第3卷 第2期 半导体学报 Vol. 3, No. 2
1982年3月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTOR Mar., 1982

LSI CAD 制版中的基本单元自动选择

庄文君
(中国科学院半导体研究所)

1981年2月16日收到

提 要

本文讨论了应用双台面图形发生器进行CAD制版时的基本单元自动选择。提出了基本单元选优的目标函数及版图单元判别的双参数集比较法. 提出了版图单元两种基本的分划模式以及控制这两种分划模式的最小整体分划阈值的概念. 最后讨论了自动选择的逻辑过程和选择过程中等价图集的归并.

一、引 言

随着集成电路的规模越来越大，利用图形发生器进行制版的效率越来越成为一个严重的问题. Gerald 对美国38家公司采用台面速度为63.5mm/sec的EM-2000可变光阑图形发生器制版情况的统计如表1[1].

表 1

组 别	版图图案分解成长方形的数目	版 数	占百分数	工作时间(分)	占百分数	平均时间(分)
1	1.000以下	520	42%	2.038	0.5%	4
2	1.000--20.000	675	55%	21.825	59.5%	32
3	20.000—50.000	26	2%	5642	14.0%	217
4	50.000—500.000	12	1%	10321	26.0%	860

为了提高制版效率和成功率，近年来国内一些单位相继研制了双台面图形发生器. 对于版图图形重复性较好的电路，其掩膜制作的效率明显地提高. 据我所杨柳林，田肇雪和本文作者对使用我所台面速度为1.5mm/sec的积木式双台面图形发生器[2]的制版情况统计如表2.

由上述典型电路的制版情况可见，尽管图形发生器台面速度相当低，基本矩形只有有限的几个，而其制版效率却已基本上与EM-2000相仿.

然而，采用了双台面图形发生器后，由于增加了上台面基本单元的选择、制作，就要求版图设计人员充分考虑图形发生器的工作特点，对版图进行统计，对版图单元进行合理分

表 2

版 图 名 称	版图图案分解成长方形的数目	设计状况	制版时间(分)
256 MOS 动态移位寄存器	3200	一般	60
1024 MOS 动态移位寄存器	13200	好	80
256 双极半译码 RAM	2200	好	30
4096 MOS RAM 氮化硅版	33000	一般	390

划，选择合理的基本单元集，才能使双台面图形发生器能充分地发挥其效能．这就增加了设计人员的工作量，延长了制版周期．此外，在逐步推进版图自动设计的工作中，双台面图形发生器基本单元的自动选择也成为必须解决的一个问题．

本文讨论的就是如何应用计算机对版图的基本单元进行自动选择．

二、基本单元集的优选目标函数

在双台面图形发生器工作过程中，由于上台面一个基本单元在下台面上的一次曝光成象，就可等效于可变光阑或基本矩形的多次曝光成象，因而提高了制版效率．我们容易确定当采用一个基本单元后，在制版全过程中可减少的曝光次数 f_a 为

$$f_a = n \cdot (q - 1) - q$$

其中：n 为该基本单元在版图上出现的总次数，

q 为基本单元图案分解成长方块的最小数目．

因此，一个上台面基本单元集在制版过程中可减少的总曝光次数 F_a 为

$$F_a = \sum_{i=1}^{k} [n_i \cdot (q_i - 1) - q_i].$$

其中：k 为上台面基本单元数．

显然，F_a 是所选基本单元集的一个函数，不同的基本单元集将分别对应着一个 F_a 值．因此，我们可以将 F_a 作为基本单元集优选的目标函数，即对于一个指定的版图，选取的基本单元集所对应的 F_a 值越大，则认为该基本单元集越合理．

如果我们着重考虑由于采用了上台面基本单元集而在整个制版过程中所减少的下台面行程，则相应的优选目标函数 s 为

$$s = \sum_{i=1}^{k} [q_i \cdot (n_i - 1) - n_i] \cdot \bar{d}_i.$$

其中：$\bar{d}_i$ 是第 i 个基本单元的图案在版图上的平均间距．

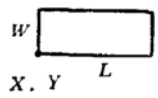
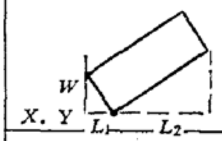
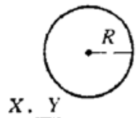
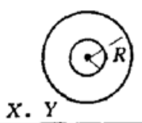
在实际工作中，采用 F_a 作为上台面基本单元集优选的目标函数已能很好地满足需要，因此本文中以 F_a 为所讨论的目标函数．

三、版图单元及其分划

一般说来，无论 LSI 或 VLSI 其基础总是有限种类的基本电路．与之相应，在 LSI 或 VLSI 版图上，也可认为，存在着相应的版图单元．

定义：在版图上，矩形、斜矩形、圆、环称为图元．其形状参数和基点的定义见表 3.

表 3　图元形状参数和基点的定义

图　　元	形状参数	基点
	L, W	X, Y
	L_1, L_2, W	X, Y
	R	X, Y
	R, r	X, Y

设版图上存在一个图元集

$B_1=\{b_{11}, b_{12}, \cdots b_{1i}\}$．其中 $b_{11}, b_{12}\cdots b_{1i}$ 分别为图元集中的一个图元，其相应的基点为 $x_{11}, y_{11}; x_{12}, y_{12}; \cdots x_{1i}, y_{1i}$．则图元集 B_1 的基点 x_1, y_1 定义为

$$\begin{cases} x_1=\min x_{1i}, & x_{1i}\in\{x_{11}, x_{12}, \cdots x_{1i}\}, \\ y_1=\min y_{1i}, & y_{1i}\in\{y_{11}, y_{12}, \cdots y_{1i}\}. \end{cases}$$

图元集 B_1 存在着两个相应的参数集 D_{11} 和 D_{12}

$D_{11}=\{F_{11}, F_{12}, \cdots F_{1i}\}$，其中 F_{1i} 为 b_{1i} 所对应的形状参数．

$D_{12}=\{S_{11}, S_{12}, \cdots S_{1i}\}$，其中 S_{1i} 为图元 b_{1i} 基点与图元集 B_1 基点 x_1, y_1 的相对坐标 x'_{1i}, y'_{1i}.

$$\begin{cases} x'_{1i}=x_{1i}-x_1 \\ y'_{1i}=y_{1i}-y_1 \end{cases}$$

对于版图上非图元的图形，如直角多边形，可通过图形转换[3]，转换成一个矩形图元集.

根据上述定义，若版图上存在图元集 $B_1, B_2, \cdots, B_n$，如满足下述条件：

① $$B_i-B_k=\phi,\quad B_i, B_k\in\{B_1, B_2\cdots B_n\},$$

② $$\begin{cases} D_{i1}=D_{11} \\ D_{i2}=D_{12} \end{cases}\qquad i=2, 3, \cdots, n.$$

则称 B_1 为该版图的一个版图单元，且在版图上出现了 n 次.

覆盖版图单元所含全部图元的最小矩形域称为版图单元的域. 其矩形边界称为版图单元的边界. 版图单元边界内(含边界)的任一矩形域称作版图单元的子域.

版图单元是选择上台面基本单元的对象，但上台面每个基本单元的线度受台面的限制，为一定值 L_0，因此选作基本单元的图集边界也必须限制在线度 L_0 之内. 所以，当版图单元边界线度大于 L_0 时，基本单元只能是版图单元的一个子域. 为此，在很多情况下，必须对版图单元进行分划. 我们认为，存在着两种可行的分划模式，即密集子域分划和最小整体不均匀分划.

1. 密集子域分划

定义：子域内所含版图单元的完整图元称为有效图元.

密集子域分划就是在版图单元边界内求子域 b_{max}，使 b_{max} 满足

① b_{max} 子域的边界线度 $\leqslant L_0$，

② b_{max} 子域内的有效图元数 $q_{max} \geqslant q_i$.

$q_i \in \forall$ 版图单元线度为 L_0 的子域的有效图元数.

则 b_{max} 称为版图单元的密集子域.

显然，这种分划模式可以严格地求得版图单元有效图元的密集子域. 但是这种分划模式存在两个问题：

① 在分划过程中，子域边界对某些图元将进行切割. 此时，有的图元如斜矩形、圆、环由于不允许被切割，因此不能将其在子域内的部分选入基本单元，但由于这些图元在版图单元中占的数量相当少，而且在软件中采取了一些相应措施，因此对结果的影响并不重要. 而大量出现的矩形图元若被切割，将严重影响这种分划模式的结果. 一个矩形图元若被子域边界切割，将被分为 2—5 个图元，子域内仅能包含其中的一个图元. 此时，若将子域内包含的部分选入基本单元，由于所余部分图元数肯定≥1，因此，选取这个切割的部分对减少制版过程的总曝光数或是没有贡献，或是反而造成损失. 所以，只有子域边界内未被切割的图元才对减少总曝光数是有效的. 换言之，只有当子域边界切割的图元数比较少，子域内能包含足够多的有效图元时，这种分划模式才是比较适宜的模式.

② 密集子域分划模式对一个版图单元进行一次分划只能求得一个密集子域. 它不能保证以最少数量的子域覆盖版图单元的全部图元. 因此，当一个版图单元由于平均图元密度比较高而可能全部选入基本单元集时，这种分划模式将需要比较多的基本单元数而降低了基本单元的平均图元数.

因此，这种分划模式适用于版图上图元平均密度较低而图元密度不均匀，且有效图元密集的版图单元的分划.

算法上可采用变步长搜索法以提高处理效率，具体实现方法从略.

2. 最小整体不均匀分划

求最少数量的子域(各子域线度 $\leqslant L_0$)覆盖版图单元的所有图元称作最小整体分划. 为了提供分划方式控制的信息，在具体实现时，目标修改为求尽量少的线度 $\leqslant L_0$ 的子

域，使之覆盖版图单元的全部图元，且尽量使各子域所含图元数比较悬殊．这种分划模式称为最小整体不均匀分划．

显然，当版图单元由于平均图元密度比较高而可能全部选入基本单元集时，这种分划模式所需的基本单元数可比较少．此外，这时版图单元中所有被子域边界切割的矩形都是有效的．从而提高了基本单元的平均图元数而有利于获得较高的优选目标函数 F_a 值．

因此，这种分划模式适用于版图上图元平均密度比较高，版图单元中图元密度比较均匀的版图单元的分划．算法上可采用双割线法，本文从略．

由上述可知，存在着两种分划模式，分别适用于不同特点的版图单元．由于所涉及的"图元平均密度比较高"，"版图单元中图元密度比较均匀"等概念都是一些相对的、模糊的概念，取决于每一个具体版图的特点和版图单元构成间的相对情况．因此，一般说来，要严格地求得 F_a 的极大值所对应的基本单元集并不是一个容易解决的问题．而关键在于如何对各个具体的版图单元决定具体的分划模式．

3. 最小整体不均匀分划阈值 U

我们已经了解分划方式的确定取决于版图单元的图元平均密度，以及版图单元内图元密度的均匀程度．自然，版图单元在版图上的出现次数也是影响它能否被选中的重要参数．

我们认为，用版图单元的平均优选目标函数 $\bar{f}_a$ 值可较好的描述上述诸因素的影响．

定义：决定版图单元采用最小整体不均匀分划的平均优选目标函数的下限值称为最小整体不均匀分划阈值 U．

设版图上第 j 个版图单元进行最小整体不均匀分划，求得子域数为 m_j，其中各子域所对应的优选目标函数值为 f'_{ai}，则该版图单元的平均优选目标函数值

$$\bar{f}_{aj} = \left(\sum_{i=1}^{m_j} f'_{ai}\right) \Big/ m_j.$$

定义：P_j 为该版图单元被选中的下限权重．

$$P_j = \min\{f_{ai}\}, \quad f_{ai} \in \{f'_{a1}, f'_{a2} \cdots f'_{amj}\}.$$

对一具体版图，设共有 j 个版图单元，各版图单元平均优选目标函数值的集合为 A．

$$A = \{\bar{f}_{a1}, \bar{f}_{a2} \cdots \bar{f}_{aj}\}.$$

设 $U_1 = \max\{\bar{f}_{aj}\}, \quad \bar{f}_{aj} \in \{A\},$

$U_2 = \max\{\bar{f}_{aj}\}, \quad \bar{f}_{aj} \in \{A\}$　且 $\bar{f}_{aj} \neq U_1,$

$\vdots \qquad \vdots$

$U_k = \max\{\bar{f}_{aj}\}, \quad \bar{f}_{aj} \in \{A\}$，且 $\bar{f}_{aj} \neq U_1, \bar{f}_{0j} \neq U_2, \cdots, \bar{f}_{aj} \neq U_{k-1}.$

则最小整体不均匀分划阈值 $U = U_{k+1}$，U 满足下述各条件：

$$\begin{cases} U_{k+1} = \max\{\bar{f}_{aj}\}, \bar{f}_{aj} \in \{A\}, \quad \text{且 } \bar{f}_{aj} \neq U_1, \bar{f}_{aj} \neq U_2, \cdots \bar{f}_{aj} \neq U_k, \\ \sum_{i=1}^{k} m_i < W - \delta, \\ \left(\sum_{i=1}^{k} m_i\right) + m_{k+1} \geq W - \delta. \end{cases}$$

其中：W 为上台面基本单元总数，

δ 为阈值参量，根据版图特点可取 0 到W的任何正整数，本文中定义 $\delta=0$.

利用阈值 U 可有效地决定各版图单元应采用的分划模式．即只有满足下述各条件的版图单元，可采用最小整体不均匀分划选优．

① 该版图单元对应的 $\bar{f}_{aj}$ 值是当前所有未分划选优的各版图单元所对应的 $\bar{f}_a$ 值中的最大值；

② $\bar{f}_{aj}\geqslant U$；

③ $P_j\geqslant U$；

④ $m_j\leqslant w'$，w' 为当前待选基本单元数．

不满足上述条件的版图单元采用密集子域分划选优．

实验结果表明，这种分划模式的控制是相当有效的．求得的 F_a 值是相当理想的．

四、图集的归并

版图单元所覆盖的图元集常常存在着几类不同的构成情况．设版图单元 B_1，B_2 覆盖的图元集为 R_1 和 R_2．R_1 由子图元集 $r_1, r_2, \cdots r_i$ 的合集构成，R_2 由子图集 $r'_1, r'_2, \cdots r'_i$ 的合集构成．则图元集 R_1 和 R_2 可能具有下述三类构成情况．

① 构成 R_1 的各子图集都相同；

② 构成 R_1 的各子图集中有一些是相同的，同时也含有不相同的子图集；

③ R_1 和 R_2 的各子图集中有一些是相同的，即 $r'_1=r_1$，$r'_2=r_2$，$\cdots$，但也含有各不相同的子图集．

显然，在基本单元的选择时，应该对此予以足够的考虑，原则上，当相同的子图集足够大时，应进行归并处理并作为一个独立的版图单元．算法上可采用印模算法(本文从略)，但这将化费大量的机时．我们在处理中，采用分类处理的方法．在第一种构成时，当版图单元边界线度大于 L_0，且所含子图集内的图元数足够多时，将子图集进行归并处理，作为新的版图单元，并同时修改其在版图上的出现次数．对于第二、三类构成，则在分划选优的过程中分别对分划得到的子域所覆盖的图元集与已选中的基本单元进行比较，判别和归并处理．这样，就提高了处理效率，提高了软件资源的利用率，其结果也是令人满意的．

五、版图单元的数据结构

为了适应版图单元的统计，图集归并及分划选优，必须有一个与之相应的合理的数据结构．这种数据结构应能适应不同性质与构成的版图单元．我们设计了一种可伸缩的、内部链接的、三模块式的数据结构．整个版图单元的数据结构分为基本块、内部归并信息块、分划信息块三部分．(如图 1) 基本块的信息包括：版图单元在版图上的位置、版图单元在版图上的出现次数、版图单元的边界、版图单元所含图元数、版图单元最小整体不均匀分划的子域数、版图单元对应的平均选优目标函数值和入选下限权重 P_j 等．它的长度

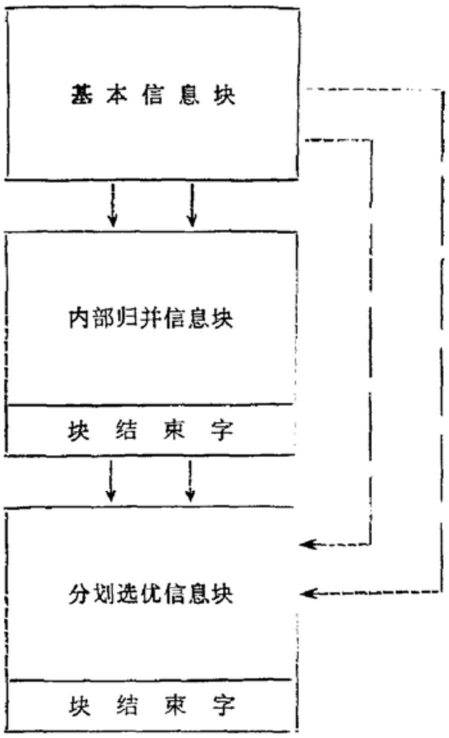


图 1　版图单元数据结构

是一定值．内部归并信息块只有第一种构成的版图单元才具有．它包含各子图集在版图单元内的相对位置等信息．它的长度是不定的．分划选优信息块只有版图单元边界线度大于 L_0 的版图单元才具有．它包含分划后各子域在边界内的位置、各子域所对应的选优目标函数值等信息．它也是不定长的．这种数据结构的应用使存贮空间的冗余度可十分低．

六、软件的基本逻辑过程

基本单元自动选择的逻辑过程如图 2 所示．整个选优过程在最小整体分划阈值的控制下可分为两种模式的四次选优、归并过程．在求得该版图对应的最小整体分划阈值后，系统进入最小整体不均匀分划选优的实过程．即对满足最小整体分划条件的各版图单元进行整体最小分划，并选出最佳的子域作为基本单元，同时对结果进行归并处理．当该实过程结束时，系统降低最小整体分划阈值．如令 $U=1$，系统进入最小整体分划选优的虚过程，即并不优选出新的基本单元而仅对分划结果进行可能的归并处理．在最小整体分划选优的虚过程结束后，系统进入密集子域分划选优的实过程．在这种分划模式下，选出可能最佳子域作为基本单元，同时对结果进行归并处理，直至选出整个所需的基本单元集．此后，系统进入密集子域分划选优的虚过程．再一次对密集子域分划结果进行归并处理．这样就在选优过程中较好地解决了图集的归并问题．这种处理方法虽然不能严格地实现所有的图集归并问题，但可以相当高的效率和软资源利用率得到令人满意的结果．

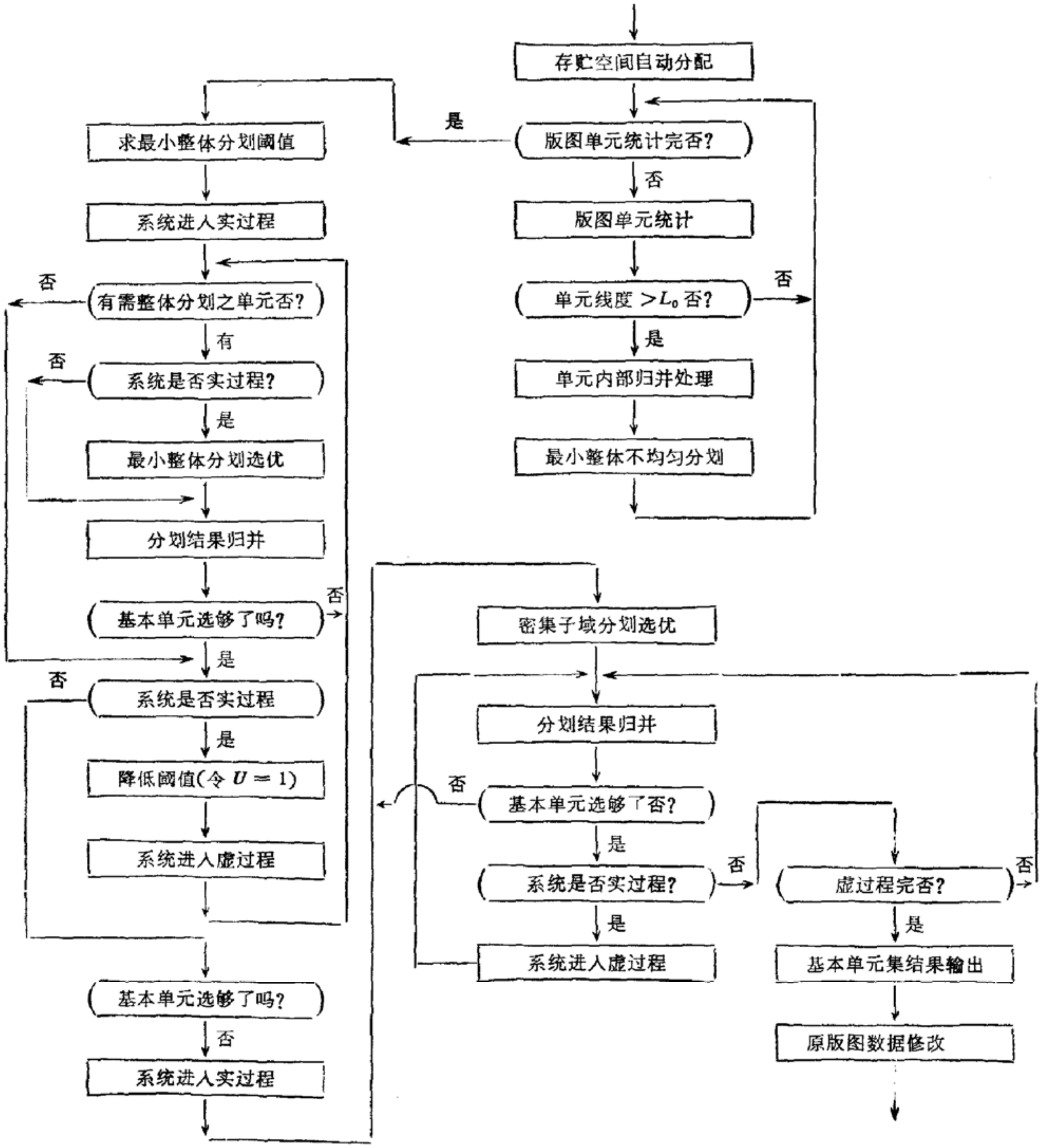


图 2　基本单元自动选择逻辑示意图

七、几点说明

① 该软件中影响处理效率的主要部分是版图单元在密集子域分划模式下的虚、实过程. 其计算量与 q_i^2 成正比，其中 q_i 为 i 号版图单元的图元数. 由于版图单元所含图元数不会很大，因此处理效率可比较高. 以 MOS 16 k RAM 电路为例，对整套版图进行基本单元自动选择处理，在 DJS-130 机上实现，约需 15 分钟.

② 严格地讲，图集的归并处理应全部在版图单元定义、统计时进行，否则将会影响选优结果，但这样将花费相当多的机时．在本软件中，考虑到处理效率和版图编辑的规律，对图集归并处理采用分两步实现的方式，即有一部分在选优过程中实现．实际工作表明，这样处理提高了处理效率，而对结果的影响很小．

③ 在软件工作中，李全圣、沈永周、陈慎卿、朱家廉同志参加了方案的讨论．张吉清同志协助做了大量的上机工作，特此表示感谢．

参　考　文　献

[1] Gerald M. Henrikoen, "Reticles by Automatic Pattern Generation", Proceeding of the Society of Photo-Opticat Instrumentation Engineers, Vol. 100, Developments in Semiconductor Microlithography II, 86 (1977).
[2] 中国科学院半导体研究所自动制版研究组，物理学报，**25**，88 (1976).
[3] 庄文君等，半导体学报，**1**，304 (1980).

Automatic Selection of Basic Units in LSI CAD Mask Making

Zhuang Wenjun
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

This article describes the automatic selection of basic units during CAD mask making with double platen pattern generator and it puts forward an object function for basic units selection and an approach for the comparison between the two parameters sets used to differentiate mask graph units. It also suggests two basic partition models of mask graph units and the concept of the minimal integral partition threshold for their control. At the end, it discusses the logical process of automatic selection and the incorporation of all equivalent graph sets during the process.