

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317.2

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, Е. В. ГАВРИЛОВ, А. П. ЖЕВЛАКОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТИВА ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФА

Рассмотрены современные предпосылки развития микроэлектроники: углубление в вакуумно-ультрафиолетовый рабочий диапазон, создание и применение зеркальных объективов предельной точности, построенных по схеме Шварцшильда, когда требования к точности измерения ошибок строже, чем  $\lambda/100$  для  $\lambda = 0,633$  мкм. На стадии финишной доводки оптических поверхностей объектива, в дополнение к дифракционной интерферометрии, необходима оценка качества изображения, сформированного объективом, с использованием прямого метода изофотометрии структуры изображения точки, чем преодолевается недостаток чувствительности интерференционного контроля.

*Ключевые слова:* нанолитограф, зеркальный объектив, дифракционная интерферометрия, компьютерная изофотометрия.

**Введение.** До последнего времени прогресс в развитии микроэлектроники обеспечивался возможностью непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов интегральных микросхем благодаря усовершенствованию фотолитографических процессов. Дальнейшее развитие требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) рабочий диапазон [1]. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикронное разрешение. В последние годы наблюдается устойчивый интерес к проблеме создания оптических элементов, точность формы поверхностей которых составляет доли нанометра [2]. Это обуславливает актуальность поиска новых технологических решений. Например, при решении задач проекционной коротковолновой нанолитографии проблема, как правило, усложняется необходимостью изготовления асферических поверхностей, для которых одновременно с высокой точностью формы требуется обеспечить и низкую, на уровне 0,1 нм (т.е. микрошероховатость поверхности). Согласно одному из основных правил метрологии, погрешность средства измерения должна быть в 10 раз меньше измеряемого отклонения размеров изделия от номинальных. Поэтому погрешности аппаратуры для измерения деформации волнового фронта при создании таких оптических систем не должны превышать  $\lambda/100$  для  $\lambda = 0,633$  мкм [3].

Традиционно применяемый для измерения деформации волнового фронта метод интерферометрии базируется на измерении искривлений системы интерференционных полос. Неизбежные погрешности интерферометрического метода зависят в основном от двух причин [4]:

- погрешности определения координат интерференционных полос;
- погрешности образцовой детали, дающей опорный волновой фронт.

Порог чувствительности, т.е. предельная погрешность визуальной расшифровки координат интерференционных полос, составляет не менее 0,1 периода полосы для незашумленной интерферограммы.

Ограничение точности традиционных интерферометров (построенных, например, по схеме Физо или Тваймана — Грина), заключается в том, что в их конструкции предусмотрено применение образцового оптического элемента (обычно — образцовой оптической поверхности) для формирования опорного волнового фронта. Такой элемент создает волновой фронт с остаточными ошибками, в числе которых:

— остаточные ошибки изготовления: применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше чем  $\lambda/20$ ;

— возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали в процессе эксплуатации.

Развитие методов интерферометрического контроля позволило использовать на этапе аттестации объектива интерферометры с дифракционной волной сравнения [4, 5], в которых устранены ошибки образцового оптического элемента ввиду его отсутствия в схеме контроля.

Современные методы специальной регистрации изображений дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических измерениях, но и преобразовать на компьютере структуру изображения к виду, позволяющему повысить в 10 раз точность его расшифровки [4]. Однако погрешности определения координат интерференционных полос с использованием современных технологий компьютерной расшифровки составляют 0,03—0,01  $\lambda$ , при этом точность контроля остается на уровне 0,1  $\lambda$ , что недостаточно применительно к контролю нанообъектива на стадии финишной доводки. Кроме того, для формирования интерференционной картины необходим режим автоколлимации, который, однако, не может быть реализован для всего объектива в целом, так как в этом случае, как известно, в зеркальных системах, состоящих из поверхностей, не имеющих зеркального покрытия, не хватает света. Поэтому необходимо разрабатывать методы контроля объективов, работающих на проходящем свете.

В настоящей статье приводится описание объектива для экспериментального нанолитографа и обосновывается необходимость использования современных методов компьютерной интерферометрии, а также методов компьютерной изофотометрии, позволяющих с высокой точностью исследовать структуру изображения, построенного созданным объективом.

**Описание объектива экспериментального нанолитографа.** Объектив имеет следующие расчетные характеристики:

рабочая длина волны — 13,4 нм,

числовая апертура — 0,36,

экранирование — 0,36,

размер поля изображения — 0,82×0,82 мм,

увеличение составляет –10,

среднеквадратичное отклонение волнового фронта по полю изображения — 0,01 $\lambda$ ...0,12 $\lambda$ ,

глубина фокуса для крайней точки поля изображения —  $\pm 15$  нм,

глубина фокуса для центральной точки поля изображения —  $\pm 50$  нм.

Оптическая схема и общий вид объектива экспериментального нанолитографа представлены на рис. 1, а, б соответственно; здесь 1 — маска (объект), 2 — главное (малое) зеркало, 3 — вторичное зеркало, 4 — плоскость резиста (плоскость изображения).

Уравнение, описывающее зеркало оптической системы, имеет следующий вид:  $y^2(z) = 2R_0z + (e^2 - 1)z^2 + A_3z^3 + \dots + A_nz^n$ , где  $R_0$  — радиус кривизны при вершине,  $e^2$  — квадрат эксцентриситета поверхности,  $A_3 \dots A_n$  — коэффициенты разложения полинома.

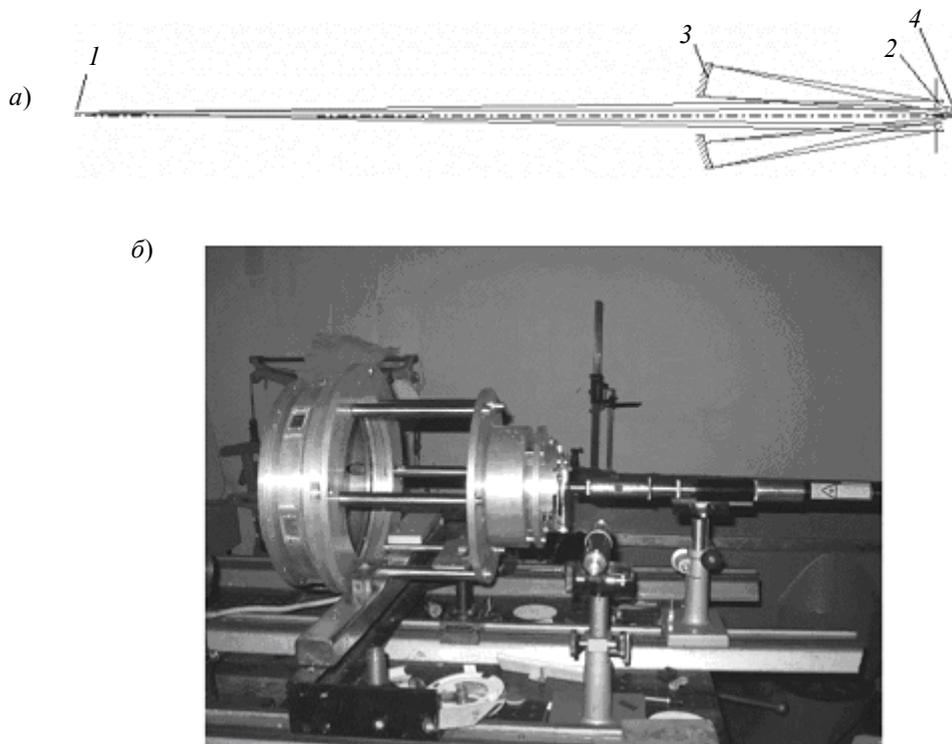


Рис. 1

Основные технологические характеристики асферических поверхностей, используемых в объективе, показаны в таблице.

Характеристика	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Асферичность, мкм	14,6	16,5
Градиент, мкм/мм	0,06	0,02
Крутизна, ...°	7,5	18,63

При контроле остаточных ошибок изготовления этих поверхностей необходимо применение прямых методов измерения функции распределения интенсивности в изображении точечного тест-объекта, построенного нанообъективом в схеме контроля [6, 7].

**Методика изготовления объектива экспериментального нанолитографа.** Точность изготовления асферической поверхности зеркала нанообъектива связана с выбранной технологией обработки и системой контроля, обеспечивающей возможность выявления погрешностей формы поверхности детали с последующим однозначным их описанием в любой момент времени для оперативной коррекции технологического процесса [3].

Один из основных способов изготовления сложных асферических элементов — использование компенсационной схемы контроля. Необходимо, однако, отметить существенный недостаток этой схемы, который заключается в возможной неоднозначности результатов контроля поверхности в момент установки компенсатора в схему контроля. В этом случае суммарная ошибка оптической системы „компенсатор + исследуемая деталь“ очень велика и невозможно оценить погрешности формы поверхности никаким другим способом, кроме как теньвым, который является только качественным, или с помощью интерферометра сдвига, точность которого ограничена определением самой величины сдвига.

Поэтому в случае двухзеркальных оптических систем классическим способом изготовления объектива является изготовление одного из зеркал в компенсационной схеме контроля.

Ошибки изготовления первого зеркала, полученные на этапе аттестации, вводятся в расчетную программу, например „ОПАЛ“ или „Zemax“, и путем пересчета формы поверхности второго зеркала достигается требуемое расчетное качество оптического изображения. Далее, в соответствии с новой формой поверхности второго зеркала вводятся изменения в технологический процесс. Контроль второго зеркала выполняется в схеме объектива. В рассматриваемом случае контроль изменения качества объектива осуществляется по изображению точки, формируемой оптической системой, и успешное изготовление объектива зависит от методов и средств контроля объектива по формируемой точке. Наиболее чувствительным методом, позволяющим в реальном масштабе времени получать основные характеристики оптической системы — частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), функцию рассеяния точки (ФРТ) и функцию концентрации энергии (ФКЭ) изображения светящейся точки, является метод компьютерной изофотометрии [7, 8].

**Метод изофотометрии ФРТ.** Этот метод позволяет регистрировать перепады освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков ( $10^5$ ), строить кривые распределения освещенности в любом сечении и топограмму распределения освещенности, а также вычислять ФКЭ и ЧКХ [6, 8].

Метод фотографической изофотометрии основан на получении серии фотоснимков пятна рассеяния с изменяющимся временем экспозиции (рис. 2, а) и последующем получении совокупности фотометрических сечений, соответствующих различным уровням освещенности. Каждое фотометрическое сечение формируется как фигура с четким контуром. Линия контура называется изофотой. Таким образом, изофота есть геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равные значения уровня относительной освещенности. Изофота исследуемого оптического изображения формируется благодаря применению приемника изображения, обладающего световой характеристикой (или функцией преобразования — ФП) типа „импульс“ (см. рис. 2, б).

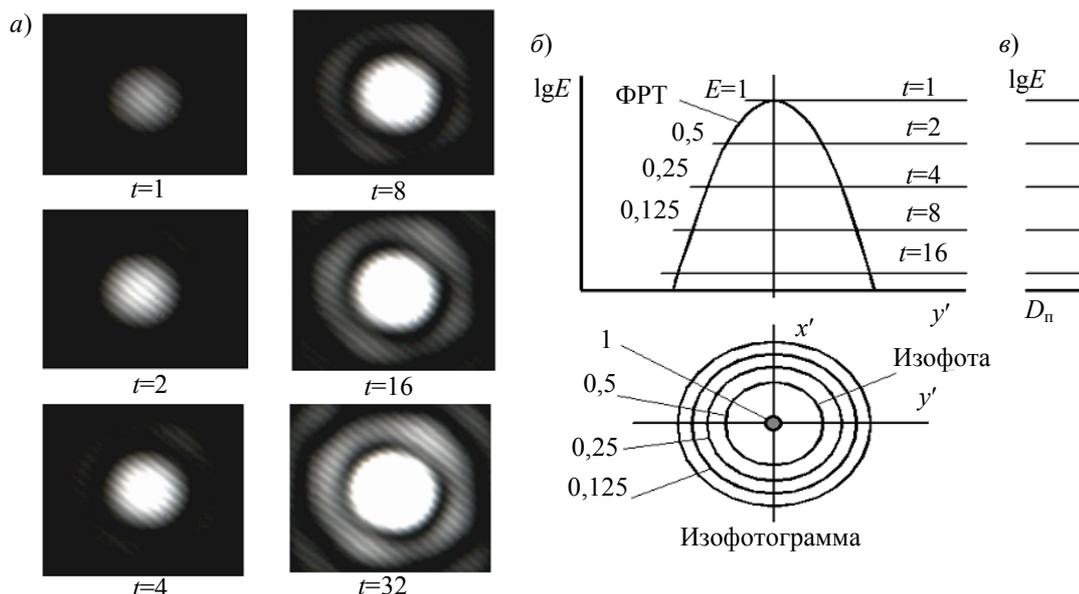


Рис. 2

Для получения системы изофот (изофотোগраммы) исследуемого распределения освещенности выполняется регистрация оптического изображения точечного тест-объекта в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда экспозиций различной длительности на приемник изображения с функцией преобразования типа „импульс“. Полученную суммарную ФП можно назвать функцией преобразования ( $D_{II}$ ) типа „гребенка“ (по латински — СОМВ). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов [8] (см. рис. 2, в).

Ряд экспозиций целесообразно располагать по шкале длительностей, значения которых определяются степенным законом возрастания:

$$t_i = 2^i, \quad (1)$$

где  $t$  — относительная продолжительность экспозиции.

Равномерная шкала логарифмов экспозиции приводит к перемещению импульсной функции преобразования вдоль оси абсцисс (см. рис. 2, б) с получением ряда фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности. Таким образом, достигается эффект перемещения импульсной функции преобразования в новые положения вдоль оси  $\lg E$ .

Процесс регистрации изображений (например, фотографический) подчиняется следующему закону взаимозаменяемости:

$$H = Et,$$

где  $H$  — экспозиция, соответствующая формированию заданного постоянного уровня сигнала изображения (например, максимальной плотности).

Для построенного семейства импульсных ФП  $D_n = f(\lg E)$  при  $t = \text{const}$  каждой отдельной функции соответствует определенное соотношение из следующей совокупности:

$$E_1 = H/t_1; \quad E_2 = H/t_2; \dots \quad E_n = H/t_n. \quad (2)$$

Нормируя полученный ряд значений освещенности к значению максимальной освещенности в данном распределении, получаем выражение в относительных (безразмерных) единицах:

$$E_{\text{отн}} = 1/t_{\text{отн}} \quad (3)$$

или в логарифмической форме:  $\lg E_{\text{отн}} = -\lg t_{\text{отн}}$ . При этом время  $t$  целесообразно задавать в целых числах, а относительную освещенность — в долях от максимального значения, принятого за единицу.

Формулы (2) и (3) являются основными выражениями, характеризующими структурометрический метод изофотометрической регистрации изображений.

На практике при контроле качества изображения, формируемого оптической системой, изображение светящейся точки многократно регистрируют на однотипный фотоприемник высокой контрастности при различных длительностях экспозиции.

Изофоты различных уровней освещенности, сформированные на отдельных снимках, совмещают в топограмму или карту распределения освещенности (изофотограмму).

В современных условиях методы изофотометрии используются в различных электронных приемниках изображения, включая матричные. При этом принципы изофотометрии, рассмотренные выше применительно к фотографическому приемнику изображения, полностью соблюдаются, как показали исследования, при использовании качественно иных приемников изображения, например телевизионных приемников, включая видеокамеры широкого назначения, а также цифровых фотокамер. Эти приемники способны изменять время накопления в широком диапазоне, что обеспечивает перепады регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков.

К достоинствам метода изофотометрии с изменяющимся временем накопления следует отнести большой диапазон измеряемого перепада освещенностей в пятне рассеяния и высокую светочувствительность; последнее особенно важно при недостатке световой энергии в схеме, например при контроле оптических поверхностей без зеркального покрытия. Недостатком метода является необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции: выполнение этого требования без применения компьютерных программ приводит к снижению оперативности исследований.

**Теоретические основы метода.** На основе изложенного алгоритма разработано программное обеспечение „КИЗО ФРТ“ (компьютерная изофотометрия) [7]. Таким образом, можно констатировать создание нового метода — компьютерной изофотометрии с изменяющимся временем накопления — и разработку схемного решения аппаратуры для его осуществления (рис. 3). В представленной схеме ПЗС-камера является приемником изображения, подключенным к компьютеру, который управляет режимом работы этой камеры, т.е. обеспечивает автоматическую регистрацию серии кадров с различным временем накопления.

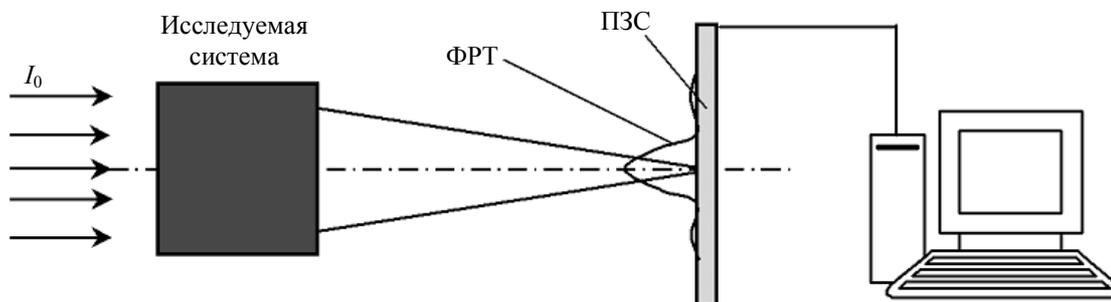


Рис. 3

Разработанный метод компьютерной изофотометрии позволяет определить ФРТ и обработать результаты измерения для получения ряда характеристик качества изображения, формируемого исследуемым объективом. Программа состоит из трех модулей.

1. Модуль „управление камерой“ использует драйвер, позволяющий потребителю ввести основные параметры изображения (такие как чувствительность, яркость, контраст), определить время накопления на основании результатов работы модуля сканирования ФРТ, передавать массив данных об изображении из камеры в память компьютера и пересылать изображение на экран.

2. Модуль „сканирование ФРТ“ позволяет определить  $t_{\min}$  для выделения первой изофоты, соответствующей максимуму ФРТ; последующие изофоты определяются описанным методом изофотометрии. Результаты измерений передаются в базу данных.

3. Модуль „анализ результата измерения“ позволяет получать значения ФРТ из базы данных и обрабатывать их для вычисления характеристик качества изображения исследуемой оптической системы, в числе которых:

- функция рассеяния линии (ФРЛ) (интегрирование ФРТ по направлению  $y$ );
- функция концентрации энергии (интегрирование ФРТ по радиусу  $r$ );
- пограничная кривая (интегрирование ФРЛ);
- частотно-контрастная характеристика (двумерное преобразование Фурье численного массива для ФРТ).

Исследуемая система закрепляется на специальном держателе, который позволяет вращать ее вокруг оси, перпендикулярной оптической оси и проходящей через узловую точку этой системы, для анализа изображения точки по полю.

Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления с использованием ПЗС-камеры представлена на рис. 4, а; осветительная часть данной схемы с применением нелазерного источника излучения приведена на рис. 4, б. Здесь приняты следующие обозначения: 1 — лазер; 2 — фотометрический клин; 3 — система для фокусировки лазерного пучка; 4 — точечная диафрагма; 5 — объектив коллиматора; 6 — исследуемый объектив; 7 — изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 — проекционный микрообъектив; 9 — видеокамера (приемник изображения); 10 — компьютер; 11 — лампа накаливания; 12 — конденсор; 13 — светофильтр; 14 — точечная диафрагма.

Порог чувствительности интерферометрии aberrаций, составляющий менее  $0,1\lambda$ , и aberrаций на уровне  $0,01\lambda$  на интерферограмме неразличим, что демонстрирует рис. 5, а, б соответственно.

Метод компьютерной изофотометрии позволяет оценивать качество изображения, формируемого исследуемой системой с чувствительностью на уровне  $0,01\lambda$ . Компьютерное отображение измеренной ФРТ при сферической aberrации  $0,1\lambda$  и  $0,01\lambda$  приведено на рис. 6, а, б соответственно.

Применение логарифмического масштаба при отображении изофотограммы позволяет различать aberrации на уровне менее чем  $\lambda/200$ .

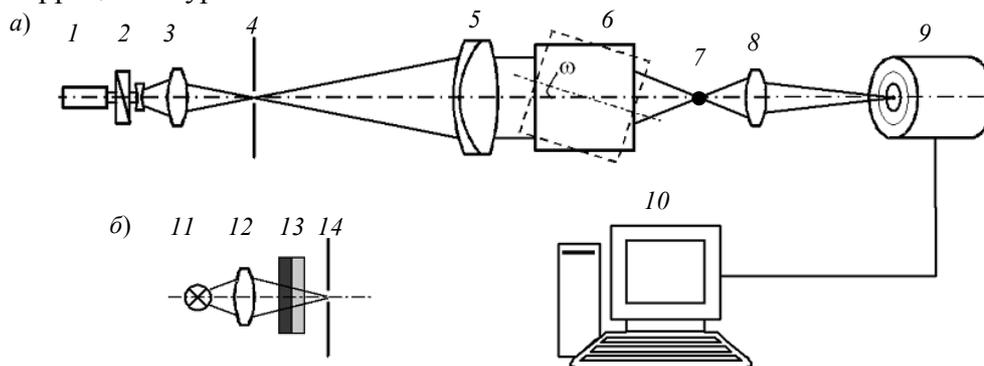


Рис. 4

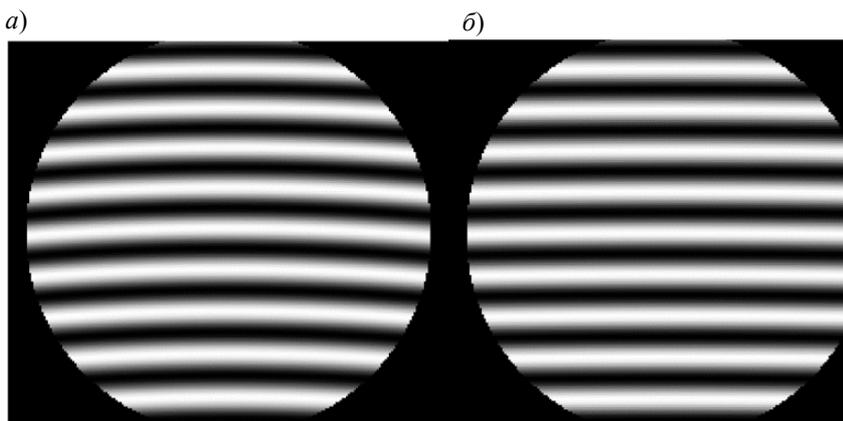


Рис. 5

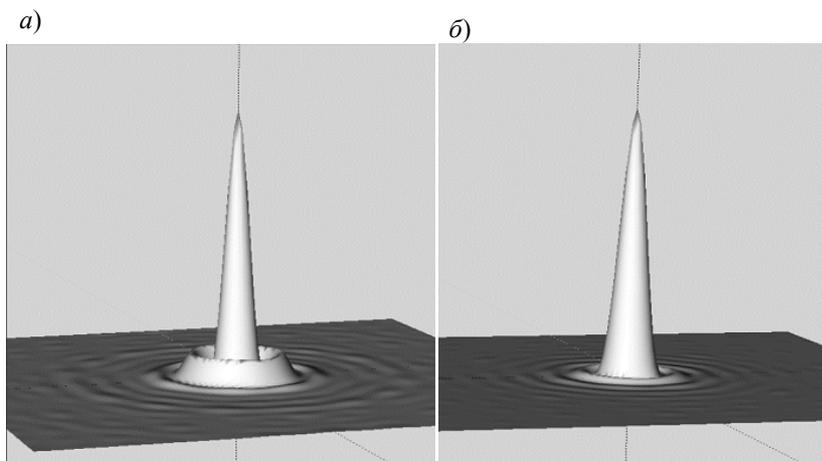


Рис. 6

### Заключение.

1. Дальнейшее развитие микроэлектроники требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый диапазон, для чего необходимо создание оптических элементов с точностью формы поверхностей на уровне долей нанометра.

2. Порог чувствительности, т.е. предельная погрешность визуальной расшифровки координат интерференционных полос, составляет величину не менее 0,1 периода полосы.

3. Применяя современные методы специальной регистрации и расшифровки, можно достичь точности контроля на уровне 0,01λ. Однако для контроля объектива экспериментального нанолитографа при работе в вакуумно-ультрафиолетовом диапазоне требуется чувствительность контроля, на порядок более совершенная.

4. Необходимая чувствительность контроля обеспечивается инновационным методом прямого измерения ФРТ в диапазоне освещенности до пяти порядков — методом компьютерной изофотометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейсян Р. П. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем ультрафиолете // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 5.
2. Pat. 5.212.588 USA. Reflective Optical Imaging System for EUV / Vriddhachalam K. Viswanathan. 1993.
3. Гаврилов Е. В., Бакаев М. И., Кирилловский В. К. и др. Состояние и перспективы развития оптики для рентгеновской литографии // Сб. трудов Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2008“. СПб: ГОИ им. С. И. Вавилова, 2008. С. 214—222.
4. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 104. с.
5. Кирилловский В. К., Петрученко И. Р. Дифракционные интерферометры. Л.: ЛИТМО, 1990. 76 с.
6. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
7. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 128. с.
8. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 89 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Константинович Кирилловский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@yandex.ru
- Егор Валерьевич Гаврилов** — Институт лазерной физики ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“, Санкт-Петербург; E-mail: egor.gavrilov@itcitmo.ru
- Александр Павлович Жевлаков** — канд. физ.-мат. наук; Институт лазерной физики ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики  
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
04.05.10 г.