

基于广度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法

杨欣华^{1,2}, 江一鹏^{1,2}, 李思坤^{1,2*}, 廖陆峰^{1,2}, 张双^{3,5}, 张利斌^{3,5}, 张生睿⁴, 施伟杰⁴, 韦亚一^{3,5}, 王向朝^{1,6}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高端光电装备部, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院微电子研究所EDA中心, 北京 100029;

⁴东方晶源微电子科技(北京)有限公司, 北京 100176;

⁵中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049;

⁶浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058

摘要 提出一种基于广度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法。通过广度优先搜索算法得到所有图形数最少的关键图形组。以45 nm标准单元库测试图形集为例,采用商用计算光刻软件Tachyon Tflex对本文方法的筛选结果进行仿真验证。结果表明,本文方法获得的关键图形组的工艺窗口优于Tachyon Tflex中的同类技术。相比于基于深度优先搜索的全芯片SMO关键图形筛选方法,本文方法只筛选出所有图形数量最少的关键图形组,图形筛选效率更高。

关键词 集成光学; 图形筛选; 计算光刻; 全芯片光源掩模联合优化; 广度优先搜索

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231002

1 引言

光刻分辨率决定芯片的特征尺寸^[1]。随着芯片特征尺寸的逐渐缩小,业界引入了计算光刻技术。计算光刻技术利用模型和算法优化光源与掩模等关键因素,提高光刻成像质量。主要的计算光刻技术包括光学邻近效应修正(OPC)^[2-4]、逆向光刻技术(ILT)^[4]、光源掩模联合优化(SMO)^[2,5-19]等。利用全芯片光源掩模优化方法协同优化光源与掩模,可以有效提升光刻成像质量,因此它是重要的计算光刻技术之一^[12,16]。

全芯片SMO的时间开销太大,直接用于全芯片版图优化的成本过高,为了缩短全芯片SMO时间,需要利用图形筛选技术筛选出关键图形进行SMO。2011年,ASML公司提出了基于频谱分析的全芯片SMO关键图形筛选技术^[14,19]。该技术包括频率表征、频率分组、图形筛选等子技术,已被用到计算光刻软件Tachyon Tflex中。2020年,Liao等^[20]对该技术进行研究,提出了基于多宽度表征和轮廓表征的全芯片SMO关键图形筛选方法,所得到的工艺窗口优于Tachyon Tflex方法。关键图形筛选是一个多解问题^[21],上述方法只能得到一组解,不能筛选出成像性能最优的关键图形组。为了解决该问题,本课题组提

出一种基于深度优先搜索的全芯片SMO关键图形筛选方法^[22],利用深度优先搜索算法筛选出所有关键图形组,其得到的工艺窗口优于上述方法。该方法虽然能够筛选出所有关键图形组并找到成像性能最优的解,但无法保证筛选出的首个关键图形组是包含图形数目最少的关键图形组。此外,全芯片SMO的优化过程通常选用包含图形数目最少的关键图形组进行仿真分析以提高优化效率,该方法为了筛选出所有的关键图形组,需要遍历整个多叉树,产生了额外的时间消耗。

针对上述问题,本文提出一种全芯片SMO关键图形筛选方法。利用广度优先搜索算法进行筛选,得到全部图形数目最少的关键图形组。以常用测试图形集为例,采用Tachyon Tflex进行仿真验证。仿真结果表明,本文方法获得的工艺窗口优于Tachyon Tflex方法,且本文方法的图形筛选效率优于基于深度搜索的全芯片SMO关键图形筛选方法。

2 基本原理

光刻成像中通常采用部分相干光照明^[23],在部分相干光源照射下,像面光强分布为各个点光源产生的光强的叠加,即

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2024-03-13; 录用日期: 2024-03-19; 网络首发日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(62374167, U22A2070)、国家02科技重大专项(2017ZX02101004-002, 2017ZX02101004)

通信作者: *lisikun@siom.ac.com

$$\hat{I}(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} J(\hat{f}, \hat{g}) \left\{ \iint_{-\infty}^{+\infty} H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') O(\hat{f}', \hat{g}') \exp[-j2\pi(\hat{f}'x + \hat{g}'y)] d\hat{f}' d\hat{g}' \right\}^2 d\hat{f} d\hat{g}, \quad (1)$$

式中： $O(\hat{f}', \hat{g}')$ 为掩模衍射谱； $J(\hat{f}, \hat{g})$ 为光源的强度分布； $H(\hat{f}, \hat{g})$ 为光瞳函数。光源优化通过调制有效光源的强度分布和轮廓形状，提高光刻成像质量。照明光束照射掩模发生衍射，掩模中的相似结构在衍射谱中的频率也相似。先通过对频率进行分组找到掩模图形间的包含关系，再利用筛选算法筛选出能够最大限度代表所有图形成像质量的关键图形。对筛选得到的关键图形组进行优化可以得到适用于所有图形的光源，从而提高光刻成像质量。本文方法的主要步骤包括频率提取、频率分组和关键图形

筛选。

2.1 频率提取

本文方法采用与参考文献[22]相同的频率提取方法，流程如图1所示。首先对掩模图形进行傅里叶变换得到衍射谱。对每一个衍射峰，提取其峰值频率位置 (\hat{f}_x, \hat{f}_y) 以及投影边界 P 。定义增长因子 γ ，用于控制频率轮廓的大小。该衍射峰的频率表示为 $S_j(\hat{f}_x, \hat{f}_y, P\gamma)$ 。相比于Tachyon Tflex软件中通过衍射峰纵横方向的宽度表征频率的方法，本文方法可以更准确地提取频谱特征。

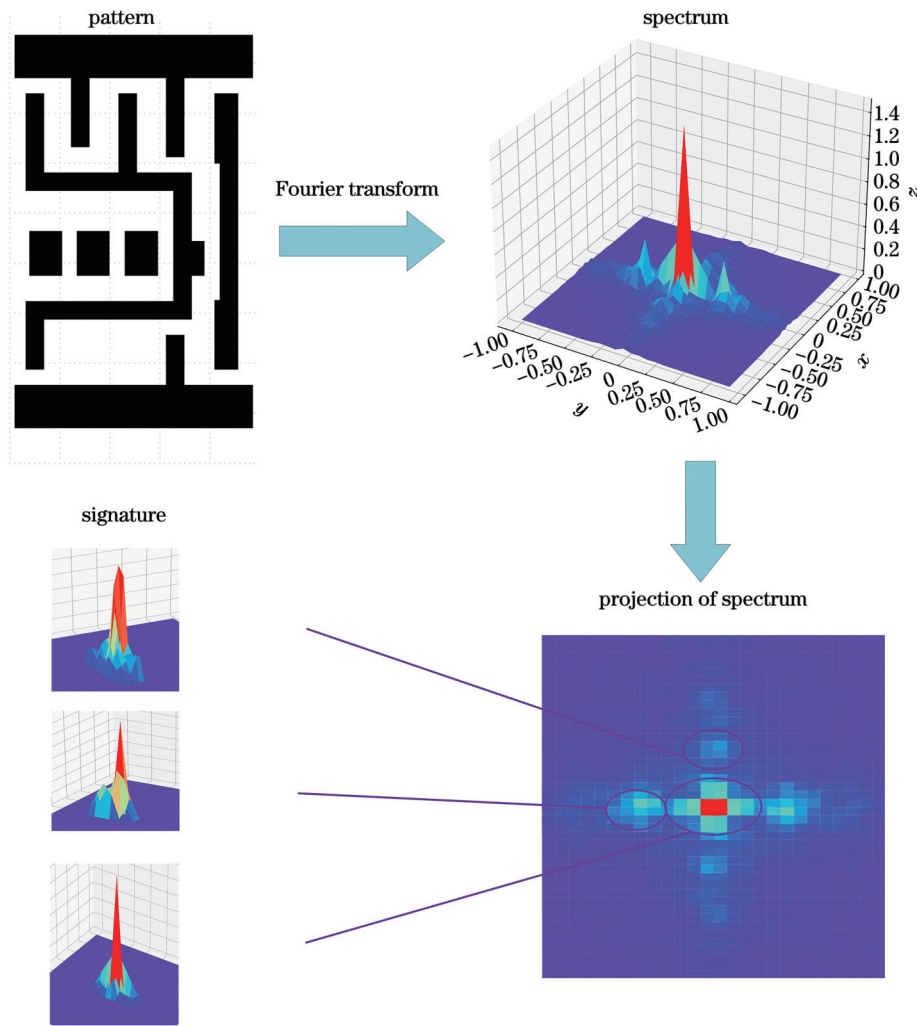


图1 频率提取示意图

Fig. 1 Diagram of frequency extraction

2.2 频率分组

提取所有主要频率之后，需要对主要频率进行分组。通过对主要频率进行分组找到掩模图形之间的包含关系，使得筛选出的关键图形尽可能地代表全部掩

模图形的成像质量。分组方法如下：若衍射峰 F_B 的峰值位置 $(\hat{f}_{x,B}, \hat{f}_{y,B})$ 处于 F_A 的轮廓 $S_A(S_A = P_A\gamma)$ 中，则 F_B 属于 F_A 分组。根据频率轮廓和位置之间的关系对频率进行分组，将被同一频率轮廓覆盖的频率划分为

一组。增长因子 γ 越大,则同一分组内的频率越多。

对主要频率分组之后需要筛选出具有代表性的主要频率,代表性主要频率覆盖了该组其他所有主要频率,可以代表该频率分组的频率特征。筛选出的关键图形集只需覆盖所有代表性主要频率即可覆盖所有主要频率,故筛选出的关键图形的成像性能即可代表全

芯片版图的成像性能。

代表性主要频率的筛选流程如图 2 所示,遍历频率分组中的每一个主要频率,将覆盖其他主要频率最多的频率作为代表频率,并将该代表频率和其包含的频率分为一组,得到具有代表性主要频率的频率分组。

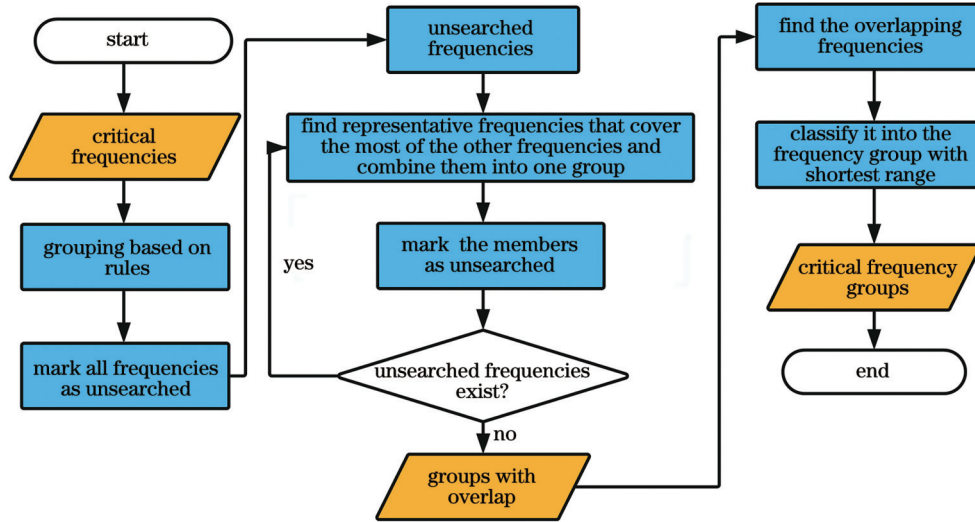


图 2 代表性主要频率筛选流程

Fig. 2 Flowchart of representative frequency selection

2.3 关键图形筛选

频率分组后,每个分组中可能包含多个代表性主要频率,每一个代表性主要频率都包含该组其他主要频率。筛选出的关键图形组只要包含每个分组中的多个代表性主要频率的任意一个就能包含所有主要频率,从而包含所有掩模图形的频谱特征。

关键图形组的筛选是一个多解问题,其求解过程可以近似为求解一棵多叉树的根节点到所有叶子节点的路径问题。关键图形筛选示意图如图 3 所示。

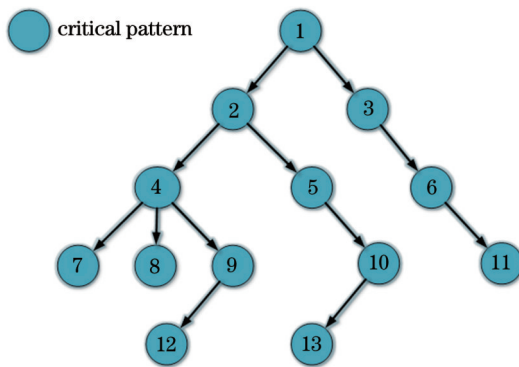


图 3 关键图形筛选示意图

Fig. 3 Schematic of critical pattern selection

图 3 包含了编号为 1~13 的 13 个关键图形,每个关键图形都至少包含一个频率分组中的一个代表性主要频率。在实际关键图形的筛选过程中,每筛选出一个关键图形,都将移除该关键图形所包含的代表性主

要频率及其分组,再计算剩余频率分组对应的关键图形,这就意味着每筛选出一个关键图形,该关键图形的“子树”都会发生变化。为了方便描述,本文假设该“子树”不改变,即将关键图形筛选问题近似为图 3 所示的一棵固定多叉树的路径求解问题。从根节点开始搜索,直到叶子节点时停止搜索,搜索期间经过的简单路径即为一组关键图形。简单路径可理解为从根节点到叶子节点的最短路径,即在当前路径遍历结束前只能遍历当前节点的子节点,不能回溯其父节点。从根节点到所有叶子节点的简单路径组成的集合即为求解的关键图形集。

基于深度优先搜索的图形筛选方法示意图如图 4 所示。从根节点 1 开始遍历,根节点有两个子节点,分

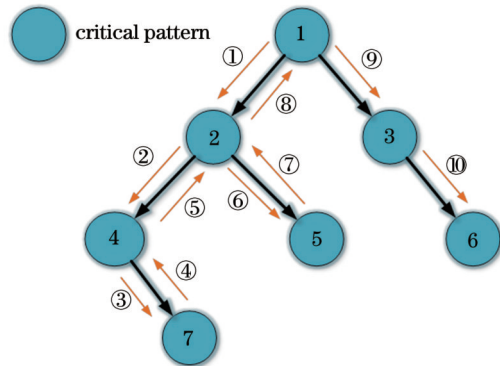


图 4 深度优先搜索图形筛选方法示意图

Fig. 4 Schematic of depth-first search pattern selection method

别为左子节点 2 和右子节点 3。按照中序遍历的顺序，遍历其左子节点 2，节点 2 同样有两个子节点，分别为左子节点 4 和右子节点 5。首先，遍历左子节点 4，节点 4 只有一个右子节点 7，故遍历节点 7。注意到节点 7 为没有子节点的叶子节点，则当前分支遍历结束。从根节点到叶子节点的简单路径为“1→2→4→7”，则图形组 (1, 2, 4, 7) 为一组关键图形组，将其加入关键图形集。然后，回溯到节点 4，节点 4 的所有子分支已遍历完成，则继续回溯到节点 2。注意到节点 2 有右子节点 5 还没有遍历，则遍历其右子节点 5，节点 5 为没有子节点的叶子节点。从根节点到当前叶子节点的简单路径为“1→2→5”，则将关键图形组 (1, 2, 5) 纳入关键图形集。根据以上搜索方式，另外一组关键图形组为 (1, 3, 6)，当搜索到叶子节点 6 时，二叉树的所有分支完成搜索，即完成了关键图形组的求解。

基于广度优先搜索的图形筛选方法示意图如图 5 所示。从根节点 1 开始遍历，优先遍历其左子节点 2。节点 2 不是叶子节点，则遍历右子节点 3。右子节点 3 同样不是叶子节点，则遍历节点 2 的左子节点 4。节点 4 不是叶子节点，则遍历节点 2 的右子节点 5。节点 5 为叶子节点，从根节点到叶子节点 5 的简单路径为“1→2→5”，则将关键图形组 (1, 2, 5) 加入关键图形集。接着遍历节点 3 的子节点 6，注意到节点 6 为叶子节点，从根节点到叶子节点 6 的简单路径为“1→3→6”，将对应的关键图形组 (1, 3, 6) 加入关键图形集。随后遍历节点 4 的子节点 7，节点 7 为叶子节点，

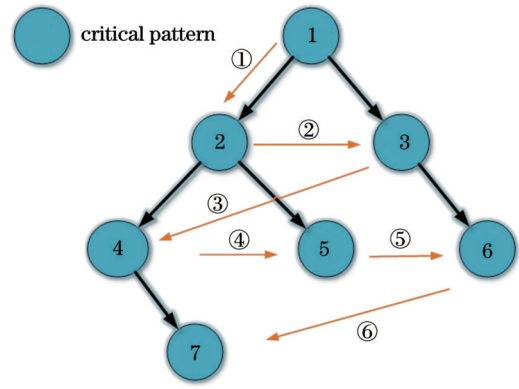


图 5 广度优先搜索图形筛选方法示意图
Fig. 5 Schematic of breadth-first search pattern selection method

则将根节点到节点 7 的简单路径所对应的关键图形组 (1, 2, 4, 7) 加入关键图形集。此时二叉树的所有节点完成遍历，即搜索完成，得到关键图形的筛选结果。

基于广度优先搜索的图形筛选方法可以确保输出的第一组关键图形为最少关键图形组，且当算法遍历完最少关键图形组叶子节点所在的层时，能够筛选出所有包含关键图形数目最少的关键图形组。该方法避免了对整棵二叉树的搜索，实现了图形筛选算法效率的提升。

下面具体介绍基于广度优先搜索的图形筛选方法的工作流程，其示意图如图 6 所示，步骤如下：

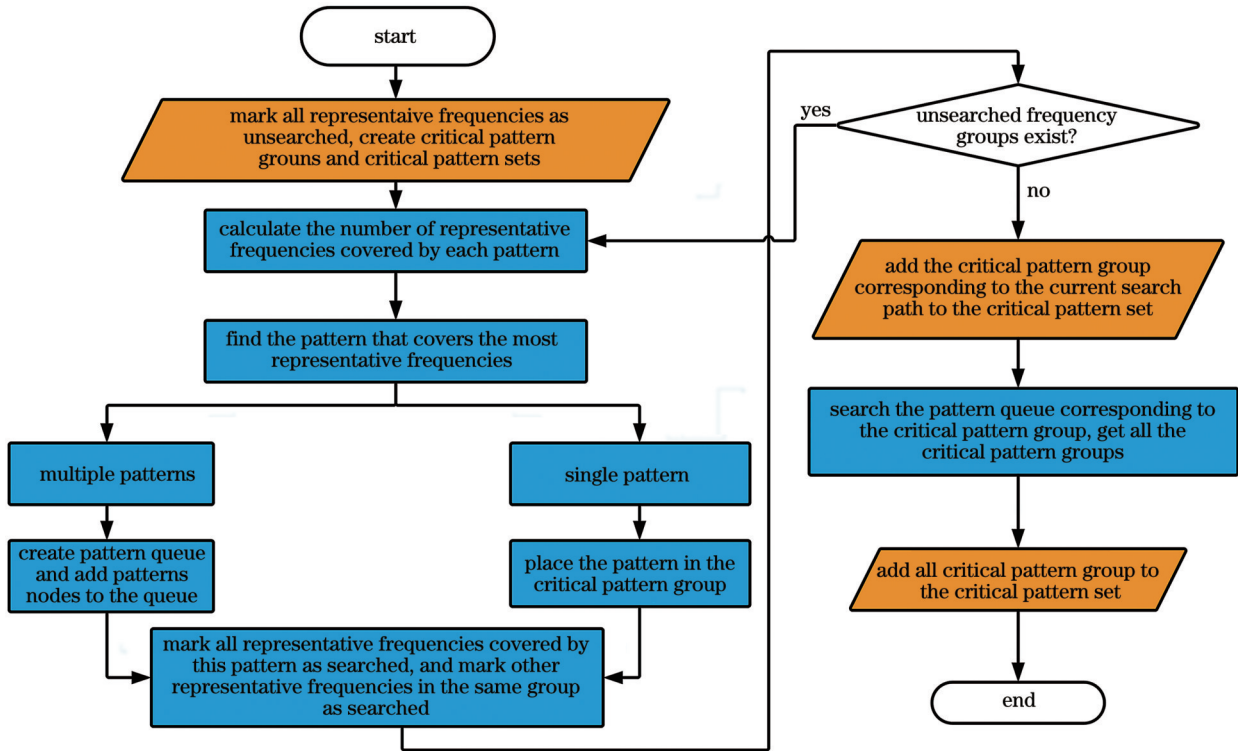


图 6 图形筛选算法流程图
Fig. 6 Flow chart of pattern selection algorithm

1) 将所有代表性主要频率标记为未搜索,并建立关键图形组和关键图形集。

2) 计算每个掩模图形覆盖的未搜索代表性主要频率个数。

3) 找出覆盖代表性主要频率最多的掩模图形。

4) 当只有一个图形时,将该图形加入关键图形组,并将该图形覆盖的代表性主要频率修改为已搜索;当有多个图形时,建立图形队列,将图形的子节点加入队列,将该图形覆盖的代表性主要频率修改为已搜索。

5) 重复上述步骤,直到所有代表性主要频率均为已搜索。

6) 将当前遍历路径对应的关键图形组加入关键图形集。

7) 遍历步骤6)所得关键图形组叶子节点对应层的图形队列。

8) 将队列中叶子节点对应的关键图形组加入关键图形集。

经过上述步骤后,得到所有包含关键图形数目最少的关键图形组。

3 仿真结果

采用 ASML 公司的 Tachyon Tflex 软件进行仿真测试。该软件是目前国际上最先进、成熟度最高的商用计算光刻软件之一。分别利用 Tachyon Tflex 和本文方法对测试图形集进行图形筛选,再利用 Tachyon Tflex 对所得关键图形进行 SMO,分析对比两种方法获得的工艺窗口和关键指标。仿真测试中使用的图形集是从 45 nm 标准单元库^[24]随机抽取的图形,总计 60 个。

使用 Tachyon Tflex 进行仿真时,需要设定图形周期性情况。当不区分图形周期性时,非周期图形和周期图形都作为孤立图形;当区分图形周期性时,周期图形会被标记(可能作为其他周期图形的一部分),非周期图形则作为孤立图形。关键图形筛选根据图形周期性进行区分。仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation conditions

Item	Description
Lithography	NXT: 1950i
Mask	Binary/dark field
Source	Freeform
Polarization	XY

3.1 区分图形周期性

考虑图形周期性时, Tachyon Tflex 筛选出 1 个关键图形组,该关键图形组中包含 11 个关键图形。本文方法直接筛选出 2 个包含关键图形数目最少的

关键图形组,分别为 Group A 和 Group B,每组图形包含 11 个不同的关键图形,如图 7 中带点箭头和带星箭头的分支所示。Tachyon Tflex 的筛选结果如图 8 所示。从图 7 可以看到,基于深度搜索的关键图形筛选方法最终搜索出 8 个关键图形组,本文方法能够直接筛选出 2 组包含图形数目最少的关键图形组,从而避免了对整棵图形树的搜索,提高了筛选效率。

在利用本文方法与 Tachyon Tflex 方法对图形集进行关键图形筛选后,根据筛选结果,利用 Tachyon Tflex 分别对两种方法的筛选结果进行光源优化,优化后的光源如图 9(a)、(b)所示。Group A 得到的光源形状与 Tachyon Tflex 类似,但在多个方向上都存在强度更高的光强分布。利用优化后的光源对全部掩模进行优化,对比两种方法得到的工艺窗口。Group A 与 Tachyon Tflex 获得的工艺窗口对比结果分别如图 9(c)、(d)所示。图 9(c)展示了 Tachyon Tflex 和本文方法在 5% 曝光宽容度(EL)、 $\pm 10\%$ 关键尺寸偏差(CDO)下获得的最大内接椭圆。图 9(d)展示了 Tachyon Tflex 和本文方法在 $\pm 10\%$ 关键尺寸偏差下的曝光宽容度随焦深(DOF)的变化曲线。对比参考文献[22]可以看出,本文方法得到的结果与基于深度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法获得结果一致。本文方法获得的工艺窗口优于 Tachyon Tflex 方法,且当曝光宽容度变化时,两种方法获得的焦深相当。

表 2 展示了 Tachyon Tflex 方法和本文方法获得的 Group A 在 10% 关键尺寸偏差和 5% 曝光宽容度下的各项关键指标对比。Group A、Tachyon Tflex 获得的焦深分别为 131.32 nm、128.94 nm;最大掩模误差增强因子(MEEF)分别为 2.17、2.09,结果相当;最差图像对数斜率(ILS)分别为 22.96、23.28, Tachyon Tflex 获得的 ILS 略优于 Group A。对比参考文献[22]的结果可知,本文方法得到的结果与基于深度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法所获得的结果一致。在可以获得同样结果的情况下,本文方法提高了筛选算法的效率。

3.2 不区分图形周期性

不考虑图形周期性时, Tachyon Tflex 筛选出 1 个关键图形组,其包含 10 个关键图形。本文方法共筛选出 8 个图形数量最少的关键图形组,分别标记为 G1~G8,每组图形包含 10 个关键图形。本文方法的关键图形筛选结果和 Tachyon Tflex 方法结果分别如图 10 和图 11 所示。如图 10 所示,本文方法只筛选出包含图形数目最少的 G1~G8 关键图形组。图形树还有 68 个包含更多图形数目的关键图形组。基于深度优先搜索的关键图形筛选方法可以筛选出所有的 76 个图形组,但需要人工筛选出所有包含图形数最少的关键图形组 G1~G8,而本文方法可以直接筛选出

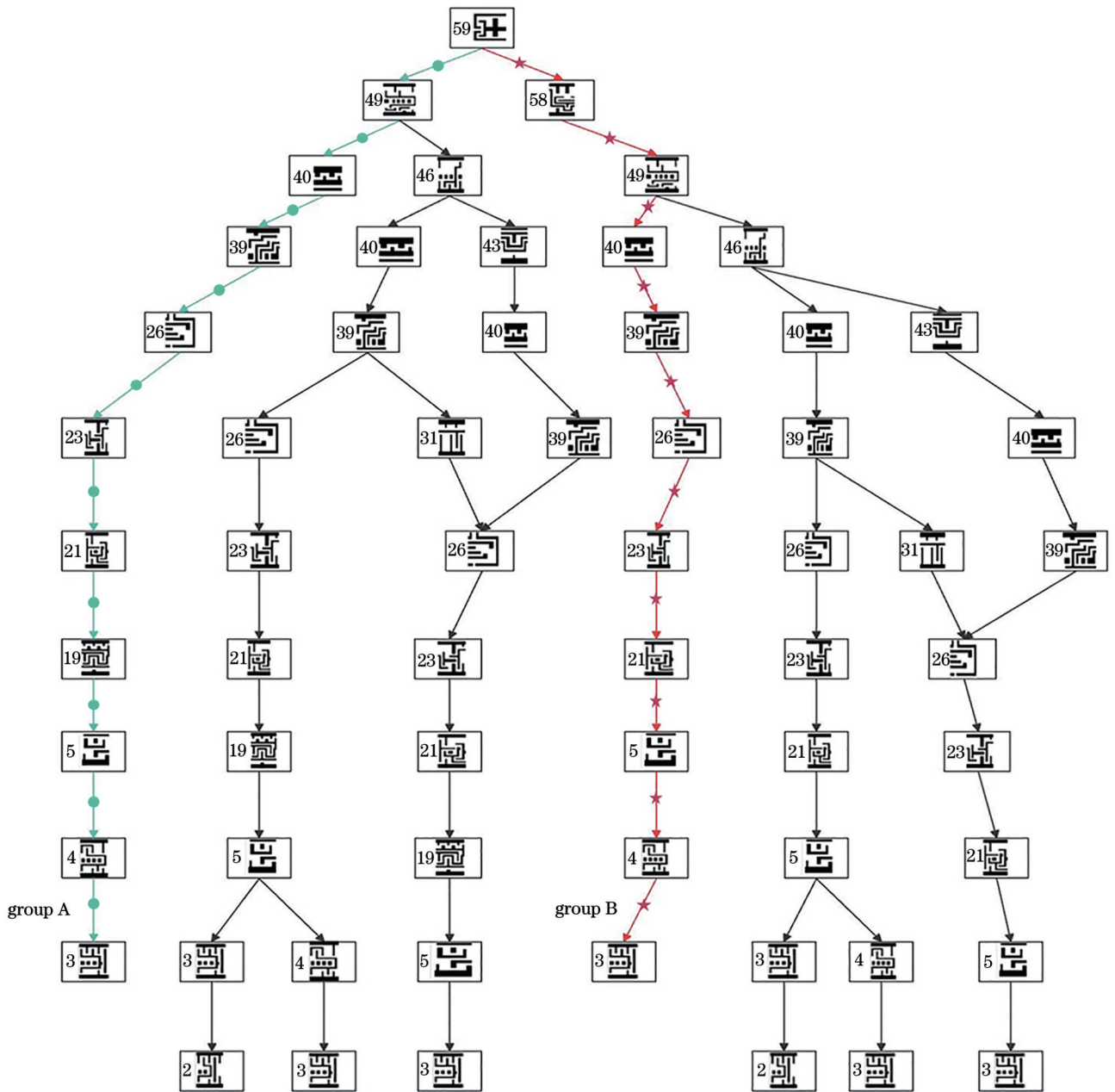


图 7 考虑图形周期性时本文方法的筛选结果(带标识箭头)

Fig. 7 Selection result (with marked arrow) of proposed method with graph periodicity

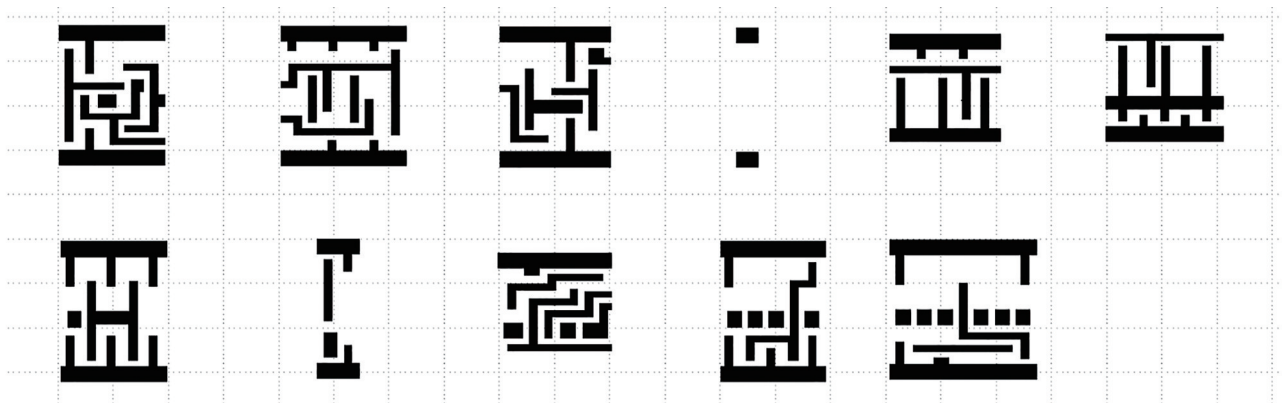


图 8 考虑图形周期性时 Tachyon Tflex 的筛选结果

Fig. 8 Critical pattern selection result of Tachyon Tflex with graph periodicity

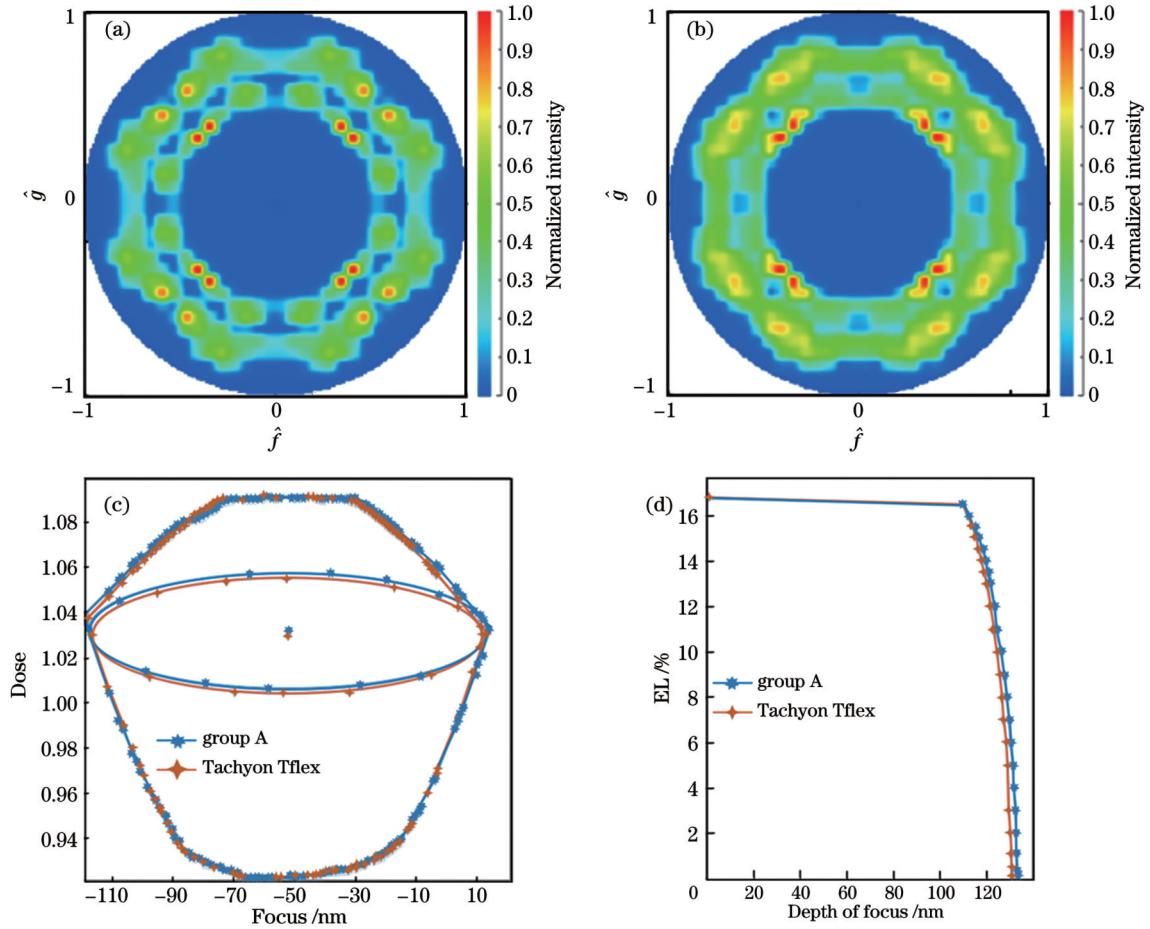


图9 考虑图形周期性时SMO后的光源和工艺窗口。(a) Tachyon Tflex优化光源;(b)本文方法优化光源;(c)公共工艺窗口;(d)曝光宽容度随焦深的变化曲线

Fig. 9 Optimized sources and process windows after SMO with graph periodicity. (a) Optimized source obtained by Tachyon Tflex; (b) optimized source obtained by proposed method; (c) common process windows; (d) exposure latitude versus depth of focus

表2 考虑图形周期性时在10%关键尺寸偏差和5%曝光宽容度下各关键指标的对比

Table 2 Comparison of key indices calculated at 10% CDO and 5% EL variation with graph periodicity

Method	DOF /nm	MEEF	ILS
Proposed (group A)	131.32	2.17	22.96
Tachyon Tflex	128.94	2.09	23.28

G1~G8, 避免了对整棵图形树的搜索, 提高了筛选效率。

根据筛选结果, 利用 Tachyon Tflex 分别对两种方法的筛选结果进行光源优化。图 12(a)、(b) 为基于 Tachyon Tflex 的筛选结果优化后的光源和基于本文方法筛选出最优结果——G3 关键图形组——作为最终结果优化的光源。基于优化后的光源, 利用 Tachyon Tflex 对全部掩模图形进行掩模优化, 得到的公共工艺窗口和曝光宽容度随焦深的变化曲线如图 12(c)、(d) 所示。图 12(c) 为两种方法的公共工艺窗口对比图, 其中内接椭圆是在 5% 曝光宽容度、±10% 关键尺寸偏差下获得的最大内接椭圆。图 12(d)

为 ±10% 关键尺寸偏差下的曝光宽容度随焦深的变化曲线对比图, 可以明显看出, 利用本文方法筛选所得的 G3 关键图形组获得的工艺窗口明显优于 Tachyon Tflex 方法。

表 3 为本文方法和 Tachyon Tflex 方法在 10% 关键尺寸偏差和 5% 曝光宽容度下各项关键指标的对比。经过对比分析可得, 本文方法得到的工艺窗口优于 Tachyon Tflex 得到的工艺窗口。

由上述仿真结果可知, 本文方法得到的关键图形筛选结果获得了更大的工艺窗口, 其成像性能优于 Tachyon Tflex 方法。相比于基于深度优先搜索的关键图形筛选方法, 本文方法不仅能保证筛选出的首个关键图形组为最少图形组, 还可以筛选出所有包含关键图形数目最少的关键图形组, 从而获得更优的关键图形筛选效率。在考虑图形周期性的情况下, 基于深度优先搜索的方法共筛选出 10 个不同的关键图形组, 其中 2 个为最少关键图形组, 而本文方法能够直接筛选出 2 个最少关键图形组, 筛选效率明显提升。在不考虑图形周期性的情况下, 基于深度优先搜索的方法共筛选出 76 个不同的关键图形组, 其中 8 个为最少关

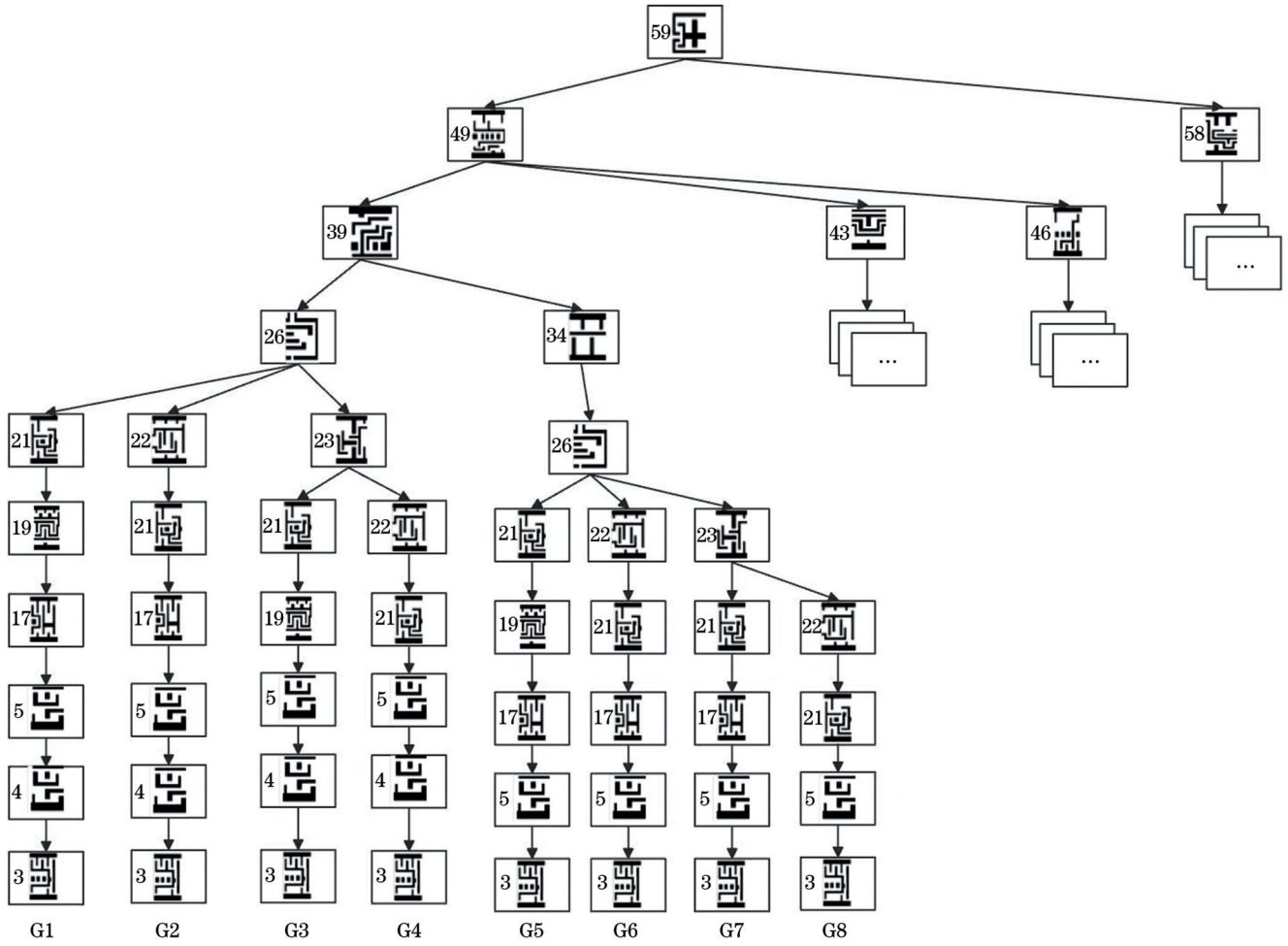


图 10 不考虑图形周期性时本文方法的关键图形筛选结果

Fig. 10 Critical pattern selection result of proposed method without graph periodicity

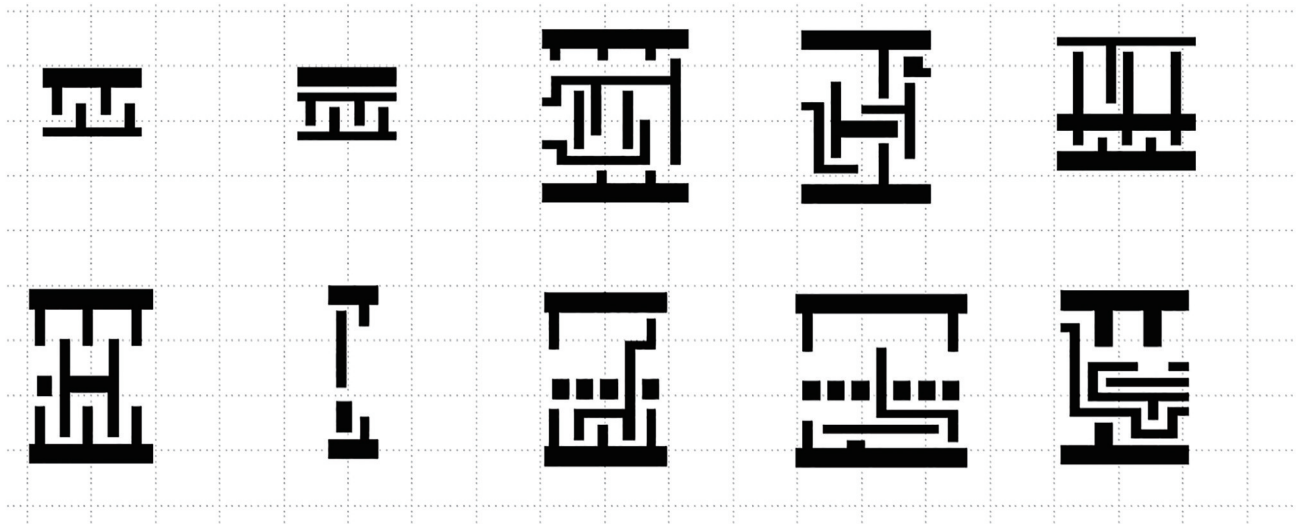


图 11 不考虑图形周期性时 Tachyon Tflex 的关键图形筛选结果

Fig. 11 Critical pattern selection result of Tachyon Tflex without graph periodicity

键图形组,而本文方法能够直接筛选出 8 个最少关键图形组,筛选效率明显提升。综上,相比于 Tachyon Tflex 方法与基于深度优先搜索的筛选方法,本文方法在提升关键图形成像性能的同时,也显著提高了关键

图形筛选的效率。

4 结 论

提出一种基于广度优先搜索的全芯片光源掩模优

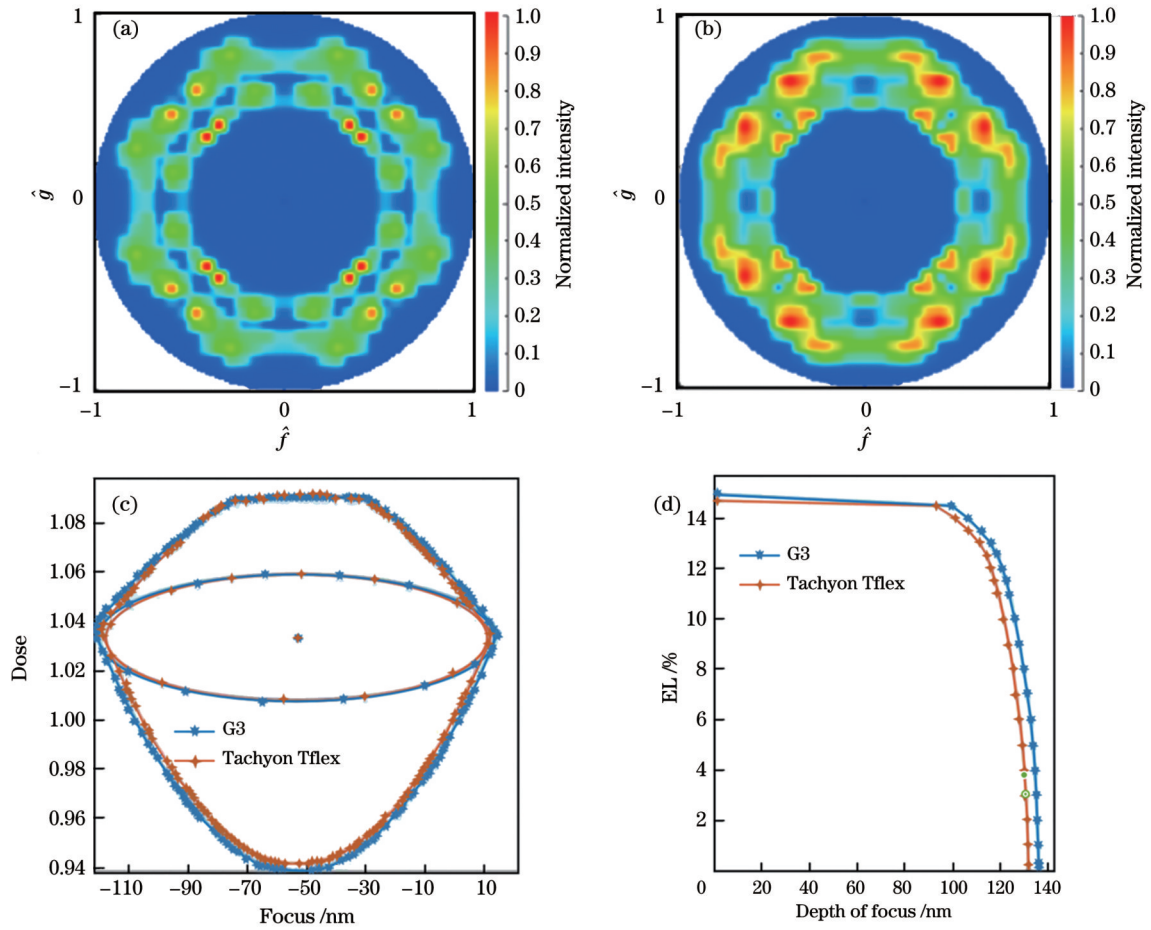


图 12 不考虑图形周期性时 SMO 后的光源和工艺窗口。(a) Tachyon Tflex 优化光源;(b)本文方法的 G3 掩模优化得到的光源;(c)公共工艺窗口;(d)曝光宽容度随焦深的变化曲线

Fig. 12 Optimized sources and process windows after SMO without graph periodicity. (a) Optimized source obtained by Tachyon Tflex; (b) optimized source obtained by G3 mask of the proposed method; (c) common process windows; (d) exposure latitude versus depth of focus

表 3 不考虑图形周期性时在 10% 关键尺寸偏差和 5% 曝光宽容度下各项关键指标的对比

Table 3 Comparison of key indices calculated at 10% CDO and 5% EL variation without graph periodicity

Method	DOF /nm	MEEF	ILS
Proposed (G3)	134.16	2.11	23.23
Tachyon Tflex	129.66	2.09	23.21

化关键图形筛选方法。利用广度优先搜索算法实现了全芯片 SMO 关键图形的筛选。利用商用计算光刻软件 Tachyon Tflex 进行仿真分析,并将本文方法所得结果与 Tachyon Tflex、基于深度优先的关键图形筛选方法进行对比。仿真结果表明,相比于 Tachyon Tflex,本文方法获得的工艺窗口更优。此外,本文方法能够快速筛选出所有关键图形数目最少的关键图形组,从而通过对比分析获得工艺窗口更优的关键图形组。相比于深度优先的关键图形筛选方法,本文方法能保证筛选出的第一个关键图形组作为关键图形数量最少的组,且能快速筛选出所有关键图形数量最少的组,从而

提高了关键图形的筛选效率。后续工作中,将利用大规模量产线验证所提技术的实际量产应用效果。

参 考 文 献

- [1] Quirk M, Serda J. Semiconductor manufacturing technology [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001: 367-412.
- [2] 安德里亚斯·爱德曼. 半导体先进光刻理论与技术[M]. 李思坤, 译. 北京: 化学工业出版社, 2023: 87-123.
- [3] Erdmann A. Optical and EUV lithography: a modeling perspective[M]. Li S K, Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2023: 87-123.
- [4] Kojima Y, Moniwa A, Maruyama T, et al. Novel OPC flow for the trim-mask lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8441: 84410I.
- [5] Vallishayee R, Orszag S, Barouch E. Optimization of stepper parameters and their influence on OPC[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2726: 660-669.
- [6] 廖陆峰, 李思坤, 张子南, 等. 光源掩模联合优化技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922010.
- [7] Liao L F, Li S K, Zhang Z N, et al. Research on source and mask optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922010.
- [8] Granik Y. Fast pixel-based mask optimization for inverse lithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and

- MOEMS, 2006, 5(4): 043002.
- [7] Socha R, Shi X L, LeHoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO) [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5853: 180-193.
- [8] Yu J C, Yu P C. Gradient-based fast source mask optimization (SMO)[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 797320.
- [9] 陈国栋, 张子南, 李思坤, 等. 深紫外计算光刻技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922007.
Chen G D, Zhang Z N, Li S K, et al. Study on deep ultraviolet computational lithography techniques[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922007.
- [10] 马旭, 张胜恩, 潘毅华, 等. 计算光刻研究及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922008.
Ma X, Zhang S E, Pan Y H, et al. Research and progress of computational lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922008.
- [11] Rosenbluth A E, Seong N. Global optimization of the illumination distribution to maximize integrated process window [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61540H.
- [12] Lai K, Rosenbluth A E, Bagheri S, et al. Experimental result and simulation analysis for the use of pixelated illumination from source mask optimization for 22 nm logic lithography process[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72740A.
- [13] Melville D, Rosenbluth A E, Tian K H, et al. Demonstrating the benefits of source-mask optimization and enabling technologies through experiment and simulations[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764006.
- [14] Zhang D Q, Chua G S, Foong Y M, et al. Source mask optimization methodology (SMO) and application to real full chip optical proximity correction[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83261V.
- [15] Pei J, Shao F, ElSewefy O, et al. Compatibility of optimized source over design changes in the foundry environment[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831M.
- [16] Tian K H, Fakhry M, Dave A, et al. Applicability of global source mask optimization to 22/20 nm node and beyond[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730C.
- [17] Rosenbluth A E, Bukofsky S J, Hibbs M S, et al. Optimum mask and source patterns to print a given shape[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 486-502.
- [18] Proglar C, Conley W, Socha B, et al. Layout and source dependent transmission tuning[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5754: 315-326.
- [19] Tsai M C, Hsu S, Chen L Q, et al. Full-chip source and mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730A.
- [20] Liao L F, Li S K, Wang X Z, et al. Critical pattern selection method for full-chip source and mask optimization[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20748-20763.
- [21] 廖陆峰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于衍射谱分析的全芯片光源掩模联合优化关键图形筛选[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2122001.
Liao L F, Li S K, Wang X Z, et al. Critical pattern selection based on diffraction spectrum analysis for full-chip source mask optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2122001.
- [22] 杨欣华, 李思坤, 廖陆峰, 等. 基于深度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1022002.
Yang X H, Li S K, Liao L F, et al. Critical pattern selection method for full-chip source and mask optimization based on depth-first search[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1022002.
- [23] Wong A K K. Optical imaging in projection microlithography [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [24] forFoundation IP 180 nm to sub-12 nm process nodes[EB/OL]. [2020-05-20]. https://www.silvaco.com/products/nangate/FreePDK45_Open_Cell_Library/index.html.

Critical Pattern Selection Method Based on Breadth-First Search for Full-Chip Source-Mask Optimization

Yang Xinhua^{1,2}, Jiang Yipeng^{1,2}, Li Sikun^{1,2*}, Liao Lufeng^{1,2}, Zhang Shuang^{3,5}, Zhang Libin^{3,5}, Zhang Shengrui⁴, Shi Weijie⁴, Wei Yayi^{3,5}, Wang Xiangzhao^{1,6}

¹Department of Advanced Optical and Microelectronic Equipment, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³EDA Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁴Dongfang Jingyuan Electron Co., Ltd., Beijing 100176, China;

⁵School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁶College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

Abstract

Objective The full-chip source-mask optimization (SMO) technique, developed by the collaborative optimization of light sources and masks, plays a crucial role in achieving process nodes of 28 nm and smaller. During full-chip SMO, it is essential to employ graphic selection techniques to identify critical patterns from the mask layout. Based on these critical patterns, an illumination mode suitable for the full-chip mask patterns can be determined. Among the various methods for graphic selection, the spectrum-based approach stands out due to its advantages of not requiring *a priori* knowledge and

offering high reliability. However, existing spectrum-based methods fall short in efficiently selecting the smallest set of critical patterns within the shortest time, leaving room for further improvement in efficiency.

Methods In this paper, we propose a critical pattern selection method based on the breadth-first search algorithm. Based on existing spectrum graphic selection methods, our approach leverages the breadth-first search mechanism to ensure that the nearest leaf nodes to the root node are discovered during the search process. By finding the shortest paths and combining them, we efficiently select all minimal critical pattern groups without traversing the entire critical pattern tree. This approach significantly improves the efficiency of critical pattern selection.

Results and Discussions In this paper, ASML's Tachyon Tflex software is used for simulation verification. The simulation employs a set of 60 randomly selected patterns from the 45 nm standard cell library. Under the condition of distinguishing pattern periodicity, our proposed method identifies two minimal critical pattern groups (Fig. 7), whereas Tachyon Tflex software produces only one group (Fig. 8). When various critical metrics are compared under a 10% CD deviation and 5% EL, group A in our method exhibits MEEF and ILS indicators similar to Tachyon Tflex, but with a significantly better depth of focus (DOF) (Table 2). Furthermore, without considering pattern periodicity, our method identifies a total of eight minimal critical pattern groups (Fig. 10), while Tachyon Tflex yields only one group (Fig. 11). In terms of critical metrics under the same CD deviation and EL conditions, G3 in our method outperforms Tachyon Tflex. By focusing on selecting the smallest set of critical patterns, our approach avoids exhaustive searches of the entire pattern tree, resulting in higher efficiency compared to depth-first search-based techniques.

Conclusions This paper proposes a critical pattern selection method for full-chip SMO based on breadth-first search. Leveraging the principles of breadth-first search, our method efficiently identifies critical patterns for full-chip SMO. Using a test pattern set extracted from the 45 nm standard cell library, we conduct simulation analyses by means of commercial computational lithography software Tachyon Tflex and compare the results with Tachyon Tflex. The simulation results demonstrate that our proposed method achieves a superior process window compared to Tachyon Tflex. By employing depth-first search, we avoid exhaustive searches of the entire pattern tree, ensuring that the first critical pattern group selected contains the fewest patterns. Utilizing breadth-first search, our method rapidly identifies all minimal critical pattern groups, simultaneously minimizing the number of critical patterns while allowing for comparative analysis to select critical pattern groups with larger process windows.

Key words integrated optics; pattern selection; computational lithography; full-chip source-mask optimization; breadth-first search