

Проблемы проекционной литографии i-line диапазона при производстве СБИС с субмикронными размерами элементов

Студент: Родионов И.А.

Руководитель квалификационной работы : доцент, к.т.н. Макаруч В.В.



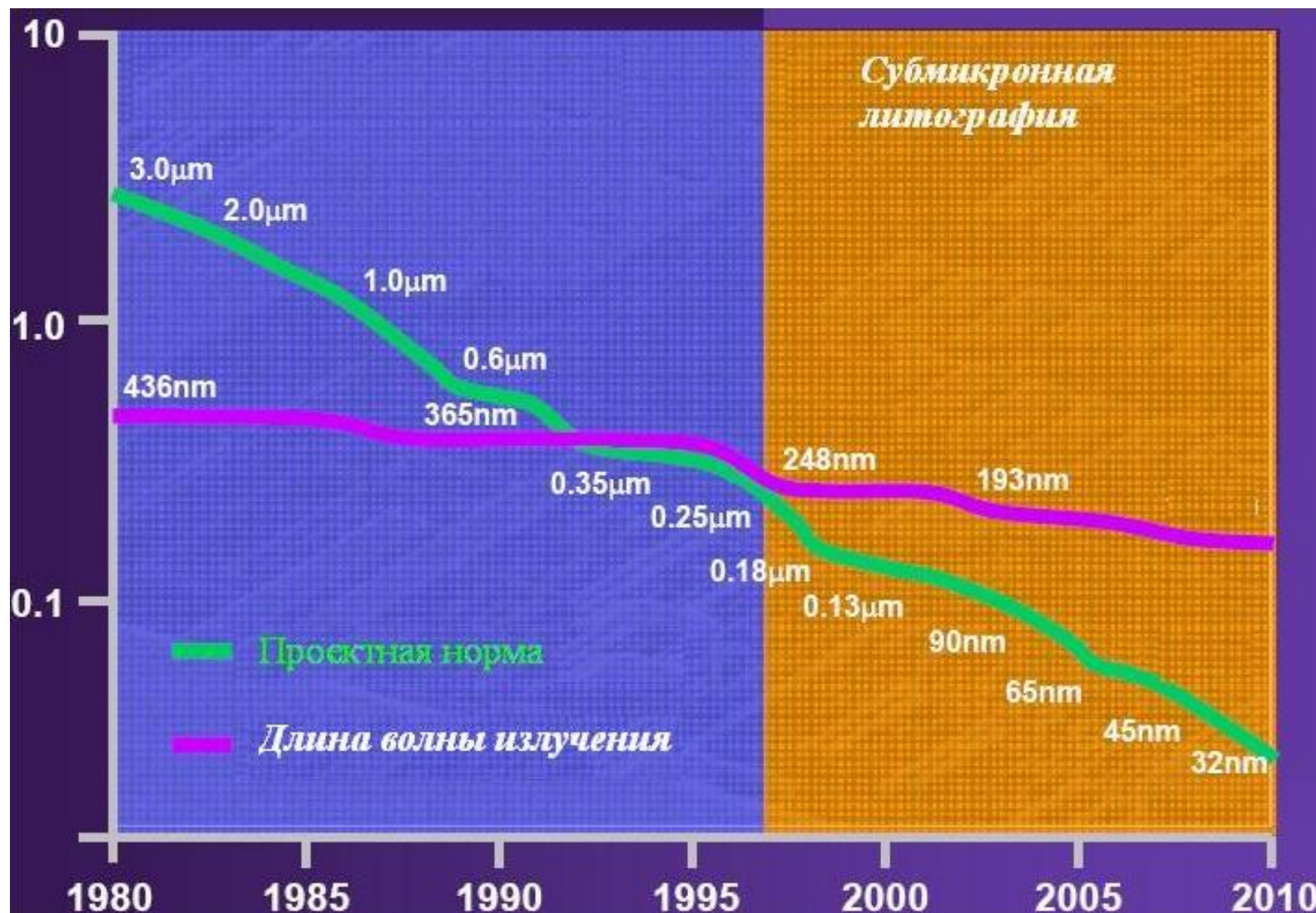
<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГУ
им. Н.Э. Баумана

Этапы развития процесса литографии



<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Цели и задачи

Цель работы:

1. Отработка технологического процесса получения изображения на фоторезистивной маске с минимальными критическими размерами 0.5 и 0.35 мкм.
2. Разработка методики подхода к контролю технологического процесса литографии с субмикронными проектными нормами.

Решаемые задачи:

1. Анализ существующих литографических материалов (УФ-резистов, антиотражающих покрытий, травителей), оснастки (шаблонов) и оборудования (на примере установки проекционной пошаговой мультипликации PAS 5500/250C фирмы ASML, Голландия).
2. Разработка фигур оперативного контроля для технологического процесса литографии при производстве СБИС с проектными нормами 0.5 мкм и 0.35 мкм.
3. Проектирование ФШ с разработанными фигурами оперативного контроля.
4. Исследование параметров техпроцесса проекционной литографии посредством построения процессных окон в координатах «фокус — доза экспозиции» для определения оптимальных технологических режимов экспонирования и проявления УФ-резиста.
5. Анализ результатов исследования с целью разработки рекомендаций по использованию в техпроцессе производства СБИС фигур контроля качества литографии.
6. Анализ результатов исследования с целью выбора оптимальных технологических режимов процесса проявления УФ-резиста.
7. Анализ возможности получения элементов с размером меньше 0.3 мкм на имеющемся оборудовании.



Теоретические основы проекционной оптики

Критерий Релея:

$$a_{min} = K_1 \lambda / NA$$

где a_{min} – разрешающая способность проекционного объектива,
 K_1 – коэффициент зависящий от уровня качества литографического процесса и используемых материалов,
 λ – длина волны экспонирующего излучения,
 NA – числовая апертура объектива.

Числовая апертура объектива (NA) в среде с показателем преломления n определяется как:

$$NA = n \sin \theta = D/2f$$

где θ – угол падения луча на границе раздела объектив – окружающая среда,
 f – фокус объектива,
 D – диаметр входного зрачка объектива.

Глубина резкости определяется как:

$$DOF = \pm K_2 \lambda / 2 (NA)^2$$

Практически единственная возможность повышения разрешающей способности - уменьшение длины волны экспонирующего излучения, т.е. переход от оптического в ультрафиолетовый диапазон длин волн.



Установка проекционной литографии ASML PAS 5500/250C

365 нм (i-Line)

Изменяемая
0.60-0.48 NA

Отдельная
Единица управления
для оператора



Транспортная система
для пластин (WTS)

С лучшей
производительностью в
индустрии

Сверхточные
Синхронные
сканирующие
стадии

Технические характеристики:

- 200 мм пластины, 200 мДж/см²
- 93 пл./час
- двухстадийная система совмещения
- точность совмещения – 40 нм
- рабочее поле – 22x22 мм



<Бакалаврская работа>

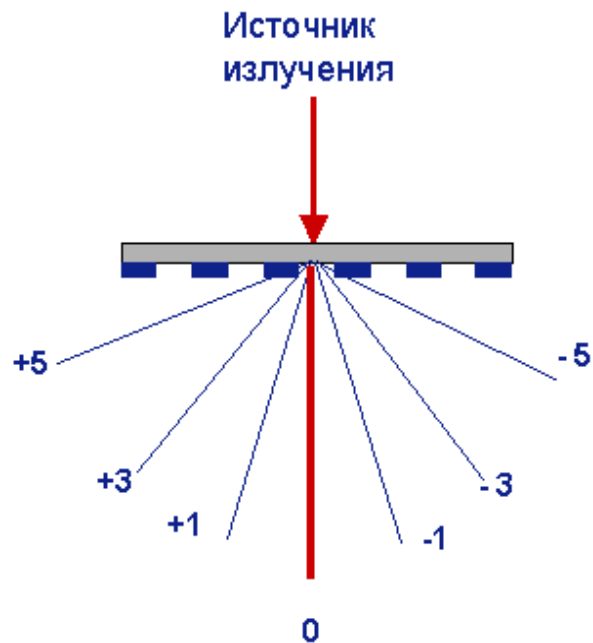
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

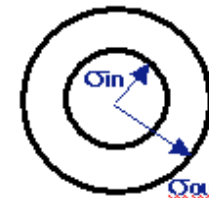
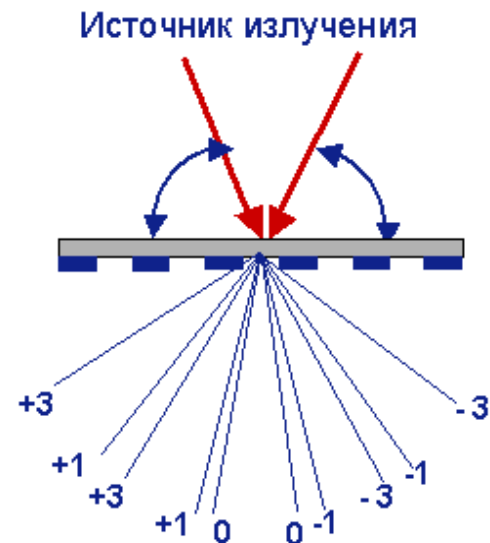
МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Дифракция в оптических системах

- Обычное освещение



- Анулярное освещение (внеосевое)



При прохождении излучения с длиной волны сопоставимой с топологическим размером рисунка на ФШ наблюдается суммирование вторичных волн с образованием дифракционных минимумов и максимумов.



План эксперимента

- получение на пластинах тестовой структуры (миры) на различных технологических режимах степпера;
- измерение контрольных размеров миры и построение процессных окон;
- анализ полученных результатов и формулировка рекомендаций.



Исходные данные для построения процессных окон

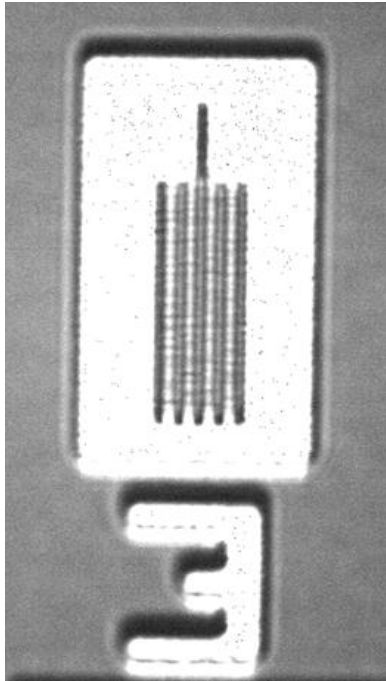
№	Толщина нанесенного резиста, нм	СКО толщины резиста, нм	Плоскостность пластины, мкм	Параметры внеосевого освещения	
				σ_{in}	σ_{out}
1	715	3	0,44	0	0,7
2			0,44	0,35	0,7
3	761	3	0,21	0	0,7
4			0,23	0,35	0,7

Резист - позитивный среднеконтрастный ультравысокого разрешения THMR-iP3650 NP фирмы ТОК (Япония).

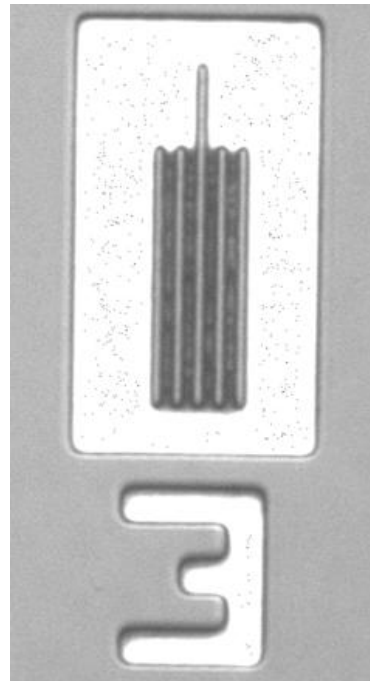
Предназначен для формирования масок толщиной ~ 0.8 мкм с минимальными размерами элементов < 0,3 мкм при экспонировании излучением i-линии ($\lambda=365$ нм) ртутной лампы сверхвысокого давления.



Качество проработки мира 0.3 мкм

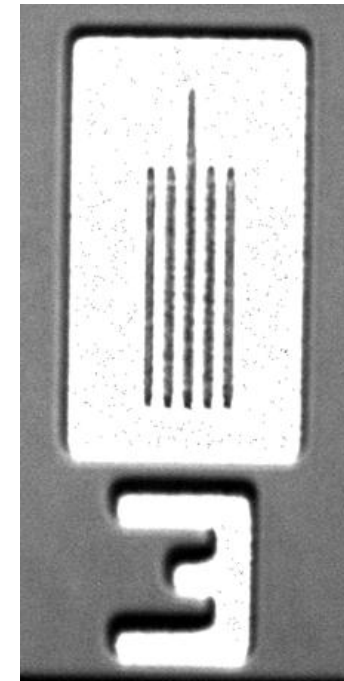


*Проработанная мира 0.3 мкм
(Leica INM300, 1500x, DUV)*



а)

*Пример выхода за пределы процессного окна
«фокус — доза экспозиции»: недостаточная (а) и
избыточная (б) дозы экспонирования
(Leica INM300, 1500x, DUV)*



б)



Пример построения процессного окна

№3	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	E	
-1.2	331																					262	
-1.1																269							
-1.0		324									295					275							
-0.9																							
-0.8											294												
-0.7																							
-0.6	334	328		320	317					310	302				286						273	268	
-0.5											301												
-0.4											297												
-0.3											290												
-0.2				324																			
-0.1											301												
0																275							
0.1											312												
0.2		331									338											265	
F																							



Результаты эксперимента по процессому окну

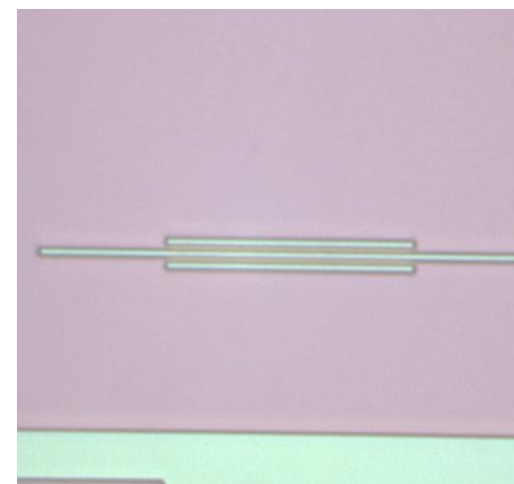
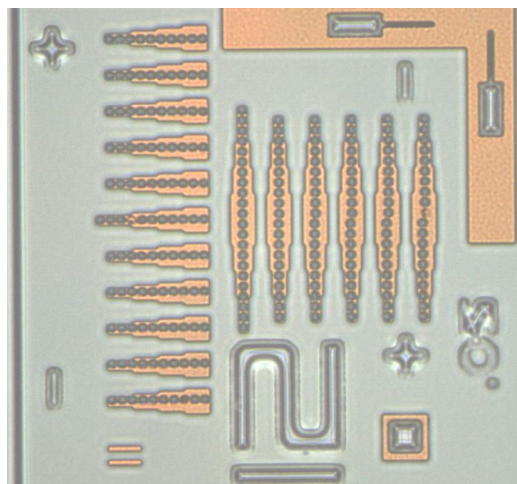
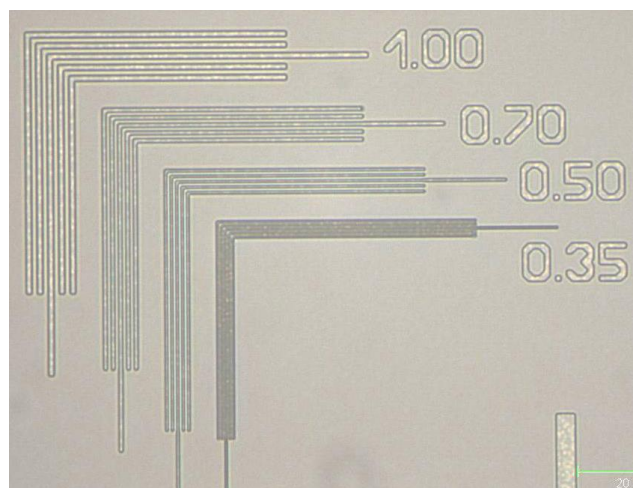
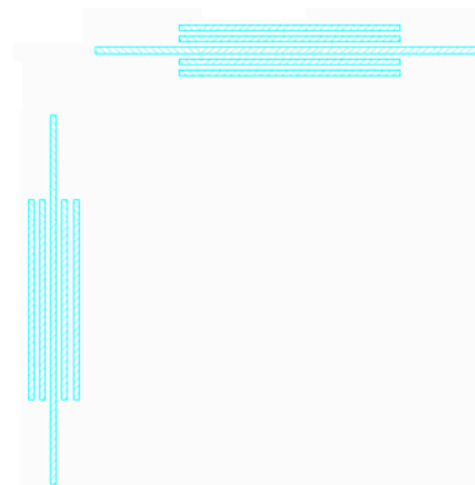
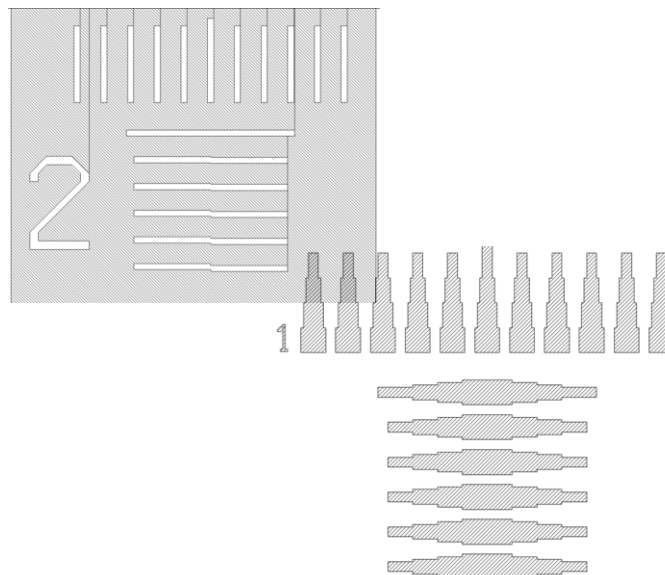
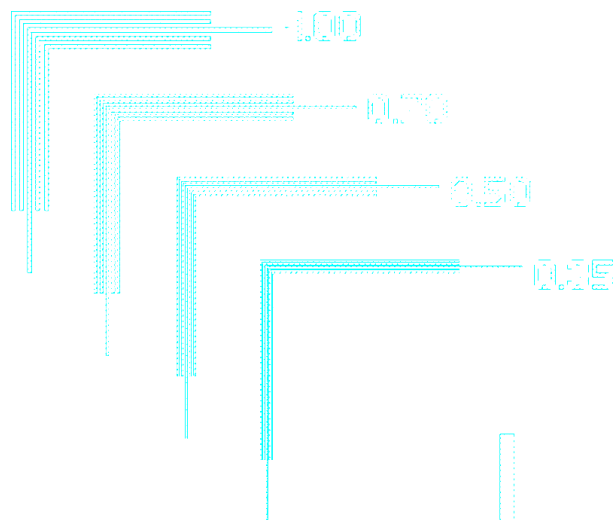
№	Доза, необходимая для проработки номинального размера E_s , мДж/см ²	Ширина процессного окна E_l , мДж/см ²	E_l , %	f , мкм	Δf , мкм
1	170	25	14,7	-0,6	1,1
2	165	20	12,1	-0,4	1,3
3	220	90	40,9	-0,5	1,2
4	220	40	18,2	-0,5	1,4

Выводы:

1. Внеосевое освещение обладает большими возможностями для получения элементов с размерами $< 0,3$ мкм, чем осевое.
2. Использование внеосевого освещения увеличивает глубину фокуса на 15%, однако одновременно влечет 50%-ное сокращение ширины процессного окна.
3. 18% ширина процессного окна (внеосевое освещение, максимум коэффициента отражения, максимум значения глубины фокуса) может считаться вполне достаточной для случая работы по рельефной подложке.
4. Применение внеосевого освещения позволяет обеспечить максимально высокую глубину фокуса без уменьшения числовой апертуры проекционной оптической системы.



Фигуры контроля техпроцесса литографии



<Бакалаврская работа>

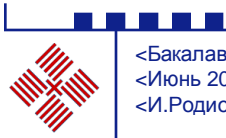
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГУ
им. Н.Э. Баумана

Полученные результаты

1. Разработаны фигуры оперативного контроля качества технологического процесса литографии, которые впечатаны в комплекты шаблонов (масок), используемых при производстве отечественных микропроцессорных КМОП СБИС серии 1890 с проектными нормами 0,35 и 0,5 мкм.
2. Доказана возможность получения структур с критическими размерами $\leq 0,3$ мкм посредством настройки процессных параметров (без введения фигур коррекции эффектов близости) на имеющемся в НИИСИ РАН оборудовании.
3. Проведены исследования и отработан базовый технологический процесс получения поликремниевых затворов и контактных окон размером 0,35 мкм на проекционном литографическом оборудовании, использующем i-линию ртути ($\lambda=365$ нм) без введение фигур коррекции эффектов близости.
4. Для получения на имеющемся оборудовании структур с меньшими критическими размерами (0,25 мкм и ниже) необходимо применять шаблоны, содержащие фигуры коррекции оптических эффектов близости.





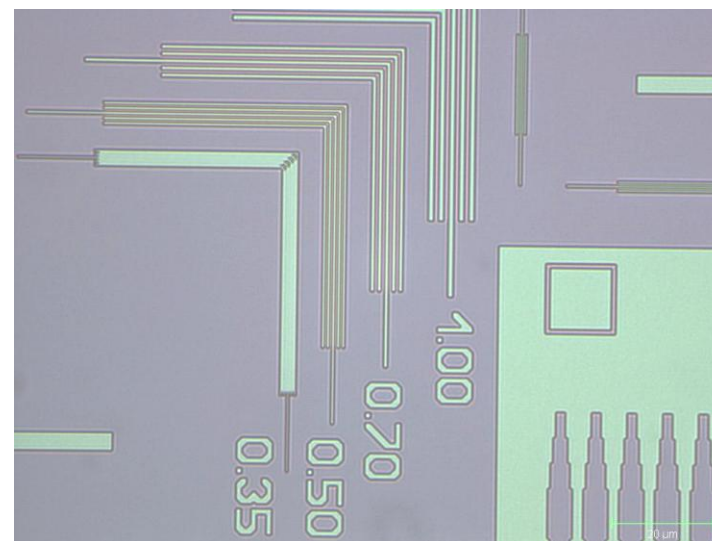
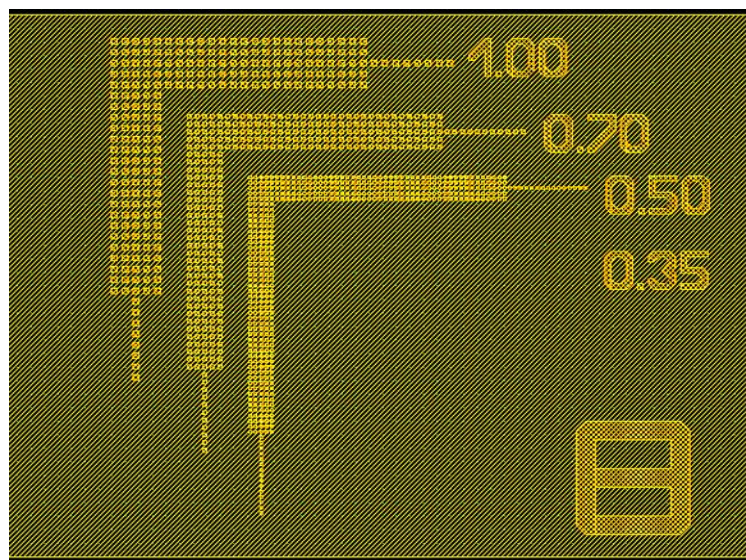
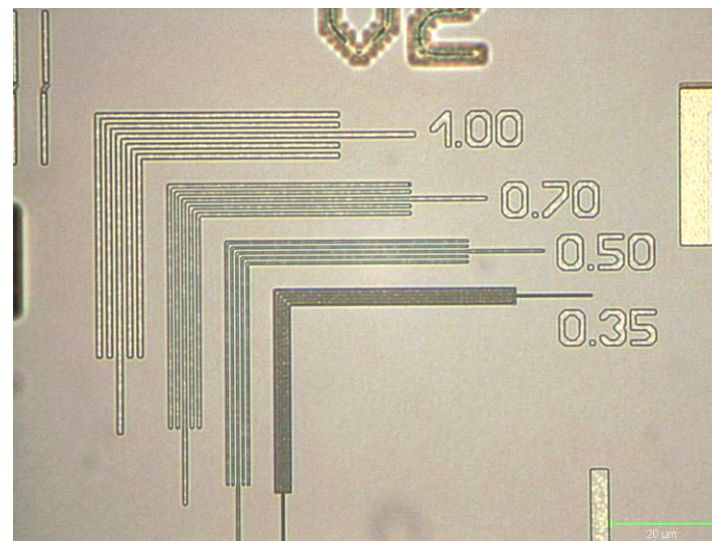
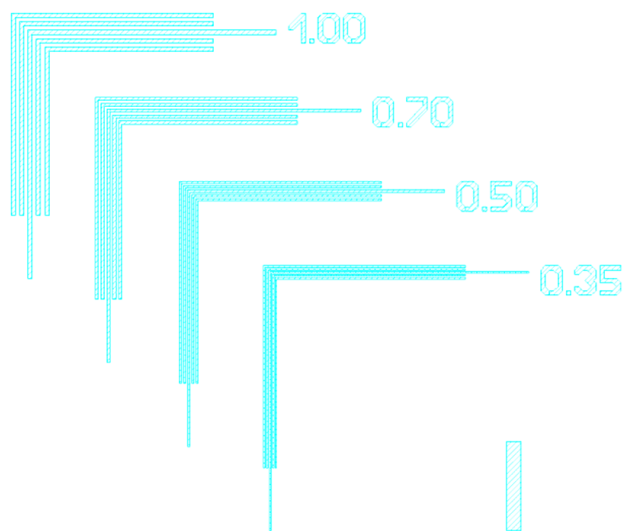
<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГУ
им. Н.Э. Баумана

Фигуры контроля разрешения



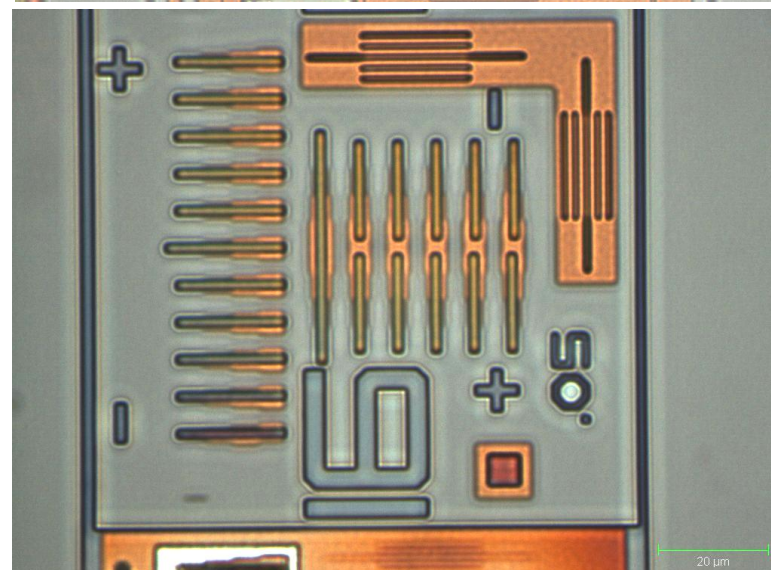
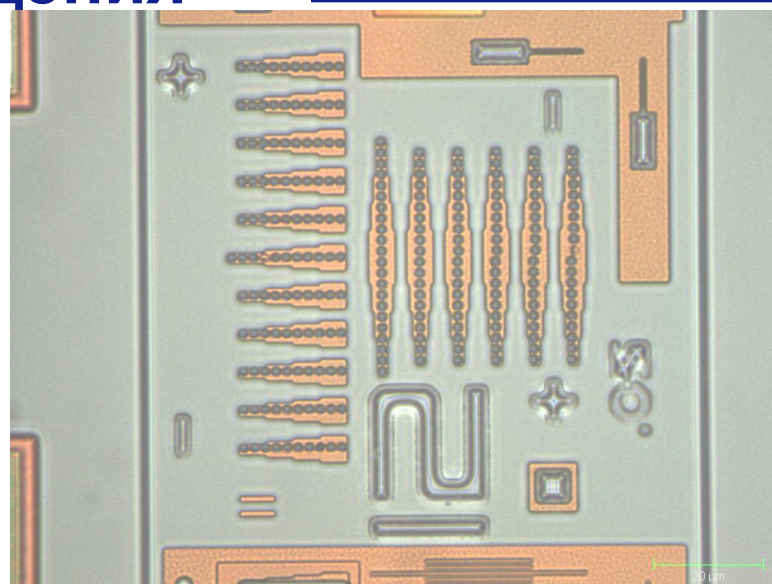
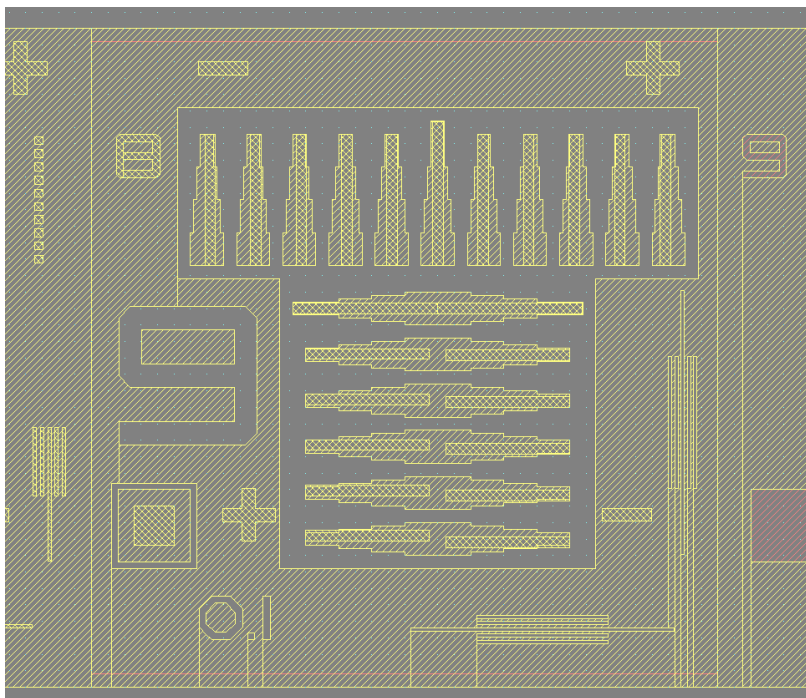
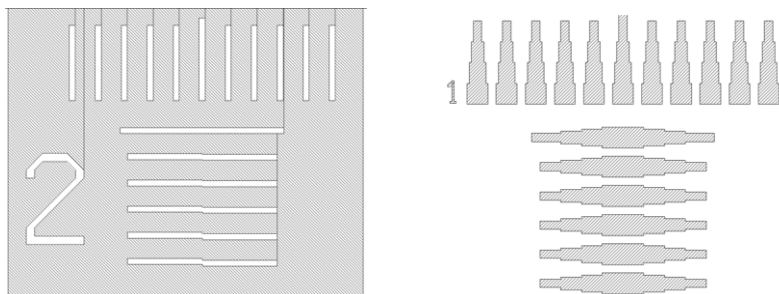
<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Фигуры контроля рассовмещения



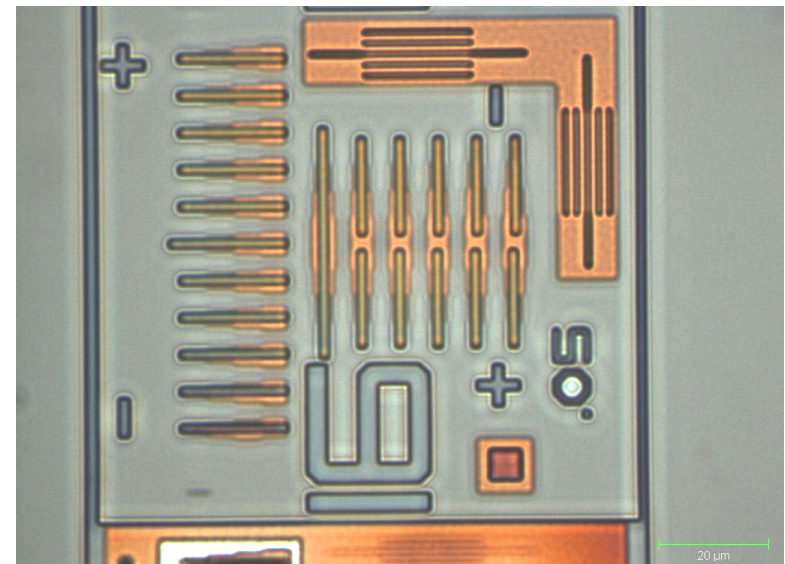
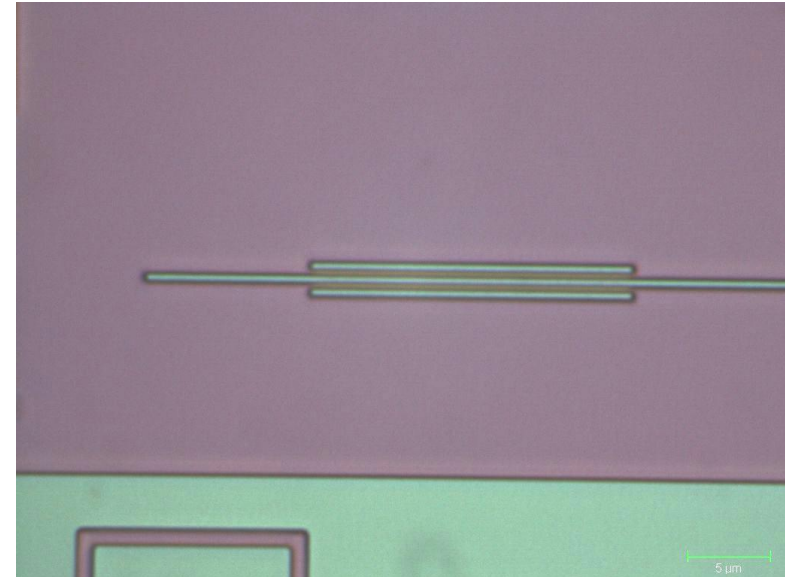
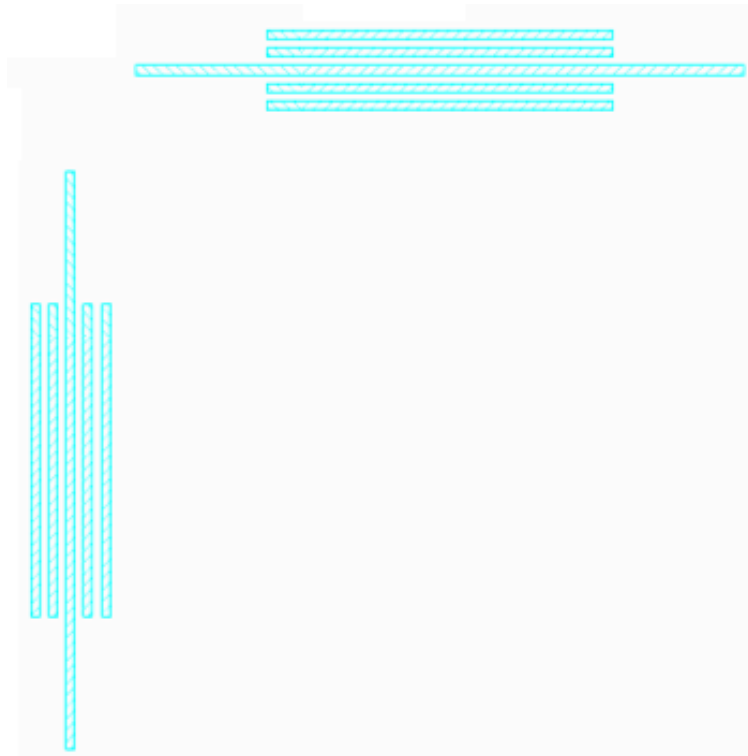
<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Фигуры контроля минимальных критических размеров



<Бакалаврская работа>
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Осветительный и проекционный модули

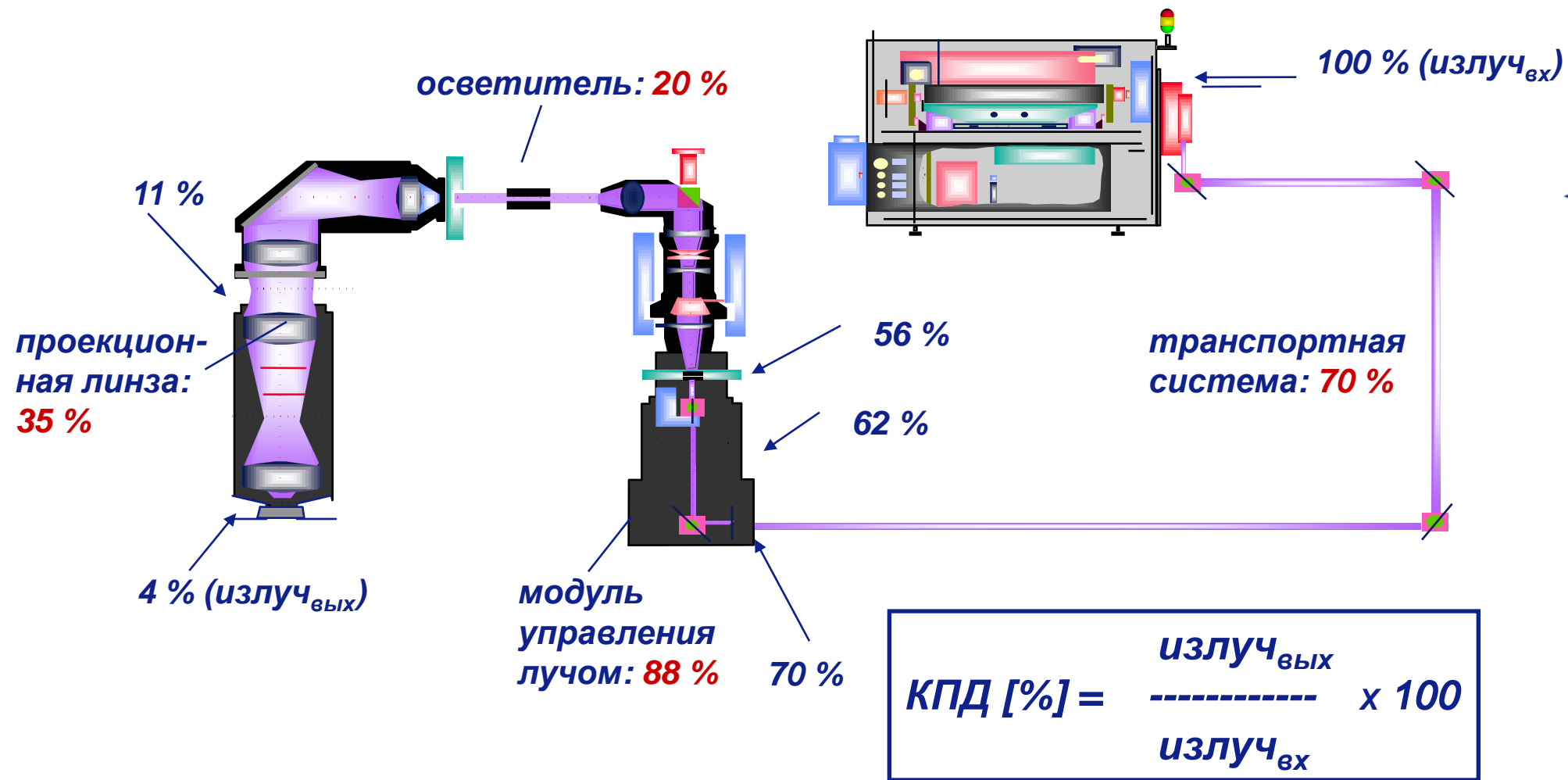
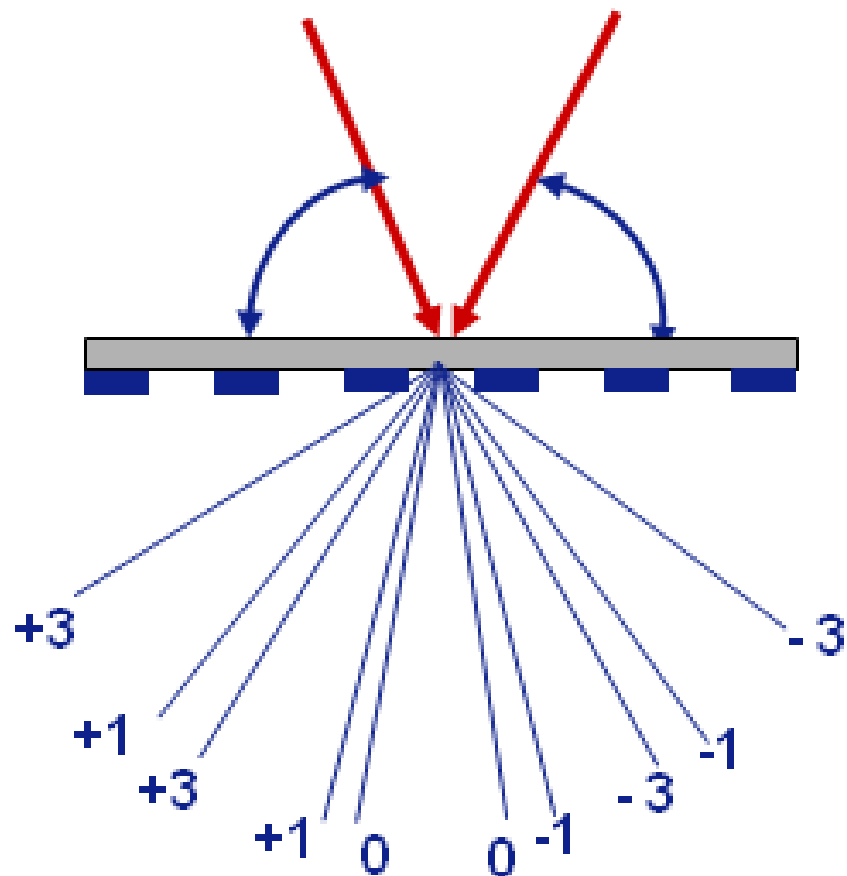
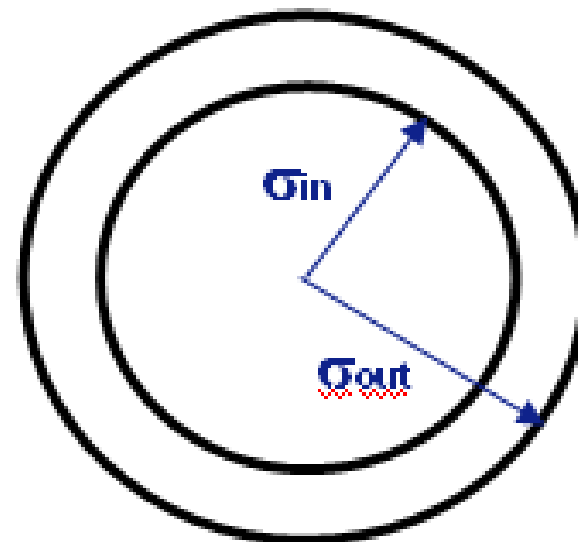


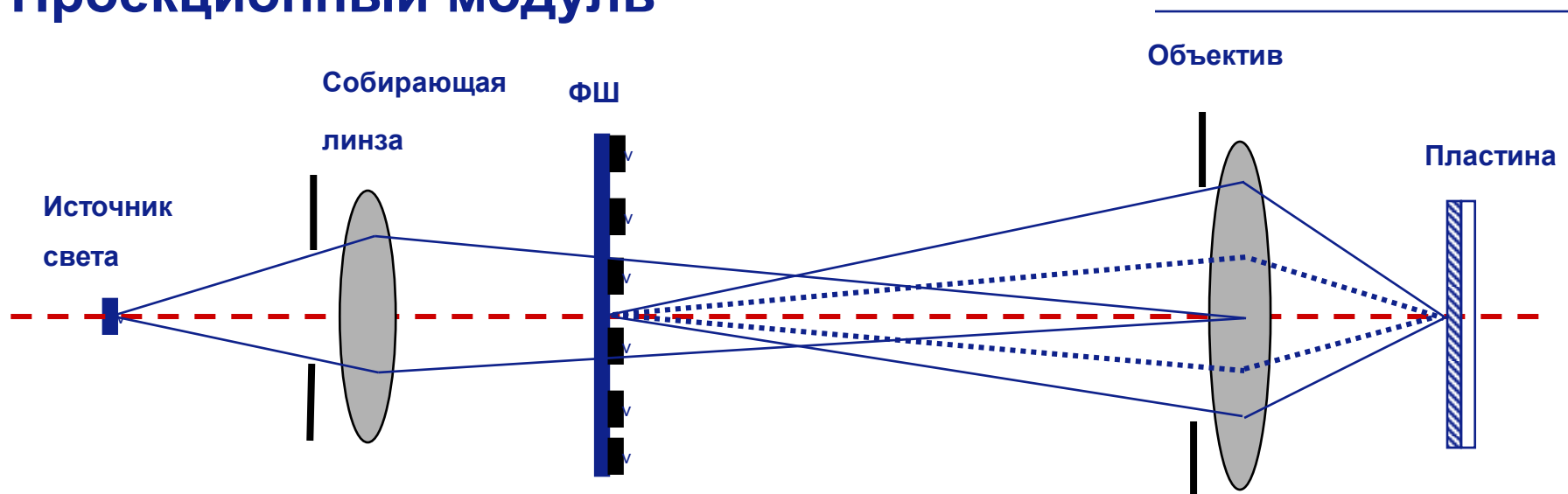
Схема анулярного освещения



Источник излучения



Проекционный модуль



Оптический объектив должен быть:

- широкополевым;
- широкоапертурным.

Зеркала объектива и зеркала маски должны иметь:

- точность выполнения размеров не хуже $0,1-0,3$ нм.
- совершенство поверхности не хуже, чем $\lambda/20$, т.е. ~ 1 нм.



Внеосевое освещение

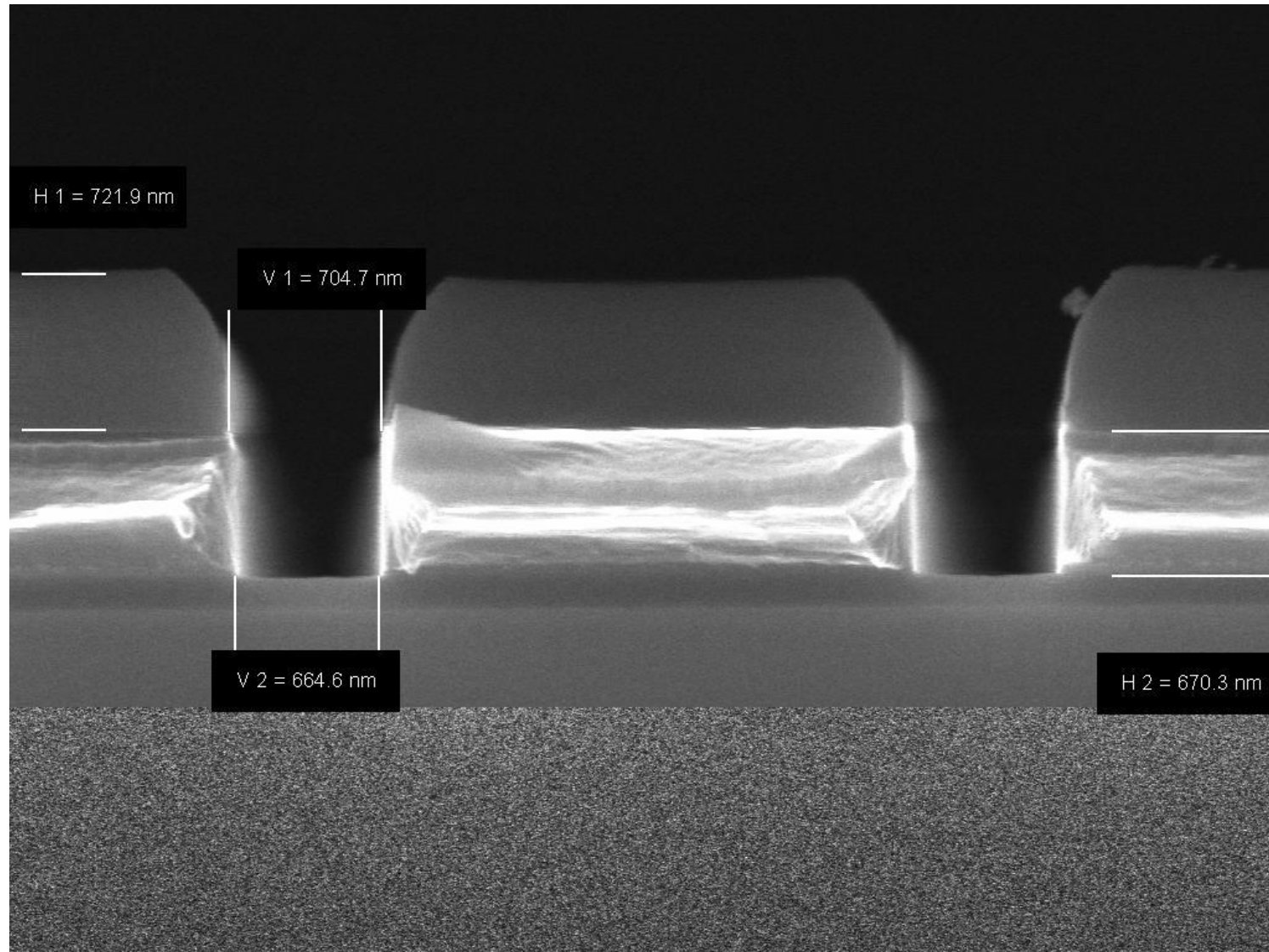
Дифракционные порядки можно снизить, используя внеосевое освещение (*Off Axis Illumination, OAI*). Внеосевое освещение обеспечивает улучшение разрешающей способности проекционного объектива без ухудшения глубины резкости изображения, но зависит от плотности и ориентации элементов топологии, что ограничивает спектр возможностей его применения.

Обычная система освещения использует источники света с равномерным распределением интенсивности светового потока по круговому полю, что вызывает ограничения по глубине фокуса из-за фазовых расхождений, для различных оптических путей.

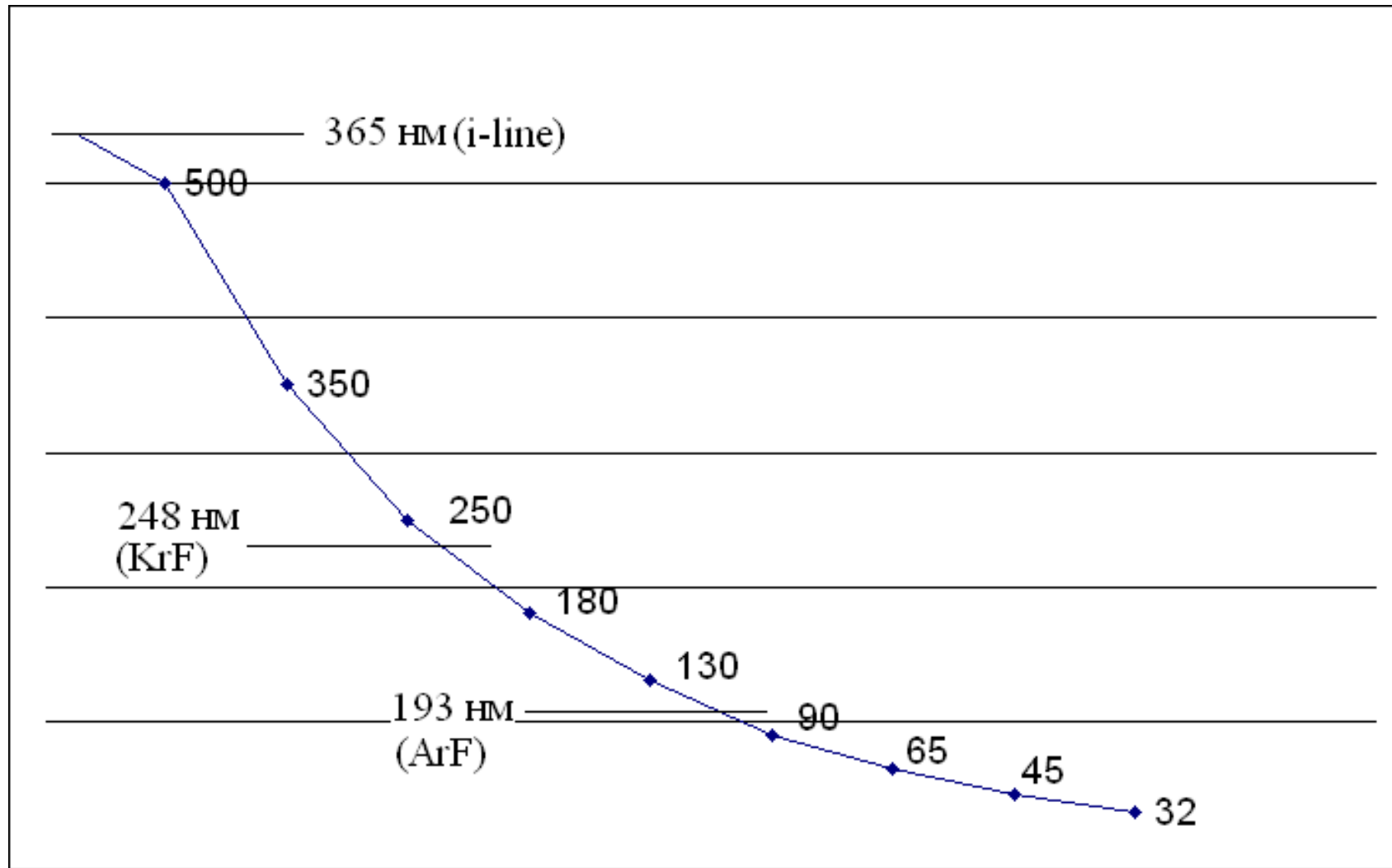
Внеосевое освещение позволяет расширить диапазон глубины резкости и улучшить разрешение. Одним из методов внеосевого освещения является анулярное (круговое) освещение, применение которого уменьшает фазовое расхождение светового потока. Этот метод освещения эффективен для плотно расположенных линий и зазоров (насыщенного рисунка шаблона).



Воздействие на ФРМ



Современное состояние



157 нм (F₂, CaF₂) – актуальная проблема!



<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

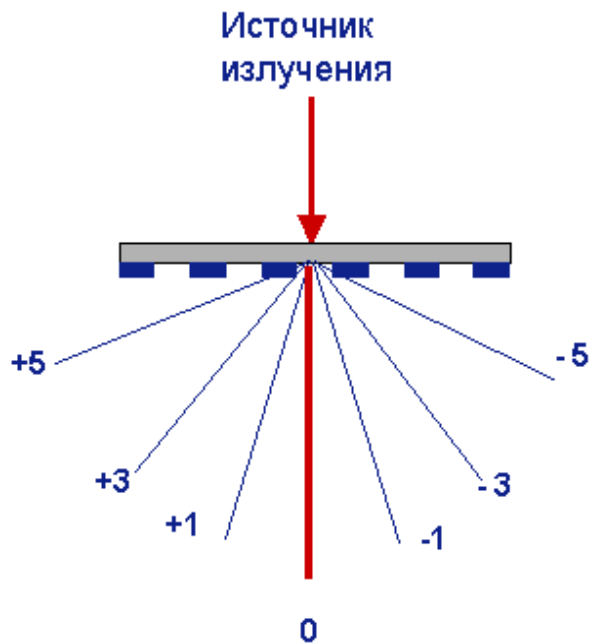
Ограничения проекционных систем

- дифракционный предел (в соответствии с критерием Релея)
- дифракция на линзе
- абберация линзы

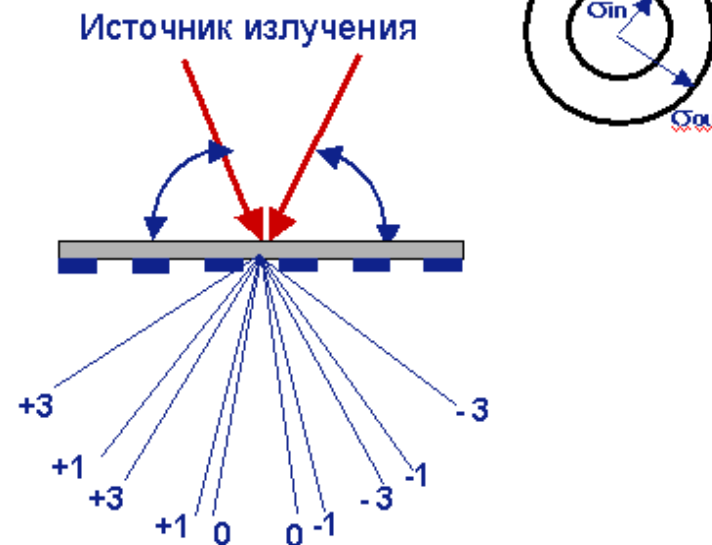


Дифракция оптических систем

- Обычное освещение



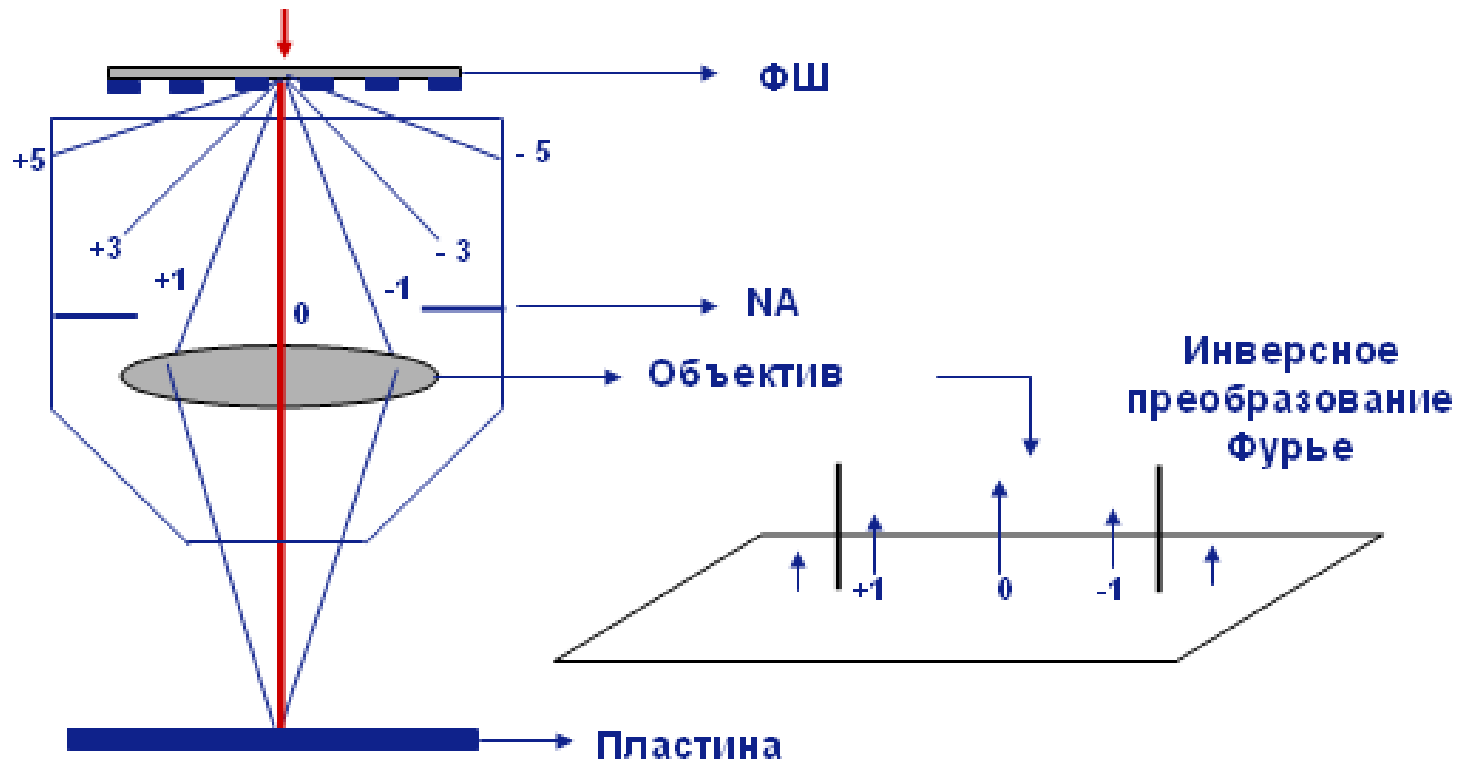
- Анулярное освещение (внеосевое)



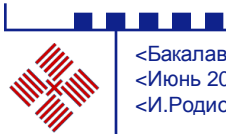
При прохождении излучения с длиной волны \approx топологическим размерам на ФШ наблюдается дифракция излучения на элементах рисунка, суммирование вторичных волн с образованием дифракционных минимумов и максимумов, т.е. излучение соответствующих дифракционных порядков.



Дифракция оптических систем



В результате инверсного преобразования Фурье на пластине мы получаем неоднородно засвеченный фоторезист.



Абберация оптических систем

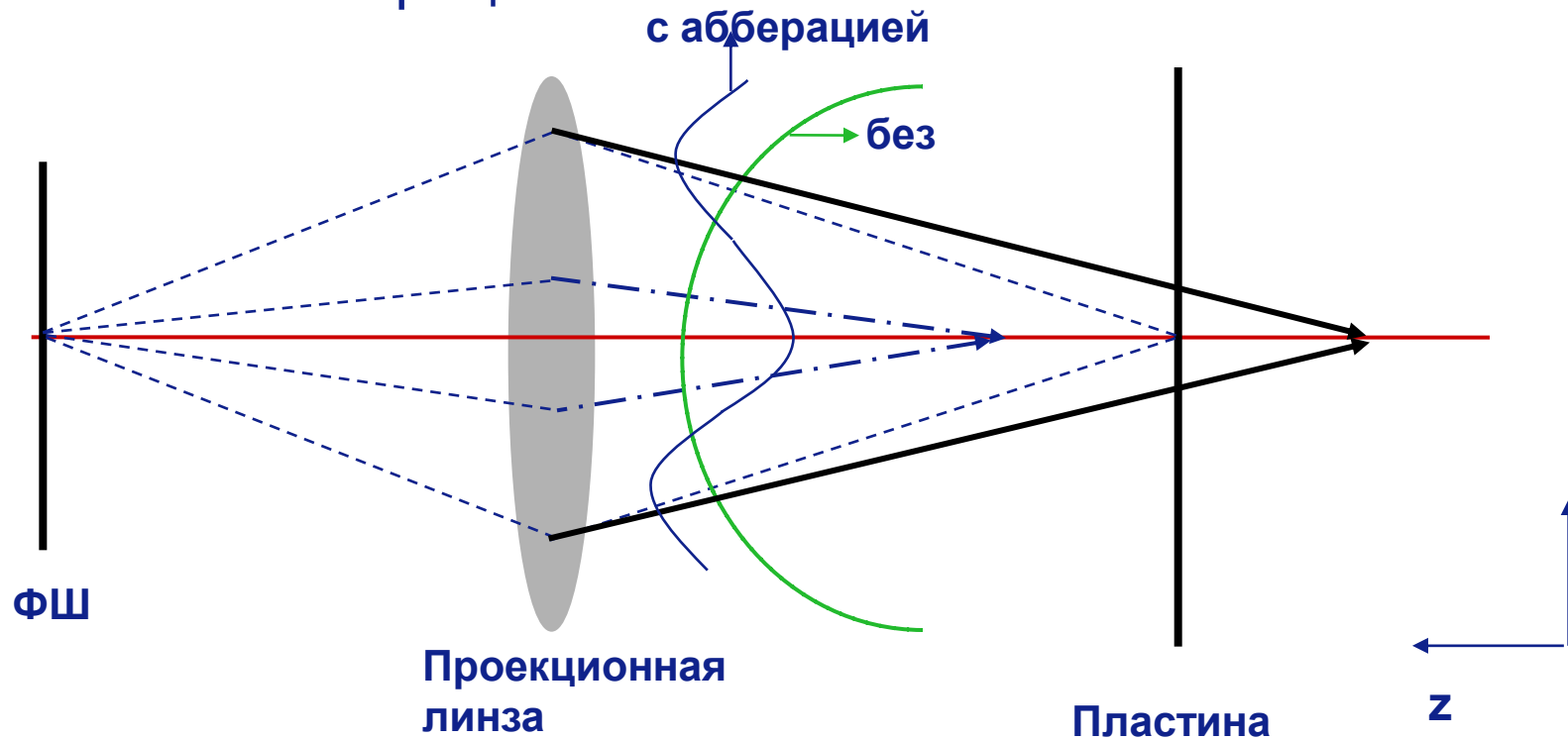
Виды абберации оптических систем:

- сферическая
- дисторсия
- кома
- астигматизм
- дефокусировка



Абберация оптических систем

Сферическая абберация



Сферическая абберация — один из типов aberrаций оптических систем; проявляется в несовпадении фокусов для лучей света, проходящих через осе-симметрическую оптическую систему (линзу, объектив) на разных расстояниях от оптической оси этой системы .



<Бакалаврская работа>

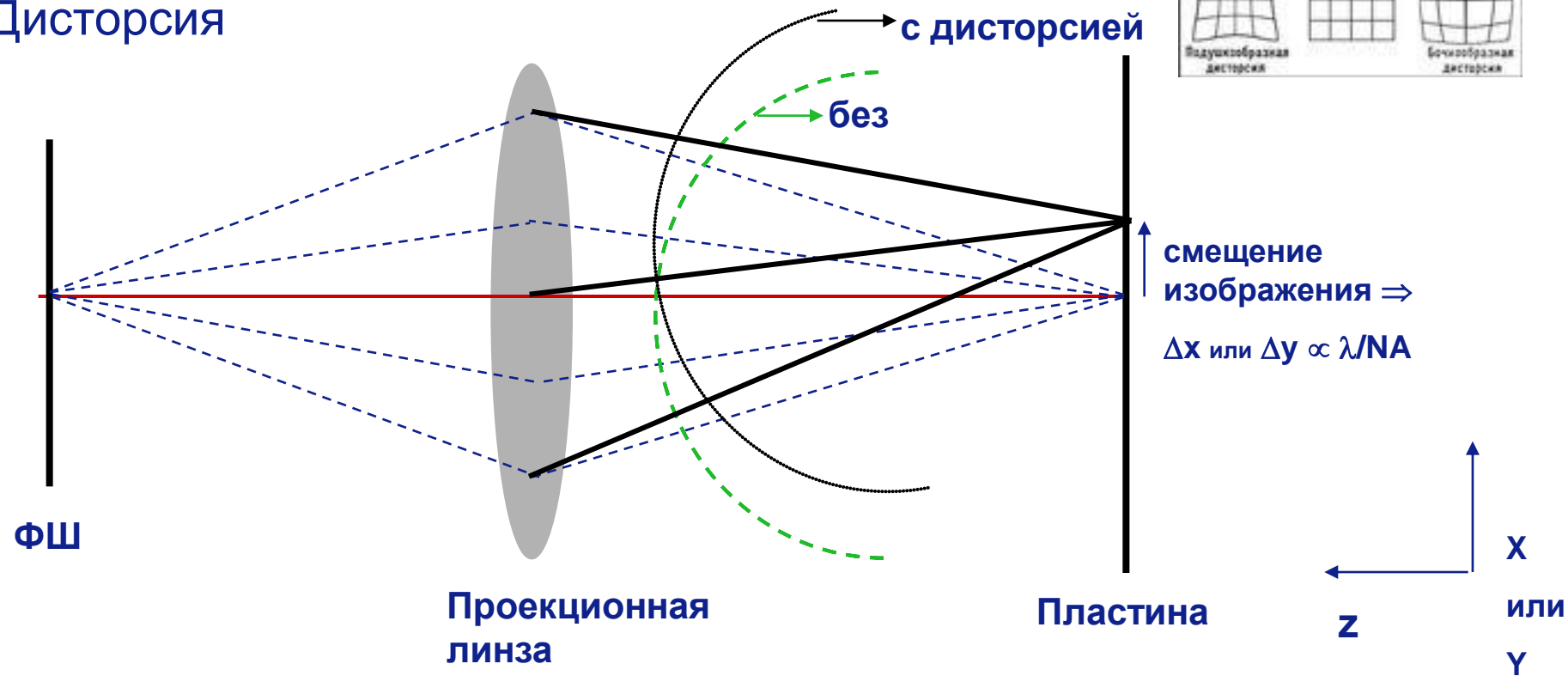
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Абберация оптических систем

Дисторсия

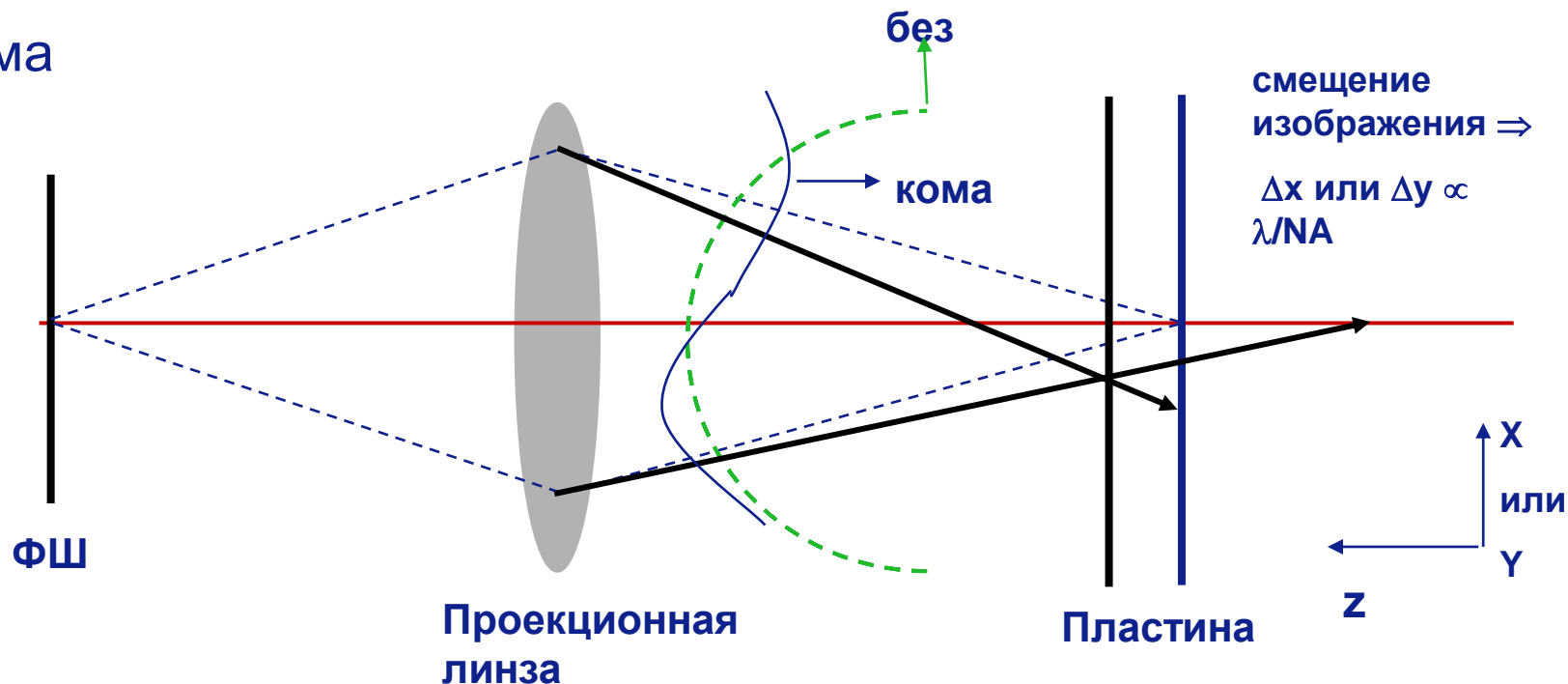


Дисторсия (от лат. *distorsio* — искривление) - погрешность изображения в оптических системах, при которой нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Д. возникает в результате того, что линейное увеличение разных частей изображения различно.



Абберация оптических систем

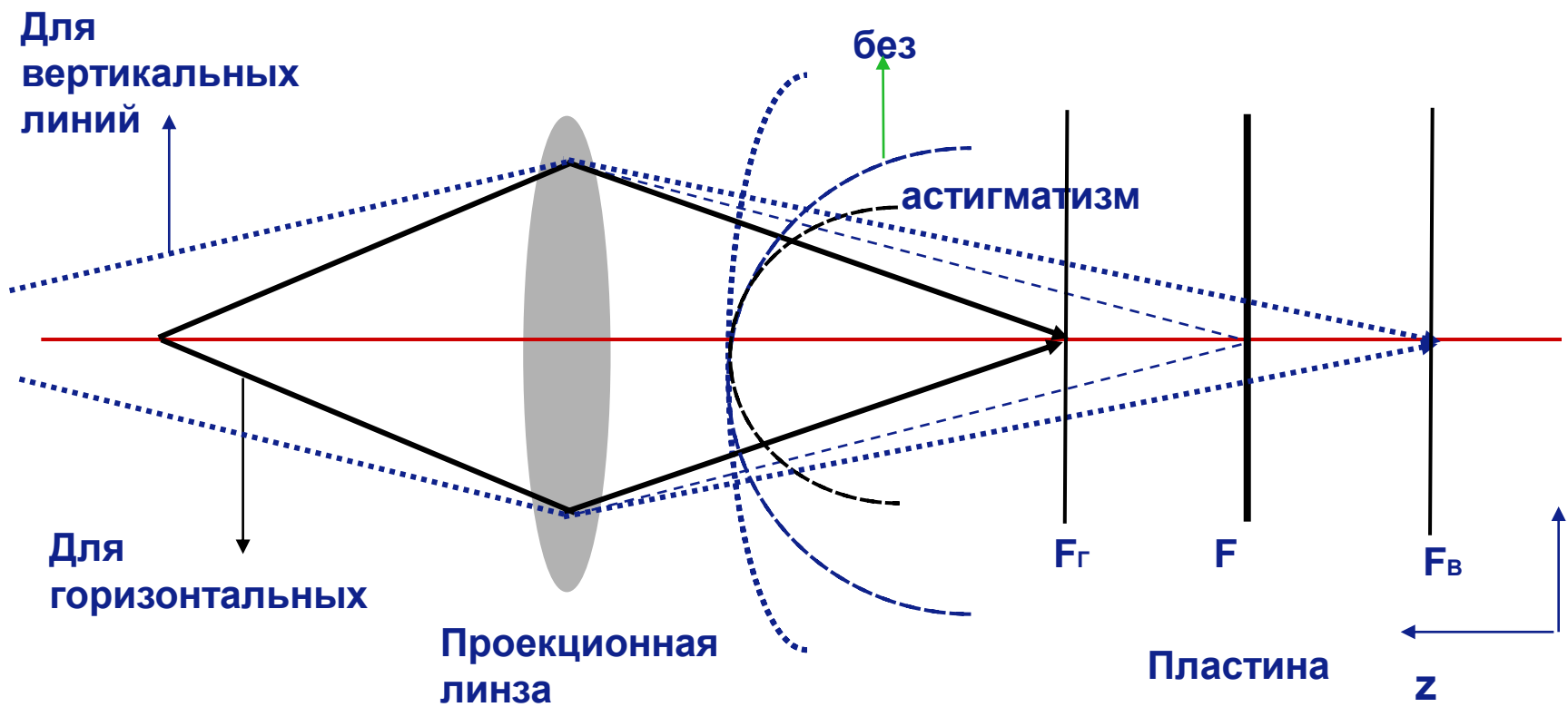
Кома



Кома (от греч. κόμη — волосы), заключается в том, что каждый участок оптической системы, удалённый от её оси на расстояние d (кольцевая зона), даёт изображение светящейся точки в виде кольца, радиус которого тем больше, чем больше d . Центры колец не совпадают, в результате чего их наложение, т. е. изображение точки, даваемое системой в целом, принимает вид несимметричного пятна рассеяния; его размеры пропорциональны квадрату апертуры системы и удалению точки-объекта от оси системы.



Абберация оптических систем

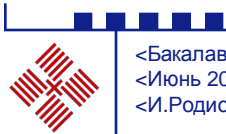
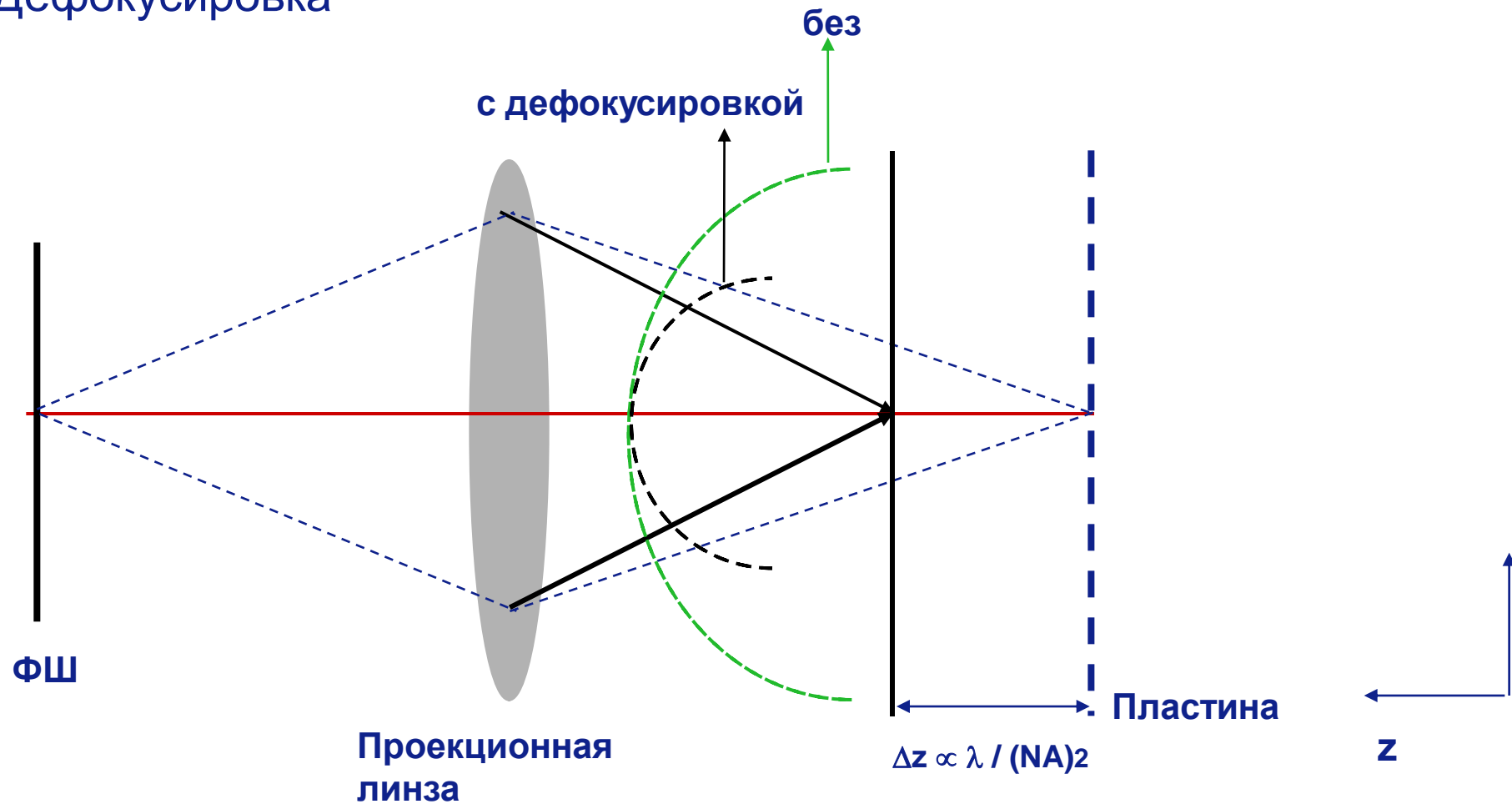


Астигматизм (от греч. а — отрицательная частица и stigme — точка), недостаток оптической системы, получающийся вследствие неодинаковой кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на неё светового пучка. Сферическая волновая поверхность после прохождения оптической системы деформируется и перестаёт быть сферической. Пучок лучей, исходящий из светящейся точки, после прохождения через оптическую систему собирается не в одной точке, а в двух взаимно перпендикулярных отрезках прямой линии, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.



Абберация оптических систем

Дефокусировка



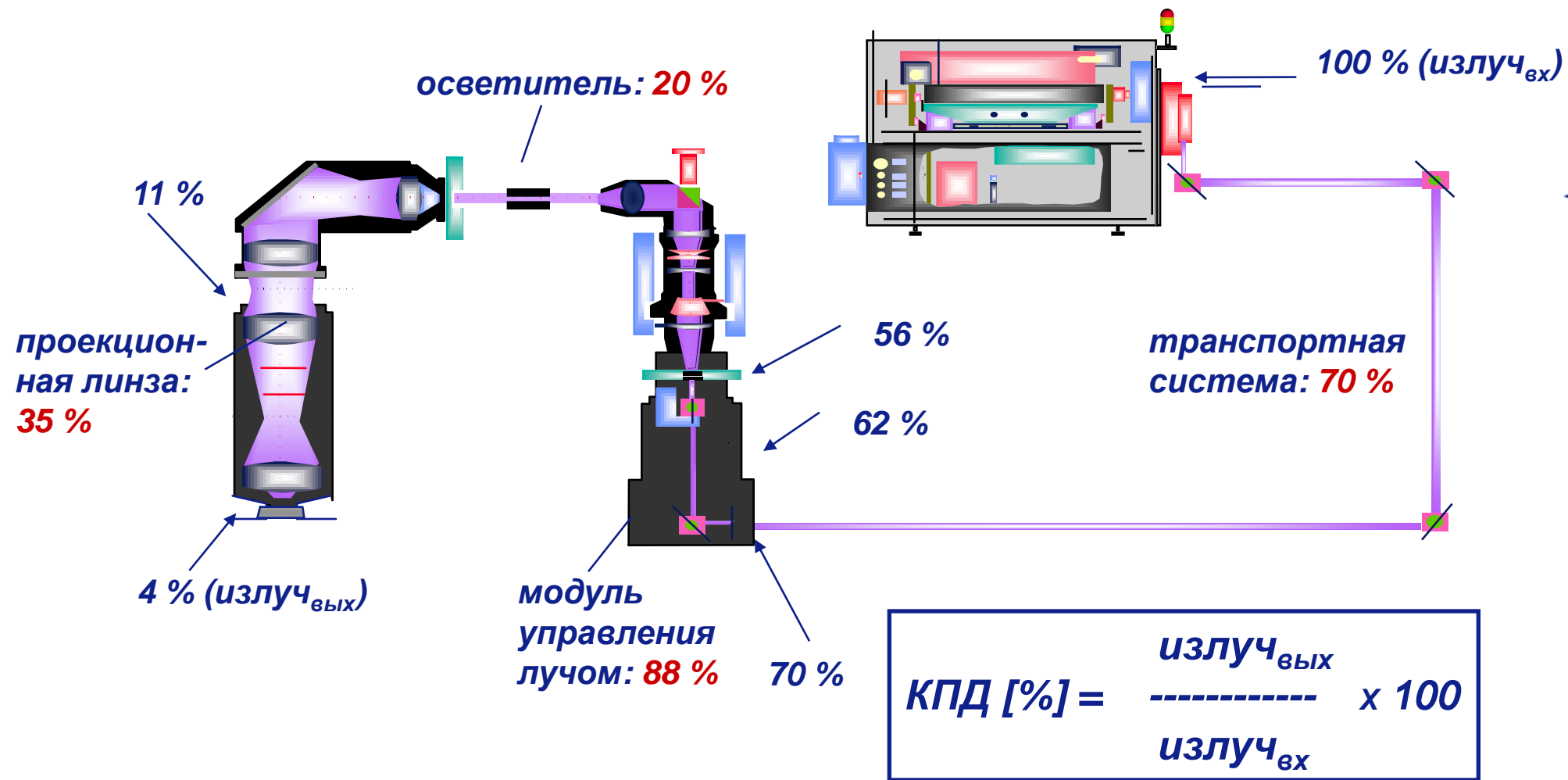
<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Осветительный и проекционный модули



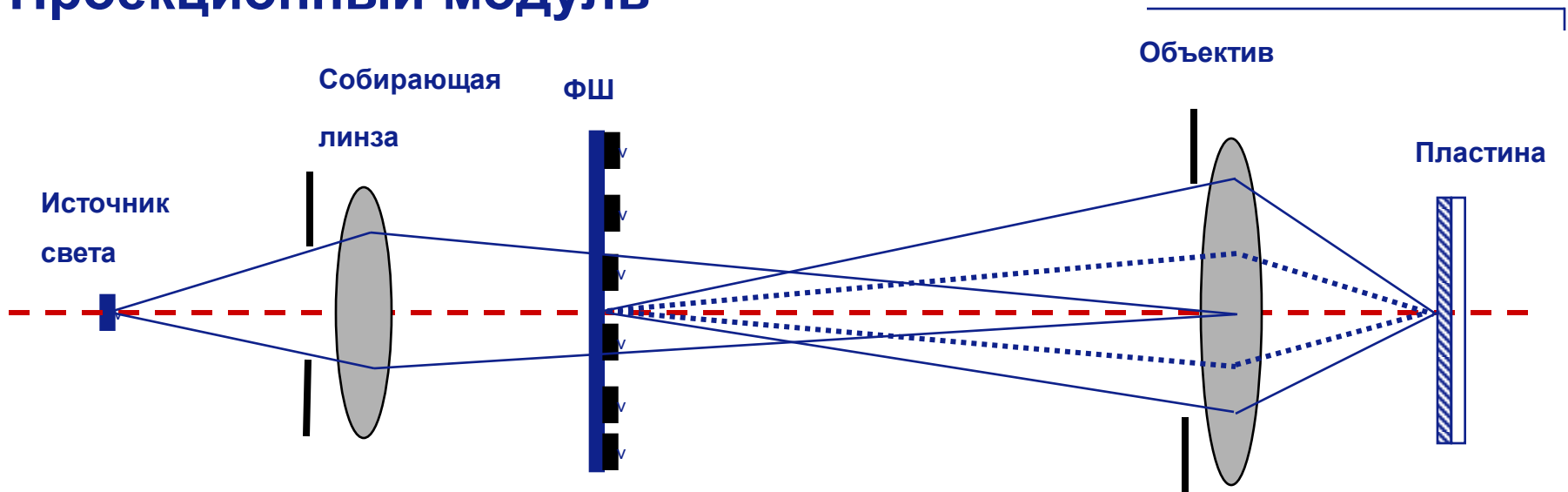
Осветительный и проекционный модули

При транспортировке луча от лазера до модуля управления лучом, излучение теряет на дифракцию, отражение, рассеянии и т.п. около 30% первоначальной энергии.

До оптической проекционной системы доходит лишь 11% мощности, излучаемой лазером, и это то при современных технологиях высокоточной (несколько нм) обработки линз, пластина, а значит и ФРМ засвечивается лишь 4% первоначальной мощности, отсюда вытекает еще один принцип современной фотолитографии - мало только получить излучение – нужно им эффективно распорядиться.



Проекционный модуль



Оптический объектив:

- широкополевым;
- широкоапертурным;
- $\lambda =$ чувствительности фоторезиста.

Зеркала объектива и зеркала маски:

- отклонениями от среднего квадратичного $\leq 0,1-0,3$ нм
- совершенство поверхности не хуже, чем $\lambda/20$, т.е. 0,5 нм.



Внеосевое освещение

Дифракционные порядки можно снизить, используя внеосевое освещение (**Off Axis Illumination, OAI**). Внеосевое освещение обеспечивает улучшение разрешающей способности без ухудшения глубины резкости изображения, но зависит от характера проецируемого изображения (т.е. плотности и ориентации топологии), что ограничивает спектр применения этого метода.

Обычная система освещения использует источники света с равномерным распределением интенсивности света по круговому полю, что вызывает ограничения по глубине фокуса из-за фазовых расхождений, для различных оптических путей. Внеосевое освещение может расширить диапазон глубины резкости и улучшить разрешение. Одним из методов внеосевого освещения является анулярное (круговое) освещение. Анулярное освещение уменьшает фазовое расхождение падающего света.

Но этот метод освещения эффективен только для плотно расположенных линий и зазоров.



Автоматизация литографии

Для обеспечения корректной работы степпера, в добавление к изображению раскладки устройства, фотошаблон должен содержать следующие служебные знаки:

- штрих-код для идентификации шаблона;
- образы для предварительного совмещения шаблона на шаблонном столике;
- знаки совмещения шаблона для совмещения шаблона и пластины;
- HRC.



Система совмещения

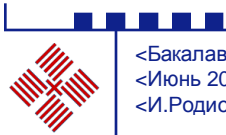
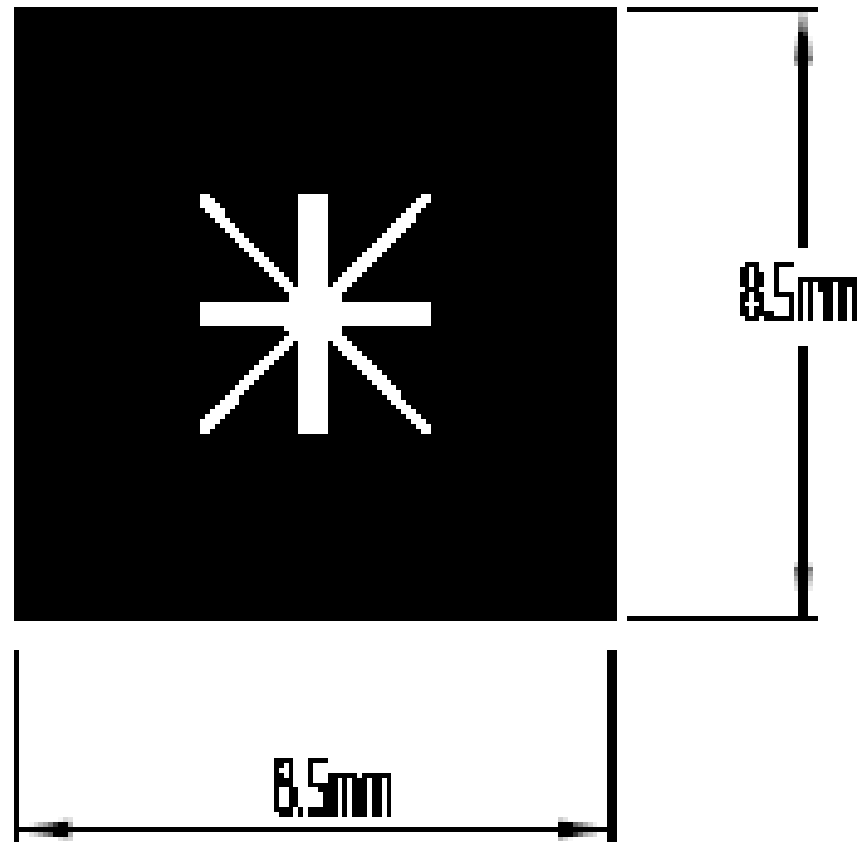
Система совмещения степпера PAS 5500/250 имеет область захвата ± 44 мкм в X и Y направлениях. Перед тем как может быть предпринята попытка совмещения, пластина должна быть позиционирована с соответствующей точностью. Предварительное совмещение производится на столике предварительного совмещения.

После предварительного совмещения дипод переносит пластину со столика предварительного совмещения на столик экспонирования для подготовки к заключительному совмещению.



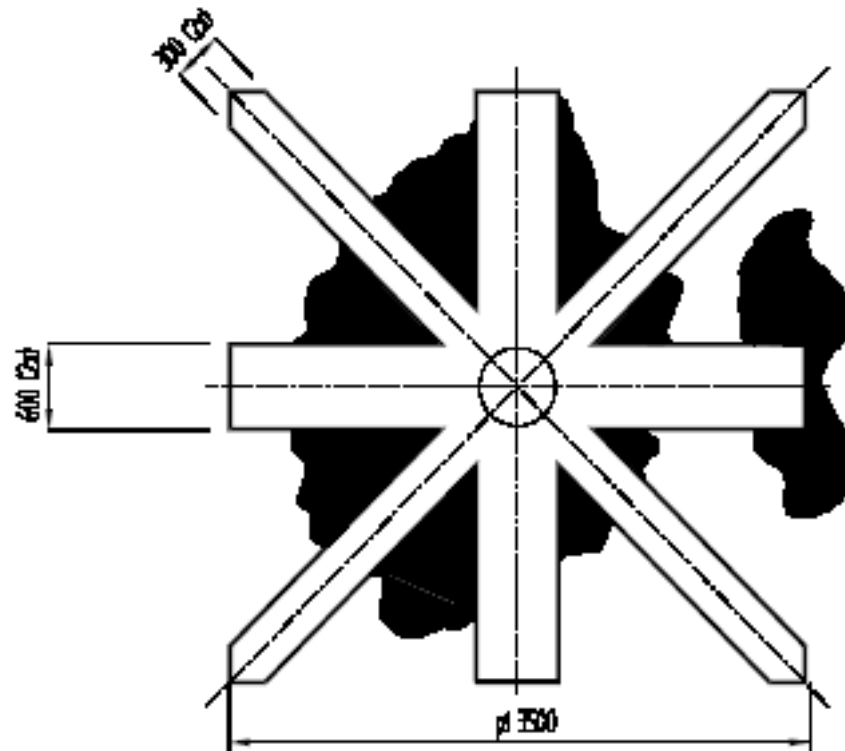
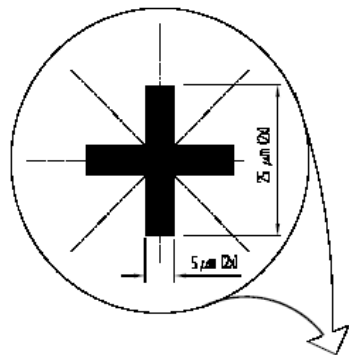
Система совмещения

Знаки предварительного совмещения



Система совмещения

Знаки предварительного совмещения



<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Система совмещения

Сдвоенная система совмещения

- Лазер системы совмещения (гелий-неоновый лазер класса 3b мощностью 10 мВт) генерирует линейно поляризованный красный луч с длиной волны 632.8 нм, который может быть направлен на пластину без опасности ее экспонирования (т.к. фоторезист на пластине чувствителен только к УФ свету).
- Фотошаблон имеет два знака первичного совмещения (M1 и M2), а каждая пластина имеет как минимум два первичных знака (W1 и W2). Расстояние между знаками M1 и M2 на фотошаблоне зависит от проекционных линз и, для системы PAS5500/250, составляет 139 мм.



Система совмещения

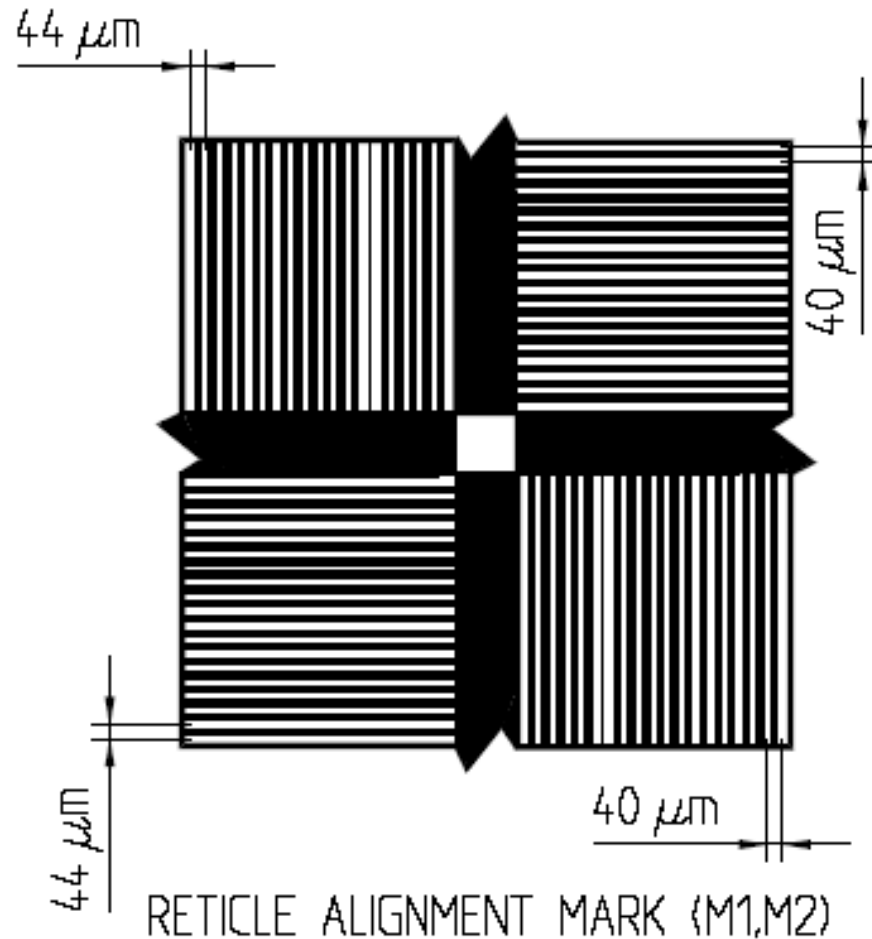
Сдвоенная система совмещения

- Лазерный луч проходит в верхней части осветителя, где делится на два параллельных оптических луча. Только один из этих лучей используется в каждый момент времени, это достигается путем перемещения координатного стола таким образом, что один из знаков совмещения пластины ($W1$ или $W2$) позиционируется под одним из знаков $M1$ или $M2$.
- Поочередное совмещение двух знаков шаблона с одним знаком пластины используется для измерения высоты шаблона, которое обеспечивает корректное вычисление кратности проекционных линз и любые необходимые поворот шаблона и его трансляцию. Второе совмещение по другому знаку пластины позволяет вычислить поворот пластины, ее трансляцию и расширение.



Система совмещения

Знаки первичного совмещения на ФШ (M1 и M2)



<Бакалаврская работа>

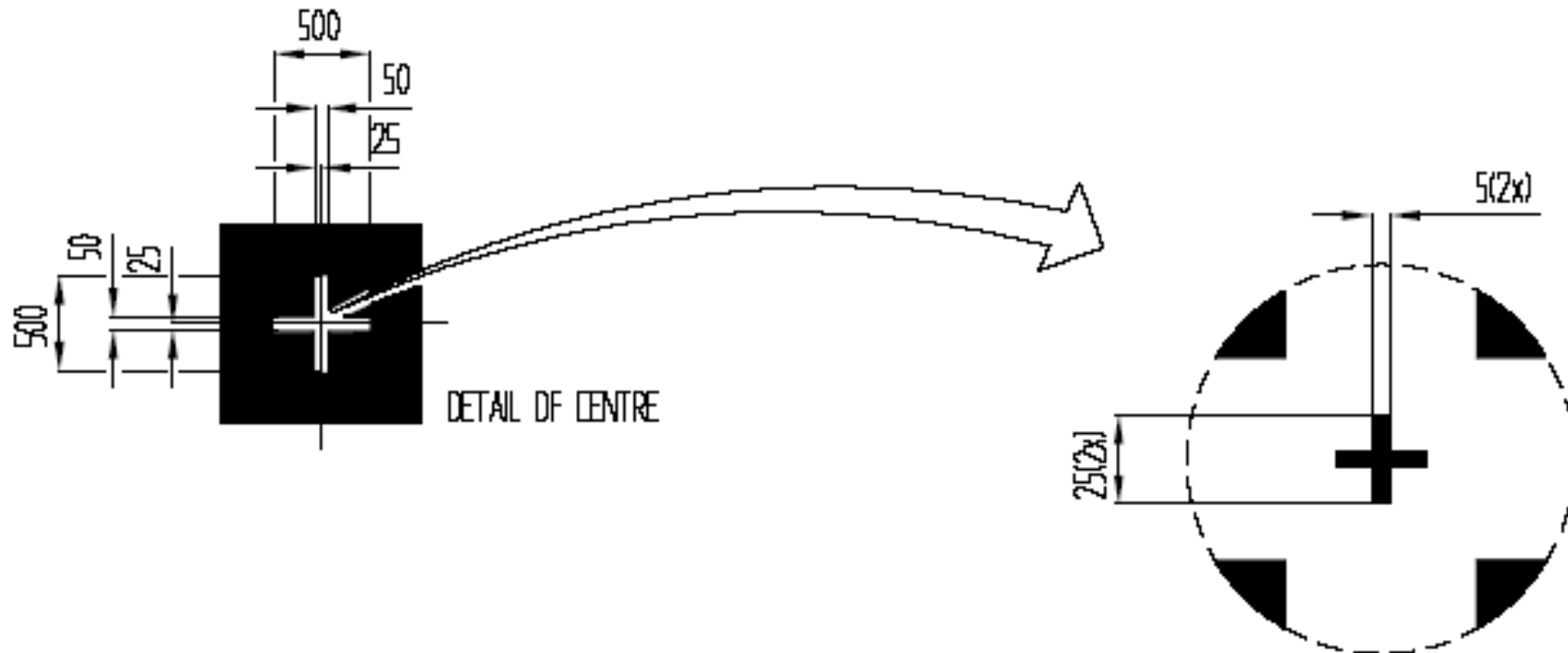
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Система совмещения

Знаки первичного совмещения на ФШ (M1 и M2)



<Бакалаврская работа>

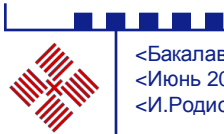
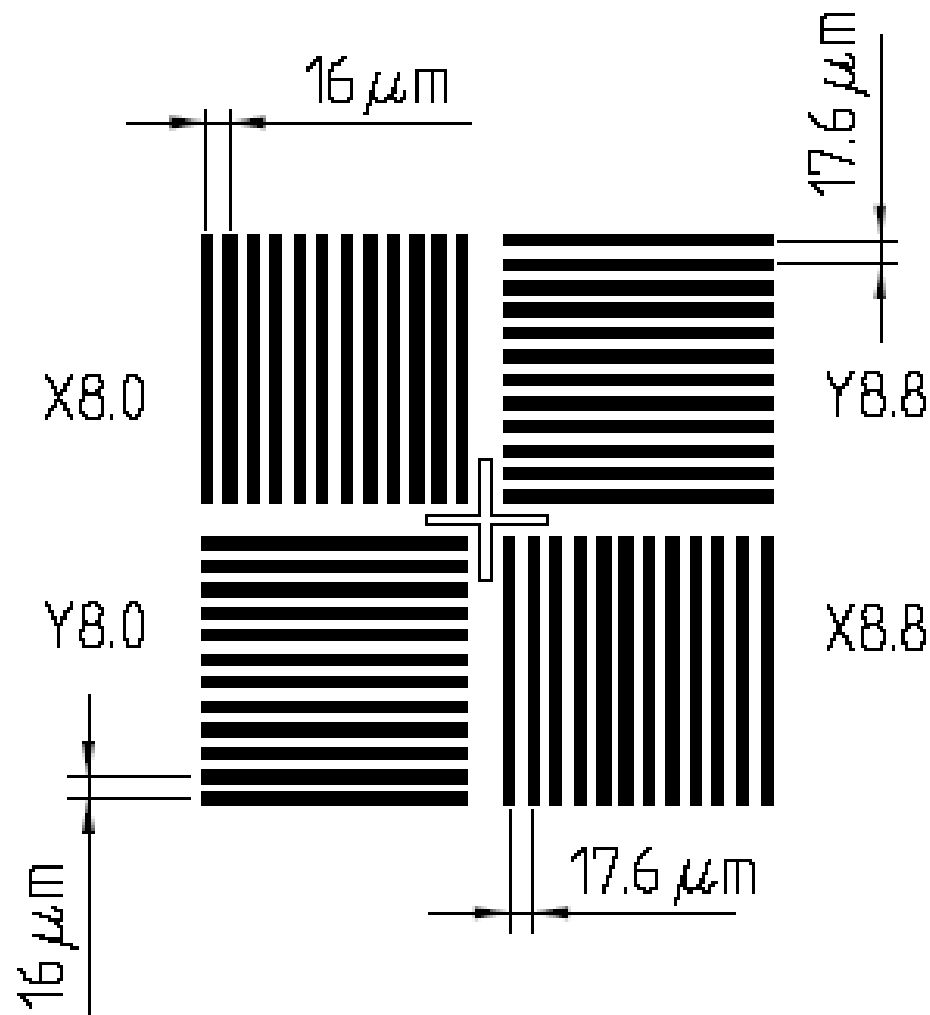
<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Система совмещения

Знаки первичного совмещения на пластине (W1 и W2)



<Бакалаврская работа>

<Июнь 2006>

<И.Родионов> / <Проблемы проекционной фотолитографии i-line диапазона при получении СБИС с субмикронными размерами элементов>

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Система совмещения

Обработка сигнала детектора

Координатный стол начинает сканирование с перемещения экспозиционного столика (и пластины) в ожидаемое для совмещения положение. Во время сканирования экспозиционный столик сначала перемещается в направлении $XY=$ (в обе стороны) с постоянной скоростью. Затем система предпринимает $X+$ и $Y+$ положительное сканирование. Возможные типы сканирования для степпера PAS 5500/250 представлены в таблице:

Тип сканир-я	Ось сканир-я	Направление сканирования	Тип сканир-я	Ось сканир-я	Направление сканирования
$X+$	X	Положительное	$XY+$	Сначала X потом Y	Положительное
$X-$	X	Отрицательное	$XY-$	Сначала X потом Y	Отрицательное
$X=$	X	Двунаправлено	$XY=$	Сначала X потом Y	Двунаправлено
$Y+$	Y	Положительное	D+	По диагонали	Положительное
$Y-$	Y	Отрицательное	D-	По диагонали	Отрицательное
$Y=$	Y	Двунаправлено	D=	По диагонали	Двунаправлено



Система совмещения

Обработка сигнала детектора

Для совмещения ФШ и пластины используются по две решетки для оси X и оси Y. Одна решетка имеет номинальный период, а другая на 10% шире. Во время сканирования обе, 8 мкм и 8.8 мкм, X решетки генерируют синусоидальный ток в соответствующем элементе детектора (то же действие позже выполняется и для 8 мкм и 8.8 мкм Y решеток). Эти токи преобразуются в напряжения, затем перемножаются и оцифровываются.

Во время сканирования, каждая фазовая решетка генерирует полную синусоидальную волну. Поскольку шаг двух решеток различен, то эти синусоидальные волны будут совпадать только на каждые 88 мкм перемещения маркера пластины. Если пластина смещается на 8 мкм n раз от корректного положения, то 16 мкм решетка покажет нулевую ошибку, однако 17.6 мкм решетка покажет ошибку $8 \times (n/10)$ мкм. Общая длина сканирования 100 мкм, поэтому одновременный максимум синусоидальных волн произойдет только в одной точке сканирования. Эта точка соответствует положению, в котором пластина и шаблон совмещены по оси X.

Данная система дает точность совмещения ± 40 нм.



Система совмещения

Обработка сигнала детектора

Ошибка 40 нм! Из-за чего?

На практике будет существовать некоторый угол поворота (или трансляции) между пластиной и шаблоном, так что максимумы никогда не возникнут точно в одной точке!

Расстояние между максимумами называется сдвигом между 8.8 мкм и 8 мкм. Для вычисления лучшего положения совмещения, компьютер сравнивает сигнал от 8 мкм решетки с сигналом от 8.8 мкм решетки, для учета этого сдвига в расчете. Положение, в котором сигнал от 8 мкм решетки наиболее близок к точке, где сигналы от 8 мкм и 8.8 мкм совпадают, выбирается в качестве положения наилучшего совмещения. Когда сканирование по оси X завершается, система выполняет сканирование по оси Y таким же образом, как и для оси X.

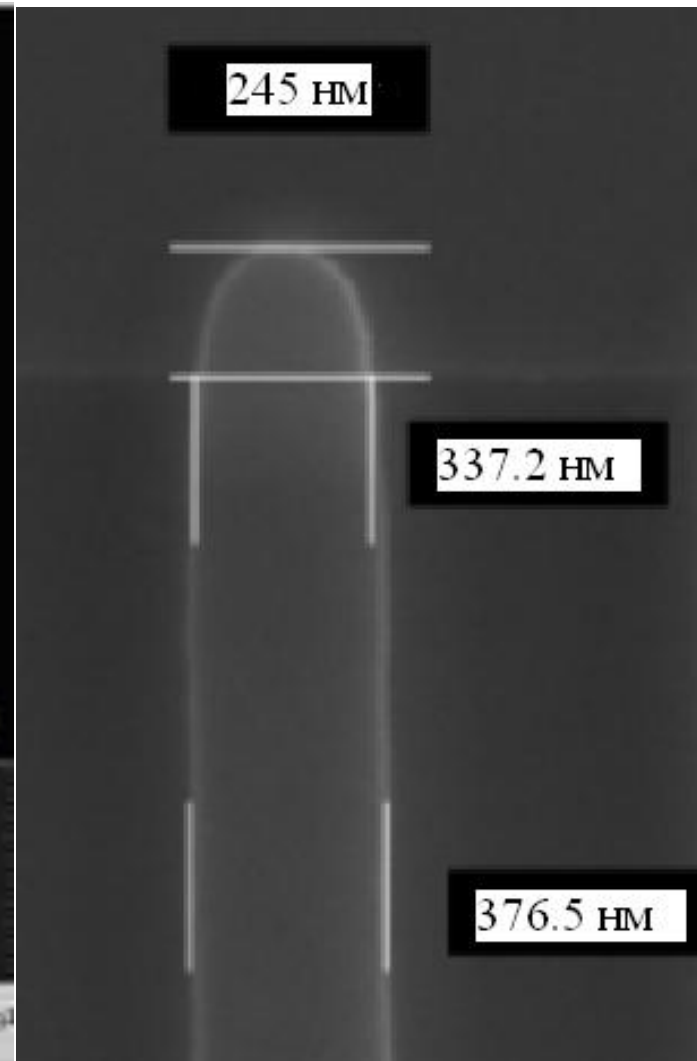
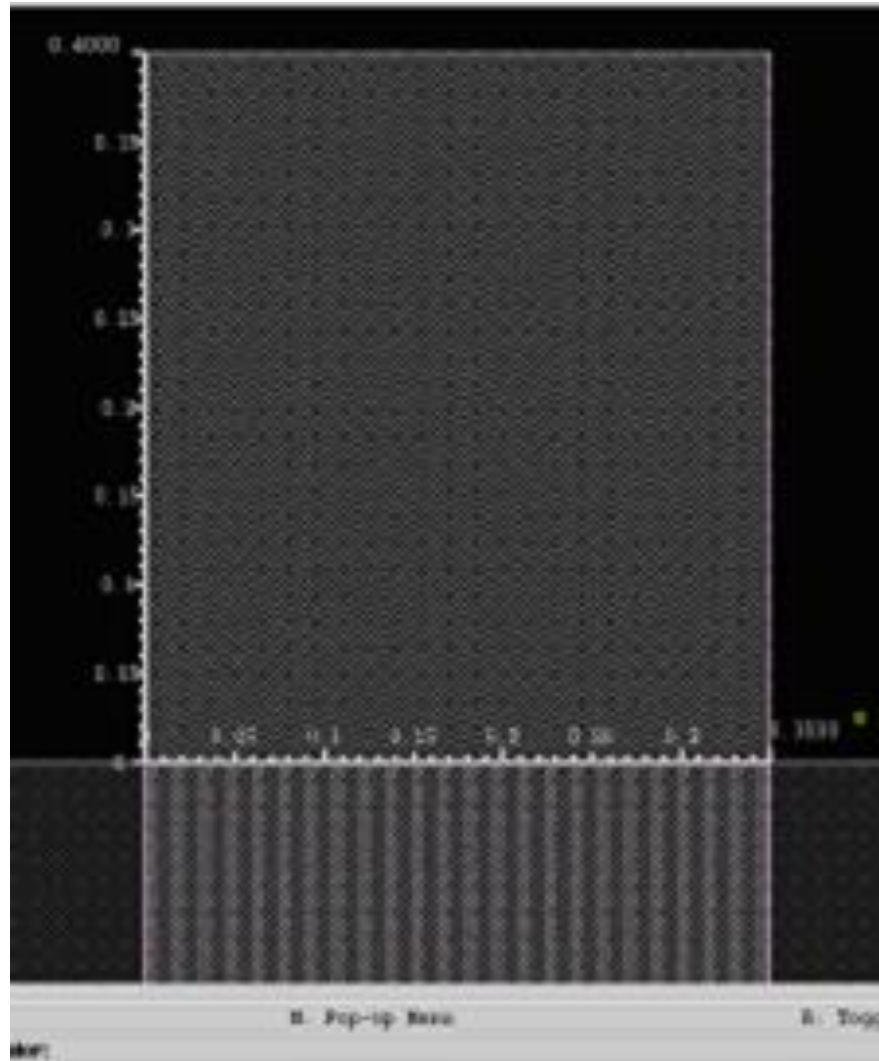


Методы повышения разрешения литографии

- использование внеосевого освещения ФШ, получаемого с помощью диафрагм, вырезающих из осевого цилиндрического пучка излучение вне осевых трубчатых (кольцевых в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков;
- коррекции эффектов оптической близости элементов топологического рисунка на ФШ с помощью дополнительных служебных элементов (ОРС), повышающих точность передачи рисунка на ФРМ;
- применения фазосдвигающих ФШ, позволяющих изменять фазу излучения так, чтобы повысить его разрешение на ФР слое;
- нанесения поверх ФР слоя пленок контрастоусиливающего материала;
- использования формируемой под ФР слоем пленки антиотражающего покрытия (BARC), позволяющей уменьшить влияние отраженного от подложки излучения на точность передачи топологического рисунка;
- иммерсия.



OPC



OPC

