

УДК 621.3.049.774

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПЕЧАТАЕМЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Алексей Валерьевич Кузовков

*Студент 1 курса магистратуры*

*Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.*

*Научные руководители: Ю.С. Боброва<sup>(1)</sup>, В.В. Иванов<sup>(2)</sup>*

*Ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»<sup>(1)</sup>*

*Начальник лаборатории топологии АО НИИМЭ<sup>(2)</sup>*

### Введение

Как известно, задача миниатюризации элементов интегральных схем давно столкнулась с технологическими ограничениями. Лимитирующей технологической операцией здесь стала фотолитография. Воспроизведение элементов с размерами меньше длины волны экспонирующего излучения требует учёта влияния оптических эффектов, поскольку в этой области возникают существенные искажения формы и размеров элементов топологии. Кроме того, появляется взаимное влияние близко расположенных структур. Вместе описанные эффекты называются эффектами оптической близости.

Другая проблема состоит в том, что элементы малых размеров особо чувствительны к вариациям параметров процесса фотолитографии. Наиболее существенными из них являются разброс значений дозы экспонирования и глубина фокуса. Под глубиной фокуса здесь понимается диапазон уровней в резисте, на которых может фокусироваться проекционная оптика, не приводя к выходу критического размера за рамки допуска. Область приемлемых значений дозы и глубины фокуса называют окном процесса.

С целью компенсации эффектов оптической близости и расширения окна процесса осуществляется оптимизация топологии фотошаблона. Этот процесс подразумевает размещение на шаблоне различного рода фигур, компенсирующих различные геометрические искажения. Среди таких искажений можно выделить укорачивание концов линий, скругление внешних и внутренних углов и изменение ширины линии.

Введение в топологию фигур коррекции обосновано для слоёв с критическим размером от нескольких сотен нанометров и менее. С уменьшением критического размера до 130 нм и ниже существенно уменьшается окно процесса фотолитографии, что требует введения коррекции принципиально иного типа – размещения непечатаемых вспомогательных структур (НВС). Для обозначения таких структур общепринят англоязычный термин sub-resolution assist features (SRAF)

НВС позволяют увеличить глубину фокуса для изолированных и близко расположенных линий и представляют собой линии, размещаемые рядом с корректируемой параллельно ей (рис. 1). Основная особенность НВС заключается в их малой ширине, вследствие чего они не появляются в изображении, но оказывают влияние на волновой фронт. В связи с этим в тексте также будет употребляться термин рассеивающие линии. Задача рассеивающих линий – обеспечить такую дифракционную картину, при которой наибольшее число порядков дифракции попадает в апертуру объектива. Детальное аналитическое описание НВС и механизма их работы можно найти в работе [1].

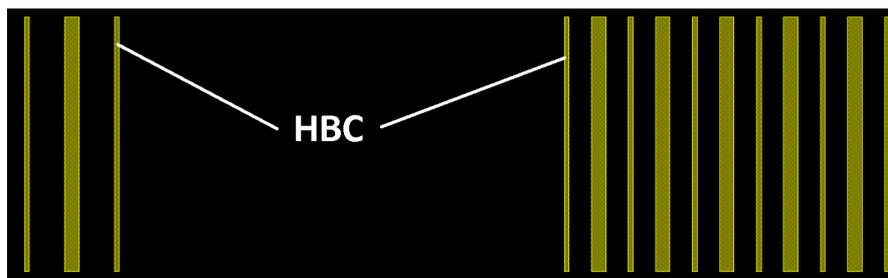


Рис. 1. Непечатаемые вспомогательные структуры

Цель данной работы – разработать правила размещения НВС для технологии 90 нм. При разработке правил размещения рассеивающих линий можно выделить две основные задачи: оптимизация изолированной линии и периодических структур. В случае изолированной линии устанавливается ограничение на минимальное расстояние между НВС и основной линией. В работе [2] показано, что при приближении рассеивающей линии к основной возрастает вероятность пропечатки НВС в резисте.

В случае периодических структур необходимо определить минимальный шаг, начиная с которого в зазорах решётки размещаются рассеивающие линии. Этот шаг может определяться ограничениями процесса литографии и/или возможностями производителя фотошаблонов. Со стороны литографии при уменьшении шага повышается вероятность пропечатки НВС. Со стороны производителя шаблонов могут быть существенны ограничения на размер элементов. В настоящей работе такой шаг составляет 450 нм.

Для получения структур с шагом, не позволяющим размещать НВС, используется внеосевое освещение. Геометрия источника излучения должна обеспечивать воспроизведение диапазона шагов от минимально возможного, до шага, где появляются НВС. Таким образом, перед разработкой правил размещения, необходимо определить минимальный шаг с НВС и оптимизировать источник освещения. Выполнив эти действия, можно приступить к проведению эксперимента по определению оптимального размещения НВС.

В настоящей работе эксперимент проводился средствами компьютерного моделирования. Процесс фотолитографии моделировался в САПР Calibre WORKbench компании Mentor Graphics. При этом в модель были заложены следующие технологические параметры: числовая апертура объектива 0,65, длина волны 193 нм, толщина резиста 300 нм; под слоем резиста 80 нм слой антиотражающего покрытия. Для моделирования использовалась полуэмпирическая модель VT5, откалиброванная по экспериментальным данным. Высокая точность модели подтверждается её успешным использованием при проектировании фотошаблонов для технологии 90 нм в ОАО «НИИМЭ и микрон»

### Выбор геометрии источника освещения

Для увеличения глубины фокуса при малых шагах наиболее часто используют аннулярную или квадрупольную форму источника (рис. 2). Квадрупольный источник даёт наилучший результат для горизонтальных и вертикальных линий. Аннулярный источник с этой стороны более универсален. Форма источника определяет дифракционную картину в плоскости входного зрачка объектива и должна обеспечивать попадание наибольшего числа порядков дифракции в его апертуру. Наглядные зависимости между видом зрачковых диаграмм и глубиной фокуса приведены в работе [2].

Применительно к периодическим структурам форма источника должна обеспечивать требуемую глубину фокуса в области шагов от максимального без НВС до минимально возможного шага. В рамках исследуемой технологии, минимальный шаг, в котором появляются рассеивающие линии, составляет 450 нм. Требуемая глубина фокуса – 0,19 мкм.

Для анализа были выбраны три аннулярных источника освещения с параметрами:  $\sigma_{out}=0.65/\sigma_{in}=0.35$ ;  $\sigma_{out}=0.75/\sigma_{in}=0.45$ ;  $\sigma_{out}=0.85/\sigma_{in}=0.55$ , где  $\sigma_{out}$  и  $\sigma_{in}$  соответственно внешний и внутренний диаметры кольца в нормированных единицах.

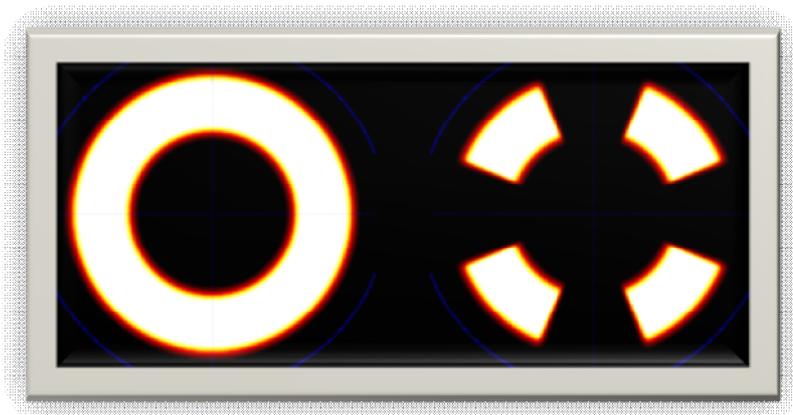


Рис. 2. Аннулярный и квадрупольный источники освещения

В ходе исследования моделировалось изображение периодических структур с шагом от 240 нм до 450 нм через каждые 30 нм. Для линии 90 нм назначался припуск по 10 нм с каждой стороны. Для каждого значения шага в указанном диапазоне моделировалось изображение структуры при освещении каждым из трёх источников. Для каждого сочетания шаг – источник строился график зависимости критического размера от глубины фокуса, называемый графиком Боссунга (рис. 3). Нулевому значению фокуса здесь соответствует поверхность резиста, положительным значениям – плоскости в резисте, отрицательным – пространство над ним. В каждом случае зависимость строилась для трёх значений дозы экспонирования: оптимального и для 1,5% отклонений в обе стороны. Значимость учёта дозы видна из графика для шага 270 нм и источника 0,75/0,45, где за пределы допуска (красная линия) выходит лишь одна из трёх зависимостей.

Оценивая для каждого графика область фокуса, где критический размер лежит в пределах допуска плюс минус 10%, получаем зависимость глубины фокуса от шага решётки для каждого источника излучения.

Согласно полученной зависимости источники 0,75/0,45 и 0,85/0,55 не обеспечивают требуемого окна процесса для шагов больше 330 нм, в то время как источник 0,65/0,35 даёт приемлемую глубину фокуса в диапазоне шагов от 240 нм до 450 нм. Таким образом, для дальнейшего проведения экспериментов был выбран аннулярный источник освещения с параметрами  $\sigma_{\text{out}}=0.65/\sigma_{\text{in}}=0.35$ .

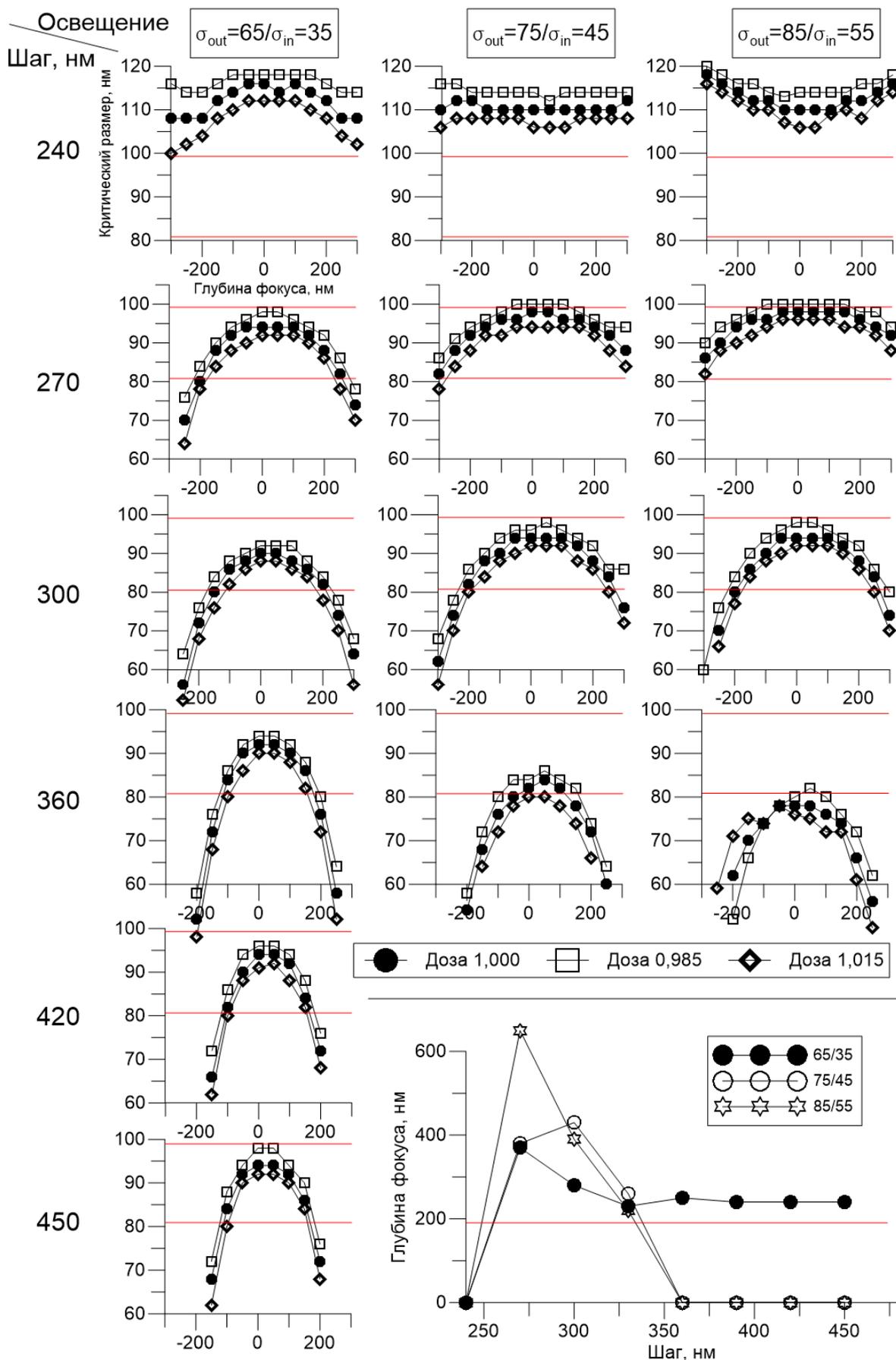


Рис.3. Графики Бессеунга для разных шагов и источников, зависимость глубины фокуса от шага

### Размещение НВС для периодических структур

В работе [3] описан метод размещения НВС, согласно которому по мере увеличения шага следует увеличивать количество рассеивающих линий в зазоре. Попытка повторить описанную методику для рассеивающих линий шириной 40, 50 и 60 нм не дала требуемого результата во всём диапазоне шагов. Наиболее эффективной оказалась следующая схема размещения НВС: в диапазоне шагов от 460 нм до 600 нм в зазоре между линиями размещается одна рассеивающая линия шириной 50 нм, для шагов от 600 нм до 900 нм её ширина меняется на 60 нм. Минимальный допустимый шаг для такой схемы составил 270 нм. Из графика на рис.4 видно, что после шага 810 нм глубина фокуса выходит на постоянный уровень. Это означает, что при данном шаге пропадают эффекты оптической близости и линию можно считать изолированной.

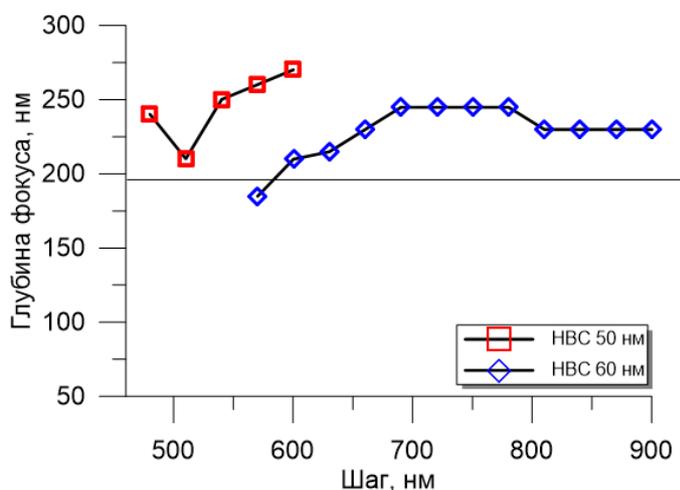


Рис. 4. Зависимость глубины фокуса от шага для разработанной схемы размещения НВС

### Размещение НВС для изолированной линии

Для определения оптимального варианта размещения варьировались такие параметры, как ширина рассеивающей линии, расстояние до основной линии, количество рассеивающих линий. На графике (рис. 5) представлены зависимости критического размера от уровня фокуса при использовании одной или двух рассеивающих линий, также варьируется их ширина. Для сравнения показана зависимость для линии без НВС. Расстояние 200 нм до основной линии даёт гарантию, что НВС не пропечатается в резисте. Среди остальных параметров оптимальным сочетанием является размещение одной НВС шириной 50 нм с каждой стороны линии.

### Заключение

В результате проведённого исследования была выявлена оптимальная форма источника освещения для получения периодических структур с шагом менее 450 нм. Для структур с большим шагом были выработаны правила размещения непечатаемых вспомогательных структур.

Результаты моделирования показали, что совокупное применение внеосевого освещения и НВС позволяет обеспечить высокую глубину фокуса во всём диапазоне воспроизводимых шагов, а также для изолированных линий.

Следующим этапом работы предполагается анализ возможности перехода к меньшим топологическим нормам на базе описанной технологии 90 нм.

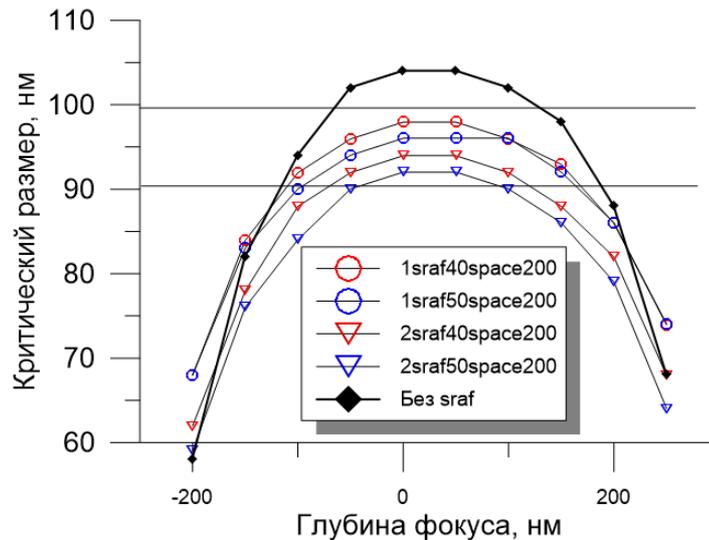


Рис. 5. Графики Боссунга для различных вариантов размещения НВС при оптимальном значении дозы

### Литература

1. *J.S. Peterson*. Analytical Description of Anti-Scattering Bar Assist Features, vol. 4000, p.77-89, SPIE 2000
2. *James Worda, Suihua Zhu, John Sturtevant*. Assist Feature OPC Implementation for the 130nm Technology Node with KrF and No Forbidden Pitches. Proc. SPIE Vol. 4691, p. 1139-1147
3. *Andreas Torsy, Olivier Toublan, Rainer Zimmermann, Harry Smyth, Jens Hassmann*. Detailed Process Analysis for Sub-Resolution Assist Features Introduction. Mentor graphics technical publication. URL: <https://www.mentor.com/products/ic-manufacturing/resources/overview/detailed-process-analysis-for-sub-resolution-assist-features-introduction-f876204b-7738-4f5e-9d41-34c7e7fa3ee4>