的工程技术人员、科研人员阅读参考。

渡边 诚 浅田邦博 可儿贤二 大附辰夫 著

岩波講座マイクロエレクトロニクス 3

VLSIの設計 I

回路とレイアウト

岩波書店, 1985

微电子学讲座 3

超大规模集成电路设计 I

电路与版图设计

〔日〕 渡边 诚 浅田邦博 著
可儿贤二 大附辰夫

胡国元 张正德 译

刘盘泉 校

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

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

1988年5月第一版 开本: 850×1168 1/32

1988年5月第一次印刷 印张: 8 1/2 插页: 1

印数: 0001—3,100 字数: 220,000

ISBN 7-03-000369-1/TN·17

定价: 3.60 元

译 者 的 话

随着微电子技术的不断发展,半导体集成电路进入了 LSI (大规模集成电路)和 VLSI (超大规模集成电路)时代。由于 LSI 和 VLSI 所具有的高功能和高可靠性,使它成为发展电子工业的基础和核心。而 VLSI 的电路设计和版图设计又是发展 LSI、VLSI 的关键,特别是 CAD (计算机辅助设计)技术的应用更是在先进的集成电路设计中必不可少的。为此,我们翻译了日本岩波书店出版的“微电子学丛书”之三*——《VLSI 设计 I 电路与版图设计》。本书以 CAD 技术在电路设计和版图设计中的应用为重点,按照 VLSI 设计流程的顺序,由浅入深地介绍了 VLSI 设计的各个重要步骤。全书共五章,作为全书的引言部分,第一章首先介绍了 VLSI 的意义、现状和 VLSI 的设计方法及组装设计;第二章则介绍作为 VLSI 基础的基本元件及其特性以及 MOS 型、双极型基本逻辑电路和功能电路;第三章介绍电路模拟程序。其中包括电路方程式的建立、求解方法以及电路模拟中用到的晶体管模型,最后两章则分别介绍了有关计算机辅助版图设计的格式化方法、算法,以及版图设计的验证。

本书第一、二、五章由胡国元翻译,第三、四章由张正德翻译。

由于译者水平所限,书中难免有不妥之处,请读者批评指正。

胡国元 张正德

1986 年 12 月

* 该丛书各册将由科学出版社陆续出版。其中,“微电子学讲座”之六——《微型计算机程序设计》已于 1988 年 2 月出版。——译者注

原 编 者 的 话

随着大规模集成电路技术的不断发展,迎来了超大规模集成电路时代。现在,大规模系统已经能够集成在一个 VLSI 芯片内,因而,面向 VLSI 的系统设计技术,以及把这些 VLSI 组合起来构成巨大系统的技术,在目前均被看作是微电子学的一部分。

本讲座中所介绍的微电子学就是这种广义的微电子学。VLSI 的发展将给今后的社会带来巨大的影响,因而,本讲座的目的就是要集中介绍设计、制作 VLSI、VLSI 计算机、通信、机械电子学等信息系统所必须的理论和技术。

然而,LSI 技术也是一个诞生时间不长,并且发展十分迅速的领域,至于它将以何种形态向前发展,其可能性是很多的,所以,若想把它作为已确立的学科体系加以总结,还有许多困难。因此,本讲座的目的是:

(1) 向关心微电子学的初学者和准备应用微电子技术的人们介绍有关微电子学的基础知识。

(2) 作为在计算机、通信、机械电子学领域工作的技术人员和研究人员的实践指南。

(3) 把掌握微电子学所必须的基础知识和技术明确化、系统化。

(4) 把微电子学作为一个新的学科进行系统化,并使其成为向理想教学用书迈进的里程碑。

希望本讲座能成为学生、技术人员、研究人员的良师益友。

元冈 达 菅野卓雄

渡边 诚 渊 一博 石井威望

前 言

本讲座中,第3、4两卷将介绍 VLSI 的 CAD 技术。以前,对微电子学的介绍,几乎总是局限于或者只讲器件本身,或者只介绍用户的使用方法,或者是重点研究它们之中的某一方面。随着器件结构日趋复杂,如何有效地利用器件功能就显得更加迫切。因此,微电子学只要以标准的存储器和微处理器作为主体,上述研究还是有其实际意义的。

但是,随着 LSI 应用领域的进一步扩大,当进入到所谓的客户 VLSI 时代,VLSI 的用户也必须积极参与它的设计。在这种情况下,只掌握那些旧的知识是不够的,必须要对 VLSI 的本质有更深入的理解。本讲座正是从这一立场出发,以加深对微电子学的综合理解为目的,在第1卷及第2卷中对器件作了介绍。可以说,这一部分介绍的是器件的硬件。与此相对应,第3卷和第4卷的内容则可以看作是器件的软件,而其主要问题就是讨论怎样在硅芯片上实现所希望的功能。

用计算机设计硬件这一想法并不是发展到今天的 VLSI 时代才开始的。在本世纪六十年代,CAD 技术就已被广泛应用于计算机的逻辑设计及电子线路的设计中。后来,随着半导体器件的日益复杂,CAD 的应用范围也从计算机印制板的设计延伸到硅芯片的设计。而且,由于其应用范围扩大到 LSI 的设计中,也使 CAD 技术本身得到了进一步的发展。对于 LSI,由于设计复杂、发现错误和修正错误困难等原因,所以,极需使用高性能的 CAD 技术。在设计当代先进的 LSI 时,如果不使用 CAD 技术就将寸步难行。

目前,VLSI 不仅广泛应用于电子设备中,而且也进入到工业机械、民用设备等广阔的领域,随着 VLSI 应用领域的扩大,参加

VLSI 设计的人员一定要能够自如地使用 CAD 这一工具。这不仅是对电子行业技术人员的要求，就是在其他有关领域中工作的人们也都需要具备这方面的基础知识。这就如同计算机的高级语言一样，作为编写软件的工具，它不仅是电子技术人员，而且也是其他方面众多人员对话的共同语言。为了广泛推广 CAD 这一工具，就必须在教学等部门积极使用它们，这样作，将来定会取得明显的效果。

如同 LSI 一样，现在，CAD 也正处于急速发展的过程中。由于高性能计算机的廉价使用，使得 CAD 变成了比较容易使用的工具。然而，尽管同称为 CAD，其功能却千差万别。当然，收集这方面的资料已不是本书的目的。与其长篇累牍地叙述，倒不如详细介绍作为 CAD 基础的那些基本思想，以尽量加深理解。

本书第 3 卷侧重介绍与器件关系密切的 CAD，亦即介绍与电路和版图设计有关的 CAD 技术。第 4 卷将介绍与系统设计较接近的 CAD 技术。电子线路的 CAD 虽然较早进入实用领域，但也是几经改进才达到今天这种水平。本书第二章将介绍硅芯片上的基本电路，第三章介绍与电路有关的 CAD，由于电子线路的 CAD 应用范围非常广，所以，大家都应该了解这方面的知识。

本书第四、五两章将介绍与版图设计有关的 CAD 技术。这一领域，虽然很早就取得了进展，但达到实用水平还是前不久的事情。客户 LSI 中的器件布局、布线与器件的设计思想密切相关，所以各种算法也要按其不同情况分别使用。在芯片上实现所要求复杂功能的方法以及实现方法的验证均是非常高超的技术，本书将充分介绍这些出色的技艺。

但是，VLSI 的 CAD 依然还处在 CAD (Computer Aided Design: 计算机辅助设计) 的水平，尚未达到 DA (Design Automation: 设计自动化) 的阶段。在现在的情况下，不管 CAD 的程序功能如何强，它们仍然是辅助人们工作的工具。例如，在现有条件下，完全自动化的版图设计虽然不是不可能实现，但若把用 DA 设计出的产品与用人工介入的设计相比，前者在性能、芯片面积等

方面仍有相当的差距,希望读者在阅读本书时,能够充分理解“掌握和运用 CAD 的是人”这一思想。

最后,向为本书出版发行作出贡献的岩波书店编辑部的各位先生致以深切的谢意。

渡边 诚

浅田 邦博

可儿 贤二

大附 辰夫

1984年11月

• ▼ •

目 录

第一章	VLSI 设计的发展趋势	1
1.1	VLSI 概况	1
1.2	VLSI 的设计方法	10
1.3	封装设计	16
第二章	基本电路	23
2.1	基本元件及其特性	23
2.2	MOS 型基本逻辑电路	49
2.3	MOS 型功能电路	72
2.4	双极型基本逻辑电路	88
第三章	电子电路模拟	105
3.1	电路设计和模拟	105
3.2	电路方程式	115
3.3	电路方程式的数值解法	123
3.4	器件模型	140
第四章	版图设计	153
4.1	版图设计概要	153
4.2	逻辑电路的划分与分配	177
4.3	布局处理算法	182
4.4	布线处理算法	190
4.5	符号式版图设计	203
4.6	对话式版图设计	207
4.7	版图设计问题的计算复杂度	213
第五章	版图设计的验证	222
5.1	掩模版图形分析	223
5.2	几何学检查	232

5.3 电路连接检查	235
5.4 电特性检查	239
5.5 计算几何学中的算法与数据结构	242
参考文献	254
索引	257

第一章 VLSI 设计的发展趋势

作为 VLSI 设计的引言部分,首先简要介绍一下 VLSI 的意义、现状、动向及设计方法等。

如果从物理学观点来看, VLSI 就是一块组件,它是把许多个微电子学所用的元件集成在一个硅芯片上的组件。但是,更确切地讲,只要集成了许多元件,它就已经超出电子部件的范围,而可以等效成具有一定功能的系统了。因此,规划、设计及制作 VLSI,是多个技术领域的综合和汇集,而与此工作有关的人员,都必须掌握 VLSI 的基本技术知识。

虽然本章是综述有关 VLSI 设计所必须的基本事项,但从上述的意义来看,可以说这一部分内容应该是与微电子学有关的全体人员所共有的知识。这里,首先叙述一下 VLSI 在电子工业中所占的地位,然后介绍它的技术现状与动向以及 VLSI 的设计方法与设计的发展趋势,最后介绍与 VLSI 设计密切相关的封装技术。就是说,在以 VLSI 设计为中心的同时,也要叙述作为纵向关系的这一技术的过去与将来以及作为横向关系的器件及封装技术,以描绘出作为多项技术集大成的 VLSI 技术体系的全貌。

1.1 VLSI 概 况

1.1.1 VLSI 及其动向

过去,电子工业是一种把许多元件组合起来实现复杂功能的组装工业。在这种情况下,相当大的一部分成本是花费在组装工程上,也就是说,电子部件间连接布线的设计、制作、检查占去了大部分工作量。这样,可实现的装置规模和性能就要受所采用的部件数、物理尺寸、可靠性的限制,而在另一方面,在复杂系统和装置

的设计试验中,又早已引入了计算机辅助设计(CAD)技术,并达到实用化。

可以从不同的角度评论微电子学从 IC 到 LSI 一直发展到 VLSI 的意义。从历史的观点来看,最初,IC 是以其小型化、轻量化的特点,由一些特殊应用而引人注目的,而这种在硅芯片上作出包含相互连线的许多部件的 IC 技术,必然会促进它的大规模集成化(LSI 化),随着电子电路的“经济化”,可以同时实现它的“高性能化”及“高可靠性”化。

这种技术发展,正在引起上述电子工业性质上的大变化。内部包含有相互连线的电子部件的出现,在硬件方面引起电子工业内部成本分配的转移以及部件和系统间界限的变动。同时,为那些比较复杂而又要求高性能的装置开辟了一条经济化的实现途径。

在这里,特别引人注目的是按 Moore 定律¹⁾象征性地描述的

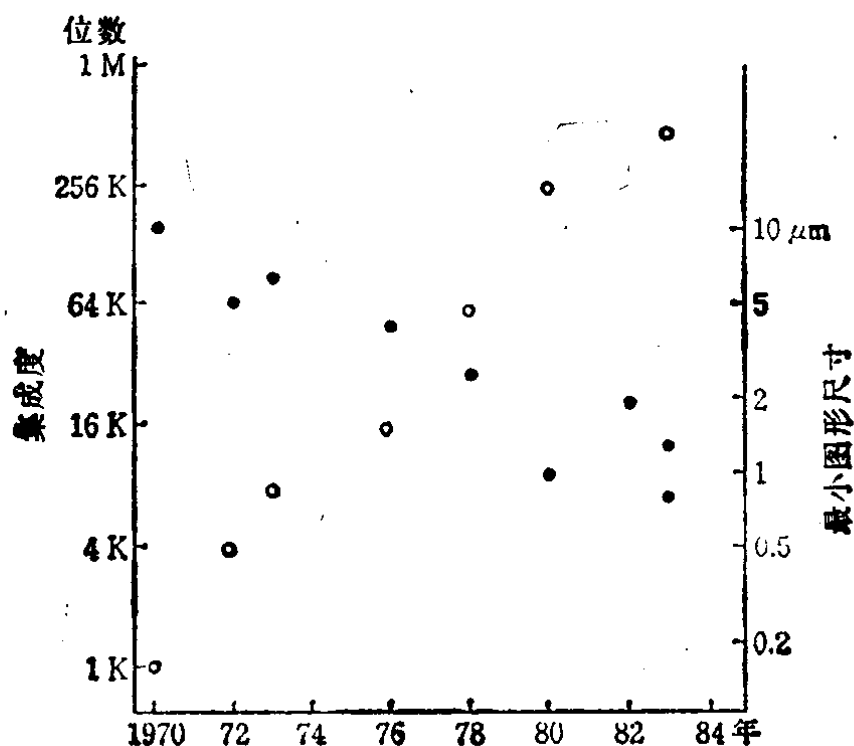


图 1.1 存储器 LSI 的发展。黑点表示最小图形尺寸(微米),白点表示集成度(位/芯片)

1) Moore, G. E.: Progress in Digital Integrated Electronics, *IEDM Digest of Tech. Papers*, 1975, pp. 11-13.

技术革新速度。LSI 化所带来的种种效益是如此之大，以至足以收回为开发该技术所进行的大量投资。同时，由于技术革新的需要，新的要求不断出现，生产规模也急剧扩大。图 1.1 示出了本世纪七十年代存储器 LSI 的集成度与所用的最小线宽的演变过程。虽然此图中没有表示出可靠性和经济性，但是，根据经验，随着集成度的提高，其可靠性和经济性也会得到改善。

使这种技术革新成为可能的主要因素是工艺技术和设计技术的发展。前者，以微细加工技术为代表。由于器件的小型化，就可以同时实现由按比例缩小规则 (scaling rule)¹⁾ 公式所给出的高性能化及由芯片面积缩小而带来的经济化。

代表后者的就是 CAD 技术。随着集成度的增大，LSI 已经和系统设计不可区分，甚至发展成与之等价，过去在系统级使用的 CAD，也开始应用到硅芯片设计上。在 VLSI 设计中，必须有比系统设计功能还要强的 CAD 系统。现在，没有 CAD 就不可能考虑进行 VLSI 设计。为此本讲座用了两卷的篇幅介绍 VLSI 的设计，其内容侧重介绍 VLSI 设计所用的 CAD。第 3 卷，《VLSI 的设计 I》介绍与器件关系密切的部分，亦即介绍与器件、电路、版图设计相关的 CAD，第 4 卷，《VLSI 的设计 II》则介绍与系统较接近的 CAD，亦即介绍与逻辑、功能、检测有关的 CAD。虽然各章内容是分开的，但作为 CAD 系统，这两卷所述内容是一个有机的整体。

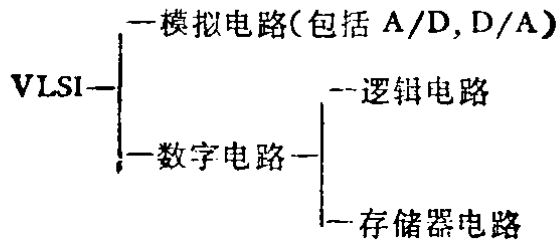
1.1.2 VLSI 的分类

根据功能分类 根据内部电路功能，可将 VLSI 大致分为模拟电路和数字电路两大类。前者包括 A/D 和 D/A 转换电路，后者可再分为逻辑电路和存储器电路(参看表 1.1)。在实际的 VLSI

1) Dennerd, R. H., Gaensslen, F. H., Yu, H. N., Rideout, V. L., Basso, E. B., LeBlanc, A. R.: Design of Ion-Implanted MOSFETs With Very Small Physical Dimensions, *IEEE JSSC*, Vol. SC-9, No. 5(1974), pp. 256-268.

中,也有不少把这些功能电路组合起来制作在一块芯片上的情况.因此,不可能利用这种分类把全部的 VLSI 区分开.

表 1.1 VLSI 的功能分类



在 VLSI 中,大多数情况下是使用数字电路,这是因为 VLSI 对数字信号的适应性强.就是说,与模拟信号相比,虽然数字信号需要占用较多的器件和信号频带,但它具有可用同类器件构成电路和可使电路功能一般化、通用化以及便于信号存储等优点.与此相反,模拟电路则必须根据所要求的对象信号及功能种类一个一个地构成电路. VLSI 的批量生产性能,即在芯片上以低的成本获得大量器件的能力,以及类似微处理器那样,由于和软件相结合而使芯片具有通用性功能等,都有力地显示出 VLSI 非常适合于制作数字电路.作为一个具体例子,表 1.2 比较了滤波器的实现方法.以前的 *LC*、*RC* 滤波器是以分立器件或混合 IC 的方式制作的,这要用符合规格的多种精密部件.与此相反,最近采用了一种器件数目相当多的单块型开关电容滤波器,这样在一个芯片上就可以实现整个电路功能同时也降低了电路成本.随着 VLSI 技术的进一步发展,随着包括 A/D, D/A 的单片数字滤波器的通用化,滤波器成本还会降低.这样, VLSI 中采用数字形式的信号处理更具有普遍性.所以,本讲座着重介绍数字 VLSI 的 CAD 技术.

根据器件和电路分类 在半导体上可实现的器件和电路的种类是很多的,但作为可实现的 VLSI,则仅限于硅的双极和 MOS 系列两类,下面就此范围加以介绍.

双极系列通常是高速电路,但功耗大、工艺复杂,而且需要占用较大的芯片面积. MOS 系列大致和它相反,这也正是 VLSI 较多采用 MOS 系列的原因.通过较为详细的分析可以知道,对于

那些必须在高速或高频情况下工作的电路,应使用双极电路;一般情况下,则可使用 MOS 电路,而对要求低功耗情况的,则使用 CMOS 或 IIL 电路。在日本,很早就注意到把 CMOS 电路应用于台式电子计算机等方面。最近,为了抑制随集成度增大而引起的功耗增加,常常选用 CMOS 电路,尽管它比 NMOS 要多占用一些芯片面积。

表 1.2 制作滤波器的各种技术

名 称	基本工作原理	元 件 数	注
LC 滤波器	模 拟	少	高精度 LC 电路(分立器件)
RC 滤波器	模 拟	↑	高精度 RC 电路(混合组装 IC)
开关电容滤波器	模 拟	↓	相对精度较高的 C 电路(单块 IC)
数字滤波器	数 字	多	A/D、D/A 转换电路(单块 IC)

可用于 VLSI 的器件和数字电路形式有很多种(如表 1.3 及图 1.2 所示),应当根据它们的性能(速度)、功耗、芯片占有面积等选择使用。有时也在同一系统或同一芯片上混合使用多种器件或电路,但是,这种情况下,必须在不同的电路间保持信号电平的互换性。在数字电路中,以 TTL 电平作为芯片间的标准逻辑电平。在芯片上,又常把电路形式划分为仅在芯片内部工作的电路与可通过引线端驱动外部的两种电路形式。对仅局限于内部工作的电路,应当选择结构简单、逻辑电平低、功耗小、占有面积小的电路形式;而在对外的电路中,要采用能够驱动布线电容的电路形式,根据需要在芯片内进行这两部分电路的电平匹配。

1.1.3 成品率和成本

用 VLSI 制作的电路的成本正随着加工尺寸的微细化而降低。简言之,芯片成本是与芯片面积成比例的,如果电路尺寸微细

表 1.3 硅 LSI 的构成元件、电路形式、结构分类表

构成元件	电路形式	结构
MOS 型 PMOS NMOS CMOS	E/E NMOS E/D NMOS	体结构 SOI 结构
双极型	CML (ECL) 系列 CML (ECL) LCML TTL (T ² L) 系列 TTL L ² TTL HTTL IIL (I ² L) 系列 IIL SITL	STTL

表中,

CML: 电流型逻辑 (Current Mode Logic)

ECL: 发射极耦合逻辑 (Emitter Coupled Logic)

LCML: 低电平 CML (Low Level CML)

TTL: 晶体管-晶体管耦合逻辑 (Transistor Coupled Transistor Logic)

L²TTL: 低电平 TTL (Low Level TTL)

HTTL: 高电平 TTL (High Level TTL)

IIL: 集成注入逻辑 (Integrated Injection Logic)

SITL: 静电感应晶体管逻辑 (Static Induction Transistor Logic)

SOI: 绝缘物上硅 (Silicon On Insulator)

STTL: 肖特基箝位 TTL (Schottky TTL)

化,那么单位电路的制作成本就会降低。除芯片面积外,决定成本的主要因素还有成品率。由于 VLSI 是经过几百道精细工序制作而成,因此,即使每一道工序的成品率都很高,但最终,从原材料到成品之间的总成品率仍会很低。

VLSI 的成品率是随着工艺复杂度、芯片面积、工作环境及操作者的熟练程度而变化的。从工艺简单的观点来看, MOS 电路比双极电路有利。芯片面积的增大会使成品率下降。因为电路所

占面积的增大就使得在一个硅片内可制作的芯片数减少，这就相当于降低了成品率，芯片成本也相应提高了。与此相反，通过缩小加工尺寸来节省芯片面积，虽然会增加工艺难度，但它可带来单位电路成本的下降。因此，应当为重点开发微细加工技术作更大的努力。

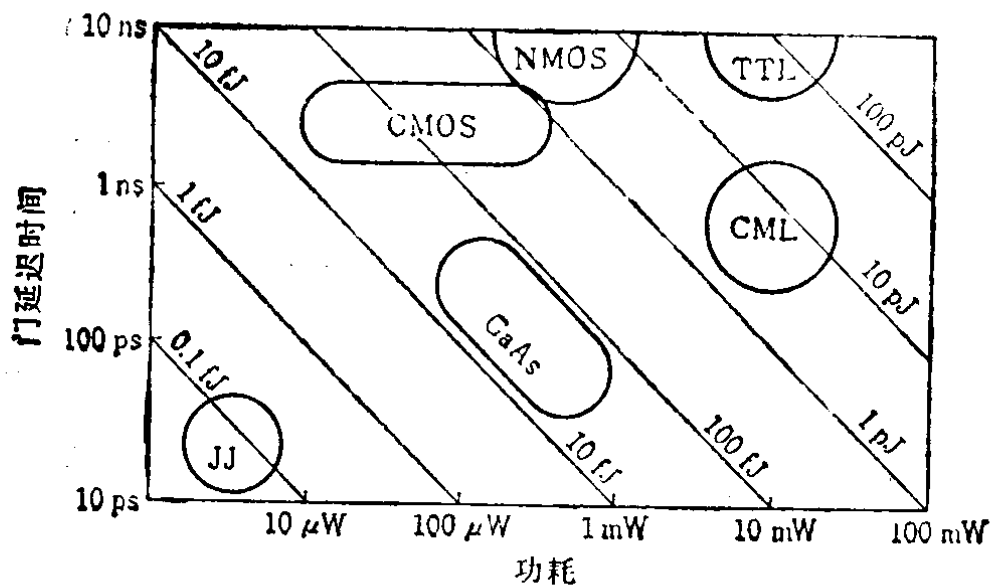


图 1.2 主要器件的门延迟时间与功耗的关系 (1985 年前的概况). $p = 10^{-18}$, $t = 10^{-15}$. JJ 表示约瑟夫森结

关于操作者的熟练程度，需要先熟悉一下所谓的学习曲线 (learning curve, 也称为经验曲线: experience curve). 工业产品的一般趋势是随着生产量的增加, 成本下降; 这可用以横轴对数坐标表示累积生产量, 纵轴对数坐标表示成本的坐标系中的一条斜率近似不变的直线来表示。在半导体工业中, 这种趋势特别显著, 一般认为, 平均生产规模每扩大一倍, 其成本约降低 30%。这就是学习曲线, 它促成了半导体产品的批量生产特性, 也成为半导体工业中激烈竞争的根本原因。

如上所述, VLSI 的成本是由许多因素决定的。到现在为止, 我们所说的成本, 只是与制作直接相关的所谓学习成本, 除此之外, 在 VLSI 中, 还必须加上一个以设计试制费用为主的初期投资。这种设计试制费用, 随 VLSI 的日趋复杂而急剧增大。在某一品种生产量很大的情况下, 初期投资分摊到大量产品上, 这样对

每一个 VLSI 成本的影响很小。但是，如果生产量很小，初期投资就会在产品成本上造成大的负担。从此意义上讲，也应当强调 VLSI 的大批量生产。

为了降低设计费用，就要从下面将分别介绍的 CAD 应用、设计投资及设计者个人经验的活用等几个方面进行努力。

1.1.4 VLSI 的实现形式

从上述的 VLSI 批量生产适应性来看，希望 VLSI 尽可能有通用性，以便能大量地生产销售。而另一方面，随着一个芯片上电路规模的增大与复杂化，这样的—个芯片就几乎与系统本身相等价，这时，最好针对该系统进行专门设计。也就是说，通用性和专用性是两个互相矛盾的要求，必须根据不同的侧重点采用不同的方法来实现。

对于侧重于通用性的 VLSI，例如微处理器及存储器。它们是提取出各种系统中通用的或可通用化的功能，在芯片上赋之实现的。它们是由 VLSI 制作厂家先行设计制作的。这种 VLSI 可大量生产，因此，降低价格(每位功能价格)的竞争很激烈。但是，由于通用性产品不一定能完全符合系统的要求。因此，往往要求针对实际系统进行特殊设计的专用产品。这就使专用电路，亦即客户 VLSI 应运而生。

根据实现的方法可把客户电路分为全客户的与半客户的两种。全客户电路是为实现专用 VLSI 而对芯片整体进行重新设计制作的。因此，它必然地具有完全符合系统要求的高性能，而且制作芯片面积小。这种电路，在批量生产时，有希望获得经济效益，但是，在设计试制中，需要很大的工作量和时间。所谓的半客户电路是一种简易定做电路，制作过程的前一段是公共的，而在以后的过程中，则进行专门制作(定做: customizing, 也称专用化)。这种电路有门阵列、PLA、ROM 等品种。其中，ROM 是固定存储器，它可与微处理器等组合，实现系统所要求的功能。PLA 与 ROM 相类似，但它是以规则的逻辑门为出发点，实现专用化 (persona-

• • •