

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

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

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 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集成电路先导工艺研发中心, 北京 100029;

⁴东方晶源微电子科技(北京)有限公司, 北京 100176

摘要 提出一种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。所提方法采用掩模频谱的投影边界以及增长因子表征掩模的衍射频谱特征。设计了基于深度优先搜索的关键图形筛选算法, 实现了全芯片光源掩模优化关键图形筛选, 获得了所有关键图形组。相比于现有同类方法, 所提方法可以获得覆盖频率分组的所有关键图形组, 进而选出更优关键图形组。采用荷兰 ASML 公司的商用计算光刻软件 Tachyon Tflex 对所提方法进行仿真验证, 仿真结果表明所提方法获得的工艺窗口优于 Tachyon Tflex 方法, 与现有方法相比, 所提方法筛选出的关键图形结果更优。

关键词 光学设计; 图形筛选; 分辨率增强技术; 光源掩模联合优化; 深度优先搜索

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1022002

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

Yang Xinhua^{1,2}, Li Sikun^{1,2*}, Liao Lufeng^{1,2}, Zhang Libin³, Zhang Shuang³,
Zhang Shengrui⁴, Shi Weijie⁴, Wei Yayi³, Wang Xiangzhao^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, 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;

³Integrated Circuit Advanced Process R&D Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁴DongFang JingYuan Electron Limited, Beijing 100176, China

Abstract A critical pattern selection method for full-chip source and mask optimization based on depth-first search is proposed. The growth factor and projection boundary of mask spectra are used to describe the diffraction spectrum characteristics. The critical pattern selection method based on depth-first search is designed to realize the critical pattern selection for full-chip source and mask optimization, so as to obtain all critical pattern groups. Compared to existing methods of the same kind, the proposed method can obtain all critical pattern groups covering all frequency groups. Tachyon Tflex, one of the state-of-the-art commercial computational lithography software

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家科技重大专项(02 专项)(2017ZX02101004-002, 2017ZX02101004-003, 2017ZX02101004)、上海市自然科学基金(17ZR1434100)

通信作者: *lisikun@siom.ac.com

from Netherlands ASML company, is used to simulate and verify the proposed method. The results show that the process window obtained by the proposed method is better than that of the Tachyon Tflex method. The proposed method shows better results of selected critical patterns than the reported methods.

Key words optical design; pattern selection; resolution enhancement technique; source and mask joint optimization; depth-first search

1 引言

光刻机是集成电路制造的核心装备。光刻分辨率决定集成电路芯片的特征尺寸^[1],是光刻机的关键性能指标之一。工艺节点的不断减小对光刻分辨率的要求越来越高。在曝光波长和数值孔径一定的情况下,光刻分辨率的进一步提高依赖于分辨率增强技术(RET)^[2]。常用的分辨率增强技术包括光学邻近效应修正(OPC)技术^[3-4]、相移掩模(PSM)^[5]、离轴照明(OAI)^[6]、亚分辨率辅助图形(SRAF)技术^[7]、光源掩模联合优化(SMO)技术^[8-19]等。OPC技术通过改变掩模图形的尺寸和形状来修正光学邻近效应。PSM通过改变光波的相位提高光刻分辨率。OAI通过改变入射到掩模上的人射角来提高光刻分辨率。SRAF技术通过在较稀疏的图形中添加亚分辨率辅助图形,增大共同工艺窗口。与传统分辨率增强技术相比,SMO联合优化照明方式和掩模图形形状,优化自由度更高,已成为 28 nm 及更小节点关键光刻分辨率技术之一^[11,15]。

SMO通过数学建模和软件算法联合优化照明模式和掩模图形以获得最佳工艺窗口的光源照明方式和掩模图形,有两种优化思路^[16-17]。一种是交替优化法,该方法在反复迭代的过程中将轮流执行掩模和光源优化。另一种是协同优化法,该方法在优化过程中协同执行光源优化和掩模优化。交替优化法通常得到的是一个局部最优解而非全局最优解,需要多次重复计算进行优化。目前工业界普遍采用的是协同优化的方法。SMO与传统光刻分辨率增强技术(OPC)相比,计算时间开销更大,无法直接对全芯片版图进行优化。为了缩短优化时间,需要挑选出少量具有代表性的关键图形进行SMO。ASML公司报道的全芯片SMO步骤如下^[13,18]: 1)利用图形筛选技术从图形集中筛选出关键图形,以关键图形为输入进行SMO,得到优化的光源; 2)验证光源是否满足要求,若不满足则重新进行SMO,直到光源满足要求; 3)利用光源对全芯片版图进行掩模优化(包含OPC和SRAF),得到优化后的掩模图形。为了保证全芯片SMO的运行效率,需要筛

选出尽可能少的关键图形。然而,如果筛选出的关键图形不能兼顾全芯片版图的成像性能,则会影响全芯片SMO的效果,减小工艺窗口,降低芯片制造良品率。所以要求筛选出的关键图形最大限度地代表全芯片版图的成像性能。一般来说,更多的关键图形数量能够更好地代表全芯片版图的成像性能。所以关键图形筛选需要兼顾全芯片SMO的运行速度和实施效果,是全芯片SMO的关键技术之一。

2011年,荷兰ASML公司提出了全芯片SMO关键图形筛选技术^[18],该技术包括频率表征、覆盖规则、图形筛选等关键子技术,是目前最先进的全芯片SMO关键图形筛选技术,已在计算光刻软件Tachyon Tflex中得到应用。中国科学院上海光学精密机械研究所对上述技术进行改进,于2020年提出了基于多宽度表征的全芯片SMO关键图形筛选方法^[20],该方法通过频率在频谱面上投影的8个方向的宽度来表征频率。这种表征方法相比于Tachyon Tflex方法更加准确。在此基础之上又提出了一种基于轮廓表征的全芯片SMO关键图形筛选方法^[21],该方法通过频率的峰值位置和投影边界来表征频率,根据设计的覆盖规则对频率进行聚类,得到频率分组,然后根据频率分组进行关键图形筛选^[21]。该方法进一步优化了主要频率的表征方法,其关键图形筛选结果优于Tachyon Tflex软件中的同类技术。关键图形的筛选是一个多解问题^[21],关键图形的筛选结果取决于所采用的筛选技术,上述现有方法在得到一组解后即输出,不能得到所有解,因此也不能得出最优解。

本文提出一种全芯片SMO关键图形筛选方法。采用频率在频谱面的投影、增长因子和峰值位置表征掩模图形的特征。根据频率轮廓间的关系设计分组方法,并通过深度优先搜索进行关键图形筛选,获得了全部关键图形组,实现了全芯片SMO的关键图形筛选。采用商用计算光刻软件Tachyon Tflex进行仿真验证。该软件是经过量产线验证的软件,其数值仿真结果具有可信性。利用常用图形集进行仿真,将仿真结果与上述同类技术的关键图形筛选结果进行比较。以关键图形数量最少为原则,只选择关键图形数量最少的关键图形组进行测

试。在考虑图形周期性的情况下,所提方法筛选出 2 组不同的关键图形组。在不考虑图形周期性的情况下,本文方法筛选出 8 组不同的关键图形组。Tachyon Tflex 的仿真结果表明所提方法获得的工艺窗口优于上述现有方法,验证了所提方法的有

效性。

2 基本原理

光刻成像中通常采用部分相干光照明^[22],成像公式为

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

式中: $O(\hat{f}', \hat{g}')$ 是掩模的衍射谱; $J(\hat{f}, \hat{g})$ 是有效光源的强度分布; (\hat{f}, \hat{g}) 是光源面坐标; $H(\hat{f}, \hat{g})$ 是光瞳函数; (\hat{x}, \hat{y}) 是像面坐标。在光刻成像系统中,掩模的衍射谱由掩模形状和结构决定。SMO 光源的形状和强度分布依赖于掩模的衍射谱。由于全芯片版图所包含的图形数量巨大,其中存在大量结构类似的掩模图形,所以掩模图形的衍射谱存在冗余,决定光源分布的同一衍射级次可能存在于多个掩模图形中,所以可以通过聚合衍射谱中的相似成分减少冗余,筛选出包含所有频谱成分的关键图形组。以关键图形组为输入进行 SMO,获得的光源对全芯片版图中所有图形都会有良好的成像性能。

根据周期性可将图形分为周期图形和非周期图形。周期图形的衍射谱由离散的衍射峰组成,提取峰值频率及谐波。非周期图形的衍射谱由连续的衍射峰组成,提取所有衍射峰频率,并设计覆盖规则对频率进行分组。最后设计关键图形筛选算法对分组

结果进行筛选,得到所需的关键图形组。所提方法包含 3 个部分:频率提取、频率分组、关键图形筛选。

2.1 频率提取

在光刻成像系统中,受投影物镜的限制,掩模衍射谱的高频分量不能进入光瞳,只有被投影物镜收集的衍射谱分量参与频率提取。由图 1 所示,首先对掩模图形进行傅里叶变换,得到衍射谱,然后进行频率提取。对于图 1 中的衍射峰 a、b、c、d,分别查找其峰值频率 (\hat{f}_x, \hat{f}_y) ,并根据峰值频率的正投影确定峰值频率在衍射谱面的投影边界 P 。定义增长因子 γ , γ 为手动配置参数,用于控制频率轮廓的大小。该衍射峰的频率由 (\hat{f}_x, \hat{f}_y) 及轮廓 $P\gamma$ 共同描述,表示为 $S_j(\hat{f}_x, \hat{f}_y, P\gamma)$ 。 γ 大于 1 表示对 P 进行放大, γ 小于 1 表示对 P 进行缩小。 γ 越大则轮廓越大;反之,则越小。相比于 Tachyon Tflex 通过 x 、 y 方向的宽度描述频率,Liao 等^[20-21]提出的用 8 方向频率宽度描述频率,通过频率的投影边界和

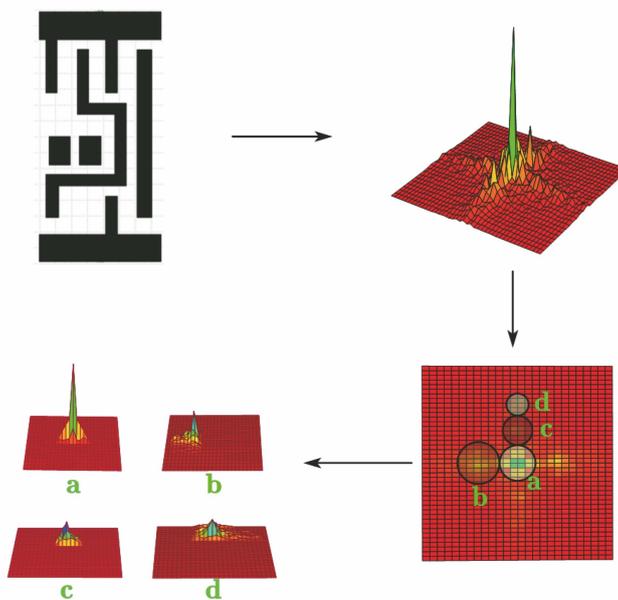


图 1 频率提取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency extraction

峰值频率位置描述频率。所提方法采用受增长因子控制的轮廓形状描述频率,可以更加准确地表征频谱特征。

2.2 频率分组

提取所有频率之后,由于频率之间存在冗余关系,所以需要频率进行分组。本文主要介绍连续衍射峰的分组方法。对于非周期图形,如图 2 所示,如果 F_B 衍射峰的峰值位置 $(\hat{f}_{B,x}, \hat{f}_{B,y})$ 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间的关系对频率进行分组,将被同一代表频率覆盖的频率划分为一组。同一组中可能有多个频率可以覆盖同组其他频率,将这样的频率作为该组中的代表频率。若同一频率被不同的代表频率覆盖,则将其划分到与代表频率距离最近的分组中。增长因子 γ 越大,则同一分组内的频率越多,同一分组内代表频率越多。周期图形的代表频率的提取方法与现有方法相同^[21]。

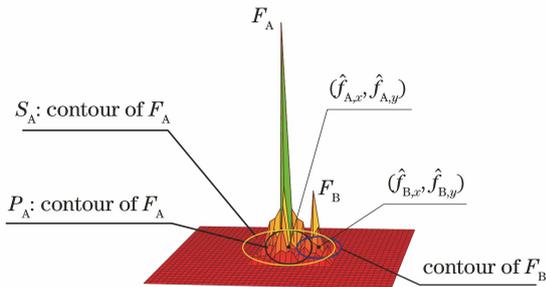


图 2 频率分组示意图

Fig. 2 Schematic diagram of frequency grouping

2.3 关键图形筛选

为了使关键图形组能够尽可能地覆盖所有出现的图形结构,经过筛选后的关键图形组需要覆盖所有出现的频率。在每个分组中,代表频率覆盖其组内所有其他频率,所以得到筛选出的关键图形组如果覆盖所有代表频率,就能覆盖所有其他频率的结论。由于在一个组内可能有多个不同的代表频率,这些代表频率分别来源于不同的掩模图形。所以筛选出的关键图形组可能会有多种可能性,这也是关键图形筛选多解性的原因之一。为了筛选出最佳关键图形组,需要筛选出所有关键图形组进行对比。

本文提出一种基于深度优先搜索的关键图形筛选方法,流程如图 3 所示。首先建立关键图形组与关键图形集。然后将代表频率标记为 unsearched。根据频率分组与图形之间的对应关系搜索含有代表频率为 unsearched 最多的图形,如果图形数量只有一个,将该图形存入关键图形组中,并将该图形的所

有代表频率以及同组的其他代表频率修改为 searched。若图形数量有多个,则按照图形编号顺序,分别将每一个图形存入关键图形组中,并将该图形的代表频率以及同组其他代表频率修改为 searched。然后沿着该分支重复上述搜索,直到所有代表频率都为 searched。此时该分支已完成搜索,将得到的关键图形组存入关键图形集中。重复上述步骤,直到所有分支都完成搜索。

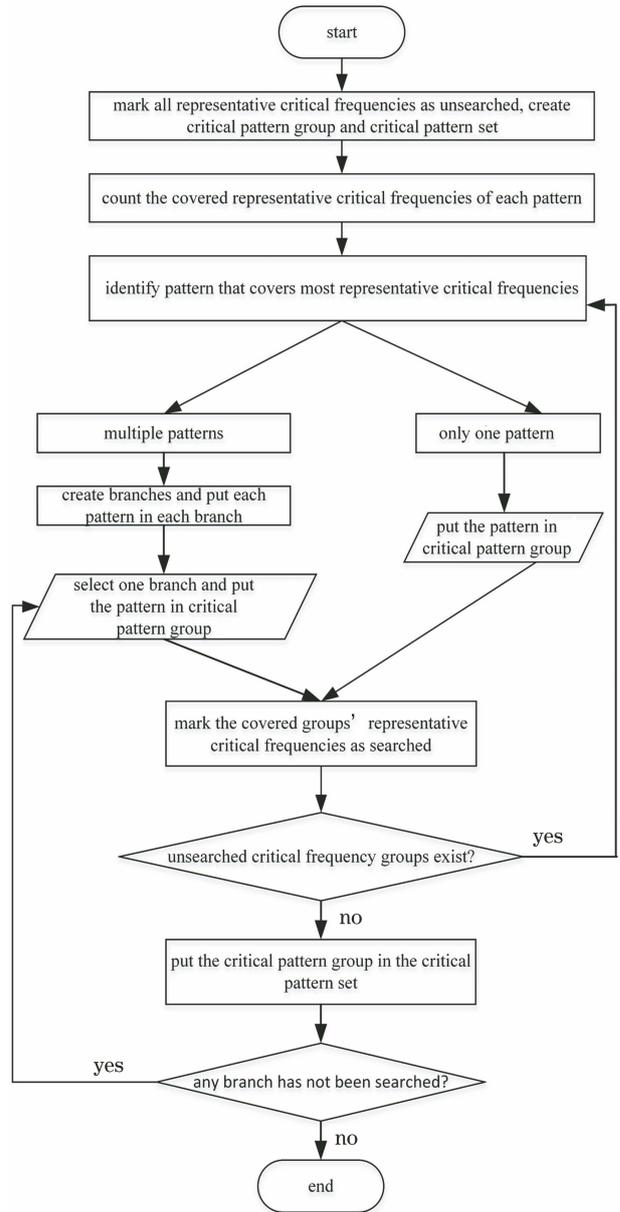


图 3 关键图形筛选流程图

Fig. 3 Flow chart of critical pattern selection

3 仿真结果

表 1 为仿真设置。采用 ASML 公司的 Tachyon Tflex 软件进行仿真。利用 Tachyon Tflex 中的方法

和所提方法对同一图形集进行关键图形筛选。对所提方法筛选出的关键图形组和 Tachyon Tflex 方法筛选出的关键图形组分别进行光源掩模联合优化,得到优化光源,再对全部掩模图形进行掩模优化。分析对比工艺窗口和关键指标。仿真使用的图形集与文献[21]中所使用的图形集相同,是从 45 nm 标准单元库中随机抽取的图形^[23],总计60个。关键图形筛选根

表 1 仿真设置

Table 1 Simulation settings

Lithography tool	NXT:1950i
Mask	Binary/dark field
Source	Freeform
Polarization	x, y

据图形周期性进行区分。为了对比本文方法与文献[21]中方法的工艺窗口,在本次测试中将增长因子 γ 设置为 1。仿真条件也和文献[21]相同。

3.1 区分图形周期性的情况

在区分图形周期性的情况下,本文方法和 Tachyon Tflex 方法同时从图形集中筛选出 11 个图形。本文方法能同时筛选出两组关键图形,分别为 group A 和 group B,其中 group B 也是文献[21]中的筛选结果,而 Tachyon Tflex 方法只能筛选出一组。本文方法的筛选结果如图 4(a)、(b)所示, Tachyon Tflex 方法的筛选结果如图 5 所示。对比两种方法可知,两种方法筛选的结果差异明显,只有两个相同的關鍵图形。

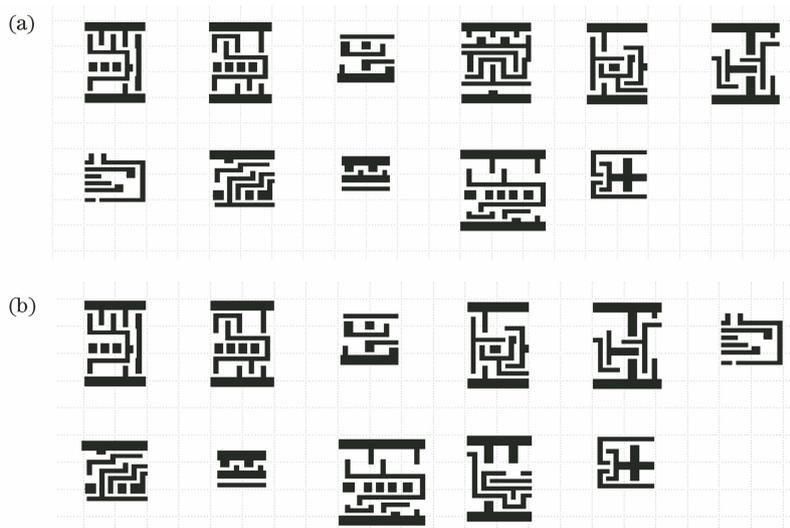


图 4 本文方法的筛选结果。(a) Group A;(b) group B

Fig. 4 Selection results of proposed method. (a) Group A; (b) group B

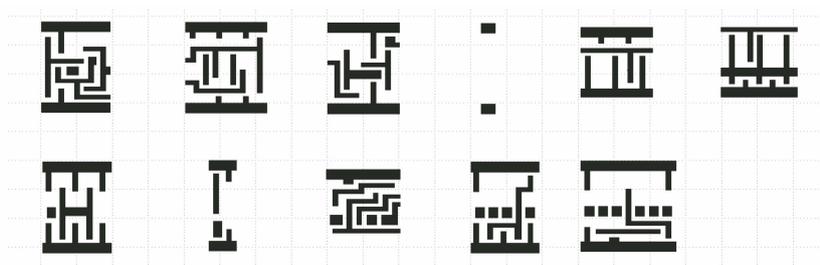


图 5 Tachyon Tflex 方法的筛选结果

Fig. 5 Selection results of Tachyon Tflex method

通过 Tachyon Tflex 对两种方法筛选出的关键图形组进行光源掩模联合优化,得到优化光源,如图 6 所示。通过观察得出,group A 和 Tachyon Tflex 得到的光源基本一致,group B 相比于 Tachyon Tflex 得到的光源在多个方向上都有着更强的光强分布。

利用优化后的光源对全部掩模进行掩模优化,

对比分析两种方法得到的工艺窗口。Group A、group B 与 Tachyon Tflex 获得的工艺窗口对比结果分别如图 7、图 8 所示。正方形+实线为本文方法的工艺窗口,圆形+实线为 Tachyon Tflex 方法对应的工艺窗口。Group A、group B 与 Tachyon Tflex 方法获得的公共工艺窗口对比如图 7(a)、图 8 (a)所示,内接椭圆为 5%曝光容忍度(EL)下的最大

内接椭圆。图 7(b)、图 8(b)分别为 group A、group B 与 Tachyon Tflex 的 EL 随焦深(DOF)的变化。可以看出本文方法获得的工艺窗口优于 Tachyon Tflex 方法,且当 EL 变化时,两种方法获得的 DOF 相同。表 2 展示了 Tachyon Tflex 方法和本文方法获得的 group A、group B 在 10% CD (Critical

Dimension)偏差和 5%EL 下的各项关键指标对比。Group A 和 group B 获得的 DOF (数值越大越好) 优于 Tachyon Tflex 方法,group B 获得的 DOF 优于 group A。Group A 和 Tachyon Tflex 获得的掩模误差增强因子(MEEF,数值越小越好)和光强对数斜率(ILS,数值越大越好)优于 group B。

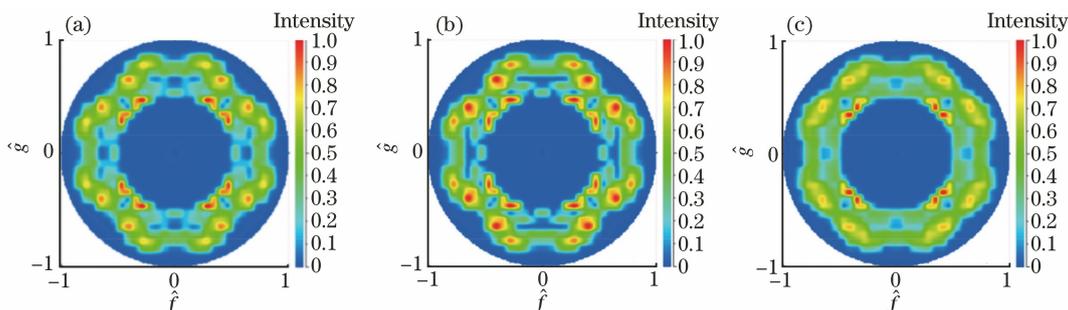


图 6 优化光源。(a)本文方法 group A;(b)本文方法 group B;(c) Tachyon Tflex 方法

Fig. 6 Optimized sources. (a) Group A of proposed method; (b) group B of proposed method; (c) Tachyon Tflex method

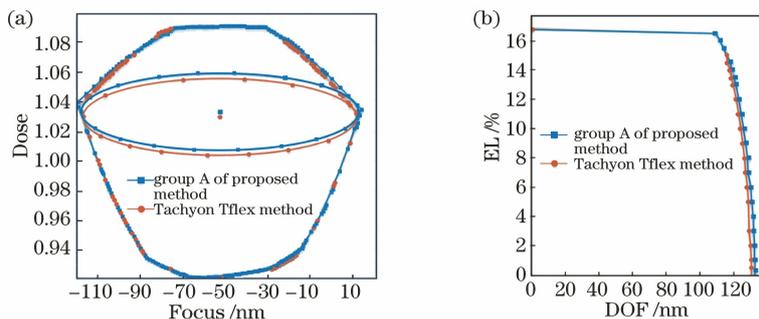


图 7 掩模优化得到的工艺窗口。(a)公共工艺窗口;(b) EL 随 DOF 的变化(group A 与 Tachyon Tflex)

Fig. 7 Process windows obtained after mask optimization. (a) Common process windows; (b) EL varying with DOF (group A and Tachyon Tflex)

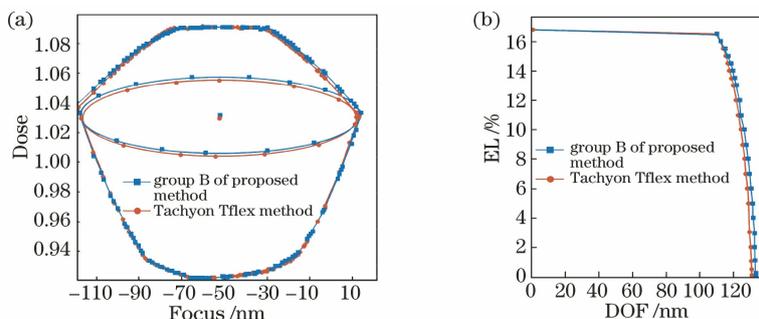


图 8 掩模优化得到的工艺窗口。(a)公共工艺窗口;(b) EL 随 DOF 的变化(group B 与 Tachyon Tflex)

Fig. 8 Process windows obtained after mask optimization. (a) Common process windows; (b) EL varying with DOF (group B and Tachyon Tflex)

表 2 在 10%CD 偏差和 5%EL 下各关键指标对比

Table 2 Comparison of key indicators under 10%CD deviation and 5%EL variation

Critical pattern	DOF /nm	MEEF	ILS
Group A	130.94	2.09	23.24
Group B	131.32	2.17	22.96
Tachyon Tflex	128.94	2.09	23.28

3.2 不区分图形周期性的情况

在不考虑图形周期性的情况下,Tachyon Tflex 筛选出 1 个关键图形组,关键图形组中包含 10 个关键图形。在关键图形数量相同的情况下,如图 9 所示,本文方法共筛选出 8 组不同的关键图形组,分别为 B1~B8。每个关键图形组中同样包含 10 个关键

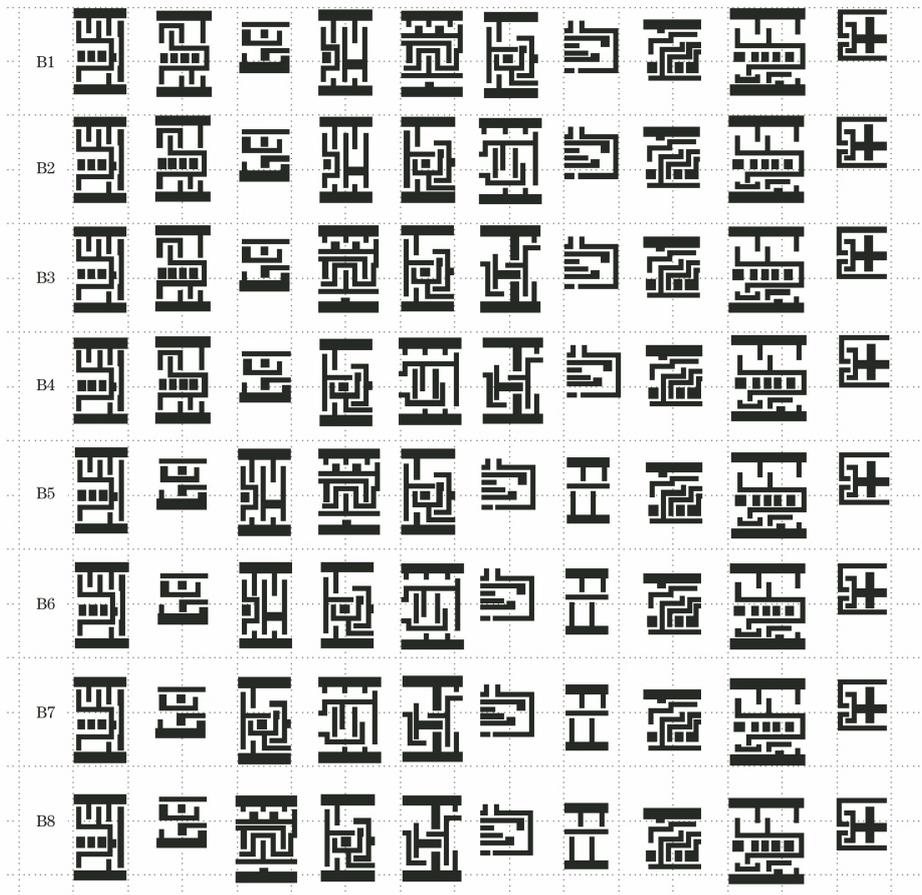


图 9 本文方法的筛选结果

Fig. 9 Selection results of proposed method

图形且由于筛选方法的差异,每个关键图形组都不完全相同。由于仿真中增长因子 γ 设置为 1,所以 B3 也是廖陆峰等^[21]所提方法的筛选结果。图 10 为 Tachyon Tflex 筛选出的关键图形组。本文方法筛选出的关键图形组和 Tachyon Tflex 筛选出的关键图形组完全不同。关键图形筛选问题是多解问题^[21]。筛选出的关键图形组决定于所采用的筛选

技术。本文方法在频率提取、频率聚类的方法方面与 Tachyon Tflex 方法明显不同,且根据频率分组所设计的关键图形筛选算法也不同,导致筛选结果不同。而本文方法筛选出的关键图形组 B1~B8 之间差异较小,正是这些差异带来了不同的优化结果,体现了关键图形筛选问题的多解性特点。

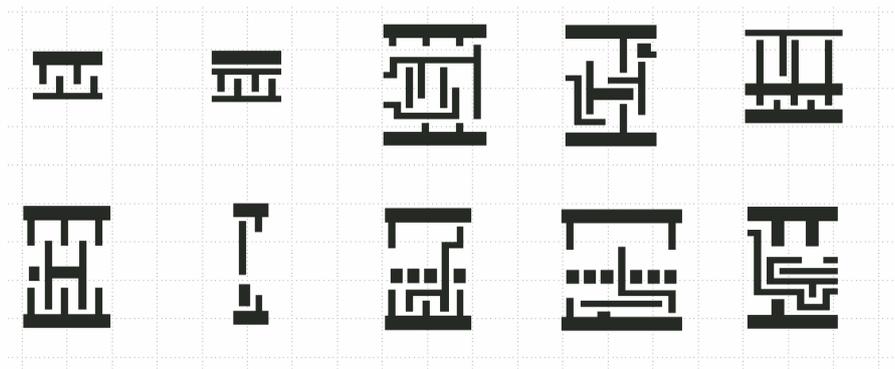


图 10 Tachyon Tflex 方法的筛选结果

Fig. 10 Selection results of Tachyon Tflex method

图 11 为 Tachyon Tflex 方法优化所得的光源。采用 Tachyon Tflex 分别对 B1~B8 进行光源优化, 优化后的光源如图 12 所示, 其中 B3 同时也是廖陆峰等^[21]所提方法产生的光源。相比于图 11 所示 Tachyon Tflex 方法优化所得的光源, 利用本文方法对 B2、B5、B6、B7 进行优化所得的光源在整体上有更强的光强分布。之后采用优化后的光源对全部掩模进行掩模优化, 得到公共工艺窗口和 EL 随 DOF 的变化曲线对比如图 13(a)~(h)所示。正方形+实线为本文方法, 圆形+实线为 Tachyon Tflex 方法。表 3 为本文方法和 Tachyon Tflex 方法在 10%CD 偏差和 5%EL 获得的 DOF、MEEF 和 ILS 结果的对比。经过对比分析可得, 本文方法得到的公共工艺窗口优于文献[21]中方法和 Tachyon

Tflex 得到的公共工艺窗口。在本文方法得到的 8 组关键图形组中, 采用 B5 关键图形组获得的工艺窗口最大且其中的关键图形与 Tachyon Tflex 方法筛选出的关键图形完全不相同, 本文方法得到的关键图形明显优于其他关键图形组, 所以 B5 关键图形组为本文方法所得的最优解。

表 3 在 5%EL 与 10%CD 偏差下各项关键指标对比(不考虑图形周期性)

Table 3 Comparison of key indicators under 5%EL and 10%CD deviation (graph periodicity is not considered)

Critical pattern	DOF /nm	MEEF	ILS
B1	130.36	2.11	23.21
B2	133.3	2.14	23.23
B3	128.34	2.10	23.21
B4	129.58	2.16	23.42
B5	134.76	2.11	23.16
B6	134.16	2.11	23.23
B7	133.98	2.10	23.22
B8	133.16	2.11	23.13
Pattern obtained by Tachyon Tflex	129.66	2.09	23.21

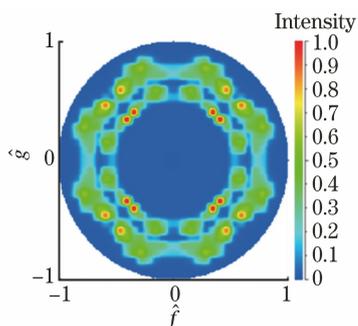


图 11 Tachyon Tflex 方法得到的优化光源

Fig. 11 Optimized source obtained by Tachyon Tflex method

为了平衡性能与时间开销, 本文方法以图形数最少为原则进行了图形筛选, 但并没有预先限定关键图形的具体数量。若不限关键图形数量, 在考虑图形周期性的情况下, 本文方法共筛选出 10 组不同的关键图形组, 其中 2 组各包含 11 个关键图形、8 组各包含 12 个关键图形。在不考虑图形周期性的

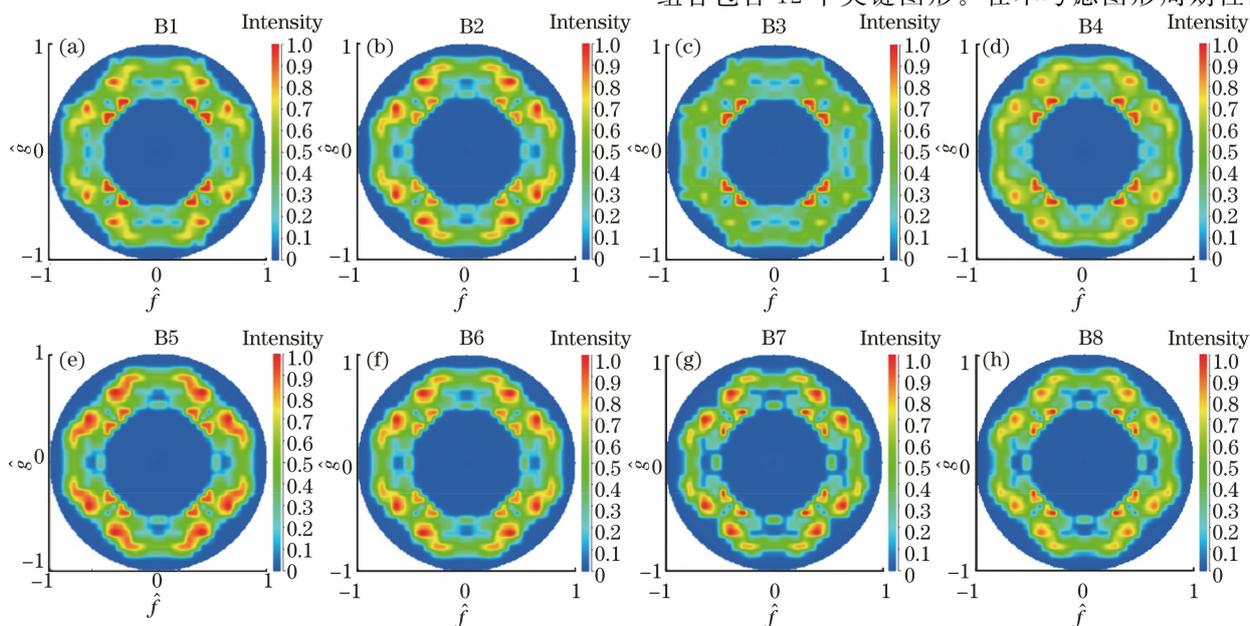


图 12 本文方法筛选出的关键图形组 B1~B8 分别经过掩模优化后的光源

Fig. 12 Light sources after mask optimization for critical pattern groups B1~B8 obtained by proposed method

情况下,本文方法共筛选出 76 组不同的关键图形组,其中 8 组各包含 10 个关键图形、48 组各包含 11

个关键图形,其余组各包含 12 个关键图形。这进一步验证了图形筛选问题的多解性特点。

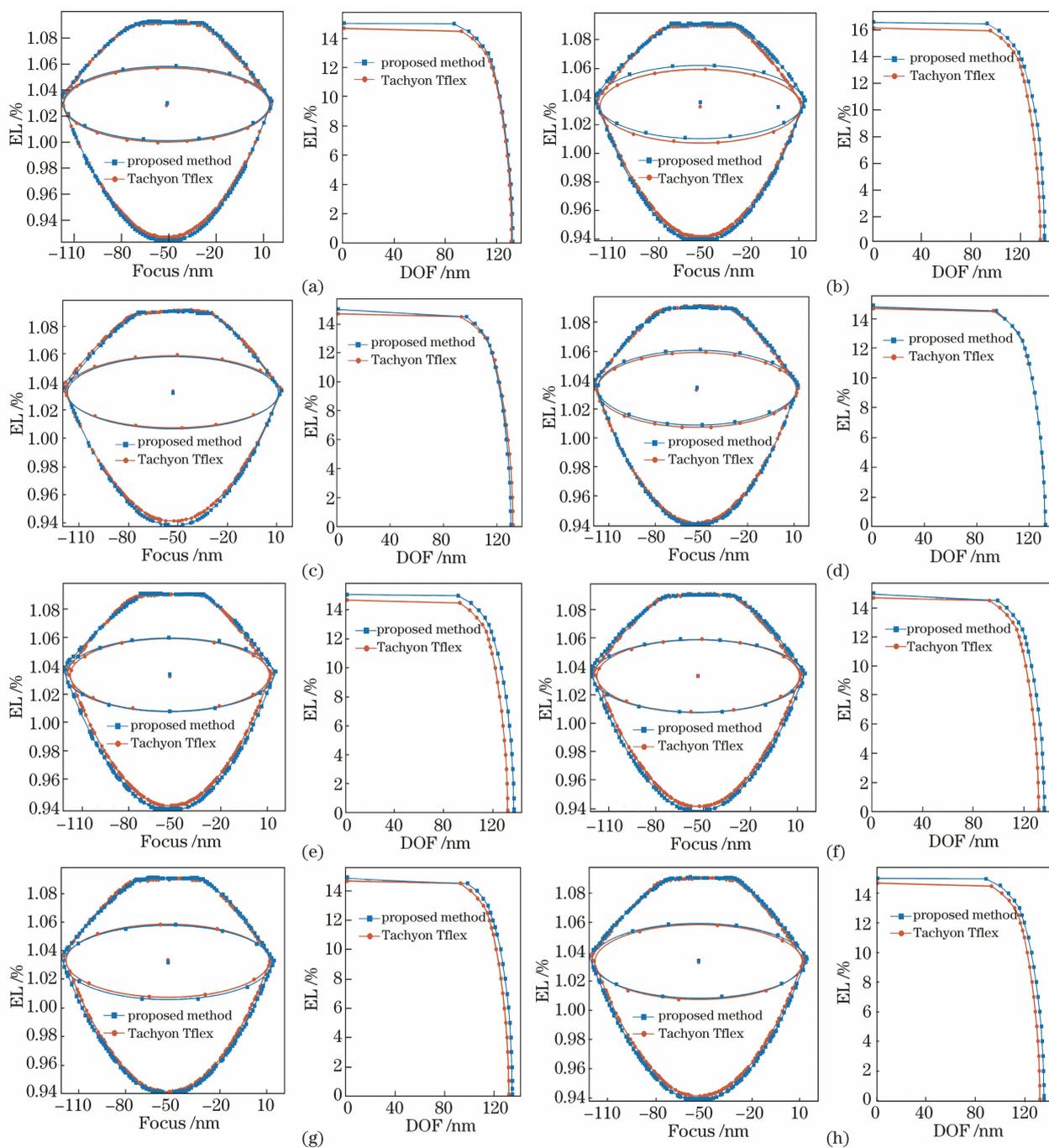


图 13 公共工艺窗口和 EL 随 DOF 的变化曲线对比图。(a) B1;(b) B2;(c) B3;(d) B4;(e) B5;(f) B6;(g) B7;(h) B8

Fig. 13 Comparison of public process windows and EL varying with DOF. (a) B1; (b) B2; (c) B3; (d) B4; (e) B5; (f) B6; (g) B7; (h) B8

4 结 论

提出了一种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。本文方法通过掩模的衍射谱对掩模进行表征。其中衍射谱频率通过衍射峰的位置和受增长因子控制的轮廓表征。为了解决频

率冗余的问题,利用频率轮廓和位置间的关系对频率进行分组。基于深度优先搜索对频率分组进行关键图形筛选,得到不同的关键图形组。利用商用计算光刻软件 Tachyon Tflex 对本文方法的有效性进行了仿真。仿真结果表明,本文方法获得的工艺窗口优于商用软件的工艺窗口,可以获得所有的关键

图形组,以便筛选出最佳关键图形组。

参 考 文 献

- [1] Quirk M, Serda J. Semiconductor manufacturing technology[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001: 367-412.
- [2] Wong A. Resolution enhancement techniques in optical lithography[M]. Washington: SPIE, 2001: 28-30, 91-180.
- [3] Kojima Y, Moniwa A, Maruyama T, et al. Novel OPC flow for the trim-mask lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8441: 84410I.
- [4] Vallishayee R R, Orszag S A, Barouch E. Optimization of stepper parameters and their influence on OPC [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2726: 660-669.
- [5] Chang C H, Schacht J, Lin B S M, et al. Specification of the phase angle of a 6% attenuated PSM mask used in ArF lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5377: 902-910.
- [6] Burkhardt M, Yen A, Progler C, et al. Illuminator design for the printing of regular contact patterns[J]. Microelectronic Engineering, 1998, 41/42: 91-95.
- [7] Li J L, Melvin L S. Sub-resolution assist features in photolithography process simulation [C]//2007 Digest of papers Microprocesses and Nanotechnology, November 5-8, 2007, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2007: 394-395.
- [8] Socha R, Shi X L, LeHoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO)[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5853: 180-193.
- [9] Yu J C, Yu P C. Gradient-based fast source mask optimization (SMO)[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 797320.
- [10] Rosenbluth A E, Seong N. Global optimization of the illumination distribution to maximize integrated process window [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61540H.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Progler C, Conley W, Socha B, et al. Layout and source dependent transmission tuning [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 315-326.
- [18] Tsai M C, Hsu S, Chen L Q, et al. Full-chip source and mask optimization [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730A.
- [19] Socha R. Freeform and SMO [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 797305.
- [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] Wong A K. Optical imaging in projection microlithography[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [23] Foundation IP for 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.