



УДК 51-74

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.216.218

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ SRAF ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОЛИТОГРАФИИ

## OPTIMIZING SRAF PLACEMENT TO INCREASE PHOTOLITHOGRAPHY RESOLUTION

ХАРЧЕНКО ЕКАТЕРИНА ЛЕОНИДОВНА

ekharchenko@niime.ru

KHARCHENKO EKATERINA L.

ekharchenko@niime.ru

КУЗОВКОВ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

akuzovkov@niime.ru

KUZOVKOV ALEXEY V.

akuzovkov@niime.ru

ИВАНОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

vlaivanov@niime.ru

IVANOV VLADIMIR V.

vlaivanov@niime.ru

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

В данной работе рассмотрен метод оптимизации правил размещения непечатаемых вспомогательных структур в целях увеличения окна процесса и, как следствие, повышения разрешающей способности в фотолитографии.

*Ключевые слова:* SRAF; фотолитография; оптимизация; правила размещения; разрешающая способность.

The paper presents the optimization method of SRAF placement with a view to expanding the process window and as a result increasing the resolution of photolithography.

*Keywords:* SRAF; photolithography; optimization; placement rules; resolution.

Размещение вспомогательных непечатаемых структур (Sub-Resolution-Assist-Feature, SRAF) играет важную роль для повышения разрешающей способности в фотолитографии и дальнейшего развития технологии в целом [1]. Эти структуры применяются для увеличения окна процесса изолированных или плотно размещенных топологических элементов с размерами порядка длины волны актиничного излучения. Действие SRAF обусловлено интерференцией волн от основной топологической структуры и самим SRAF, что приводит к сохранению контраста изображения при смещении фокуса или дозы экспонирования [2]. Это особенно существенно для технологий уровня 90 нм и меньше.

В зависимости от технологического уровня размещение SRAF может осуществляться на основе набора правил (Rule-based SRAF) или на основе результатов моделирования фотолитографии (Model-based SRAF). MBSRAF обеспечивает большую точность, однако имеет большую вычислительную сложность. RBSRAF обеспечивает большую скорость вычислений, но его эффективность полностью определяется точностью настройки правил. Таким образом, когда размещение SRAF в топологии осуществляется согласно определенным геометрическим правилам, для описания которых требуется до нескольких десятков числовых параметров, большое разнообразие и взаимные корреляции правил ставят нетривиальную задачу определения их оптимального набора [1].

Целью данной работы является разработка метода оптимизации правил размещения SRAF, позволяющего определить схему их расстановки в двумерных топологических ситуациях для максимизации окна процесса. Задачи работы:

- подготовить тестовые структуры для отработки правил;
- определить критерий и параметры оптимизации;

- определить алгоритм оптимизации;
- провести моделирование.

Для отработки метода оптимизации были подготовлены два набора тестовых структур для последовательной оптимизации правил одномерных и двумерных топологических структур. Тестовые структуры для одномерного случая представляют собой матрицу стандартных структур типа Pitch (рис. 1а) с разной шириной линий (от 100 до 180 нм) и шагом (от 240 до 1200 нм). В строке матрицы слева направо меняется величина шага. В столбце сверху вниз изменяется ширина линий. Для двумерного случая используется топология случайной конфигурации со случайно распределенными значениями толщины линии и зазора. Генерация случайной топологии производится на основе элементарных блоков [3]. Подготовленная топология была сгенерирована с использованием пяти элементарных блоков, каждому из которых присвоен свой статистический вес, т.е. вероятность, с которой данный блок размещался в топологии. Полученная по итогам расстановки топология прошла проверку на соответствие правилам проектирования технологии со схожей проектной нормой, что обеспечивает реалистичный дизайн топологического решения.

Критерий оптимизации должен рассчитываться на основе моделирования процесса фотолитографии и давать оценку качества получаемых на пластине структур для оптимального режима экспонирования и для отклонений по фокусу и дозе. Поскольку на этапе определения правил размещения SRAF еще не может быть получена откалиброванная модель процесса фотолитографии, позволяющая прогнозировать результат проявления фоторезиста, критерий оптимизации необходимо связывать с воздушным изображением. Для оценки воздушного изображения привычным параметром качества является контраст:

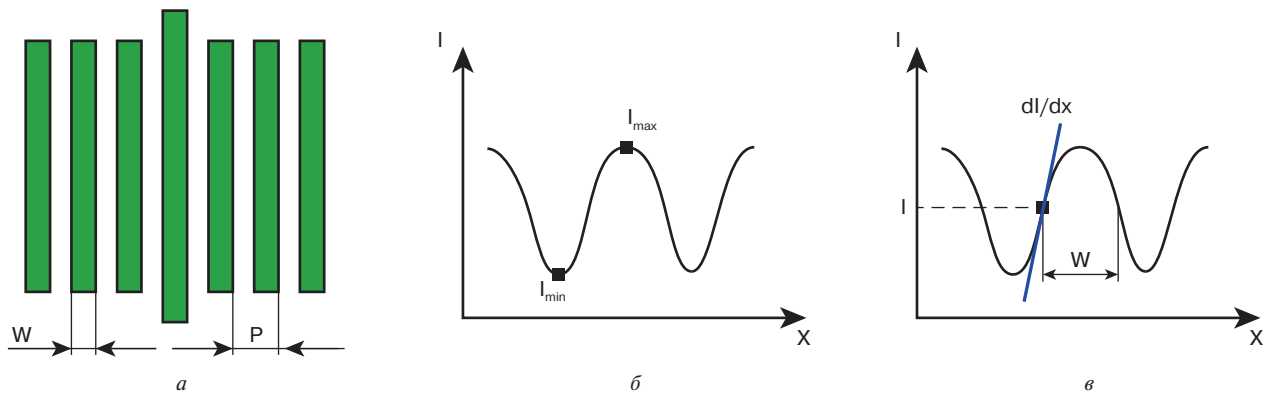


Рис. 1. Параметры качества периодических структур: а) вид структуры; б) контраст; в) NILS

$$\text{Contrast} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  указаны на рис. 1б. Данный параметр применим только для одномерных топологических структур и не учитывает характер перехода на границе светлого и темного полей, поэтому при одном значении контраста возможны разные результаты. Это связано с наклоном стенки фоторезиста и приобретает большое значение в субмикронных технологиях.

Для оценки качества изображения сегодня принято использовать параметр NILS (Normalized Intensity Log-Slope):

$$\text{NILS} = \frac{w}{I} \cdot \frac{dI}{dx} = w \cdot \frac{d(\ln(x))}{dx},$$

где все параметры указаны на рис. 1в. NILS характеризует наклон кривой интенсивности, что в конечном счете отражается на формировании стенки резиста. Критерий оптимизации вычисляется на основе моделирования воздушного изображения в нескольких плоскостях внутри фоторезиста и представляет собой сумму значений NILS (Normalized Image Log Slope), вычисленных в ряде точек по контурам полигонов топологии. Суммарное значение NILS берется за основу для оценки эффективности каждой конфигурации правил размещения SRAF.

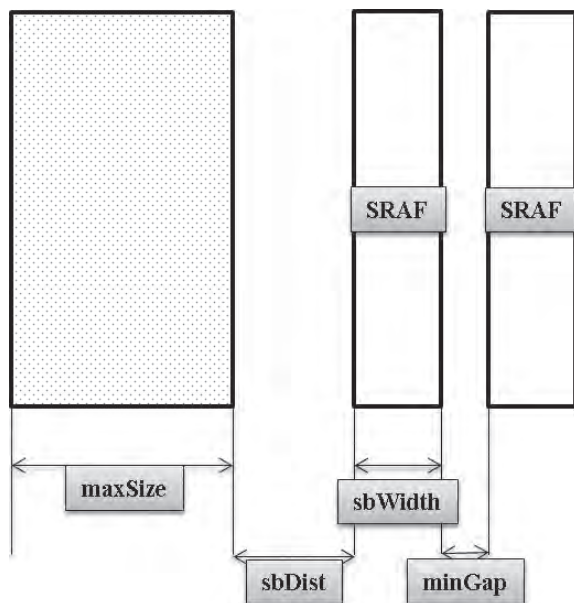


Рис. 2. Параметры оптимизации для одномерного случая

В ходе работы проводилась оптимизация четырех параметров для одномерных структур:

- sbWidth — ширина вспомогательной структуры;
  - sbDist — расстояние от вспомогательной структуры до топологического элемента;
  - minGap — минимальное допустимое расстояние между вспомогательными структурами;
  - maxSize — максимальная ширина топологического элемента, для которого размещаются вспомогательные структуры
- Данные параметры наглядно продемонстрированы на рис. 2.

Правила размещения SRAF для двумерных случаев, помимо описанных, включают более десяти новых параметров и здесь приведены не будут.

Таблица 1. Допустимые значения варьируемых параметров

Параметр	Минимальное значение (мкм)	Максимальное значение (мкм)
sbWidth	0,033	0,060
sbDist	0,140	0,250
minGap	0,090	0,250
maxSize	0,100	0,180

Таблица 2. Значение критерия оптимизации в зависимости от силы мутации (f) и вероятности скрещивания (p)

Сила мутации (f)	Вероятность скрещивания (p)	Значение критерия оптимизации
0,2	0,8	8479,507
0,2	0,2	8169,091
0,8	0,8	8305,406
0,8	0,2	7997,880

Таблица 3. Значение критерия оптимизации в зависимости от параметра p

Вероятность (p)	Значение критерия оптимизации
0,25	8479,258
0,5	8479,507
0,75	8479,151
1,0	8478,670

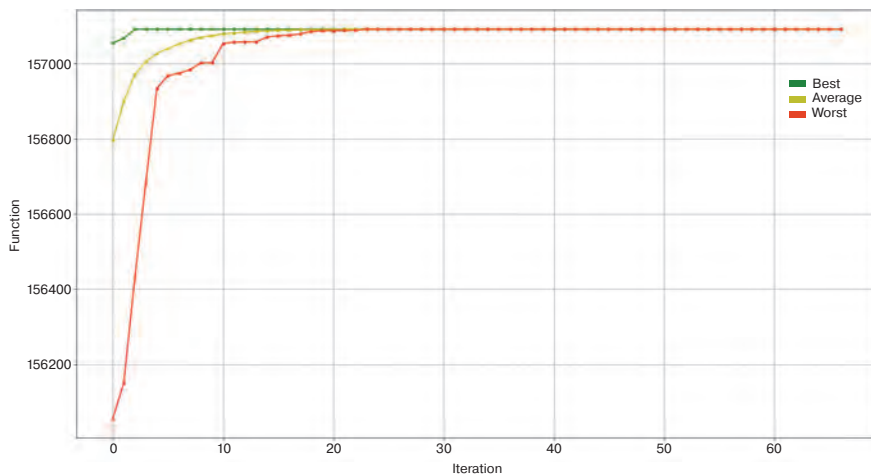


Рис. 3. Оптимизация параметров двумерных структур с помощью генетического алгоритма

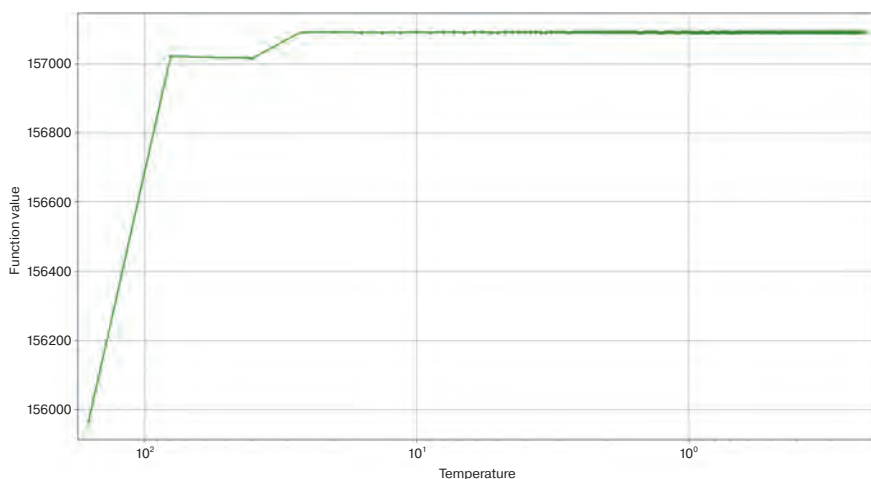


Рис. 4. Оптимизация параметров одномерных структур с помощью алгоритма имитации отжига

В качестве методов оптимизации рассмотрены два алгоритма: генетический алгоритм и алгоритм имитации отжига. Данные алгоритмы используются, когда в решаемой задаче искомый критерий оптимизации не задан в явном виде, а вычисление его производной трудоемко и не всегда возможно. Генетический алгоритм оптимизации широко распространен для решения задач с большим числом переменных [4]. Его суть заключается в подборе случайных комбинаций необходимых параметров с использованием механизмов схожих по своей сути с естественным отбором, таких как наследование, селекция и скрещивание. В рамках данной работы были выбраны следующие параметры: максимальное число итераций — 500, максимальное число вычислений функции — 150000, количество попыток — 15, размер популяции — 100, сила мутации и вероятность скрещивания варьировались согласно табл. 2.

Исходя из данных табл. 2, можно сделать вывод, что наиболее подходящим является первый вариант с параметрами  $f = 0,2$  и  $p = 0,8$ .

Помимо генетического алгоритма также был использован алгоритм имитации отжига. Алгоритм выполняется при температуре от 80 до 0,001 с шагом 0,001. Все вычисления, рассчитанные при одной температуре, называются итерациями. Внутри каждой

итерации выполняются циклы — попытки поиска лучшего решения. Основным параметром, который определяет данный алгоритм, — доля параметров, фиксированных в каждом цикле ( $p$ ). Если  $p = 0,25$ , то четверть параметров меняет свое значение. Если же  $p = 0,5$ , то половина. В ходе работы был проведен ряд расчетов для нахождения оптимального значения параметра  $p$ . Из результатов, представленных в табл. 3, видно, что изменение данного параметра не оказывает значительного влияния на результат оптимизации в данной задаче.

Моделирование проводилось с использованием САПР Mentor Graphics Calibre Work Bench.

Первый этап оптимизации заключался в определении правил размещения SRAF для одномерных структур с использованием генетического алгоритма и алгоритма имитации отжига. Далее были выбраны оптимальные значения для четырех параметров из табл. 1. Следующий этап — проведение расчета SRAF для двумерных структур с исходными и оптимизированными параметрами из предыдущего пункта. В результате сравнения значение критерия оптимизации, рассчитанное с помощью генетического алгоритма (157091,52) (рис. 3), оказалось незначительно больше, чем критерий оптимизации, рассчитанный алгоритмом имитации отжига (157091,37) (рис. 4). Однако время, потраченное на расчет по генетическому алгоритму, в три раза меньше, чем то, что потрачено на расчет по алгоритму имитации отжига. Из этого можно сделать вывод,

что целесообразнее пользоваться генетическим алгоритмом для расчета оптимальных параметров SRAF.

Таким образом, в ходе работы были определены параметры, критерий и алгоритм оптимизации правил размещения SRAF. Дальнейшее развитие работы лежит в разработке метода окончательного эмпирического уточнения правил.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2 томах. — М., 2012.
2. Кузовков А.В. Использование непечатаемых вспомогательных структур для повышения разрешающей способности фотолитографии // Сборник докладов конференции «Студенческая научная весна — 2016». — М., 2016.
3. Ипатова Е.В., Иванов В.В. Оптимизация разработки топологии случайной конфигурации для отработки OPC-решений // Сб. тез. «Микроэлектроника и информатика — 2018». — М., 2018.
4. Харченко Е.Л., Кузовков А.В., Иванов В.В. Методика оптимизации освещения в фотолитографии // Сб. тез. 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ — М., 2017.