

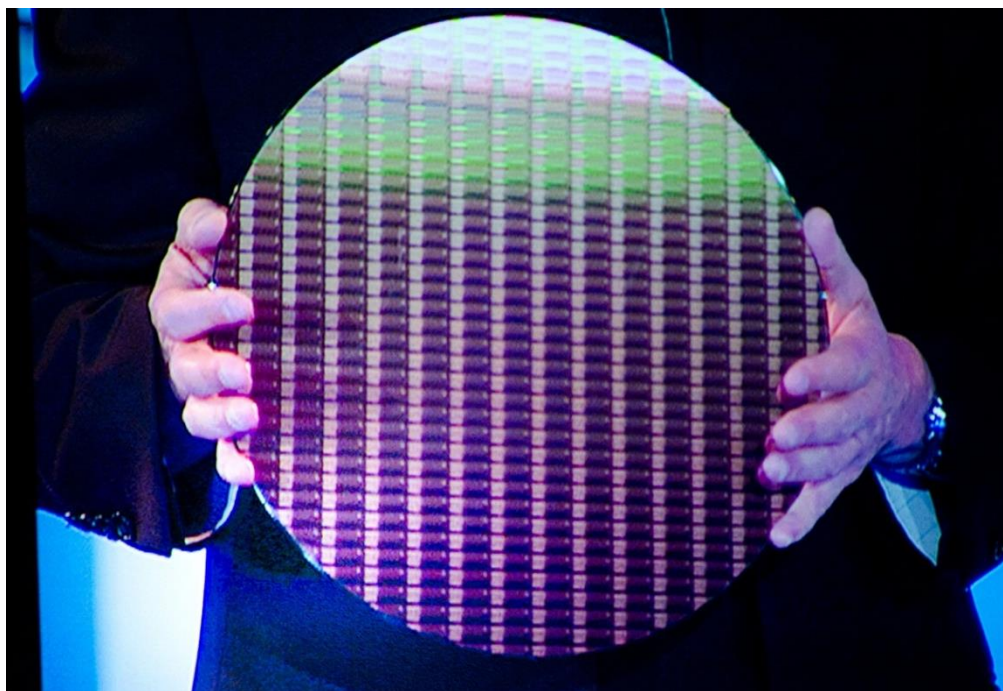


Формирование элементов микросхем или как Intel освоил 7 нм

Алексей Кузовков
Ведущий инженер-конструктор
АО НИИМЭ

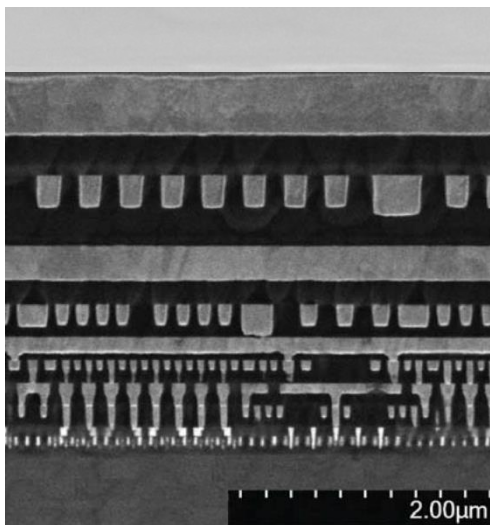
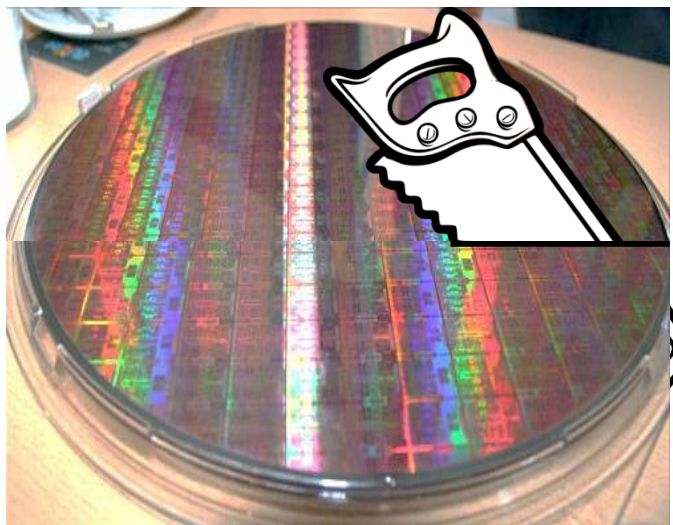
- Основы фотолитографии
- Методы повышения разрешения
- Успехи России в гонке за нанометрами

Изделия микроэлектроники



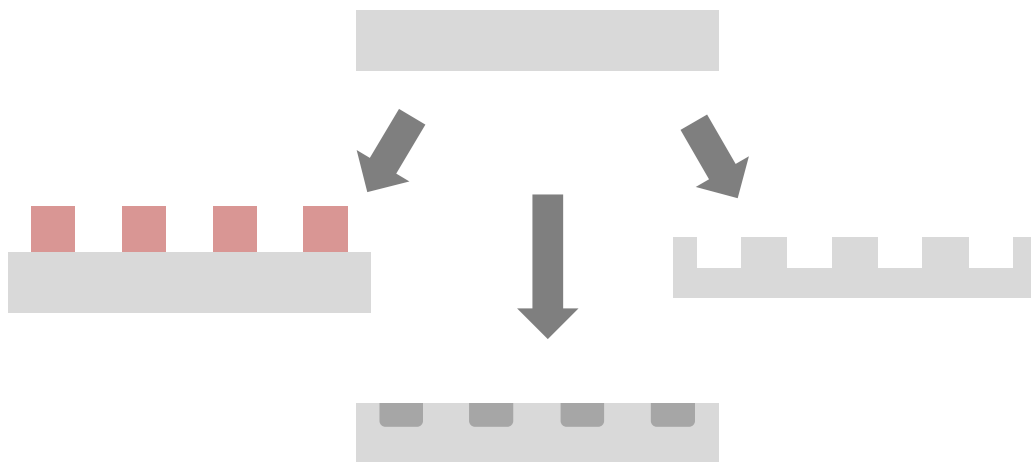
Изделия микроэлектроники - микросхемы - производятся в групповом технологическом процессе на кремниевых пластинах.

Структура микросхемы



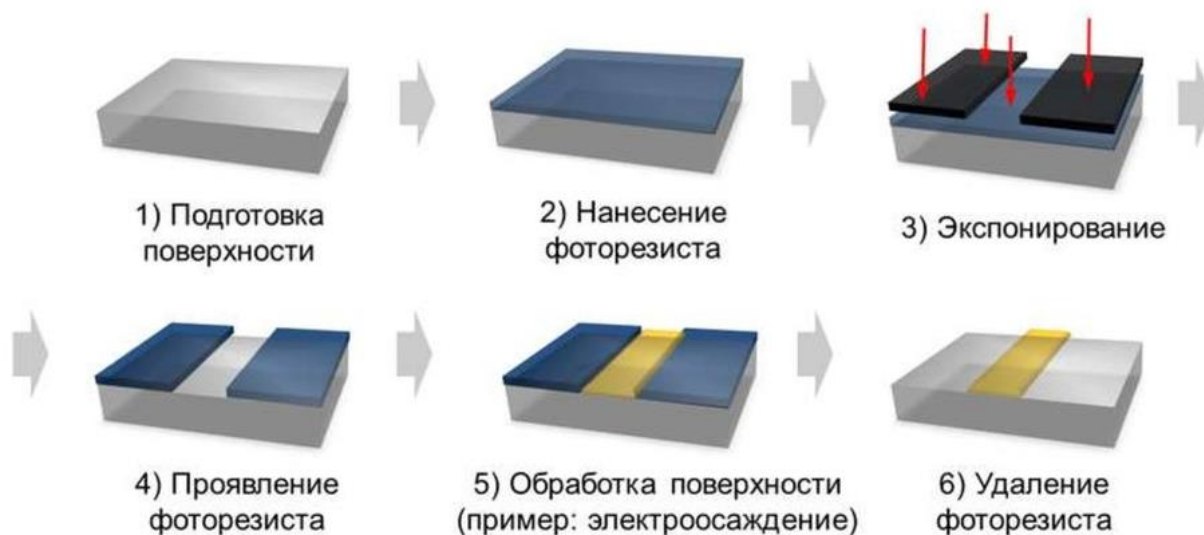
Микросхема имеет слоистую структуру, а технологию её изготовления называют планарной.

Базовые операции планарной технологии



Базовые операции технологии позволяют локально удалять/наносить материал или изменять его свойства.

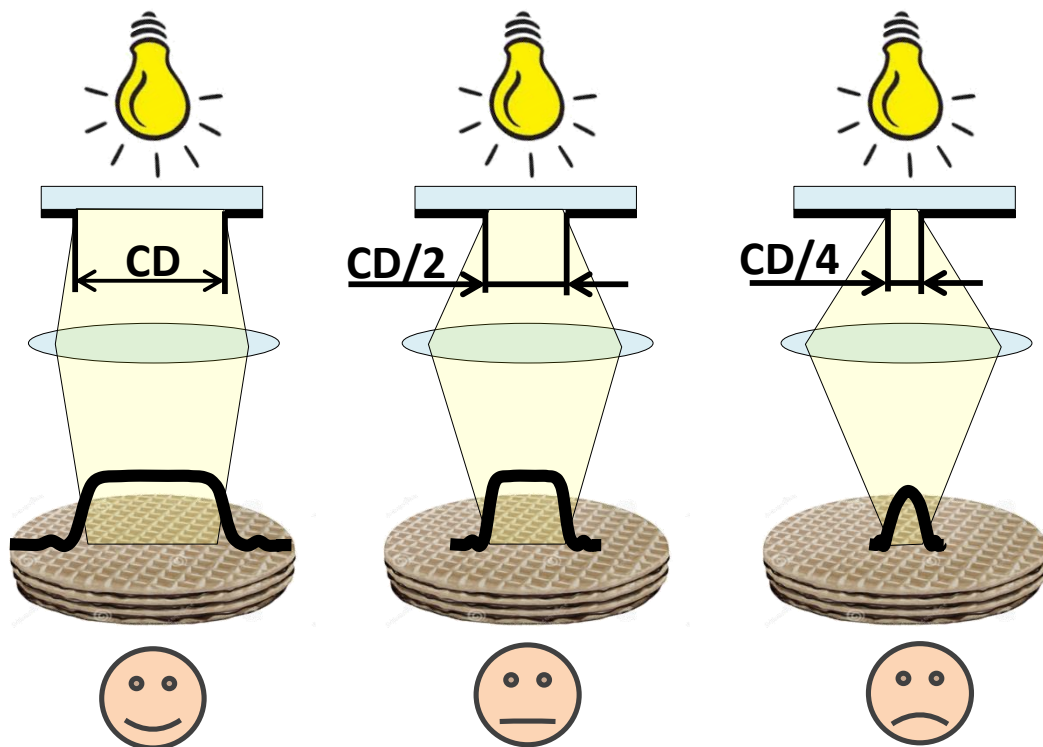
Процесс фотолитографии



Процесс фотолитографии позволяет формировать структуры размерами в десятки нанометров

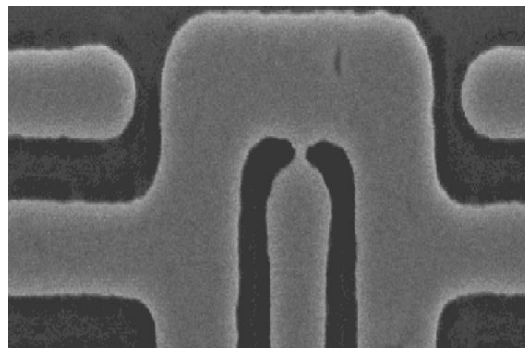
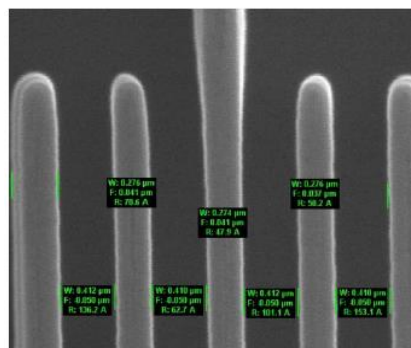
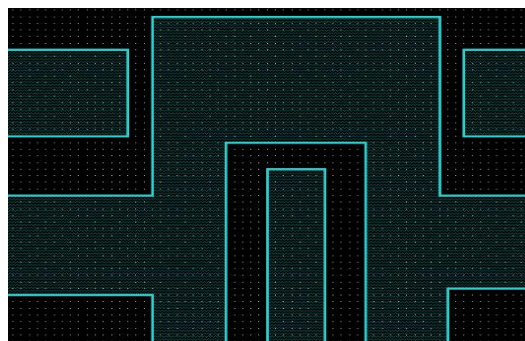
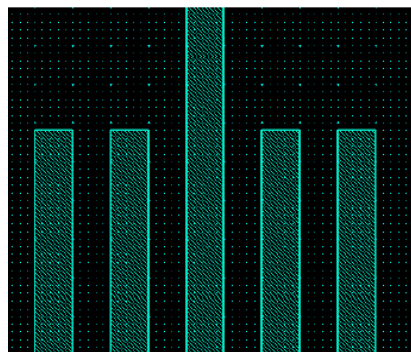
Презентация «Оборудование для проекционной фотолитографии». URL: <https://ppt-online.org/25029>

Проблема разрешения в фотолитографии



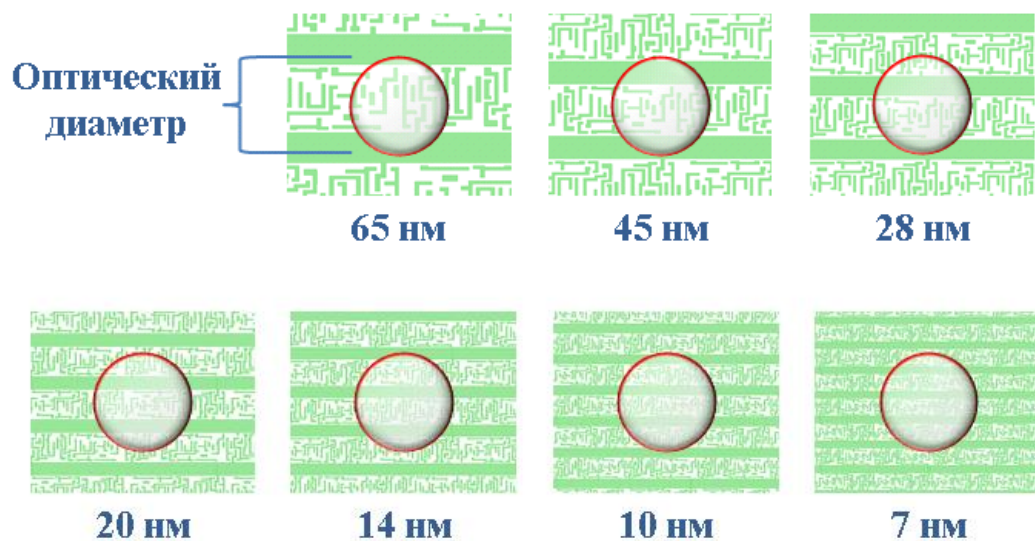
При приближении размеров элементов топологии к длине волны используемого излучения проявляются негативные оптические эффекты

Проблема разрешения в фотолитографии



Эффекты оптической близости ведут к возникновению литографических дефектов.

Проблема разрешения в фотолитографии

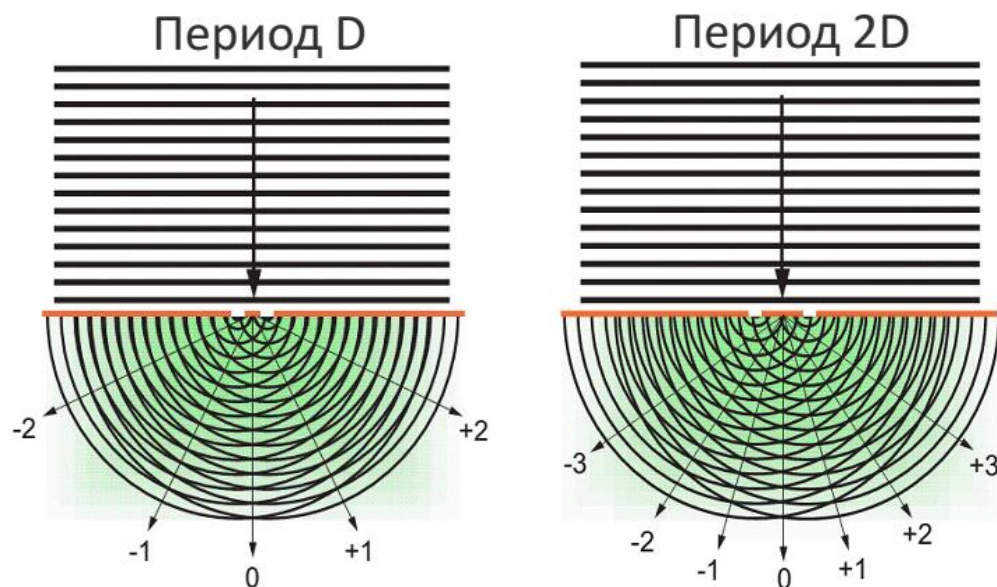


С уменьшением технологического уровня проблема становится все более острой.

Методы повышения разрешения:

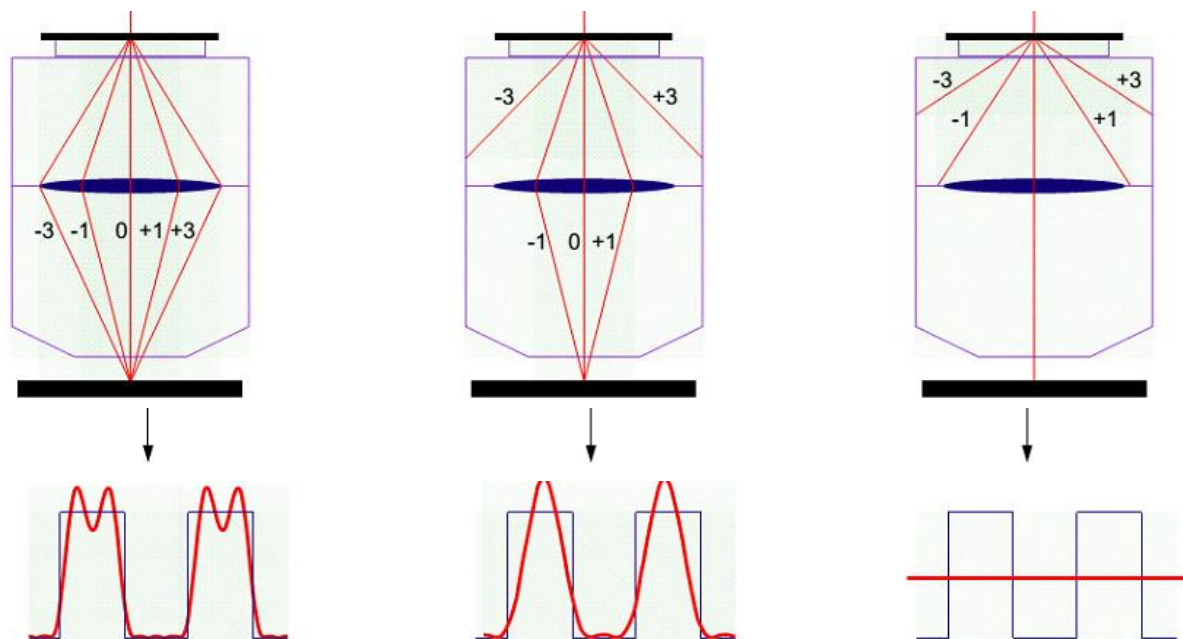
- Внеосевое освещение
- Фазосдвигающие фотошаблоны
- Двойное паттернирование
- Коррекция эффектов оптической близости

Внеосевое освещение



При увеличении периода структур порядки дифракции расходятся под меньшим углом

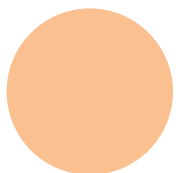
Внеосевое освещение



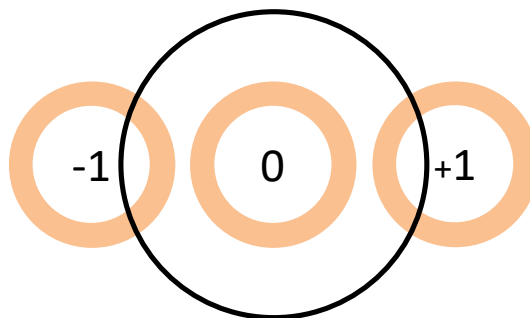
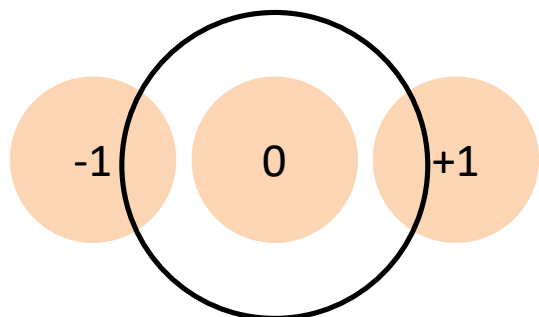
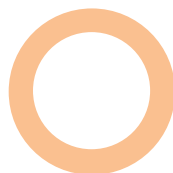
Качество изображения в фоторезисте определяется количеством порядков, попавших в апертуру объектива

Внеосевое освещение

Обычный
источник освещения



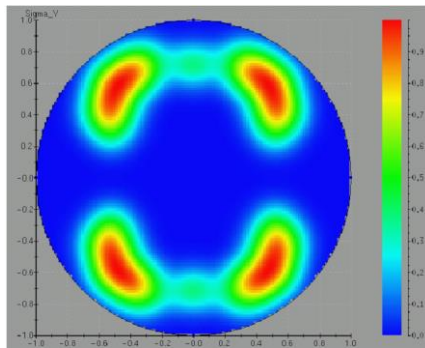
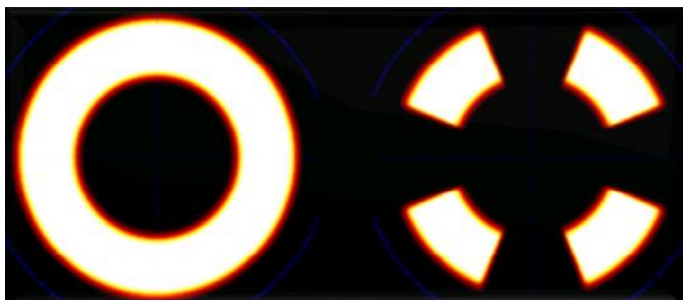
Аннулярный
источник освещения



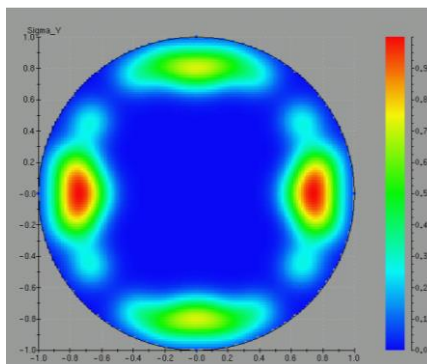
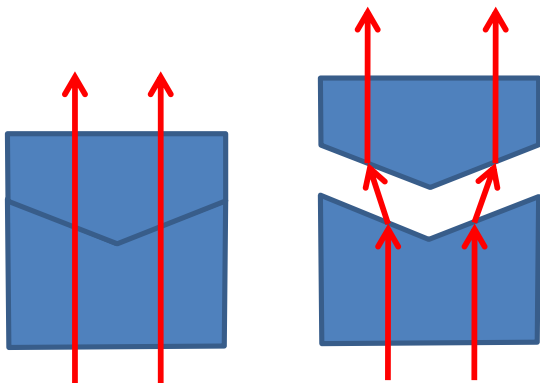
Апертура объектива

Изменение геометрии источника изменяет соотношение интенсивности отдельных порядков.

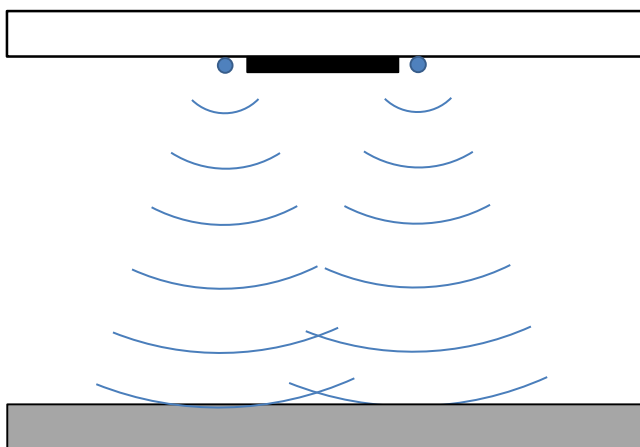
Внеосевое освещение



В технологиях уровней 45 нм и ниже используются источники освещения с возможностью гибкой настройки (freeform source)



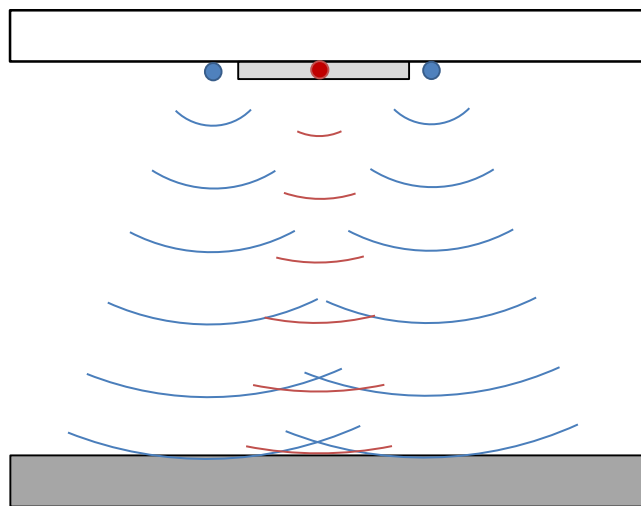
Фазосдвигающие фотошаблоны



Идея: уменьшить
засвечивание тёмного
поля путём
деструктивной
интерференции волн

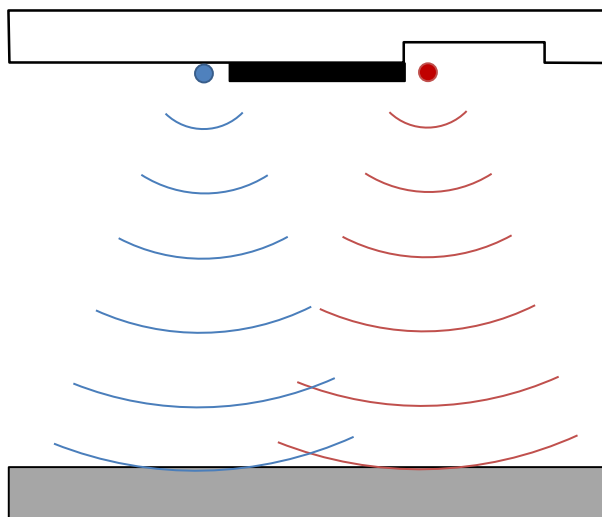
Область применения:
Изолированные и
плотно расположенные
линии критического
размера

Фазосдвигающие фотошаблоны



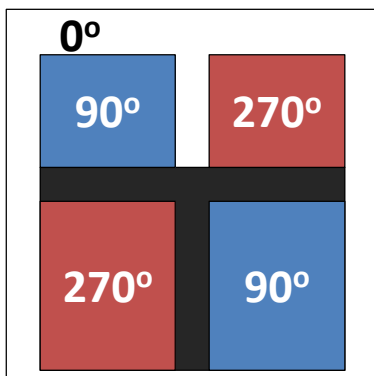
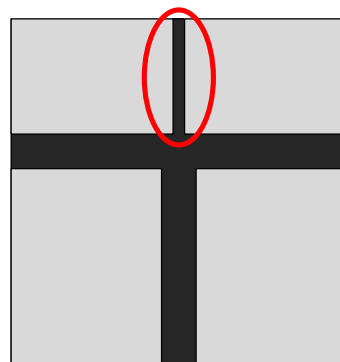
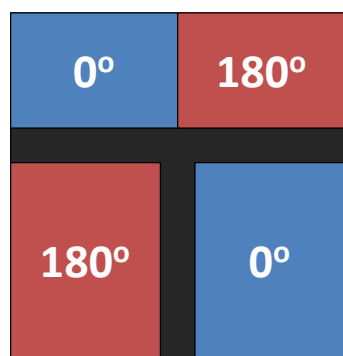
EAPSM (Embedded Attenuated Phase Shift Mask) - Тёмное поле пропускает часть света, одновременно сдвигая фазу волны на 180° относительно фазы светлого поля. Встречаясь в противофазе пропущенная и дифрагированные волны гасят друг друга.

Фазосдвигающие фотошаблоны



AAPSM (Alternating Aperture Phase Shift Mask) - Волны из двух светлых полей имеют противоположные фазы, вследствие чего гасят друг друга при наложении

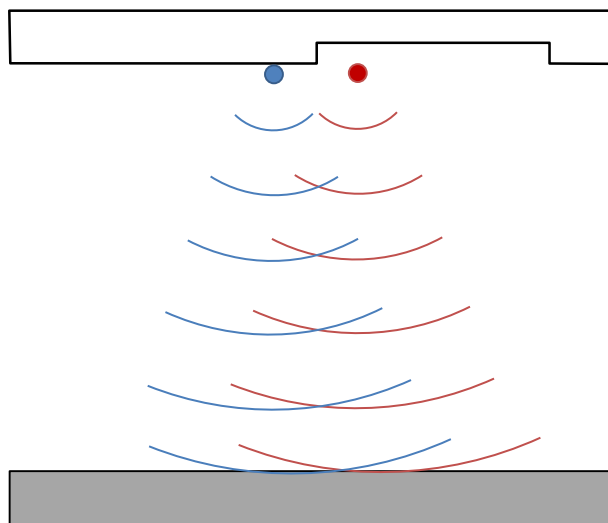
Фазосдвигающие фотошаблоны



Границы раздела противоположных фаз формируют тонкие линии в фоторезисте. Проблему решают тремя способами:

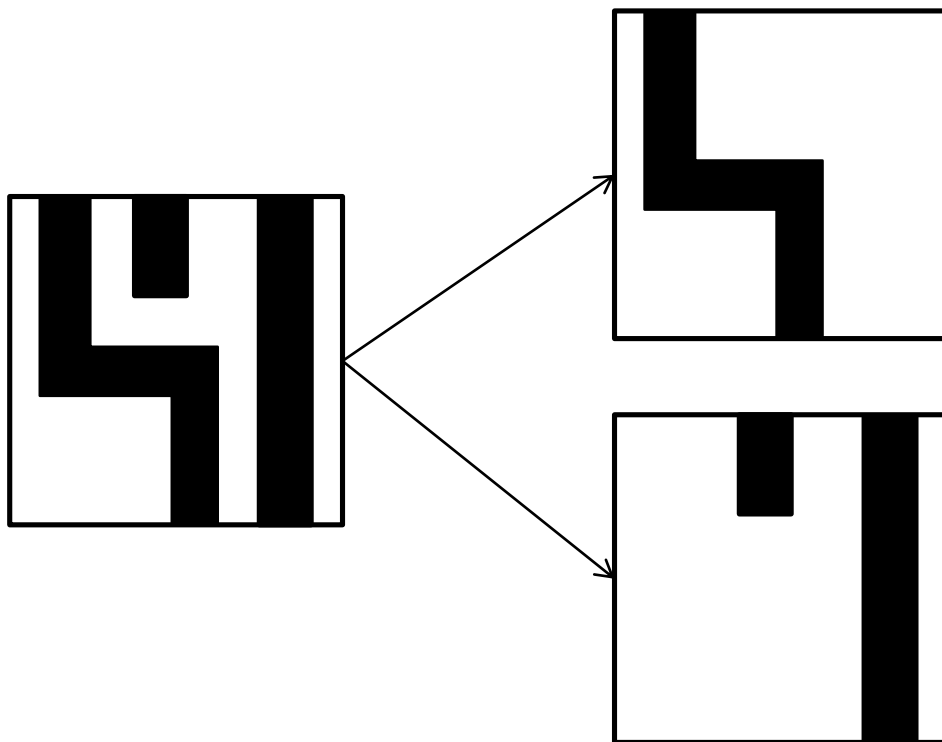
- 1) Используют отделочный ФШ (trim mask) для удаления линий
- 2) Переход $180^\circ/0^\circ$ на фотошаблоне делают ступенчатым $180^\circ/120^\circ/60^\circ/0^\circ$
- 3) Используют фазы 270° и 90° :

Фазосдвигающие фотошаблоны



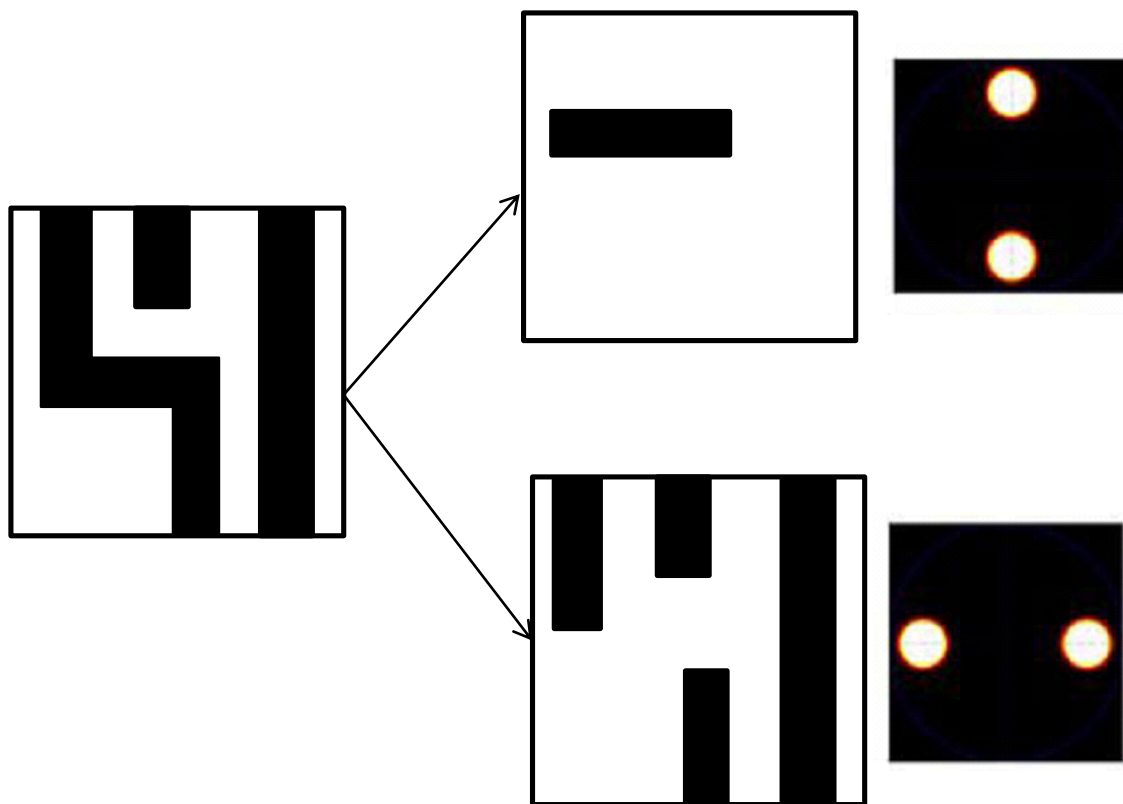
CPL (Chromeless Phase Litho Phase Shift Mask) - Тёмное поле отсутствует на шаблоне. Тонкие тёмные линии формируются на границе раздела фаз. Для формирования остальных фигур слоя используется отдельный шаблон

Двойное паттернирование



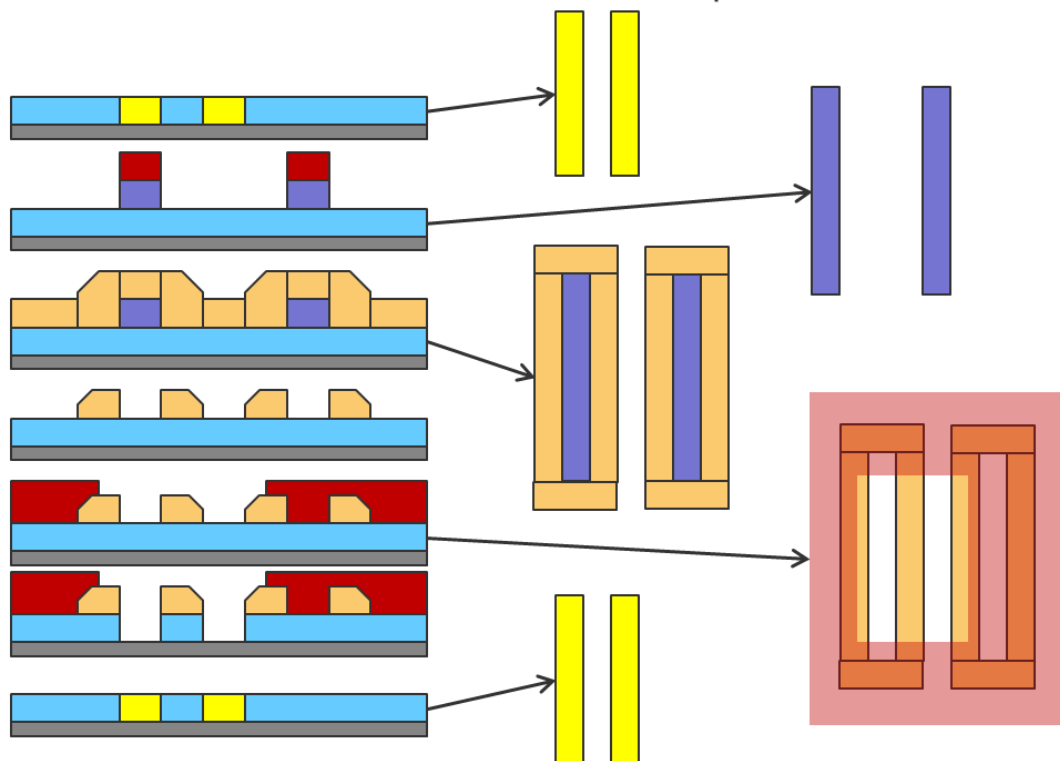
Классическое разбиение топологии для двойного паттернирования

Двойное паттернирование



Техника двойной дипольной литографии использует преимущества источника освещения для разно ориентированных линий

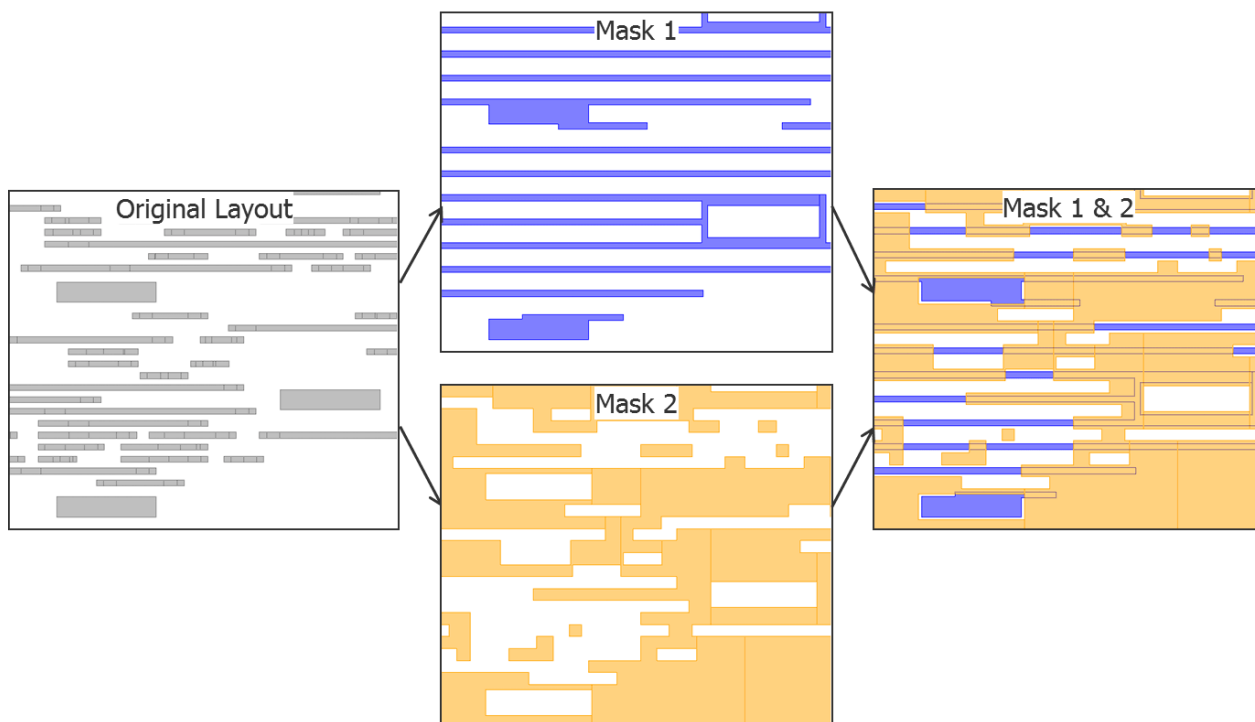
Двойное паттернирование



Техника SADP (Self-Aligned Double Patterning) позволяет решить проблему совмещения слоев.

URL: <https://semiengineering.com/self-aligned-double-patterning-part-one/>

Двойное паттернирование

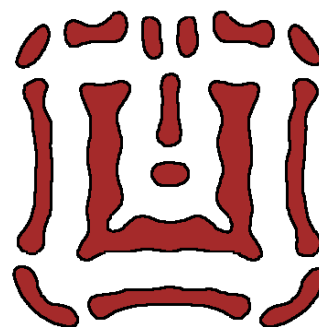
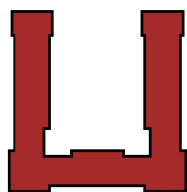
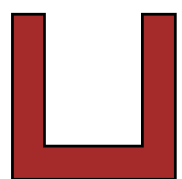


Однако SADP (Self-Aligned Double Patterning) значительно усложняет проектирование фотошаблонов.

URL: <https://semiengineering.com/self-aligned-double-patterning-part-one/>

Коррекция эффектов оптической близости

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$



Без коррекции

0.66

RBOPC

0.52

MBOPC

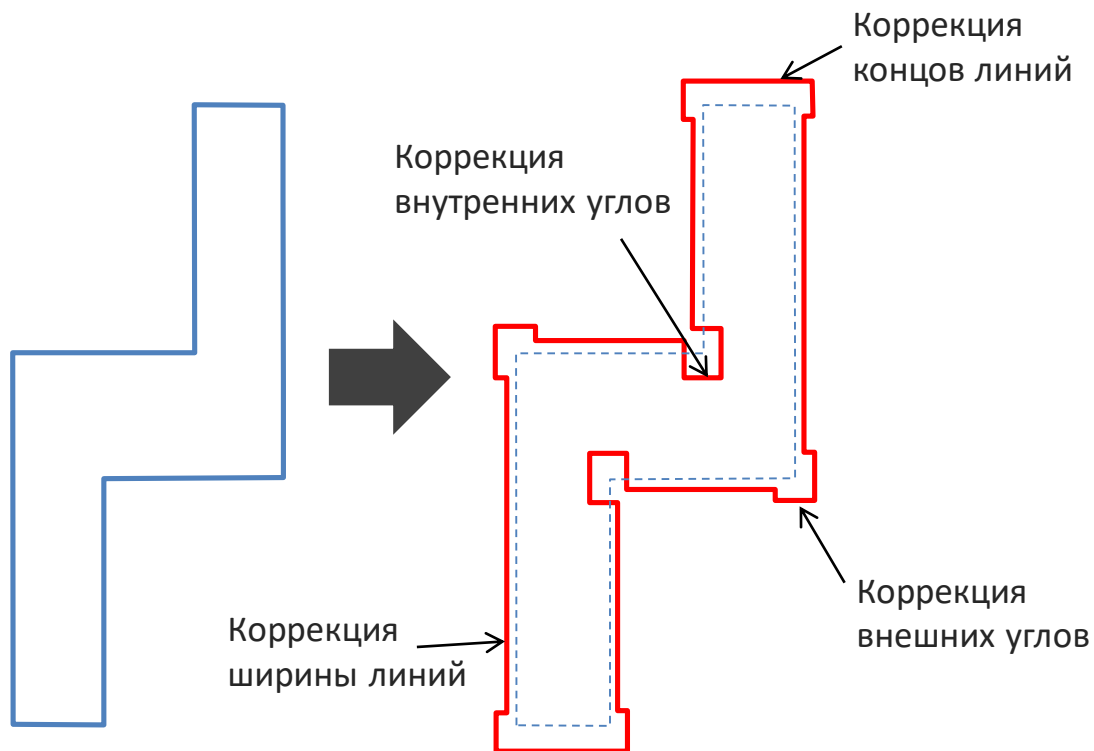
0.28

ILT

k_1

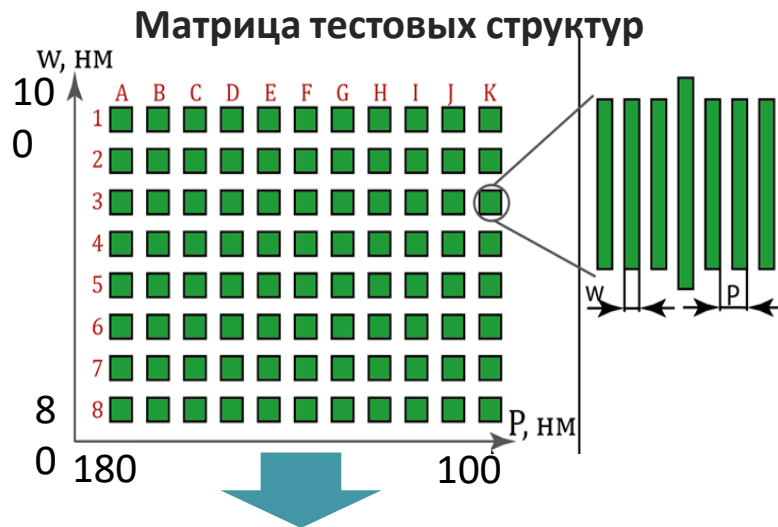
В зависимости от сложности литографического процесса применяются различные техники коррекции.

Коррекция эффектов оптической близости



RBOPC (Rule-based Optical Proximity Correction) - коррекция на основе эмпирических правил.

Коррекция эффектов оптической близости



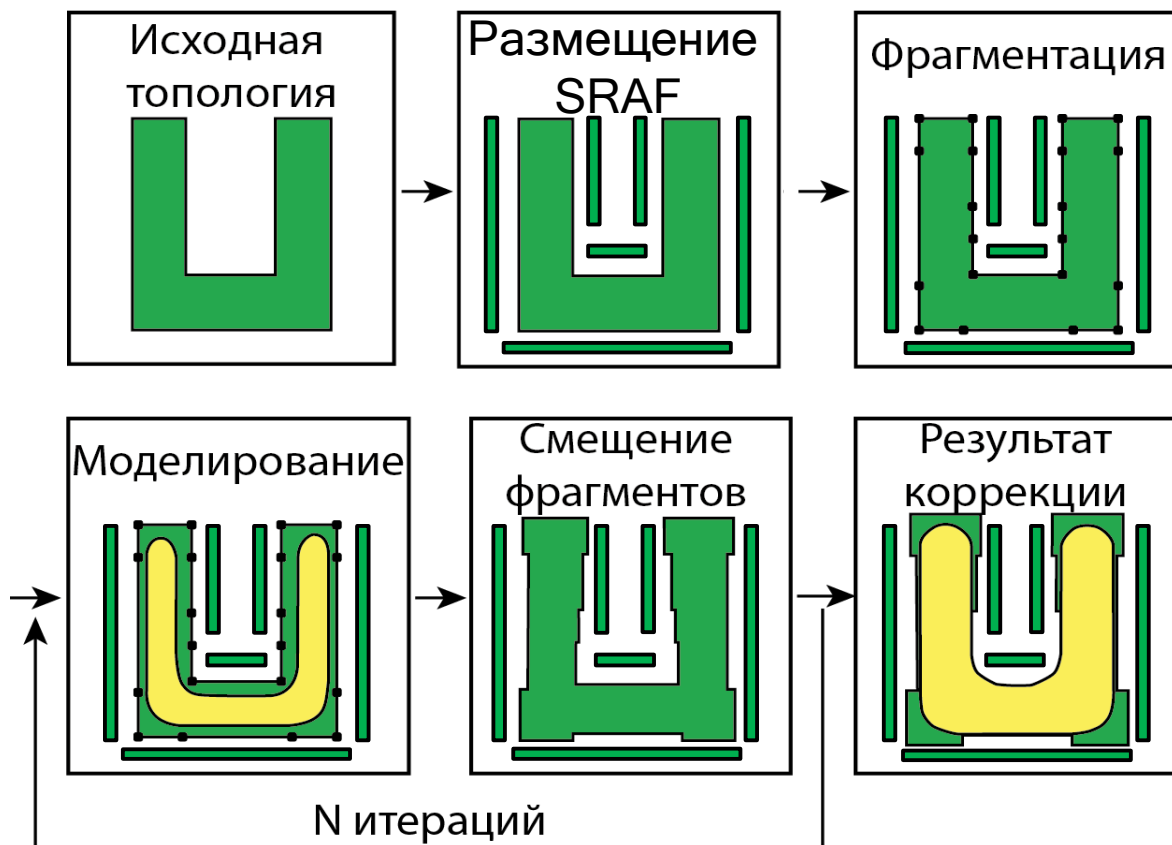
Пример: коррекция ширины линий для технологии 90 нм

$P, \text{нм}$	$W, \text{нм}$	Глубина фокуса, нм
180	80	0
180	82	190
180	84	230
180	86	215
...

Таблица правил

$P, \text{нм}$	$W, \text{нм}$
180	92
190	86
...	...
100	84

Коррекция эффектов оптической близости



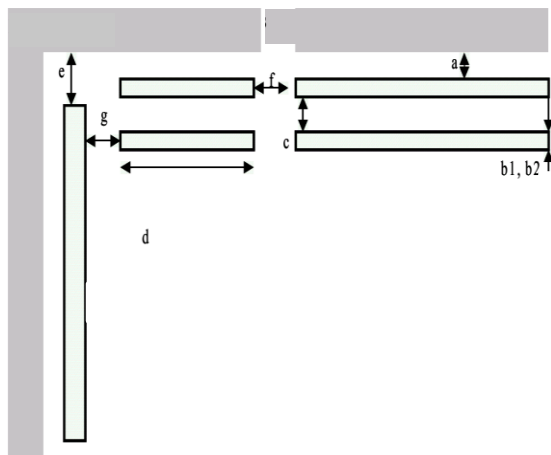
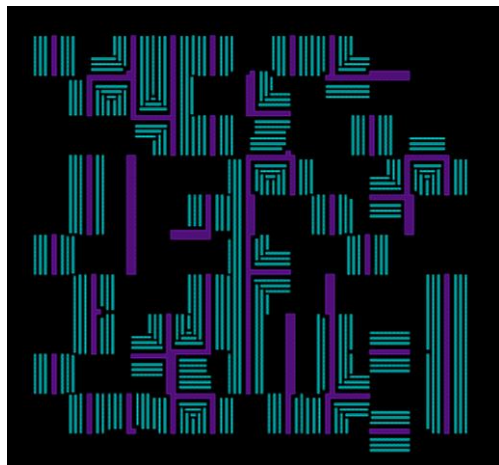
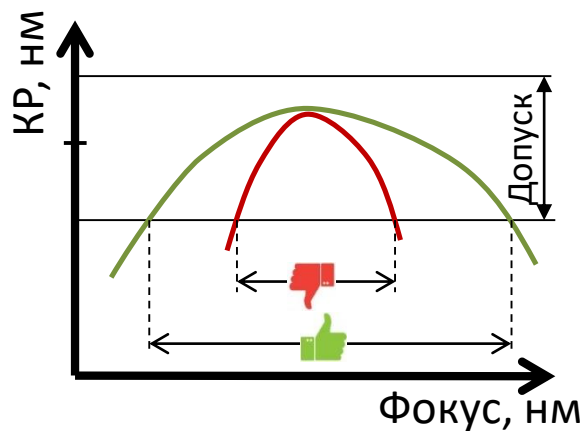
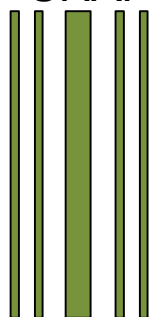
МВОРС (Model-based Optical Proximity Correction) В основе коррекции на основе моделирования лежит принцип обратной связи

Коррекция эффектов оптической близости

Только коррекция



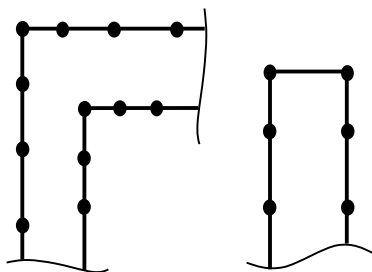
Коррекция + SRAF



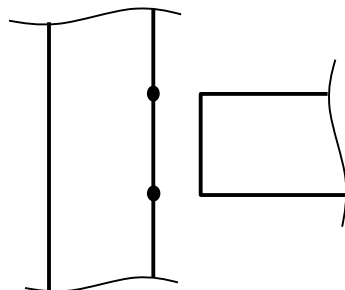
Размещение SRAF (sub-resolution assist features) - размещение непечатаемых вспомогательных структур согласно заранее определённым правилам.

Коррекция эффектов оптической близости

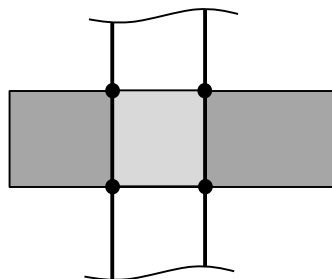
На концах линий
и углах



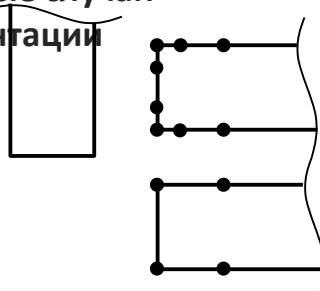
В областях взаимного
влияния фигур



В областях влияния
других слоёв

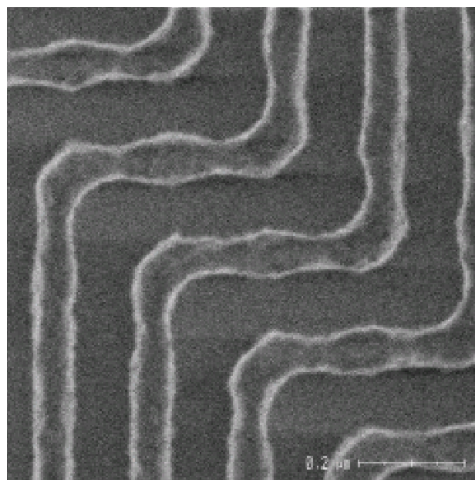
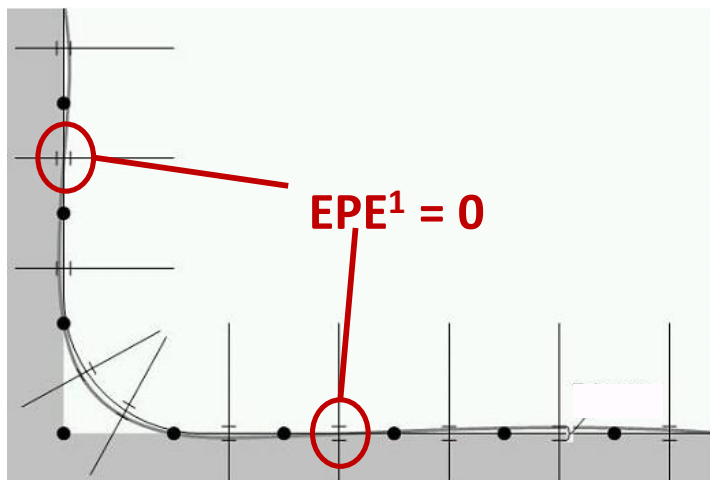


Специальные случаи
фрагментаций



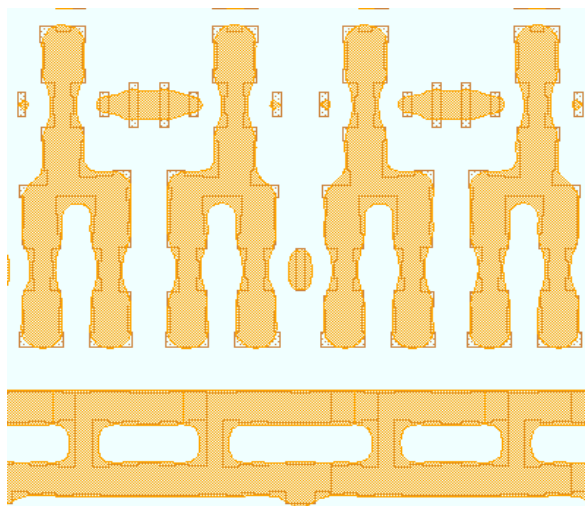
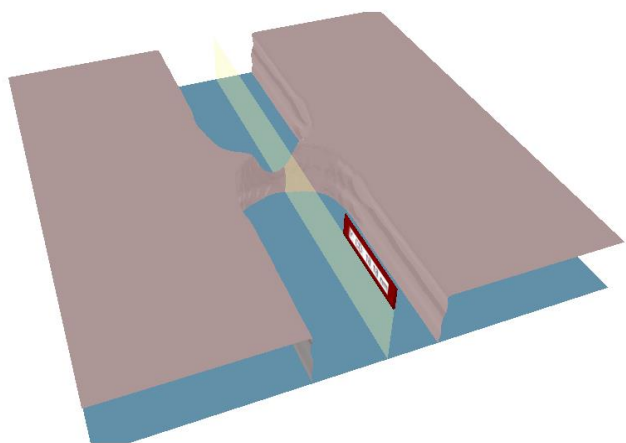
Фрагментация - границы полигонов разбиваются на фрагменты согласно заранее определённым правилам

Коррекция эффектов оптической близости



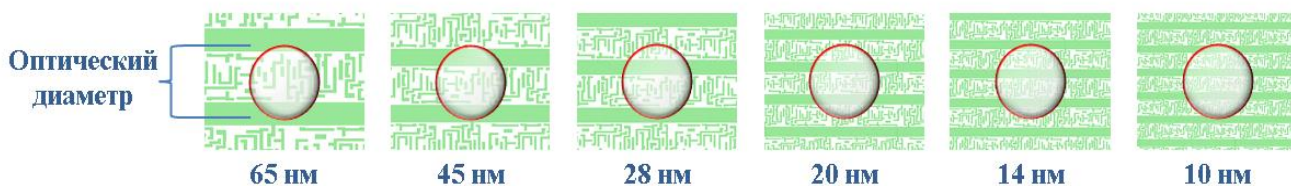
Некорректная настройка фрагментации может привести к возникновению «ряби»

Коррекция эффектов оптической близости

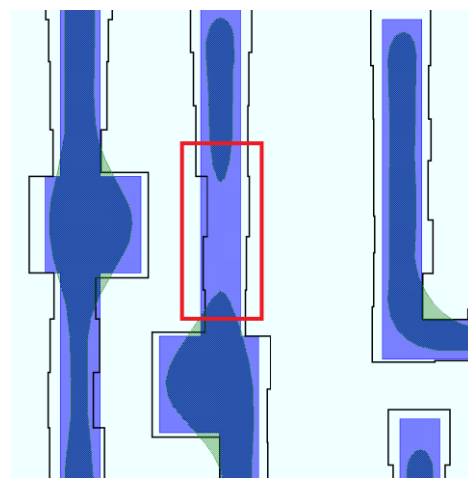
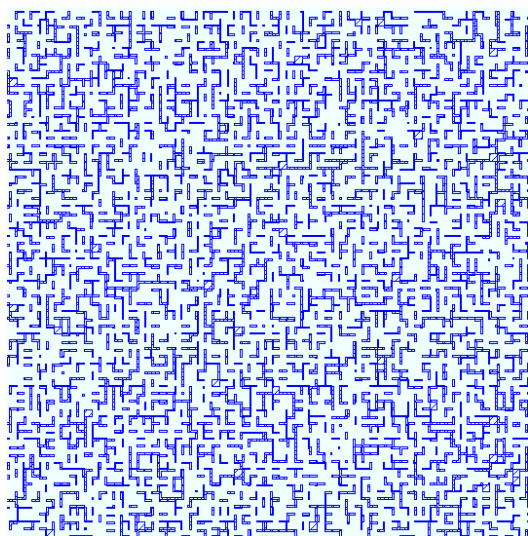


Для прогнозирования контуров проявления фоторезиста используются упрощенные эмпирические модели.

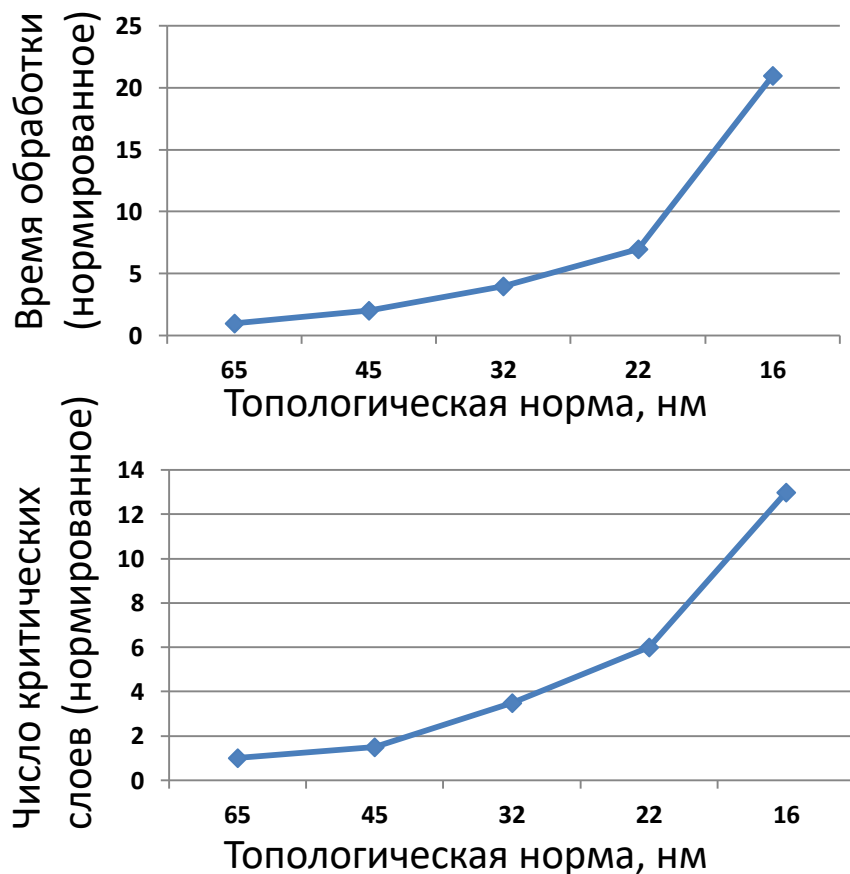
Коррекция эффектов оптической близости



Гарантировать
корректное проведение
коррекции эффектов
оптической близости
невозможно

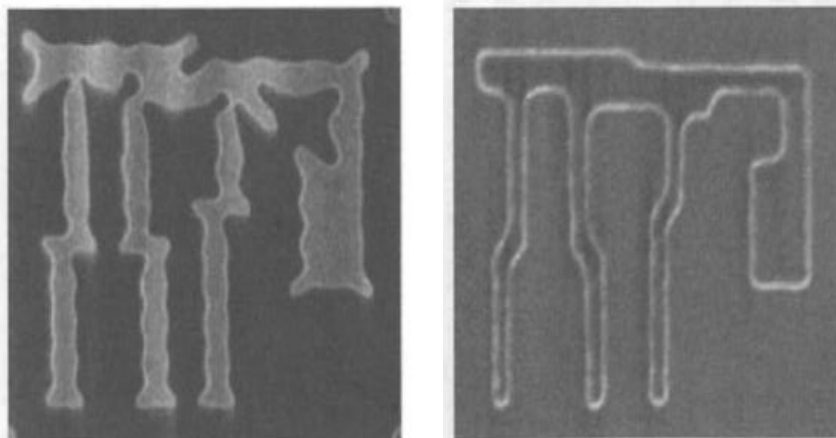


Коррекция эффектов оптической близости



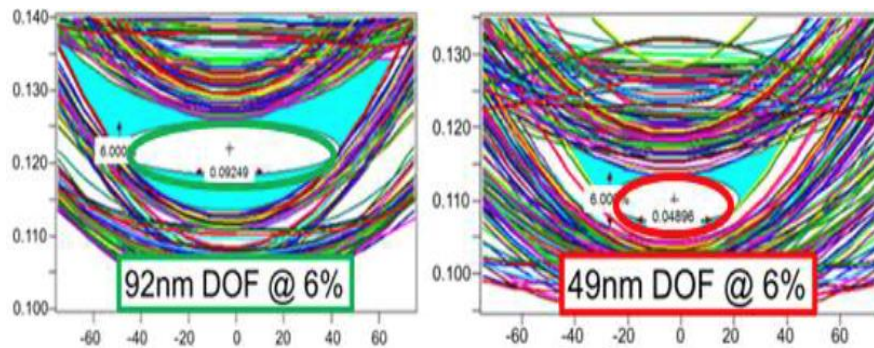
С усложнением технологии растет число технологических слоев, требующих коррекции, как и сложность самих слоев. Это повышает требования к вычислительным ресурсам.

Коррекция эффектов оптической близости



Пример увеличения окна процесса для технологии 22 нм

Техника обратной литографии (Inverse Lithography Technology) - точное решение задачи коррекции. По известному (требуемому) изображению на пластине восстанавливается изображение фотошаблона



Отечественная индустрия

Текущий уровень



Технологический лидер -
завод Микрон
(г. Зеленоград) с процессом
уровня 90 нм

Перспектива развития

УТВЕРЖДЕНА
распоряжением Правительства
Российской Федерации
от 17 января 2020 г. № 20-р

СТРАТЕГИЯ

развития электронной промышленности Российской Федерации
на период до 2030 года

- Разработать технологии, специальные материалы, технологическое и контрольно-измерительное оборудование для производства фотошаблонов с проектными нормами 250 нм, 180 нм, 90 нм, 65 нм и 28 нм, а также решения для проектных норм 22 - 20 нм, 16 - 14 нм и менее.
- Создать кремниевые фабрики, работающие в режиме "фаундри" для выпуска цифровых интегральных микросхем с топологическими нормами 28 нм, 14 - 12 нм, 7 - 5 нм.

- Разработать технологии производства с топологическими нормами 65 - 45 нм, 28 нм, 14 - 12 нм, 7 - 5 нм.

Перспектива развития



Проект строительства новых научно-производственных объектов на портале «Активный гражданин»

URL: <https://stroi.mos.ru/news/v-tiekhnopolisie-moskva-postroiat-novyie-nauchno-proizvodstviennye-obiekty>



Спасибо за внимание

117036, г. Москва,
пр. 60-летия Октября, 10А,
Тел.: +7 495 988 53 88
Email: info@edunano.ru
www.edunano.ru