

## 45. Форма осветителя как ключевой фактор при разработке методик дифракционной коррекции изображения в проекционной фотолитографии для технологий уровня 65 нм и менее

Н. Н. Балан, В. В. Иванов, А. В. Кузовков  
АО «НИИМЭ», Москва, Зеленоград, Россия

Статья посвящена роли подбора наилучшей формы осветителя при реализации техник повышения разрешения проекционной фотолитографии (RET). Описан принцип влияния внеосевого освещения на разрешающую способность фотолитографии, рассмотрены основные виды внеосевых осветителей, используемых в современной полупроводниковой технологии. Приведены результаты расчета оптимальной формы параметрического осветителя для слоя первого металла в перспективном технологическом процессе.

*Ключевые слова:* Проекционная фотолитография, Оптимизация формы осветителя, Дифракционная коррекция изображения, Коррекция оптической близости.

*Цитирование:* Балан, Н. Н. Форма осветителя как ключевой фактор при разработке методик дифракционной коррекции изображения в проекционной фотолитографии для технологий уровня 65 нм и менее / Н. Н. Балан, В. В. Иванов, А. В. Кузовков // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 233–241.

### Введение

Вот уже много лет возможности литографии непрерывно растут, обеспечивая в свою очередь постоянный рост быстродействия и степени интеграции устройств электронной техники.

Как известно [1], разрешающая способность проекционной фотолитографии (в данном случае имеется в виду минимальный размер полупериода печатаемых структур) может быть определена соотношением

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны экспонирующего излучения,  $NA = n \sin \theta$  — числовая апертура объектива ( $\theta$  — апертурный угол,  $n$  — показатель преломления среды), а  $k_1$  — технологический коэффициент. В классической Релеевской формуле для разрешения оптических систем он равен 0,61 [2].

Разнообразные технические и технологические ухищрения, направленные на уменьшение коэффициента  $k_1$ , как правило, именуются в литературе термином RET (Resolution Enhancement Techniques). Использование RET позволяет добиться пропечатывания в резисте элементов с размерами значительно менее длины волны используемого излучения. К указанным методам можно отнести:

- применение внеосевого освещения;

- введение фазовых элементов на фотошаблоне;
- дифракционную коррекцию изображения или коррекцию оптической близости;
- применение многократной экспозиции.

**Внеосевое освещение**, как и **введение фазовых элементов в фотошаблон**, позволяет перестроить дифракционную картину переносимого в резист изображения с целью обеспечения попадания в объектив наибольшего количества гармоник изображения, несущих полезный сигнал («грубая» перестройка дифракционной картины).

**Дифракционная коррекция, называемая обычно коррекцией оптической близости** (Optical Proximity Correction — OPC), включает в себя набор методик, осуществляющих как изменение формы переносимых в слой резиста элементов рисунка, так и добавление на фотошаблон дополнительных элементов, заведомо меньших предела разрешения литографической установки, не прорабатываемых в резисте, но оказывающих интерференционное влияние на основные структуры рисунка («тонкая» перестройка дифракционной картины) [3].

**Многократная экспозиция** — исключительно технологический метод, состоящий в разбиении сложного рисунка на несколько более простых и впечатывании их в резист последовательно с разных фотошаблонов, при этом для каждого впечатывания при необходимости возможны индивидуальные подбор формы осветителя, введение фазовых элементов в фотошаблон и дифракционная коррекция изображения [4].

Комбинирование различных RET позволяет добиться значения  $k_1 \approx 0,2$  (или даже менее), что соответствует уровню технологии  $28 \text{ нм}$  при использовании эксимерного ArF лазера с длиной волны  $193 \text{ нм}$  и иммерсионного объектива с числовой апертурой  $NA = 1,35$ .

Реализация необходимых RET практически всегда начинается с выбора наилучшей формы осветителя, обеспечивающей оптимальную проработку всех критических структур переносимого в резист рисунка, и согласования по толщинам и показателям преломления слоев литографического стека (антиотражающие слои, резист, слои подложки).

Далее будет описан принцип влияния внеосевого освещения на разрешающую способность проекционной фотолитографии. Будут рассмотрены основные подходы, применяемые на сегодняшний день в рамках данной методики, и приведены некоторые расчеты.

## 1. Внеосевое освещение.

### Основные типы внеосевых осветителей

Как известно, бинарный фотошаблон, содержащий группу непрозрачных параллельных периодических линий с периодом  $p$ , при освещении нормально падающей плоской ТЕ-волной длины  $\lambda$  (осевое точечное освещение) формирует дифракционную картину дискретных порядков (рисунок 1), отстоящих друг от друга в плоскости пространственных частот на расстояние, пропорциональное  $1/p$ . В силу конечных размеров объектива пространственные частоты высших порядков отсекаются, что ухудшает качество воспроизводимого изображения.

Для линий достаточно малого периода наблюдается отсечка всех порядков, кроме нулевого и первых, и в этом случае нормированное распределение интенсивности излучения,

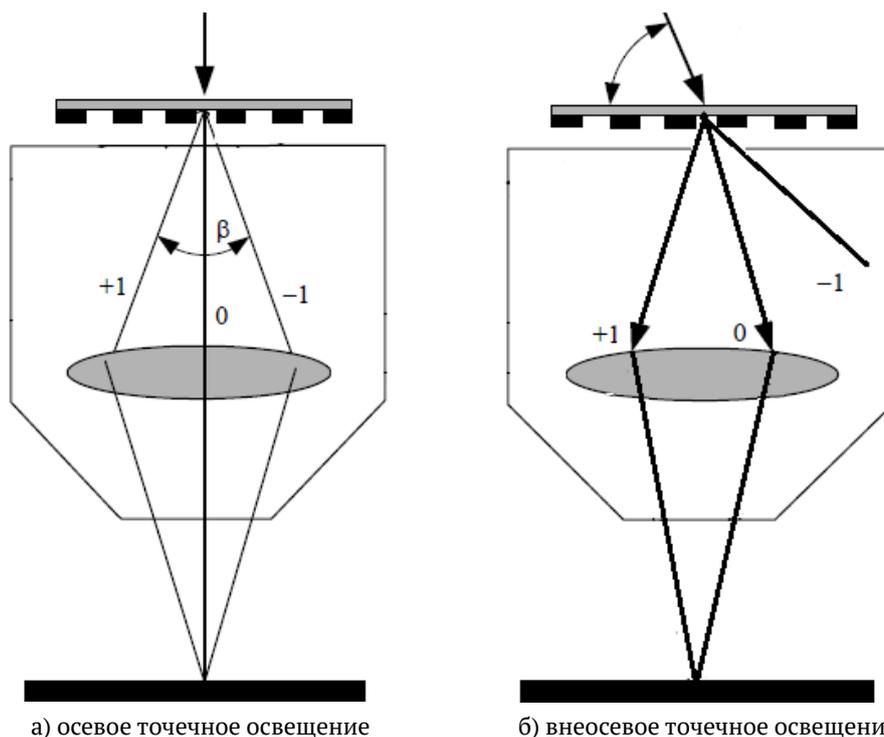


Рис. 1. К объяснению принципа внеосевого освещения фотошаблона [5]

прошедшего через объектив, в плоскости изображения дается формулой (2) [1]. Предполагается, что кратность объектива равна единице.

$$I(x) = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) + \frac{4}{\pi^2} \cos^2\left(\frac{2\pi x}{p}\right). \quad (2)$$

Первый член правой части в (2) соответствует равномерной засветке, второй (несущий основную информационную составляющую) есть результат интерференции первых порядков с нулевым. Третий член обусловлен интерференцией первых порядков между собой и вносит в результирующее изображение гармоническую компоненту двойной частоты, повышая контраст изображения.

Пространственная частота отсечки  $\pm 1$  порядков дифракции, обусловленная конечными размерами оправы объектива, равна по модулю  $NA/\lambda$ . Таким образом, при использовании бинарного фотошаблона с осевым пространственно-когерентным (точечным) освещением разрешаемый период линий не может быть менее  $\lambda/NA$ , поскольку в этом случае изображение исчезает вовсе. Использование в этом случае внеосевого точечного освещения (рисунок 1б) позволяет добиться попадания в объектив вместе с нулевым как минимум одного из ненулевых порядков дифракции, что приводит к восстановлению полезного сигнала. Таким образом, внеосевое освещение позволяет вернуть изображение, пусть и за счет некоторой потери его контраста.

В случае использования протяженного осветителя каждый из порядков дифракции представляет собой в плоскости пространственных частот конечную область (рисунок 2а), что позволяет формировать в слое резиста изображение некоторого количества групп линий, не раз-

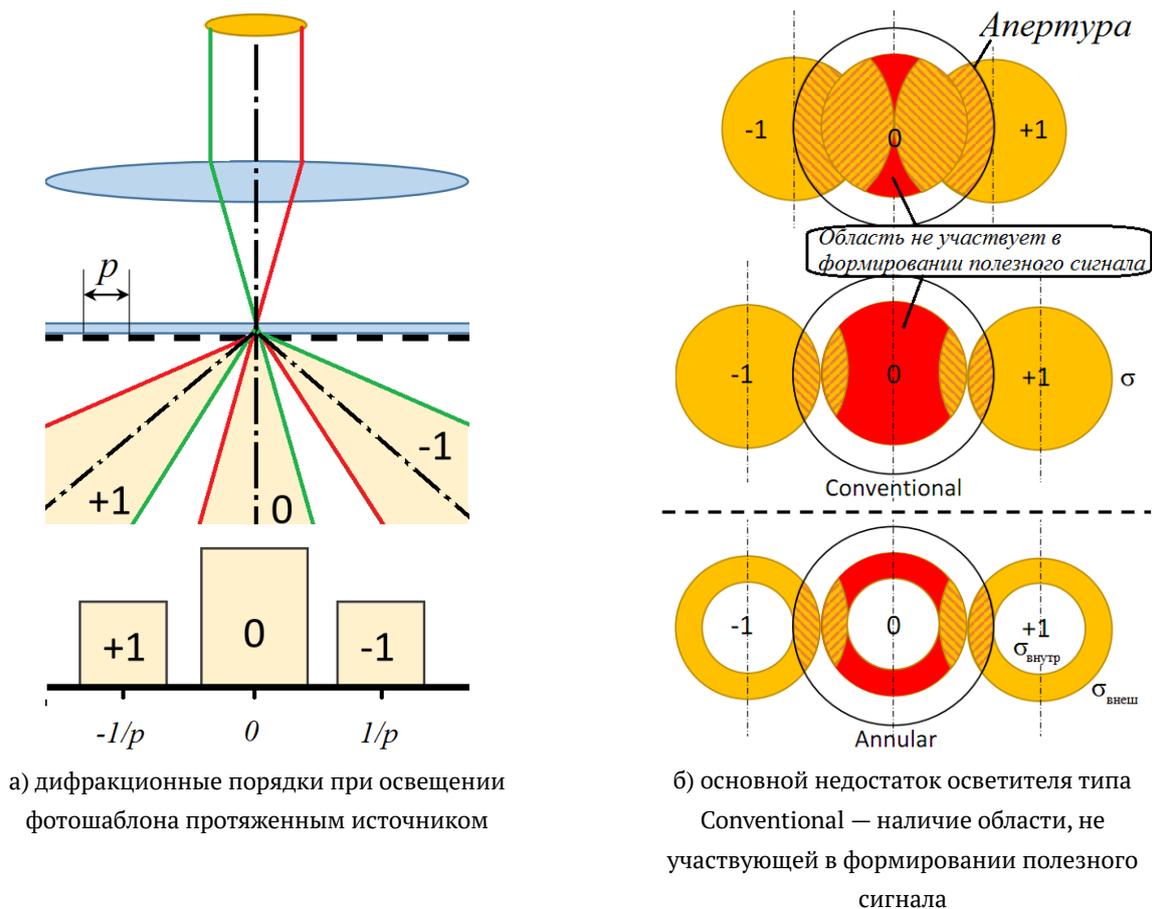


Рис. 2. Освещение фотошаблона протяженным источником [6]

решаемых литографической установкой в случае использования осевого точечного освещения и имеющих разные значения периода. Самой широко используемой формой протяженного осветителя является форма диска. Такой осветитель обычно именуется *Conventional* и характеризуется параметром

$$\sigma = \frac{n \sin \theta_{\text{осв}}}{NA} = \frac{\text{Диаметр источника}}{\text{Диаметр апертуры объектива}}, \quad (3)$$

где  $\theta_{\text{осв}}$  – угол светового конуса дифракционного порядка (рисунок 2а).

Основной недостаток такого осветителя, показанный на рисунке 2б, заключается в том, что, начиная с некоторых значений периода линий передаваемого рисунка, значительная часть площади источника перестает участвовать в формировании полезного сигнала, добавляя к изображению лишь паразитную засветку, тем самым понижая контраст передаваемого изображения. Так появились параметрические источники сложной формы, призванные в какой-то мере исправить эту проблему. Такие источники, как правило, описываются несколькими параметрами. Например, показанный на рисунке 2б кольцевой источник (или *Annular*) характеризуется параметрами  $\sigma_{\text{внешн}}$  и  $\sigma_{\text{внутр}}$ .

Некоторые более сложные параметрические источники приведены на рисунке 3.

Главная проблема таких осветителей заключается в том, что они оптимизируются для весьма ограниченного количества конфигураций передаваемого рисунка. В частности, для линий некоторых периодов глубина фокуса показывает минимальное значение, сравнимое с

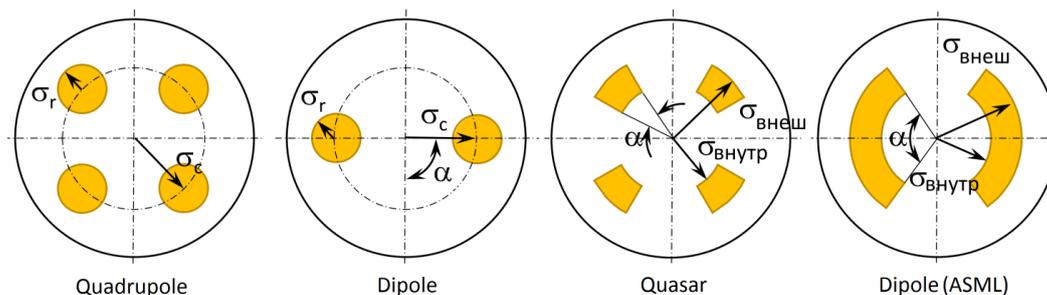


Рис. 3. Примеры параметрических осветителей

глубиной фокуса для одиночных линий, на проработку которых внеосевое освещение вообще не оказывает заметного влияния [1]. Это чревато неудовлетворительной проработкой таких линий при литографии, что вынуждает разработчиков вносить в правила проектирования изделий дополнительные требования по исключению из дизайна групповых линейчатых структур определенного периода.

Что же касается одиночных линий и прямоугольников, то для их успешной проработки в условиях освещения, оптимизированного для групповых периодических линий, в топологию схемы добавляются упомянутые ранее дополнительные элементы (так называемые SRAF — Sub-Resolution Assist Features), не прорабатываемые в резисте из-за своего небольшого размера, но оказывающие влияние на картину дифракции, приближая ее к случаю дифракционной картины, формируемой групповыми периодическими линейчатыми структурами.

В последние годы для полупроводниковой технологии современного уровня (65–28нм), использующей литографические установки на основе эксимерных ArF лазеров с длиной волны 193 нм, подобный подход сталкивается все с большими затруднениями, поскольку дизайн изделий становится более сложным, а технологические процессы более дорогими. В связи с этим для технологов становится целесообразным избегать сложных операций формирования приборных слоев, включающих в себя несколько литографий (упомянутое ранее многократное впечатывание или процессы с жесткой маской), удешевляя технологический процесс и уменьшая время, затрачиваемое на изготовление изделия. Эту задачу существенно облегчает применение наборных пиксельных осветителей, которыми в настоящее время комплектуются установки проекционной оптической литографии, предназначенные для продвинутых уровней технологии [7].

На рисунке 4 изображен степпер-сканер TWINSCAN NXT:1970Ci, содержащий наборную систему освещения произвольной формы FlexRay на основе микрозеркал (рисунок 4б).

Форму подобного осветителя можно оптимизировать для множества элементов топологии критического слоя, добившись значительного улучшения суммарного процессного окна [8].

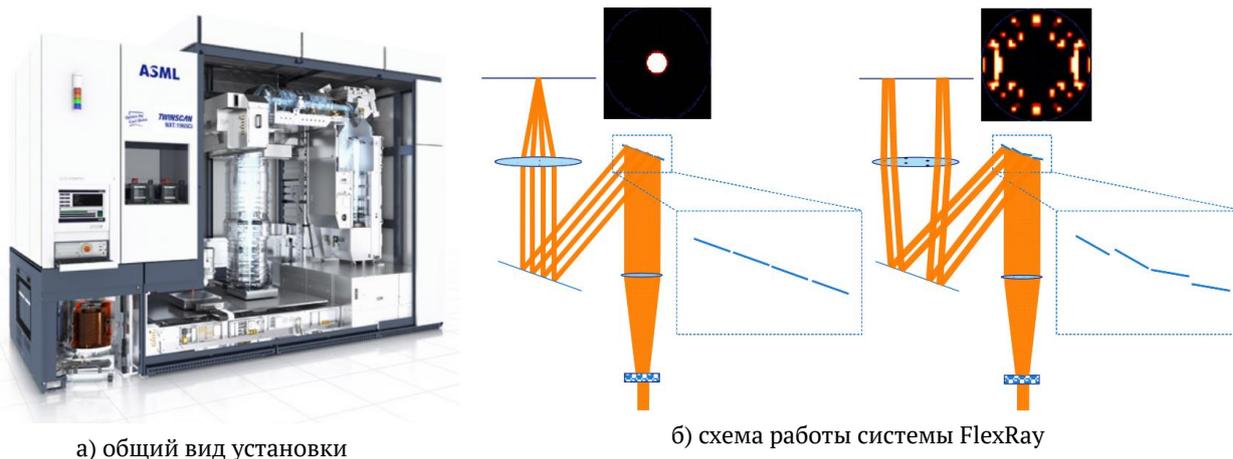
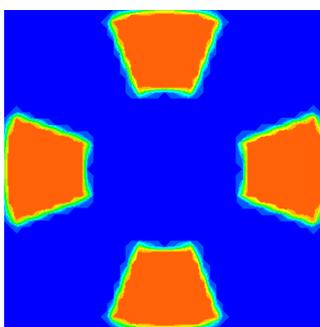


Рис. 4. Степпер-сканер TWINSKAN NXT:1970Ci



Quasar, ориентация Cross, угол выреза  $40^\circ$ ,  $\sigma_{\text{Внешн}} = 1$  и  $\sigma_{\text{Внутр}} = 0,5$

Рис. 5. Начальная форма осветителя

### 3. Подбор оптимальных параметров параметрического осветителя для слоя медной коммутации по анализу воздушного изображения

В рамках данной работы решалась задача подбора оптимальной формы параметрического источника для слоя первого металла в перспективном технологическом процессе. Тон фотошаблона предполагался темным, ширина элемента 50 нм, наиболее часто используемый период линий 100 нм.

В качестве исходной формы осветителя была выбрана конфигурация Quasar с ориентацией Cross (рисунок 5) в предположении того, что топология состоит преимущественно из вертикальных и горизонтальных линейчатых структур. Начальные  $\sigma_{\text{Внешн}}$  и  $\sigma_{\text{Внутр}}$  равны соответственно 1 и 0,5. Начальный угол выреза —  $40^\circ$ .

Предполагается использовать иммерсионную среду с показателем преломления 1,44, а также ослабляющий фазовый ФШ с коэффициентом пропускания темных областей 0,06 и вращением фазы  $180^\circ$ . Рабочая длина волны  $\lambda = 193$  нм.

Метрикой качества воздушного изображения в литографии является так называемая *нормированная логарифмическая крутизна интенсивности* или *NILS* (Normalized Intensity Log-Slope), определяемая выражением:

$$NILS = \frac{w}{l} \frac{dl}{dx} = w \frac{d(\ln I)}{dx}, \quad (4)$$

IV. Голограммные и дифракционные оптические элементы,  
компьютерно-синтезированные голограммы, метаматериалы и плазмонные структуры

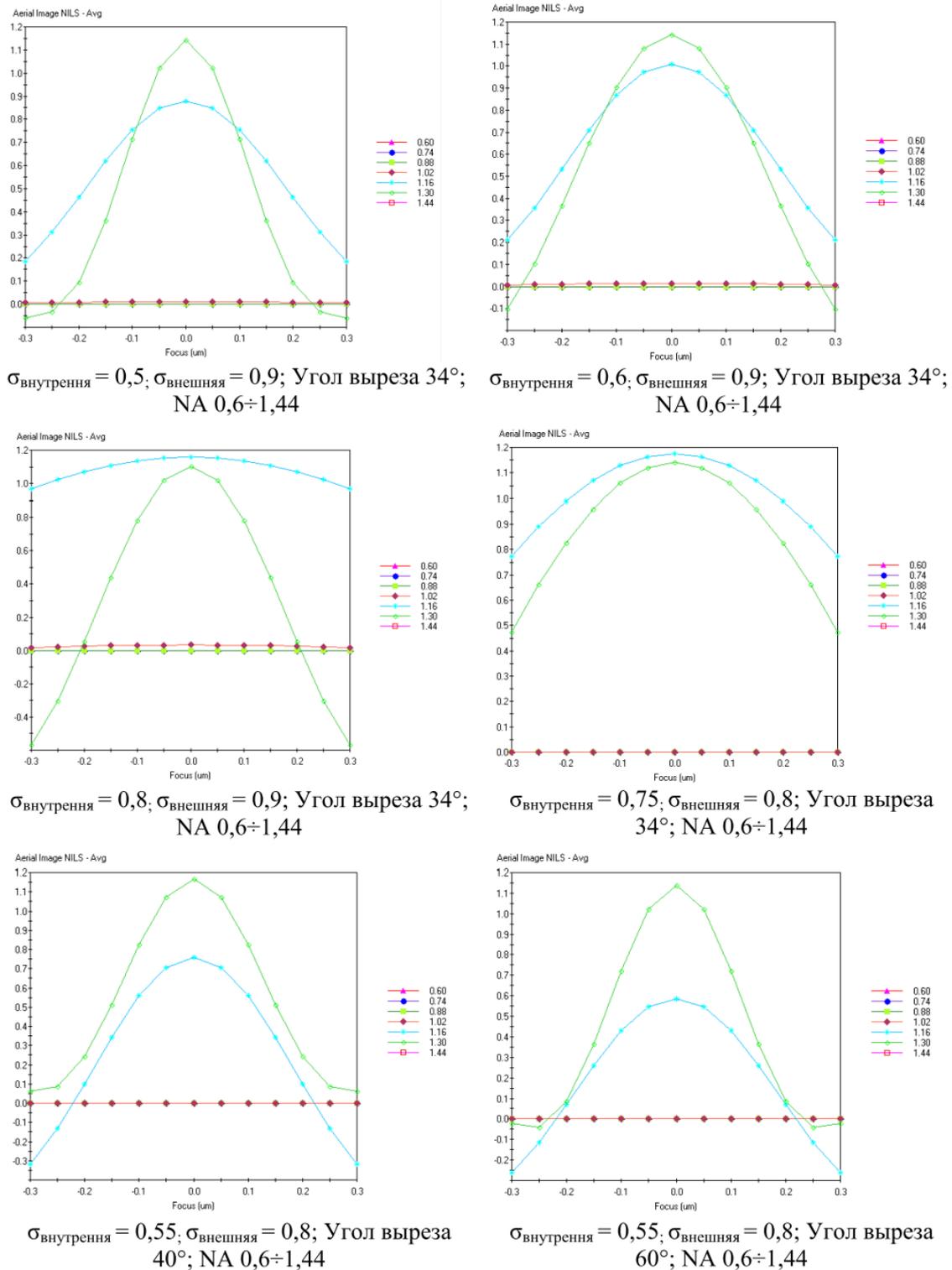


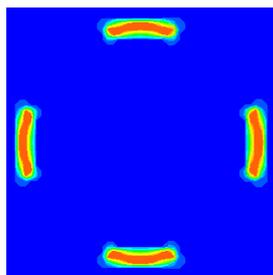
Рис. 6. Зависимости NLS от дефокуса для различных значений числовой апертуры и параметров осветителя

где  $w$  — характерная величина структуры, а производная берется на ее границе.

В качестве критерия оптимизации используется величина

$$A = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} NLS(f)df = \max, \quad (5)$$

выступающая аналогом ширины процессного окна при рассмотрении воздушного изображения. Интегрирование производится от  $F_{\min} = -0,2$  мкм до



Quasar, ориентация Cross, угол выреза  $34^\circ$ ,  $\sigma_{\text{Внешн}} = 0,9$  и  $\sigma_{\text{Внутр}} = 0,8$

Рис. 7. Оптимизированная форма осветителя

$F_{\text{max}} = 0,2$  мкм. На рисунке 6 показаны некоторые зависимости  $NILS$  от дефокуса при разных значениях числовой апертуры и параметров осветителя. Из показанных зависимостей видно, что оптимальными параметрами оптической системы являются  $NA = 1,16$ ;  $\sigma_{\text{Внешн}} = 0,8$ ;  $\sigma_{\text{Внутр}} = 0,9$ ; Угол выреза —  $34^\circ$ . Оптимизированная форма осветителя изображена на рисунке 7.

### Заключение

Выбор формы осветителя является важнейшим элементом процедуры повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии, реализуемым, как правило, в первую очередь, на основе анализа формируемого воздушного изображения периодических структур топологии литографического слоя.

Для решения задачи оптимизации формы параметрического источника целесообразно использовать зависимость  $NILS$  от фокуса, добиваясь максимума интегрального параметра  $A = \int_{F_{\text{min}}}^{F_{\text{max}}} NILS(f)df$  при варьировании параметров источника.

Открытым остаётся вопрос об оптимизации формы наборного источника для всех критических структур топологии изделия в связке с коррекцией их геометрии, что является темой для отдельной работы.

### Список источников

- [1] **Макк, С.** Fundamental Principles of Optical Lithography. The Science of Microfabrication / Chris Mack. — Wiley, 2008. — 534 p.
- [2] **Сейсян, Р. П.** Нанолитография в микроэлектронике (Обзор) / Р. П. Сейсян // Журнал технической физики. — 2011. — Том 81. — № 8. — С. 1–14.
- [3] **Балан, Н. Н.** Технологии дифракционной коррекции изображения в разработке фотошаблонов для УФ фотолитографии / Н. Н. Балан // Голография. Наука и практика XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: тезисы докладов. — Общество с ограниченной ответственностью «Микро и наноголографические системы», 2017. — С. 169–175.
- [4] **Wei, Y.** Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography / Y. Wei, R. L. Brainard. — SPIE Press, 2009.
- [5] **Макарчук, В. В.** Методы литографии в наноинженерии / В. В. Макарчук, И. А. Родионов, Ю. Б. Цветков. — М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2011. — 174 с.

- [6] **Красников, Г. Я.** Проблемы и перспективы развития методов коррекции оптической близости для современных уровней технологии / Г. Я. Красников, Д. В. Синюков // Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания». — 2019. — Том 1. — № 3. — С. 17–22.
- [7] **Bekaert, J.** Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay / J. Bekaert, J. T. N. L. van Look, K. D'havé, B. Laenens, G. Vandenberghe, P. van Adrichem, W. Shao, J. Ghan K. Schreel, J. Bekaert // Proc. of SPIE. — 2011. — Vol. 7973 — P. 7973–7973-12. — DOI:10.1117/12.881607.
- [8] **Zhang, D.** Source mask optimization methodology (SMO) and application to real full chip optical proximity correction / D. Zhang, G. Chua, Y. Foong, Y. Zou, S. Hsu, S. Baron, M. Feng, H.-Y. Liu, Z. Li, J. Schramm, T. Yun, C. Babcock, B. I. Choi, S. Roling, A. Navarra, T. Fischer, A. Leschok, X. Liu, W. Shi, J. Qiu, R. Dover // Optical Microlithography XXV. Proc. of SPIE. — 2012. — Vol. 8326 — P. 83261V. — DOI:10.1117/12.916614.