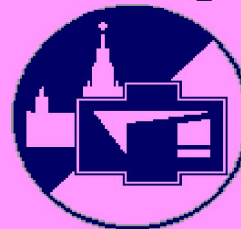




**Московский Государственный Университет
имени М.В.Ломоносова
Физический факультет**



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПРОЕКЦИОННОЙ
ФОТОЛИТОГРАФИИ**

**к.ф.-м.н., н.с. Ю. В. РЫЖИКОВА
(кафедра оптики и спектроскопии)**

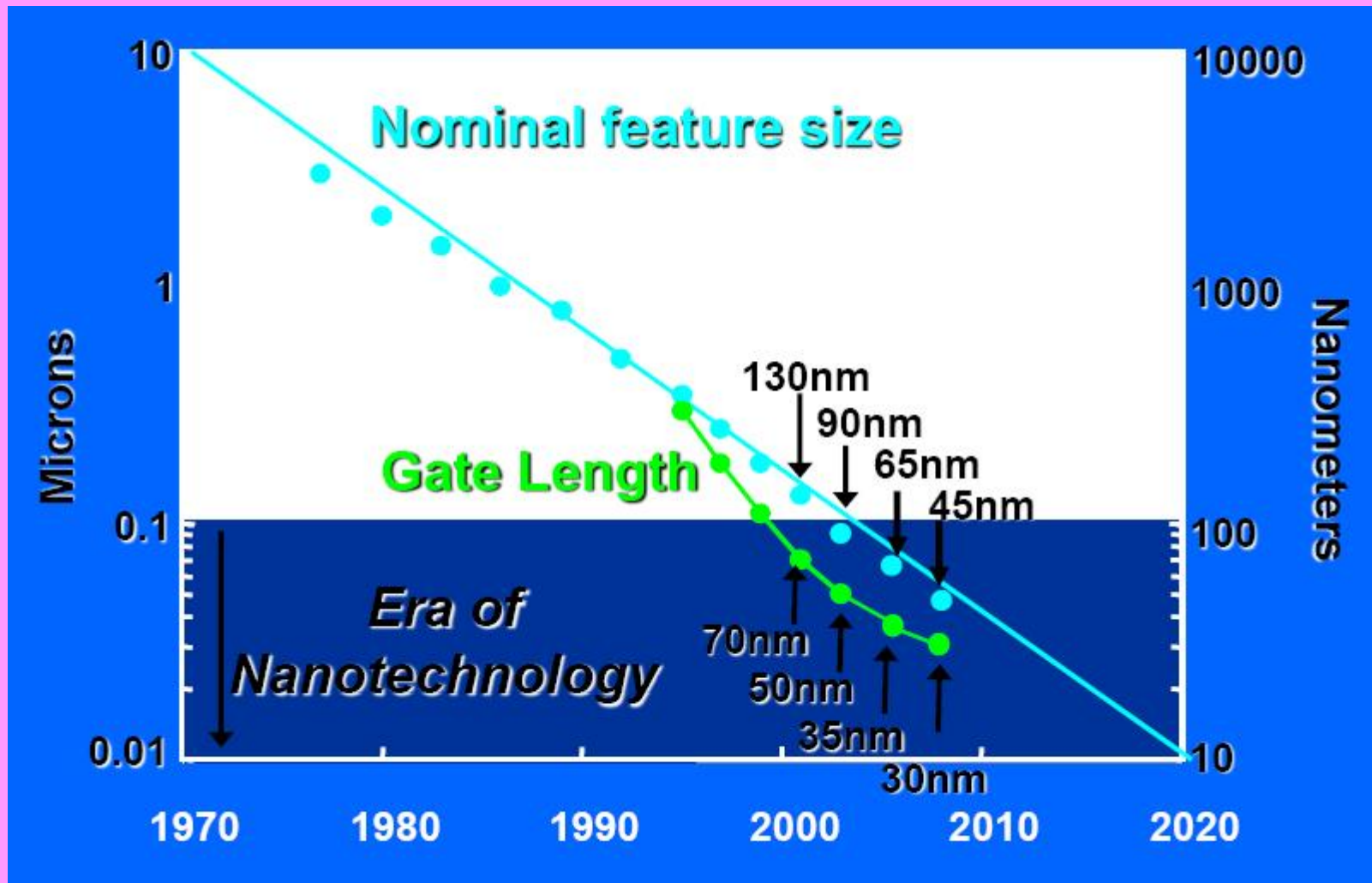
**к.ф.-м.н., доцент Г. В. БЕЛОКОПЫТОВ
(кафедра физики колебаний)**

2013

Содержание

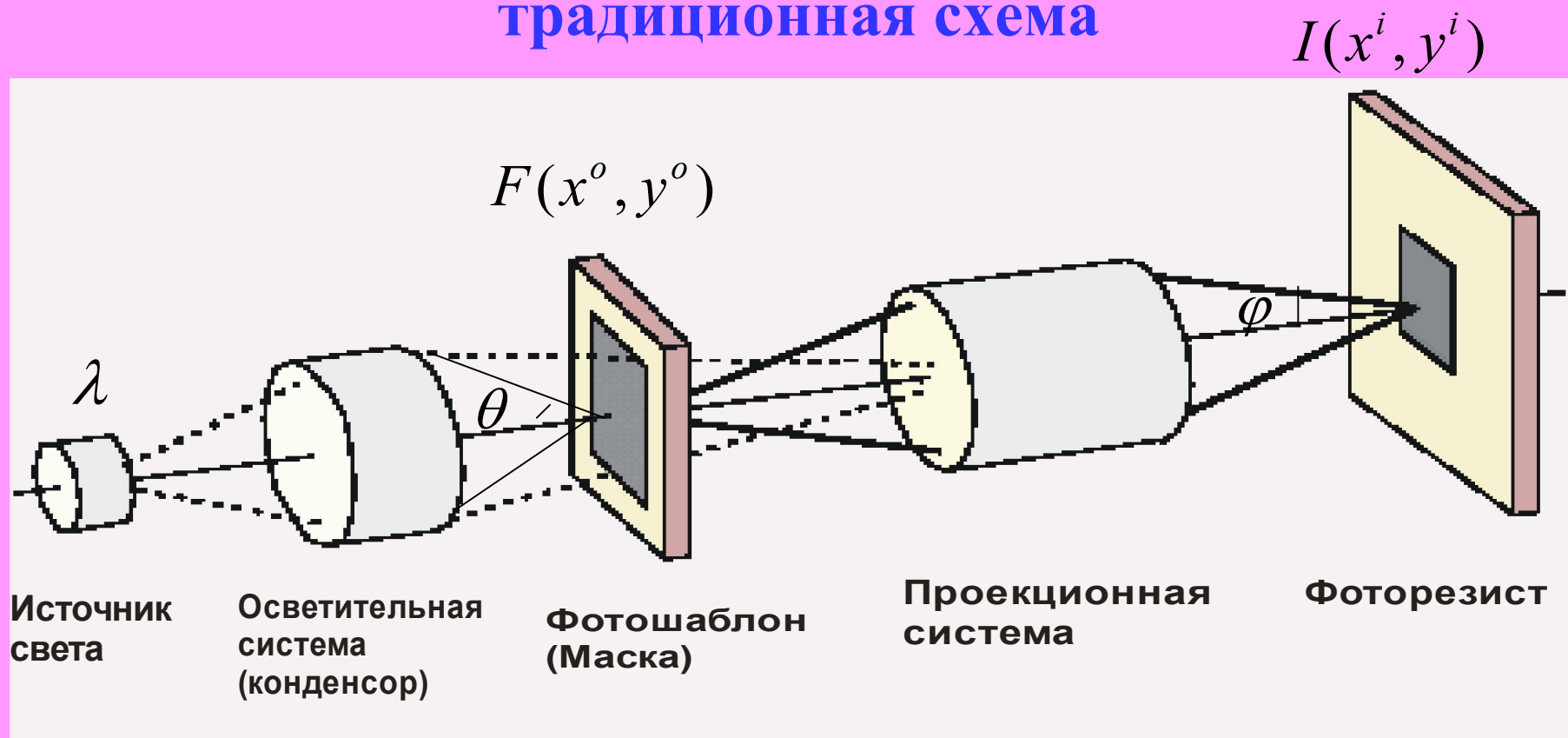
- **Традиционная схема проекционной фотолитографии**
- **Моделирование формирования изображения по традиционной схеме**
- **Проблемы производства масок**
- **Базовая схема литографии без масок**
- **Альтернативные системы**
- **Проблемы моделирования и синтеза в литографии без масок**

Динамика уменьшения размеров топологических элементов ИС



Source: Intel, 2010 <http://nano.msu.ru/files/conferences/school-2010-04/SuetinNV.pdf>

Схема фотолитографической установки: традиционная схема



Домненко В. М. // Опт. журнал. 1998. Т. 65.(1). С. 58-63.

Параметр когерентности

$$\sigma = \sin \theta$$

Числовая апертура

$$NA = \sin \phi$$

Моделирование формирования изображения: основные формулы скалярной модели

Спектр функции когерентного импульсного отклика:

$$S_K(\nu_x, \nu_y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \nu_x^2 + \nu_y^2 \leq \nu_{\max}^2 \\ 0, & \text{если } \nu_x^2 + \nu_y^2 > \nu_{\max}^2 \end{cases}, \text{ где}$$

$\nu_{\max} = NA/\lambda$; (ν_x, ν_y) – компоненты пространственных частот, прошедших через проекционную оптическую систему.

Спектр функции взаимной интенсивности:

$$S_B(\nu'_x, \nu'_y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \nu'^2_x + \nu'^2_y \leq (\nu_{\max} \sigma)^2 \\ 0, & \text{если } \nu'^2_x + \nu'^2_y > (\nu_{\max} \sigma)^2 \end{cases}$$

$\sigma = \sin \theta$
параметр когерентности

(ν'_x, ν'_y) – компоненты пространственных частот плоской волны, падающей на маску в объектной плоскости

Интенсивность света в плоскости изображения:

$$I(x^i, y^i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_B(\nu'_x, \nu'_y) |\mathbf{F}^{-1} \{ S_F(\nu_x - \nu'_x, \nu_y - \nu'_y) \cdot S_K(\nu_x, \nu_y) \}|^2 d\nu'_x d\nu'_y$$

($\mathbf{F}$ - Фурье преобразование)

S_F - спектр функции пропускания маски

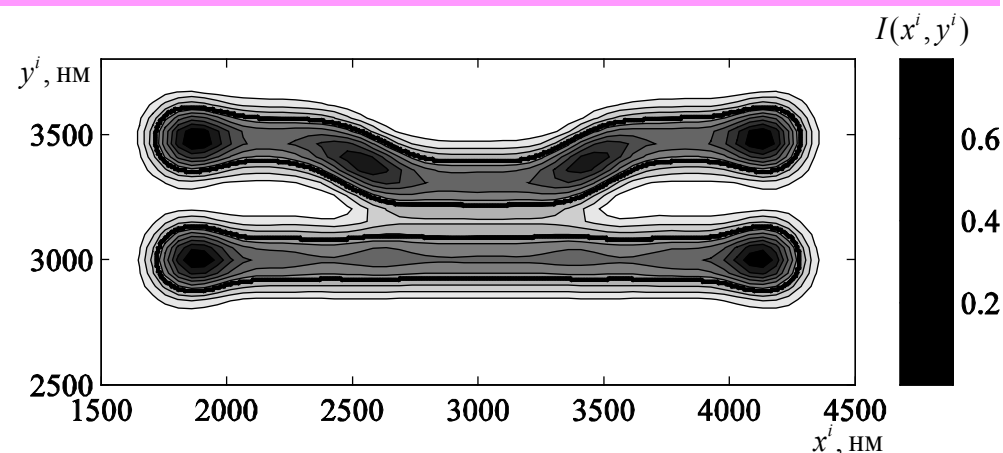
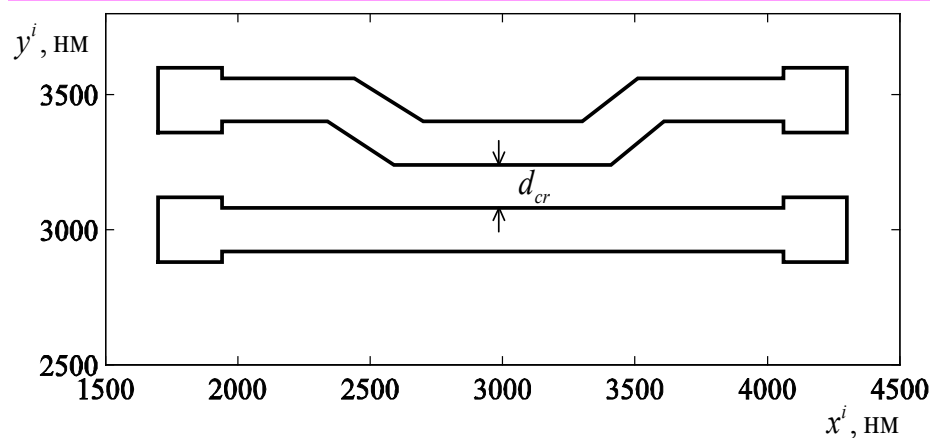
Моделирование формирования изображения: основные формулы скалярной модели

$$S_F(v_x, v_y) = \frac{e^{i\varphi}}{8\pi^2 v_x v_y} \sum_{n=1}^N e^{-2\pi i(v_x x_n + v_y y_n)} (f_n - f_{n+1}),$$

где $f_n = (v_x - k_n v_y)/(v_x + k_n v_y)$, $f_{N+1} = f_1$, $k_n = (y_n - y_{n-1})/(x_n - x_{n-1})$

Спектр функции пропускания прямоугольника:

$$S_F^{\square} = -\frac{e^{i\varphi}}{(2\pi)^2 v_x v_y} \{e^{-2\pi i(v_x x_1 + v_y y_1)} - e^{-2\pi i(v_x x_2 + v_y y_1)} + e^{-2\pi i(v_x x_2 + v_y y_2)} - e^{-2\pi i(v_x x_1 + v_y y_2)}\}$$

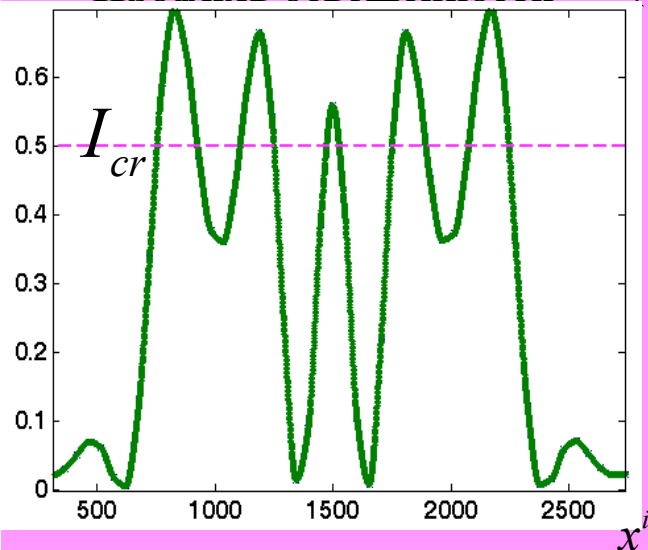


Белокопытов Г.В., Рыжикова Ю.В. // Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика. Астрон. 2009. №2. С. 41-43.

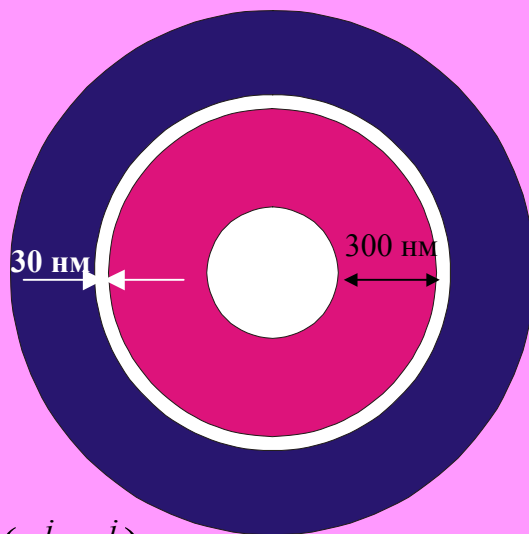
Формирование оптического изображения

- Бинарная маска

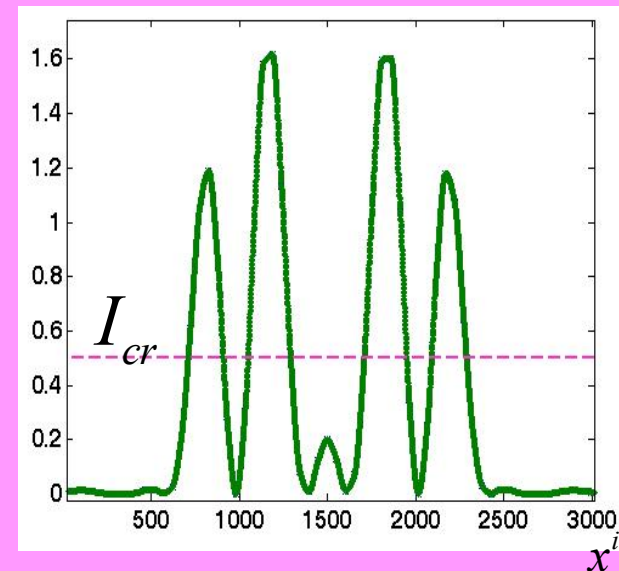
- Профиль освещённости $I(x^i)$



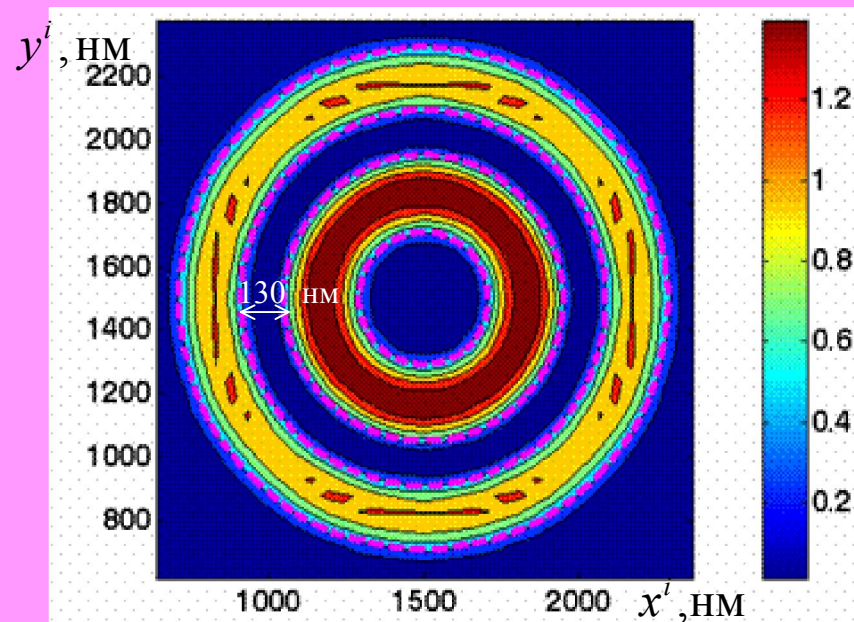
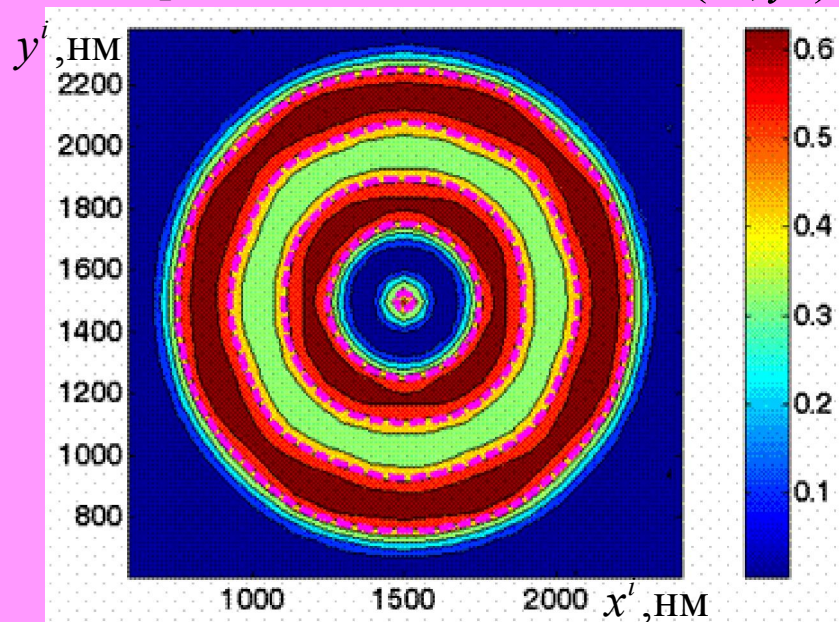
Геометрия маски



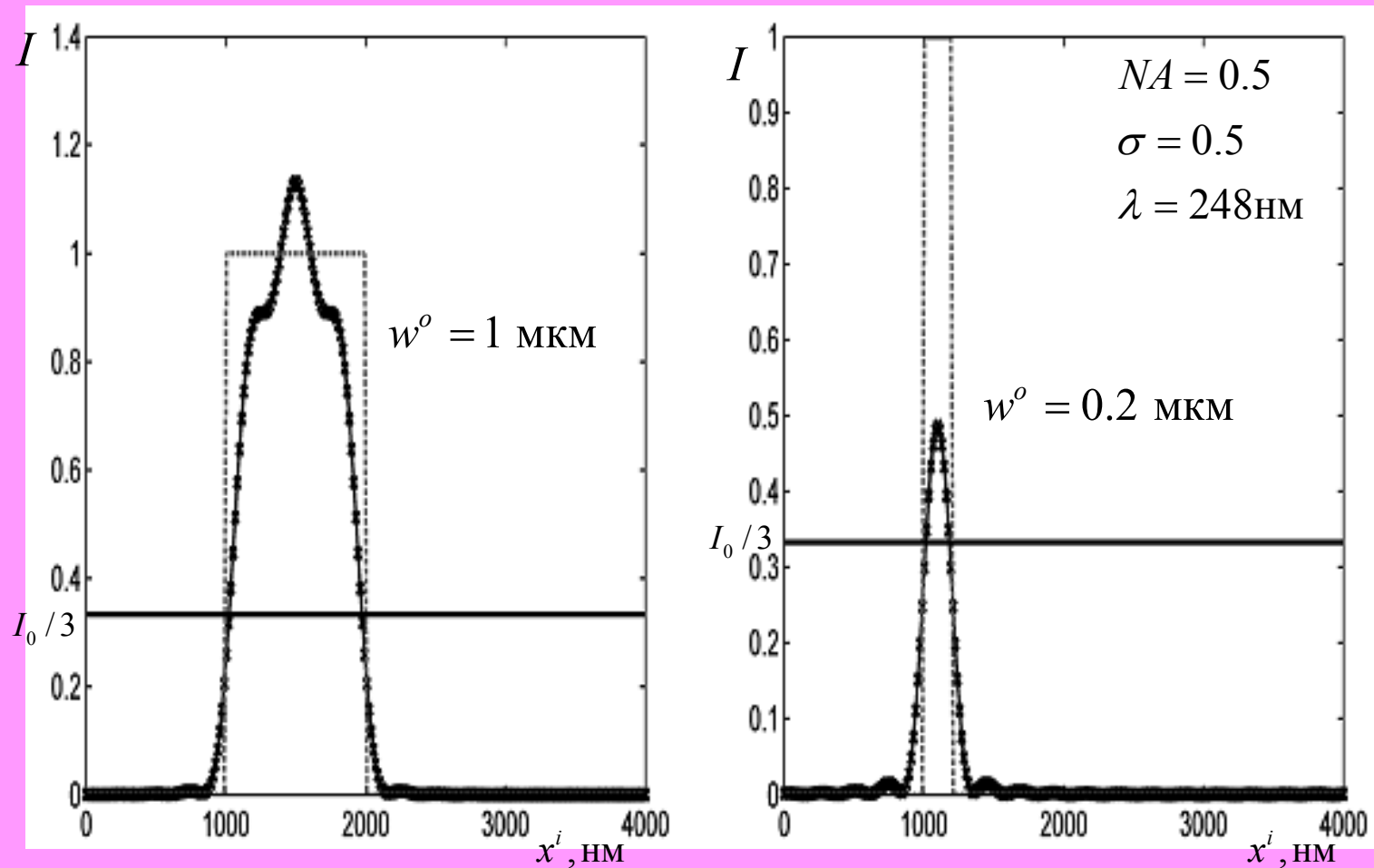
- Фазовая маска



- Распределение интенсивности $I(x^i, y^i)$



Оценка критических размеров изображения



I_0 — интенсивность света в плоскости изображения в отсутствие маски.

Оценка критических размеров изображения

Критерий воспроизводимости изображения:

$$\left| \delta w^i \right| = \left| \frac{\Delta w^{\pm}}{w^i} \right| \leq 0.1$$

где w^i – размер элемента в плоскости изображения, определенный по пороговому уровню интенсивности,

$$\Delta w^{\pm} = w^i(I_0 \pm 10\%) - w^i(I_0)$$

I_0 – интенсивность света в плоскости изображения в отсутствие маски.

Белокопытов Г.В., Рыжикова Ю.В. Сравнение характеристик изображения в проекционной фотолитографии. // Известия РАН. Серия физическая. 2008. т. 72. №1. С. 88-91.

Оценка критических размеров изображения (простейших контурных элементов на фотошаблоне)

Элемент контурного рисунка	Измеряемый параметр	Критические размеры, нм	
		В области изображения	В области маски
Квадрат	сторона	190	235
Полоска	ширина	163	166
Пара полосок	расстояние между полосками	160	167
Пара полосок с фазами 0 и $\pm 2\pi/3$		115	108

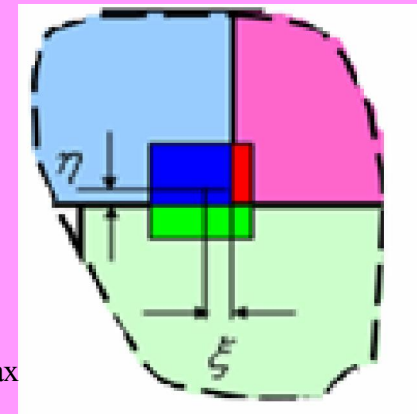
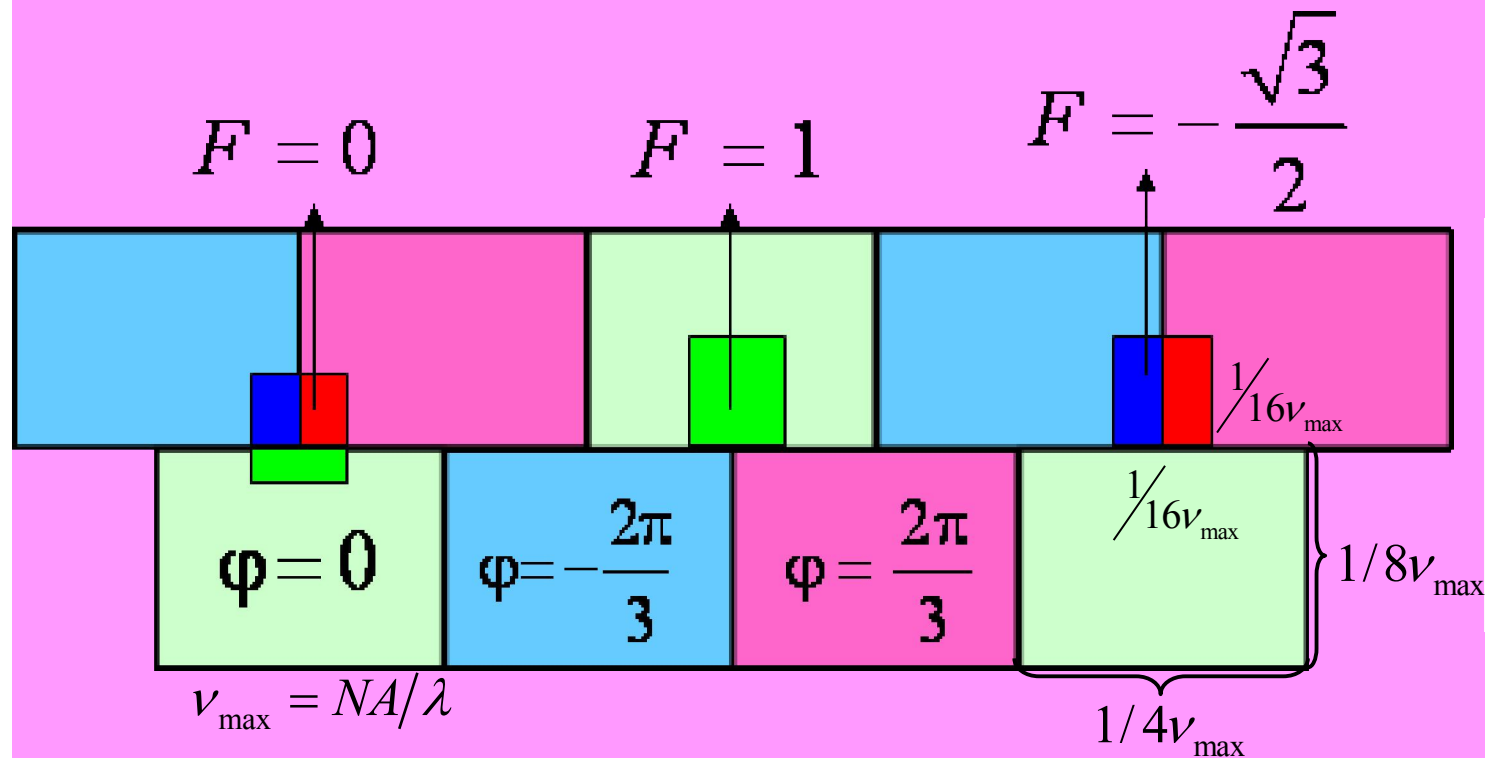
$$NA = 0.6 \quad \sigma = 0.5 \quad \lambda = 248 \text{ нм}$$

Белокопытов Г.В., Рыжикова Ю.В. Сравнение характеристик изображения в проекционной фотолитографии. // Известия РАН. Серия физическая. 2008. т. 72. №1. С. 88-91.

Фазово-растровые маски

Координаты центра отверстия:

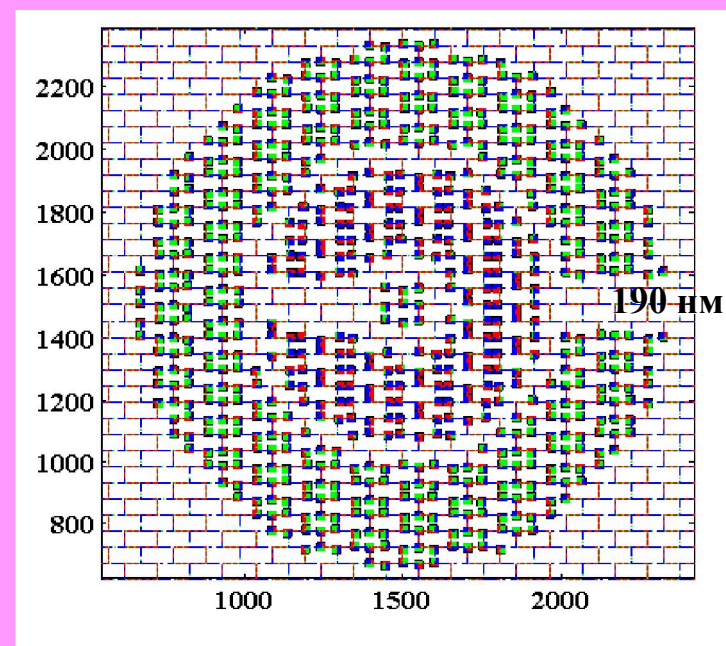
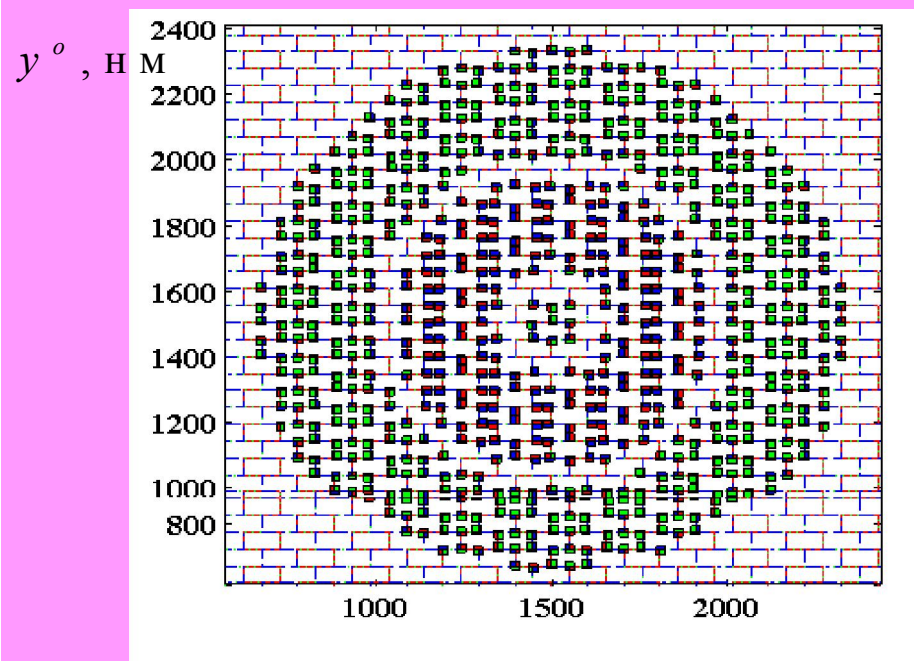
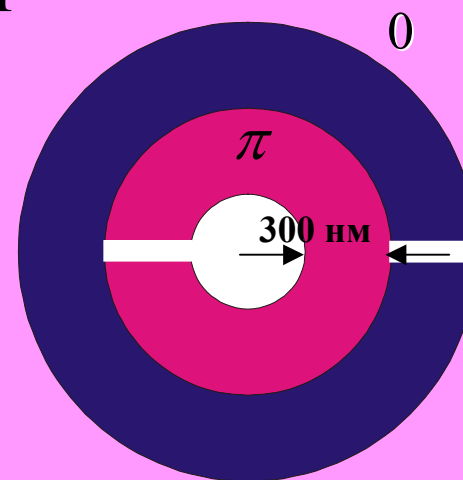
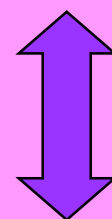
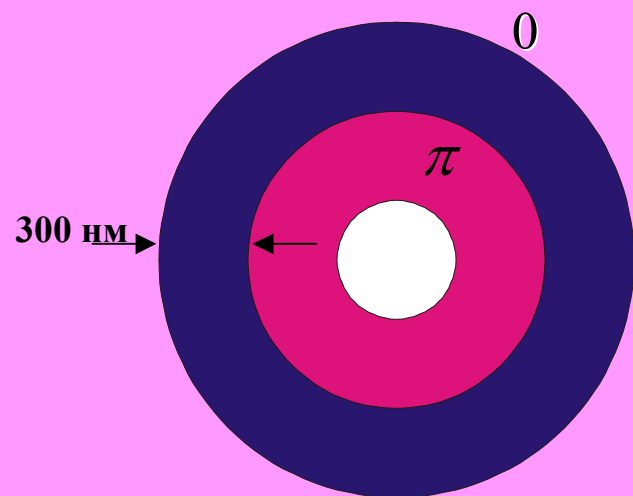
$$x_c^o = x_m^o + \xi_{mn}, \quad y_c^o = y_n^o + \eta_{mn}$$



Белокопытов Г.В., Короткова Ю.В. (Рыжикова Ю.В.) Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика. Астрон. 2007. №3. С. 44–48.

Фазово-растровые маски

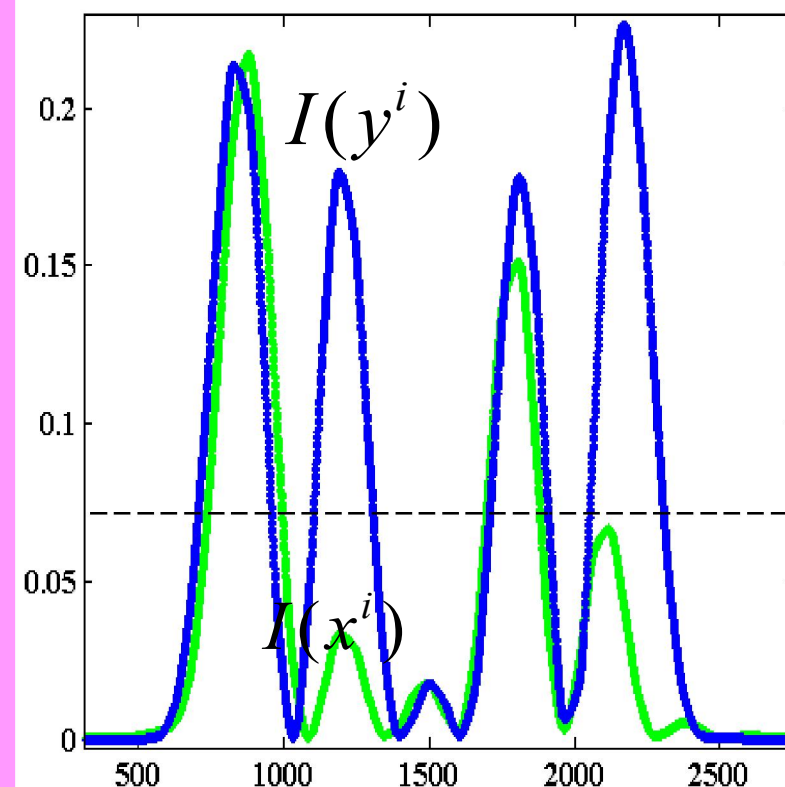
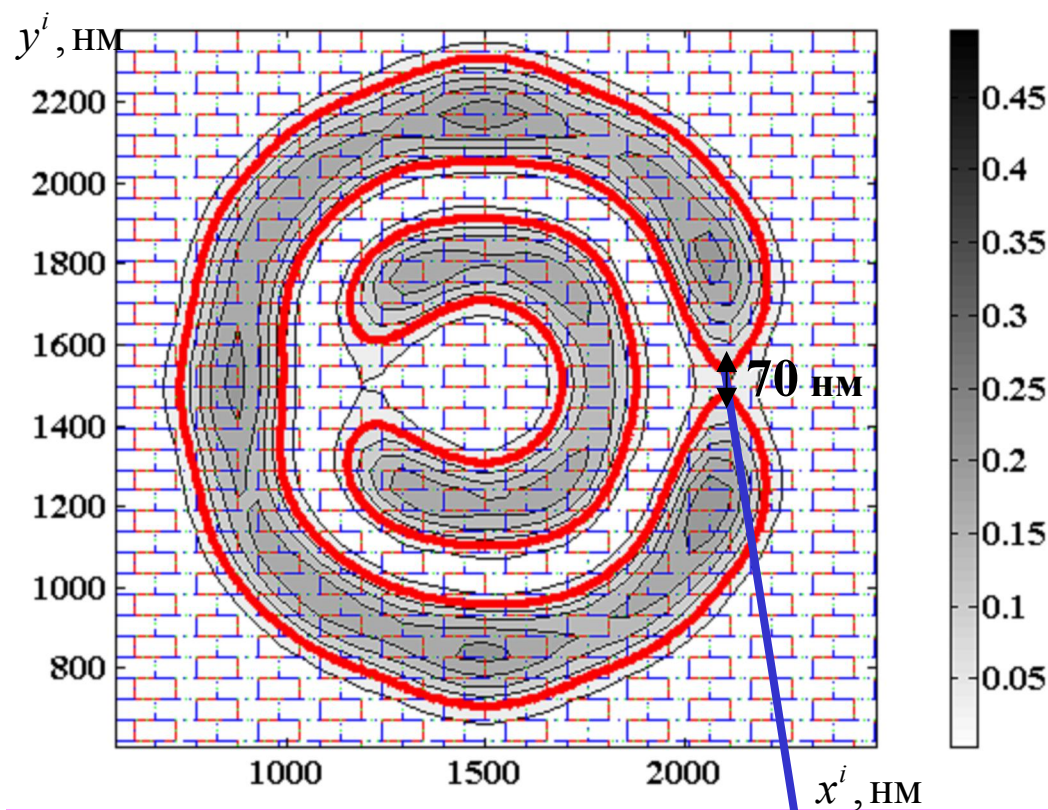
Прототип ФРМ



x^o , нм

Изображение фазово-растровой маски (частично-когерентное освещение $\sigma = 0.5$)

$$I(x^i, y^i)$$

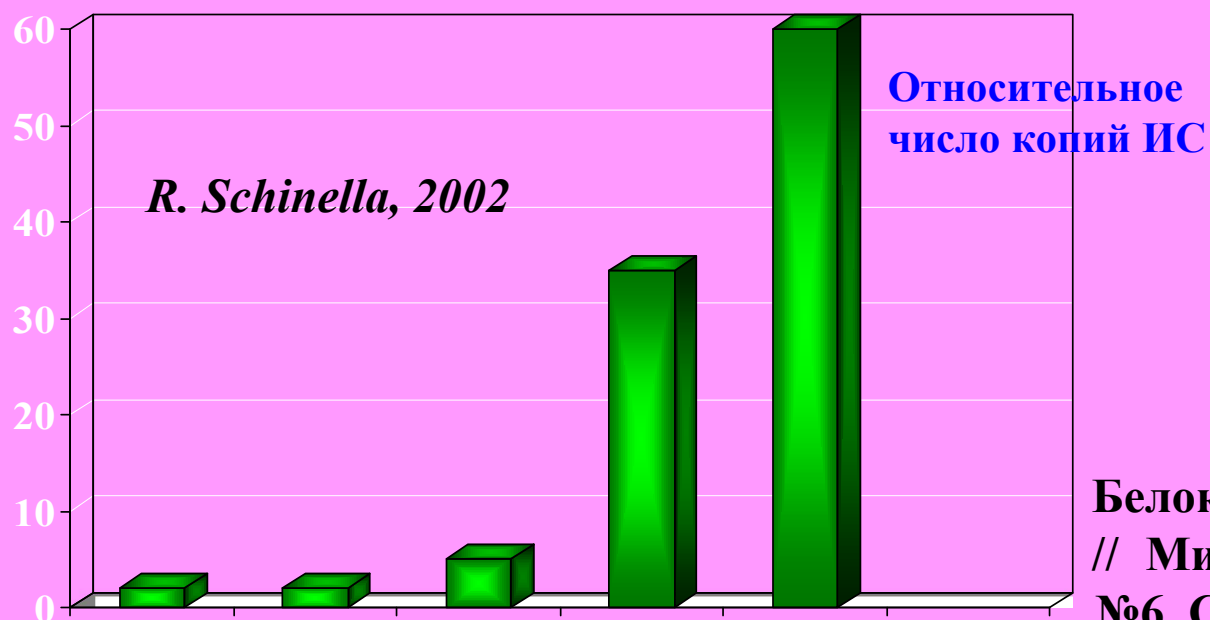
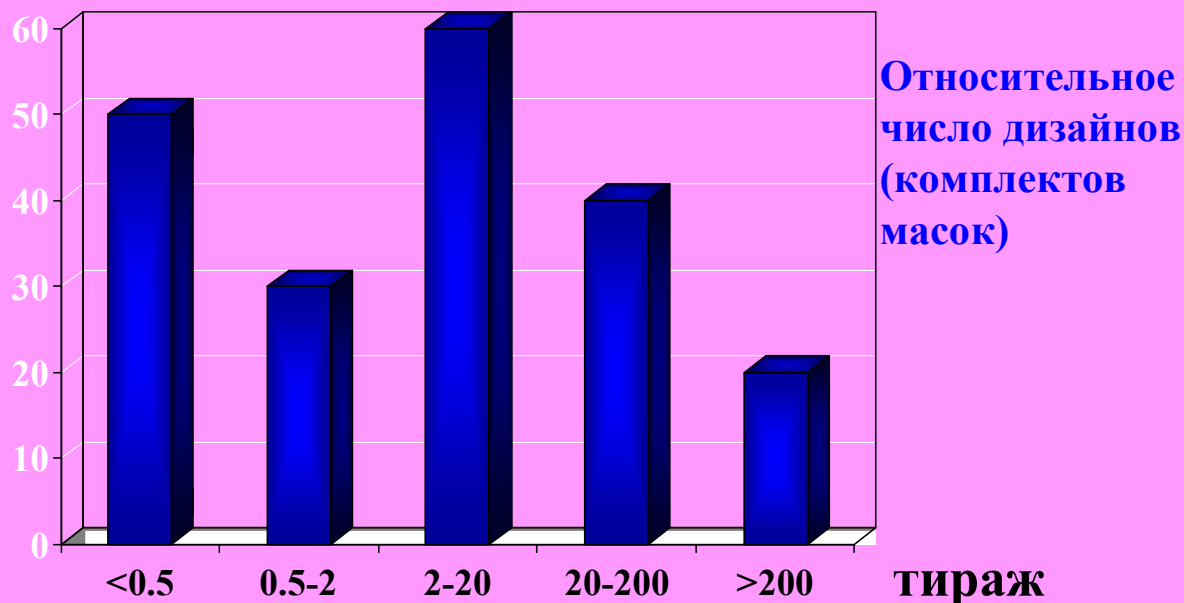


$$F = 0, I \neq 0$$

$$NA = 0.6$$

$$\lambda = 248 \text{ HM}$$

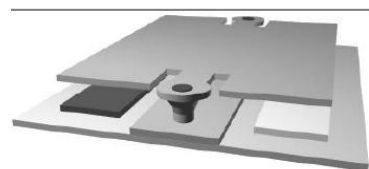
Проблемы литографических масок



- Рост стоимости комплекта масок
- Длительное время изготовления
- Малотиражная продукция экономически невыгодна
- **Требуются более дешевые и быстрые способы создания масок, или альтернативные системы литографии без масок.**

Белокопытов Г.В., Рыжикова Ю.В.
// Микроэлектроника. 2011. т. 40.
№6. С. 453-467.

Литографическая система с пространственным модулятором света



ПМС

$$\varphi < 0.5^\circ$$

Фурье-линза

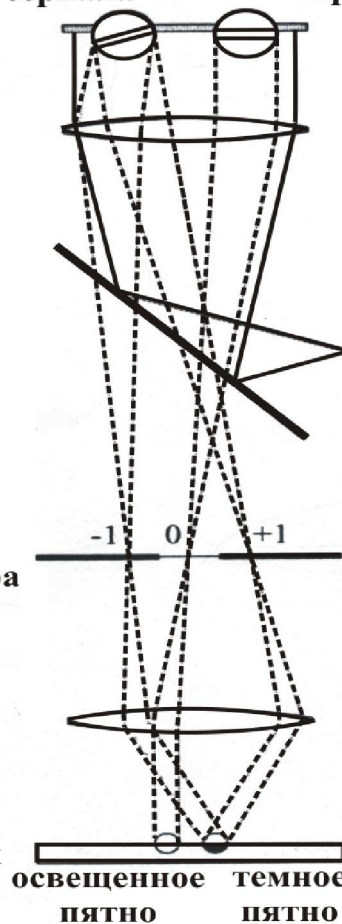
полупрозрачная
пластина

Фурье плоскость
пространственного фильтра

проекционная система

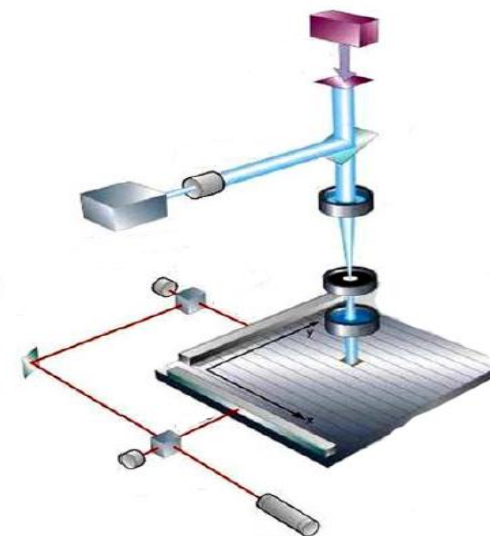
плоскость изображения

отклоняющие
зеркала неотклоняющие
зеркала



**Micronic Laser Systems
AB (Швеция)**

**Fraunhofer Institute for
Photonic Microsystems
(Германия)**



Dauderstadt U., Karlin T., et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5348. P. 119-126.

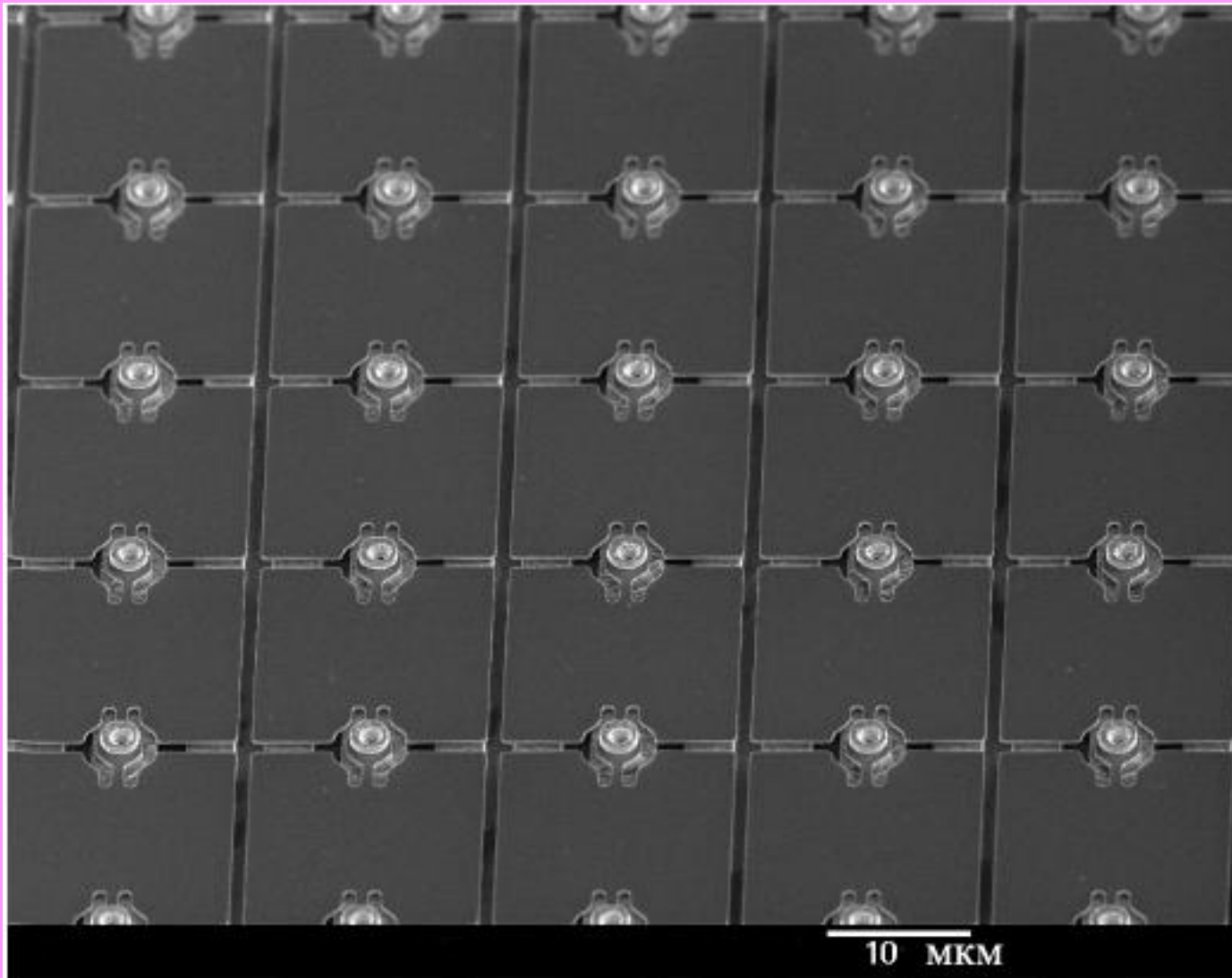
Основные характеристики устройств на базе матриц микрозеркал

Компонент устройства	Основные характеристики	
Источник освещения длина волны рабочая частота	$\lambda = 248 \text{ нм}$ 2 кГц	$\lambda = 193 \text{ нм}$ 4 кГц
ПМС рабочая частота размер зеркала размер матрицы зеркал	2 кГц $16 \times 16 \text{ мкм}^2$ 512×2048	4 кГц $8 \times 8 \text{ мкм}^2$ 2048×5120
Проекционная система уменьшение числовая апертура линз глубина резкости	$M=200$ $NA=0.82$ $DOF = \pm 0.4$	$M=267$ $NA=0.7-0.93$ $DOF = \pm 0.1$
Плоскость изображения размер основного элемента	80 нм	30 нм

Литография без маски: условия реализации

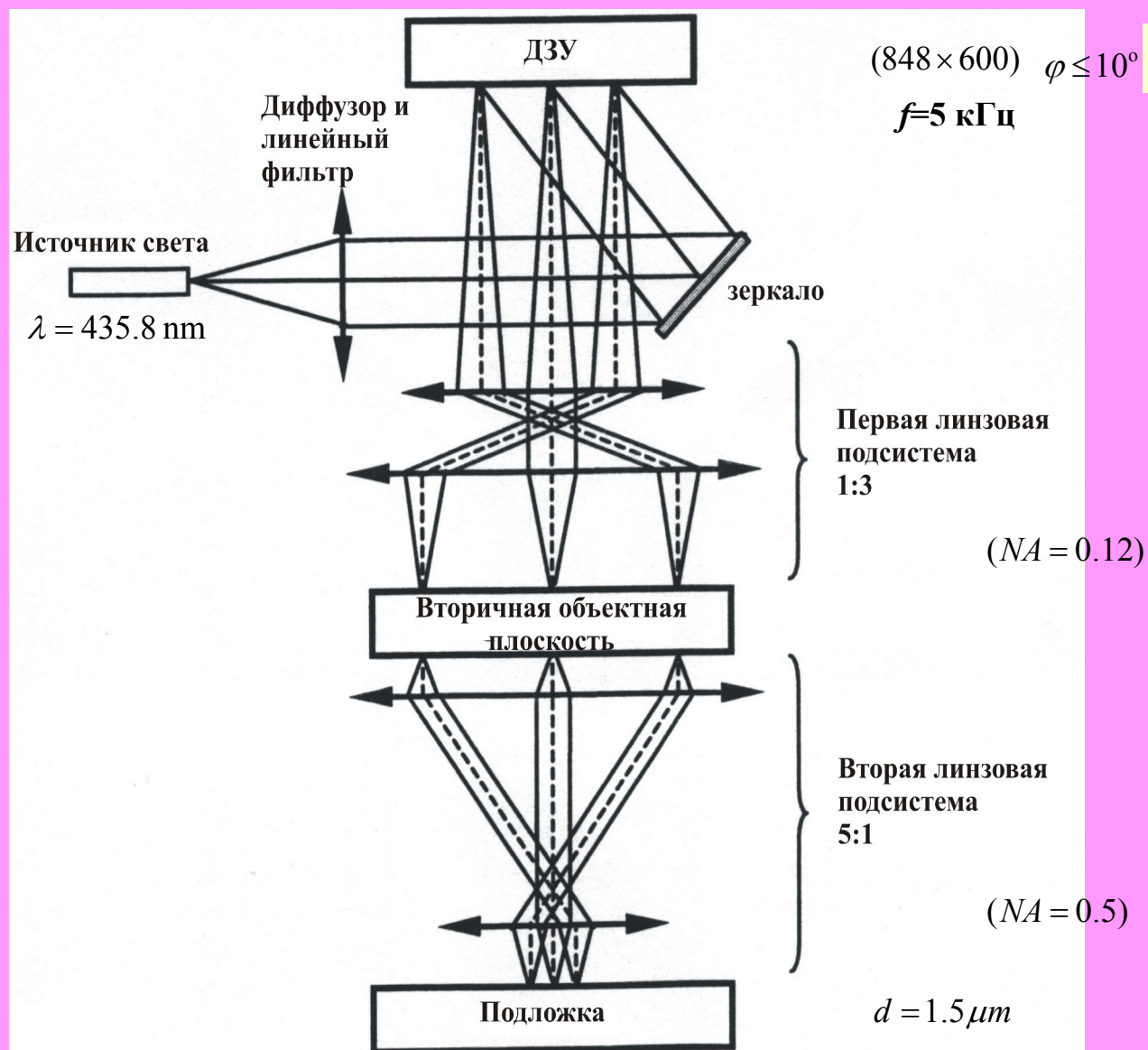
- **Матрицы динамически управляемых микрозеркал (порядка 10^6 элементов).**
- **Установка поперечных координат обрабатываемой поверхности с точностью в единицы нм.**
- **Компьютерный синтез динамической маски из передаточных функций отдельных управляемых элементов.**
- **Подача управляющих сигналов к матрице поворотных зеркал (10^{10} бит/с).**

Матрица микрозеркал



Zimmer F., Niklaus F., et. al. // Proc. SPIE. 2009. V. 7208. P. 720807.

ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ДИСКРЕТНЫМ ЗЕРКАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ



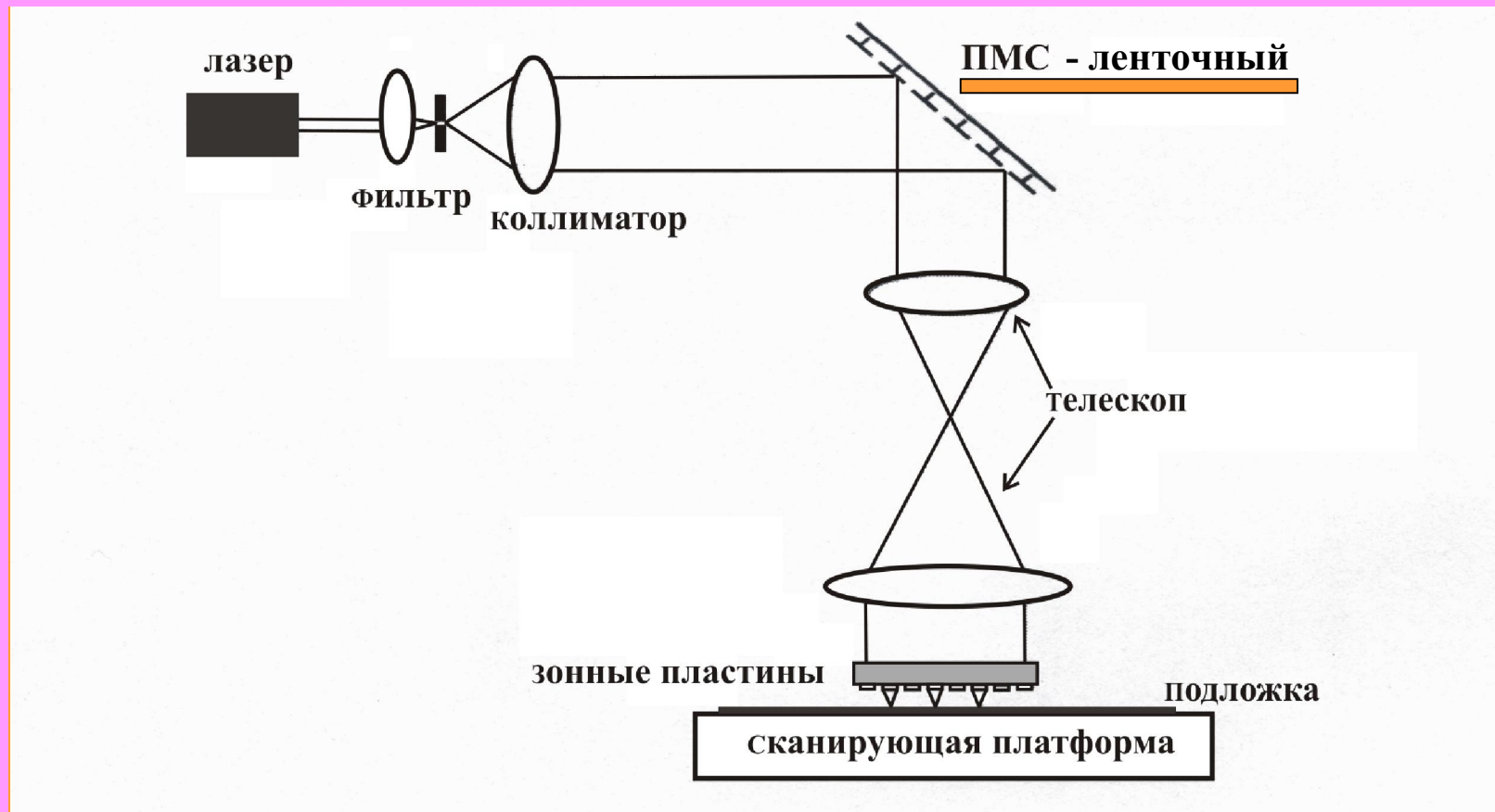
$(848 \times 600) \quad \varphi \leq 10^\circ$

$f=5 \text{ кГц}$

Texas Instruments

ЛИТОГРАФИЯ НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ ЗОННЫХ ПЛАСТИН

Massachusetts Institute of Technology - MIT



Menon R., Patel A., Smith H. I.// Proc. SPIE. 2005. V. 5721. P. 53.

Численное моделирование – синтез динамических масок

Особенности объекта:

- **Экспонирование резиста - по частям, многопроходное.**
- **Геометрическое подобие маски и рисунка на резисте отсутствует.**
- **Метод синтеза – глобальная оптимизация.**
- **Виртуальная маска – амплитудная.**
- **Отдельный элемент – микроантенна.**
- **Возможны градации интенсивности (до 64).**
- **Проекционная система с сильным уменьшением – параметр когерентности близок к единице.**

Исходные формулы скалярной модели для виртуальной маски (системы поворотных зеркал)

Краевая задача для функции отклика микрозеркала:

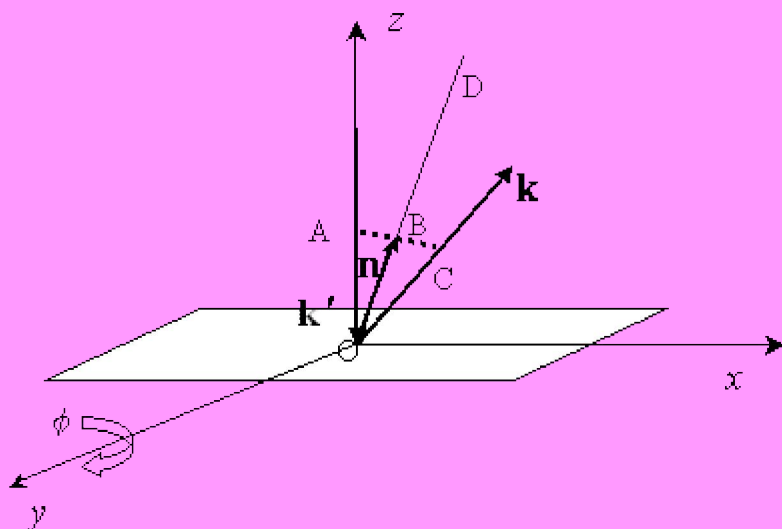
$$\begin{cases} (\Delta + k^2)H = 0 \\ H(x, y, z = 0) = f(x, y) \end{cases}$$

Краевая функция граничной задачи:

$$f(x, y) = \begin{cases} R \cdot e^{i\chi x}, & \text{в области зеркала} \\ 0, & \text{в остальных точках,} \end{cases}$$

где $\chi = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \phi \cos \phi$

R - коэффициент отражения



Общее решение для (1):

$$H(x, y, z, k_x, k_y) = \int \int_{k_x, k_y} A(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y - k_z z)} dk_x dk_y, \quad \text{где}$$

$$A(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{x, y} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$$

Исходные формулы скалярной модели для виртуальной маски (системы поворотных зеркал)

Для прямоугольного зеркала:

$$A(k_x, k_y) = \frac{R}{(2\pi)^2 \tilde{k}_x k_y} \left(e^{i(\tilde{k}_x x_1 - k_y y_1)} - e^{i(\tilde{k}_x x_2 - k_y y_1)} + e^{i(\tilde{k}_x x_2 - k_y y_2)} - e^{i(\tilde{k}_x x_1 - k_y y_2)} \right) \quad \text{где} \quad \tilde{k}_x = \chi - k_x$$

Для многоугольного зеркала:

$$A(\hat{k}'_x, k_y) = \frac{R}{8\pi^2 \hat{k}'_x k_y} \sum_{n=1}^N e^{-i(\hat{k}'_x x_n + k_y y_n)} (f_n - f_{n+1}), \quad \text{где} \quad \hat{k}'_x = -\tilde{k}_x; \quad f_n = (\hat{k}'_x - k_n k_y) / (\hat{k}'_x + k_n k_y), \quad f_{N+1} = f_1,$$

$$k_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \quad \text{угловой коэффициент,} \quad N - \text{число вершин многоугольного зеркала}$$

**Распределение интенсивности
отраженной волны при
когерентном освещении**

$$I(x, y, z) = |H(x, y, z, 0, 0)|^2$$

**Распределение интенсивности
отраженной волны при частично-
когерентном освещении**

$$I(x, y, z) = \int \int_{k'_x, k'_y} |H(x, y, z, k'_x, k'_y)|^2 dk'_x, dk'_y$$

Заключение

(основные результаты)

- ❖ Получена аналитическая формула для спектра пространственных гармоник дифрагированного поля, в случае когда граница объекта задается в виде произвольного многоугольника. Описанный подход к расчету изображений не требует разложения элементов маски на простейшие составляющие, что позволяет радикально упростить геометрический анализ и сократить объем вычислений. Формула положена в основу расчета изображений в фотолитографии.
- ❖ Разработаны алгоритм и программа расчёта оптического изображения в проекционной оптической литографии, в приближении скалярной теории дифракции с учетом частичной когерентности источника света и дифракционной ограниченности оптической системы.
- ❖ Разработана методика оценки критических размеров элементов изображения путём численного моделирования. Исследованы изображения тестовых объектов, даваемые различными типами масок (бинарными, фазовыми и фазово-растровыми). Изучены зависимости критических размеров от числовой апертуры и параметра когерентности для бинарных и фазовых масок. Показано, что двухфазные маски обеспечивают существенно больший контраст, чем бинарные и трехфазные маски.

Заключение

(основные результаты)

- ❖ Исследовано формирование изображения в фотолитографии с помощью фазово-растровых масок (ФРМ), которые являются развитием фазовых масок и основаны на дискретизации функции пропускания и разложении отсчётов на три фазовые составляющие. Разработан алгоритм их синтеза, который позволяет получить произвольное распределение комплексной функции пропускания маски.
- ❖ Показано, что для ФРМ, приведенные размеры элементов которых много меньше длины волны, выполняется свойство локальности. Проведено численное моделирование и продемонстрировано действие фазово-растровой маски при создании элементов субмикронных размеров на примере двух колец с зазорами.
- ❖ Теоретически исследована задача о нахождении распределения поля волны, отраженной от поворотного зеркала в скалярном приближении теории дифракции при когерентном и частично-когерентном освещении. Получены удобные соотношения для реализации алгоритма расчета оптических изображений виртуальных масок, состоящих из микрозеркал.