



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-37-45>

УДК 621.382.002

ВЛИЯНИЕ ВНЕОСЕВОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ОПТИМИЗАЦИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 250–350 нм

А. А. ЗАХАРЕВИЧ^{1,2}, И. Ю. ЛОВШЕНКО²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. С увеличением плотности интеграции и уменьшением размеров элементов появляется необходимость оптимизации технологических процессов фотолитографии. Для повышения разрешающей способности и глубины фокуса объективов проекционного оборудования, работающего в УФ-диапазоне на базе ртутных газоразрядных ламп, эффективно применение внеосевого освещения. Метод внеосевого освещения уменьшает дифракционные ограничения и повышает разрешающую способность при проектных нормах порядка 250–350 нм. В статье представлены результаты комплексного анализа методов формирования и оптимизации систем внеосевого освещения в проекционной фотолитографии, предложен и апробирован метод имитации внеосевого кольцевого освещения для установок, не имеющих штатных систем повышения разрешения, эффективность и адекватность которого подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: проекционная фотолитография, внеосевое освещение, разрешающая способность, проектные нормы интегральных микросхем, глубина фокуса, минимальный элемент разрешения, оборудование проекционной печати, экспонирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Захаревич, А. А. Влияние внеосевого освещения на оптимизацию технологического процесса проекционной фотолитографии с проектными нормами 250–350 нм / А. А. Захаревич, И. Ю. Ловшенко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 2. С. 37–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-37-45>.

THE IMPACT OF OFF-AXIS ILLUMINATION ON THE OPTIMIZATION OF THE 250–350 nm PROJECTION PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS

ANDREI ZAKHAREVICH^{1,2}, IVAN LOVSHENKO²

¹JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. With increasing integration density and decreasing feature sizes, there is a need to optimize photolithography processes. Off-axis illumination is effective in increasing the resolution and depth of focus of lenses in projection equipment operating in the UV range using mercury-vapor discharge lamps. Off-axis illumination reduces diffraction limitations and improves resolution within design limits of approximately 250–350 nm. This article presents the results of a comprehensive analysis of methods for developing and optimizing off-axis illumination systems in projection photolithography. A method for simulating off-axis ring illumination for systems lacking standard resolution enhancement systems is proposed and tested. The effectiveness and adequacy of this method are confirmed by experimental studies.

Keywords: projection photolithography, off-axis illumination, resolution, integrated circuit design rules, depth of focus, minimum resolution element, projection printing equipment, exposure.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Zakharevich A., Lovshenko I. (2026) The Impact of Off-Axis Illumination on the Optimization of the 250–350 nm Projection Photolithography Process. *Doklady BGUIR*. 24 (2), 37–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-37-45> (in Russian).

Введение

Современные тенденции развития микроэлектроники, направленные на постоянную миниатюризацию элементов топологии, определяют необходимость реализации проектных норм в диапазоне от 250 до 350 нм для технологий проекционной фотолитографии. Переход к таким проектным нормам предъявляет новые требования к улучшению оптических характеристик оборудования, в частности, к разрешающей способности и глубине резкости (фокуса) (depth of field (depth of focus), DOF) процессов фотолитографии, а также к методам повышения разрешения (resolution enhancement techniques, RET).

В процессе формирования субмикронных структур должны учитываться дифракционные явления в осветительной системе и проекционном объективе, а также взаимное влияние смежных элементов фотошаблона (эффект оптической близости). На этом уровне критические размеры (critical dimension, CD) становятся высокочувствительными к флуктуациям дозы экспонирования и дефокусировке. Традиционно для компенсации данных искажений применяется оптимизация топологии фотошаблона и технологических режимов. Однако для оборудования предыдущих поколений, не оснащенного штатными системами внеосевого освещения, задача обеспечения необходимого технологического окна остается нерешенной.

В статье рассмотрены эффективные подходы к повышению разрешающей способности и увеличению глубины резкости (фокуса) литографического оборудования за счет разработки и обоснования концепции реализации внеосевого освещения в существующих установках, изначально не обладающих данной функциональностью. В частности, выполнено сравнение параметров внеосевого освещения (коэффициента когерентности и кольцевого отношения) на современных литографических установках, предложено техническое решение по модификации осветительной системы для формирования кольцевого освещения на оборудовании без штатных систем повышения разрешения, проведена экспериментальная проверка эффективности разработанного метода для улучшения качества воспроизведения топологического рисунка.

Анализ методов оптимизации разрешения и глубины фокуса проекционной системы

Формирование элементов топологии интегральных микросхем (ИМС) на поверхности пластины с фоторезистом затруднено, когда требуется получить размеры меньше длины волны экспонирующего УФ-излучения. По критерию Релея разрешение проекционной системы R определяется дифракционным пределом [1–5]

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

где k_1 – коэффициент, зависящий от технологического уровня производства; λ – длина волны экспонирующего излучения (для i -line УФ-спектра $\lambda = 365$ нм); NA – числовая апертура объектива, $NA = n \sin \theta$; θ – апертурный угол; n – показатель преломления среды.

Оптимизация разрешающей способности может осуществляться за счет уменьшения длины волны экспонирования или увеличения NA объектива. Однако это приводит к значительному уменьшению глубины резкости (фокуса) проекционного объектива $\Delta Z(\text{DOF})$, который приближенно обратно пропорционален квадрату NA [1–5]:

$$\Delta Z(\text{DOF}) = k_3 \frac{\lambda}{n \sin^2 \left[\frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin \theta \right) \right]} \approx k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}, \quad (2)$$

где k_2, k_3 – коэффициент, зависящий от технологического уровня производства.

На практике разрешающая способность и глубина резкости (фокуса) определяются не только параметрами оптики, но и характеристиками фотолитографического процесса. Поэтому коэф-

коэффициенты k_1 и k_2 зависят от технологических факторов и обычно отличаются от классических значений. Связь между глубиной резкости (фокуса) и минимальным размером элемента можно выразить через соответствующие коэффициенты, которые показывают, что при возрастании требуемого разрешения глубина резкости (фокуса) уменьшается [1, 2, 5, 6]:

$$\Delta Z(\text{DOF}) = \frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{R_{\min}^2}{\lambda}. \quad (3)$$

В (1) уменьшение R может быть достигнуто тремя основными путями:

- использованием излучателей с меньшей длиной волны (например, эксимерных лазеров);
- увеличением числовой апертуры проекционных объективов (включая иммерсионные методы);
- уменьшением коэффициента k_1 посредством применения RET.

Первые два способа обычно ухудшают DOF и существенно удорожают оборудование. Третий путь (минимизация k_1) может одновременно улучшить разрешение и DOF, но диктует более строгие требования к разработке фотошаблонов. Минимальный размер на пластине определяется отношением предельного размера на фотошаблоне к коэффициенту масштабирования проекционной установки (например, 10:1, 5:1, 4:1).

Рассмотрим методы повышения разрешающей способности для оборудования с УФ-источниками ртутных ламп (для длины волны λ , равной 365, 404 и 436 нм) [7, 8]. Ограничения, влияющие на разрешение при проецировании топологического рисунка, в основном связаны с дифракцией на фотошаблоне и aberrациями оптики [2, 9, 10]. Если пренебречь факторами, влияющими на свойства объектива во время эксплуатации, то при проекции изображений основную роль играет дифракция, а не aberrация. Дифракция Фраунгофера описывает дифракцию в плоских волнах при больших расстояниях от препятствия; дифракция Френеля – то же, но при малых расстояниях, и проявляется в контактной фотолитографии. Проекционная система в основном подвержена эффектам Фраунгофера [7, 10].

Согласно оптической теории Фурье, свет, прошедший через фотошаблон, формирует в плоскости зрачка объектива пространственный спектр световой волны. Фотошаблон с периодическими линиями (период P) при освещении дает дискретный спектр дифракционных порядков, расположенных с интервалом, пропорциональным $1/P$. Поскольку входная апертура объектива конечна, высокие порядки отсеиваются. При малых периодах остаются лишь нулевой и первые порядки (рис. 1).

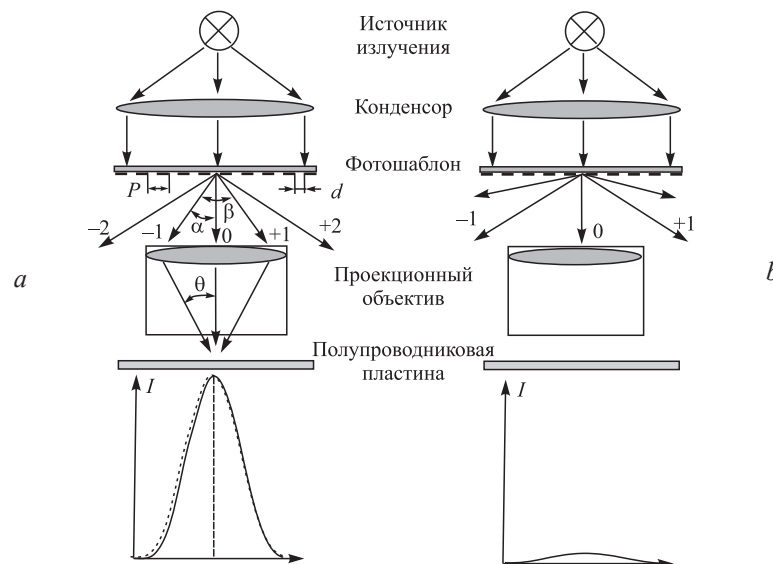


Рис. 1. Дифракционные порядки, образованные элементами фотошаблона шириной d и периодом P топологии с шагом: $a - (\geq \lambda/NA)$; $b - (< \lambda/NA)$

Fig. 1. Diffraction orders formed by photomask elements of width d and topology period P with a pitch of: $a - (\geq \lambda/NA)$; $b - (< \lambda/NA)NA$

Нормированное распределение интенсивности в плоскости изображения для рассматриваемого случая (для простоты предполагается, что кратность объектива равна единице) может быть представлено следующим образом [2]:

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

Первый член правой части в (4) соответствует равномерной засветке, второй (несущий основную информационную составляющую) отражает 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.

На рис. 1 показан процесс оптического переноса топологии периодических элементов фотошаблона шириной d и периодом P на полупроводниковую пластину с нанесенным фоторезистом. Элементы топологии фотошаблона формируют дискретный спектр пространственных частот с интервалами $2\pi/P$. Если показатель преломления среды $n = 1$, дифракционные порядки m выйдут под углом θ , где:

$$NA = \sin \theta = m \frac{\lambda}{P}, \quad m = \pm 0 \pm 1 \pm 2, \dots \quad (5)$$

Условие прохождения ± 1 порядков через апертуру объектива определяется соотношением

$$NA = \sin \theta \geq \frac{\lambda}{P}. \quad (6)$$

При осевом пространственно-когерентном освещении разрешаемый период P не может быть меньше λ/NA – при дальнейшем уменьшении периода изображение исчезает. В схеме Келера [10–13] осветитель формирует изображение источника в плоскости входного зрачка (рис. 2).

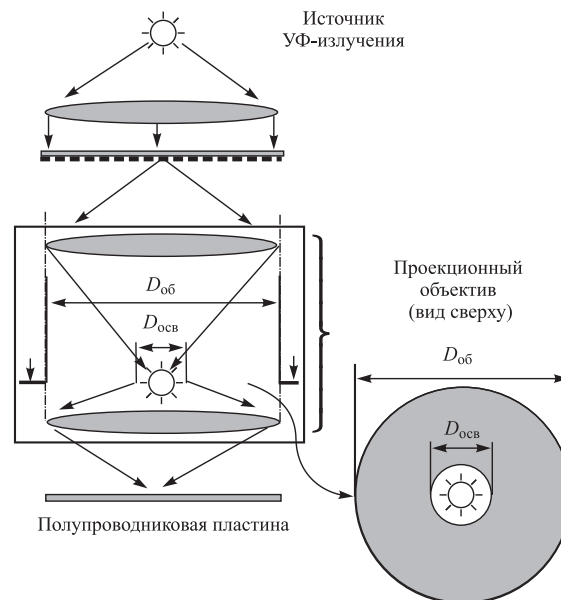


Рис. 2. Отношение диаметра апертуры оптической системы осветителя к диаметру апертуры объектива
Fig. 2. The ratio of the aperture diameter of the optical system of the illuminator to the aperture diameter of the lens

В зависимости от формы и размеров изображения источника освещение бывает когерентным, частично когерентным или некогерентным. Коэффициент заполнения зрачка σ (фактор когерентности) определяется как отношение числовых апертур конденсора осветительной оптической системы $NA_{осв}$ и проекционного объектива $NA_{об}$

$$\sigma = \frac{NA_{осв}}{NA_{об}} \approx \frac{D_{осв}}{D_{об}}, \quad 0 \leq \sigma \leq 1. \quad (7)$$

Зная σ , можно найти коэффициент k_1 дифракционного предела разрешения

$$k_1 = \frac{1}{2(\sigma + 1)}. \quad (8)$$

При $k_1 = 0,5$ – освещение когерентное, при $k_1 = 0,25$ – некогерентное. Формула (8) учитывает только дифракционные эффекты. Для полного описания процесса необходимо учитывать

влияние фоторезиста и технологических режимов. В фотолитографии применяют осветители с $\sigma \approx 0,25-0,80$, реализуя внеосевое освещение диафрагмами квадруполя, кольцевой апертуры или более сложных форм (рис. 3).

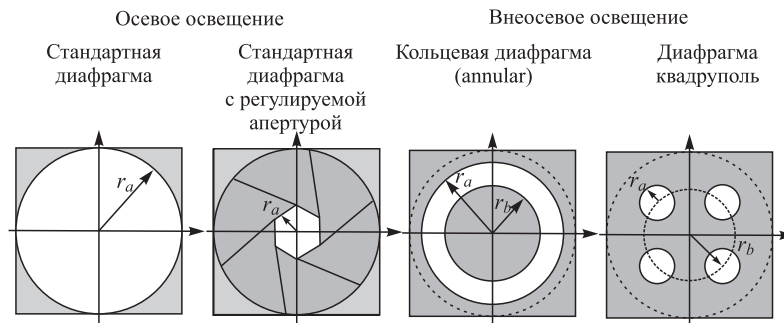


Рис. 3. Типы диафрагм освещения для проекционного оборудования фотолитографии
Fig. 3. Types of illumination diaphragms for photolithography projection equipment

Внеосевое освещение позволяет вместе с нулевым порядком ввести в объектив хотя бы один ненулевой порядок дифракции, что восстанавливает полезную информацию и повышает разрешающую способность, пусть и с некоторой потерей контраста. Это особенно важно для периодических структур с периодом менее λ/NA [1, 4, 5]. Стандартная осевая диафрагма формирует световой поток, попадающий на фотошаблон, параллельно оптической оси. Стандартная осевая диафрагма с регулируемой апертурой формирует световой поток на фотошаблон, почти параллельно оптической оси. За счет уменьшения диаметра ирисовой диафрагмы, центрированной по оптической оси проекционного объектива, можно незначительно улучшить глубину резкости (фокуса) и равномерность освещенности по кадру, при этом уменьшая разрешающую способность и рабочее поле экспонирования (мощность-дозу). Она предназначена для оптимизации светового потока освещения при использовании фотошаблонов с фазовым сдвигом.

Внеосевая диафрагма квадруполь-система внеосевого освещения представляет собой четыре отдельных полюса, расположенных по одному в каждом квадранте зрачка осветителя, ориентированного под углом 45° к оптическим осям x и y . Квадруполь ориентирует и наклоняет дифрагированный световой поток на фотошаблоне относительно оптической оси. Максимальная двухлучевая интерференция достигается, когда интерферирующие лучи радиально симметричны относительно центра оптической оси, а не радиально симметричная интерференция минимальна. Оптимизируя расположение и размеры отверстий относительно фотошаблона при использовании этой диафрагмы, можно улучшить как разрешение, так и получить наибольшую глубину резкости (фокуса). Эта диафрагма зависит от конструкции шаблона и эффективна в основном в отношении стандартных вертикальных/горизонтальных линий топологии, другие ориентации не будут оптимальными.

Внеосевая кольцевая диафрагма выполнена в форме тороидальной апертуры, центрированной по оптической оси проекционного объектива и наклоняющей световой поток, падающий на фотошаблон, к оптической оси. Отношение радиуса r_b к радиусу r_a называется кольцевым отношением, которое характеризует область пропускания диафрагмы. Оптимизируя размеры отверстий относительно фотошаблона, можно улучшить как разрешение, так и глубину фокусировки. При использовании кольцевой диафрагмы снижается контрастность изображения из-за наличия эффекта близости, но увеличивается глубина резкости (фокуса). Эта диафрагма эффективна в основном для вертикальных/горизонтальных и наклонных направлений линий топологии фотошаблона, не чувствительна к эффектам моста.

Рассмотрим процессы дифракции и интерференции при сравнении осевого и внеосевого кольцевого освещения (рис. 4).

При осевом освещении световая волна, проходя через фотошаблон, дифрагирует с образованием четных и нечетных дифракционных порядков. С уменьшением периода дифракционной решетки угол β увеличивается, и меньшее количество дифракционных порядков попадает во входную апертуру проекционной линзы. Для получения качественного изображения во входную апертуру должны попадать 0-й и ± 1 -е дифракционные порядки. Интерференция этих трех лучей при обычном типе освещения определяет полную информацию об изображении. Порядок 0 (центральный максимум) представляет собой область максимальной суммарной интенсивности прямого распространения света, прошедшего через дифракционную решетку и не претерпевшего отклонения, а также не содержит информации об объекте, кроме его общей яркости.

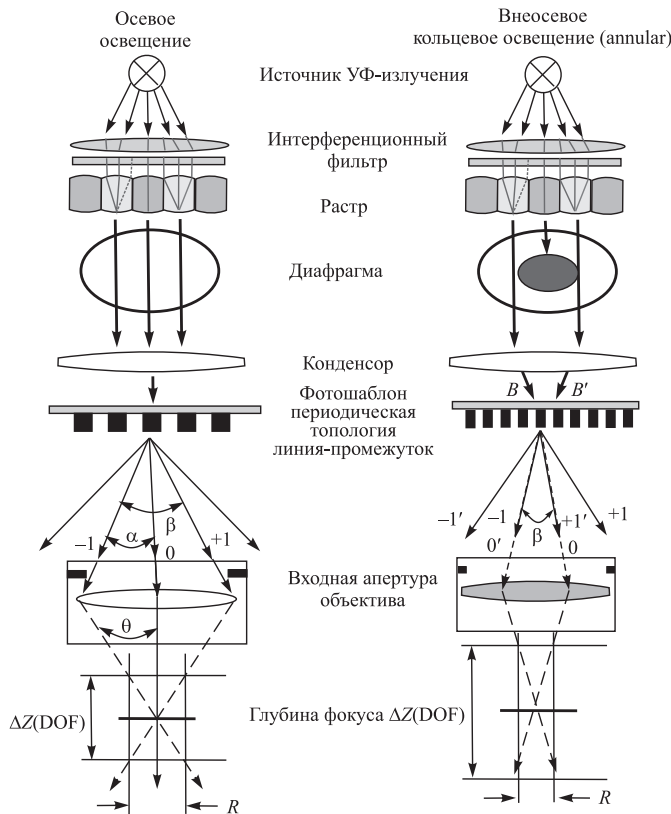


Рис. 4. Сравнение систем осевого и внеосевого кольцевого освещения
Fig. 4. Comparison of on-axis and off-axis ring lighting systems

Порядки ± 1 и более, которые возникли в результате дифракции, содержат информацию о пространственной структуре объекта и фактически формируют изображение объекта, а их положение и интенсивность зависят от характеристики объекта, вызвавшего дифракцию (размеров элементов топологии фотошаблона, формы элементов, периода линий топологии фотошаблона, апертуры объектива, длины волны излучения и др.).

При кольцевом освещении [5, 7, 8] световая волна падает под углом на фотошаблон и дифрагирует с образованием четных и нечетных дифракционных порядков, смещая нулевой порядок. В итоге в апертуру объектива попадают 0-й и ± 1 -е порядки с разных направлений. В этом случае наблюдается интерференция двух лучей 0-го и -1 -го или 0-го и $+1$ -го порядков, что повышает разрешение (вместо угла β получаем $\beta/2$) и увеличивает DOF. Таким образом, за счет замены трехлучевого изображения ± 1 -х и 0-го порядков дифракции обычного осевого освещения на двухлучевое изображение одного ± 1 -х и 0-го порядков вдвое уменьшается угол конуса и фактически удваивается угол приема для передачи интерферирующих пучков света в плоскость изображения на пластине (рис. 4). Глубина резкости (фокуса) при использовании внеосевого освещения достигает максимума, когда шаг топологии близок к расчетному. По мере увеличения шага глубина резкости (фокуса) очень быстро падает, стабилизируясь на уровне глубины фокуса изолированной линии (которая составляет примерно половину максимальной глубины фокуса). Решение проблемы недостаточной глубины резкости (фокуса) для изолированных линий – вспомогательные элементы субмикронного разрешения.

Экспериментальные результаты исследований

В процессе исследований были использованы методы анализа оптических систем и физического эксперимента. Аналитическая часть базировалась на расчете пропускания осветительной системы и дифракционных пределов. Переход от формализованной аналитической постановки к технической реализации модели осуществлялся на оборудовании проекционной фотолитографии ($\lambda = 365$ нм), не оснащенной штатной системой повышения разрешения. В рамках предварительного анализа исследовались параметры диафрагм установок фирм ASML и Nikon, обладающих системами внеосевого освещения. Проанализированы значения коэффициента заполнения зрачка σ , числовых апертур осветительной системы ($NA_{осв}$) и проекционного объектива ($NA_{об}$), а также отношение радиусов кольцевой диафрагмы r_b/r_a .

Экспериментальная апробация проводилась на установке проекционной печати Nikon NSR-2205i11d ($\lambda = 365$ нм) без штатной системы повышения разрешения с использованием режима имитации внеосевого кольцевого освещения посредством внедрения специально изготовленной модификации апертуры (плоской круглой пластины расчетного диаметра), установленной в блок оптических растров. В сочетании с регулируемой ирисовой диафрагмой данное решение обеспечило полную имитацию кольцевого освещения (рис. 5). Оценка разрешения и глубины резкости проводилась с применением специализированного фотошаблона с мирами Фуко. Тест-элементы в виде периодических штрихов четырех направлений располагались в пяти точках рабочего поля фотошаблона (центр и углы). Экспонирование на полупроводниковую пластину осуществлялось с масштабированием 5:1 методом последовательного изменения экспозиции и фокуса (рис. 6). Разрешающая способность определялась по максимальной пространственной частоте различных штрихов, а глубина резкости – по стабильности и форме профиля.

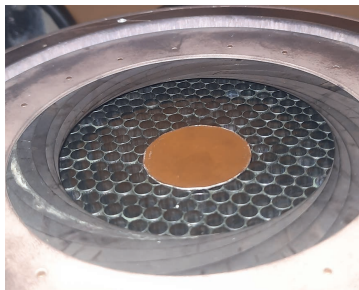


Рис. 5. Имитация внеосевой кольцевой диафрагмы
Fig. 5. Simulation of an off-axis annular diaphragm

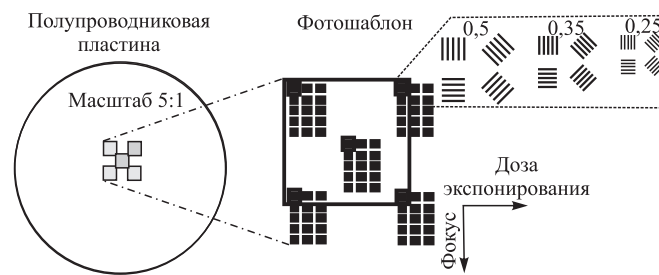


Рис. 6. Расположение штриховой миры (миры Фуко) на фотошаблоне и полупроводниковой пластине с фоторезистом после проявления
Fig. 6. The location of the line pattern (Foucault patterns) on the photomask and the semiconductor wafer with photoresist after development

Линейные размеры измерялись с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 7).

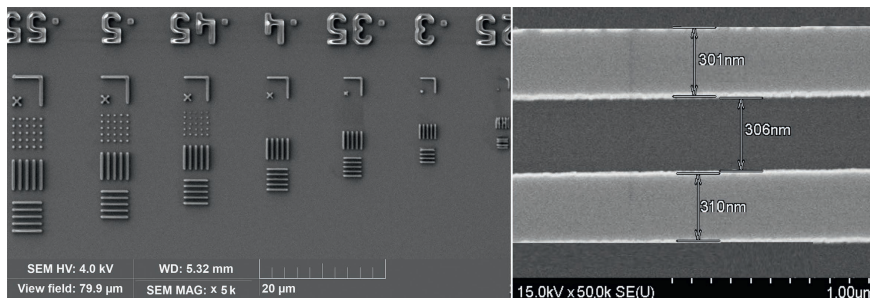


Рис. 7. Элементы теста-миры, полученные с использованием имитации внеосевого кольцевого освещения и измеренные на электронном растровом микроскопе (увеличение $\times 5000$ и $\times 50\,000$)

Fig. 7. Elements of test targets obtained using simulated off-axis ring illumination and measured on a scanning electron microscope (magnification $\times 5000$ and $\times 50\,000$)

На рис. 8 показаны элементы миры при варьировании фокуса. Установлено, что при внеосевом кольцевом освещении глубина резкости $\Delta Z(\text{DOF}) = 0,8$ мкм.

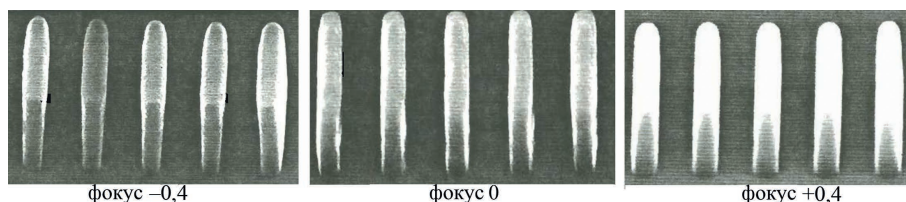


Рис. 8. Элементы теста-миры, полученные с использованием имитации внеосевого кольцевого освещения при проходе по фокусу

Fig. 8. Elements of the test targets obtained using simulated off-axis ring illumination during focus pass

Значения исходных данных эксперимента и полученных в процессе исследований результатов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения, полученные в процессе исследований
Table 1. Values obtained during the research process

| Параметр | Значение |
|---|-----------|
| Исходные данные | |
| Длина волны экспонирования λ , нм | 365 |
| Числовая апертура объектива (типовое значение) $NA_{об}$ | 0,55 |
| Номинальный критический размер, воспроизводимый оборудованием без системы внеосевого освещения по спецификации $R(CD)$, нм | 350 |
| Допуск по критическому размеру $\Delta CD_{доп}$, нм | 10 |
| Числовая апертура осветителя (конденсора) $NA_{осв}$ | 0,40 |
| Глубина резкости (фокуса) оборудования по спецификации $\Delta Z(DOF)$, мкм | 0,6 |
| Отношение радиусов кольцевой диафрагмы (annular) r_b/r_a , % | 50 |
| Освещенность и равномерность, измеренные внутренним датчиком по полю кадра без системы внеосевого освещения, мВт/см ² (%) | 700 (1,2) |
| Освещенность и равномерность, измеренные внутренним датчиком по полю кадра с кольцевой системой внеосевого освещения, мВт/см ² (%) | 370 (1,7) |
| Фоторезист SPR955-СМ 0.9: толщина пленки, мкм | 0,97 |
| Проявитель MF CD-26: время, с | 60 |
| Начальная доза экспонирования E , мДж/см ² | 165 |
| Шаг экспонирования ΔE , мДж/см ² | 5 |
| Начальное значение фокуса F , мкм | 0 |
| Шаг фокуса ΔF , мкм | 0,2 |
| Полученные результаты | |
| Критический размер с использованием кольцевой системы внеосевого освещения $R(CD)$, нм | 300–310 |
| Глубина резкости (фокуса) оборудования с использованием кольцевой системы внеосевого освещения $\Delta Z(DOF)$, мкм | 0,8 |

Заключение

1. Представлены результаты комплексного анализа методов формирования и оптимизации систем внеосевого освещения в проекционной фотолитографии. Разработан и технически реализован метод имитации внеосевого кольцевого освещения для установок, не имеющих штатных систем повышения разрешения. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность и адекватность предложенного подхода: достигнуто стабильное субмикронное разрешение с формированием элементов в диапазоне 250–350 нм при существенном увеличении показателя глубины резкости $\Delta Z(DOF)$ до 0,8 мкм, что расширяет технологические возможности проекционной литографии без изменения длины волны излучения.

2. Предложен и апробирован оригинальный метод формирования кольцевого освещения, основанный на синергии статических экранирующих элементов (центрального обтюратора расчетного диаметра) и регулируемой ирисовой диафрагмы. Данная комбинация позволяет прецизионно управлять коэффициентом частичной когерентности и кольцевым отношением, обеспечивая гибкую настройку осветителя под конкретные топологические нормы.

3. В качестве очередного этапа оптимизации топологии фотошаблонов следует рассмотреть использование вспомогательных элементов субмикронного разрешения для компенсации недостаточной глубины резкости и коррекции профиля изолированных и краевых линий. Для сохранения высокой интенсивности освещенности и обеспечения нормативной равномерности экспонирования по всему полю кадра требуется внедрение в осветительную систему дополнительных элементов корректирующей оптики. Оснащение оборудования дополнительными системами внеосевого освещения с револьверами диафрагм и корректирующей оптики позволит значительно улучшить его характеристики.

4. Использование полученных результатов позволит модернизировать имеющийся парк литографического оборудования без привлечения капиталоемких инвестиций в закупку новых импортных систем. Внедрение предложенных решений обеспечит адаптацию производства к более жестким проектным нормам, повысит стабильность техпроцесса за счет расширения окна фокусировки и увеличит взаимозаменяемость оборудования, что принесет значимый экономический эффект.

Список литературы / References

1. Mack C. A. (2007) *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. Chichester, Wiley Publ.
2. Born M., Wolf E. (1999) *Principles of Optics*. Cambridge, Cambridge University Press Publ.
3. Mack C. A. (1997) *Inside PROLITH™. A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation. For the PROLITH Family of Lithography Simulation Tools, v5.0*. USA, Austin, Texas, Published by FINLE Technologies, Inc.
4. Lin B. J. (2010) *Optical Lithography: Here is Why*. SPIE Press Publ.
5. *Applications Documentation. Image Quality Control: How to Do the Setup and Run*. ASML, 2001.
6. Wong A. (2001) Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography. *Engineering, Physics*.
7. Mack C. A. (2007) Line-Edge Roughness and Its Impact on Lithography. *Journal of Micro/Nanolithography*. 6 (3). https://www.lithoguru.com/scientist/litho_papers/2010_LER_Ultimate_Limits.pdf.
8. Mack C. A. (2006) *Field Guide to Optical Lithography*. USA, Washington, SPIE Press Publ.
9. Levinson H. J. (2019) *Principles of Lithography*. Bellingham, Washington USA, SPIE Press Publ.
10. Levinson H. J. (2001) *Lithography Process Control*. Bellingham, Washington USA, SPIE Press Publ.
11. Mack C. A. (1988) Understanding Focus Effects in Submicron Optical Lithography. *Optical Engineering*. 27 (12), 1093–1100.
12. Brunner T. A. (1997) Impact of Lens Aberrations on Optical Lithography. *IBM Journal of Research and Development*. 41 (1/2), 57–67.
13. Mack C. A. (1997) Resolution and Depth of Focus in Optical Lithography. *Micro lithographic Techniques in IC Fabrication, Proc., SPIE*. 3183, 14–27.

Поступила 23.02.2026

Принята в печать 03.04.2026

Received: 23 February 2026

Accepted: 3 April 2026

Вклад авторов

Захаревич А. А. обосновал концепцию, сформулировал идею, цели и задачи исследования, выполнил техническую реализацию модели внеосевого кольцевого освещения, проанализировал методы оптимизации и результаты исследования, подготовил текст рукописи и графические материалы.

Ловшенко И. Ю. провел анализ научно-технической литературы, систематизировал данные, скорректировал основные научные выводы.

Authors' contribution

Zakharevich A. substantiated the concept, formulated the idea, goals and objectives of the study, carried out the technical implementation of the off-axis ring lighting model, analyzed the optimization methods and results of the study, prepared the text of the manuscript and graphic materials.

Lovshenko I. conducted an analysis of scientific and technical literature, systematized the data, and adjusted the main scientific conclusions.

Сведения об авторах

Захаревич А. А., вед. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»; магистр техн. наук, асп. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ловшенко И. Ю., зав. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4), БГУИР

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Казинца, 121а
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 572-01-78
E-mail: andyzahar@yandex.ru
Захаревич Андрей Анатольевич

Information about the authors

Zakharevich A., Leading Engineer, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”, Master Sci. (Tech.), Postgraduate of the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Lovshenko I., Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (Lab 4.4), BSUIR

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121a
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 29 572-01-78
Email: andyzahar@yandex.ru
Zakharevich Andrei