Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

БЕЛОУСОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И АМПЛИТУДНЫХ РЕШЁТОК

Шифр и наименование специальности
01.04.05 – Оптика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Корольков Виктор Павлович

Новосибирск – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях, таких как лазерная обработка материалов [1-5], сенсорика [6-8], медицина [9-11], мониторинг и контроль [12-19], производство оптических систем [20-24], оптическая связь [25], сборка сложных многокомпонентных оптических систем [26], светотехника [27,28], оптико-электронные приборы двойного назначения [29], защита подлинности продукции [30-34], а также во многих устройствах, окружающих нас в повседневной жизни, находят широкое применение дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Основной функцией ДОЭ является преобразование исходного волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами. Широкие функциональные возможности в реализации волновых фронтов и энергетических преобразований света, а также малый вес и габариты данных элементов способствует тому, что область их применения постоянно расширяется [35-49]. Следует отметить, что в основе современного развития дифракционной оптики лежат работы ряда российских учёных [1,12,20,36,37,50-58], в свое время предвосхитивших перспективы применения ДОЭ и компьютерно-синтезированных голограмм.

ДОЭ позволяют осуществлять светоделительные [42,59-61], фокусирующие [21,23,36,41,53,55,57,62], поляризационные [43,63], корректирующие [20,55] и другие [36,44-49] преобразования исходного волнового фронта, эффективно расширяя функциональные возможности элементной базы оптических компонентов. Преобразование падающего волнового фронта на структуре ДОЭ осуществляется на основании законов дифракции. Рабочая структура ДОЭ может быть амплитудной, фазовой или амплитудно-фазовой. Принцип работы амплитудных ДОЭ основан на периодическом локальном изменении коэффициентов отражения и/или пропускания по площади элемента. Максимальная эффективность таких элементов в первом порядке дифракции не превышает 10%, что вызвано значительными потерями излучения на амплитудной маске [36]. В свою очередь, при использовании фазовых ДОЭ преобразование волнового фронта осуществляется исключительно за счёт изменения фазы падающего волнового фронта в локальных областях элемента. Можно выделить 2 типа фазовых ДОЭ: элементы с объёмной фазой (объёмные) и элементы с поверхностным микрорельефом (рельефно-фазовые, многоуровневые). В объёмных дифракционных оптических элементах фазовое преобразование волнового фронта осуществляется за счёт локального изменения оптических свойств (например, пространственного изменения показателя преломления) в различных плоскостях «слоистой» структуры материала элемента. То есть фазовая структура таких элементов записана в объёмной среде. В качестве примера ДОЭ с объёмной фазовой структурой можно привести так называемые объёмные голографические решётки или голограммы Денисюка [64], а также брэговские решётки (объёмные дифракционные решётки) [65-67]. Фазовые ДОЭ с поверхностным микрорельефом подразумевают создание на подложке структуры определённой формы (ступенчатой, гладкой, кусочно-непрерывной и т.д.), на которой и осуществляется фазовое преобразование падающего на элемент волнового фронта. Дифракционная эффективность фазовых элементов существенно выше по сравнению с амплитудными и может достигать 100%. Благодаря этому фазовые ДОЭ получили широкое распространение в оптических схемах. Амплитудно-фазовые ДОЭ представляют собой комбинированную структуру фазового микрорельефа и амплитудной маски. Изготовление таких элементов представляет собой сложный процесс. В связи с этим, в настоящее время они редко используются на практике [46]. Хотя энергетическая эффективность амлитудно-фазовых ДОЭ уступает фазовым элементам, но управление фазой и амплитудой дает возможность снизить погрешность синтеза заданного распределения амплитуды и фазы.

Элементы с поверхностной фазовой структурой микрорельефа можно объединить в один общий класс рельефно-фазовых оптических элементов (РОЭ). В процессе расчёта рабочей структуры РОЭ решается обратная задача, целью которой, является поиск функции поверхностного рельефа, пройдя сквозь который (или отразившись от него), исходное излучение с заданной комплексной амплитудой в заданной области пространства будет иметь требуемое распределение амплитуды и фазы [36,48]. К РОЭ также можно отнести и конформальные оптические элементы (рефракционные элементы, функция пропускания которых выбирается, исходя из заданных внешних неоптических условий, а не из набора стандартных оптических поверхностей), применяемые в качестве статических корректоров волнового фронта [68]. Следует отметить, что поверхностная структура из поглощающего (отражающего) материала с малой глубиной микрорельефа, сформированная на подложке, может служить в качестве маски, формирующей рабочую структуру амплитудных ДОЭ. Несмотря на то, что преобразование волнового фронта на структуре РОЭ может осуществляться на основании законов дифракции или рефракции, на этапе формирования рассчитанный микрорельеф, как правило, подвергается дискретизации и описывается как многоуровневый.

На сегодняшний день, можно выделить следующие основные методы формирования рельефа, используемые при изготовлении РОЭ: технология алмазного точения [69-71], проекционная и контактная фотолитографические технологии с применением бинарных [72-76], растровых и полутоновых фотошаблонов (ФШ) [77], технология оплавления фоторезиста [78-83], методы оптической голографии [84,85], запись электронным пучком [86,87], прямая лазерная запись по фоторезисту [88-93], тиражирование оригиналов РОЭ (так называемых мастер-матриц) методами гальванопластики [94] и репликации [95] на поверхность полимеров, а также методы прямой лазерной записи на тонких плёнках металлов. Наиболее распространёнными в производственной практике из упомянутых методов являются фотолитографическая технология, сканирующая одно- или многоточечная запись сфокусированным лазерным пучком [96-98], интерференционно-голографический метод [99,100] и технология алмазного точения. Большое внимание уделяется исследованию и поиску приложений термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных слабо сфокусированным импульсным пучком (импульсным пучком с низкоапертурной фокусировкой) [40,101-110], представляющих из себя высокоупорядоченные решетки (более подробно этот вопрос рассмотрен в главе 3). Возрастающие требования к современным устройствам и системам, в которых применяются РОЭ, не позволяют останавливаться на достигнутых успехах [111], и заставляют разрабатывать новые, а также совершенствовать уже имеющиеся методы изготовления данных элементов. При этом упор делается на повышение экономической эффективности, производительности и снижение погрешностей изготовления.

Стоит отметить, что производственный процесс неотделим от процесса контроля параметров синтезируемых элементов. Отклонения волнового фронта, формируемого РОЭ, от заданных значений связанно, в основном, с ошибками при нанесении профиля на оптическую подложку элемента [112-114]. Методы контроля РОЭ можно условно разделить на четыре основные группы: определение соответствия между измеренными и расчетными характеристиками преобразования светового пучка (искажение формируемого волнового фронта, интегральная эффективность преобразования распределения интенсивности и т.д.) [68,115,116], непосредственное измерение параметров микрорельефа исследуемого элемента (таких, как глубина, форма, период и угловая ориентация структур) [105,117-126], анализ тестовых структур, изготовленных на подложке вместе с основной структурой элемента [115,116,127-129] и оптическая дифрактометрия, основанная на анализе дифракционной картины (ДК), полученной в результате локального освещения пробным пучком рабочей структуры исследуемого элемента или тестовой решётки [115,124,127,128,130-141].

При контроле РОЭ по анализу соответствия между измеренными и расчетными характеристиками преобразования светового пучка измерения необходимо производить на расчётной длине волны, а для ряда элементов – с использованием расчётной оптической схемы. Это ограничивает применение данного метода, так как оптическая схема, в которой планируется использование элемента, не всегда известна изготовителю и может являться коммерческой тайной, а доступ к источнику излучения с необходимой длиной волны у изготовителя элемента может быть затруднён. Кроме того, при использовании данного метода для финишного контроля РОЭ, в случае отклонения измеренных характеристик от заданных значений, как правило, сложно определить причину того, чем они вызваны. Для этого, как правило, приходится прибегать к другим методам, описанным ниже. Важно отметить, что прямое измерение характеристик преобразования светового пучка при контроле на промежуточных стадиях многоэтапного технологического процесса изготовления многоуровневого рельефа РОЭ, например, при использовании фотолитографической технологии, мало информативно. Это связано с тем, что рельеф на стадии его формирования в слое фоторизиста имеет другие (не расчётные) параметры глубины, и выполнен в материале, имеющем иной показатель преломления по сравнению с конечным элементом. Следовательно, отличаются и характеристики преобразования, осуществляемого им.

К методам, основанным на непосредственном измерении параметров микрорельефа исследуемого элемента относятся: конфокальная и лазерная профилометрия, методы сканирующей зондовой микроскопии, оптическая микроскопия и микроскопия электронным пучком, интерференционные методы измерения топологии микрорельефа и т.д. Однако контроль РОЭ по прямому измерению параметров микрорельефа не всегда представляется возможным, а также не всегда удобен в силу ряда причин. Во-первых, оборудование, предназначенное для измерения топологии микрорельефа, как правило, не является специализированным для задач контроля РОЭ. Из-за этого часто приходится разрабатывать алгоритмы постобработки измеренных данных с целью определения интересующих параметров [105,124]. При этом разрабатываемые алгоритмы постобработки чаще всего не являются универсальными и предназначены для контроля определённого класса элементов, или элементов, изготавливаемых серийно. Во-вторых, размеры РОЭ могут варьироваться от сотен мкм^2 до десятков тысяч мм^2, а параметры микрорельефа рабочей структуры могут существенно отличаться в различных областях элемента. Например, для конформальных оптических элементов характерны низкая пространственная частота многоуровневого рельефа, а для дифракционных осесимметричных линз – постепенное увеличение ширины зон от периферии к центру элемента. Ряд используемого на сегодняшний день оборудования для прямого измерения параметров микрорельефа, позволяет осуществлять измерения лишь в локальном участке исследуемой структуры или вдоль какого-то сечения, что, в свою очередь, значительно осложняет процедуру контроля при изготовлении многих классов РОЭ. В-третьих, измерение микрорельефа по всей площади и определение его отклонения от расчётных значений в различных областях, как правило, не является самой целью. Для контроля качества изготовленного РОЭ необходимо определить, насколько сильно эти отклонения влияют на оптические параметры волнового фронта, формируемого элементом. Кроме того, важно выявить на каком технологическом этапе формирования рельефа (в зависимости от технологии его изготовления) возникли эти отклонения, и, при необходимости повторного изготовления элемента, устранить их причины.

Использование тестовых структур, сформированных на подложке вместе с основной структурой РОЭ, упрощает процедуру контроля (так как контроль для многих задач достаточно производить лишь в локальных областях с известными координатами на подложке) и позволяет получить информацию о комплексных ошибках, возникших в процессе изготовлении элемента (отклонение глубины и формы рельефа, ошибки позиционирования сканирующей записывающей системы при длительном формировании микрорельефа и т.д.). Важно учитывать, что параметры формируемых тестовых структур должны выбираться с учётом параметров основной структуры контролируемого РОЭ. Например, глубина и период тестовых решёток выбираются с учётом максимальной глубины и минимального периода микрорельефа изготавливаемого элемента, а их форма должна быть адаптирована под задачу контроля и метод его осуществления (профилометрический контроль [115,116,128], анализ микроизображений [129] или дифрактометрический контроль [115,127,128]). Однако анализ тестовых структур не даёт информации о локальных дефектах структуры в рабочей области исследуемого РОЭ. В связи с этим, данный метод желательно сопровождать дополнительным контролем, например, визуальным анализом основной структуры элемента со стороны оператора или другими методами контроля рабочей структуры РОЭ.

Дифракционная эффективность является одним из важнейших параметров элементов дифракционной оптики. В связи с этим, одним из основных методов контроля качества данных элементов является метод оптической дифрактометрии, основанный на анализе по дифракционным порядкам пространственного распределения интенсивностей дифрагировавшего на микрорельефе излучения. Данный метод ограничен контролем элементов с квазипериодической структурой микрорельефа, средний период которой в локально контролируемой области в несколько раз меньше размера пробного пучка. При этом в случае попадания в поле пробного пучка структуры с высоким градиентом периода или с существенной кривизной зон интерпретация результатов измерений дифрактометрическим методом осложняется, что также ограничивает область его применения. Дифрактометрический метод является методом локального контроля, а размер пробного пучка, который определяет размер единовременно измеряемой области, обычно крайне мал по сравнению с размерами исследуемого элемента. В связи с этим, сканирование РОЭ по всей его площади, в зависимости от размера элемента, может достигать десятков часов. На сегодняшний день измерения дифрактометрическим методом зачастую осуществляются вручную в нескольких локальных областях исследуемого элемента. Данный подход не исключает влияния человеческого фактора на результат выполняемых измерений. Известные технические решения для автоматизации дифрактометрического метода позволяют осуществлять контроль РОЭ в небольшом диапазоне изменения периодов исследуемой структуры. Расширение диапазона измеряемых периодов при использовании дифрактометрического метода достигается за счёт увеличения углового диапазона регистрируемой дифракционной картины (более подробно этот вопрос рассмотрен в главе 1).

Таблица 1. Основные методы контроля РОЭ

№	Метод контроля	Преимущества	Недостатки
1	Определение соответствия между измеренными и расчетными характеристиками преобразования светового пучка	- Измерение конечных (и основных) характеристик РОЭ.	- Необходимость производить измерение на расчётной длине волны; - В случае необходимости, измерения должны производиться с использованием расчётной оптической схемы; - В большинстве случаев при контроле РОЭ отсутствует возможность определения причин отклонения полученных характеристик преобразования светового пучка от расчётных значений.
2	Непосредственное измерение параметров микрорельефа исследуемого элемента	- Использование стандартного оборудования для микроскопии и профилометрии; - Измерение основных параметров микрорельефа в рабочей области элемента и возможность сопоставления их с расчётными значениями.	- Отсутствие информации о параметрах волнового фронта формируемого РОЭ; - Необходимость разрабатывать алгоритмы постобработки измеренных данных.
3	Анализ тестовых структур, изготовленных на подложке вместе с основным элементом	- Контроль производится лишь в локальных областях с известными координатами на подложке; - Возможность получения информации о комплексных ошибках, возникших в процессе изготовления элемента.	- Отсутствие информации о локальных дефектах структуры в рабочей области контролируемого элемента.
4	Оптическая дифрактометрия	- Возможность контролировать как основные параметры микрорельефа исследуемой структуры РОЭ, так и энергетическую эффективность элемента.	- Ограниченность контролем элементов с квазипериодической структурой, средний период которой в локально контролируемой области в несколько раз меньше размера пробного пучка; - Необходимость информации об оптических параметрах материала (или материалов) формирующего структуру РОЭ, для определения глубины и формы микрорельефа.

Каждый из вышеперечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки, основные из которых представлены в таблице 1. Кроме того, каждый из них в отдельности не позволяет решить весь спектр задач контроля, возникающих при изготовлении РОЭ. Таким образом, принимая во внимание многообразие способов формирования рабочей структуры РОЭ и широкие функциональные возможности данных элементов по преобразованию волновых фронтов и распределения интенсивности света, разработка методов и устройств, создаваемых для контроля определённых типов микрорельефа исследуемых элементов в рамках выбранного технологического процесса, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка методов и создание оптико-электронных систем для осуществления локального бесконтактного контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток, в рамках выбранного технологического процесса их изготовления и с учётом особенностей микрорельефа исследуемых структур.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие **основные задачи**:

- исследование оптических схем видеорегистрации дифракционной картины, формирующейся на поверхности объёмных рассеивающих экранов в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°-360°, с целью создания оптико-электронных устройств дифрактометрического контроля параметров ДОЭ, работающих в прошедшем или отражённом свете;
- разработка дифрактометрического метода финишного контроля РОЭ, предназначенных для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета, на основе использования лазерного источника видимого диапазона;
- разработка метода поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутоновой технологии;

- разработка метода количественной оценки производительности записи (в зависимости от мощности и скорости сканирования лазерного записывающего пучка), дефектности, а также прямолинейности и параллельности дорожек, составляющих рельеф лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, по анализу их микроизображений.

Научная новизна

1. Впервые предложены и исследованы оптические схемы устройств дифрактометрического контроля, в которых при регистрации дифракционной картины от локальной области исследуемого элемента, освещённой пробным лазерным пучком, используется объёмный рассеивающий экран, установленный между ДОЭ и системой видеорегистрации. Проведено исследование схем с использованием объёмных рассеивающих экранов, имеющих форму полусферы и сегмента параболоида вращения, а также оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, изготовленного на базе оптоволоконной шайбы.
2. Впервые создана автоматическая оптико-электронная система дифрактометрического контроля параметров ДОЭ с периодом структуры в диапазоне 0.45–6.47 мкм, в которой при регистрации дифракционной картины используется полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами, расположенными вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. В разработанном устройстве используется источник излучения с оптоволоконным выходом, объединяющий три лазерных источника с длинами волн 447 нм, 532 нм и 643 нм, а регистрация дифракционной картины осуществляется в отражённом свете. Диапазон периодов элементов, контролируемых на созданном устройстве, составляет 0.45–4.5 мкм для длины волны 447 нм, 0.54–5.36 мкм для длины волны 532 нм и 0.65–6.47 мкм для длины волны 643 нм.
3. Впервые создан дифрактометрический стенд, в котором при регистрации дифракционной картины в прошедшем свете используется оптоволоконный рассеивающий экран с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским,

изготовленный на базе оптоволоконной шайбы. Стенд создан на базе инвертированного оптического микроскопа и позволяет объединить визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете, для элементов с диапазоном изменения периодов 0.45–1 мкм.

4. Впервые для термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных на плёнках хрома и гафния, получены зависимости количественных характеристик таких параметров как относительная площадь дефектов исследуемой структуры, прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ее, а также производительность записи, в зависимости от мощности и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного гауссова пучка.

Практическая значимость работы

1. Предложенные и исследованные в работе схемы видеорегистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне с использованием объёмных рассеивающих экранов позволяют создавать автоматические системы дифрактометрического контроля ДОЭ с высокой скоростью измерения параметров элементов в локально контролируемой области и при этом с широким диапазоном изменения периодов исследуемых структур: от сотен нанометров до нескольких десятков микрометров.

2. Предложенный дифрактометрический метод, основанный на анализе дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете, даёт возможность использовать общедоступные лазерные источники видимого диапазона для контроля РОЭ, рассчитанных для работы в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета на пропускание, что значительно упрощает процедуру контроля данных элементов и тем самым снижает затраты на их изготовление.

3. Разработанный метод, основанный на формировании и анализе тестовых структур с синусоидальной формой профиля, позволяет осуществлять контроль на всех технологических этапах растровой полутоновой фотолитографии при

изготовлении РОЭ, что даёт возможность выявлять источники и величины ошибок на промежуточных стадиях изготовления элементов и снизить затраты на их изготовление.

4. Разработанный метод количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур по анализу их микроизображений имеет практическое значение для исследования физических процессов, которые приводят к формированию периодической структуры на поверхности материала, при его обработке лазерным излучением. Кроме того, полученные с помощью разработанного метода данные позволяют определять оптимальные параметры записи ЛИППС.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные схемы локального дифрактометрического контроля параметров ДОЭ с применением объёмного рассеивающего экрана, установленного между исследуемым ДОЭ и системой видеорегистрации, позволяют осуществлять регистрацию дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360°. Использование рассеивающего экрана, выполненного в форме полусферы, позволяет осуществлять регистрацию дифракционной картины в заявленном угловом диапазоне с помощью четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси симметрии рассеивающего экрана. Использование рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне ±45° от оси его симметрии приближена к форме полусферы, или регулярного оптоволоконного жгута с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, позволяет регистрировать дифракционную картину в заявленном угловом диапазоне с помощью всего одной видеокамеры, расположенной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана.

2. Использование встроенных тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным профилем микрорельефа и анализ дифракции при отражении от них пробного лазерного пучка видимого диапазона позволяет осуществлять контроль

изготовления многоуровневых РОЭ, предназначенных для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета. При этом длина волны пробного лазерного пучка и угол его падения на тестовые структуры выбираются из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции на отражение для тестовой линейной решётки с расчётными параметрами микрорельефа. Влияние деструктивной интерференции на измерение интенсивности нулевого порядка дифракции устраняется путем установки исследуемого элемента через слой иммерсионной жидкости на опорную подложку (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие), изготовленную из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый элемент.

3. Разработанный метод поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с применением технологии растровой полутоновой фотолитографии, основанный на формировании и анализе встроенных тестовых структур с синусоидальной формой профиля, позволяет осуществлять контроль функции пропускания растрового фотошаблона и формы рельефа в фоторезисте во всем динамическом диапазоне без искажения результатов измерения вблизи резких перепадов рельефа, свойственных решеткам с кусочно-непрерывным профилем.

4. Разработанный метод количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, основанный на анализе карт угловой ориентации пикселей на их микроизображениях, позволяет определять относительную площадь дефектов исследуемой структуры, прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ее, а также производительность записи, как функцию технологических параметров.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием многократно апробированных экспериментальных методов, применением известных и многократно проверенных программных пакетов для моделирования и обработки результатов, применением современных средств и методик измерения, сравнением полученных результатов с известными/эталонными значениями измеряемых параметров, а также публикацией основных результатов работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: Международная научная конференция «СИБОПТИКА» (г. Новосибирск, в 2015–2018 гг.); XIV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (г. Звенигород, 2017); XV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (г. Нижний Новгород, 2018 г.); Восьмой Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2018 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (г. Пекин, Китай, 2018 г.); Международная конференция «Optics+Optoelectronics» (г. Прага, Чехия, 2019 г.); XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Санкт-Петербург, 2019 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (г. Ханчжоу, Китай, 2019 г.); VI Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ) (г. Самара, 2020 г.); Девятый Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2020 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (Digital Forum, Китай, 2020 г.).

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в выборе применяемых методов исследования, расчёте, проектировании, сборке и юстировке устройств, описанных в данной диссертационной работе, проведении экспериментальных и теоретических исследований, разработке программных кодов и алгоритмов для численного моделирования, обработке результатов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке научных публикаций по теме исследования, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту. Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично.

Внедрение результатов работы

Применение разработанной в рамках данной работы методики контроля с использованием тестовых синусоидальных решёток позволило оптимизировать процесс изготовления широкоапертурных конформальных оптических корректоров для кристаллических активных элементов из $YAG:Nd^{3+}$. Данные корректоры были изготовлены в рамках совместных договоров по выполнению научно-исследовательских работ № 12/12/2016 и № 17/01-18 между ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» и ИАиЭ СО РАН.

Результаты исследования по теме «Высокопроизводительная запись термохимических лазерно-индуцированных периодических структур на пленках металлов» были отобраны Объединенным ученым Советом по физическим наукам СО РАН для включения в доклад Президенту РФ и Правительству РФ о состоянии фундаментальных наук в Российской Федерации и за рубежом и важнейших научных достижениях, полученных российскими учеными в 2019 году.

Связь с государственными научно-техническими программами.

Работы по разработке схем видеорегистрации дифракционной картины с использованием объёмных рассеивающих экранов и методов их применения выполнялись в рамках гранта РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227,междисциплинарного интеграционного проекта № 112 Сибирского отделения РАН, проекта № 2012-218-03-004 Министерства образования и науки РФ, проекта Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН на 2016 год № II.2П/II.10-6, а также гранта РНФ № 17-19-01721 «Развитие сверхразрешающей термохимической лазерной технологии формирования компьютерно-синтезированных дифракционных наноструктур».

Работы по разработке дифрактометрических методов контроля параметров ДОЭ с субволновыми периодами и созданию программного кода на базе инструментария GD-Calc для их анализа и моделирования параметров дифрагированного излучения осуществлялись в рамках гранта РНФ № 17-19-

01721 «Развитие сверхразрешающей термохимической лазерной технологии формирования компьютерно-синтезированных дифракционных наноструктур».

Остальные работы выполнялись в рамках государственного задания (№ гос. регистрации 01201373321, № гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 11 статей, 10 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ) и 18 тезисов и материалов докладов на научных конференциях международного и всероссийского уровня. Получен 1 патент на изобретение РФ (№ 2634372) и 1 акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. **Белоусов, Д. А.** Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – №. 5. – С. 678–686.
2. **Белоусов, Д. А.** Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 35–42.
3. **Belousov, D. A.** Optimization of test gratings and their measurement at manufacturing of diffractive optics and conformal correctors / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10818. – Article number 1081814. – Pp. 1–9.
4. **Belousov, D. A.** Laser beam diffraction inspection of periodic metal/oxide structures with submicron period / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, V. N. Khomutov, R. K. Nasyrov // Proceedings of SPIE – The International

Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110301C. – Pp. 1–9.

5. **Belousov, D. A.** Multi-channel scanning measuring system for testing of diffractive structures and thin transparent films / V. P. Korolkov, V. V. Cherkashin, V. N. Khomutov, D. A. Belousov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110301E. – Pp. 1–12.

6. **Belousov, D. A.** Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals / V. P Korolkov., A. G. Sedukhin, D. A. Belousov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, S. L. Mikerin, E. V. Spesivtsev, R. I. Kutz // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110300A. – Pp. 1–12.

7. **Belousov, D. A.** Fast formation of hybrid periodic surface structures on Hf thin-film by focused femtosecond laser beam / A. V. Dostovalov, K. A. Bronnikov, D. A. Belousov, V. P. Korolkov, S. A. Babin // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11183. – Article number 111830U. – Pp. 1–6.

8. **Belousov, D. A.** Spectral data of refractive index and extinction coefficient for thin films of titanium group metals used for fabrication of optical microstructures / D. A. Belousov, V. S. Terent'ev, E. V. Spesivtsev, V. P. Korolkov // Data in Brief. – 2020. – Vol. 28. – Article number 104903. – Pp. 1–5.

9. **Белоусов, Д. А.** Метод обработки микроизображений для анализа структур ТЛИППС / Д. А. Белоусов, А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. Л. Микерин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – №. 6. – С. 936-945.

10. **Belousov, D. A.** Determination of linewidth for metal/oxide gratings by measured diffraction efficiency in several orders / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, R. I. Kuts // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2020. – Vol. 11551. – Article number 115511N. – Pp. 1–7.

Статьи в прочих изданиях:

11. **Белоусов, Д. А.** Влияние скорости сканирования на формирование ТЛИПСС радиально-симметричным и эллиптическим гауссовым фемтосекундным лазерным пучком / А. В. Достовалов, В. С. Тереньтьев, К. А. Бронников, Д. А. Белоусов, В. П. Корольков // Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5. – № 3. – С. 157-172.

Тезисы и материалы докладов:

12. **Белоусов, Д. А.** Оптико-электронный сканер дифракционной эффективности / Д. А. Белоусов // 19 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ – 19: материалы конференции. – 2013 – С. 434-435.

13. **Белоусов, Д. А.** Цифровой сканер распределения дифракционной эффективности синтезированных голограмм / Д. А. Белоусов // Студент и научно-технический прогресс. Инструментальные методы и техника экспериментальной физики: материалы 51 международной научной студенческой конференции – 2013 – С. 9.

14. **Белоусов, Д. А.** Оптико-электронный дефектоскоп дифракционных оптических элементов / Д. А. Белоусов // Сборник докладов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии». – 2014. – Т. 1. – С. 69-70.

15. **Белоусов, Д. А.** Прибор для измерения дифракционной эффективности в широком динамическом диапазоне / Д. А. Белоусов // Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука технологии инновации». – 2014. – Ч. 1. – С. 15-19.

16. **Белоусов, Д. А.** Устройство для измерения индикатрисы рассеяния света структурированными поверхностями / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов международной научной конференции «СИБОПТИКА - 2015». – 2015. – Т. 5. – №. 2. – С.128-131.

17. **Белоусов, Д. А.** Контроль параметров микрорельефа синтезированных голограмм методом анализа дифракционной картины / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов международной научной конференции «СИБОПТИКА - 2016». – 2016. – Т. 5. – №. 2. – С.32-36.

18. **Белоусов, Д. А.** Метод регистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне для контроля периодов и угловой ориентации структур дифракционных оптических элементов / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, В. В. Черкашин // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов международной научной конференции «СИБОПТИКА - 2017». – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С.35-39.

19. **Белоусов, Д. А.** Дифракционный метод контроля поверхностных нано и микроструктур компьютерно-синтезированных голограмм / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Голография. Наука и практика: Тезисы докладов XIV Международной конференция «ГолоЭкспо 2017». – 2017. – С. 150-153.

20. **Белоусов, Д. А.** Контроль дифракционной эффективности в отражённом свете дифракционных структур рассчитанных на пропускание / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов международной научной конференции «СИБОПТИКА - 2018». – 2018. – Т. 1. – С. 151-155.

21. **Белоусов, Д. А.** Формирование и характеризация тестовых синусоидальных решёток для производственного контроля конформальных элементов / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов международной научной конференции «СИБОПТИКА - 2018». – 2018. – Т. 1. – С. 129-133.

22. **Белоусов, Д. А.** Профилометрическая и дифрактометрическая характеризация синусоидальных тестовых решёток при производстве конформальных и дифракционных оптических элементов / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров // HOLOEXPO: XV международная

конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 215-219.

23. **Белоусов, Д. А.** Методы характеризации метал/оксидных решеток, формируемых методами прямой лазерной записи / В. П. Корольков, Д. А. Белоусов, А. В. Достовалов, С. Л. Микерин, В. Н. Хомутов // HOLOEXPO: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 191-196.

24. **Белоусов, Д. А.** Фемтосекундная лазерная запись астигматическим гауссовым пучком периодических структур на плёнке хрома / А. В. Достовалов, В. С. Тереньтьев, К. А. Бронников, К. А. Окотруб, Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, С. А. Бабин // Материалы Восьмого Российского семинара по волоконным лазерам. – 2018. – С. 198-199.

25. **Белоусов, Д. А.** Влияние ошибок изготовления ДОЭ на распределение интенсивности света в задачах мультипликации и гомогенизации пучков / Р. К. Насыров, Д. А. Белоусов, А. Г. Седухин, В. П. Корольков, В. Н. Хомутов //HOLOEXPO2019: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана. – 2019. – С.211-215.

26. **Belousov, D. A.** Perspectives of laser local oxidation nanolithography for fabrication of subwavelength and high-na diffractive optical elements / V. P. Korolkov, V. P. Veiko, E. A. Shakhno, A. V. Dostovalov, D. A. Sinev, A. G. Sedukhin, D. A. Belousov, R. K. Nasyrov // International Symposium "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-2019). Book of Abstracts. – 2019. – Pp. 87.

27. **Белоусов, Д. А.** Анализ упорядоченности и дефектности структур ТЛИППС сформированных на тонких плёнках Hf астигматическим гауссовым пучком / Д. А. Белоусов, А. В. Достовалов, В. П. Корольков, К. А. Бронников, С. Л. Микерин, С. А. Бабин // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): Сборник трудов по материалам VI

Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Карпеева. – 2020. –С. 372-377.

28. **Белоусов, Д. А.** Высокопроизводительная запись ТЛИППС на тонких плёнках Hf астигматическим гауссовым пучком фемтосекундного лазера / Д. А. Белоусов, А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. Л. Микерин, К. А. Бронников, С. А. Бабин // Материалы девятого Международного семинара по волоконным лазерам. – 2020. – С. 150-151.

29. **Belousov, D. A.** Application of nanotechnologies to the problems of diffractive optics / V. P. Korolkov, D. A. Belousov // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – IEEE, 2020. – Pp. 1-8.

Патент на изобретение:

30. Пат. 2634372 Рос. Федерация. Устройство для контроля углового положения дифракционных порядков дифракционных элементов (варианты) [Текст] / А. Г. Полещук, **Д. А. Белоусов** // № 2016121799; Заявл. 01.06.2016; Опубл. 26.10.2017, Бюл. № 30.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, трёх приложений, и списка цитируемой литературы, содержащего 229 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 178 страниц и включает 79 рисунков и 7 таблиц.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ ОПЕРАТИВНОГО ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЭ

В настоящее время дифракционные оптические элементы должны не только давать возможность осуществлять преобразование исходного волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами, но и соответствовать жёстким требованиям по энергетической эффективности данного преобразования. Отклонение рельефа ДОЭ от расчётных значений приводит к искажению формируемого элементом волнового фронта и/или к снижению его энергетической эффективности. В связи с этим, одним из основных методов оценки качества как амплитудных, так и фазовых ДОЭ является использование оптической дифрактометрии [131-133,136], которая также применяется для контроля качества изготовления и подлинности защитных голограмм [124,134,135], а также в микроэлектронике для промышленного контроля размеров элементов при изготовлении интегральных микросхем [130,137-141]. Дифрактометрический метод контроля подразумевает измерение не самой структуры исследуемого элемента, а параметров излучения, дифрагированного на ней. Анализ дифракционной картины (пространственного распределения интенсивностей дифракционных порядков (ДП)) позволяет определить как дифракционную эффективность (ДЭ), так и параметры микрорельефа исследуемого элемента в локальной области, освещённой пробным лазерным пучком.

Падающий пробный световой пучок, пройдя или отразившись от периодической структуры элемента, дифрагирует на ней и раскладывается в пространстве в ряд дифракционных порядков, углы дифракции (a_m) которых определяются выражением:

$$a_m = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d} + \sin(\theta)\right), \tag{1.1}$$

где m – номер дифракционного порядка, λ – длина волны пробного пучка, d – период структуры в локально контролируемой области ДОЭ, θ – угол падения пробного пучка [142]. Мощность излучения P_m в дифракционном порядке с номером m зависит от глубины и формы рельефа в исследуемой области, а величина дифракционной эффективности для каждого дифракционного порядка определяется, как:

$$\eta_m(x, y) = \frac{P_m(x,y)}{P_{in}}, \tag{1.2}$$

где P_{in} – мощность пробного пука. Как следует из выражения 1.1, измерив пространственное распределение дифракционных порядков и зная длину волны пробного пучка, можно определить период структуры в локально исследуемой области ДОЭ (а также угловую ориентацию структуры), а анализ интенсивностей ДП позволяет определить глубину и форму рельефа [130,133-135,139].

Сканирование ДОЭ пробным лазерным пучком позволяет построить карты распределения ДЭ и основных параметров микрорельефа по всей его площади [124,131-135]. При этом размер локально контролируемой области в каждой точке ДОЭ определяется размером пробного пучка на поверхности исследуемого элемента. Выбор размера контролируемой области является важной задачей при осуществлении дифрактометрического контроля. Во-первых, для эффективной дифракции на микрорельефе ДОЭ размер пробного пучка должен превышать величину максимально контролируемого периода исследуемого элемента не менее чем в 5 раз. Во-вторых, уменьшение локально контролируемой области приводит к пропорциональному увеличению времени при сканировании всей площади элемента, а увеличение – к ухудшению разрешения системы.

Проблемой при создании автоматических устройств для реализации дифрактометрического контроля широкого класса элементов дифракционной оптики является сложная структура микрорельефа этих элементов. В различных локальных областях ДОЭ его структура, как правило, имеет различную угловую ориентацию, а её период нередко отличается в десять и более раз, при том, что его минимальная величина может быть соизмерима с длиной волны пробного пучка.

Из выражения 1.1 следует, что при нормальном падении пробного пучка на периодическую структуру, углы дифракции соответствующих положительных (m) и отрицательных (-m) дифракционных порядков равны между собой по величине, но противоположны по знаку. При этом количество как положительных, так и отрицательных ДП увеличивается с ростом контролируемого периода. Максимальный номер ДП |m| в дифракционной картине соответствует целой части от величины d/λ. Минимальный угол отклонения дифрагированного излучения от оптической оси соответствует нулевому ДП и равен 0°, а максимальный может достигать ±90°. В связи с этим, для осуществления автоматического контроля дифрактометрическим методом на одном устройстве элементов с широким диапазоном изменения периодов необходимо регистрировать дифракционную картину в максимально возможном диапазоне углов дифракции и в диапазоне 0°–360° по азимутальному углу ориентации ДК.

Автоматические системы, реализующие дифрактометрический метод, можно разделить на два типа: системы со сканирующей [124,135,143-146] и статичной [132,133] регистрацией ДК. В устройствах первого типа, как следует из названия, регистрация дифракционной картины осуществляется с помощью дополнительной сканирующей системы. Технически это может быть реализовано несколькими способами: регистрацией ДК с помощью сканирующего светочувствительного датчика (фотодетектора, матрицы фотодетекторов или светочувствительной матрицы); регистрацией ДК статично установленными светочувствительными датчиками с изменением угла падения пробного пучка (вращение источника излучения); регистрацией ДК статично установленными светочувствительными датчиками с вращением исследуемого ДОЭ (вращение элемента). Возможна и смешанная реализация регистрирующей системы (с двойным и более сканированием), в которой, например, вращение исследуемого элемента используется вместе со сканированием ДК светочувствительным датчиком. Так как в таких системах регистрация дифракционной картины чаще всего осуществляется с помощью фотодетектора (или матрицы фотодетекторов), их преимуществом является широкий динамический диапазон измеряемой интенсивности ДП. Очевидным недостатком таких систем можно выделить низкую скорость выполняемых измерений. Особенно это актуально при необходимости регистрации ДК от структур с произвольной угловой ориентацией на исследуемом элементе. В таком случае необходимо осуществлять регистрацию дифрагированного излучения в диапазоне 0°–360° по азимутальному углу ориентации ДК, из-за чего процесс измерения в одной локально контролируемой области может достигать нескольких минут. В связи с этим, такие системы чаще всего используются с целью локального контроля серийно выпускаемых ДОЭ, для которых известны параметры структур в каждой локально контролируемой области или для элементов, ДК которых лежит вдоль одной линейной координаты сканирования фотодетектора.

В автоматических системах со статичной регистрацией дифракционной картины, как правило, используется закреплённая видеокамера (или несколько видеокамер) с проекционным объективом. Главным преимуществом таких систем является скорость регистрации пространственного распределения ДП. Одной из основных проблем при реализации данного технического решения является регистрация дифракционной картины в широком диапазоне углов дифракции. Дифрагированное излучение, распространяющееся в пространстве в широком угловом диапазоне, регистрируется статично установленной видеокамерой с проекционным объективом лишь частично. Максимально регистрируемый угол дифракции в таком случае определяется числовой апертурой используемого объектива и его расстоянием от исследуемого ДОЭ. Таким образом, увеличения телесного угла регистрируемой дифракционной картины можно добиться, используя широко апертурный объектив, расположенный максимально близко к исследуемому элементу. Пример такой автоматической системы для контроля ДОЭ в прошедшем свете, позволяющей регистрировать излучение в диапазоне углов дифракции ~ ±65°, представлен в работе [133]. Очевидным недостатком данного технического решения можно выделить невозможность подобной конфигурации измерительной системы для регистрации ДК в широком угловом диапазоне дифрагированного излучения в отражённом от ДОЭ свете, так как в таком случае нет возможности подвести проекционный объектив достаточно близко к исследуемому элементу.

Более универсальным методом расширения углового диапазона регистрируемых дифракционных порядков является использование рассеивающего экрана, расположенного между исследуемым элементом и проекционным объективом видеокамеры (рис. 1.1). Данное техническое решение позволяет разрабатывать системы для контроля элементов, работающих как в прошедшем, так и в отражённом свете. Впервые автоматическое устройство для анализа пространственного распределения интенсивностей ДП с использованием плоского рассеивающего экрана было представлено в работе [132].

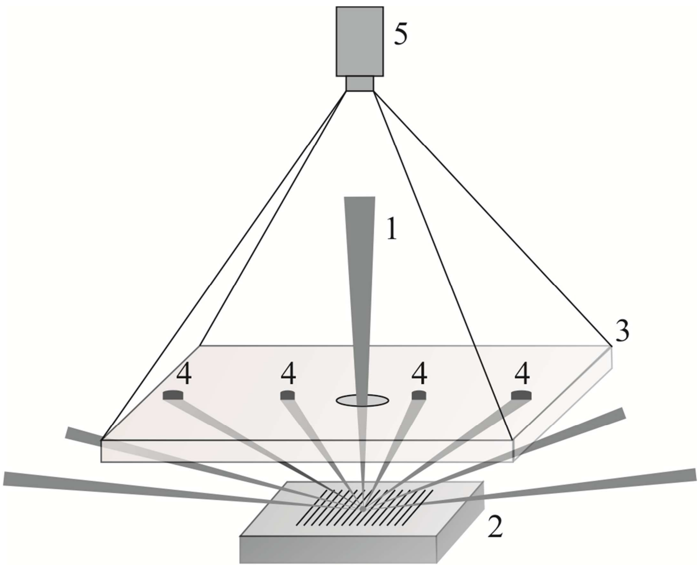


Рис. 1.1. Использование плоского рассеивающего экрана для увеличения регистрируемого телесного угла дифрагированного излучения в отражённом свете: 1 – излучение пробного пучка; 2 – исследуемый элемент; 3 – плоский рассеивающий экран; 4 – регистрируемые дифракционные порядки; 5 – видеокамера с проекционным объективом

Однако использование плоского рассеивающего экрана при регистрации ДК в широком угловом диапазоне обладает рядом недостатков. Во-первых, для того, чтобы обеспечить расхождение дифракционных порядков на рассеивающем экране друг относительно друга (в случае регистрации дифракционной картины в отражённом свете, с учётом наличия в экране отверстия для ввода излучения, необходимо обеспечить ещё и попадание первых порядков дифракции всей площадью на поверхность рассеивающего экрана), он должен располагаться в некотором отдалении от исследуемого элемента. Это, в свою очередь, неизбежно приводит к уменьшению регистрируемого углового диапазона или к значительному увеличению габаритных размеров установки. Во-вторых, оптический путь, пройденный дифрагированным излучением от ДОЭ до экрана, зависит от угла дифракции. При нормальном падении пробного пучка, нулевой порядок дифракции пройдёт в L раз меньшее расстояние до рассеивающего экрана, по сравнению с дифракционным порядком, который отклонился на угол α от оптической оси, где:

$$L = \frac{1}{\cos(\alpha)}\,. \tag{1.3}$$

В связи с тем, что для сканирования исследуемой структуры ДОЭ чаще всего используется сфокусированное излучение пробного пучка, увеличение пройденного оптического пути приводит к увеличению размеров пятна и вытягиванию его в эллипс на поверхности рассеивающего экрана. Таким образом, с увеличением угла дифракции, интенсивность регистрируемого дифрагированного излучения распределяется по пучку большей площади. Коэффициент отражения от поверхности рассеивающего экрана, который чаще всего изготавливается из матированного или крашеного стекла, напрямую зависит от угла дифракции α, и увеличивается вместе с ростом угла падения ДП на его поверхность. Из формулы 1.1 следует, что, чем выше |m|, тем больше ДП отклоняется от оптической оси. Как правило, первые порядки дифракции обладают более высокой интенсивностью, по сравнению с порядками с большим номером |m|. С учётом вышесказанного можно сделать вывод о том, что в процессе контроля ряда ДОЭ рассеянное на плоском экране дифрагированное излучение (для ДП с высоким порядковым номером |m|) не будет иметь достаточно высокий уровень интенсивности, для осуществления его регистрации видеокамерой при углах дифракции, превышающих величину ~ 70°.

В данной главе описаны предложенные оптические схемы и устройства, позволяющие с помощью статично закреплённой видеокамеры (или нескольких видеокамер) осуществлять регистрацию ДК в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла ориентации ДП 0°–360°. Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах [143-156].

1.1. Увеличение углового диапазона видеорегистрации дифракционной картины с помощью использования объёмного рассеивающего экрана

Для расширения углового диапазона автоматически регистрируемой дифракционной картины при контроле ДОЭ, работающих в прошедшем или в отражённом свете, до величины не менее чем ± 80°по углу дифракции и 0°–360° по углу ориентации ДК, было предложено использовать объёмный рассеивающий экран, расположенный между исследуемым элементом и системой видеорегистрации [147-153]. Использование объёмного рассеивающего экрана даёт возможность расположить его максимально близко к исследуемому элементу, избегая контакта экрана со структурой ДОЭ во время сканирования образца. Это позволяет обеспечить попадание на его поверхность дифракционных порядков в широком диапазоне углов дифракции, а также обеспечить достаточное расстояние от исследуемого элемента до экрана для расхождения порядков друг относительно друга. Важно отметить, что при использовании объёмного рассеивающего экрана кривизна поверхности, с которой регистрируется дифракционная картина, и параметры используемого проекционного объектива должны выбираться из условия обеспечения достаточной глубины резкости для захвата видеокамерой контрастного изображения. Ниже приведены результаты исследования объёмных рассеивающих экранов различной конфигурации, позволяющих регистрировать дифракционную картину в заявленном угловом диапазоне.

1.2. Рассеивающий экран полусферической формы

Для начала рассмотрим использование рассеивающего экрана, имеющего форму полусферы [147]:

$$\begin{cases} z^2 = r^2 - x^2 - y^2 \\ z \in [0; r] \end{cases}. \tag{1.4}$$

Пробный пучок фокусируется на поверхности исследуемого ДОЭ в центре радиуса кривизны полусферического рассеивающего экрана (рис 1.2). При нормальном падении пробного пучка на исследуемый ДОЭ, полусферический экран является осесимметричным относительно оптической оси. Из этого следует, что параметры зарегистрированных дифракционных порядков зависят только от модуля угла дифракции и не зависят от угла ориентации ДК. В связи с этим, для простоты дальнейших рассуждений, будем рассматривать разложение ДП лишь для одной угловой ориентации ДК, лежащей в плоскости XZ, в которой полусфера представляет собой половину окружности с радиусом r (рис 1.3).

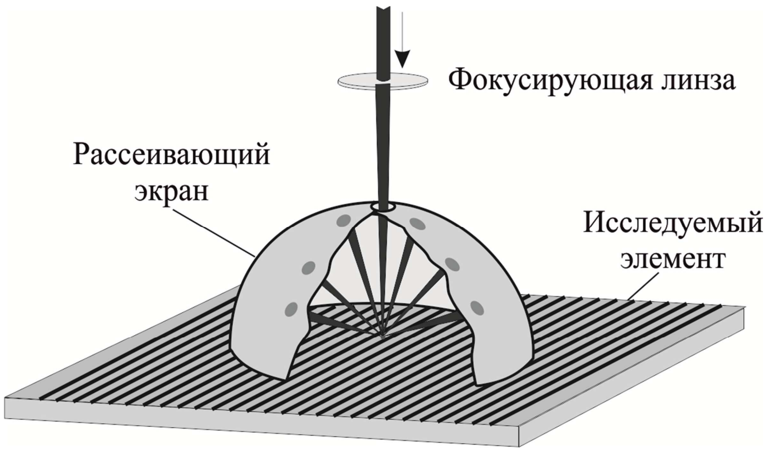


Рис. 1.2. Использование полусферического рассеивающего экрана для увеличения углового диапазона регистрируемой дифракционной картины в отражённом свете

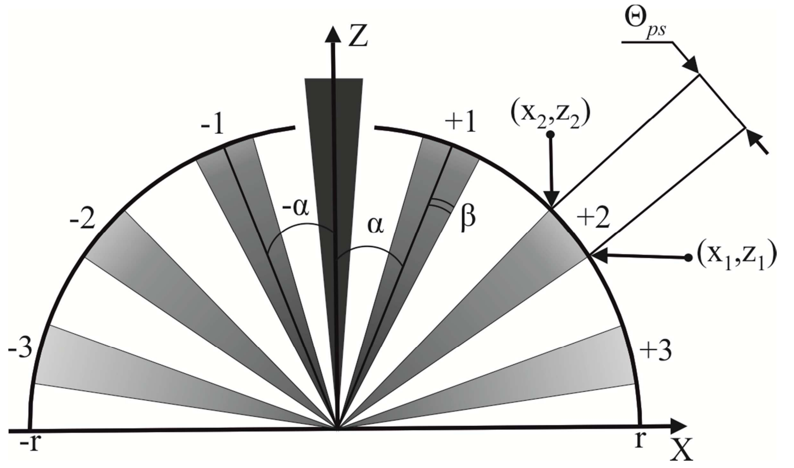


Рис. 1.3. Проецирование дифрагированного излучения на поверхность полусферического рассеивающего экрана в плоскости XZ

Координаты границ (краевых точек) ДП на поверхности полусферического рассеивающего экрана (x_1,z_1) и (x_2,z_2) в зависимости от угла дифракции α можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} z_{1,2} = \sqrt{r^2 - x_{1,2}^2} \\ x_1 = z_1 * tg(\alpha + \beta) \\ x_2 = z_2 * tg(\alpha - \beta) \end{cases}, \tag{1.5}$$

где β – угол расходимости пучка. Так как пробный пучок сфокусирован в центре радиуса кривизны рассеивающего экрана, выполненного в форме полсферы, то размер ДП на его поверхности не зависит от угла дифракции α, а зависит только от пройденного оптического пути (радиуса полусферы r) и угла расходимости β:

$$\Theta_{ps} = 2 * r * \beta, \tag{1.6}$$

Рассмотрим вариант регистрации ДК одной видеокамерой, установленной над полусферическим рассеивающим экраном вдоль оси его симметрии. В таком случае, ДП с поверхности рассеивающего экрана, проецируются объективом на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры X'Y', которая параллельна плоскости XY. Размер светочувствительной матрицы для простоты примем равным 2r (рис. 1.4).

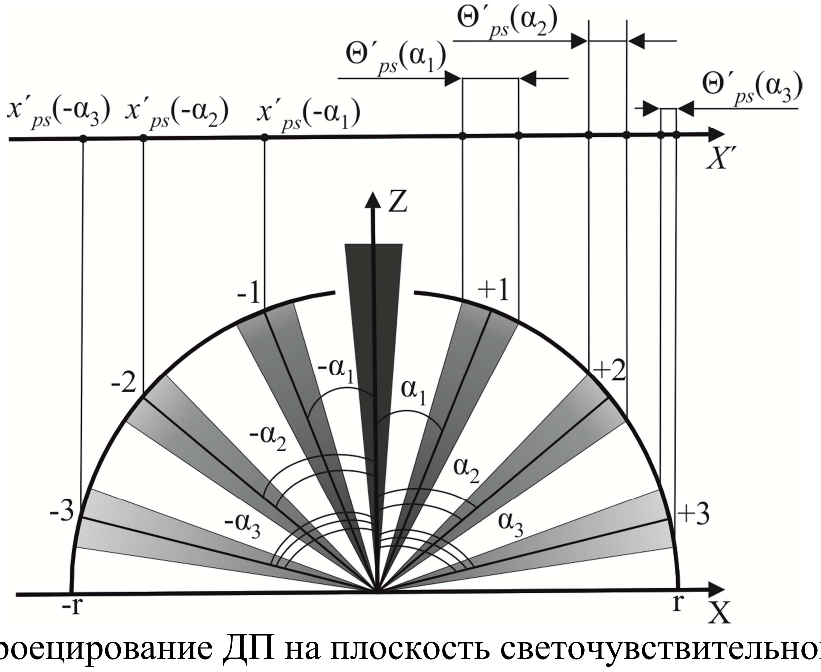


Рис. 1.4. Проецирование ДП на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры X'Y' с поверхности полусферического рассеивающего экрана

Тогда размер дифракционных порядков в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры можно записать как:

$$\Theta'_{ps} = |x_1 - x_2| \,, \tag{1.7}$$

где x_1 и x_2 – координаты границ ДП на поверхности полусферического экрана (рис. 1.3), которые можно определить из системы уравнений (1.5). Таким образом, дифракционные порядки, имеющие одинаковый размер на поверхности полусферического экрана, на зарегистрированной дифракционной картине уменьшаются с увеличением угла дифракции (рис. 1.5).

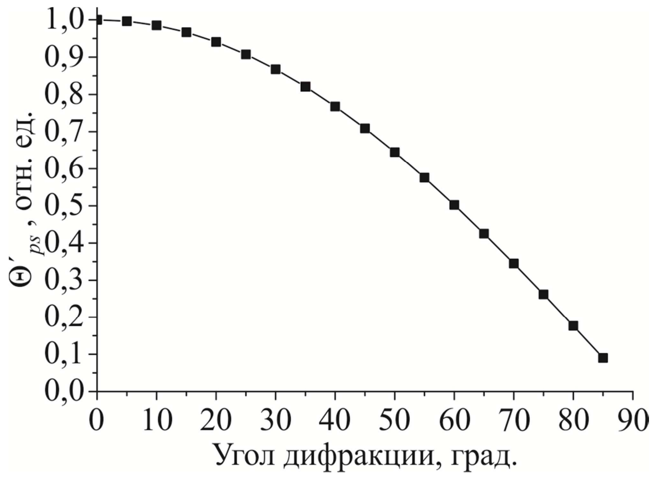


Рис. 1.5. Размер ДП в плоскости светочувствительной матрицы при регистрации дифракционной картины с поверхности полусферического рассеивающего экрана одной видеокамерой

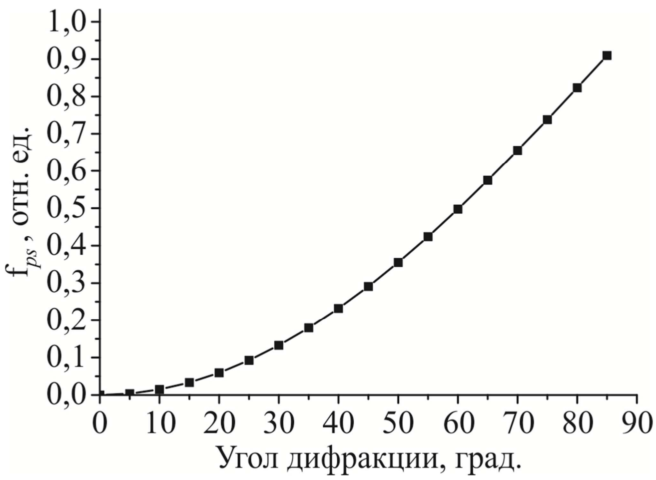


Рис. 1.6. Искажение поперечного размера ДП, при регистрации ДК с поверхности полусферического рассеивающего экрана одной видеокамерой

Это приводит к искажениям зарегистрированных дифракционных порядков (рис. 1.6), величина которых может быть определена из выражения:

$$f_{ps} = 1 - \frac{\Theta'_{ps}}{\Theta_{ps}} = 1 - \frac{90*|x_1 - x_2|}{r*\beta*\pi}. \quad (1.8)$$

Любые искажения регистрируемой дифракционной картины, в свою очередь, могут влиять на точность определения периода в локально контролируемой области исследуемого элемента по анализу пространственного распределения ДП.

Теперь рассмотрим, как расположены координаты центров дифракционных порядков в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры x'_{ps} (рис. 1.4). Для этого в систему уравнений (1.5) подставим значение β равное нулю и перепишем её в следующем виде:

$$\begin{cases} z^2 = \sqrt{r^2 - {x'_{ps}}^2} \\ x'_{ps} = z * tg(\alpha) \end{cases}. \quad (1.9)$$

Из системы уравнений (1.9) следует, что, при определении углового распределения ДП по анализу ДК, зарегистрированной одной видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана для углов дифракции, превышающих величину 60°, разрешение системы резко ухудшается (рис. 1.7).

На рис. 1.8 представлена ДК в отражённом свете от дифракционной решётки с периодом 1.5 мкм, зарегистрированная видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана (радиус кривизны полусферического сегмента r = 23 мм, высота рассеивающего экрана 22мм). Расстояние от исследуемого объекта до нижнего основания экрана в эксперименте ~1 мм (пробный пучок сфокусирован в центре радиуса кривизны полусферического сегмента), длина волны пробного пучка 635 нм. В центре экрана выполнено отверстие диаметром 5 мм, через которое (с помощью поворотной призмы), излучение пробного пучка попадаете на структуру исследуемой решётки. На зарегистрированной ДК видно, что ДП, отклонившиеся на углы дифракции ±57.9°, располагаются на рассеивающем экране достаточно близко к границе видимой области видеокамеры. Это подтверждает выводы, полученные в результате моделирования о том, что при углах дифракции ~60° и выше, разрешение системы резко ухудшается, а расстояние между центрами ДП в плоскости светочувствительно матрицы для данной области настолько мало, что может приводить к их слиянию на зарегистрированной дифракционной картине. При этом участок близкий к линейному, при определении центров дифракционных порядков лежит в диапазоне углов дифракции ~ ±45° (рис. 1.7).

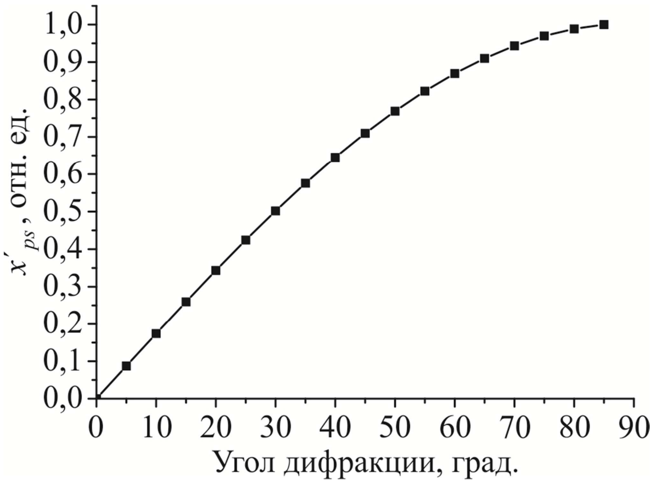


Рис. 1.7. Координаты центров ДП в плоскости светочувствительной матрицы при регистрации дифракционной картины с поверхности полусферического рассеивающего экрана одной видеокамерой

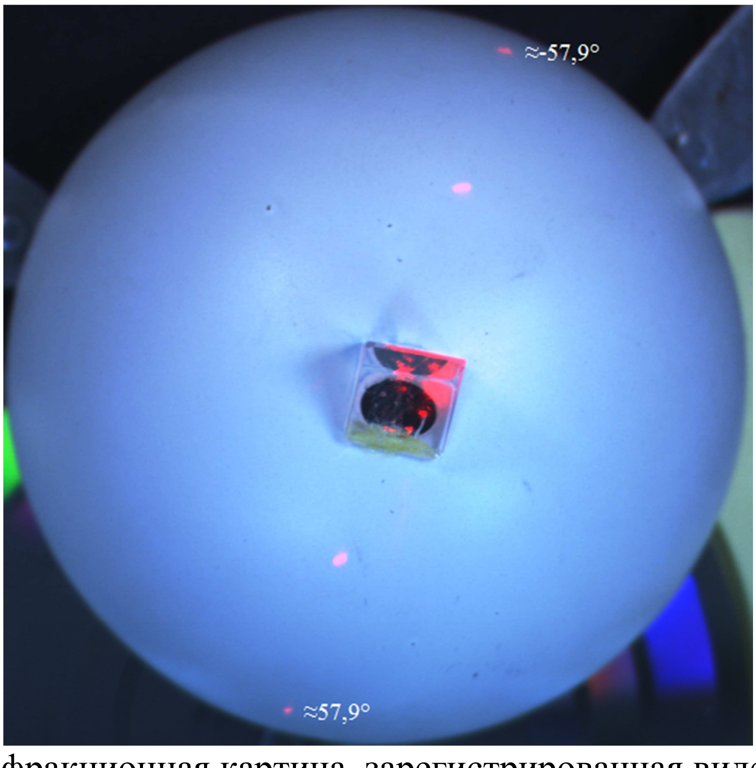


Рис. 1.8. Дифракционная картина, зарегистрированная видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана

Полученные результаты свидетельствует о том, что использование полусферического рассеивающего экрана и одной видеокамеры позволяет регистрировать ДК с точностью, достаточной для анализа пространственного распределения ДП (с целью последующего определения периода элемента в контролируемой области), лишь в диапазоне углов дифракции ~ ±60°. Таким образом, при использовании полусферического рассеивающего экрана для регистрации дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360° не достаточно одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана. Учитывая тот факт, что при определении центров ДП, участок близкий к линейному лежит в диапазоне углов дифракции ~ ±45°, достаточным является использование четырёх видеокамер, расположенных вокруг полусферического экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии.

1.2.1. Устройство для регистрации дифракционной картины в отражённом свете с использованием полусферического рассеивающего экрана

По результатам проведённого исследования, была реализована следующая схема устройства для регистрации и анализа пространственного распределения дифракционных порядков ДОЭ (рис. 1.9), в которой при регистрации ДК в отражённом свете используется полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами, расположенными вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии [148,149]. Внешний вид созданного устройства представлен на рис. 1.10. На рис. 1.9 и рис. 1.10 используются следующие обозначения: 1 – источник излучения; 2 –фокусирующий объектив; 3 – входное отверстие; 4 – полусферический рассеивающий экран; 5 – исследуемый элемент; 6 – XY-координатная система; 7 – Z-координатный столик; 8 – объектив; 9 – видеокамера; 10 – контролер лазерного модуля; 11 – контролер XY-координатной системы; 12 – управляющий компьютер. Зелёными пунктирными линиями на рис. 1.9 показано угловое поле зрения видеокамер в плоскости рисунка.

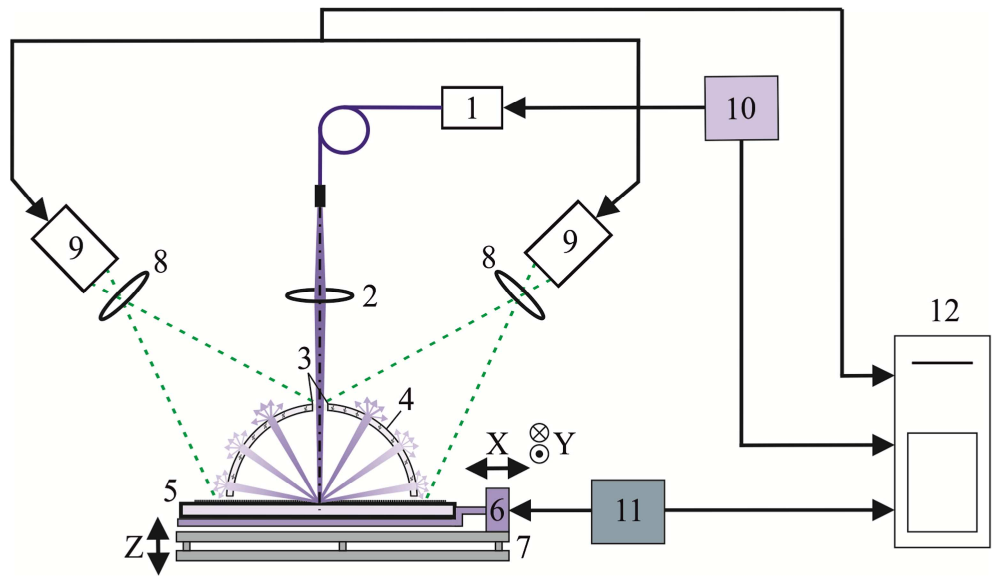


Рис. 1.9. Упрощённая схема устройства дифрактометрического контроля параметров ДОЭ по анализу ДК в отражённом свете

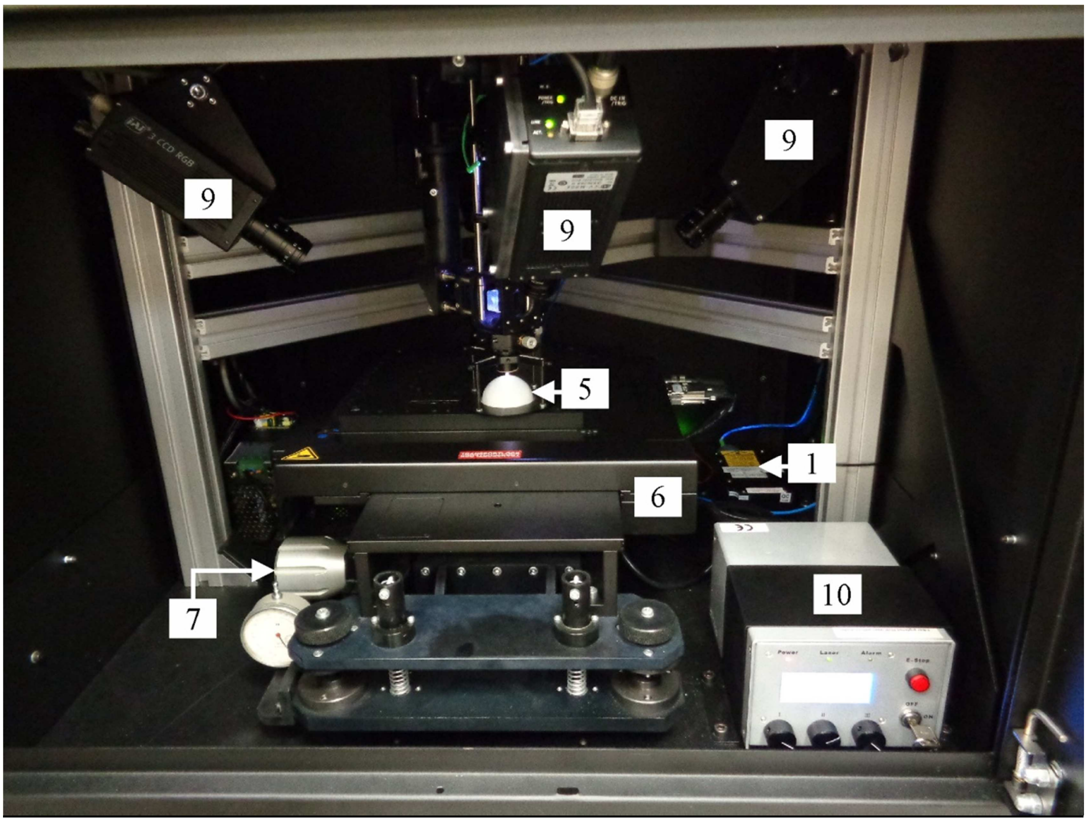


Рис. 1.10. Внешний вид устройства дифрактометрического контроля параметров ДОЭ, в котором при регистрации ДК в отражённом свете используется полусферический рассеивающий экран

Принцип работы системы, можно описать следующим образом. Излучение пробного пучка, генерируемое лазерным источником, с помощью фокусирующего объектива проходит через входное отверстие в рассеивающем экране и фокусируется на исследуемом элементе, который установлен на XY-координатной системе позиционирования, обеспечивающей диапазон сканирования 208х208 мм. Для измерения ДОЭ с различной толщиной подложки, XY-координатная система установлена на Z-координатном столике, что позволяет регулировать расстояние до рассеивающего экрана в диапазоне 25 мм. Дифрагированное от периодической структуры элемента излучение попадает на поверхность рассеивающего экрана и регистрируется четырьмя видеокамерами с проекционными объективами, установленными вокруг рассеивающего экрана. Видеокамеры установлены таким образом, что каждая из них контролирует отдельный сектор рассеивающего экрана, который составляет 90° по азимутальному углу и ~ 85° по углу дифракции. Изображения, зарегистрированные всеми четырьмя видеокамерами, передаются на управляющий компьютер, где осуществляется их дальнейшая обработка. Для расширения динамического диапазона системы, с целью анализа всех видимых дифракционных порядков, регистрация ДК в каждой локальной области исследуемого элемента осуществляется путём захвата и совместной обработки нескольких изображений, полученных при различном времени экспозиции видеокамер.

Расстояние от исследуемого объекта до нижнего основания экрана составляет ~1 мм. В разработанном устройстве используется полусферический рассеивающий экран со следующими параметрами: радиус кривизны полусферического сегмента $r = 23$ мм; высота экрана 22 мм (высота полусферического экрана уменьшена на 1 мм по сравнению с величиной r для обеспечения фокусировки пробного пучка в центре радиуса его кривизны); диаметр отверстия для ввода излучения 2 мм. Калибровка устройства перед началом работы, представляет собой сканирование 36 линейных амплитудных дифракционных решёток с периодом 4.5 мкм, с последующей регистрацией дифракционных картин и определением координат центров всех видимых дифракционных порядков для каждой тестовой структуры. Угол ориентации каждой последующей эталонной дифракционной структуры отличается от предыдущей на 5°. Калибровочные структуры были записаны методом прямой безрезистной лазерной записи на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в ИАиЭ СО РАН [98]. В разработанном устройстве используется источник излучения с оптоволоконным выходом, объединяющий три лазерных источника с длинами волн 447 нм, 532 нм и 643 нм. При калибровке системы используется пробный пучок с длинной волны 447 нм. Таким образом, полученная калибровочная сетка соответствует угловому диапазону регистрируемых углов дифракции 5.7°–83.4°. Калибровочные сетки, полученные для всех четырёх видеокамер, представлены на рис. 1.11, где зелёными кружками отмечены координаты центров зарегистрированных дифракционных порядков калибровочных структур с различной угловой ориентацией.

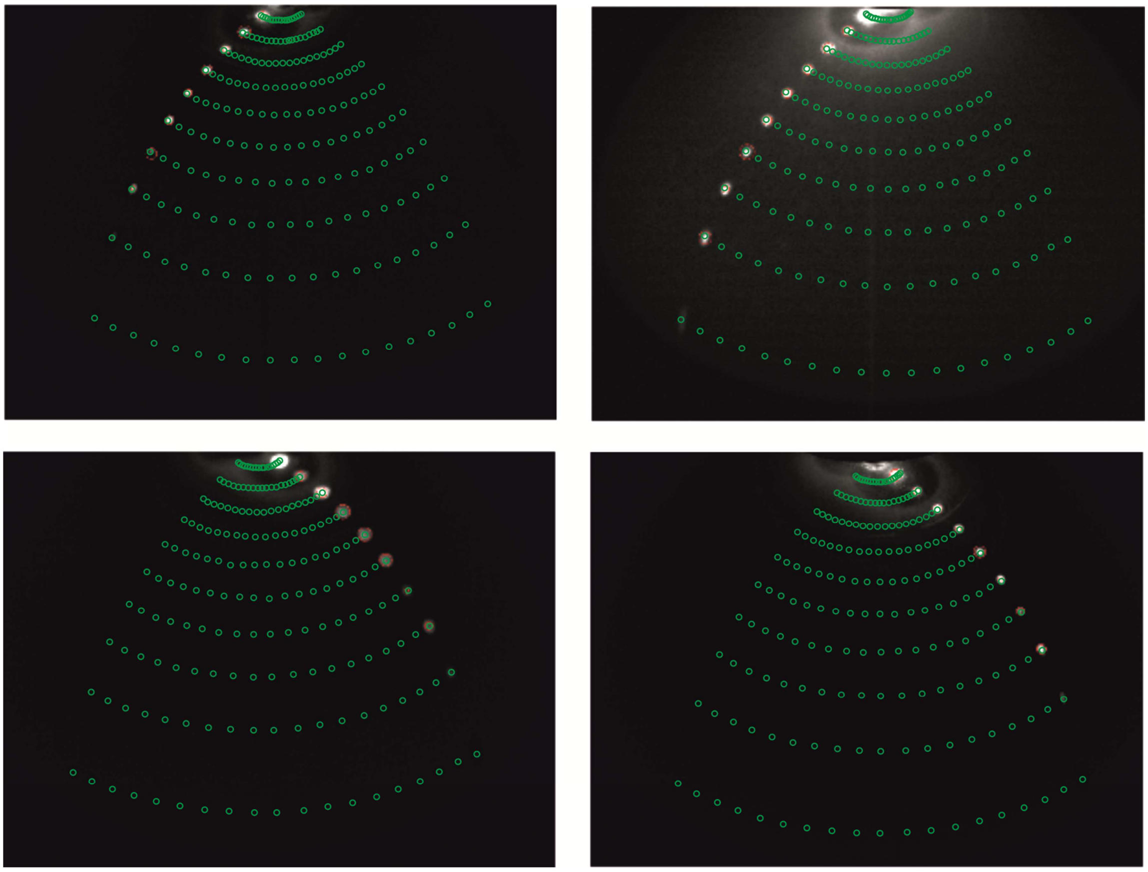


Рис. 1.11. Калибровочные сетки угловых координат для каждой из четырёх видеокамер

Использование трёх длин волн позволяет расширить диапазон измеряемых периодов на данном устройстве. Откалиброванный угловой диапазон регистрируемых ДП, соответствует диапазону измеряемых периодов 0.45–4.5 мкм для длины волны 447 нм, 0.54–5.36 мкм для длины волны 532 нм и 0.65–6.47 мкм для длины волны 643 нм. Для регистрации дифракционной картины используются четыре 3CCD-видеокамеры JAI CV-M9 GE с проекционными объективами KOWA LM25NC3. Использование данных 3CCD-видеокамер (RGB Color Cameras) позволяет осуществлять одновременную регистрацию дифракционных картин на всех длинах волн используемого источника излучения, а в процессе обработки разделять изображения зарегистрированные синим, зелёным и красным каналами. Каждая видеокамера контролирует свой азимутальный угловой сектор, в котором каждому пикселю светочувствительной матрицы соответствует определённый калибровкой угол ориентации и угол дифракции α. Для регистрации всех дифракционных порядков захват изображения в каждой точке осуществляется при нескольких значениях времени экспозиции. После определения по зарегистрированной дифракционной картине углов дифракции и порядковых номеров всех ДП, период исследуемой структуры для каждого дифракционного порядка определяется из уравнения дифракционной решётки:

$$d = \frac{m\lambda}{\sin(a_m)}\,. \tag{1.10}$$

Результирующее значение периода в локальной области исследуемого элемента определяется путём усреднения измеренных значений периодов по всем зарегистрированным дифракционным порядкам. При этом если в исследуемое поле пробного пучка попало несколько периодических структур, то их разделение между собой осуществляется по измеренным параметрам угловой ориентации решёток (по азимутальному углу ориентации ДП в дифракционной картине).

На рис. 1.12 показан пример сканирования на разработанном устройстве пробным пучком с длиной волны 447 нм области, размером 2670x300 мкм, в которой располагалось 9 эталонных дифракционных структур с периодами от 0.5 до 4 мкм. Диаметр пробного пучка составлял 25 мкм, а шаг сканирования 10 мкм. По карте отклонения измеренных значений от эталонных, представленной на рис. 1.12б, видно, что максимальное отклонение измеренного периода от эталонных значений составило ~ 4% (на краях решётки с периодом 4 мкм).

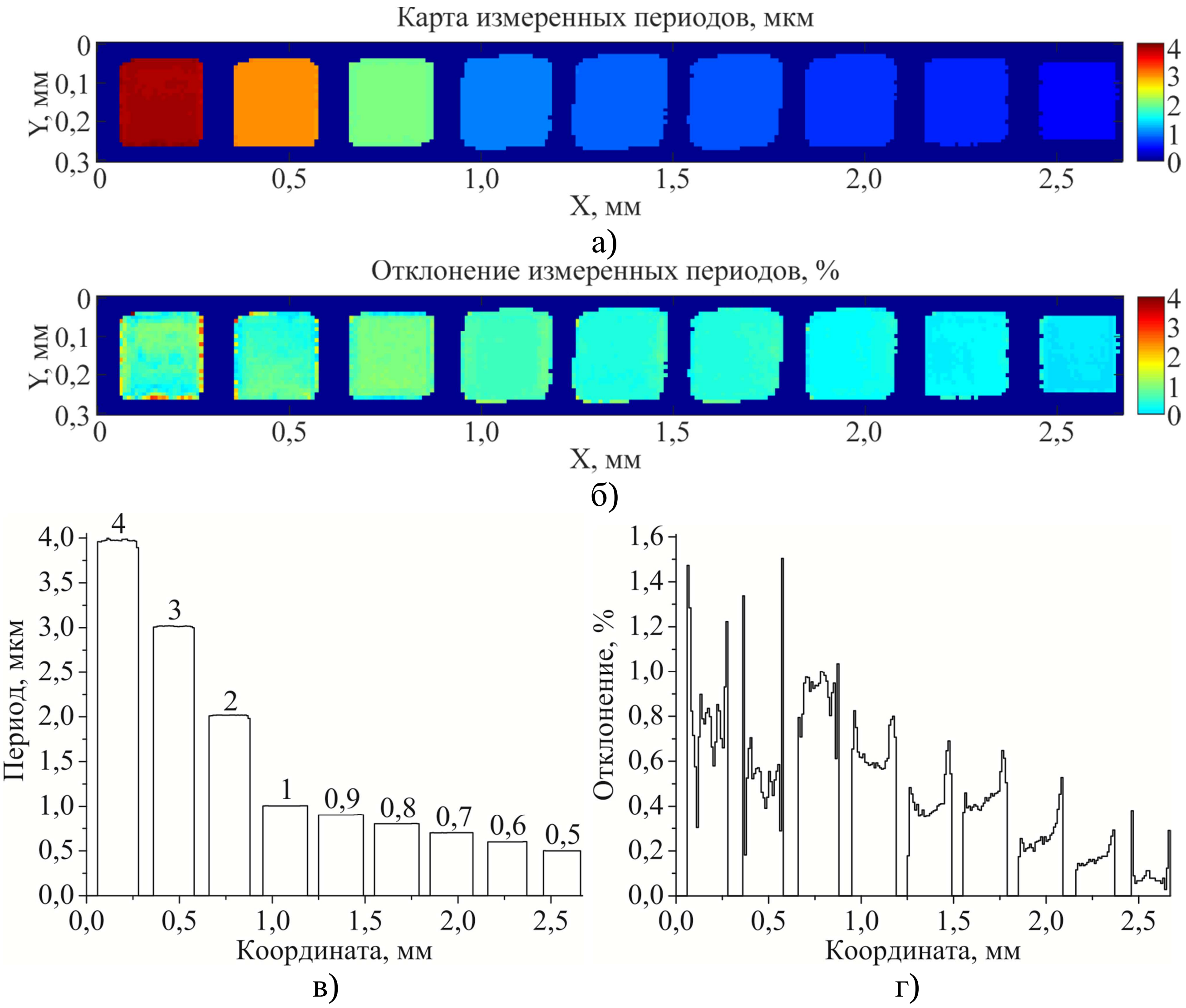


Рис. 1.12. Измерение периодов эталонных структур на разработанном устройстве: а) карта измеренных периодов; б) карта отклонения измеренных периодов от эталонных значений; в) измеренные периоды вдоль центральной линии области сканирования (сверху подписаны значения периодов эталонных структур в измеряемых областях); г) отклонение измеренных значений вдоль центральной линии области сканирования

На рис. 1.12б и рис. 1.12г можно заметить, что максимальная погрешность измерения сосредоточена на краях исследуемых решёток там, где пробный пучок попадает на исследуемую структуру не всей площадью. При этом с уменьшением периода ошибка измерения на краю исследуемых структур уменьшается до величины ~ 0.4% для периода 0.5 мкм. Максимальное отклонение измеренных значений в тех областях, где пробный пучок всей площадью попадает на исследуемую структуру, составляет около 1% для диапазона периодов 2–4 мкм, и снижается при уменьшении исследуемых периодов в диапазоне от 1 до 0.5 мкм до величины ~ 0.1%.

Увеличение отклонения измеренных периодов в областях, где пробный пучок частично (не всей площадью) попадает на исследуемую структуру можно объяснить эффектами «дифракции на краю», приводящих к искажению формы регистрируемых дифракционных порядков. Это, в свою очередь, приводит к ошибке определения центров ДП и, следовательно, к ошибке определения периода структур. Кроме того, увеличение погрешности измерения на краю исследуемых решёток и повышение точности измерения при уменьшении исследуемых периодов связано с нелинейность функции синуса в уравнении 1.10.

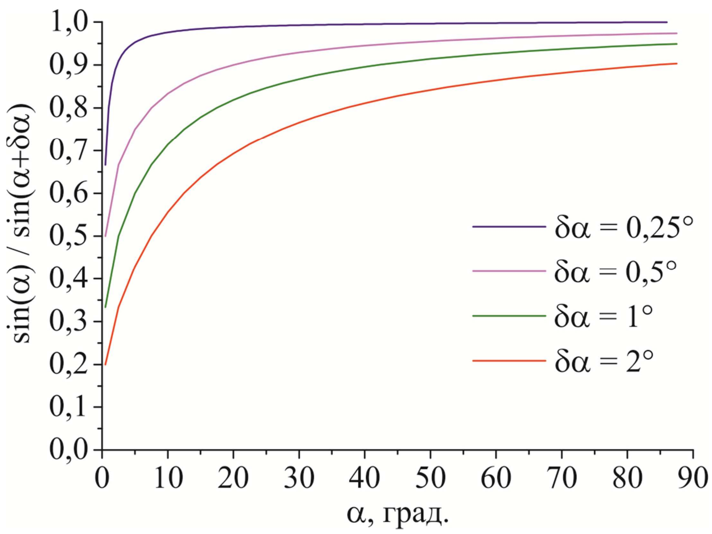


Рис. 1.13. Влияние ошибки определения угла дифракции α на величину sin(α)

На рис. 1.13 показано, что с увеличением угла дифракции, функция синуса менее чувствительна к ошибке его определения (δα). Первые порядки дифракции отклоняются под меньшими углами, по сравнению с ДП с большим порядковым номером |m|. Когда пробный пучок попадает на исследуемую структуру не всей площадью, а лишь на её край, интенсивность дифракционных порядков с большим порядковым номером |m| слишком мала, для возможности их регистрации видеокамерой. В связи с этим, на краю структуры, определение периода осуществляется только по первым (зарегистрированным) порядкам дифракции. С учётом нелинейности функции синуса, уменьшение угла дифракции зарегистрированных дифракционных порядков приводит к дополнительной погрешности определения периода по анализу ДК. Отсутствие в зарегистрированной дифракционной картине ДП с большими порядковыми номерами |m| (в случае их малой интенсивности), а, соответственно, и с большими углами дифракции, по сравнению с зарегистрированными ДП, является одной из причин увеличения пиковых значений отклонения значений измеренного периода на краю исследуемых решёток (рис. 1.12б и рис. 1.12г). Кроме того, при увеличении периода исследуемого элемента дифракционные порядки отклоняются под меньшими углами, по сравнению с дифракционными порядками с тем же порядковым номером |m| для структур с меньшим периодом (при их наличии в ДК). Это объясняет тот факт, что с ростом исследуемого периода возрастает и ошибка его определения по анализу зарегистрированной ДК.

Учитывая вышесказанное, оптимальным алгоритмом, позволяющим повысить точность определения периодов исследуемых структур по анализу дифракционной картины в широком угловом диапазоне, является регистрация всех видимых дифракционных порядков с последующим определением периодов исследуемых структур по тем ДП, которые имеют максимальный порядковый номер |m|, или, другими словами, максимальный угол дифракции.

1.3. Рассеивающие экраны асферической формы

Для регистрации дифракционной картины с использованием всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана, в рамках данной работы было проведено исследование рассеивающих экранов, имеющих асферическую форму [147]. С учётом результатов полученных в разделе 1.2 для исследования были выбраны две формы асферических рассеивающих экранов, условно обозначенных в дальнейшем как «экран №1» и «экран №2» (рис. 1.14). Экран №1 представляет собой сегмент полусферического экрана, в котором возможна регистрация пространственного распределения ДП с точностью, достаточной для определения периодов ДОЭ, то есть сегмент полусферического экрана, ограниченный угловым диапазоном ±60° от оси его симметрии. Для обеспечения одинаковой высоты исследуемых экранов, радиус кривизны данного экрана составляет 2r, где r – радиус кривизны полусферического рассеивающего экрана, описанного в разделе 1.2:

$$\begin{cases} z_{rps}^2 = (2*r)^2 - x_{rps}^2 - y_{rps}^2 \\ z_{rps} \in [r; 2r] \end{cases}. \quad (1.11)$$

При использовании экрана №1 пробный пучок фокусируется на исследуемом элементе не в центре радиуса его кривизны. В связи с этим, несмотря на то, что сам экран представляет собой сегмент сферы, в оптической схеме его можно считать асферическим, так как оптический путь дифрагированного на периодической структуре ДОЭ излучения до поверхности рассеивающего экрана зависит от угла дифракции.

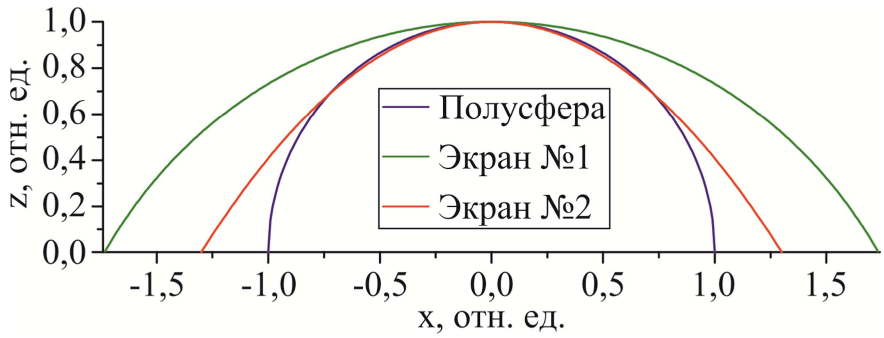


Рис. 1.14. 2D-проекции форм исследуемых рассеивающих экранов

Экран №2 представляет собой сегмент параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне ±45° от оси его симметрии приближена к форме полусферического экрана, то есть к той области полусферического экрана, для которой функция определения центров ДП при регистрации ДК одной видеокамерой является близкой к линейной:

$$\begin{cases} z_{par} = r - \frac{x_{par}^2 + y_{par}^2}{1.69*r} \\ z_{par} \in [0; r] \end{cases}. \quad (1.12)$$

Оба асферических экрана, предложенных для исследования, имеют осесимметричную форму относительно оптической оси. Поэтому так же, как и для полусферического экрана, ниже можно рассматривать разложение ДП лишь для одной угловой ориентации ДК, лежащей в плоскости XZ.

Координаты центров ДП в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности рассеивающего экрана №1 можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} z_{rps} = \sqrt{(2*r)^2 - {x'_{rps}}^2} - r \\ x'_{rps} = z_{rps} * tg(\alpha) \\ z_{rps} \in [0;r] \end{cases}, \tag{1.13}$$

а при регистрации дифракционной картины с поверхности рассеивающего экрана №2:

$$\begin{cases} z_{par} = r - \frac{{x'_{par}}^2}{1.69*r} \\ x'_{par} = z_{par} * tg(\alpha) \\ z_{par} \in [0;r] \end{cases}. \tag{1.14}$$

Из систем уравнений (1.13) и (1.14) следует, что функция преобразования углового распределения дифракционных порядков в декартовы координаты плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов близка к линейной, в широком диапазоне углов дифракции (рис. 1.15).

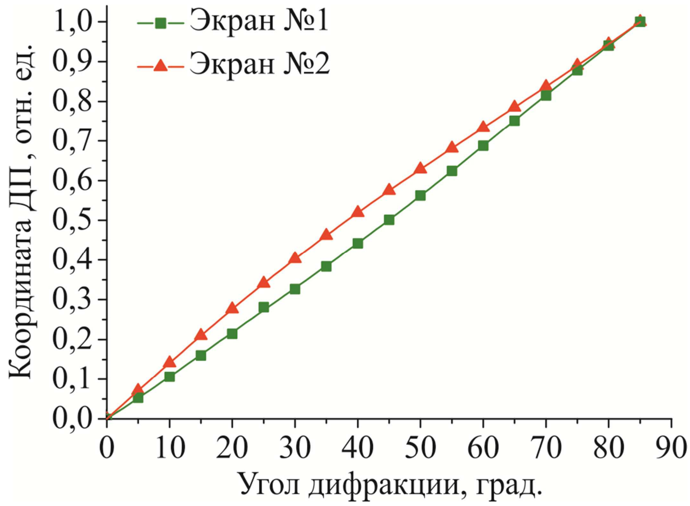


Рис. 1.15. Координаты центров ДП в плоскости матрицы видеокамеры при регистрации ДК с поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов

Однако, в отличие от экрана, имеющего форму полусферы, оптический путь от локально освещённой области на поверхности ДОЭ, в которой фокусируется излучение пробного пучка, до поверхности асферических рассеивающих экранов зависит от угла дифракции. В связи с этим, от угла дифракции зависит и размер дифракционных порядков на поверхности исследуемых асферических экранов. Координаты границ (краевых точек) дифракционных порядков на рассеивающем экране №1 в зависимости от угла дифракции α и угла расходимости излучения β (рис. 1.3) можно найти из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (z_{rps})_{1,2} = \sqrt{(2*r)^2 - (x_{rps}^2)_{1,2}} - r \\ (x_{rps})_1 = (z_{rps})_1 * tg(\alpha + \beta) \\ (x_{rps})_2 = (z_{rps})_2 * tg(\alpha - \beta) \\ (z_{rps})_{1,2} \in [0; r] \end{cases} . \qquad (1.15)$$

В свою очередь координаты краевых точек ДП на поверхности экрана №2 можно определить следующим образом:

$$\begin{cases} (z_{par})_{1,2} = r - \frac{(x_{par}^2)_{1,2}}{1.69*r} \\ (x_{par})_1 = (z_{par})_1 * tg(\alpha + \theta) \\ (x_{par})_2 = (z_{par})_2 * tg(\alpha - \theta) \\ (z_{par})_{1,2} \in [0; r] \end{cases} . \qquad (1.16)$$

Из систем уравнений (1.15) и (1.16) поперечные размеры дифракционных порядков на поверхности соответствующих рассеивающих экранов можно найти, как:

$$\Theta_{rps} = \sqrt{((x_{rps})_2 - (x_{rps})_1)^2 + ((z_{rps})_1 - (z_{rps})_2)^2} , \qquad (1.17)$$

$$\Theta_{par} = \sqrt{((x_{par})_2 - (x_{par})_1)^2 + ((z_{par})_1 - (z_{par})_2)^2} . \qquad (1.18)$$

На рис. 1.16 представлены зависимости поперечных размеров дифракционных порядков на поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов в зависимости от угла дифракции. Расчёт проводился для угла расходимости дифрагированного излучения β=1°. Полученные результаты показывают, что при отклонении дифракционных порядков от оптической оси на величину 10° и выше, поперечный размер ДП на поверхности экрана №1 больше, по сравнению с размером ДП на поверхности экрана №2 для соответствующих углов. Это связано с большими габаритными размерами экрана №1 по сравнению с экраном №2 (рис. 1.14). Как было сказано ранее, распределение дифрагированного излучения в пучок большего размера на поверхности рассеивающего экрана крайне не желательно, так как может не позволить видеокамере зарегистрировать дифракционные порядки с низким уровнем интенсивности, особенно при больших углах дифракции.

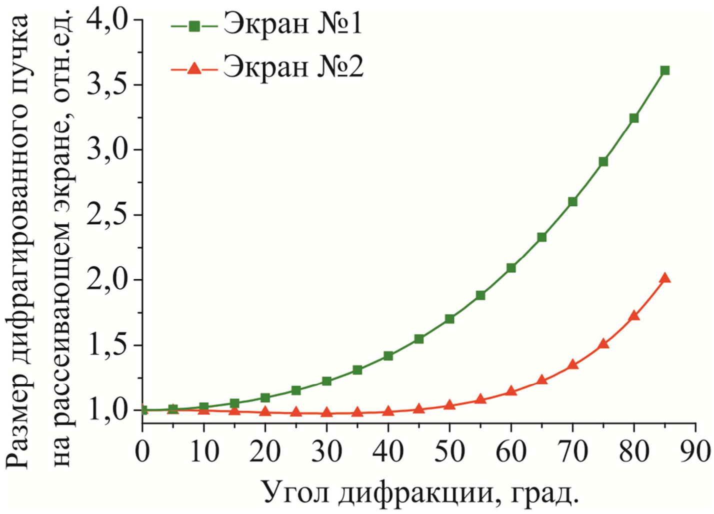


Рис. 1.16. Размеры ДП на поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов в зависимости от угла дифракции

Для простоты расчёта размеров ДП в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры её размер, как и в пункте 1.2, примем равным ширине (диаметру основания) рассеивающего экрана, с поверхности которого осуществляется регистрация дифракционной картины. Тогда размер дифракционных порядков, зарегистрированных с поверхности экрана №1, в зависимости от угла дифракции можно определить, как:

$$\Theta'_{rps} = \left|(x_{rps})_2 - (x_{rps})_1\right| . \qquad (1.19)$$

В свою очередь размер дифракционных порядков, зарегистрированных с поверхности экрана №2, в зависимости от угла дифракции можно найти следующим образом:

$$\Theta'_{par} = \left|(x_{par})_2 - (x_{par})_1\right| . \qquad (1.20)$$

На рис. 1.17 представлены результаты моделирования поперечных размеров дифракционных порядков, зарегистрированных одной видеокамерой с поверхности исследуемых рассеивающих экранов.

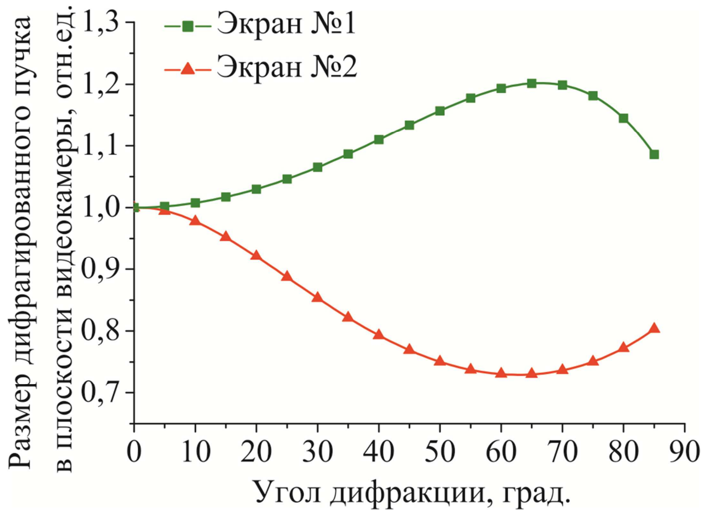


Рис. 1.17. Поперечные размеры ДП на светочувствительной матрице видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов

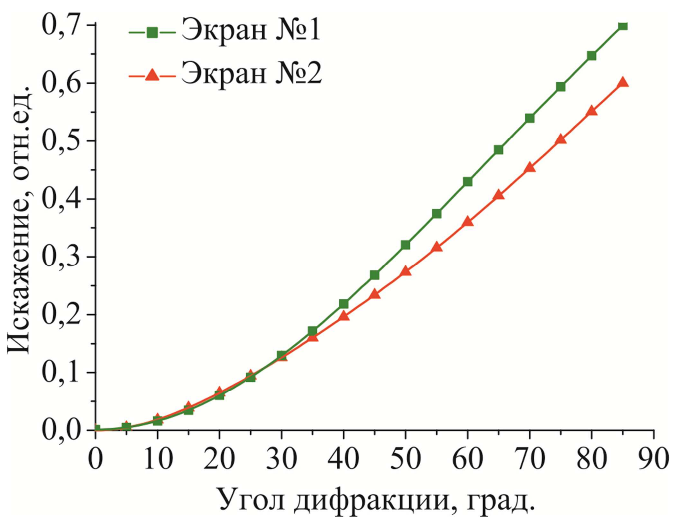


Рис. 1.18. Искажения поперечных размеров ДП в зависимости от угла дифракции при регистрации ДК с поверхности асферических рассеивающих экранов

Величину искажений размеров дифракционных порядков в зависимости от угла дифракции при регистрации ДК с поверхности исследуемых асферических рассеивающих экранов можно найти из соответствующих выражений:

$$f_{rps} = 1 - \frac{\Theta'_{rps}}{\Theta_{rps}}, \tag{1.21}$$

$$f_{par} = 1 - \frac{\Theta'_{par}}{\Theta_{par}}. \tag{1.22}$$

Результаты моделирования, представленные на рис. 1.18 показывают, что при регистрации дифракционной картины с поверхности рассеивающего экрана №1, дифракционные порядки, отклонившиеся на угол, превышающий 30°, испытывают большие искажения по сравнению с дифракционными порядками, зарегистрированными с поверхности рассеивающего экрана №2 для соответствующих углов.

Таким образом, на основе проведённого анализа можно сделать вывод, что оба исследуемых рассеивающих экрана асферической формы позволяют регистрировать пространственное распределение ДП в широком диапазоне углов дифракции с использованием всего одной видеокамеры. Однако рассеивающий экран в форме сегмента параболоида вращения (экран №2) обладает лучшими характеристиками, по сравнению с рассеивающим экраном, выполненным в виде сегмента полусферического экрана (экран №1).

Для экспериментальной апробации возможности регистрации дифракционной картины одной видеокамерой с поверхности асферического рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, был собран стенд [147,150], упрощённая схема которого представлена на рис. 1.19. В экспериментальном стенде в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный модуль с длиной волны 635 нм. Параболический рассеивающий экран имел высоту h_p = 23 мм (диаметр основания ~ 60 мм) и был установлен на расстоянии $\Delta_p \approx 1$ мм от исследуемых структур (рис. 1.19). Регистрация дифракционных картин осуществлялась видеокамерой JAI CV-M9 GE с проекционным объективом KOWA LM25NC3. На рис. 1.20а и рис. 1.20б представлены дифракционные картины, полученные в отражённом свете от эталонных тестовых структур с периодами 5 мкм и 1.5 мкм соответственно, и зарегистрированные видеокамерой с поверхности рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения.

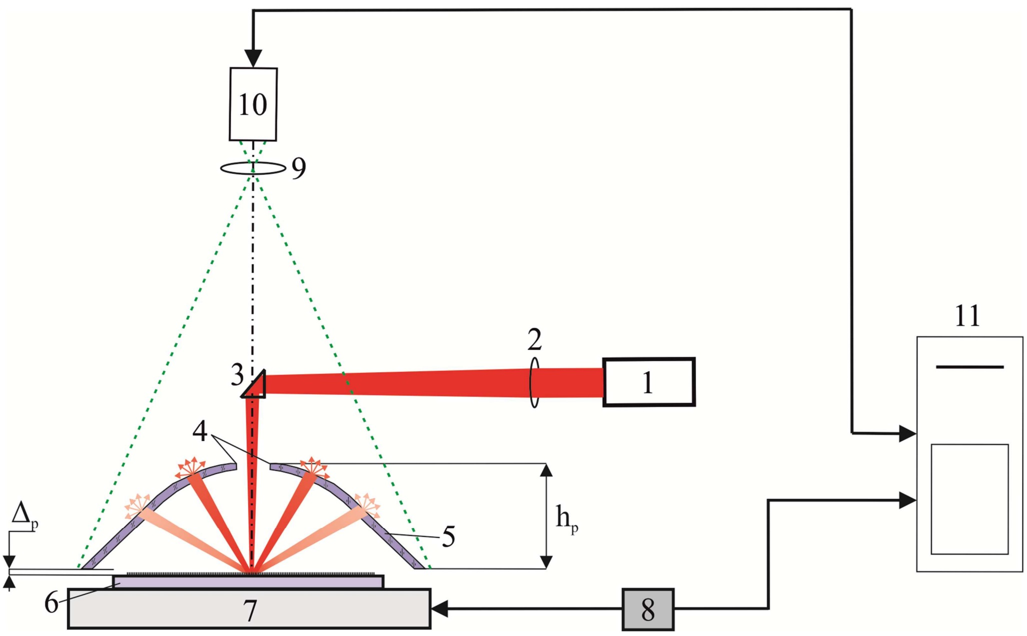
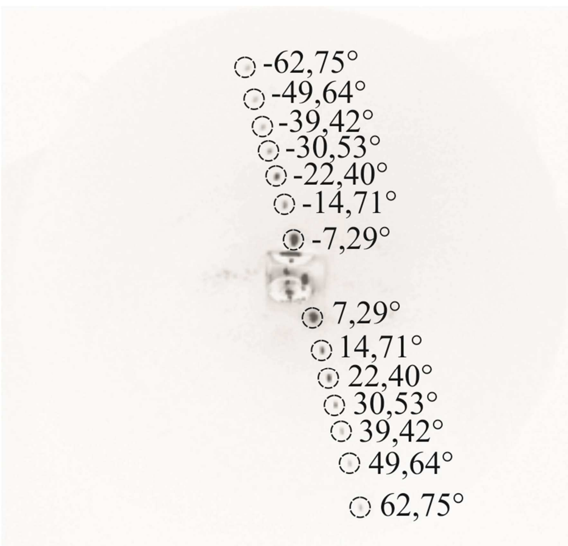


Рис. 1.19. Схема стенда с использованием при регистрации ДК в отражённом свете рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения: 1 – источник излучения; 2 –фокусирующий объектив; 3 – поворотная призма; 4 –отверстие для ввода излучения; 5 –рассеивающий экран; 6–исследуемый элемент; 7–XY-координатная система; 8– контролер XY-координатной системы; 9 – объектив; 10 – видеокамера; 11 – управляющий компьютер



а)

б)

Рис. 1.20. Негативы дифракционных картин, зарегистрированных видеокамерой с поверхности параболического рассеивающего экрана, полученные при освещении пробным пучком тестовых структур с периодом 5 мкм (а) и 1.5 мкм (б)

На рис. 1.21 представлен график интенсивности, регистрируемой видеокамерой с поверхности параболического рассеивающего экрана, в зависимости от угла отклонения дифрагированного пучка от оптической оси. Падение регистрируемой интенсивности при углах отклонения выше 65°, вероятно, связано с тем, что слой матовой белой краски, которая выполняет роль рассеивающего покрытия, в нижней части экрана имеет большую толщину, что вызвано методом её нанесения на поверхность экрана.

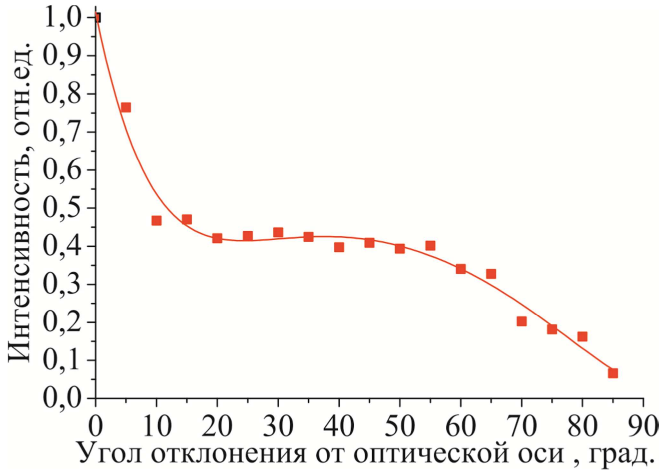


Рис. 1.21. Интенсивность, регистрируемая видеокамерой с поверхности рассеивающего экрана выполненного в форме сегмента параболоида вращения

В итоге, объединяя результаты теоритического и экспериментального исследования, можно сделать вывод, что использование рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, позволяет осуществлять регистрацию ДК в прошедшем или отражённом от исследуемого элемента свете в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360° с помощью всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии экрана (Патент на изобретение №2634372 – Приложение 1).

1.4. Оптоволоконный рассеивающий экран

Для регистрации дифракционной картины с использованием одной видеокамеры, помимо использования экранов имеющих асферическую форму, была предложена концепция устройства с использованием оптоволоконного рассеивающего экрана (ОРЭ), который может быть изготовлен на базе регулярного оптоволоконного жгута (например, из оптоволоконного фокона или оптоволоконной шайбы) [151-153]. Для того чтобы иметь возможность установить ОРЭ максимально близко к исследуемому элементу, обеспечив при этом достаточное расстояние для расхождения ДП на регистрируемой видеокамерой дифракционной картине, первый его торец выполнен в виде сферического сегмента. Первый торец ОРЭ покрыт рассеивающим покрытием для исключения направленного отражения дифрагированного излучения от его поверхности обратно, в сторону исследуемого элемента. Дифракционная картина регистрируется видеокамерой со второго торца ОРЭ, который может иметь как плоскую (рис. 1.22а), так и выпуклую (рис. 1.22б) форму, увеличивая, таким образом, светопередачу дифрагированного излучения на светочувствительную матрицу видеокамеры.

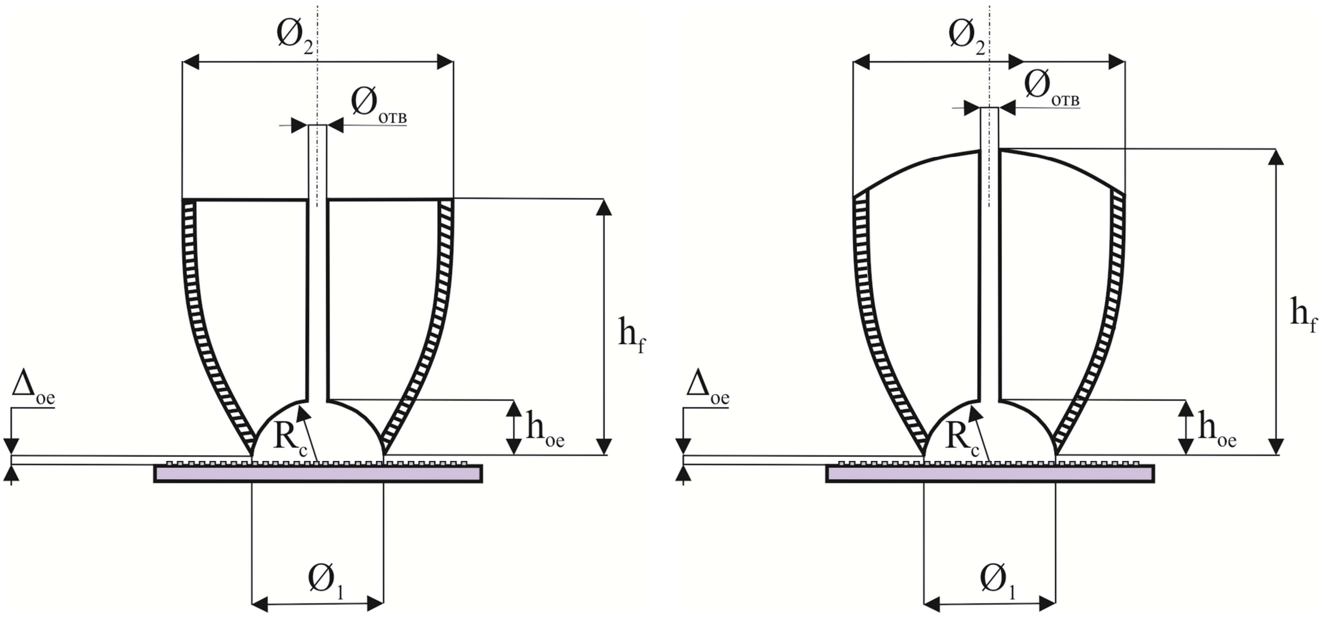


Рис. 1.22. ОРЭ с плоским (а) и выпуклым вторым торцом (б)

На рис. 1.23 представлена схема устройства с использованием двух ОРЭ, позволяющего осуществлять регистрацию дифракционных картин, как в прошедшем, так и в отражённом от исследуемого элемента свете. ОРЭ располагаются на расстоянии Δ_{oe} от контролируемого ДОЭ (рис. 1.22), которое выбирается из условия исключения касания ОРЭ и исследуемого элемента, при осуществлении сканирования образца на XY-координатной системе. Пробный пучок фокусируется на исследуемом элементе в центре радиуса кривизны первого торца ОРЭ, благодаря чему дифракционные порядки на его поверхности имеют одинаковый размер.

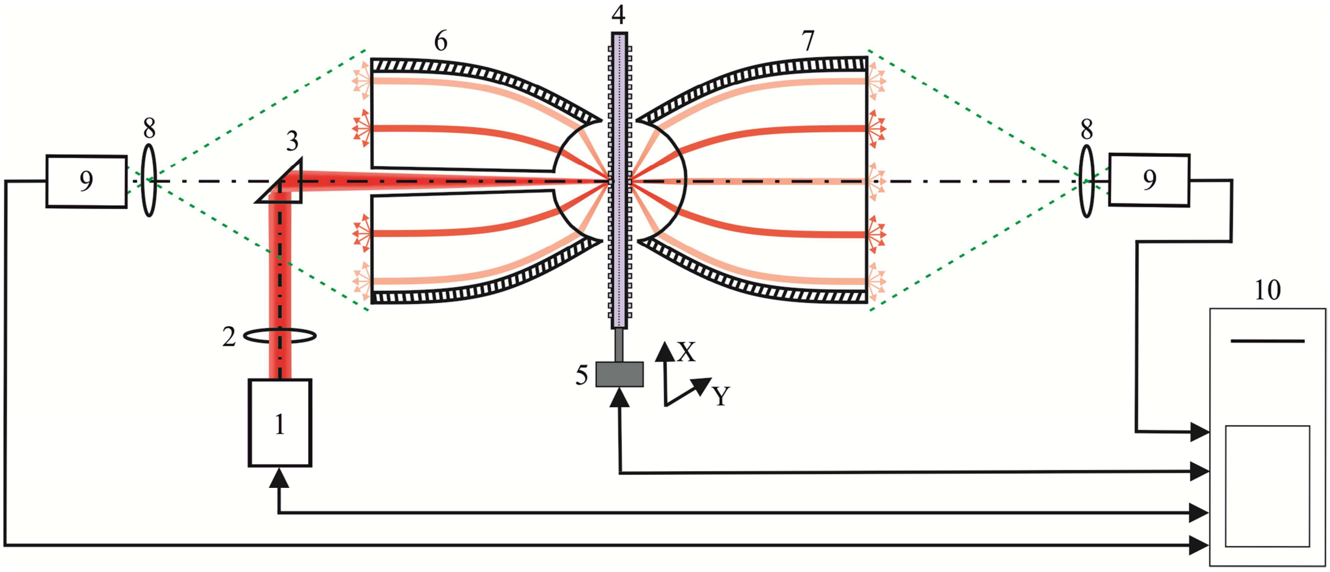


Рис. 1.23. Схема устройства для регистрации дифрагированного излучения, прошедшего и/или отражённого от периодической структуры ДОЭ с использованием ОРЭ: 1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – поворотная призма; 4 – исследуемый элемент; 5 – XY-координатная система; 6 – оптоволоконный рассеивающий экран с отверстием; 7 – оптоволоконный рассеивающий экран; 8 – проекционный объектив; 9 – видеокамера; 10 – управляющий компьютер

Высота сферического сегмента h_{oe}, расстояние от контролируемого ДОЭ до ОРЭ Δ_{oe} и, при регистрации ДК в отражённом свете, диаметр пропускающего окна $\varnothing_{отв}$ (рис. 1.22а) определяются из условия попадания дифрагированного излучения в требуемом диапазоне регистрируемых углов дифракции на рабочую область первого торца ОРЭ. Последняя ограничена с одной стороны отверстием для прохода падающего излучения, а с другой расстоянием от исследуемого образца до ОРЭ:

$$\begin{cases} \varnothing_{отв} = 2Q(\Delta_{oe} + h_f)NA \\ R_c \sin(\alpha_{min}) \geq W(\Delta_{oe} + h_f)NA + QR_cNA\,, \\ h_{oe} = R_c(1 - \cos(\alpha_{max})) \end{cases} \tag{1.23}$$

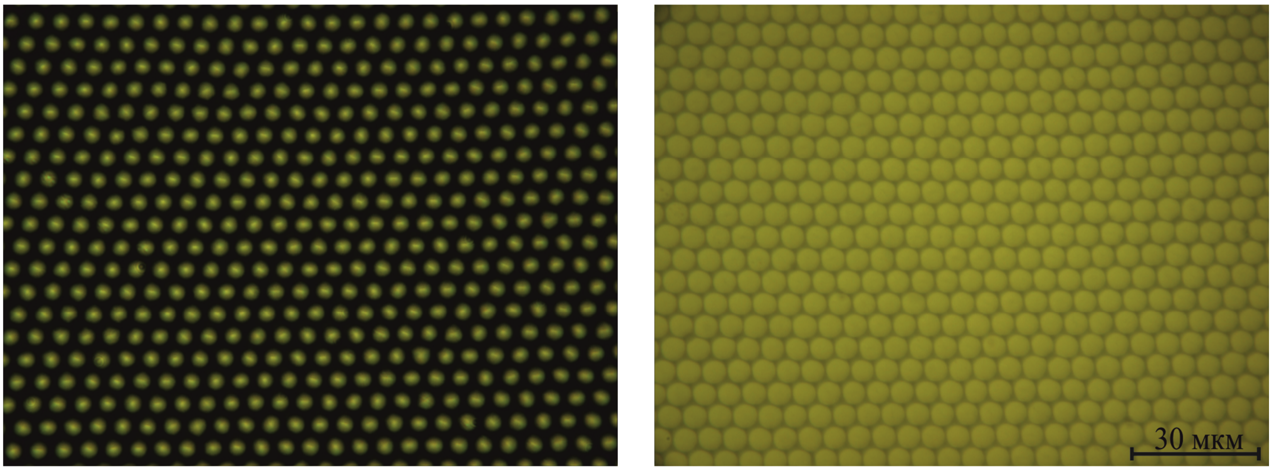
где NA – числовая апертура пробного пучка, h_f – высота ОРЭ, $R_c=\Delta_{oe}+h_{oe}$ – радиус кривизны сферического сегмента, выполненного в первом торце ОРЭ, α_{min} и α_{max} – минимально и максимально регистрируемый угол дифракции соответственно, Q и W – постоянные коэффициенты, значения которых выбирается в диапазоне 1.1–1.5 для предотвращения попадания ДП на границы рабочей области экрана.

При осуществлении регистрации ДК, в отражённом свете, в связи с наличием в ОРЭ сквозного отверстия, ограничен не только максимальный, но и минимальный угол дифракции, регистрируемый системой. При регистрации ДК в прошедшем свете, из-за отсутствия отверстия для ввода излучения, рабочая поверхность первого торца ОРЭ ограничена только расстоянием от исследуемого элемента до экрана. Очевидно, что для регистрации дифракционной картины в широком диапазоне углов дифракции, расстояние от исследуемого элемента до ОРЭ необходимо выбирать минимально возможным.

ОРЭ имеет осесимметричную форму рабочей области и, если не учитывать дефекты, возникшие при его изготовлении, параметры дифракционных порядков, регистрируемых видеокамерой со второго его торца, зависят только от угла дифракции и не зависят от угловой ориентации ДК. При переносе дифракционной картины с первого торца ОРЭ на второй могут возникать искажения регистрируемой дифракционной картины, которые, в том числе, зависят от соотношения площадей торцов ОРЭ:

$$J = \frac{S_1}{S_2} \approx 2 * \frac{\varnothing_1^2}{\varnothing_2^2}, \qquad (1.24)$$

где S_1 и S_2 – площади первого и второго торцов ОРЭ, $\varnothing_1$ и $\varnothing_2$ – диаметры первого торца, выполненного в форме полсферы и второго, плоского торца ОРЭ соответственно. Если коэффициент J=1, то дифракционная картина с первого торца ОРЭ, имеющего сферическую форму, переносится на второй торец таким образом, что разрешение системы не зависит от угла дифракции. В противном случае возникают дисторсионные явления, и при регистрации дифракционной картины со второго торца ОРЭ точность определения углового положения ДП будет зависеть от угла дифракции. Следует пояснить, что данное утверждение не относится к случаю использования ОРЭ, выполненного таким образом, что масштаб дифракционной картины линейно увеличивается (или уменьшается) при переносе изображения с первого торца на второй.



а) б)

Рис. 1.24. Микроизображения структуры второго (плоского) торца ОРЭ, полученные в прошедшем (а) и отражённом (б) свете

Для апробации предложенной концепции устройства с использованием ОРЭ был создан экспериментальный стенд [151-153], реализующий схему, представленную на рис. 1.23 для регистрации ДК элементов, работающих в прошедшем свете (то есть без ОРЭ 6 на схеме рис. 1.23). Используемый ОРЭ был изготовлен на базе оптоволоконной шайбы высотой 19.5 мм. Диаметр рабочей области первого торца $Ø_1$ равен диаметру рабочей области второго, плоского торца $Ø_2$ и составляет 36 мм. Радиус кривизны сферического сегмента выполненного в первом торце составляет ~ 18 мм. Размер отдельных оптоволокон, составляющих структуру оптоволоконного рассеивающего экрана, составляет около 6 мкм (рис. 1.24). Максимально регистрируемый угол дифракции на собранном стенде, при установке ОРЭ на расстоянии 1 мм от исследуемого элемента, составляет ~ 82°.

Калибровка системы по сопоставлению координат пикселей на матрице видеокамеры с углами отклонения дифракционных порядков от оптической оси и угловой ориентацией структур осуществлялась путём сканирования 36 линейных эталонных дифракционных решёток с периодом 8 мкм. При используемой длине волны пробного пучка 635 нм, это соответствует угловому диапазону от 0° до 72.27°. Угол ориентации каждой последующей эталонной дифракционной структуры отличался от предыдущей на 5°. Калибровочные структуры были записаны методом прямой безрезистной лазерной записи на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в ИАиЭ СО РАН [98]. Полученная калибровочная сетка представлена на рис. 1.25, где зелёными кружками отмечены координаты центров зарегистрированных дифракционных порядков калибровочных структур с различной угловой ориентацией.

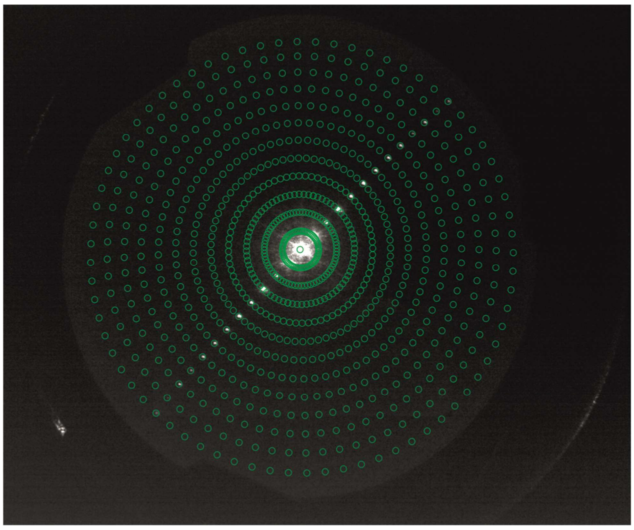
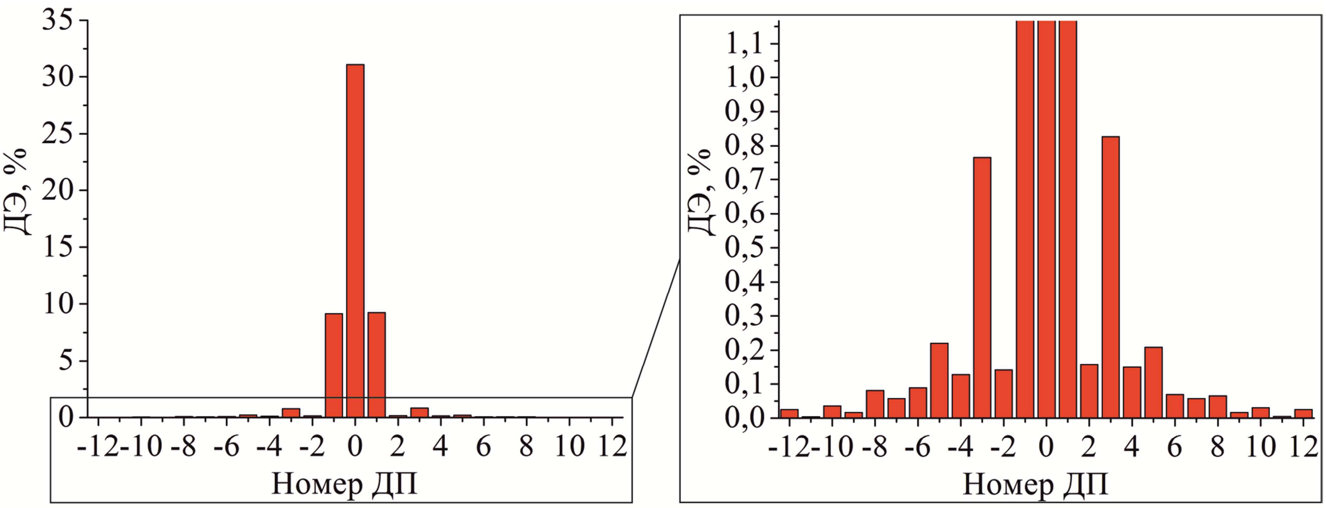


Рис. 1.25. Калибровочная сетка угловых координат, отмеченная на поверхности ОРЭ

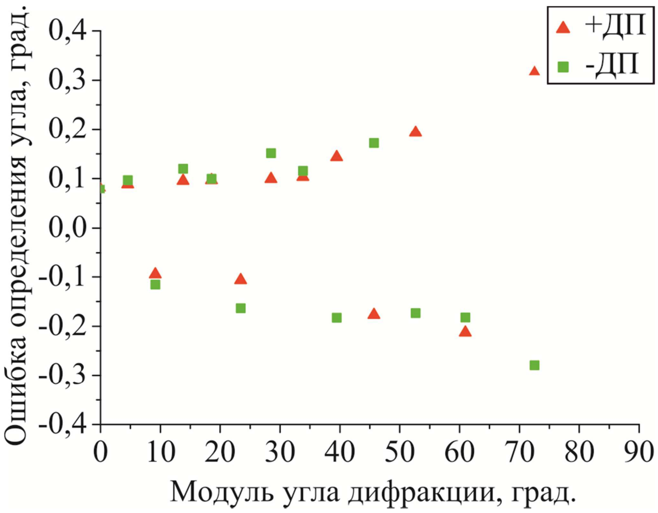


а) б)

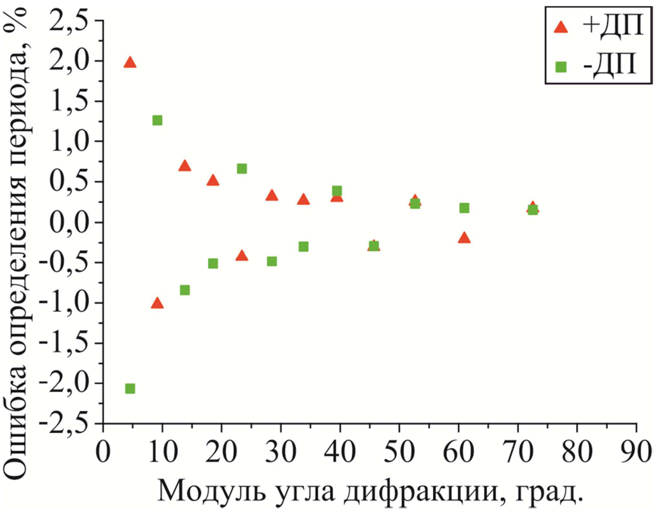
Рис. 1.26. Распределение измеренной дифракционной эффективности по дифракционным порядкам для эталонной амплитудной дифракционной решётки с периодом 8 мкм в масштабе 1:1 (а) и в выделенной области в масштабе 30:1 (б)

Помимо определения пространственного распределения дифракционных порядков, на данном стенде регистрируется и их дифракционная эффективность. Расширения динамического диапазона регистрируемой интенсивности достигается путём сшивки кадров, отснятых с различными значениями времени экспозиции видеокамеры, в диапазоне от 0.009 до 25 мс. На рис. 1.26 приведены значения ДЭ всех видимых дифракционных порядков для одной из эталонных структур с периодом 8 мкм.

По полученной калибровочной сетке можно оценить, как зависит точность определения пространственного распределения дифракционных порядков от угла дифракции. Максимальное экспериментально полученное отклонение (повторяемость результатов) при определении центров ДП, при использованном алгоритме обработки отдельных дифракционных картин и сшивки изображений, составило не более одного пикселя (по каждой из координат X и Y матрицы видеокамеры). Точность может быть увеличена за счёт выборки, обеспеченной регистрацией множества изображений, с различными временами экспозиции для каждого локального участка исследуемого элемента. Однако для оценки погрешности определения координат центров ДП возьмём худший случай, то есть отклонение найденного центра ДП на 1 пиксель. На рис. 1.27а приведены результаты, показывающие разность между измеренными углами дифракции при анализе дифракционной картины для решётки с периодом 8 мкм, и теоретическими значениями этих углов, при потенциально максимальном смещении центра каждого ДП на матрице видеокамеры (для полученной калибровочной сетки). На рис. 1.27б показано, как данная погрешность определения углов дифракции влияет на точность определения периода по анализу углового положения для каждого ДП по формуле 1.10. Ухудшение разрешения системы при определении углового положения ДП с ростом угла дифракции (рис. 1.27а), вызвано тем, что используемая в качестве рассеивающего экрана оптоволоконная шайба имеет равные диаметры обоих торцов. Это, согласно выражению 1.24, приводит к дисторсии регистрируемой видеокамерой ДК. Несмотря на это, точность определения периода с увеличением угла дифракции возрастает (рис. 1.27б). Это можно объяснить нелинейностью функции синуса в выражении 1.10, которая с увеличением угла дифракции менее чувствительна к ошибке его определения (см. пункт 1.2.1). Кроме того, анализ пространственного распределения ДП, отклонившихся на больший угол дифракции, позволяет более точно определить угловую ориентацию исследуемых структур (рис. 1.28). Это связано с тем, что при увеличении угла дифракции, увеличивается радиус окружности, на котором располагаются дифракционные порядки на поверхности ОРЭ (рис. 1.25).



а)



б)

Рис. 1.27. Оценка погрешностей выполняемых измерений на основе полученной калибровочной сетки: ошибка определения угла дифракции ДП (а) и ошибка определения периода линейной дифракционной решётки (б)

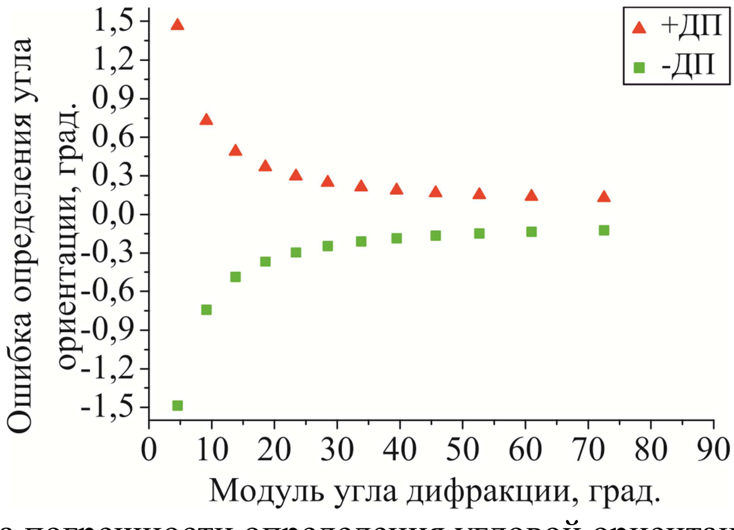


Рис. 1.28. Оценка погрешности определения угловой ориентации структуры на основе полученной калибровочной сетки

В таблице 1.1 приведены экспериментальные результаты определения параметров структуры тестовой дифракционной решётки с периодом 6 мкм и угловой ориентацией 45° по анализу ДК. Результаты определения параметров решётки приведены для каждого зарегистрированного ДП отдельно. Средний, измеренный по всем дифракционным порядком, период решётки составил 5.996 мкм, а угловая ориентация 44.983°.

Таблица 1.1. Измерение периода и угловой ориентации дифракционной структуры тестового элемента по всем ДП

№ ДП	Измеренный период тестовой решётки, мкм	Ошибка определения периода, мкм	Измеренная угловая ориентация тестовой решётки, град.	Ошибка определения угла ориентации, град.
9	6.000	0.000	45.002	0.002
8	5.999	-0.001	45.166	0.166
7	6.007	0.007	45.062	0.062
6	6.004	0.004	45.036	0.036
5	5.998	-0.002	44.987	-0.013
4	6.016	0.016	44.600	-0.400
3	6.002	0.002	45.021	0.021
2	6.058	0.058	45.543	0.543
1	6.023	0.023	45.720	0.720
-1	5.876	-0.124	43.776	-1.224
-2	5.955	-0.045	44.564	-0.436
-3	5.997	-0.003	44.967	-0.033
-4	5.958	-0.042	45.150	0.150
-5	5.985	-0.015	44.857	-0.143
-6	6.010	0.010	45.092	0.092
-7	6.016	0.016	45.146	0.146
-8	6.017	0.017	44.995	-0.005
-9	6.001	0.001	45.012	0.012

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что использование оптоволоконного рассеивающего экрана, позволяет производить регистрацию дифракционной картины в широком телесном угле дифракции с помощью всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси его симметрии (Патент на изобретение №2634372 – Приложение 1). Даже при использовании ОРЭ изготовленного на базе оптоволоконной шайбы с равными диаметрами первого и второго торцов, несмотря на дисторсионные искажения, возникающие при переносе изображения с первого торца экрана на второй (с которого осуществляется регистрация ДК), точность определения периода и угловой ориентации решётки при анализе пространственного распределения ДП, отклонившихся на больший угол дифракции, возрастает. Использование ОРЭ, изготовленного таким образом, чтобы уменьшить дисторсионные искажения при переносе изображения ДК с одного торца на другой, позволит повысить точность определения углов дифракции ДП и, следовательно, точность определения периода по анализу регистрируемых дифракционных картин.

1.4.1. Устройство для регистрации дифракционной картины в прошедшем свете с использованием оптоволоконного рассеивающего экрана

По результатам проведённого исследования, на базе инвертированного оптического микроскопа «Axiovert 40 MAT» создан дифрактометрический стенд, который позволяет объединить визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете [149]. В данном устройстве при регистрации дифракционной картины в прошедшем свете используется ОРЭ, описанный в разделе 1.4. Схема разработанного дифрактометрического стенда показана на рис. 1.29. Принцип работы устройства можно описать следующим образом. Излучение от лазерного источника через отверстие, предназначенное для одного из микроскопных окуляров, попадает в оптический канал микроскопа. Линза 2 с фокусным расстоянием 103.5 мм используется для компенсации оптической схемы микроскопа, и путём регулирования заполнения апертуры фокусирующего микроскопного объектива позволяет регулировать размер сфокусированного пробного пучка на поверхности исследуемого элемента. Перемещение исследуемого элемента осуществляется микроскопным столиком. Дифрагированное на периодической структуре излучение проецируется на первый торец оптоволоконного рассеивающего экрана, который имеет форму полусферы. Дифракционная картина со второго торца оптоволоконного рассеивающего экрана регистрируется видеокамерой с проекционным объективом. Оптоволоконный рассеивающий экран и видеокамера закреплены на линейном модуле перемещения, что позволяет осуществлять их позиционирование вдоль оси Z для измерения элементов разной толщины. Изображения, зарегистрированные видеокамерой, передаются на компьютер, где осуществляется их последующая обработка. Расширение динамического диапазона системы достигается за счёт регистрации нескольких изображений, полученных при различном времени экспозиции видеокамеры. Визуальный анализ исследуемого элемента осуществляется оператором через окуляр микроскопа 3.

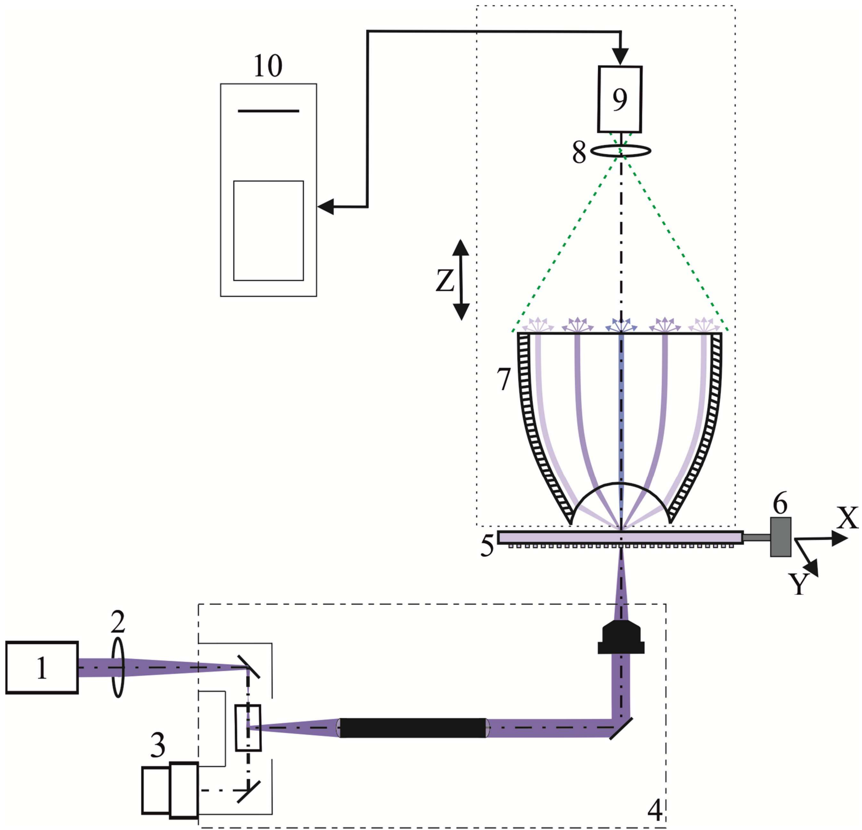


Рис. 1.29. Упрощённая схема дифрактометрического стенда с оптоволоконным рассеивающим экраном, выполненного на базе оптического микроскопа:

1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – окуляр;

4 – оптический канал микроскопа; 5–исследуемый ДОЭ;

6–XY-координатный столик; 7 – оптоволоконный рассеивающий экран;

8 – объектив; 9 – видеокамера; 10 –компьютер

На рис. 1.30а приведена фотография дифрактометрического стенда, собранного на базе оптического микроскопа. На разработанном устройстве фокусировка пробного пучка осуществляется микроскопным объективом с увеличением 10х. Это приводит к увеличению расходимости дифрагированного излучения и, соответственно, площади дифракционных порядков на втором, плоском торце оптоволоконной шайбы, с которого осуществляется захват дифракционной картины видеокамерой (рис. 1.30б), по сравнению с экспериментальным дифрактометрическим стендом, описанным в разделе 1.4, в котором для фокусировки пробного пучка использовалась длиннофокусная линза (рис. 1.30в). В связи с этим, диапазон измеряемых периодов на данном дифрактометрическом стенде составляет 0.45–1 мкм при длине волны пробного пучка 405 нм.

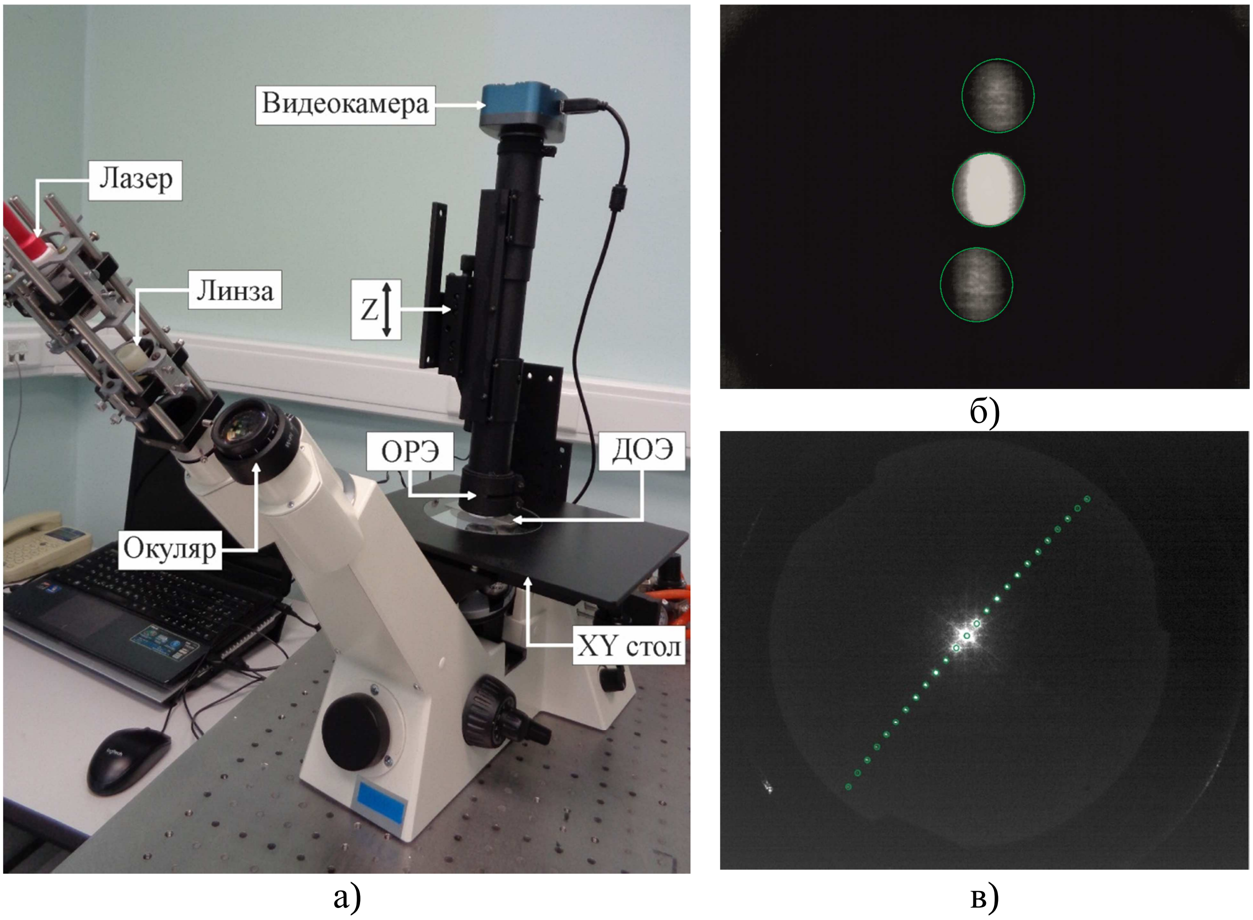


Рис. 1.30. Дифрактометрический стенд, реализованный на базе микроскопа «Axiovert 40 MAT»: а) внешний вид; б) зарегистрированная на данном устройстве дифракционная картина решётки с периодом 0.8 мкм; в) дифракционная картина решётки с периодом 8 мкм, зарегистрированная на экспериментальном дифрактомктрическом стенде, описанном в разделе 1.4

Данное устройство предназначено для определения параметров тестовых металл/оксидных решёток, формируемых методом прямой безрезистной лазерной записи на тонких плёнках металла при различных параметрах мощности и скорости сканирования пучка. Целью анализа тестовых структур является определение оптимальных параметров записи итогового элемента. Исследуемые решётки характеризуются малым размером (несколько десятков микрон), а их период не превышает 1 мкм.

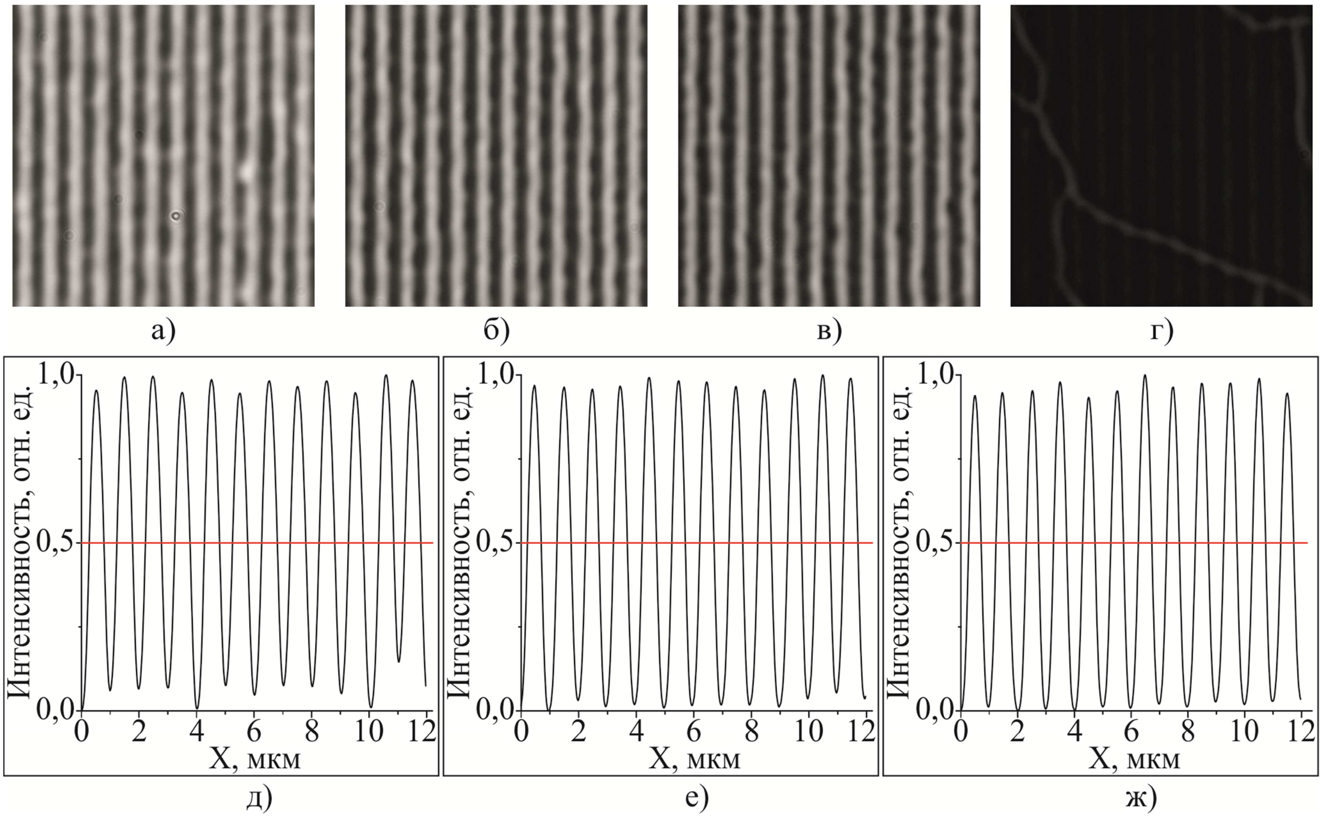


Рис. 1.31. Микроизображения в прошедшем свете тестовых металл/оксидных решёток, сформированных на плёнке титана, и усреднённые графики распределения интенсивности на изображениях (для решёток со сквозным окислением дорожек): P = 17.8 мВт, V = 175.9 мм/с (а, д); P = 16.9 мВт, V = 156.8 мм/с (б, е); P = 15.9 мВт, V = 135.7 мм/с (в, ж); P = 15.0 мВт, V = 115.6 мм/с (г)

На рис. 1.31а-г представлены фрагменты микроизображений решёток с периодом 1 мкм, сформированных методом прямой безрезистной лазерной записи в металлической плёнке титана толщиной 70 нм, напылённой на стеклянную подложку из плавленого кварца толщиной 1 мм. Представленные фрагменты микроизображений были получены на оптическом микроскопе в прошедшем свете и показывают область тестовых решёток размером 12x12 мкм (разрешение 570×570 пикселей). Запись тестовых решёток производилась при непрерывном режиме работы лазерного источника, и при различных параметрах мощности записывающего пучка (P) и скорости сканирования (V).

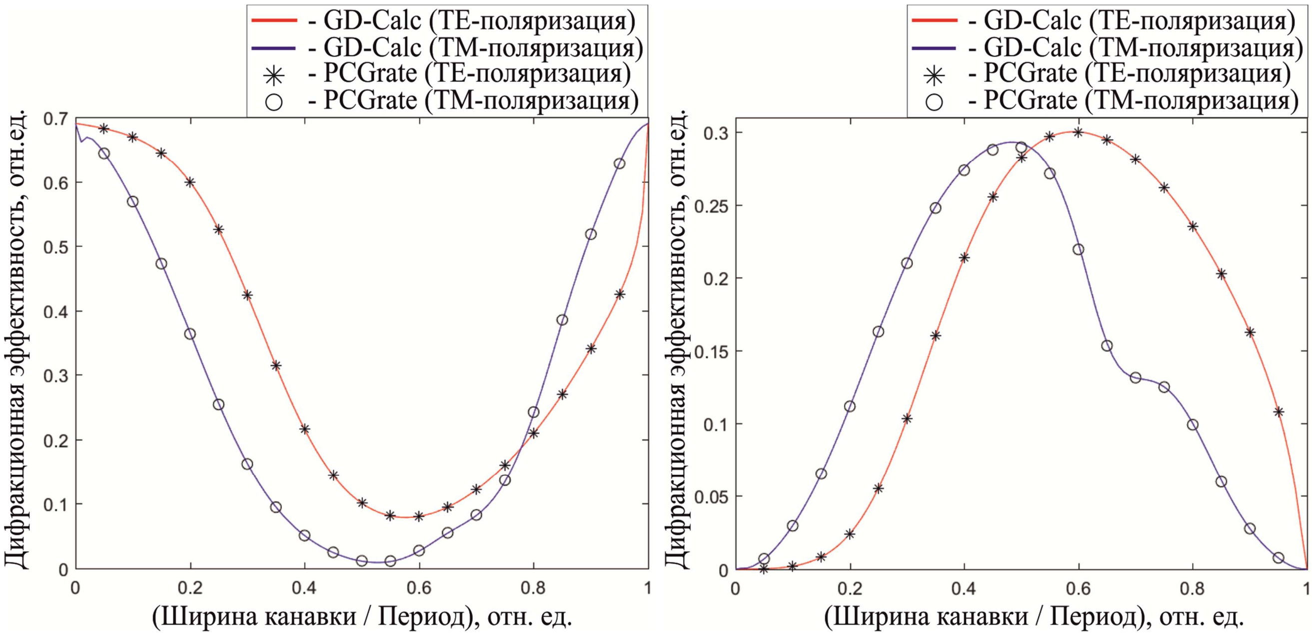
В таблице 1.2 представлены данные измеренной дифракционной эффективности исследуемых решёток. Дифракционная эффективность измерялась в прошедшем и отражённом свете при нормальном падении пробного пучка для двух направлений поляризации (TE и TM). В качестве источника излучения при измерениях использовался линейно поляризованный полупроводниковый лазер с длинной волны 405 нм. В таблице 1.2 приведены значения ДЭ для значения поляризации (TE+TM)/2. На рис. 1.31г видно, что при постепенном снижении мощности записывающего пучка, формируемые оксидные дорожки сохраняют свою упорядоченность, но в определённый момент перестаёт происходить сквозное окисление металлической плёнки, что, соответственно, приводит к падению интенсивности дифрагированного на данной структуре излучения в прошедшем свете. Таким образом, анализ дифракционной картины тестовых решёток в прошедшем свете позволяет оперативно определить граничные значения параметров P и V для записи итогового элемента.

Таблица 1.2. Измеренная дифракционная эффективность и ширина оксидных дорожек тесовых металл/оксидных решёток, сформированных в плёнке Ti

		Решётка #1	Решётка #2	Решётка #3	Решётка #4
Параметры записи	P, мВт	17.8	16.9	15.9	15.0
	V, мм/с	175.9	156.8	135.7	115.6
ДЭ в прошедшем свете ((TE+TM)/2)	-1 ДП, %	1.9±0.2	2.3±0.2	1.7±0.2	0.02±0.005
	0 ДП, %	14.2±0.3	10.2±0.3	7.9±0.2	1.2±0.1
	1 ДП, %	2.4±0.2	2.4±0.2	1.6±0.2	0.01±0.005
ДЭ в отражённом свете ((TE+TM)/2)	-2 ДП, %	0.8±0.1	0.6±0.1	0.4±0.1	0.07±0.01
	-1 ДП, %	1.4±0.1	3.5±0.3	2.8±0.3	0.8±0.08
	1 ДП, %	1.8±0.2	3.2±0.3	3.6±0.3	0.7±0.07
	2 ДП, %	0.4±0.1	0.2±0.1	0.2±0.1	0.06±0.01
Ширина оксидных дорожек, нм		549	490	461	–

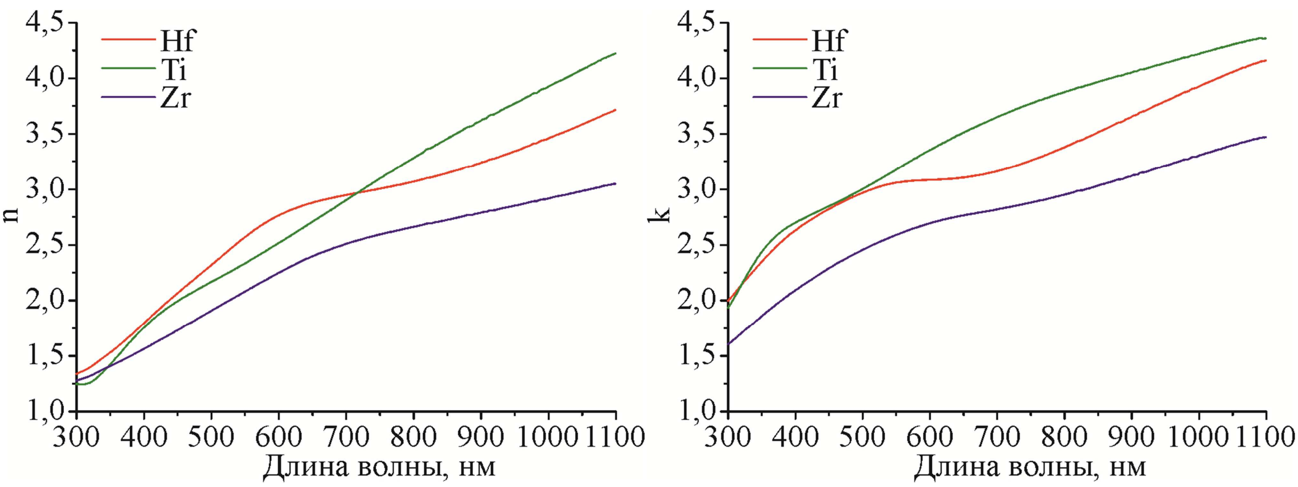
Также в таблице 1.2 для параметров записи, позволяющих получить сквозное окисление структур (рис. 1.31а-в), приведены значения средней ширины записанных оксидных дорожек. Ширина дорожек определялась по уровню 0.5 усреднённых графиков распределения интенсивности на микроизображениях тестовых решёток (рис. 1.31д-ж). Данная величина, полученная при анализе тестовых структур, записанных при различных значениях P и V, является важной при выборе оптимальных параметров записи итогового элемента.

Для оценки ширины записанных оксидных дорожек также могут быть использованы данные измеренной ДЭ. Для этого необходимо иметь возможность рассчитывать дифракционную эффективность решёток с субмикронными периодами в рамках строгой электромагнитной теории. В рамках данной работы с помощью пакета прикладных программ MATLAB [157] был разработан специальный программный код, в котором для расчёта дифракционной эффективности используются функции инструментария GD-Calc (Grating Diffraction Calculator) [158]. В основе алгоритма инструментария GD-Calc лежит обобщенный вариант теории строгих связанных волн (RCW – rigorous coupled-wave), что позволяет рассчитывать с его помощью дифракционную эффективность в рамках строгой электромагнитной теории. Данный программный код был разработан как для оценки скважности металл/оксидных структур по данным измеренной дифракционной эффективности, так и для исследования поляризационных эффектов на параметры дифракционной картины формируемой ДОЭ. Достоверность результатов рассчитанной дифракционной эффективности, полученной с помощью разработанного программного кода, для структур с различной формой профиля (бинарной, трапециевидной, синусоидальной, кусочно-непрерывной и т. д.) проверялась путём сравнения данных моделирования с данными, полученными при использовании коммерческой программы для расчёта параметров решёток – PCGrate [159]. Для примера, на рис. 1.32а и рис. 1.32б представлены графики рассчитанной дифракционной эффективности 0-го и 1-го ДП, полученные при использовании программы PCGrate и разработанного программного кода на базе инструментария GD-Calc. Моделирование проводилось для отражательной дифракционной решётки из хрома с периодом 0.6 мкм и глубиной рельефа 0.1 мкм, при длине волны пробного пучка 405 нм. Как видно на рис. 1.32, полученные результаты расчёта ДЭ находятся в хорошем согласии между собой.



а) б)

Рис. 1.32. ДЭ отражательной бинарной решётки, рассчитанная с использованием программы PCGrate и разработанного программного кода на базе инструментария GD-Calc: 0-ой дифракционный порядок (а) и 1-ый дифракционный порядок (б)



а) б)

Рис. 1.33. Спектральные зависимости показателя преломления (а) и коэффициента поглощения (б), измеренные для тонких пленок Ti, Zr и Hf.

Для моделирования оптических характеристик металл/оксидных решёток, сформированных в плёнках Hf, Ti и Zr на спектральном эллипсометре «ЭЛЛИПС-1991», разработанном в ИФП СО РАН [160], в диапазоне длин волн 300–1100 нм, были измерены показатели преломления n (рис. 1.33а) и коэффициенты поглощения k (рис. 1.33б) для этих металлов [154,155]. Спектральная зависимость параметров n и k для гафния в диапазоне длин волн 300–1100 нм, насколько известно автору работы, была измерена впервые в мире. Были известны зависимости только для диапазона длин волн 2.4–122 нм [161,162].

При расчёте дифракционной эффективности субмикронных металл/оксидных решёток, записанных методом прямой безрезистной лазерной записи на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в ИАиЭ СО РАН [98] (диаметр записывающего гауссова пучка на полувысоте ~ 0.7 мкм), в процессе моделирования их оптических характеристик использовалась геометрия, представленная на рис. 1.34.

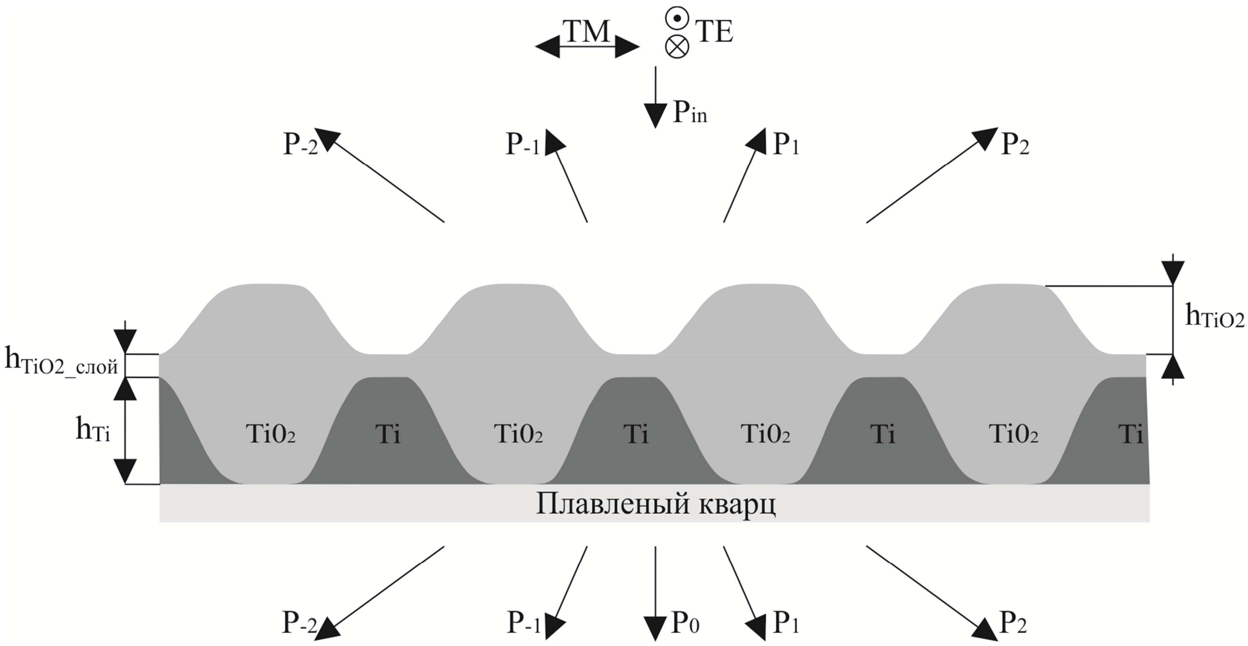


Рис. 1.34. Геометрия металл/оксидной решётки, используемая при моделировании

В используемой геометрии форма сформированных оксидных дорожек описывается двумя искажёнными синусоидами, каждая из которых характеризует форму правой или левой стенки профиля с соответствующими коэффициентами искажения b_1 и b_2. Форма периодической оксидной структуры, сформированной в слое металлической плёнки, задаётся системой уравнений:

$$\begin{cases} g_{\text{металл}}(x) = -\frac{h_{Ti}}{2} * (1 + cos\left[\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right) - b_1 * \sin\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right)\right], x \in [0, \frac{d}{2}) \\ g_{\text{металл}}(x) = -\frac{h_{Ti}}{2} * (1 + cos\left[\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right) - b_2 * \sin\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right)\right], x \in [\frac{d}{2}, d) \end{cases}, \qquad (1.25)$$

где h_{Ti} – высота плёнки металла, напылённой на подложку, d – период решётки. В свою очередь, форма профиля оксидных выступов решётки задаётся системой уравнений:

$$\begin{cases} g_{\text{оксид}}(x) = \frac{h_{TiO2}}{2} * (1 + cos\left[\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right) - b_1 * \sin\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right)\right], x \in [0, \frac{d}{2}) \\ g_{\text{оксид}}(x) = \frac{h_{TiO2}}{2} * (1 + cos\left[\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right) - b_2 * \sin\left(\frac{2*\pi}{d} * x\right)\right], x \in [\frac{d}{2}, d) \end{cases}, \quad (1.26)$$

где h_{TiO2} – высота оксидных выступов. В данной геометрии используется допущение, что форма синусоидальных оксидных выступов совпадает с формой стенок оксидной структуры, сформированной в слое металлической плёнки. Кроме того, предполагается, что из-за частичного воздействия лазерного записывающего пучка, сверху плёнки металла возможно образование тонкого сплошного слоя оксидной плёнки высотой $h_{TiO2\_слой}$.

Для апробации предложенной геометрии была исследована возможность определения по данным измеренной ДЭ скважности металл/оксидных решёток, сформированных в плёнке титана при параметрах записи, позволяющих добиться сквозного окисления металлической плёнки (рис. 1.31а-в) [156]. В процессе моделирования ДЭ решёток использовались измеренные для плёнки Ti параметры показателя преломления n (рис. 1.33а) и коэффициенты поглощения k (рис. 1.33б), которые для интересующей нас длины волны пробного пучка составили 1.7850 и 2.7153 соответственно. Показатели преломления диоксида титана и плавленого кварца для моделирования были взяты из литературных источников [163,164] и [165,166], и составляли 2.3258 и 1.4696 соответственно. В связи с тем, что показатель преломления и коэффициент поглощения для формируемого оксида измерены не были, моделирование производилось с учётом различного количества примеси металла в оксидных структурах.

Высота оксидных выступов при моделировании рассчитывалась с учётом фактора Пиллинга – Бедвордса [167], согласно которому отношение молярного объема оксида к объему израсходованного на его формирования металла можно записать, как:

$$F_{PB} = \frac{M(Me_iO_j)*\rho(Me)}{i*A(Me)*\rho(Me_iO_j)} = \frac{79.87*4.54}{1*47.87*4.24} = 1.79 \;, \qquad (1.27)$$

где $M(Me_iO_j)$ – молярная масса оксида, $A(Me)$ – атомная масса металла, $\rho(Me_iO_j)$ – плотность оксида, $\rho(Me)$ – плотность металла, i – число атомов металла в молекуле оксида. С учётом исходной высоты плёнки Ti, которая составляет 70 нм, максимальная высота выступающей оксидной структуры при моделировании принимала значения в диапазоне от 50 до 60 нм.

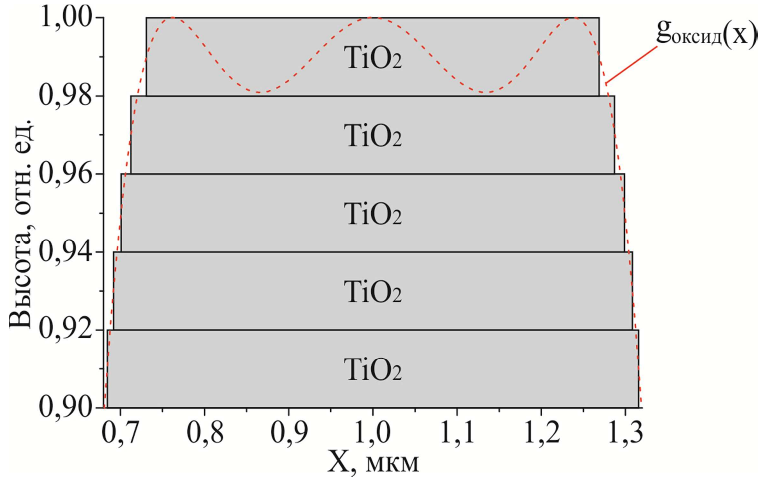
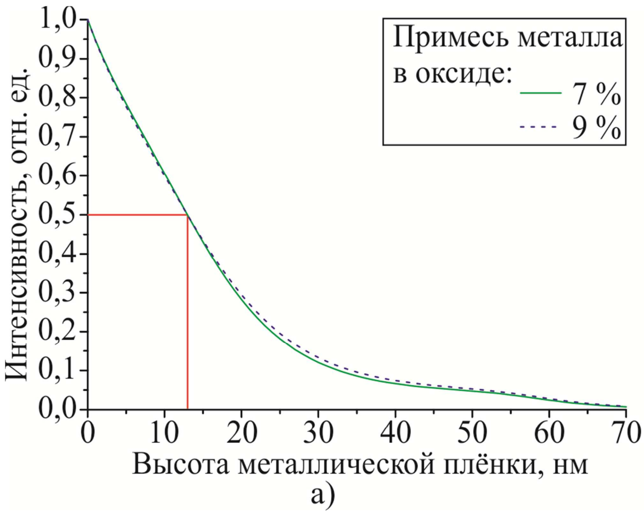


Рис. 1.35. Модельная форма пика выступающей оксидной структуры при значениях коэффициентов искажения стенок $b_1 = b_2 = 1.5$

В процессе моделирования осуществлялся поиск параметров геометрии металл/оксидной структуры для каждой решётки, при которых достигалось максимальное совпадение теоретически рассчитанной и экспериментально измеренной дифракционной эффективности. В таблице 1.3 приведены значения теоретически рассчитанной дифракционной эффективности (для дифракционных порядков, которые были измерены в прошедшем и отражённом свете в таблице 1.2) и соответствующие параметры модели исследуемых решёток. Параметры b_1 и b_2 при моделировании принимали значения в диапазоне от -1.5 до 1.5 с шагом 0.02. Следует отметить, что при подстановке в уравнения 1.25 и 1.26 значений $|b_1| \geq 1$ и $|b_2| \geq 1$ в областях, описывающих форму вблизи максимумов данных функций, образуются два провала (или два выступа вблизи областей минимумов функций), высота которых увеличивается с ростом значений $|b_1|$ и $|b_2|$. Однако многоуровневый рельеф в инструментарии GD-Calc описывается блочной структурой, и для решения этой проблемы граничные значения при определении координат блоков, формирующих металл/оксидную решётку, выбирались по крайним точкам функций задающих форму рельефа на полувысоте формируемого слоя (рис. 1.35). Таким образом, провалы и выступы в центральных областях моделируемых металл/оксидных дорожек отсутствуют, а увеличение коэффициентов искажения стенок $|b_1|$ и $|b_2|$ до значений, превышающих единицу, влияет только на их ширину.



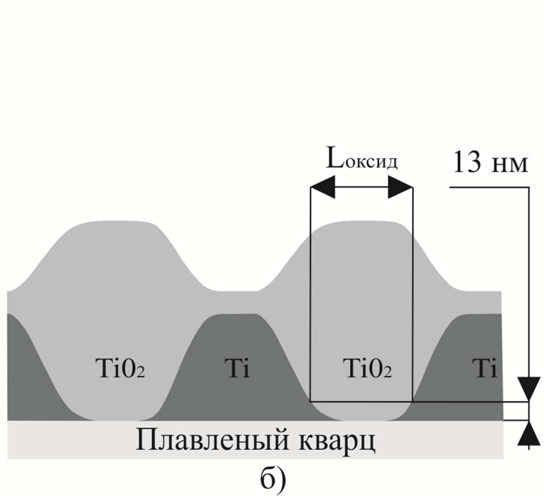


Рис. 1.36. Определение высоты остаточного слоя металлической плёнки для измерения ширины оксидных дорожек в используемой геометрии: интенсивность в прошедшем свете в зависимости от высоты остаточного слоя металлической плёнки (а) и геометрия определения ширины оксидных дорожек (б)

Выше, ширина оксидных дорожек исследуемых структур по анализу их микроизображений в прошедшем свете была измерена по уровню 0.5 графиков распределения интенсивности (таблица 1.2). На рис. 1.36а показано, что падение интенсивности прошедшего излучения в два раза соответствует высоте остаточного слоя металлической плёнки в записанной оксидной дорожке равной 13 нм. Этот уровень был использован для оценки ширины оксидных дорожек ($L_{оксид}$) в используемой геометрии (рис. 1.36б). Полученные результаты определения ширины линий исследуемых структур по данным анализа ДЭ представлены в таблице 1.3. Они хорошо согласуются с экспериментально измеренными данными, которые представлены в таблице 1.2. Максимальное расхождение полученных результатов составляет ~ 50 нм, что соответствует 5% от величины периода измеряемых решёток. Таким образом, полученные результаты показывают, что предложенный метод может быть использован для оценки ширины линий тестовых металл/оксидных решёток с целью подбора оптимальных параметров записи (мощности и скорости сканирования записывающего пучка) по анализу дифракционной эффективности измеренной в прошедшем и отражённом свете.

Таблица 1.3. Определение ширины оксидных дорожек металл/оксидных решёток по анализу измеренной дифракционной эффективности

		Решётка #1	Решётка #2	Решётка #3
Параметры записи решётки	P, мВт	17.8	16.9	15.9
	V, мм/с	175.9	156.8	135.7
Параметры модели	h_{Ti}, нм	70	70	70
	$h_{TiO2\_слой}$, нм	15	10	10
	h_{TiO2}, нм	45	50	50
	Примесь металла в оксиде, %	7	7	9
	b_1	1.29±0.03	0.73±0.03	0.3±0.04
	b_2	0.91±0.07	0.56±0.02	0.77±0.03
Рассчитанная ДЭ прошедших ДП (TE+TM)/2	-1 ДП, %	2.50±0.03	2.78±0.01	2.41±0.03
	0 ДП, %	14.14±0.30	10.09±0.23	7.54±0.19
	1 ДП, %	2.89±0.08	2.94±0.03	2.19±0.01
Рассчитанная ДЭ отражённых ДП (TE+TM)/2	-2 ДП, %	0.40±0.01	0.50±0.02	1.07±0.07
	-1 ДП, %	1.68±0.05	2.67±0.01	2.28±0.03
	1 ДП, %	1.48±0.02	2.40±0.01	2.93±0.06
	2 ДП, %	0.34±0.01	0.68±0.03	0.50±0.02
Ширина оксидных дорожек, нм		604.5±12.5	483.5±8.5	445±11

1.5. Выводы к главе 1

- Предложены и экспериментально исследованы оптические схемы устройств дифрактометрического контроля, в которых при регистрации дифракционной картины от локальной области исследуемого элемента, освещённой пробным лазерным пучком, используется объёмный рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом и системой видеорегистрации. Проведено исследование схем с использованием объёмных рассеивающих экранов полусферической и асферической формы, а также с использованием оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, который может быть изготовлен на базе регулярного оптоволоконного жгута (например, из оптоволоконного фокона или оптоволоконной шайбы). Предложенные схемы позволяют осуществлять оперативную видеорегистрацию дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360° для ДОЭ, работающих в прошедшем или отражённом свете.

- При использовании рассеивающего экрана, выполненного в форме полусферы, для регистрации дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360° достаточным является использование четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. По результатам проведённого исследования для дифрактометрического контроля параметров ДОЭ было создано оптико-электронное устройство, в котором при регистрации дифракционной картины в отражённом свете используется рассеивающий экран, выполненный в форме полусферы. Диапазон периодов исследуемых структур, которые можно контролировать на данном устройстве составляет 0.45–6.47 мкм.

- Использование рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне ±45° от оси его симметрии приближена к форме полусферы, или оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, позволяет регистрировать дифракционную картину в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360° с помощью всего одной видеокамеры с проекционным объективом расположенной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана.

- По результатам проведённого исследования на базе инвертированного оптического микроскопа создан дифрактометрический стенд, позволяющий объединить визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете, для элементов с диапазоном изменения периодов 0.45–1 мкм. При регистрации дифракционной картины на разработанном стенде используется оптоволоконный рассеивающий экран, изготовленный на базе оптоволоконной шайбы. Данное устройство предназначено для подбора оптимальных параметров прямой безрезистной лазерной записи металл/оксидных структур по анализу тестовых решёток, сформированных при различных значениях мощности и скорости сканирования записывающего пучка.

- Созданные устройства позволяют регистрировать пространственное распределение интенсивностей всех видимых дифракционных порядков и определять такие параметры ДОЭ, как период и угловая ориентация структур в локальных областях исследуемого элемента, а также дифракционную эффективность, которая может быть использована для контроля качества ДОЭ и/или определения скважности исследуемых периодических решёток.

Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах [143-156].

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РОЭ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ТЕСТОВЫХ РЕШЕТОК

Разработка универсальных методов контроля параметров РОЭ сложно выполнима по ряду причин. Во-первых, данные элементы часто либо индивидуально рассчитываются под решение требуемой задачи преобразования исходного волнового фронта [68,116], либо являются элементами мелкосерийного производства [115]. Во-вторых, контроль дифракционной эффективности таких элементов, необходимо производить в соответствии с расчётной оптической схемой, которая не всегда известна изготовителю и может являться коммерческой тайной, а также с использованием расчётной длины волны, доступ к которой у изготовителя элемента может быть затруднён. В-третьих, микрорельеф РОЭ может иметь сложную структуру для осуществления контроля качества изготовления элемента по непосредственному измерению его параметров. В связи с этим, при изготовлении РОЭ эффективным методом контроля является измерение параметров однотипных тестовых структур, выполненных на подложке вместе с рабочей структурой элемента [115,116,127-129]. Данный подход позволяет отказаться от измерения характеристик непосредственно самого изготавливаемого элемента, что даёт возможность сделать процедуру контроля более универсальной. При этом важно отметить, что форма и параметры микрорельефа тестовых структур должны быть оптимизированы под решение задач осуществляемого контроля.

В данной главе описаны методы контроля рельефно-фазовых оптических элементов, изготавливаемых методом растровой полутоновой технологии [77, 111], по анализу тестовых структур. Первый метод предназначен для финишного контроля элементов, рассчитанных для работы в дальнем ультрафиолетовом (ДУФ) диапазоне длин волн на пропускание с использованием лазерного источника видимого диапазона. Второй метод позволяет осуществлять поэтапный контроль при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов с использованием растровой полутоновой технологии.

Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах [111,168-173].

2.1. Контроль пропускающих РОЭ по анализу дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете

При изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов, рассчитанных для работы в ДУФ диапазоне на пропускание, одной из проблем осуществления финишного контроля является доступ к источнику излучения с необходимой длиной волны. В частности, это актуально, при изготовлении гомогенизаторов [168], предназначенных для формирования пучка эксимерного лазера. Данные элементы используются для того, чтобы преобразовать исходный лазерный пучок с неудовлетворительным распределением интенсивности в пучок с заданными параметрами профиля распределения интенсивности (рис. 2.1а). Рельеф дифракционных гомогенизаторов, рассчитывается при помощи итеративного алгоритма преобразования Фурье (IFTA) [174] и имеет достаточно сложную структуру (рис. 2.1б и рис. 2.1в) для осуществления контроля таких элементов по прямому измерению его параметров.

Контроль РОЭ, предназначенных для работы в ДУФ диапазоне на пропускание, расчётная глубина рельефа которых позволяет обеспечить разность фаз $\geq 2\pi$ на рабочей длине волны в прошедшем свете, предлагается осуществлять по анализу параметров тестовых линейных решёток (ТЛР) с кусочно-непрерывным рельефом, изготовленных на одной подложке рядом с рабочей структурой элемента. Глубина ТЛР равна максимальной глубине в рабочей области РОЭ, а контроль выполняется по анализу дифракционной эффективности ТЛР в отражённом свете [115]. При контроле таких элементов дифрактометрическим методом, можно подобрать длину волны лазерного источника более длинноволнового диапазона (в частности видимого), которая при нормальном падении пробного пучка на ТЛР позволит обеспечить такую разность фаз в отражённом свете, при которой дифракционная эффективность в рабочем порядке дифракции ($m_р$) решётки будет максимальной и в теории может достигать 100%. Длина волны λ_0 такого источника в видимом диапазоне спектра может быть определена, как:

$$\begin{cases} \lambda_0 = \frac{2*h_{ТЛР}}{m_р} \\ 380 \leq \lambda_0 \leq 780 \end{cases}, \tag{2.1}$$

где $h_{ТЛР}$ – глубина ТЛР, $m_р$ = 1, 2, 3… – номер рабочего дифракционного порядка (в котором при расчётной глубине рельефа можно добиться максимальной ДЭ) для ТЛР в отражённом свете, при нормальном падении пробного пучка с длиной волны λ_0. Отклонение параметров сформированного микрорельефа от расчётных значений, приведёт к снижению ДЭ в рабочем порядке дифракции ТЛР. Таким образом, измерение и анализ ДЭ тестовой линейной решётки в отражённом свете позволяет оценить погрешность изготовления фазовой структуры РОЭ.

На сегодняшний день источники когерентного излучения могут иметь определённый стандартный набор длин волн. Кроме того, даже источники с близкими друг к другу значениями длины волны генерируемого излучения могут существенно отличаться по различным характеристикам, например, по стабильности длины волны или мощности выходного излучения, цене, доступности, компактности и т.д. В связи с этим для осуществления контроля выбирается максимально приемлемый источник излучения, длина волны которого $\lambda_и$ приближена к значению λ_0. Для компенсации несоответствия используемой длины волны расчётной, при осуществлении контроля пробный пучок падает на структуру ТЛР под углом θ к нормали, который определяется как:

$$\theta = \arccos(\frac{m_р*\lambda_и}{2*h_{ТЛР}}) . \tag{2.2}$$

Из формул 2.1 и 2.2 следует, что контроль вышеописанным методом, с использованием источника видимого диапазона, возможен при расчётной глубине микрорельефа РОЭ ≥ 190 нм.

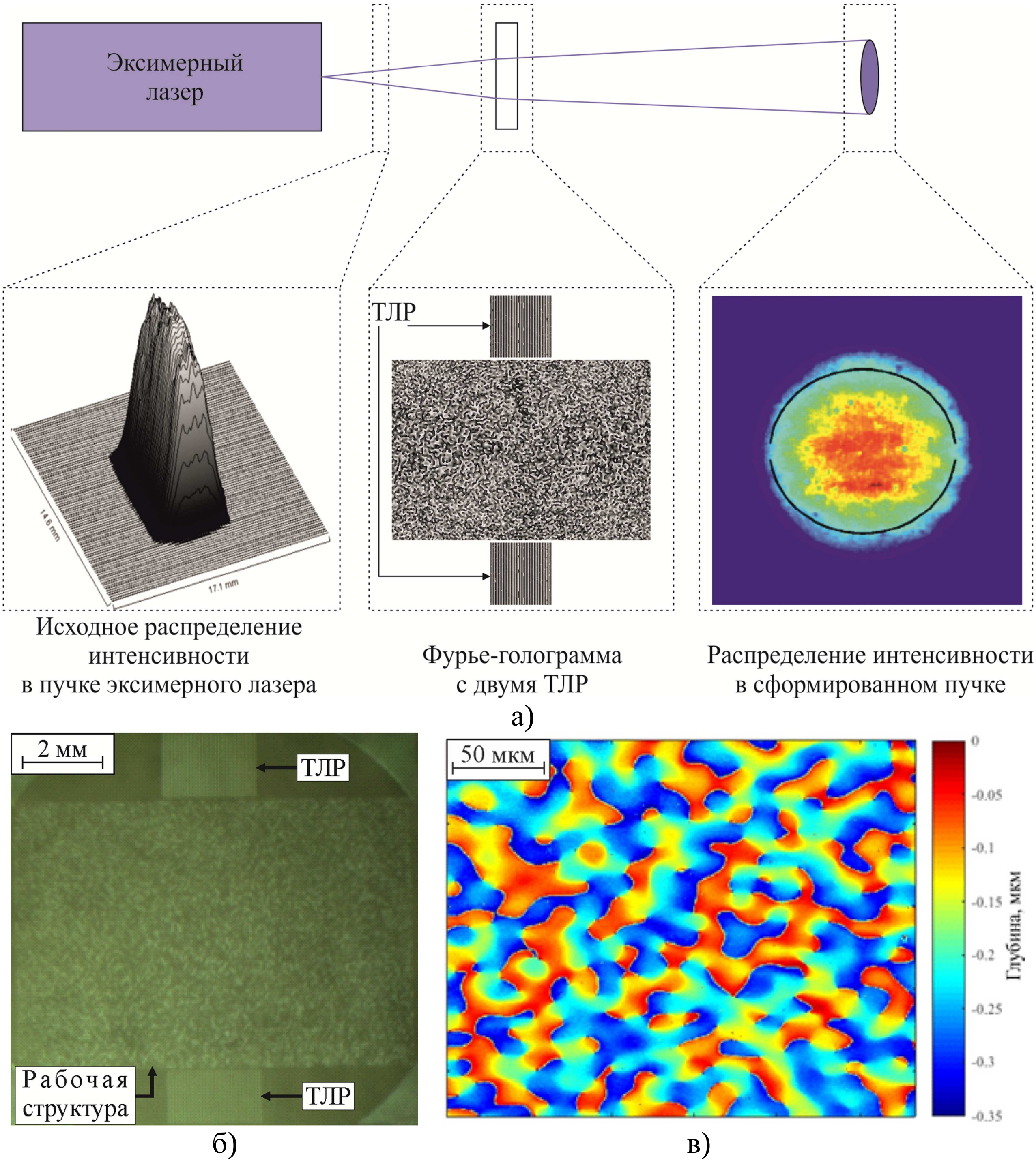


Рис. 2.1. Применение РОЭ для формирования пучка эксимерного лазера с длиной волны 193.3 нм: а) схема преобразования волнового фронта эксимерного лазера; б) фотография элемента с двумя тестовыми структурами; в) карта глубины микрорельефа в центральной области элемента

При измерении ДЭ в отражённом свете от структур, рельеф которых сформирован в оптически прозрачном материале, для устранения деструктивной интерференции между дифрагированным излучением и изучением, отражённым от обратной стороны подложки, авторами работы [115] было предложено два метода. Первый – наносить на обратную сторону исследуемого РОЭ слой глицерина и копировальной бумаги с матовой поверхностью. Второй – напылять на лицевую сторону элемента со структурой непрозрачную металлическую пленку на время измерения, а после стравливать ее. Последний метод, упрощённая схема которого представлена на рис. 2.2, давал существенно более стабильные результаты.

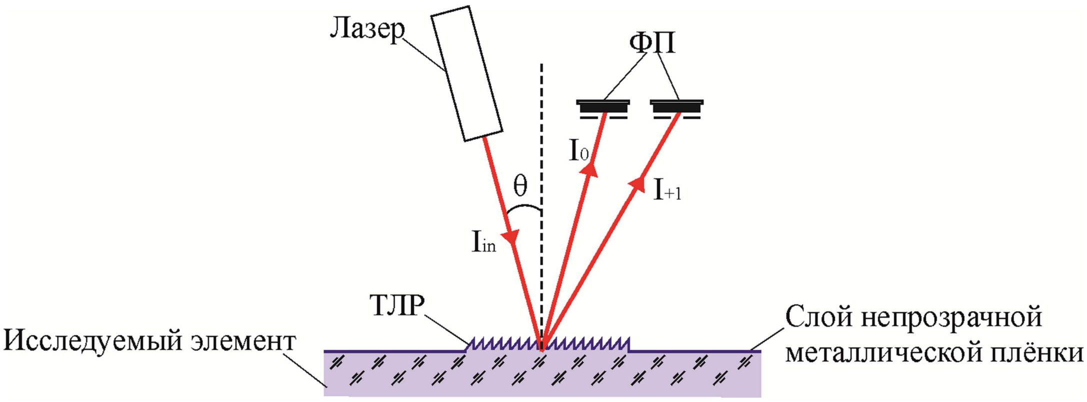


Рис. 2.2 Упрощённая схема измерения ДЭ в отражённом свете при напылении на исследуемую структуру тонкого слоя непрозрачной металлической плёнки

Однако экспериментальная апробация показала, что данный подход не позволяет контролировать элементы, предназначенные для работы с мощным лазерным излучением ДУФ диапазона. Это связано с тем, что после стравливания металлической плёнки частицы металла остаются в микродефектах поверхности РОЭ, и под воздействием мощного ДУФ излучения со временем происходит разрушение кварцевой подложки, вследствие чего ухудшается дифракционная эффективность элемента.

Для решения этой проблемы было предложено отказаться от напыления хрома на микрорельеф РОЭ и модифицировать классический для оптики метод с иммерсионной жидкостью и матовой бумагой. Матовую бумагу предлагается заменить на опорную подложку (ОП), которая выполнена из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый РОЭ (в нашем случае оптический кварц). Обратная сторона ОП должна быть выполнена таким образом, чтобы не допустить попадания отражённого от неё излучения в канал измерения

ДЭ. Иммерсионная жидкость, коэффициент преломления которой $n_2 \approx n_1$ (где n_1 – коэффициент преломления материала подложки исследуемого РОЭ), позволяет «убрать» воздушную границу и тем самым обеспечить беспрепятственное попадание прошедшего излучения на обратную сторону ОП. Для исключения царапания обратной стороны РОЭ при установке и снятии исследуемого элемента о поверхность ОП на нее наклеиваются узкие полоски тонкой пластиковой ленты по краям зоны измерения. Использование ОП обладает рядом преимуществ по сравнению с матовой бумагой. Во-первых, обеспечивается лучшее прилегание к поверхности исследуемого РОЭ. Во-вторых, данный метод позволяет повысить повторяемость получаемых результатов измерения ДЭ. Для апробации предложенного метода контроля было проведено исследование применения двух типов ОП: клиновой (рис. 2.3а) и плоской с рассеивающим (матовым) покрытием (рис. 2.3б) [169,170].

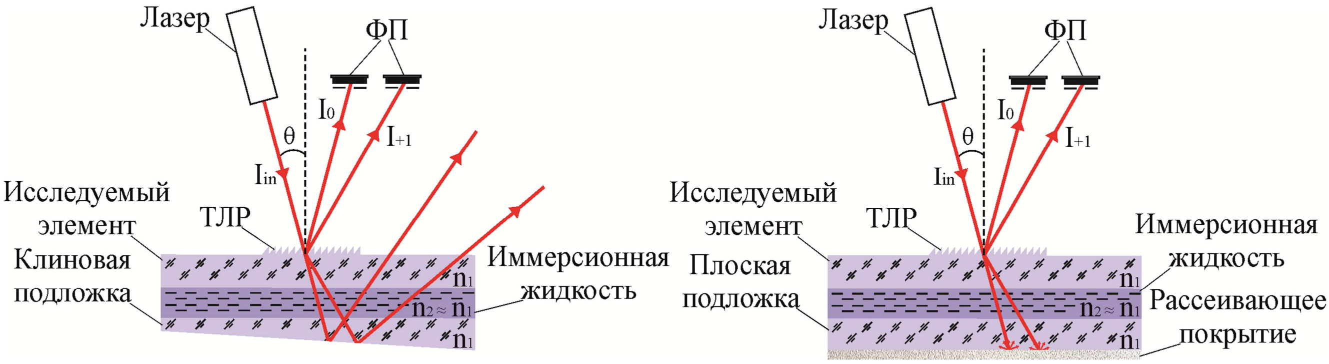


Рис. 2.3. Упрощённая схема измерения ДЭ в отражённом свете от ТЛР, выполненных в оптически прозрачном материале: с использованием клиновой ОП (а) и с использованием плоской ОП с рассеивающим покрытием (б)

РОЭ, для которых разрабатывался данный метод контроля, изготавливаются методом проекционной фотолитографии с растрированным фотошаблоном [77,111] на кварцевой подложке диаметром 100 мм. В процессе изготовления на одной подложке располагается по 20 РОЭ. Каждый элемент, помимо рабочей структуры, включает в себя по две ТЛР (рис. 2.1а-б) с периодом 100 мкм. Расчётная глубина рельефа РОЭ, как и глубина ТЛР $h_{ТЛР}$, составляет 344 нм.

Основная погрешность при изготовлении данных элементов обусловлена, в основном, неточностью формирования глубины фазового профиля [168].

Для апробации предложенного метода контроля, из изготовленной подложки с элементами была вырезана тестовая пластина, содержащая 5 РОЭ (условно обозначенные как A, B, C, D и E), и 10 ТЛР соответственно (A1, A2, B1, B2 … , E1, E2). Для начала тестовая пластина была покрыта слоем хрома (рис. 2.4а), после чего измерялась ДЭ первого дифракционного порядка ТЛР, как показано на рис. 2.2. Измерения ДЭ осуществлялись с использованием лазерного модуля с длиной волны 691 нм. Полученные данные мы считали эталонными. За тем с ТЛР D и E был стравлен слой хрома (рис. 2.4б), после чего, тестовая пластина поочерёдно устанавливалась, через слой иммерсионной жидкости на исследуемые ОП и производилось повторное измерение ДЭ ТЛР. В качестве иммерсионной жидкости был использован раствор глицерина, коэффициент преломления которого был измерен на рефрактометре ИРФ-22 [175] и составлял 1.460. Коэффициент преломления кварцевой подложки, который был измерен на том же приборе, был равен 1.4595. Данные ДЭ ТЛР с индексами A, B и C, с которых хром не стравливался, использовались для того, чтобы определить повторяемость результатов между измерениями.

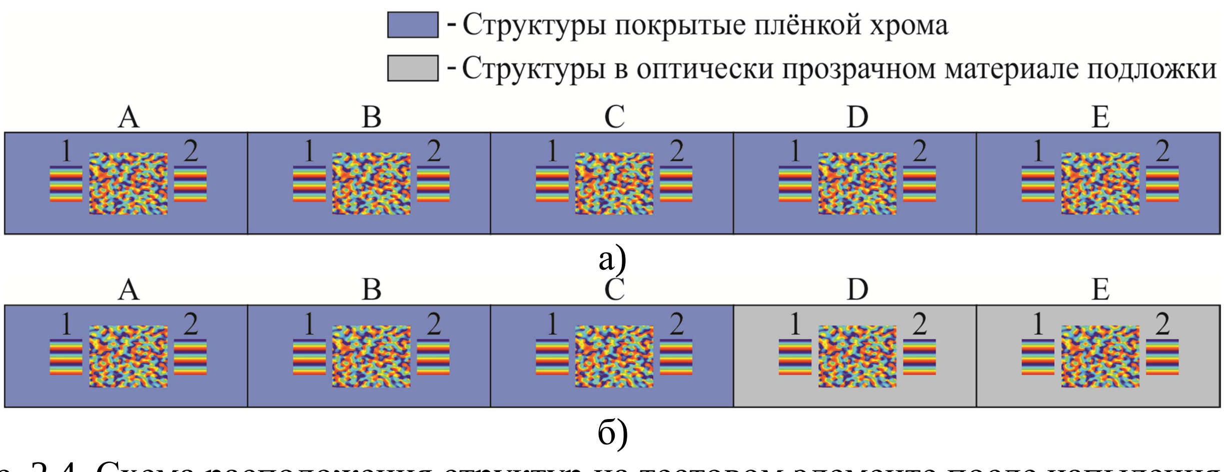


Рис. 2.4. Схема расположения структур на тестовом элементе после напыления (а) и после частичного стравливания (б) плёнки хрома

Процесс измерения дифракционной эффективности ТЛР был автоматизирован в составе многоканальной измерительной системы [171], схема которой представлена на рис. 2.5 (внешний вид представлен на рис. 2.6). Данная система предназначена для контроля при изготовлении элементов дифракционной и конформальной оптики и объединяет в себе методы дифрактометрического и спектрального контроля различных параметров исследуемых элементов. В частности, на данном устройстве производится автоматическое измерение ДЭ ТЛР в отражённом свете (канал №1), измерение функции пропускания растрового фотошаблона в области тестовой синусоидальной решётки (канал №2 – более подробно об этом написано в пункте 2.2.2). Также с помощью спектральных измерений в отражённом или прошедшем излучении (канал №3), осуществляется измерение эффективности пропускающих аттенюаторов в нулевом (рабочем) дифракционном порядке на расчётной длине волны, а также глубины бинарного фазового рельефа в локальных областях исследуемого элемента и распределение толщины плёнок фоторезиста спектральным методом [115,176,177].

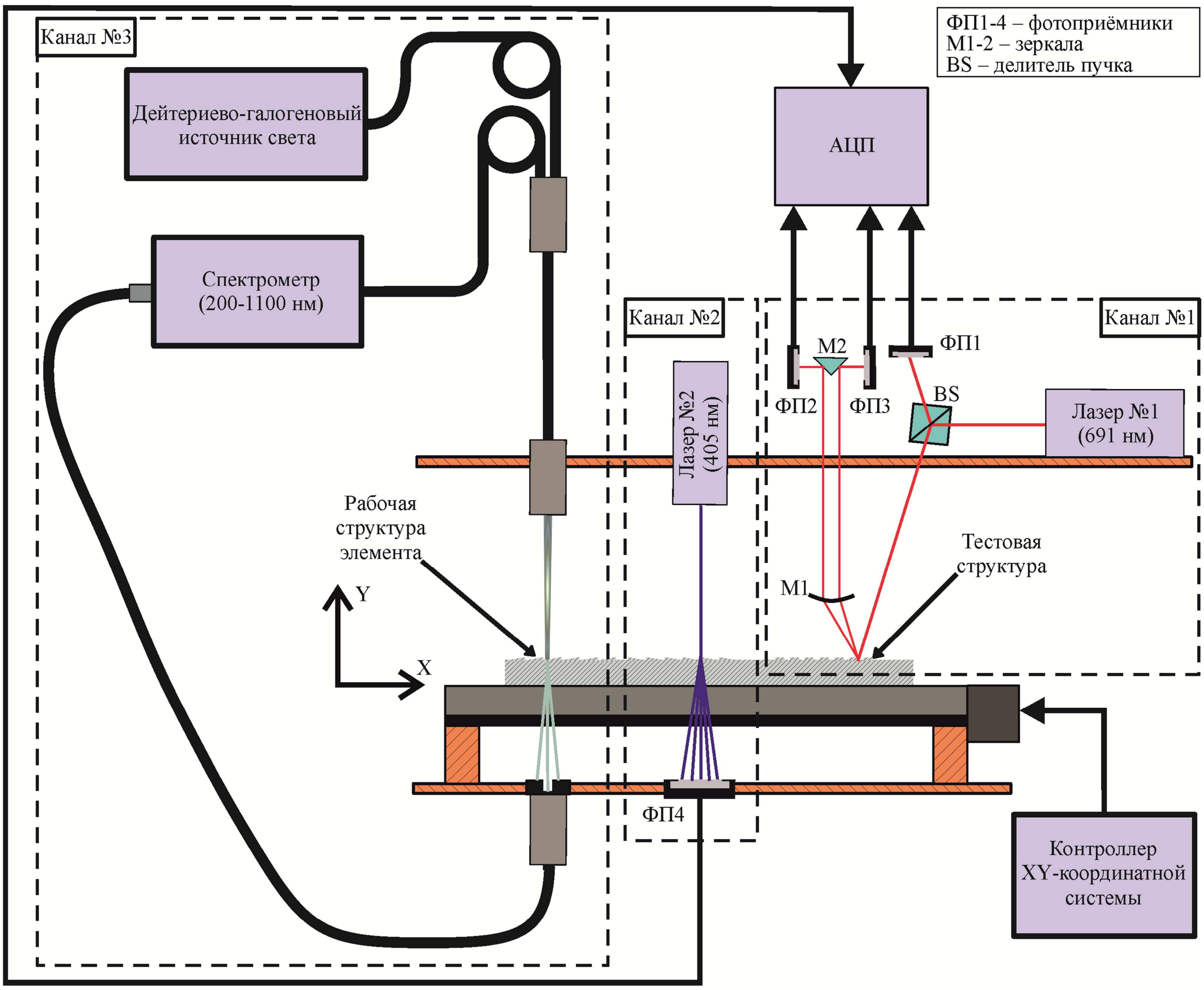


Рис. 2.5. Упрощённая схема многоканальной измерительной системы

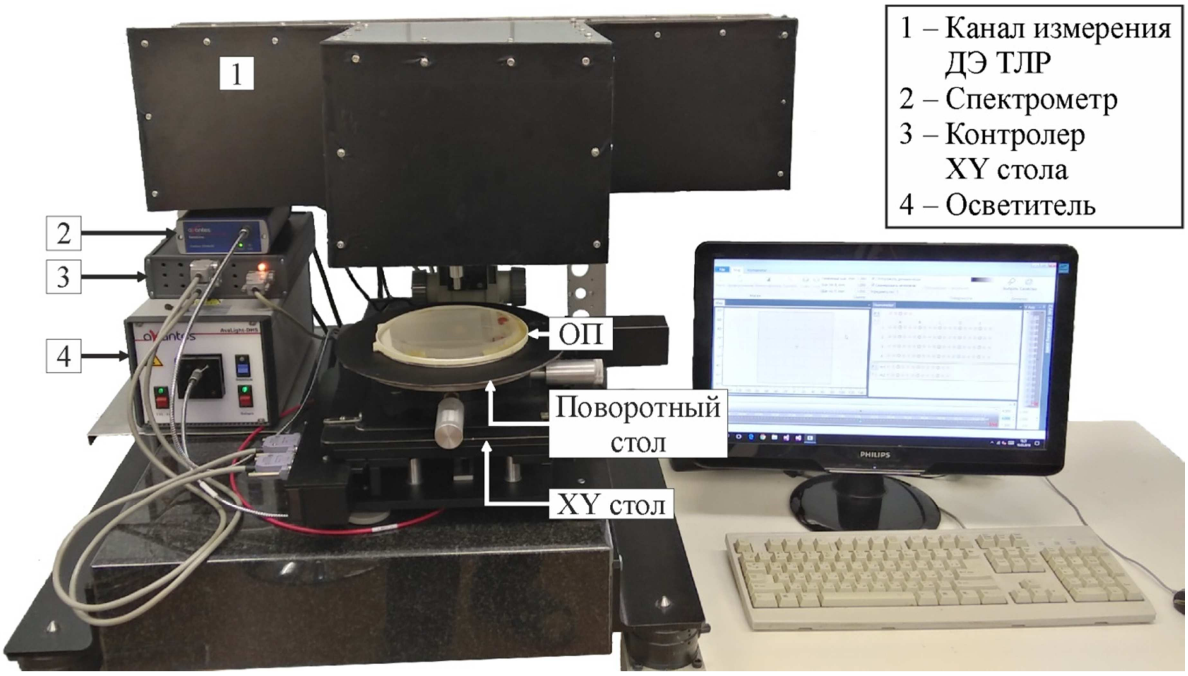


Рис. 2.6. Внешний вид многоканальной измерительной системы

В многоканальной измерительной системе для измерения ДЭ используются статично установленные фотоприёмники (ФП), а измерение ДЭ осуществляется следующим образом. Сначала с помощью ФП2 регистрируется мощность отражённого лазерного излучения от области элемента, в которой отсутствует многоуровневая структура (либо от плёнки хрома, либо от поверхности плавленого кварца соответственно). Данное значение соответствует опорной мощности P_{ref}. Затем, пробный пучок перемещается на контролируемую ТЛР, и с помощью ФП2 и ФП3 регистрируются мощности 0-го (P_0) и рабочего (в данном случае 1-го (P_1)) дифракционных порядков соответственно. Дифракционная эффективность m-го дифракционного порядка (η_m) определяется, как:

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{ref}} * 100\% \,. \tag{2.3}$$

Данные, полученные с ФП1, используются для контроля флуктуаций мощности источника излучения в процессе выполнения измерений.

В таблице 2.1 приведены данные измеренной дифракционной эффективности ТЛР в первом порядке дифракции, усреднённые по 15 измерениям, до частичного стравливания хрома с поверхности тестовой пластины и после него, с применением клиновой ОП и плоской ОП с рассеивающим покрытием. Результаты измерения ДЭ, полученные при использовании исследуемых опорных подложек, имеют хорошее согласие, как между собой, так и с данными полученными от ТЛР покрытых хромом. Таким образом, можно сделать вывод, что оба типа предложенных опорных подложек позволяют производить измерения ДЭ в отражённом свете от структур, выполненных в оптически прозрачном материале. При этом, в измерительных схемах, в которых для регистрации ДЭ используются статично установленные фотоприёмники (как показано на рис. 2.3 и рис. 2.5), наиболее эффективным является использование клиновой ОП, так как в этом случае полностью исключается попадание отражённого (или рассеянного) от обратной поверхности подложки излучения в измерительный канал. Однако, в случае измерения ДЭ в широком угловом диапазоне с использованием рассеивающих экранов методами, описанными в главе 1, при использовании клиновой ОП, отражённое от её обратной стороны излучение попадёт на рассеивающий экран, и будет зарегистрировано видеокамерой. В связи с этим, при регистрации дифракционной картины на устройствах такого типа наиболее эффективным является использование плоской ОП с рассеивающим покрытием, использование которой исключает регистрацию ложной дифракционной картины.

Таблица 2.1. Результаты измерения дифракционной эффективности ТЛР для тестовой пластины

	Измерение ДЭ до частичного стравливания хрома			**Измерение ДЭ после частичного стравливания хрома с использованием клиновой ОП**					**Измерение ДЭ после частичного стравливания хрома с использованием плоской ОП с рассеивающим покрытием**				
Структура	**Покрытие хромом**	**ТЛР 1 ДЭ, %**	**ТЛР 2 ДЭ, %**	**Покрытие хромом**	**ТЛР 1 ДЭ, %**	**ТЛР 2 ДЭ, %**	**ТЛР 1 - Расхождение результатов, %**	**ТЛР 2 - Расхождение результатов, %**	**Покрытие хромом**	**ТЛР 1 ДЭ, %**	**ТЛР 2 ДЭ, %**	**ТЛР 1 - Расхождение результатов, %**	**ТЛР 2 - Расхождение результатов, %**
A	+	93.06	93.60	+	93.05	94.78	0.01	1.18	+	93.64	94.13	0.58	0.54
B	+	93.27	93.90	+	94.49	93.88	1.22	0.02	+	94.06	93.92	0.79	0.02
C	+	94.24	93.36	+	94.37	92.84	0.13	0.51	+	94.16	92.42	0.08	0.93
D	+	93.84	90.64	-	93.88	91.87	0.04	1.23	-	94.01	90.36	0.16	0.27
E	+	92.91	86.77	-	92.87	85.68	0.04	1.09	-	92.27	86.10	0.64	0.67

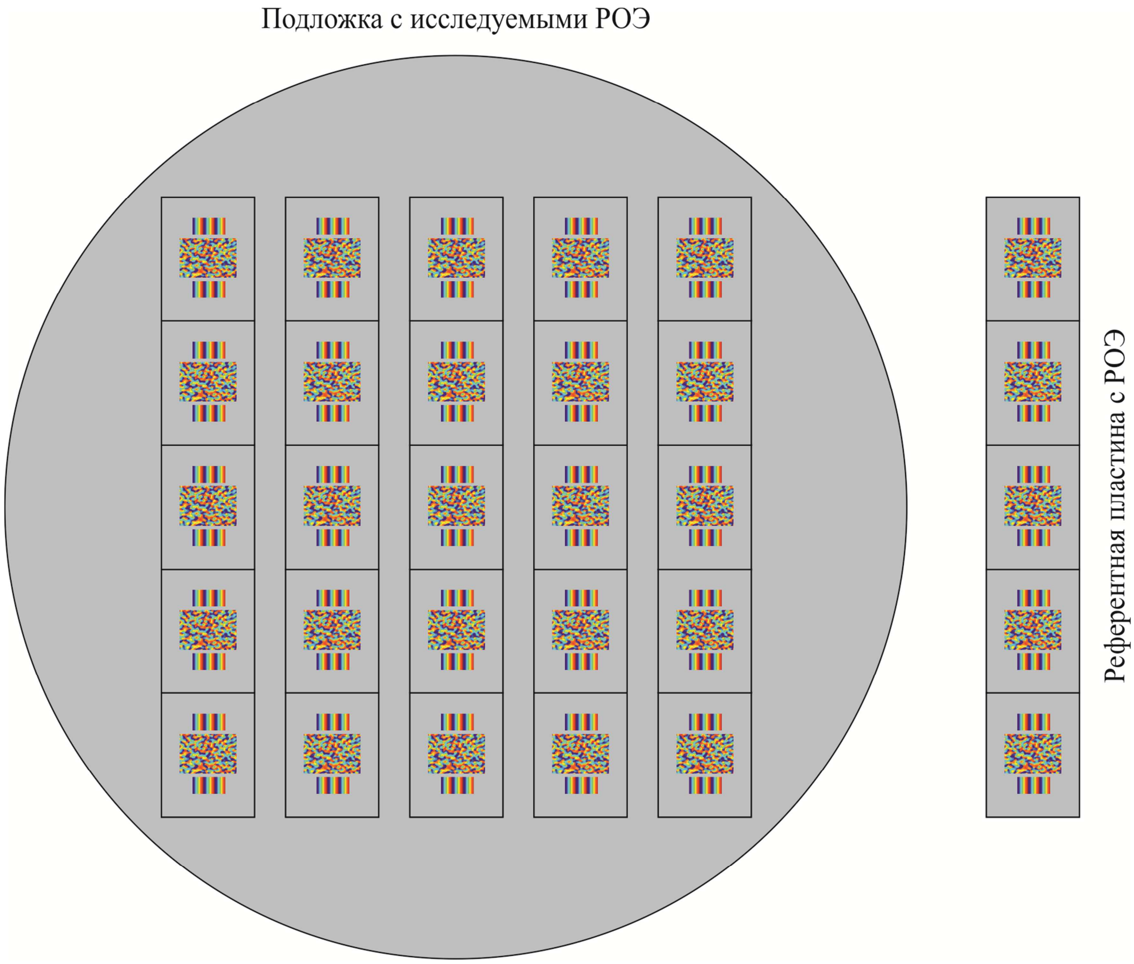


Рис. 2.7. Расположение исследуемой и референтной пластины с РОЭ на опорной подложке при контроле дифракционной эффективности ТЛР

При проведении измерений дифракционной эффективности ТЛР предложенным методом, использование статично установленных фотоприёмников в измерительном канале по сравнению с использованием рассеивающих экранов и видеокамеры более предпочтительно, так как позволяет облегчить процесс юстировки системы. При измерении реальных элементов, для юстировки системы на клиновую ОП через слой иммерсионной жидкости, помимо подложки с исследуемыми РОЭ также устанавливается референтная пластина, включающая в себя 5 РОЭ (10 ТЛР), ДЭ которых была измерена ранее (рис. 2.7). Перед началом измерения референтная пластина на слое иммерсионной жидкости позиционируется с помощью юстировочного столика для выставления угла ориентации ТЛР и угла падения пробного пучка таким образом, чтобы ДЭ тестовых линейных решёток референтной пластины имела максимальное значение (или значение, полученное при предыдущих измерениях). Затем осуществляется юстировка исследуемой подложки таким образом, чтобы соответствующие дифракционные порядки попадали на ФП2 и ФП3. Данный подход позволяет обеспечить повторяемость результатов от измерения к измерению, и упростить процесс юстировки исследуемой подложки с элементами.

Предложенный метод позволяет достаточно быстро, в течение одного часа (с учётом юстировки системы перед началом измерения), производить контроль подложек, включающих в себя группу РОЭ. На рис. 2.8 показан результат контроля двух подложек, с 20 РОЭ (40 ТЛР) каждая, по анализу ДЭ первого ДП тестовых линейных решёток. Минимально допустимое значение ДЭ составляет 90%, что соответствует отклонению глубины структуры от расчётных параметров ~ 35 нм. Применение предложенного метода позволило значительно повысить скорость оценки погрешности изготовления этих элементов по сравнению с методом анализа параметров микрорельефа ТЛР по профилограммам [178], полученным на интерферометре белого света, который применялся ранее.

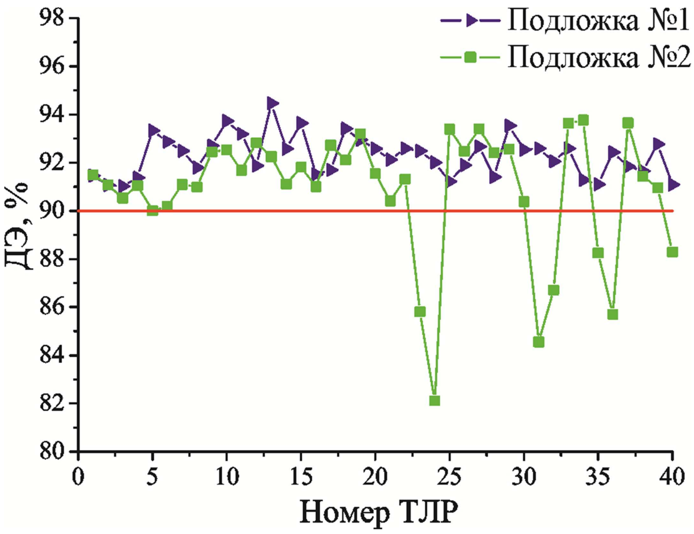


Рис. 2.8. Пример контроля подложек, содержащих 20 РОЭ, по измерению дифракционной эффективности ТЛР

2.2. Поэтапный контроль конформальных оптических элементов по анализу характеристик тестовых решёток с синусоидальной формой профиля

Конформальными называют элементы, функция пропускания которых выбирается, исходя из заданных внешних неоптических условий, а не из набора стандартных оптических поверхностей [68]. В частности, такие элементы применяются как статические корректоры волнового фронта, исправляющие аберрации активных элементов мощных твердотельных лазеров. Искажения волнового фронта при прохождении через кристалл активного элемента лазера являются следствием неоднородности распределения показателя преломления в теле кристалла. Выращивание кристаллических активных элементов по методу Чохральского крайне трудозатратный и дорогостоящий процесс. При этом полученные изделия, зачастую, не удовлетворяют требованиям по оптическому качеству. В ИАиЭ СО РАН с применением растровой полутоновой технологии осуществляется изготовления индивидуальных конформальных статических корректоров для кристаллических активных элементов из YAG:Nd^{3+} [68,116].

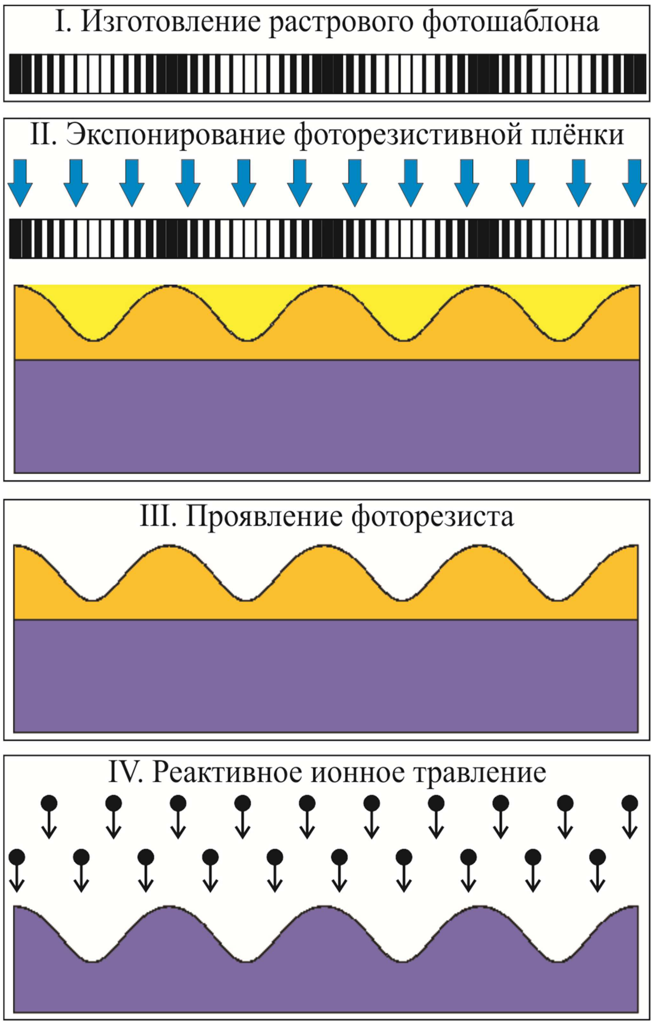


Рис. 2.9. Этапы растровой полутоновой технологии

Каждый из этапов растровой полутоновой технологии (рис. 2.9) является критическим, то есть ошибки, возникшие на одном из этапов, не могу быть исправлены в дальнейшем. В связи с этим, актуальной задачей является разработка методов не только финишного, но и промежуточного контроля, осуществляемого на различных этапах изготовления элемента. При этом важной задачей промежуточного контроля является получение необходимой информации, которая позволит принять меры для устранения ошибок формирования рельефа РОЭ, возникших на различных технологических этапах.

Измерение параметров микрорельефа, сформированного на промежуточной стадии растровой полутоновой технологии в слое фоторезиста, не может быть выполнено с применением интерферометров когерентного света типа Физо [179] (которые могут быть использованы для финишного контроля параметров изготовленного элемента по всей его площади [68,116]). Это связано с тем, что прозрачная плёнка фоторезиста имеет иной показатель преломления по сравнению с кварцевой подложкой, что приводит к деструктивной интерференции в слое фоторезиста. Интерферометры белого света (WLI-интерферометры) менее подвержены влиянию деструктивной интерференции за счёт достаточно малой длины когерентности, и могут быть использованы для измерения параметров микрорельефа, сформированного в слое фоторезистивной плёнки. Однако их применение ограничено контролем структур в поле относительно малого размера, в то время как рельеф конформальных элементов обладает низкой пространственной частотой. В частности, имеющийся в ИАиЭ СО РАН WLI-интерферометр фирмы BMT GmbH позволяет производить измерения в поле шириной 1.4 мм. В связи с этим, для осуществления контроля на промежуточных стадиях изготовления конформальных корректоров, актуальным является использование тестовых решёток, размер которых позволит осуществлять измерение их параметров с помощью интерферометра белого света.

2.2.1. Выбор формы профиля тестовой решётки

Для контроля параметров многоуровневого рельефа, сформированного в плёнке фоторезиста при изготовлении конформальных статических корректоров с помощью WLI-интерферометра, авторами опубликованных ранее работ [68,115] было предложено использовать ТЛР, расположенную вокруг (вне рабочего поля) изготавливаемого элемента. Глубина ТЛР при этом равна максимальной глубине формируемого рельефа, изготавливаемого конформального корректора. Анализ отклонения глубины [178] и формы сформированной ТЛР позволяет оценить правильность расчёта параметров растрового фотошаблона (в случае неудовлетворительных результатов, дать рекомендации для записи нового фотошаблона), а также подбирать параметры экспонирования фоторезиста.

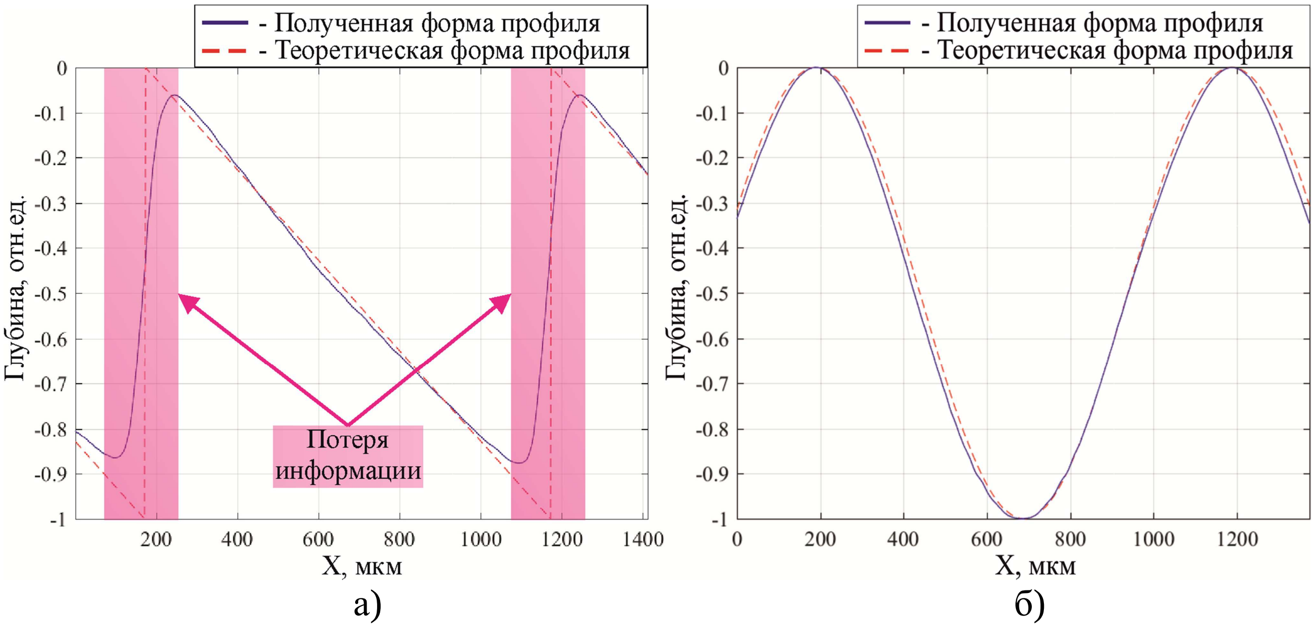


Рис. 2.10. Сравнение теоретической формы профиля с формой рельефа, сформированного в плёнке фоторезиста: а) линейная решётка; б) синусоидальная решётка

Однако, на рис. 2.10а видно, что профиль ТЛР, сформированной в плёнке фоторизиста, имеет широкий обратный скат. Причиной этого является то, что при формировании микрорельефа методом растровой полутоновой технологии, в процессе экспонирования фотошаблон располагается на значительном расстоянии от плёнки фоторезиста. Это необходимо для устранения переноса структуры растрированного фотошаблона в формируемый микрорельеф. В связи с этим, значительная область, размер которой может достигать ~ 15% от периода ТЛР, не может быть проконтролирована по полученной профилограмме. Следовательно, в указанных областях отсутствует возможность корректного определения характеристических кривых, которые необходимы для коррекции или расчета функции пропускания растрового фотошаблона, использование которого позволит минимизировать отклонения формы изготавливаемого микрорельефа, а также для подбора параметров экспонирования слоя фоторезитса, с целью получения в нём требуемой глубины микрорельефа. Кроме того, важно отметить, что профилометры, как правило, не передают корректно профиль на резких скачках исследуемого микрорельефа, что также вносит погрешность в результаты, полученные с помощью профилометрического анализа параметров ТЛР.

Для решения этой проблемы в рамках данной работы было предложено использовать решётку, имеющую синусоидальную форму профиля [170,172,173]. Как показано на рис. 2.10б, синусоидальный рельеф, сформированный в плёнке фоторезиста (в данной работе использовался резист ФП-3535 производства компании ФРАСТ-М) методом полутоновой растровой технологии, сопоставим с теоретической формой синусоидальной решётки во всех её областях. Из этого следует, что использование тестовых синусоидальных решёток (ТСР) позволяет получать полные характеристические кривые, для подбора параметров экспонирования фоторезиста, измерения отклонения полученной формы профиля и коррекции функции пропускания растрового фотошаблона.

2.2.2. Контроль функции пропускания растрового фотошаблона

Растровый полутоновой фотошаблон представляет собой набор ячеек одинакового размера, но с различным заполнением (скважностью), и применяется для получения в плоскости фоторезиста заданного изменения интенсивности экспонирующего излучения в требуемом для фотолитографического процесса диапазоне [111]. Использование тестовой синусоидальной решётки расположенной вокруг основной структуры РОЭ позволяет осуществлять контроль на стадии записи растрового фотошаблона. Благодаря тому, что функция пропускания фотошаблона в области, предназначенной для формирования ТСР, меняется плавно (рис. 2.11а), сканирование этой области пробным лазерным пучком и измерение интенсивности прошедшего излучения (рис. 2.12в) позволяет получить полную характеристическую кривую функции пропускания изготовленного фотошаблона.

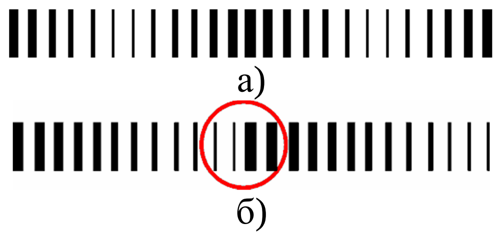


Рис. 2.11. Схематичное представление скважности ячеек фотошаблона в областях, предназначенных для формирования рельефа тестовых решёток: а) тестовая синусоидальная решётка; б) тестовая линейная решётка

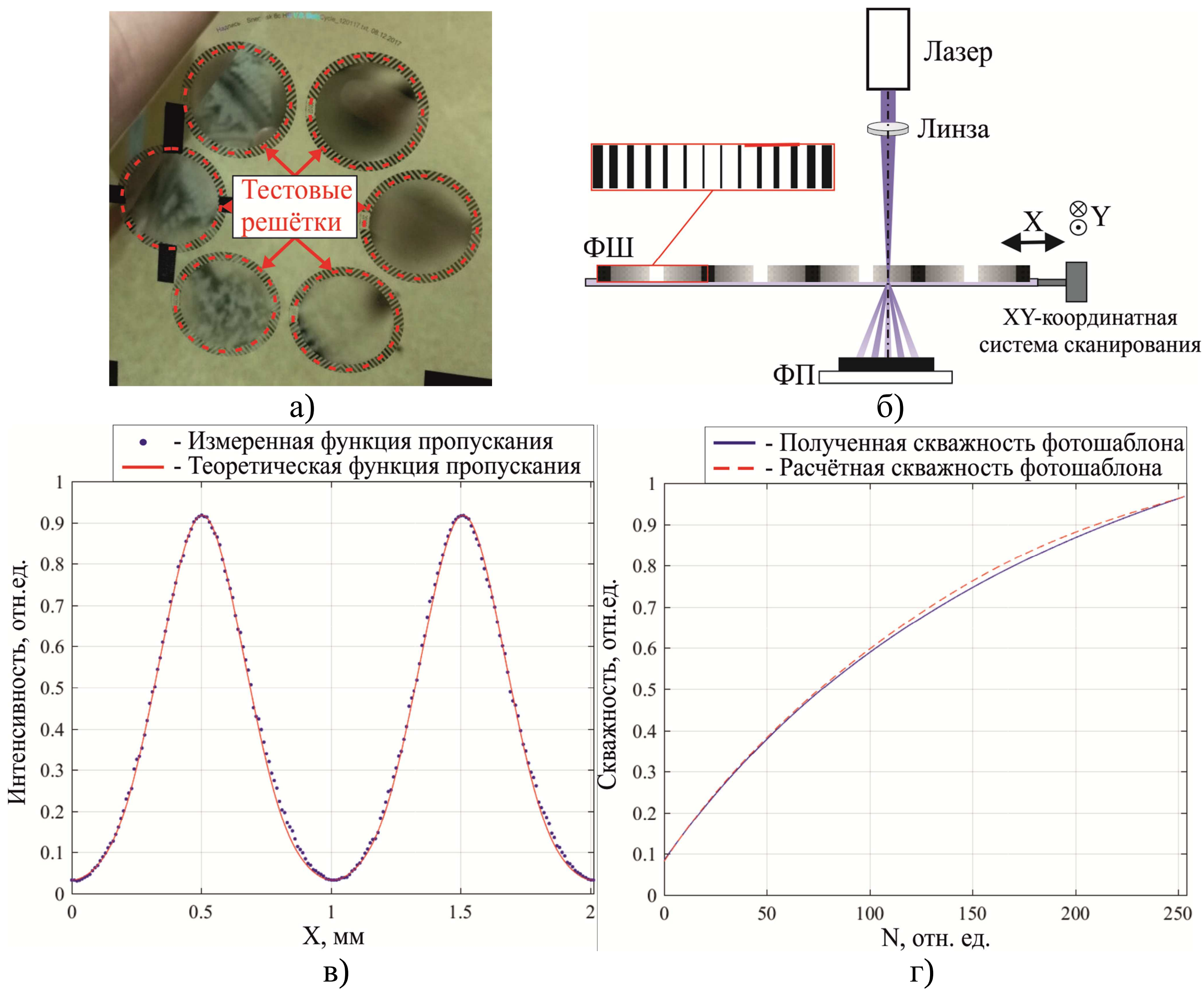


Рис. 2.12. Контроль растрового фотошаблона по анализу прошедшей интенсивности в области ТСР: а) фотография фотошаблона; б) схема измерения; в) результаты измерение функции пропускания фотошаблона; г) определение функции скважности изготовленного фотошаблона и сравнение её с расчётной

Измерив функцию пропускания фотошаблона в тестовой области, можно восстановить функцию скважности записанных растрированных ячеек и сравнить её с расчётной (рис. 2.12г). Процесс измерения функции пропускания ФШ был автоматизирован в составе многоканальной измерительной системы [171], описанной в разделе 2.1 (канал №2 на рис. 2.5). На рис. 2.12а представлена фотография растрового фотошаблона, предназначенного для изготовления шести конформальных статических корректоров. Схема измерения функции пропускания ФШ в областях, предназначенных для формирования рельефа ТСР, представлена на рис. 2.12б.

При использовании ТЛР данный метод контроля не позволяет получать полную характеристическую кривую функции скважности ячеек (или функции пропускания) растрового ФШ. В отличие от синусоидальной тестовой решётки функция пропускания ФШ в областях, предназначенных для формирования экстремумов профиля ТЛР, меняется скачкообразно (рис. 2.11б). Пробный сканирующий пучок, используемый при измерении интенсивности прошедшего излучения (канал №2 на рис. 2.5), имеет размер порядка 5 ячеек фотошаблона. Следовательно, в процессе сканирования, при исследовании области экстремумов ТЛР, измеренная функция пропускания меняется плавно (а не скачкообразно) от минимума к максимуму (или наоборот), образуя подобие обратного ската, что не позволяет осуществлять контроль в данных областях описанным методом.

2.2.3. Контроль параметров микрорельефа, сформированного в плёнке фоторезиста по анализу измеренного профиля ТСР

После контроля функции пропускания растрового фотошаблона, он используется для экспонирования фоторезистивной плёнки, нанесённой на подложку, с последующим её проявлением. Это приводит к формированию на ней поверхностного многоуровневого микрорельефа, контроль основных параметров которого можно осуществить по анализу измеренной на WLI-интерферометре области тестовой синусоидальной решётки. Для анализа параметров ТСР в рамках данной работы с использованием пакета прикладных программ MATLAB [157] был разработан программный код, алгоритм работы которого описан ниже.

Для начала, на измеренной профилограмме выбирается исследуемая область Δy (рис. 2.13а), и, после ориентации профилограммы (рис. 2.13б и рис. 2.13в), профиль в выбранной области усредняется для дальнейшего анализа (рис. 2.13г).

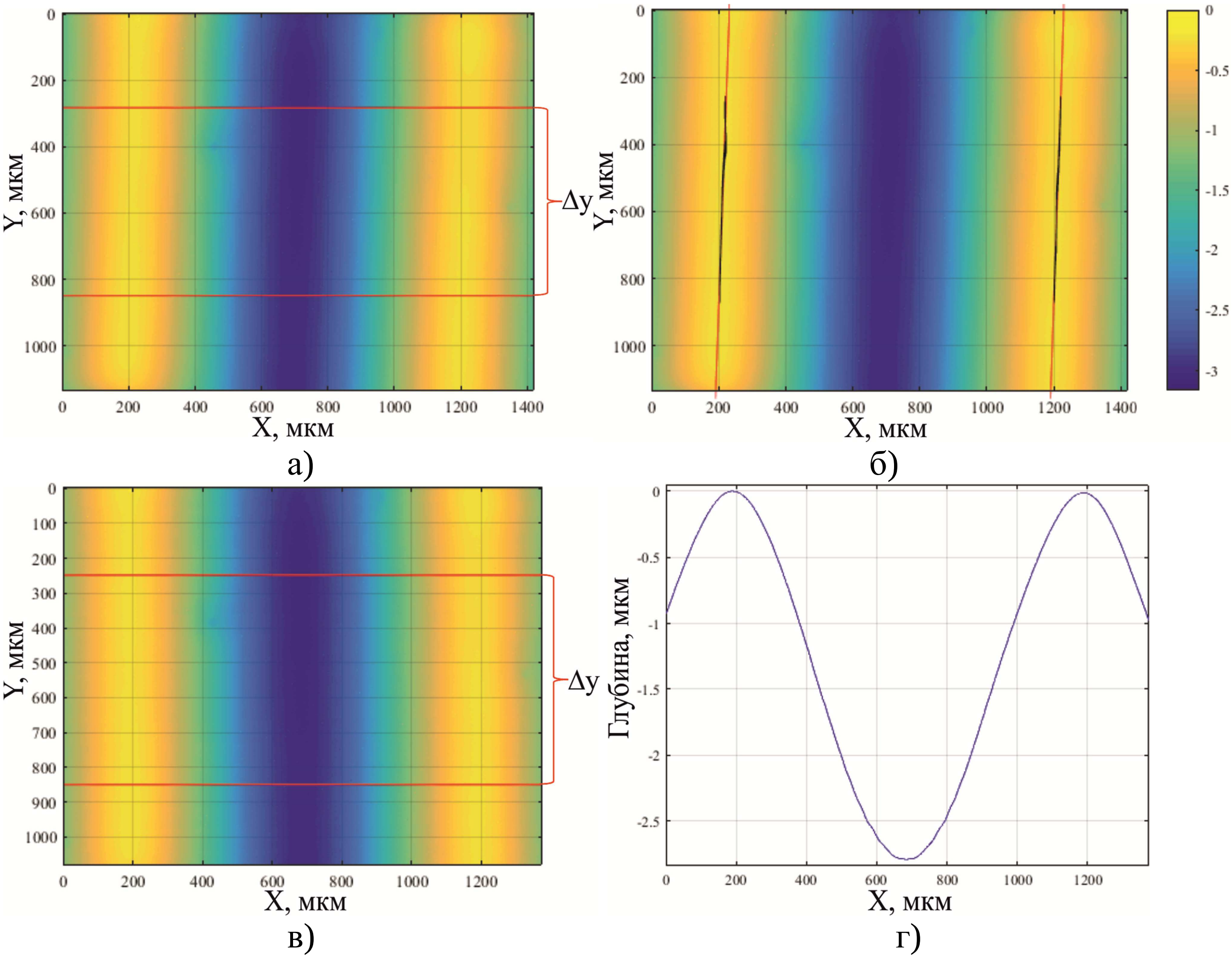


Рис. 2.13. Определение усреднённого профиля ТСР: а) исходная профилограмма ТСР, измеренная на WLI-интерферометре; б) поиск максимумов ТСР (чёрные точки – найденные методом построчного сканирования максимумы; красные линии – аппроксимированные прямые); в) профилограмма ТСР после выравнивания; г) усреднённый по области Δy профиль ТСР

В общем случае сформированный профиль ТСР может значительно отличаться от синусоидальной формы. В связи с этим аппроксимация профиля с целью его сглаживания и дальнейшей обработки осуществляется «сшивкой» функциий $h_i(x)$, где $h_i(x)$ – полиномы 7-ой степени. Количество функций $h_i(x)$

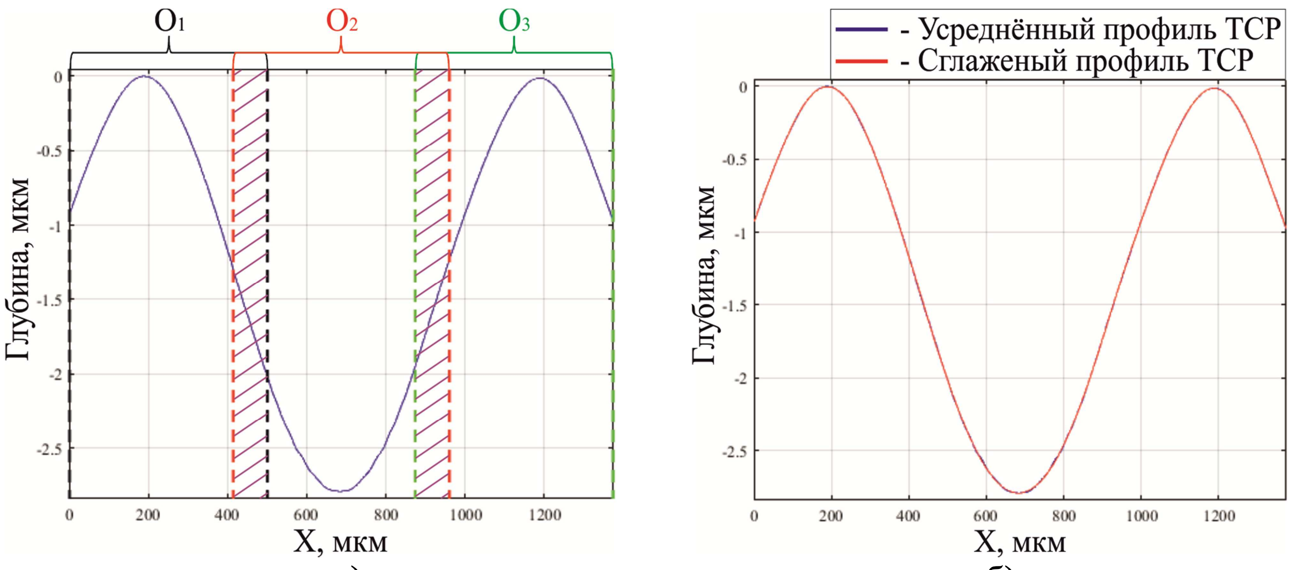
соответствует количеству зарегистрированных на профилограмме экстремумов (E) ТСР. Для аппроксимации, весь измеренный диапазон вдоль оси X (рис. 2.13г) который равен:

$$F = \max(X) - \min(X) \tag{2.4}$$

делится на количество зарегистрированных экстремумов ТСР. Каждая функция $h_i(x)$ аппроксимирует область одного из экстремумов ТСР (области O_i на рис. 2.14а), которая лежит в диапазоне:

$$x_j \in \begin{cases} \left[\min(x)\ ;\ \min(x) + \frac{j}{N}F + K\right], \text{если } j = 1 \\ \left[\min(x) + \frac{j-1}{N}F - K\ ;\ \min(x) + \frac{j}{N}F + K\right], \text{если } 1 < j < E\ , \\ \left[\min(x) + \frac{j-1}{N}F - K\ ;\ \min(x) + \frac{j}{N}F\right], \text{если } j = E \end{cases} \tag{2.5}$$

где j – порядковый номер аппроксимируемого экстремума, а K – коэффициент наложения функций который равен (K=F*0,1/E).



а) б)

Рис. 2.14. Аппроксимация профиля ТСР: а) разделение ТСР на области для дальнейшей аппроксимации; б) сглаженный профиль ТСР после аппроксимации

«Сшивка» функций для получения сглаженного профиля ТСР (рис. 2.14б) осуществляется в областях их наложения (рис. 2.14а), а координаты точки сшивки (x_s) для функций $h_i(x)$ и h_i+1(x) определяются из условия:

$$\begin{cases} \min\left(\left|h_j(x_{s-1}) - h_{j-1}(x_{s-1})\right| + \left|h_j(x_s) - h_{j-1}(x_s)\right| + \left|h_j(x_{s+1}) - h_{j-1}(x_{s+1})\right|\right) \\ \min(x) + \frac{j-1}{i}F - K \le x_s \le \min(x) + \frac{j-1}{i}F + K \\ 2 \le \mathrm{j} \le E - 1 \end{cases} . \quad (2.6)$$

После сглаживания для дальнейшего анализа необходимо скомпенсировать наклон измеренного профиля, то есть точки максимумов необходимо расположить на одной высоте (равной нулю). Для горизонтирования профиля (рис. 2.15) находятся координаты пиков ТСР (x_i;y_i), по которым определяется угол наклона аппроксимированного профиля (U). Координаты для каждой точки (x';y') полученной в результате поворота точки (x;y) в процессе горизонтирования определяются из соотношения:

$$\begin{matrix} x' = x\cos(U) \mp y\sin(U) \\ y' = \pm x\sin(U) + y\cos(U) \end{matrix}, \quad (2.7)$$

где верхний знак указан для поворота координат против часовой стрелки, а нижний для поворота по часовой стрелке.

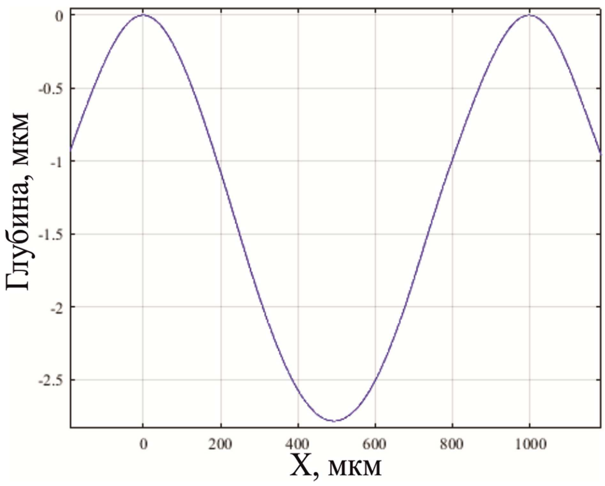


Рис. 2.15. Профиль ТСР после сглаживания и горизонтирования

После горизонтирования аппроксимированного профиля ТСР в новой системе координат, снова находятся координаты всех точек экстремумов ТСР (x_i;y_i), как максимумов, так и минимумов. Усреднённое значение y_i - координат всех точек минимумов измеренного профиля соответствует значению максимальной глубины сформированной ТСР в исследуемой области.

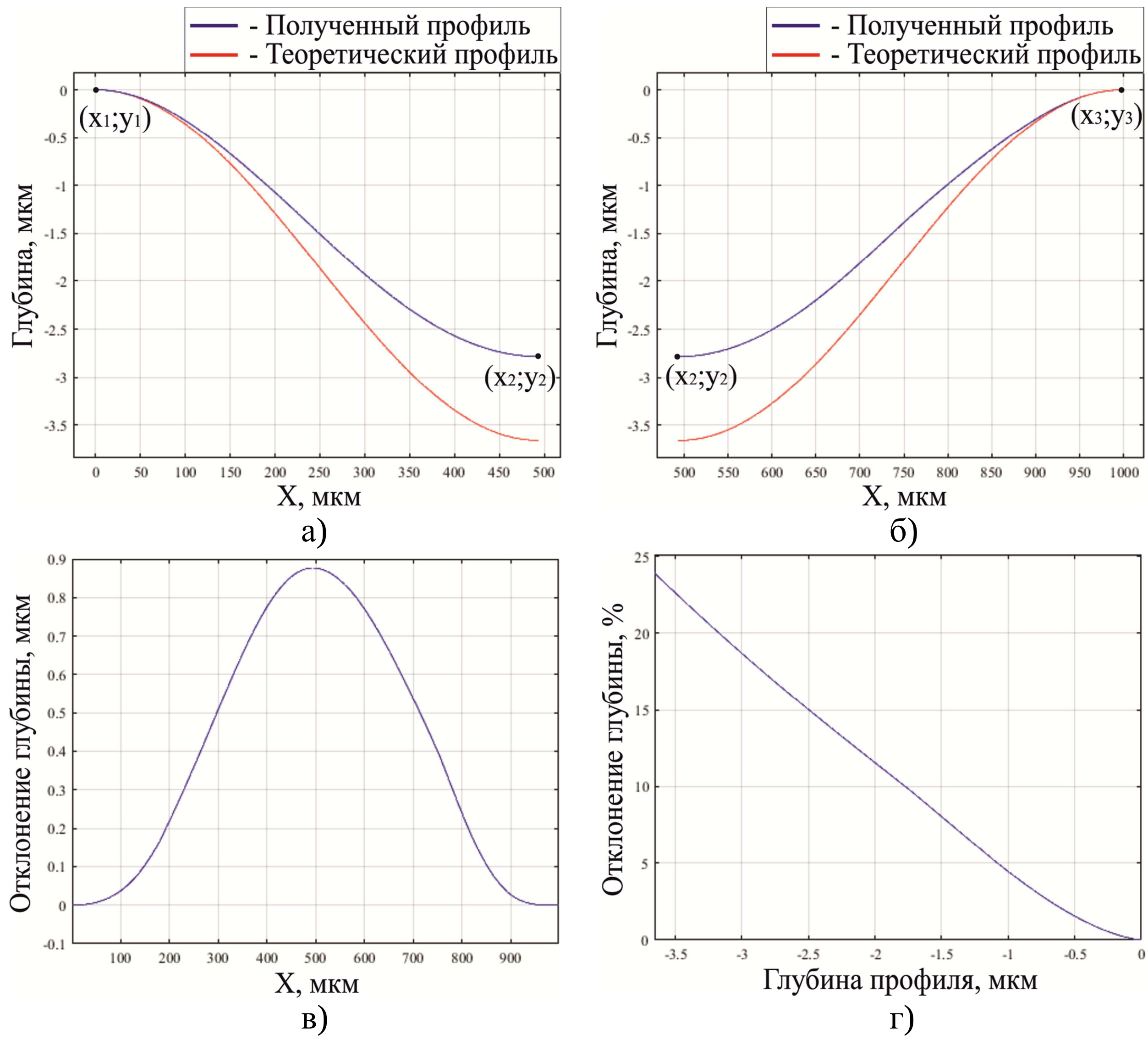


Рис. 2.16. Определение отклонения полученной глубины ТСР от расчётных параметров: область между первым и вторым (а), а также вторым и третьим (б) экстремумами исследуемого профиля ТСР; отклонения глубины сформированного профиля в зависимости от координаты ТСР (в); характеристическая кривая отклонения сформированной глубины микрорельефа от расчётных значений (г)

Затем, как показано на рис. 2.16а и рис. 2.16б, весь измеренный профиль ТСР разбивается на отдельные участки, ограниченные двумя точками экстремумов, каждый из которых сравнивается с аналогичным участком теоретической синусоидальной функции, имеющей расчётную глубину. Период каждой j-й теоретической синусоидальной функции (d_j) ограниченной двумя точками соседних экстремумов ТСР определяется отдельно и составляет:

$$d_j = (x_{j+1} - x_j) * 2 \,. \qquad (2.8)$$

Максимумы теоретической синусоидальной функции совмещены с точками максимумов соответствующих фрагментов измеренной ТСР (x_i;y_i), как показано на рис. 2.16а и рис. 2.16б.

Сравнение значений глубины теоретической синусоидальной функции в каждой точке, и измеренной глубины сформированной ТСР позволяет получить график разности глубин между полученной глубиной в материале образца и расчётной (рис. 2.16в). После чего, усредняя значения по всем участкам ТСР, можно определить характеристическую кривую отклонения глубины рельефа сформированного в слое фоторезиста от расчётных значений (рис. 2.16г). Так как ТСР изготавливается вокруг основной структуры микрорельефа РОЭ при абсолютно идентичных параметрах, её глубина в каждой точке сопоставима с соответствующими параметрами глубины основного микрорельефа РОЭ. Таким образом, умножение расчётной карты микрорельефа исследуемого РОЭ в каждой локальном участке на соответствующий коэффициент отклонения полученной глубины, определяемый по характеристической кривой (рис. 2.16г), позволяет получить карту глубины основной структуры РОЭ, сформированной в фоторезистивной плёнке. Описанный метод позволяет подбирать параметры экспонирования, с целью получения в слое фоторезиста требуемой глубины микрорельефа перед его переносом в материал подложки.

Помимо определения отклонения полученной глубины, важной задачей является определение отклонения формы сформированного профиля от расчётных параметров. Для определения этого параметра измеренный профиль ТСР нормируется на максимальное значение глубины, после чего разбивается на отдельные участки, ограниченные двумя точками экстремумов, каждый из которых сравнивается с соответствующим участком теоретического синусоидального профиля. При этом глубина теоретического профиля также нормирована и лежит в диапазоне от -1 до 0. Период фрагмента для каждой j-й теоретической синусоидальной функции (d_j) определяется по формуле (2.8).

Таким образом, как показано на рис. 2.17а и рис. 2.17б, экстремумы каждого j-го теоретического синуса совпадают с точками экстремумов x_j и x_{j+1} соответствующего фрагмента профиля ТСР. Сопоставляя расчётные и измеренные значения ТСР, можно получить характеристическую кривую отклонения формы сформированного профиля в слое фоторезиста (рис. 2.18). Полученные данные отклонения формы профиля ТСР могут быть использованы для коррекции файла скважности, с целью записи фотошаблона, применение которого позволит устранить ошибки при формировании микрорельефа.

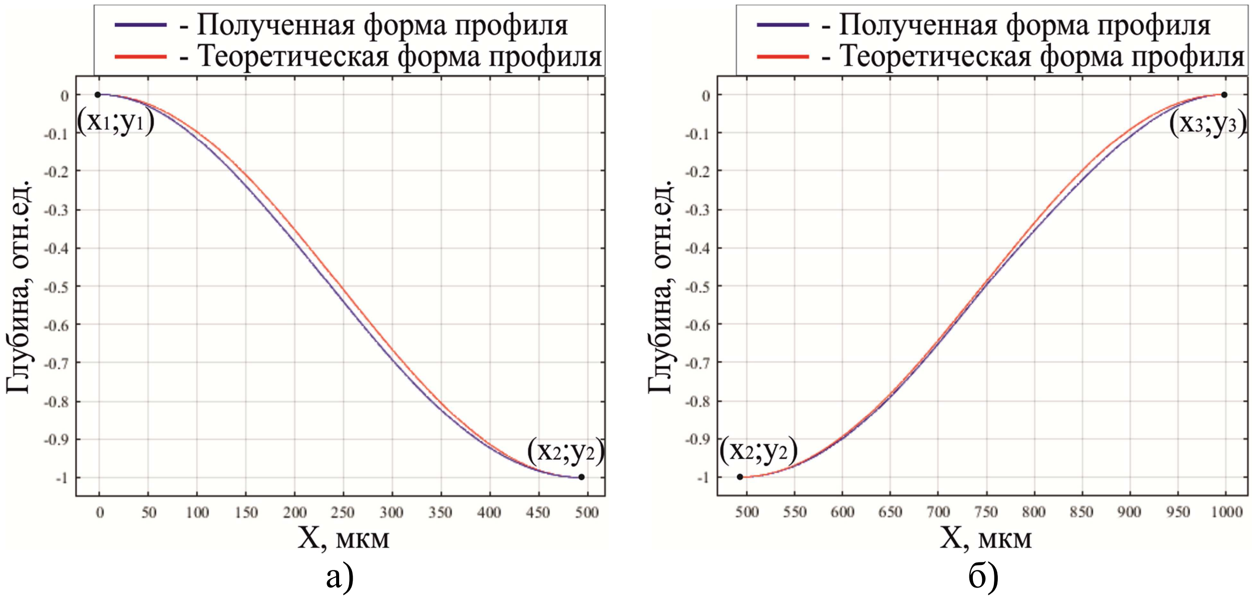


Рис. 2.17. Определение отклонения полученной формы профиля ТСР от расчётных параметров: область между первым и вторым (а), а также вторым и третьим (б) экстремумами исследуемого профиля ТСР

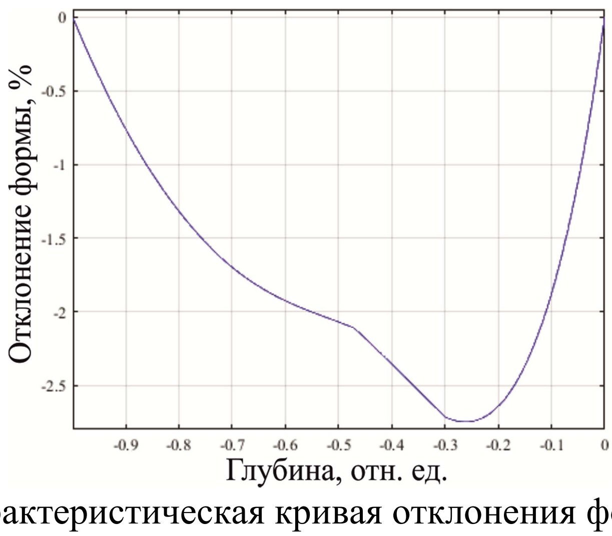


Рис. 2.18. Характеристическая кривая отклонения формы профиля многоуровневого микрорельефа, полученная по анализу ТСР

Вышеописанный подход по определению отклонения глубины и формы сформированного микрорельефа по анализу измеренного профиля ТСР может быть применён и для финишного контроля микрорельефа РОЭ, сформированного в материале подложки.

2.2.4. Коррекция файла скважности полутонового фотошаблона

Глубина и форма формируемого рельефа напрямую зависят от функции скважности (заполнения растровых ячеек), которая использовалась при записи фотошаблона. Функция скважности фотошаблона сопоставляет значение глубины профиля, которую необходимо получить в локальном участке, с коэффициентом заполнения растровой ячейки фотошаблона (Т), используемой для экспонирования этого участка. При записи фотошаблона на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в ИАиЭ СО РАН [98], функция скважности описывается 256 значениями (N), лежащими в диапазоне от 0 до 1, где 0 соответствует записи ячейке с максимальным пропусканием, а 1 соответствует полностью непрозрачной ячейке.

На рис. 2.19а и рис. 2.19б показан процесс коррекции функции скважности для записи скорректированного растрового фотошаблона (в котором исправлены ошибки предыдущего) по результатам сравнения формы тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста с теоретической синусоидальной функцией. Процесс коррекции можно описать следующим образом. В точке исследуемого рельефа X_1, в которой необходимо получить глубину профиля равную $h(T_1)$, была использована ячейка растрового фотошаблона со скважностью T_1. Однако необходимая для данной координаты глубина рельефа была получена в точке X_2 исследуемого рельефа (где необходимо получить глубину рельефа $h(T_2)$), в которой использовалась ячейка растрового фотошаблона со скважностью T_2. Следовательно, в скорректированной функции скважности в ячейке фотошаблона N_1 необходимо использовать значение скважности равное T_2. И так для каждой точки сформированного профиля тестовой синусоидальной решётки.

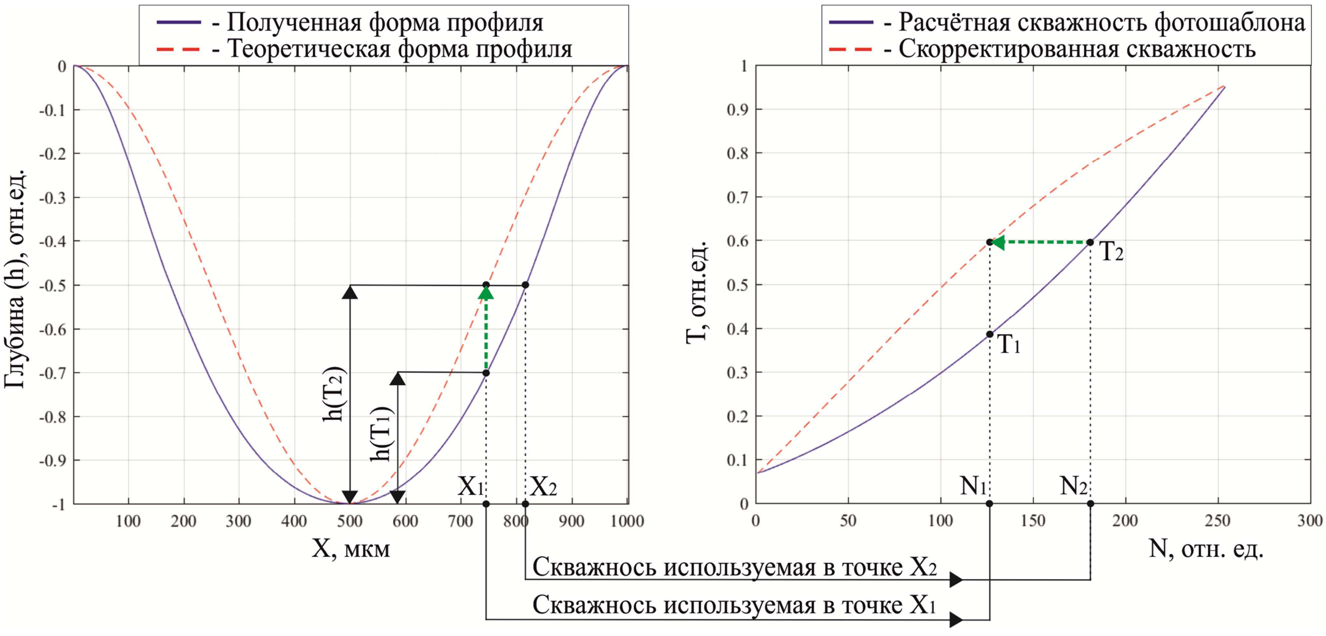


Рис. 2.19. Коррекция функции скважности полутонового растрового фотошаблона по данным контроля формы профиля тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста: а) контроль формы нормированного профиля тестовой синусоидальной решётки; б) коррекция функции скважности растрового фотошаблона

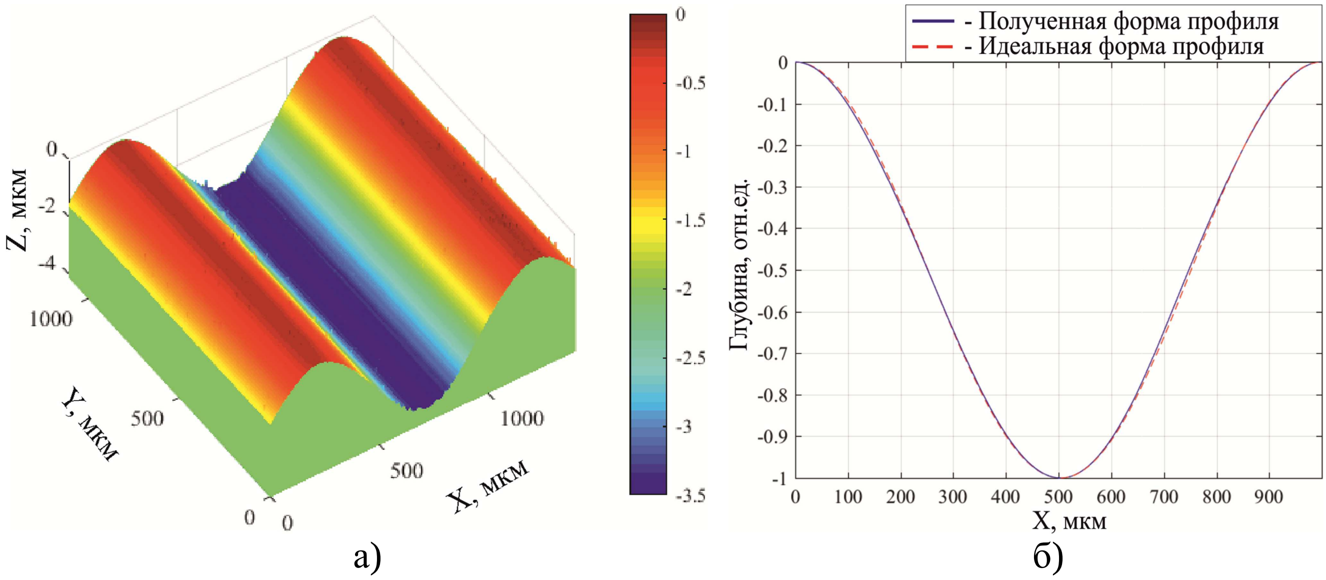


Рис. 2.20. Контроль формы профиля тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста, полученной с использованием растрового фотошаблона, записанного с учётом коррекции функции скважности: а) измеренная профилограмма рельефа в фоторезисте; б) сравнение нормированной формы полученного профиля с теоретической синусоидальной функцией

На рис. 2.20а показан рельеф тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста при использовании растрового фотошаблона, записанного с учётом коррекции функции скважности. Сравнение полученной формы профиля с теоретической синусоидальной функцией показано на рис. 2.20б. В то время как при использовании не скорректированного фотошаблона максимальное отклонение формы тестовой синусоидальной решётки для различных параметров экспонирования фоторезиста позволяющих получить глубину рельефа в диапазоне от 3.1 мкм до 3.5 мкм варьировалось в диапазоне 6.9 – 8.5%, использование скорректированного фотошаблона позволило значительно уменьшить отклонение получаемой формы рельефа до 0.9 – 2.6%, для тех же параметров экспонирования.

2.3. Выводы к главе 2

- Предложен и экспериментально апробирован метод дифрактометрического контроля в отражённом свете при изготовлении РОЭ, предназначенных для работы в ДУФ диапазоне на пропускание с использованием тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом, изготовленных на одной подложке вместе с исследуемыми структурами. Предложенный метод позволяет осуществлять контроль РОЭ не на расчётной длине волны, а с использованием лазерного источника видимого диапазона. Длина волны источника излучения видимого диапазона и угол его падения на тестовые структуры выбираются из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции на отражение для тестовой линейной решётки с расчётными параметрами микрорельефа. Влияние деструктивной интерференции между дифрагированным излучением и изучением, отражённым от обратной стороны подложки, на измерение дифракционной эффективности устраняется путем установки исследуемого элемента через слой иммерсионной жидкости на опорную подложку (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие) изготовленную из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый элемент. Данный метод был автоматизирован для контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием проекционной фотолитографии с растрированным фотошаблоном. Его применение для контроля подложек, на каждой из которых сформирована группа РОЭ (с двумя тестовыми решётками для каждого элемента), позволило значительно повысить скорость оценки погрешности их изготовления по сравнению с методом анализа параметров микрорельефа тестовых линейных решёток по профилограммам, полученным на оптическом профилометре.

- Разработан и экспериментально исследован метод поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутоновой фотолитографии, основанный на формировании и анализе параметров тестовых структур с синусоидальной формой профиля. Синусоидальные решетки не имеют фазовых скачков и, следовательно, гораздо менее искажаются при печати. Использование тестовых синусоидальных решёток позволяет получать полные характеристические кривые на каждом технологическом этапе изготовления элемента. Это позволяет осуществлять контроль функции пропускания изготовленного фотошаблона, подбирать оптимальные параметры экспонирования фоторезиста, измерять отклонение полученной глубины и формы профиля, а также определять необходимую функцию пропускания растрового фотошаблона, использование которого позволит минимизировать отклонение формы профиля изготавливаемого микрорельефа от расчётных значений. Предложенный метод позволяет минимизировать ошибки, возникающие в процессе изготовления РОЭ методом растровой полутоновой фотолитографии. Использование фотошаблона, функция пропускания (функция скважности ячеек) которого была скорректирована с использованием полученных характеристических кривых, позволило значительно уменьшить максимальное отклонение формы тестовой синусоидальной решетки до значений 0.9 – 2.6% при различных параметрах экспонирования фоторезиста. До коррекции оно составляло 6.9 – 8.5% для тех же параметров экспонирования. Аналогичный метод контроля можно использовать и при проекционной литографии.

Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах [111,168-173].

ГЛАВА 3. МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) были открыты на полупроводниковых поверхностях в 1965 году [180] и с тех пор являются объектом многочисленных исследований. Данные структуры могут быть записаны практически на любых материалах, включая металлы [101-110,181,182], полупроводники [40,183,184] и диэлектрики [185,186], путём облучения их поверхности линейно поляризованными лазерными пучками (особенно при использовании ультракоротких лазерных импульсов с длительностями в диапазоне от пикосекунды до фемтосекунды). Формирование периодического поверхностного микрорельефа может быть использовано как с целью изменения оптических свойств исходного материала (например, для изготовления дифракционных решёток), так и для изменения его физических свойств (например, для изменения трения или смачиваемости исходной поверхности). В связи с этим ЛИППС имеют широкий потенциал для практического применения в различных областях, таких как: создание гидрофобных покрытий [187,188], биомедицина [189-191], изменение оптического поглощения металлов [192], трибология [182], оптическое хранение информации [193], окраска и маркировка поверхности [194] и, конечно, для изготовления дифракционных структур [195], в том числе для целей защитной голографии [196].

Морфология поверхностного рельефа ЛИППС напрямую зависит от режима воздействия лазерного пучка. В частности, на неё влияют такие факторы как: поляризация записывающего пучка [101,184,197], толщина плёнки модифицируемого материала [106], скорость и направление сканирования записывающего пучка [110,198,199], параметры лазерного излучения (длина волны, мощность и т. д.) [182,186,200,201], частота повторения импульсов и/или использование лазерных вспышек [202,203], среда, в которой происходит модификация материала [204,205] и т. д. На сегодняшний день до сих пор не существует единой теории, которая бы количественно описывала периодичность ЛИППС, их качество, а также ориентацию формируемых решёток относительно поляризации записывающего пучка для большого разнообразия материалов и для различных параметров записи. В связи с этим, изучение физических процессов и механизмов, приводящих к формированию периодической структуры на поверхности обрабатываемого лазерным излучением материала, является актуальной задачей [102,110,206-211].

ЛИППС можно условно разделить на два типа: абляционные [210-214] и термохимические [101-110]. Механизм формирования ЛИППС первого типа, как следует из названия, основан на абляции части материала обрабатываемой поверхности под воздействием лазерного излучения. Таким образом, на модифицируемом материале формируются периодические дорожки, представляющие собой впадины, высота которых ниже начального уровня поверхности. В основе формирования ЛИППС второго типа лежат термохимические процессы, приводящие при лазерной обработке исходного материала к периодическому изменению его физико-химических свойств. Термохимические лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ТЛИППС) на поверхности различных металлов представляют собой чередующиеся дорожки оксида, сформированные под воздействием лазерного излучения и расположенные между дорожками металла. В отличие от абляционных ЛИППС, механизм окисления металлической плёнки приводит к образованию выступов над исходным уровнем обрабатываемой поверхности. Ориентация сформированных периодических оксидных дорожек при этом сонаправлена с направлением поляризации записывающего лазерного пучка.

Для ТЛИППС характерна высокая степень упорядоченности (разброс значений сформированных периодов на площади в 1 мм^2 может быть менее 1 нм, а при определенных условиях фазовые сдвиги и дефекты структуры могут быть практически полностью устранены [102]), в связи с чем они имеют большой потенциал для практического применения [215,216]. Термохимические процессы, вызванные лазерной обработкой металлической плёнки, позволяют, в частности, создавать пропускающие или отражающие металл/оксидные дифракционные решётки. Практическое применение ТЛИППС может стать, более экономически выгодной технологией по сравнению с дорогостоящими методами литографии, для задач по микро-наноструктурированию поверхностей.

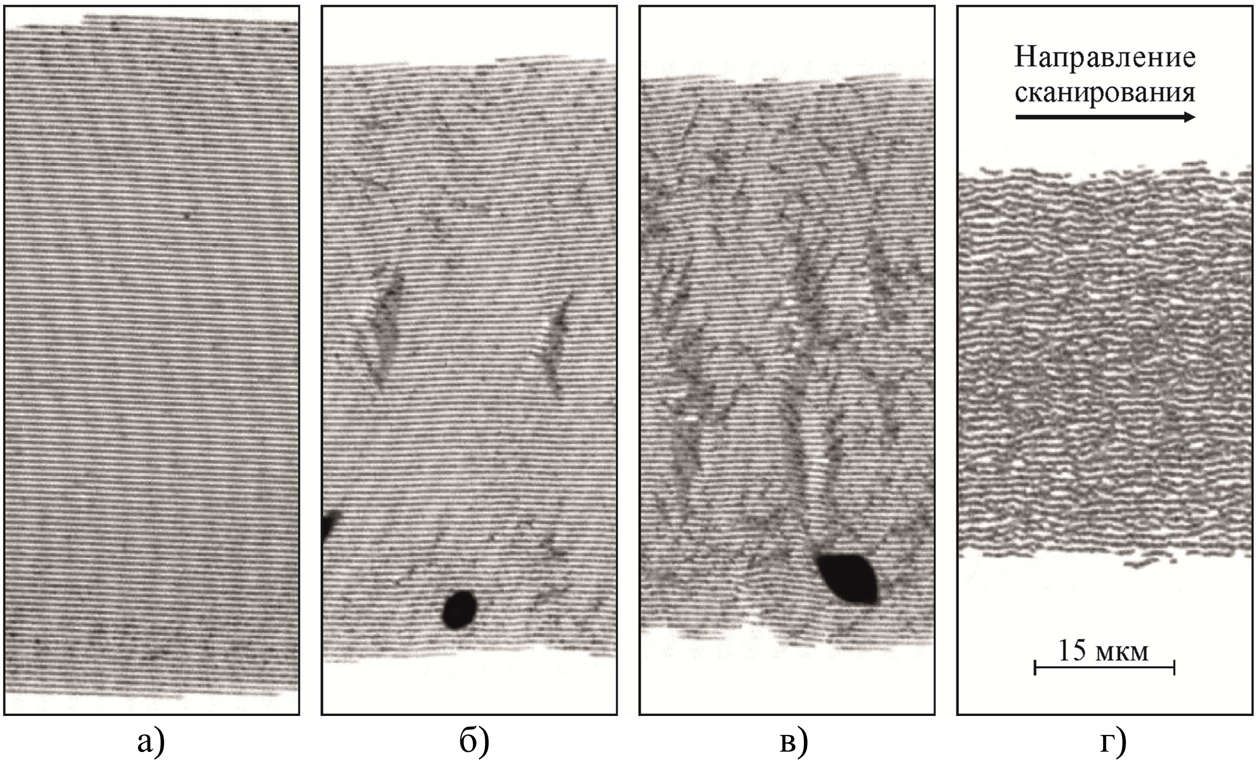


Рис. 3.1. Фрагменты микроизображений ТЛИППС, записанных на плёнке хрома толщиной 30 нм астигматическим гауссовым пучком, при мощности пучка 275 мВт и различных скоростях сканирования: 100 мкм/с (а), 125 мкм/с (б), 150 мкм/с (в) и 500 мкм/с (г)

Для практических задач по микро-наносруктурированию поверхностей различных материалов одним из важнейших параметров является производительность записи периодических структур. При формировании ТЛИППС повышение производительности может быть достигнуто за счёт увеличения скорости сканирования записывающего пучка, а также с помощью изменения его формы или увеличения геометрических размеров с соответствующим повышением мощности излучения. Однако всё это приводит к изменению условий экспонирования модифицируемой поверхности, что, как было сказано выше, влияет на характеристики сформированных периодических структур, а также на их качество (рис. 3.1 – здесь и далее в работе, приводимые оригиналы микроизображений ТЛИППС получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi TM3000 и подвержены дополнительной обработке по повышению контраста и яркости для улучшения визуального восприятия). В связи с этим, одной из важнейших задач при формировании ЛИППС (в том числе и ТЛИППС) является определение оптимальных параметров лазерной обработки материала, позволяющих установить баланс между производительностью записи и качеством формируемой структуры.

Исследования ТЛИППС в настоящее время направлены как на разработку и апробацию технологий их формирования, так и на изучение различных металлических покрытий наиболее пригодных для данного метода поверхностной модификации материалов. Анализ сформированного микрорельефа ТЛИППС имеет ряд особенностей по сравнению, например, с анализом металл/оксидных решёток, сформированных методом одноточечной прямой лазерной записи, сфокусированным пучком. При одноточечной лазерной записи каждая отдельная оксидная дорожка формируется от линии к линии дискретно, путём последовательного экспонирования локальных участков модифицируемого материала. В свою очередь при формировании ТЛИППС используется слабо сфокусированный импульсный пучок (импульсный пучок с низкоапертурной фокусировкой), что приводит к формированию периодической структуры по всей площади записывающего пучка на модифицируемой поверхности, в областях получивших достаточную дозу экспозиции. Но в связи с тем, что на различных участках записывающего пучка обрабатываемая поверхность получает разную дозу экспозиции (на что влияют форма записывающего пучка, его мощность и скорость сканирования), сформированный микрорельеф ТЛИППС в общем случае является не однородным. Например, в различных областях ТЛИППС могут быть сконцентрированы разнообразные дефекты структуры, вызванные нехваткой (для термохимической модификации) или переизбытком полученной материалом дозы экспозиции (в данной главе под переэкспонированием металлической поверхности подразумевается ухудшение упорядоченности и увеличение дефектности формируемой структуры за счёт влияния абляционных эффектов на термохимический процесс формирования ТЛИППС). Также, изменение параметров записи может влиять на прямолинейность и параллельность металл/оксидных дорожек, формирующих ТЛИППС (рис. 3.1). Для решения практических задач требуется высокая упорядоченность и низкая дефектность записанных решёток. В связи с этим задача разработки и развития методов количественной оценки этих характеристик весьма актуальна для сравнительного анализа ЛИППС на новых и ранее исследованных материалах при различных режимах обработки, а также для определения оптимальных параметров записи этих структур.

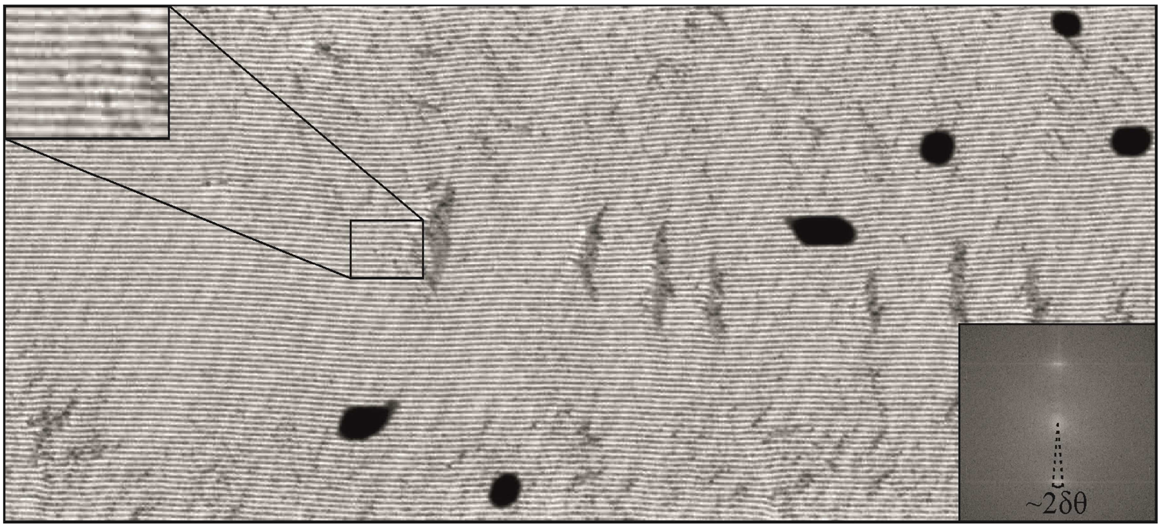
Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах[217-224].

3.1. Количественная оценка параметров ЛИППС по анализу их микроизображений

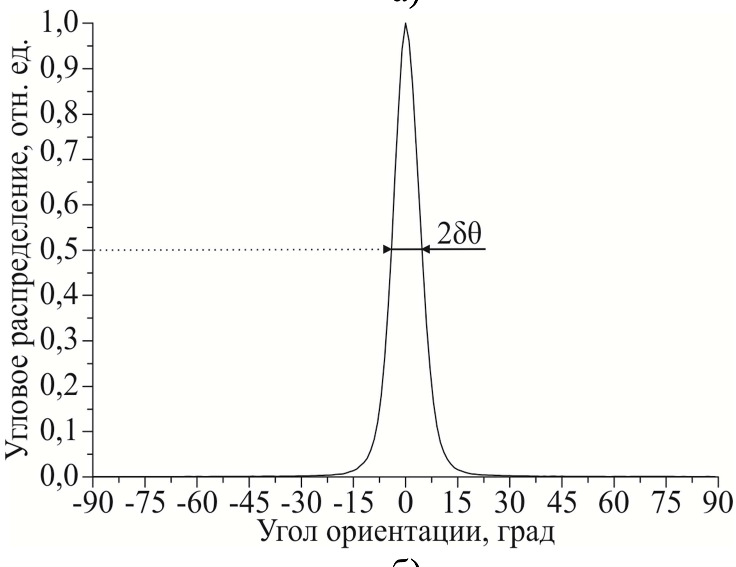
3.1.1 Анализ упорядоченности дорожек формирующих ЛИППС

Упорядоченность дорожек, формирующих периодическую структуру, является важным параметром для анализа качества ЛИППС (в данной главе под упорядоченностью подразумевается прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ЛИППС, без учёта их эквидистантности). Впервые метод количественной оценки данного параметра для ЛИППС был предложен в работе [105]. В данной работе для оценки упорядоченности ЛИППС по анализу их микроизображений был введён параметр DLOA (dispersion in the LIPSS orientation angle), который соответствует, и сопоставим по величине с параметром углового размытия ($\delta\theta$), получаемого при двумерном преобразовании Фурье исследуемого изображения (рис. 3.2а). Идея, лежащая в основе метода, базируется на утверждении, что при анализе идеально прямолинейных структур все дорожки, формирующие микрорельеф ЛИППС, имеют одинаковую угловую ориентацию на обрабатываемом микроизображении. Полученные при двумерном преобразовании

Фурье максимумы такого микроизображения будут представлять собой точки (либо, в случае изменения ширины зон, будут вытягиваться в линию, но при этом не будет наблюдаться их углового размытия), а величина $\delta\theta$ при этом равна нулю. В свою очередь отклонение от прямолинейности сформированных дорожек приводит к угловому размытию максимумов на полученных Фурье спектрах и, соответственно, к увеличению значения $\delta\theta$ (рис. 3.2а). Таким образом, измерение величины $\delta\theta$ позволяет определить усреднённое по изображению отклонение от прямолинейности дорожек исследуемой структуры.



а)



б)

Рис. 3.2. Определение параметра DLOA (углового размытия $\delta\theta$): по анализу двумерного преобразования Фурье микроизображения ТЛИППС (а) и по графику углового распределения пикселей, полученному путём обработки этого микроизображения в программе ImageJ (б)

Для более точного определения величины $\delta\theta$ (параметра DLOA) в работе [105] предлагается использовать свободно доступный плагин OrientationJ [225], разработанный для программного обеспечения с открытым исходным кодом ImageJ [226,227]. Данное программное обеспечение, на основе анализа градиентного структурного тензора, позволяет определить локальную угловую ориентацию для каждого пикселя микроизображения [228,229]. Исходный инструментарий OrientationJ после анализа исследуемого микроизображения даёт возможность построить график углового распределения (УР) пикселей (или сохранить полученные данные для самостоятельного построения графика УР), с шагом дискретизации по углу ориентации $\Delta\alpha$ равным 1°. Параметр DLOA определяется как полуширина на полувысоте полученного графика УР (рис. 3.2б).

Оба вышеописанных метода дают усреднённое значение прямолинейности объектов, представленных на обрабатываемом микроизображении (в случае анализа ЛИППС квазипериодических дорожек). В связи с этим, для корректного определения параметра DLOA на изображении желательно обеспечить присутствие только исследуемой структуры, что не всегда возможно осуществить при анализе ЛИППС (более подробно об этом написано в пункте 3.2.2).

DLOA является параметром количественной оценки прямолинейности и лишь частично характеризует параллельность (соответствие локальной ориентации дорожек основной ориентации периодической структуры) дорожек, формирующих ЛИППС. Это связано с тем, что полуширина на полувысоте не включает в себя информацию об основании полученного графика УР. Для пояснения данного утверждения на рис. 3.3а представлено смоделированное изображение, включающее в себя две решётки с разной площадью, угловая ориентация которых составляет 0° и 45°. График УР пикселей, полученный при анализе данного изображения в программе ImageJ, представлен на рис. 3.3б. Параметр DLOA, измеренный по полученному графику УР, составляет 0°. То есть дорожки, характеризующие структуру с основной угловой ориентацией решёток на изображении абсолютно прямолинейны. Однако параметр DLOA не даёт никакой информации о наличии на исследуемом изображении решётки с иной угловой ориентацией. Конечно, при анализе такого изображения можно разделить его на две отдельные решётки и измерить параметр DLOA для каждой из них, или по полученному графику УР определить полуширину на полувысоте для двух пиков по отдельности. Однако при анализе реальных ЛИППС дорожки с различной угловой ориентацией перемешаны среди общей структуры, и выделить их таким простым способом не представляется возможным.

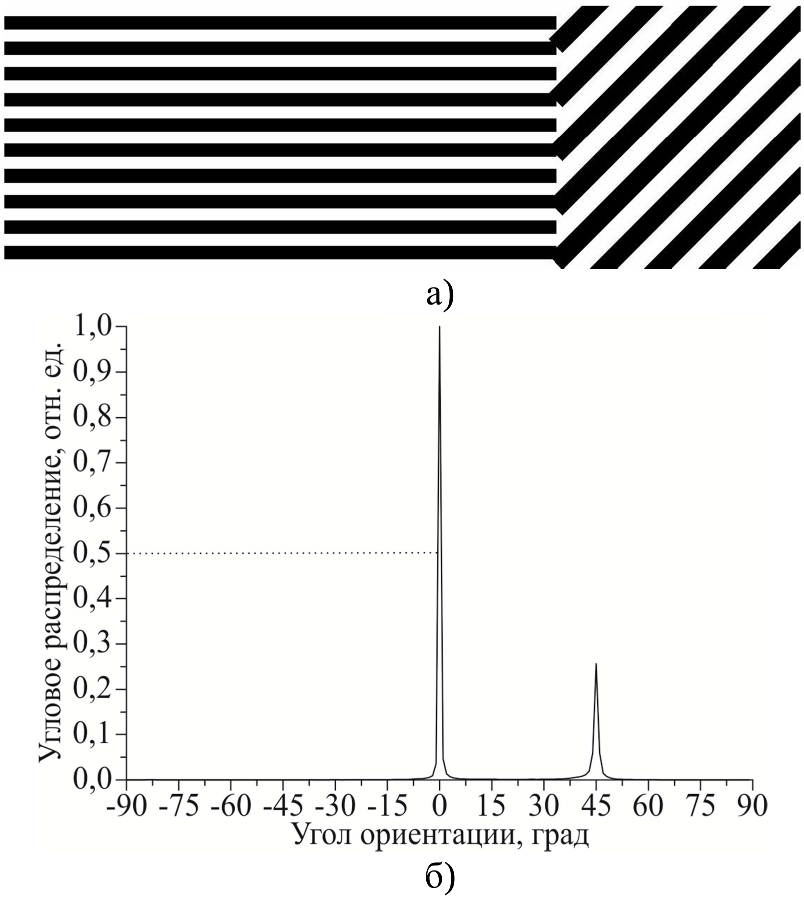


Рис. 3.3. Смоделированное изображение двух периодических решёток с разной угловой ориентацией (а) и график углового распределения, полученный путём обработки данного изображения в программе ImageJ (б)

На рис. 3.4 представлены характерные графики УР, полученные при анализе микроизображений ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома толщиной 30 нм при мощности записывающего астигматически сфокусированного гауссова пучка 320 мВт и скоростях сканирования 300 мкм/с (ТЛИППС$_{300}$) и 500 мкм/с (ТЛИППС$_{500}$). Параметр DLOA, измеренный по полученным графикам УР, для данных структур составил 15.5°±1° и 16°±1° соответственно. То есть параметр DLOA в данном случае не позволяет однозначно определить, при каких параметрах записи была сформирована более упорядоченная структура. Однако на рис. 3.4 видно, что основание графика УР для ТЛИППС$_{300}$ лежит ниже по сравнению с графиком УР для ТЛИППС$_{500}$. Оба графика нормированы таким образом, что максимальное значение УР пикселей, соответствующее основному направлению ориентации дорожек, формирующих ТЛИППС, равно 1. В связи с этим, подъём уровня основания на графике УР свидетельствует о том, что большее количество пикселей на обрабатываемом микроизображении (в процентном соотношении) характеризует участки исследуемой структуры, локальная угловая ориентация которых не совпадает с основным направлением угловой ориентации дорожек сформированной ТЛИППС. Таким образом, по полученным графикам УР можно сделать вывод, что дорожки, формирующие микрорельеф ТЛИППС$_{300}$ более сонаправлены с основной угловой ориентацией структуры (или, другими словами, более параллельны по отношению к основной ориентации структуры) по сравнению с дорожками, формирующими микрорельеф ТЛИППС$_{500}$.

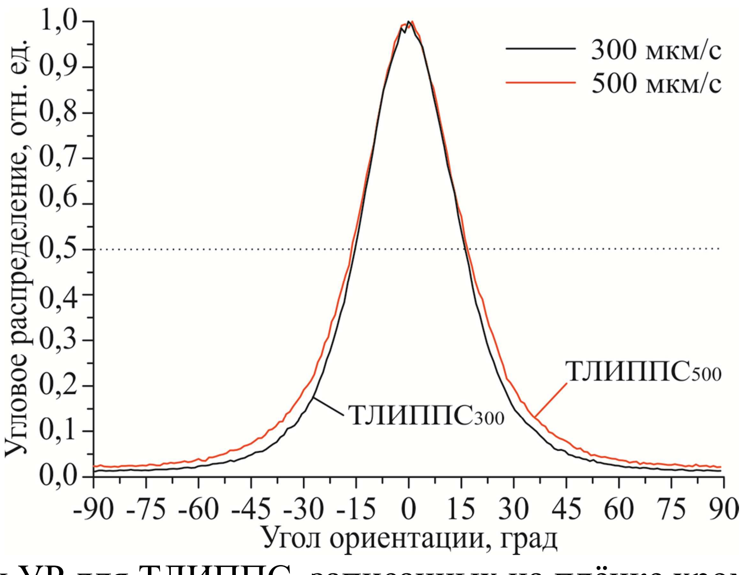


Рис. 3.4 Графики УР для ТЛИППС, записанных на плёнке хрома при мощности пучка 320 мВт и скоростях сканирования 300 мкм/с и 500 мкм/с

Учитывая вышесказанное, для количественной оценки параллельности дорожек, формирующих ЛИППС, по отношению к основной ориентации исследуемой структуры, в рамках данной работы было предложено определять нормированную площадь под кривой графика УР (НПУР) [217,218], которая в общем виде находится как:

$$\Xi = \frac{\Delta\alpha * \sum_{i=1}^{180/\Delta\alpha} (\text{УР})_i}{\max(\text{УР})} \ , \qquad (3.1)$$

где $max(\text{УР})$ – высота графика углового распределения пикселей (рис. 3.5). Параметр НПУР (Ξ) не может быть равен нулю и принимает значения в диапазоне от Δα до 180, где величина Δα соответствует анализу идеально параллельной прямолинейной структуры, а величина 180 анализу кольцевой структуры, в которой в равной степени присутствуют дорожки со всеми возможными локальными угловыми ориентациями. В частности, для ТЛИППС$_{300}$ и ТЛИППС$_{500}$ значение параметра НПУР составляет 36.7°±0.2 и 40.5±0.3 соответственно. Таким образом, для количественной оценки упорядоченности исследуемых ТЛИППС по анализу их микроизображений предлагается использовать совместное определение по графику УР параметров DLOA (параметр прямолинейности дорожек) и НПУР (параметр параллельности дорожек).

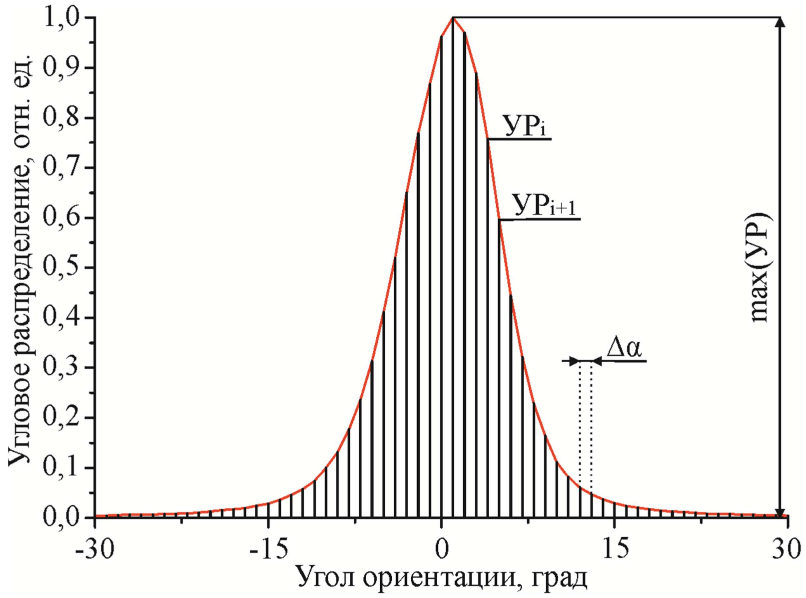
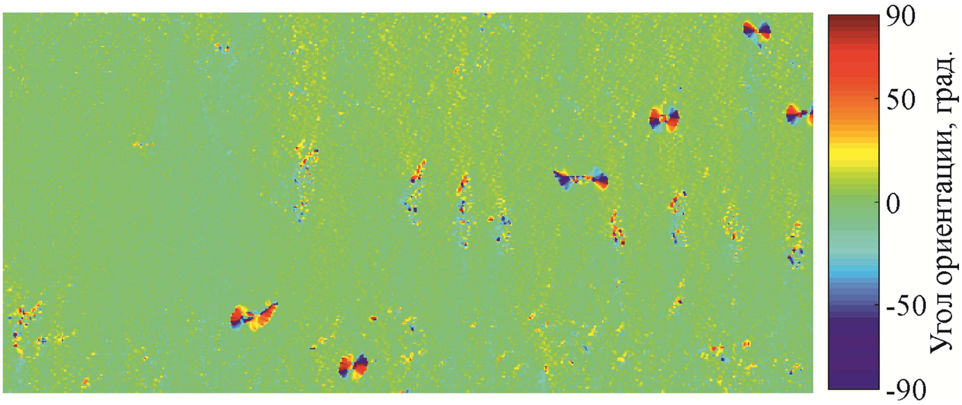


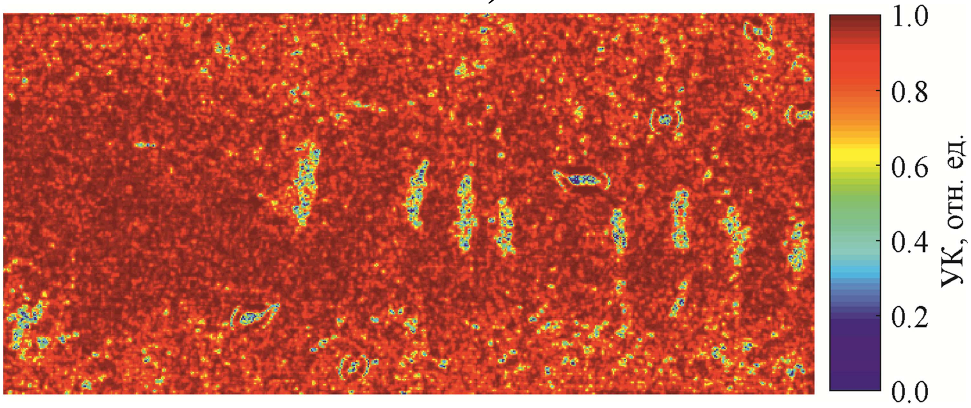
Рис. 3.5 Определения параметра НПУР по графику УР (приведён фрагмент графика) на примере анализа микроизображения ТЛИППС, записанной на плёнке хрома при мощности пучка 320 мВт и скорости сканирования 125 мкм/с

Кроме введения нового параметра для количественной оценки параллельности дорожек, в рамках данной работы было предложено модифицировать метод, описанный в работе [105]. Точность определения параметров упорядоченности напрямую зависит от шага дискретизации по углу ориентации $\Delta\alpha$, используемого при построении графика УР пикселей анализируемого изображения структуры. После обработки микроизображения в программе ImageJ оператору представляются данные для построения графика УР пикселей с шагом дискретизации по углу равным 1°. Однако осуществляемый анализ микроизображения представляет собой метод попиксельной обработки, и в программе ImageJ имеется возможность сохранить карту обработанного изображения, на которой каждому пикселю соответствует значение его угловой ориентации. Для этого после обработки микроизображения в плагине OrientationJ выбирается вкладка «Orientation» и сохраняется полученная карта угловой ориентации пикселей обрабатываемого изображения. Именно полученную карту угловой ориентации пикселей предлагается использовать для построения графиков УР и анализа параметров ЛИППС [217]. На рис. 3.6а приведён пример карты угловой ориентации пикселей микроизображения структуры ТЛИППС, сформированной на плёнке хрома толщиной 30 нм астигматическим гауссовым пучком, при мощности пучка 275 мВт и скорости сканирования 125 мкм/с, оригинал которой представлен на рис. 3.2а.

Данный подход открывает ряд возможностей для анализа ЛИППС. Во-первых, это позволяет повысить точность при определении параметров прямолинейности и параллельности исследуемых структур, так как даёт возможность регулировать шаг дискретизации $\Delta\alpha$ при построении графиков УР. Для этого при анализе полученной карты угловой ориентации пикселей обрабатываемого микроизображения выбирается интервал $\Delta\alpha$, и последующим суммированием числа пикселей, угловая ориентация которых попадает в заданный интервал, строится график УР. При $\Delta\alpha$=1° график УР будет сопоставим с графиком, построенным напрямую из данных предоставленных оператору программой ImageJ. Уменьшение шага дискретизации позволяет более точно определять величину параметров упорядоченности исследуемых структур. В данной работе при анализе микроизображений ЛИППС предлагается выбирать интервал $\Delta\alpha$ в диапазоне от 0.1° до 1°, начиная с большего значения. Критерием для выбора интервала $\Delta\alpha$ является условие сходимости результатов при определении величины $\delta\theta$. Значение параметра DLOA для выбранной величины $\Delta\alpha$ лежит в диапазоне $\delta\theta(\Delta\alpha) \pm\Delta\alpha$. При уменьшении $\Delta\alpha$ значение параметра DLOA не должно выходить за рамки диапазона, полученного при большем значении $\Delta\alpha$. Если данное условие не выполняется, то дальнейшее уменьшение шага дискретизации не осуществляется.



а)



б)

Рис. 3.6. Карты угловой ориентации пикселей (а) и угловой когерентности (б) при обработке микроизображения в программе ImageJ

На рис. 3.7 представлены примеры графиков УР, полученных при обработке микроизображений ТЛИППС с шагом дискретизации по углу ориентации 0.1°. Полученные результаты показывают, что чем выше упорядоченность дорожек исследуемой структуры, тем меньше высокочастотная модуляция на графике УР пикселей. Таким образом, уменьшение величины $\Delta\alpha$ при построении графиков УР пикселей позволяет более точно определять параметры DLOA и НПУР для данных структур.

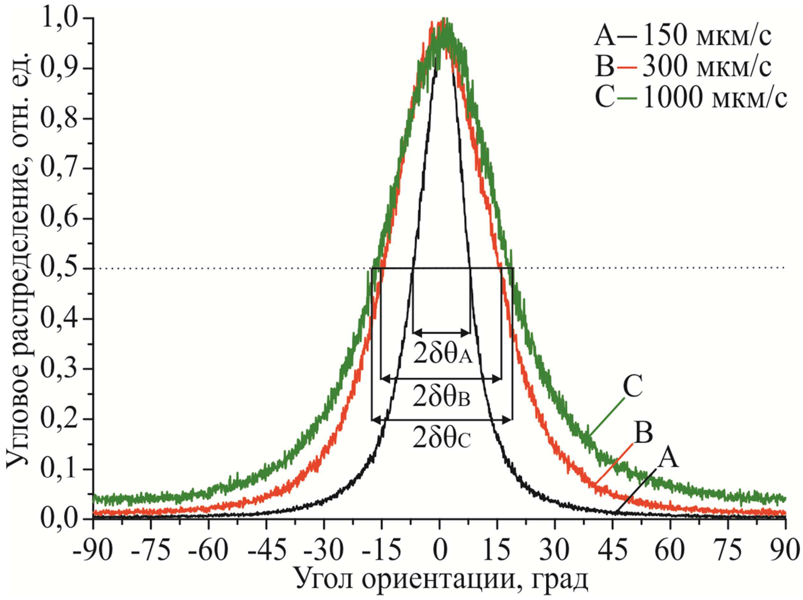


Рис. 3.7. Графики УР для ТЛИППС, записанных на плёнке хрома, при мощности пучка 320 мВт и различных скоростях сканирования

Во-вторых, анализ полученной карты угловой ориентации пикселей позволяет использовать для построения графиков УР не все пиксели обрабатываемого микроизображения [217]. Это даёт возможность обрабатывать ЛИППС со сложной формой границы исследуемой структуры, исключив из анализа упорядоченности области, не модифицированные лазерным излучением. Кроме того, выделив на обрабатываемом микроизображении дефекты и неоднородности структуры можно исключить также и эти области из анализа, с целью минимизировать их влияние на определение параметров упорядоченности эффективно записанных дорожек ЛИППС. При этом может быть использован любой алгоритм, позволяющий выделить данные области на обрабатываемом микроизображении. В том числе, для этих целей могут быть использованы и полученные карты угловой ориентации пикселей [217]. На карте, представленной на рис. 3.6а, видно, что в областях неоднородностей структуры угловая ориентация пикселей существенно отличается от основной ориентации дорожек исследуемой ТЛИППС. На рис. 3.6б представлена карта угловой когерентности (УК) пикселей, полученная при обработке в программе ImageJ (вкладка «Coherency» в плагине «OrientationJ») микроизображения, представленного на рис. 3.2а. УК может принимать значения в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует высоко ориентированным структурам на обрабатываемом микроизображении, а 0 указывает на изотропные области (осесимметричные области без преобладающего направления ориентации структуры). [213,214]. На краях дефектных областей исследуемой структуры значение УК уменьшается по сравнению с областями, эффективно записанных периодических дорожек. Ниже описан алгоритм, который по совместному анализу карт угловой ориентации и угловой когерентности пикселей позволяет определять на исследуемом микроизображении дефектные области ЛИППС, а также области, не модифицированные лазерным излучением, с целью анализа параметров ЛИППС в интересующих нас областях.

3.1.2 Выделение на обрабатываемом микроизображении области исследуемой ЛИППС и дефектных областей на ней

Как можно заметить на рис. 3.1, ЛИППС, сформированные при сканировании поверхности записывающим пучком, не имеют чёткой границы между периодическими дорожками и немодифицированной поверхностью. В связи с этим на исследуемых микроизображениях ЛИППС присутствуют области, не обработанные лазерным излучением. Эту проблему можно решить, обрезав изображение и оставив для анализа только периодическую структуру, как показано на рис. 3.2а. Однако этот подход имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, при уменьшении дозы экспонирования поверхностного материала, вызванного, например, увеличением скорости сканирования записывающего пучка, ширина следа ЛИППС постепенно уменьшается (рис. 3.1а-в). Это приводит к тому, что ЛИППС, записанные при слабом экспонировании материала имеют малое количество дорожек (рис. 3.8а). Для анализа такой структуры при формировании изображения прямоугольной формы, включающего в себя только модифицированную область, придётся обрезать часть дорожек, что повлияет на полученные результаты при определении параметров её упорядоченности. Во-вторых, исследуемые ЛИППС могут иметь сложную форму. В частности, форма ТЛИППС, сформированной при обработке поверхности неподвижным астигматическим гауссовым пучком, имеет форму близкую к эллипсу (рис. 3.8б). Кроме того, как видно на рис. 3.8б из-за переэкспонирования материала в центральной области такой ТЛИППС сосредоточена большая дефектная область, в которой отсутствует периодическая структура, но которая также будет вносить вклад в определение параметра упорядоченности вышеописанными методами.

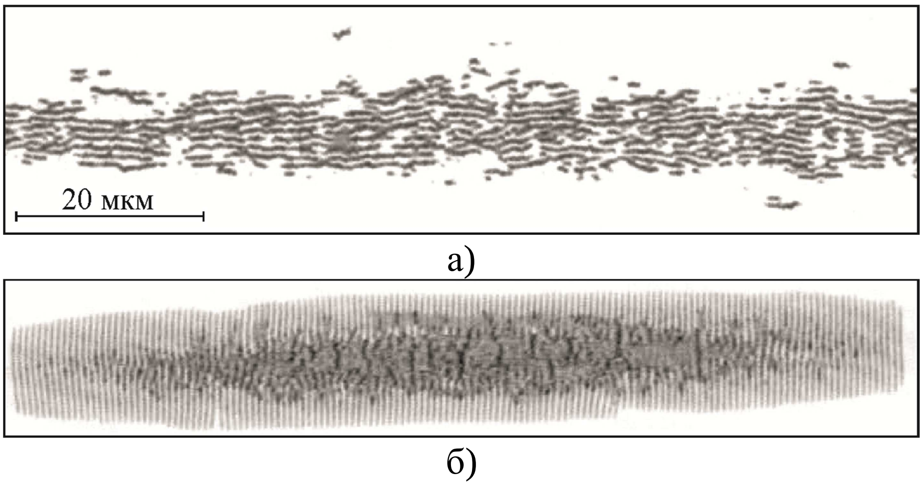


Рис. 3.8. Микроизображения ТЛИППС, записанных на плёнке хрома: мощность пучка 250 мВт и скоростью сканирования 500 мкм/с (а); ТЛИППС, сформированная при воздействии на плёнку металла в течение одной секунды неподвижным астигматическим гауссовым пучком мощностью 300 мВт (б)

В связи с этим, при количественной оценке параметров ЛИППС сложной формы по анализу их микроизображений (в общем случае, так как структура ЛИППС не имеет чётких прямолинейных границ, обработка их микроизображений всегда сводится к задаче анализа структуры со сложной формой) можно выделить две задачи. Во-первых, выделение на обрабатываемом микроизображении области исследуемой ЛИППС с последующим построением графика УР без учёта пикселей, характеризующих области изображения, не модифицированные записывающим пучком. Анализ полученного графика УР позволяет определить параметры упорядоченности DLOA и НПУР для исследуемой ЛИППС. Во-вторых, выделение на изображении дефектных областей исследуемой структуры. Выделение пикселей изображения, которые характеризуют области дефектов, позволяет построить графики УР только для эффективно записанных дорожек ЛИППС (то есть без учёта пикселей микроизображения, которые характеризуют области дефектов и области не модифицированные лазерным излучением), с последующим определением по ним параметров $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ.}$ и $НПУР_{ЭФФ.ОБЛ.}$. Такой подход позволяет минимизировать вклад дефектных областей, сформированной периодической структуры, на определение параметров упорядоченности эффективно записанных дорожек, а также получить дополнительный параметр количественной оценки ЛИППС, а именно площадь дефектов по отношению к общей площади модифицированной области [217]. Количество дефектов на сформированной структуре наравне с упорядоченностью является важным параметром для анализа качества исследуемой ЛИППС.

На рис. 3.9а представлен фрагмент характерного микроизображения ТЛИППС, полученного на сканирующем электронном микроскопе, на границе которого присутствует область, не модифицированная лазерным излучением, а дефекты хаотично расположены на сформированной периодической структуре. На данном микроизображении видно, что часть дефектов (ярко выраженные тёмные области) можно выделить по анализу распределения интенсивности пикселей. Однако также видно, что большая часть дефектов (неоднородностей структуры) лежит в диапазоне интенсивностей тёмных и светлых дорожек, формирующих исследуемую ТЛИППС (также, как и на микроизображениях рис. 3.1а, рис. 3.1г, и рис. 3.8а-б, на которых вообще отсутствуют ярко выраженные тёмные области, что является типичным для микроизображений ТЛИППС, полученных на сканирующим электронном микроскопе). Кроме того, рядом с записанной периодической структурой поверхность металла покрывается оксидной плёнкой. Это, в свою очередь, приводит к выравниванию интенсивностей между светлыми дорожками периодической структуры и окружающей ТЛИППС областью на обрабатываемых СЭМ изображениях. Из чего можно сделать вывод, что определить пиксели микроизображения, характеризующие те или иные области, исключительно путём их селекции по интенсивности не представляется возможным.

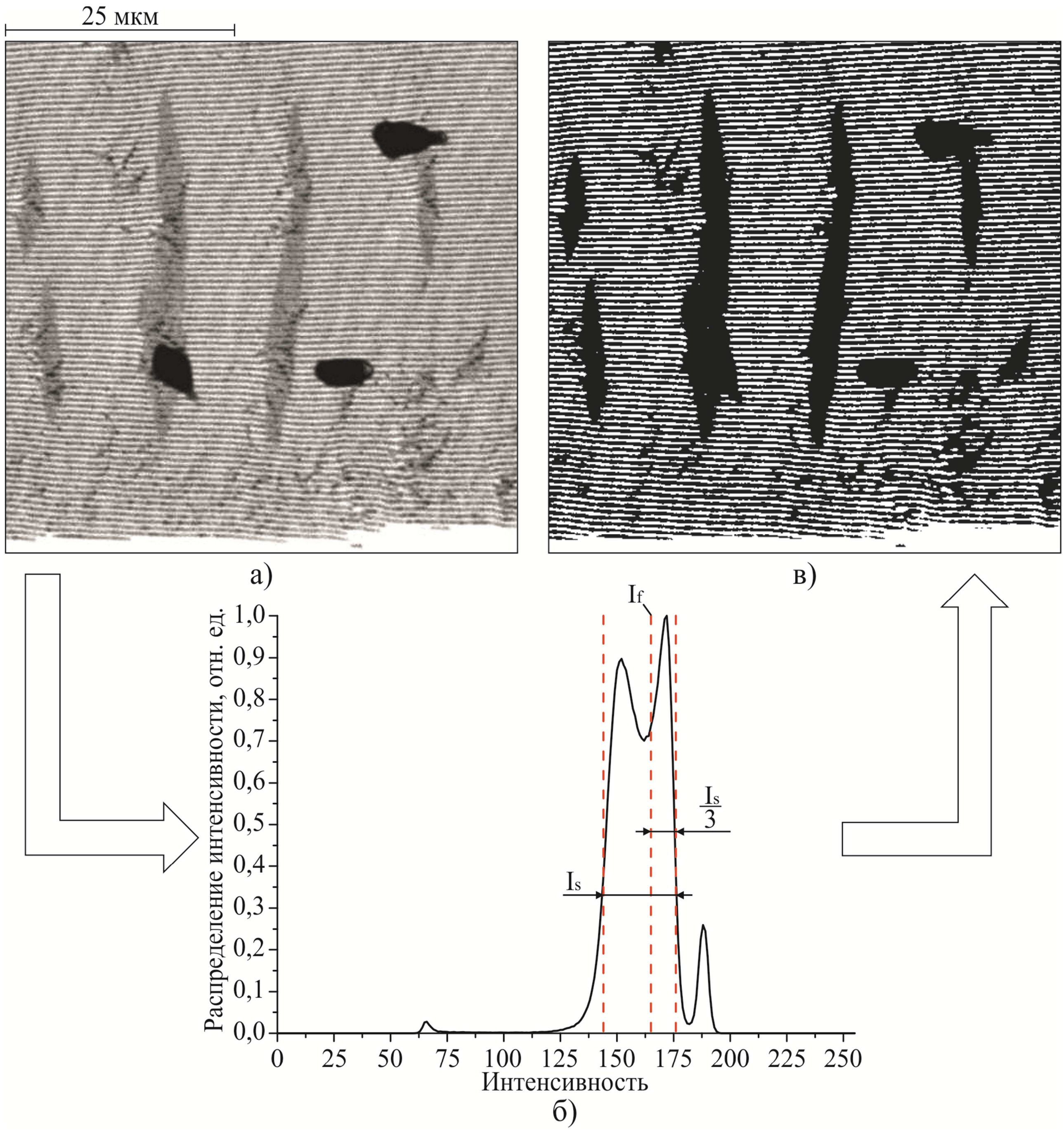
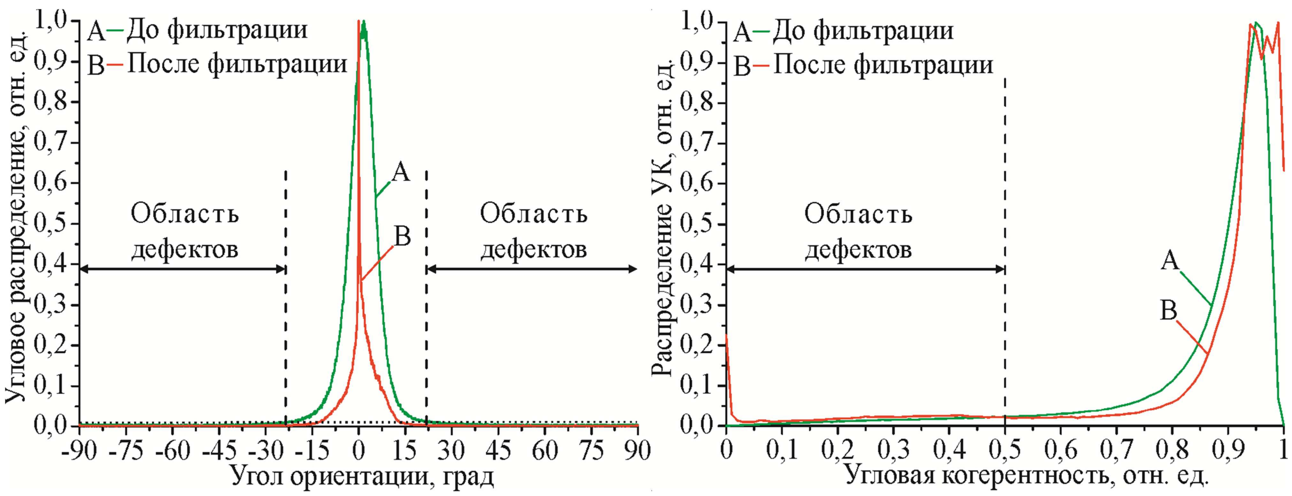


Рис. 3.9. Выделение светлых дорожек на СЭМ изображении ТЛИППС: фрагмент исходного изображения (а); график распределения пикселей по интенсивности (б); фрагмент изображения после выделения светлых дорожек (в)

Для того чтобы определить пиксели микроизображения, характеризующие области, не модифицированные лазерным излучением, и области дефектов ЛИППС, можно воспользоваться тем фактом, что объектом исследования является периодическая структура, представляющая собой на обрабатываемом микроизображении набор светлых и тёмных дорожек. Для начала определим ширину диапазона интенсивностей I_s, который характеризует основную (большую) часть исследуемой структуры на обрабатываемом микроизображении (рис. 3.9б). Затем выделим светлые дорожки периодической структуры для последующей обработки полученного изображения (вместе с исходным изображением исследуемой структуры) в программе ImageJ. Так как при обработке изображения в программе ImageJ скважность структур не влияет на определение угловой ориентации пикселей, не обязательно точно определять границу тёмных и светлых дорожек. В связи с этим, для того, чтобы выделить направления светлых и тёмных дорожек исследуемой периодической структуры, устанавливаем значение фильтра по интенсивности I_f, отстоящим от правой границы интервала I_s на величину $I_s/3$, как показано на рис. 3.9б. Для создания изображения с выделенными светлыми дорожками, всем пикселям, интенсивность которых выше или равна значению I_f, присваивается значение равное 255, а тем пикселям, интенсивность которых меньше значения I_f, присваивается значение 10. Если на обрабатываемом микроизображении присутствуют пиксели, которые были определены как дефектные по анализу распределения интенсивности (ярко выраженные тёмные области), им присваивается значение равное 0. В результате получается изображение, в котором тёмные и светлые дорожки имеют ярко выраженный контраст, а в областях дефектов светлые дорожки отсутствуют (рис. 3.9в). Далее, оба изображения (исходное микроизображение, и изображение с выделенными светлыми дорожками) обрабатываются в программе ImageJ (в плагине OrientationJ при настройке градиентного структурного тензора выбираются значения «Gaussian Gradient» и $\sigma = 1$ пиксель (для гауссова окна)) и сохраняются две карты угловой ориентации пикселей, из которых строятся соответствующие графики УР (рис. 3.10а). Также, после обработки изображений сохраняются две карты угловой когерентности, по которым путём суммирования числа пикселей микроизображения, УК которых попадает в заданный интервал, с шагом дискретизации 0.01 (по аналогии с тем, как описано в пункте 3.1.1 для построения графика УР) строятся соответствующие графики распределения УК пикселей (рис. 3.10б).

Совместный анализ полученных карт УР и УК позволяет выделить области, не модифицированные лазерным излучением, а также области дефектов на исследуемой структуре (или, другими словами, неэффективные области на обрабатываемом микроизображении ЛИППС). Полученный график УР пикселей, построенный для исходного изображения, позволяет определить основной угловой диапазон характерный для исследуемой ЛИППС на обрабатываемом микроизображении. Для этого на полученном графике (кривая «А» на рис. 3.10а) определяются границы «купола», который характеризует основной диапазон угловых ориентаций дорожек, формирующих ТЛИППС. В данной работе для определения границ данного «купола» используется фильтр, установленный на уровне 1% от разности максимального и минимального значения на полученном графике УР (рис. 3.10а). Вместе с этим, по полученным графикам УР пикселей, построенным для исходного изображения и изображения с выделенными светлыми дорожками, определяются значения $DLOA_{Image}$ и $DLOA_{Filtered}$, равные полуширине на полувысоте соответствующих графиков. Если значение $DLOA_{Filtered} \leq DLOA_{Image}$, тогда все пиксели, угловая ориентация которых хотя бы на одной из карт УР не соответствует найденному основному угловому диапазону УР исследуемой структуры, характеризуют не эффективную область на обрабатываемом микроизображении. Если же $DLOA_{Filtered} > DLOA_{Image}$, это свидетельствует о том, что прямолинейность дорожек на изображении, полученном после выделения светлых дорожек, хуже, по сравнению с исходным. Тогда для определения не эффективных областей по соответствию значений локальной угловой ориентации пикселей основному диапазону угловой ориентации дорожек исследуемой ЛИППС используется только карта УР, полученная для исходного микроизображения. Кроме того, для определения не эффективных областей на обрабатываемом микроизображении осуществляется также фильтрация пикселей по полученным картам УК. Если значение УК пикселя хотя бы на одной из двух полученных карт УК меньше величины 0.5 (то есть пиксель характеризует слабо ориентированную область на одном из двух микроизображений), то этот пиксель также отмечается как характеризующий неэффективную область на микроизображении исследуемой структуры (рис. 3.10б). Таким образом, помимо уже выделенных дефектных пикселей по интенсивности (интенсивность которых на изображении с выделенными светлыми дорожками (рис. 3.9в) равна 0), к дефектным относятся пиксели, не прошедшие фильтр либо по УР, либо по УК и интенсивность которых на отфильтрованном изображении (рис. 3.9в) равна 10. В свою очередь пиксели, не прошедшие фильтр по УР или по УК и интенсивность которых на отфильтрованном изображении (рис. 3.9в) равна 255, характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением.



а) б)

Рис. 3.10. Графики УР (а) и УК (б), полученные при анализе изображения до и после фильтрации по интенсивности (то есть до и после выделения светлых дорожек)

Результат обработки описанным методом СЭМ изображения ТЛИППС (исходный фрагмент которого показан на рис. 3.9а), представлен на рис. 3.11. На данном изображении белые пиксели характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением, чёрные пиксели – области дефектов исследуемой структуры, а ТЛИППС в эффективно записанной области представлена оттенками серого. На рис. 3.12а представлен результат обработки вышеописанным методом микроизображения ТЛИППС сложной формы, сформированной на плёнке хрома в результате воздействия неподвижным астигматическим гауссовым пучком. Исходное СЭМ изображение данной структуры представлено на рис. 3.8б. На рис. 3.12б представлены графики УР полученные на различных этапах обработки микроизображения. График «А» построен с учётом всех пикселей обрабатываемого микроизображения. Данный график используется при определении основного углового диапазона, характерного для исследуемой периодической структуры. График «В» построен с учётом только тех пикселей, которые характеризуют на микроизображении исследуемую ТЛИППС (то есть без учёта пикселей изображения, которые характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением). Данный график позволяет определить общие параметры упорядоченности записанной структуры – DLOA и НПУР. График «С» построен с учётом только тех пикселей, которые характеризуют эффективно записанную ТЛИППС. По данному графику определяются параметры упорядоченности в эффективно записанной области ТЛИППС – $\text{DLOA}_{\text{ЭФФ.ОБЛ.}}$ и $\text{НПУР}_{\text{ЭФФ.ОБЛ.}}$, позволяющие минимизировать погрешность, вносимую дефектными областями структуры в определение прямолинейности и параллельности эффективно записанных дорожек.

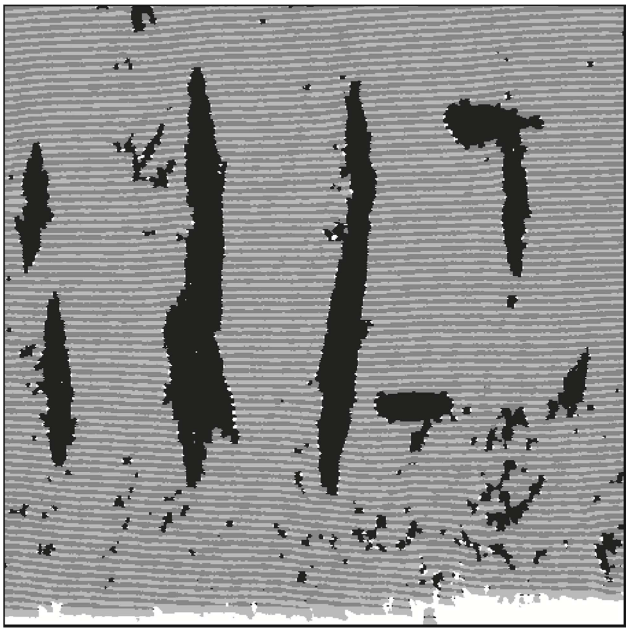
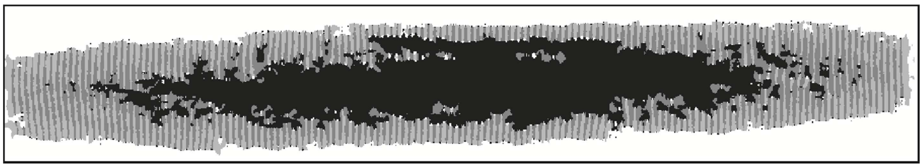
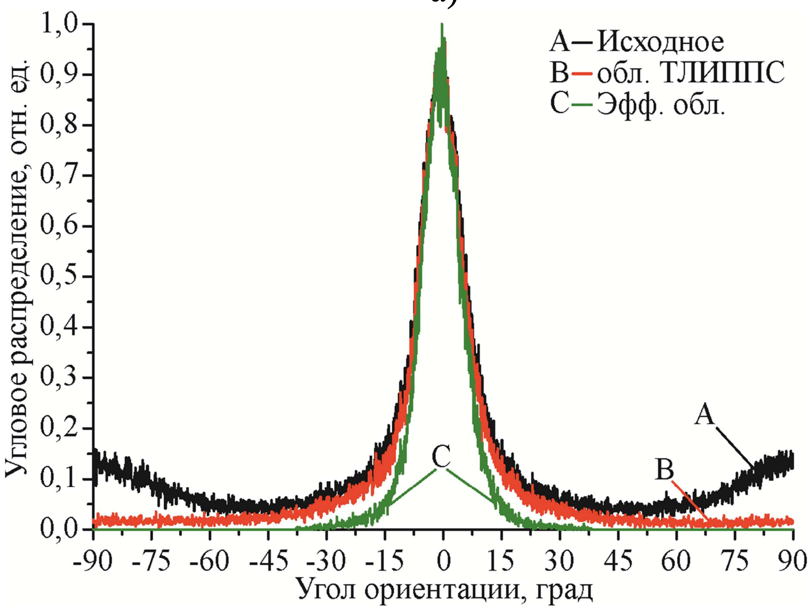


Рис. 3.11. Фрагмент микроизображения ТЛИППС, записанной при мощности пучка 300 мВт и скорости сканирования 125 мкм/с после выделения дефектных областей структуры и областей, не модифицированных лазерным излучением



а)



б)

Рис. 3.12. Анализ ТЛИППС, сформированной при воздействии неподвижным астигматическим гауссовым пучком мощностью 300 мВт в течение 1 секунды: микроизображение после фильтрации дефектов структуры и областей, не модифицированных лазерным излучением (а); сравнение графиков углового распределения на различных этапах обработки микроизображения (б)

Помимо возможности анализа ТЛИППС сложной формы и минимизации влияния дефектных областей структуры на определение параметров упорядоченности, предложенный метод анализа микроизображений позволяет ввести дополнительные параметры для количественной оценки качества и производительности записи ЛИППС. Во-первых, определив на изображении области, не модифицированные лазерным излучением (то есть, определив общий размер исследуемой ЛИППС на изображении в пикселях), а также определив пиксели, которые характеризуют области дефектов структуры, можно рассчитать относительную площадь дефектов (ОПД) исследуемой ЛИППС:

$$D = \frac{Pix_D}{Pix_\Sigma} * 100\ \% \quad , \tag{3.2}$$

где Pix_D – общее количество пикселей, которые характеризуют дефектные области ЛИППС, Pix_Σ – общее количество пикселей, характеризующих исследуемую ЛИППС на обрабатываемом микроизображении (общее количество пикселей микроизображения без учёта областей, не модифицированных лазерным излучением). Во-вторых, зная физический размер одного пикселя на микроизображении (Pix_S) можно определить площадь модифицированной области (ПМО) как:

$$S_{\text{мо}} = Pix_\Sigma * Pix_S \quad . \tag{3.3}$$

Данный параметр применим для количественной оценки производительности записи структур, которые можно полностью (всей площадью) зарегистрировать одним кадром. Например, при анализе ЛИППС, сформированных путём обработки металлической плёнки неподвижным лазерным пучком (рис. 3.8б).

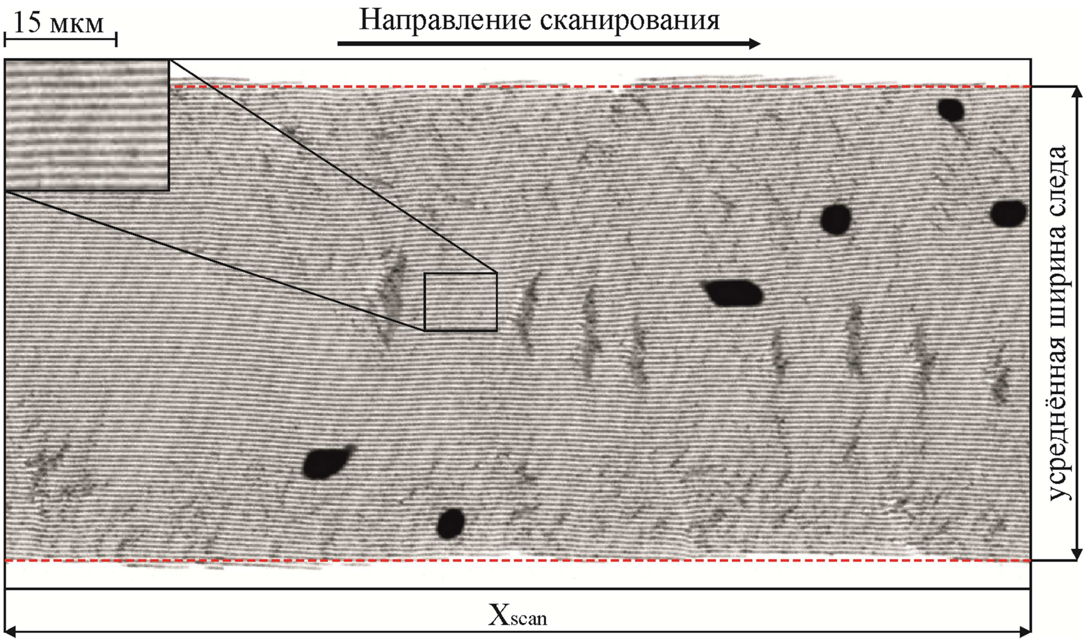


Рис. 3.13. Определение усреднённой ширины следа ТЛИППС, сформированной сканирующим записывающим пучком

При анализе ЛИППС, полученных сканирующим записывающим пучком, очевидно, что ПМО зависит не только от параметров записывающего пучка, таких как мощность, форма, размер, и т. д., но и от длины сканируемой им области. Кроме того, при анализе таких структур чаще всего регистрируется лишь локальный участок, модифицированной записывающим пучком поверхности, размер которого может зависеть от различных параметров, например, от выбранного увеличения микроскопа. В связи с этим оценку производительности сканирующей записи (ПСЗ) ЛИППС предлагается определять как произведение усреднённой ширины следа (рис. 3.13), сформированного при однопроходном сканировании образца, на скорость сканирования V:

$$S_{сз} = \frac{Pix_{\Sigma} * Pix_{SY}}{X_{scan}} * V \,, \tag{3.4}$$

где Pix_{SY} – физическая ширина пикселя на микроизображении в направлении перпендикулярном направлению сканирования, X_{scan} – длина зарегистрированного следа ЛИППС (в пикселях) на обрабатываемом микроизображении.

На рис. 3.14 приведена блок-схема разработанного алгоритма анализа микроизображений ЛИППС, в сравнении с алгоритмом, описанным в работе [105]. При регистрации микроизображения исследуемой структуры рекомендуется выбирать увеличение микроскопа и разрешение сохраняемого изображения, таким образом, чтобы на один период регистрируемой решётки приходилось ~ 6 – 18 пикселей. Это предлагается делать для того, чтобы оценить параметры общей упорядоченности и дефектности сформированной структуры без учёта локальных неоднородностей отдельных дорожек. Можно выделить следующие основные этапы предложенного метода количественного оценки параметров ЛИППС сложной формы по анализу их миркоизображений:

- Вырезание (если необходимо) фрагмента микроизображения для дальнейшего анализа, без обрезания границ исследуемой структуры;
- Определение пикселей на микроизображении, которые характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением, области дефектов ЛИППС и области эффективно записанной периодической структуры;
- Количественный анализ дефектности исследуемой ЛИППС (определение параметра ОПД);
- Количественный анализ производительности записи ЛИППС (определение параметра ПМО или ПСЗ);

- Построение графика УР без учёта пикселей микроизображения, которые характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением, с последующим определением параметров общей упорядоченности исследуемой ЛИППС (параметры DLOA и НПУР);
- Построение графика УР без учёта пикселей микроизображения, которые характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением и области дефектов ЛИППС, с последующим определением параметров упорядоченности эффективно записанных дорожек, формирующих ЛИППС (параметры $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ.}$ и $НПУР_{ЭФФ.ОБЛ.}$).

Таким образом, предложенный метод обработки микроизображений позволяет осуществлять анализ ЛИППС сложной формы для количественной оценки таких характеристик как дефектность записанной структуры, производительность записи ЛИППС, а также прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих периодическую структуру. Следует отметить, что описанный в данном разделе алгоритм адаптирован под анализ СЭМ изображений, на которых пиксели с большей интенсивностью характеризуют исходную поверхность модифицируемого материала. Однако с небольшими изменениями он может быть применён к анализу микроизображений, полученных другими методами. Например, для микроизображений ТЛИППС, полученных на оптическом микроскопе в прошедшем через периодическую структуру свете, интенсивность пикселей в областях металла и сформированного оксида будет инвертирована, по сравнению с СЭМ изображениями этих структур. Исходя из этого, необходимо учесть данное обстоятельство при программной обработке таких микроизображений с использованием описанного алгоритма. При получении микроизображений на АСМ микроскопе, необходимо предварительно убрать «горизонтальные царапины», вызванные процессом регистрации микроизображения, и при обработке определяемые как дефекты, а также учесть, что выступы структуры при анализе микроизображений абляционных ЛИППС соответствуют дорожкам, характеризующим исходную поверхность материала, а при анализе ТЛИППС, сформированным оксидным дорожкам и т. д.

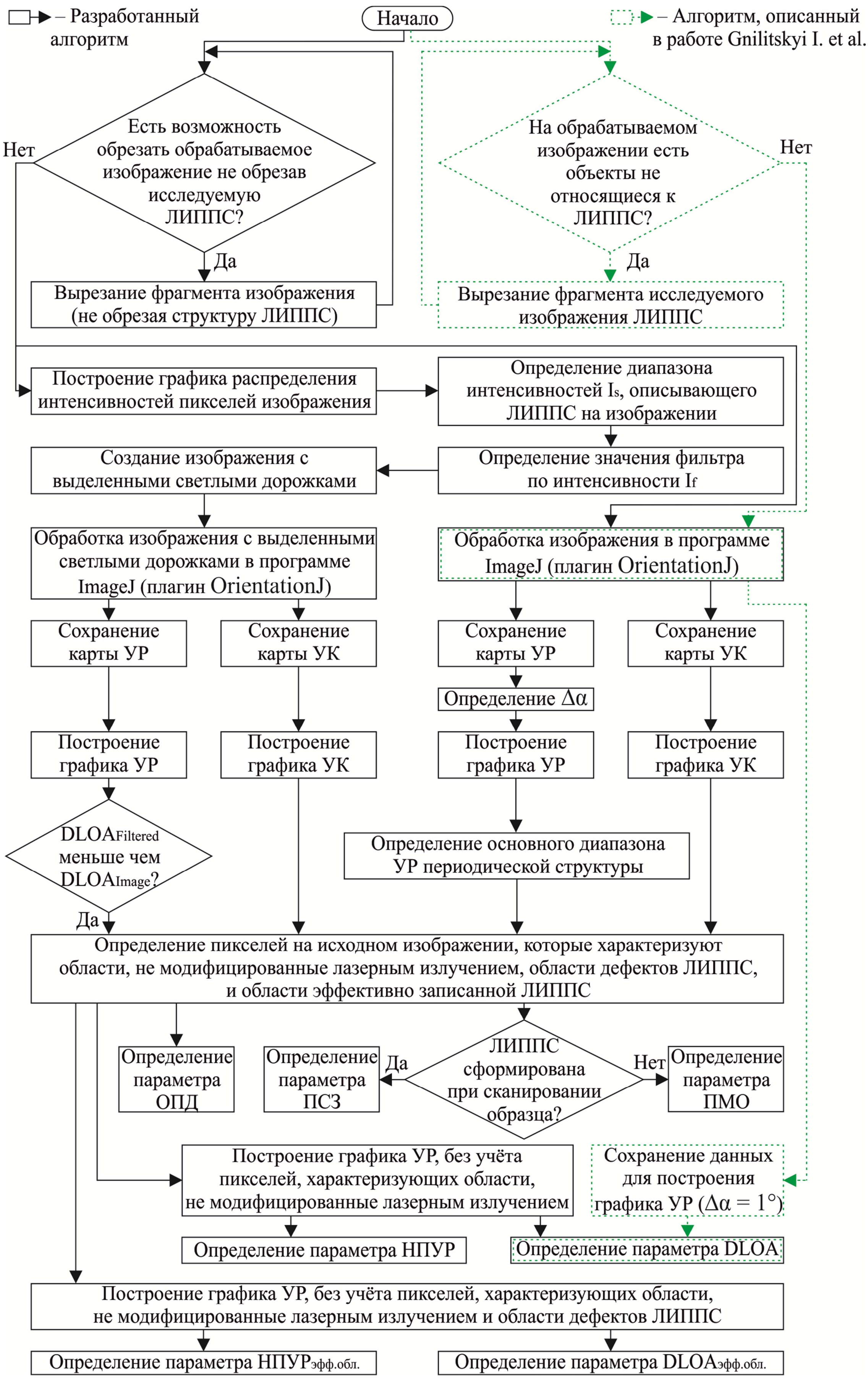


Рис. 3.14. Блок-схема разработанного алгоритма анализа микроизображений ЛИППС

3.2. Экспериментальные результаты анализа микроизображений ТЛИППС

Разработанный метод анализа микроизображений был применён для количественной оценки параметров ТЛИППС, записанных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм). Металлические пленки были нанесены на подложки из боросиликатного стекла ВК7 методом магнетронного напыления. Исследуемые структуры были сформированы на установке прецизионной фемтосекундной модификации материалов (рис. 3.15), подробно описанной в работе [109]. В данной установке в качестве источника излучения используется фемтосекундный лазер Light Conversion PHAROS 6W (параметры излучения: длина волны 1026 нм; частота повторения импульсов в экспериментах составляла 200 кГц; длительность импульса на полувысоте 232 фс). Для контроля поляризации падающего излучения используется пластинка λ/2, установленная на системе углового позиционирования. В процессе записи ТЛИППС направление поляризация падающего излучения совпадало с направлением сканирования образца. Для увеличения производительности записи формирование ТЛИППС производилось с помощью астигматически сфокусированного гауссова пучка. Преобразование гауссова симметричного пучка в астигматический осуществляется с помощью цилиндрической рассеивающей линзы Л1 ($f_{Л1}$ = - 1м), а его размер задаётся с помощью собирающих линз Л2 ($f_{Л2}$ = 14 мм) и Л3 ($f_{Л3}$ = 28 мм). Линза Л4 ($f_{Л4}$ = 50 мм) фокусирует излучение записывающего пучка на поверхность обрабатываемой металлической пленки. При формировании исследуемых ТЛИППС записывающий пучок имел эллиптическую форму фокального пятна с соотношением сторон 1:10 и размером вдоль большей оси ~ 150 мкм. Исследование параметров сформированных ТЛИППС производилось по анализу микроизображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000 с увеличением 1200x (физический размер пикселя $\sim 107 \times 107$ мкм, что для исследуемых структур соответствует величине 6–10 пикселей на период решётки). Данные параметры увеличения позволяют одним кадром регистрировать всю ширину следа исследуемых ТЛИППС, сформированных при сканировании образца, что важно для оценки производительности записи. Анализ СЭМ изображений в программе «ImageJ» с использованием плагина «OrientationJ» выполнялся в модуле «Orientation Distribution» (при настройке градиентного структурного тензора использовались значения «Gaussian Gradient» и σ = 1 пиксель (для гауссова окна)). При построении графиков УР пикселей для различных структур шаг дискретизации по углу ориентации Δα варьировался в диапазоне от 1° до 0.1°.

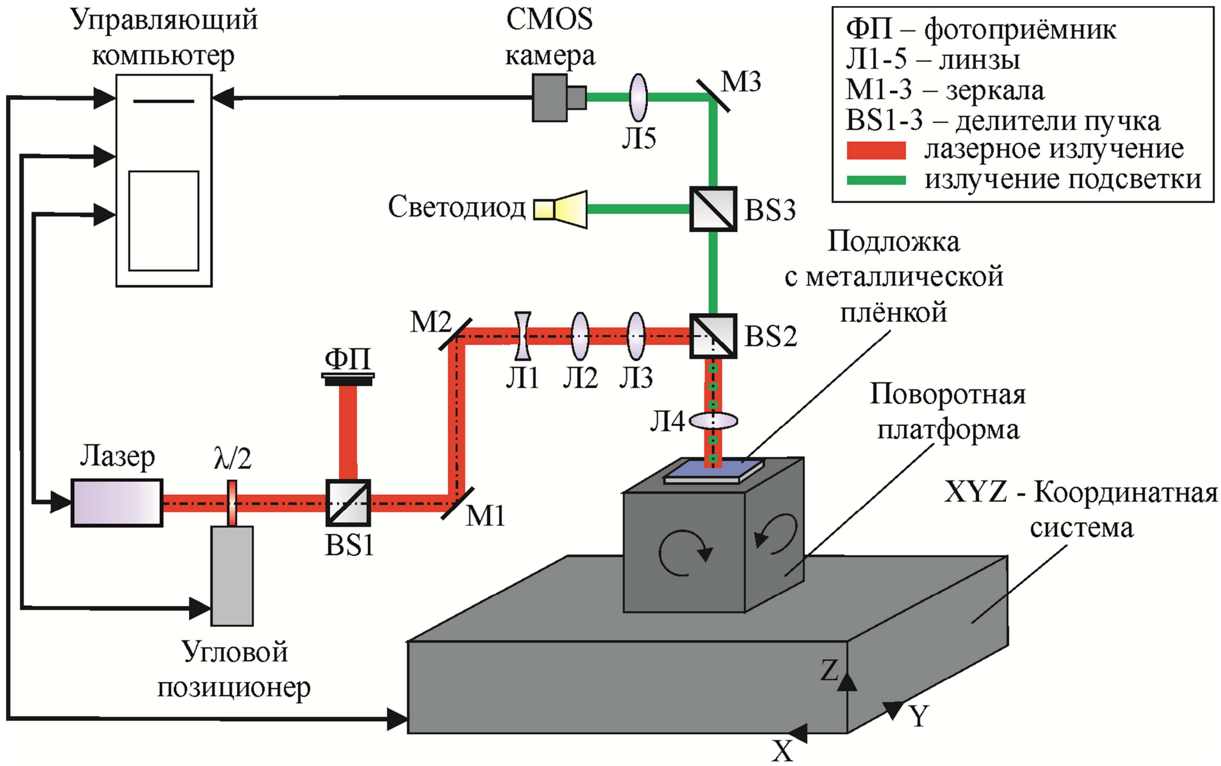


Рис. 3.15. Схема установки прецизионной фемтосекундной модификации материалов

3.2.1 Анализ ТЛИППС, сформированных на тонких плёнках хрома

В данном разделе представлены результаты анализа СЭМ изображений ТЛИППС, сформированных на поверхности пленки хрома толщиной 30 нм при различных параметрах мощности (250–340 мВт) и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного гауссова пучка (100–2000 мкм/с) [217,219,220]. Период исследуемых структур изменялся в зависимости от параметров записи и лежал в диапазоне 630–950 нм.

На рис. 3.16а представлены результаты количественной оценки производительности сканирующей записи ТЛИППС. Полученные результаты показывают, что, несмотря на тот факт, что с увеличением скорости сканирования производительность записи возрастает (до определённого момента), практически бездефектные структуры формируются при скоростях сканирования, не превышающих ~ 100 мкм/с (рис. 3.16б). Для данной скорости сканирования записывающего пучка ОПД на сформированных структурах практически не зависит от его мощности и составляет около 2–3% в диапазоне мощностей 250–340 мВт. Однако с ростом скорости сканирования увеличивается и количество дефектов на сформированной структуре пропорционально как скорости сканирования, так и мощности записывающего пучка. Интересно отметить, что ОПД для диапазона мощностей 250–320 мВт резко возрастет при увеличении скорости сканирования от 100 до 150 мкм/с, а затем наблюдается небольшой спад при скорости сканирования 300 мкм/с. Предположительно это связано с тем, что при скорости записи превышающей 100 мкм/с (рис. 3.1а) возникают локальные участки, в которых поверх периодической структуры формируются островковые области неоднородностей оксидной плёнки. Этот эффект можно наблюдать на фрагментах СЭМ изображений исследуемых ТЛИППС, представленных на рис. 3.17а (а также на рис. 3.1б-в, рис. 3.2а, рис. 3.9а и рис. 3.13). При обработке таких микроизображений, как показано на рис. 3.17б (для ТЛИППС, записанной при скорости сканирования 150 мкм/с), данные островковые области определяются как дефекты структуры (что также можно наблюдать на рис. 3.11). При скорости сканирования 300 мкм/с и выше, вероятно, вся структура (или большая её часть) покрывается относительно равномерной оксидной плёнкой, из-за чего локальные неоднородности, вызванные этим эффектом, на микроизображениях пропадают, что является причиной уменьшения определяемой ОПД. Для мощности записывающего пучка 340 мВт этот эффект не был обнаружен. Возможно, это связано с тем, что для данной мощности пучка, уже при скорости сканирования 100 мкм/с, весь сформированный микрорельеф ТЛИППС покрыт слоем относительно равномерной оксидной плёнки.

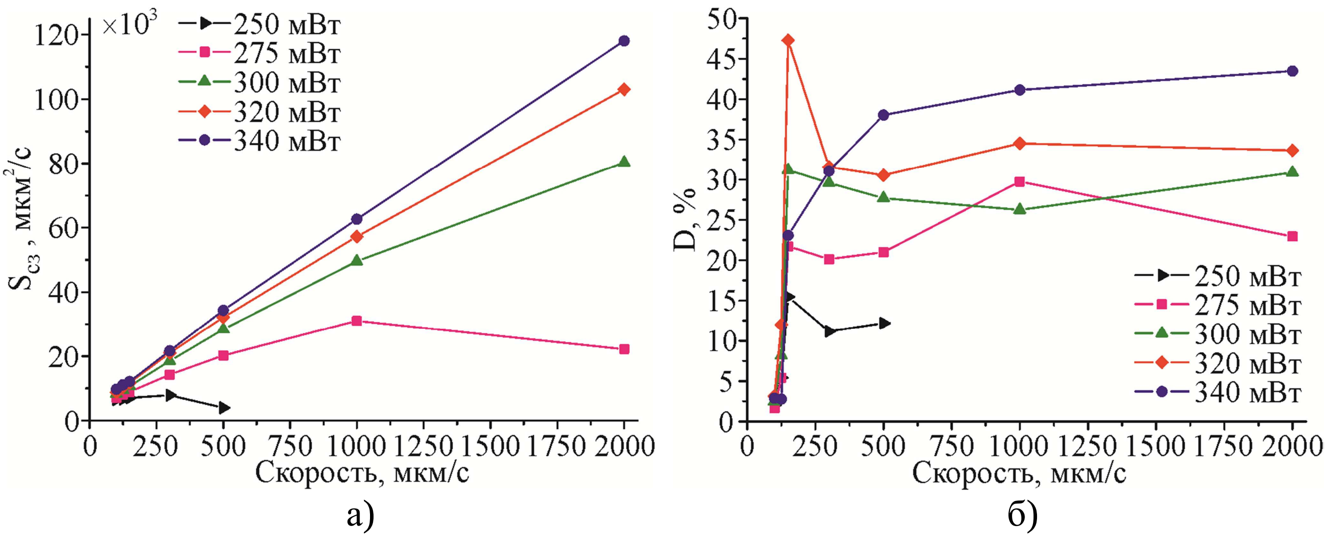


Рис. 3.16. Анализ СЭМ изображений ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома: производительность сканирующей записи (а); относительная площадь дефектов (б)

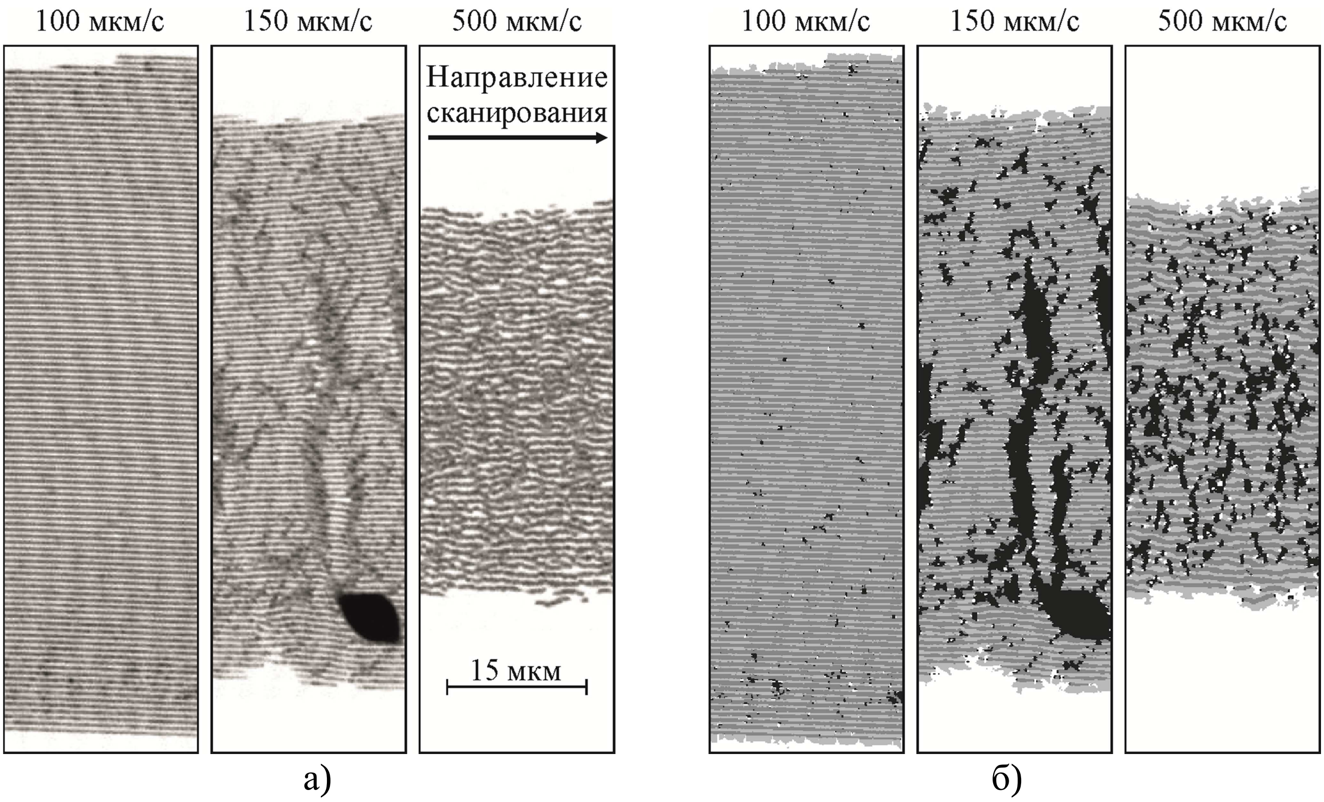


Рис. 3.17. Фрагменты микроизображений ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома при мощности записывающего пучка 275 мВт и различных скоростях сканирования: исходные микроизображения (а); микроизображения после фильтрации дефектов структур и областей, не модифицированных лазерным излучением (б)

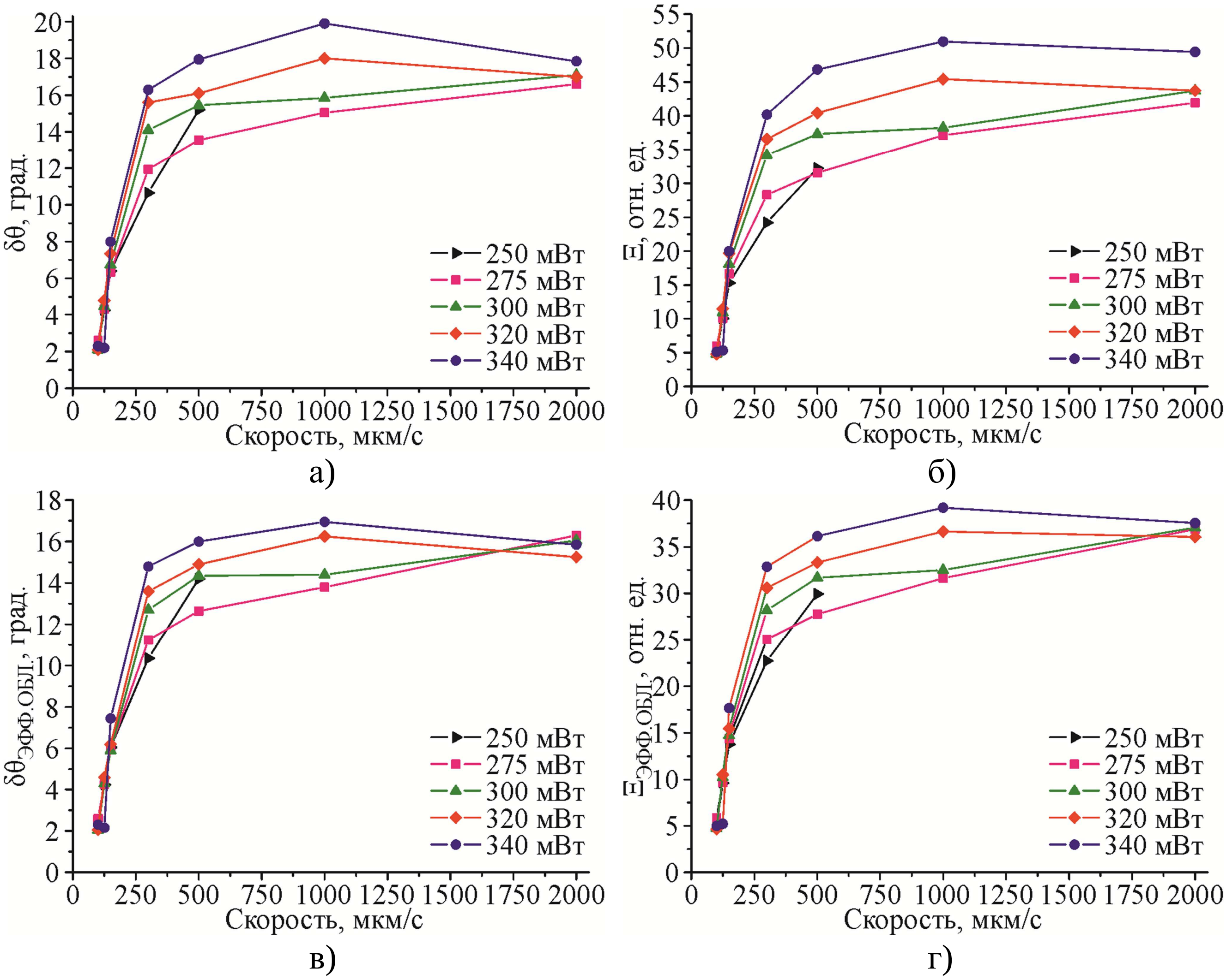


Рис. 3.18. Определение параметров упорядоченности ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома: общая упорядоченность структур (параметры DLOA (а) и НПУР (б)); упорядоченность дорожек в эффективно записанных областях ТЛИППС (параметры $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ.}$ (в) и $НПУР_{ЭФФ.ОБЛ.}$ (г))

На рис. 3.18а-г представлены результаты количественной оценки параметров упорядоченности исследуемых ТЛИППС. Полученные результаты показывают, что возможность записи ТЛИППС на тонких плёнках хрома с высокой степенью упорядоченности зависит от скорости сканирования вдоль поверхности образца и мощности записывающего пучка. При этом для скоростей сканирования 100–125 мкм/с, упорядоченность структур практически не зависит от мощности записывающего пучка. Однако при дальнейшем увеличение скорости сканирования до 1000 мкм/с, наблюдается ухудшение упорядоченности исследуемых структур пропорционально как мощности пучка, так и скорости сканирования. В диапазоне скоростей 1000–2000 мкм/с упорядоченность ТЛИППС существенно не изменялась. Интересно отметить, что при скорости сканирования 2000 мкм/с мощность записывающего пучка, в диапазоне достаточном для формирования ТЛИППС (275–340 мВт), практически не влияла на упорядоченность дорожек в эффективно записанных областях исследуемых структур (рис. 3.18в-г).

В таблице 3.1 приведены результаты обработки СЭМ изображений ТЛИППС, сформированных при воздействии на статично установленный образец астигматическим гауссовым пучком в течение 1 секунды в зависимости от мощности записывающего пучка. Внешний вид обработанных СЭМ изображений исследуемых структур после фильтрации дефектов и областей, не модифицированных лазерным излучением, представлен на рис. 3.19.

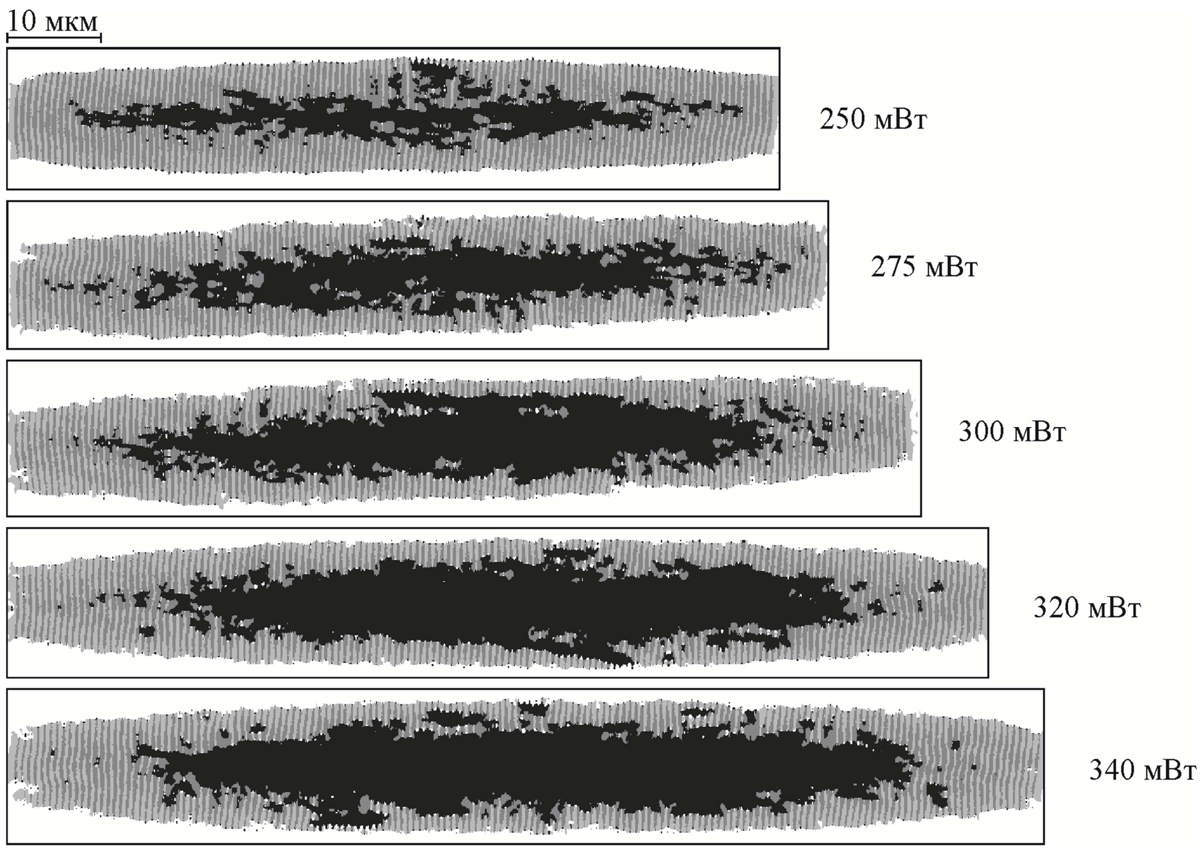


Рис. 3.19. Обработанные микроизображения ТЛИППС, записанных на плёнке хрома неподвижным астигматическим гауссовым пучком, после фильтрации дефектов структур и областей, не модифицированных лазерным излучением

Таблица 3.1 – Результат обработки СЭМ изображений ТЛИППС, записанных на плёнке хрома, при воздействии на образец неподвижным астигматическим гауссовым пучком

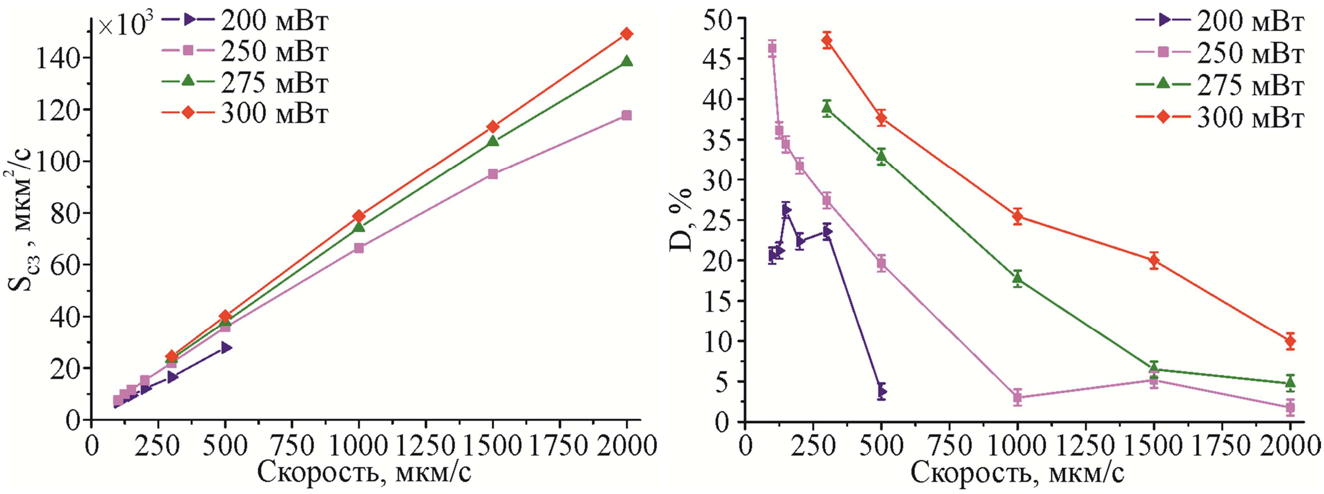
Мощность, мВт	ПМО, мкм^2	ОПД, %.	DLOA$_{Эфф_обл.}$, град.	НПУР$_{Эфф_обл.}$, отн. ед.
250	875.9±0.9	23.8±0.6	4.9±0.2	11.7±0.3
275	924.6±0.2	33.4±0.2	5.7±0.3	13.4±0.3
300	1053.1±0.3	41.9±0.2	5.5±0.2	13.0±0.8
320	1205.9±0.1	44.9±0.1	5.3±0.1	12.6±0.3
340	1301.5±0.3	48.4±0.2	6.1±0.2	14.0±0.1

По представленным результатам видно, что увеличение мощности записывающего пучка вместе с увеличением ПМО, приводит к существенному росту ОПД с 24% при мощности пучка 250 мВт до 48% при мощности 340мВт, что, как можно заметить на рис. 3.19, в основном вызвано переэкспонированием центральной области формируемых ТЛИППС имеющих эллиптичную форму. В связи с этим, увеличение мощности записывающего пучка в исследуемом диапазоне не приводит к существенному росту площади эффективно записанной периодической структуры. Кроме того явной зависимости упорядоченности периодических дорожек в эффективно записанных областях исследуемых ТЛИППС от мощности записывающего пучка не наблюдается.

3.2.2 Анализ ТЛИППС, сформированных на тонких плёнках гафния

В данном разделе представлены результаты анализа СЭМ изображений ТЛИППС, сформированных на поверхности пленки гафния толщиной 15 нм [221–223]. Формирование исследуемых ТЛИППС производилось при мощностях записывающего пучка 200 мВт (диапазон скоростей сканирования 100–500 мкм/с), 250 мВт (диапазон скоростей сканирования 100–2000 мкм/с), а также 275 мВт и 300 мВт (диапазон скоростей сканирования 300–2000 мкм/с). Период исследуемых структур изменялся в зависимости от параметров записи и лежал в диапазоне 650–720 нм [224]. Выбор гафния в качестве исследуемого материала для формирования ТЛИППС был обусловлен его пирофорным поведением, низкой теплопроводностью и высокой температурой плавления, как для самого металла, так и для формируемого оксида.

На рис. 3.20а представлены результаты количественной оценки производительности сканирующей записи сформированных ТЛИППС. Полученные результаты показывают, что в исследуемых диапазонах мощностей и скоростей сканирования записывающего пучка производительность записи монотонно возрастает с увеличением скорости сканирования. При этом, как показано на рис. 3.20б, относительная площадь дефектов с увеличением скорости сканирования существенно уменьшается (в отличие от ТЛИППС сформированных на плёнках хрома – рис. 3.16б). Это связано с тем, что при «малых» скоростях сканирования, из-за переэкспонирования материала, в центральной области ТЛИППС сосредоточена большая область дефектов, относительная площадь которых на СЭМ изображениях варьируется в зависимости от мощности записывающего пучка, и, в частности, для скорости сканирования 300 мкм/с составляет от 24% до 47%.



а) б)

Рис. 3.20. Анализ СЭМ изображений ТЛИППС, сформированных на плёнке гафния: производительность сканирующей записи (а); относительная площадь дефектов (б)

Как видно на рис. 3.21а-б, увеличение скорости сканирования приводит к уменьшению дозы экспозиции в центральной области и формированию в ней периодической структуры, что и является причиной уменьшения определяемой величины ОПД. В частности, для мощности записывающего пучка 250 мВт и скорости сканирования 2000 мкм/с ОПД сформированной структуры составила ~ 2%. При этом, при той же скорости сканирования для мощностей пучка 275 и 300 мВт относительная площадь дефектов составила 4.5% и 10% соответственно. По полученным данным, можно предположить, что для мощности записывающего пучка 275 мВт пучка увеличение скорости сканирования выше 2000 мкм/с может способствовать уменьшению относительной площади дефектов на сформированных структурах ниже величины 4.5%.

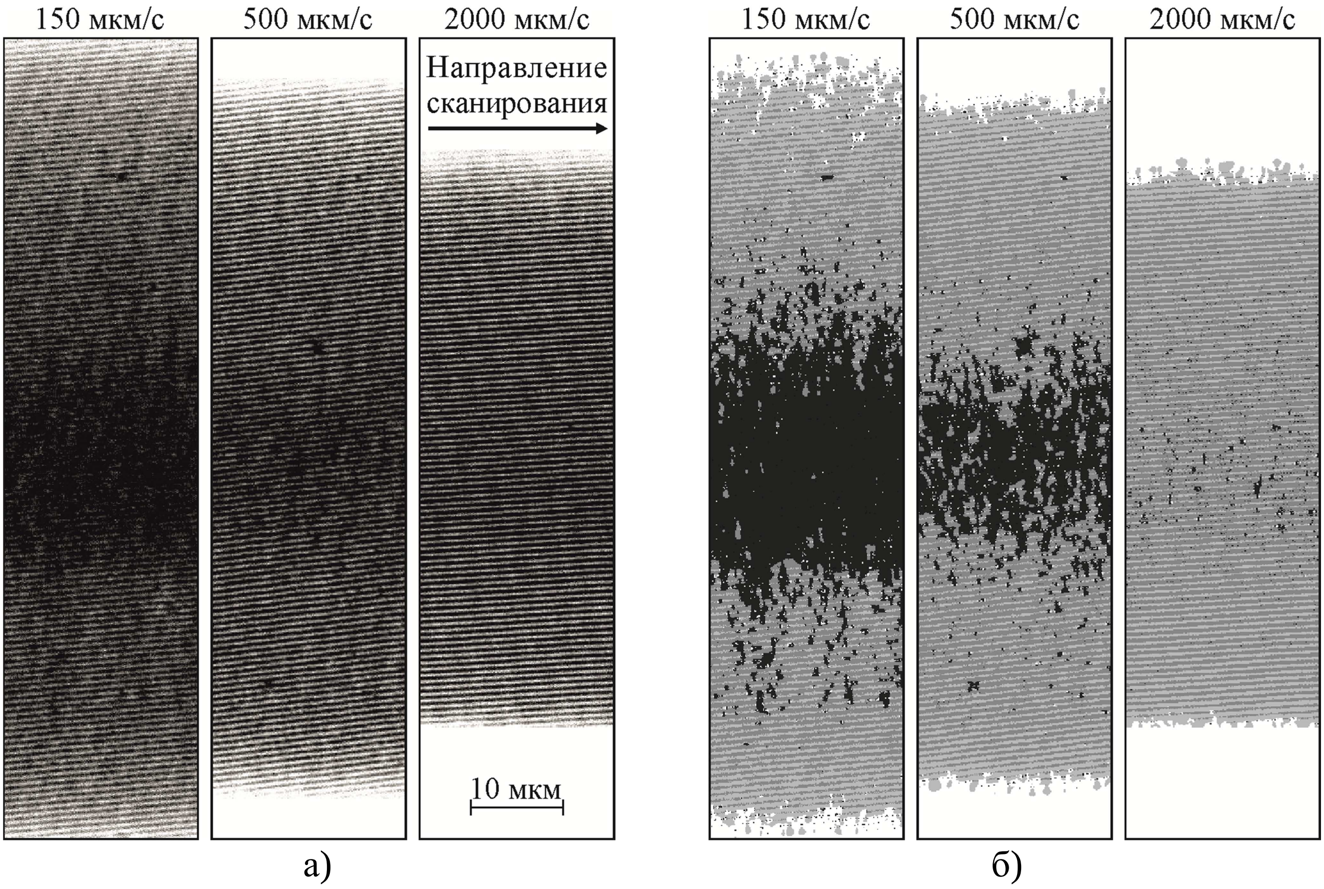


Рис. 3.21. Фрагменты микроизображений ТЛИППС, сформированных на плёнке гафния при мощности записывающего пучка 250 мВт и различных скоростях сканирования: исходные микроизображения (а); микроизображения после фильтрации дефектов структур и областей, не модифицированных лазерным излучением (б)

Как показано на рис. 3.22а-в ТЛИППС, сформированные на плёнках гафния в исследуемых диапазонах мощностей и скоростей сканирования записывающего пучка имеют высокую степень упорядоченности, соизмеримую с параметрами упорядоченности структур ТЛИППС, записанных на плёнках хрома в диапазоне скоростей сканирования 100–125 мкм/с (рис. 3.18а-в).

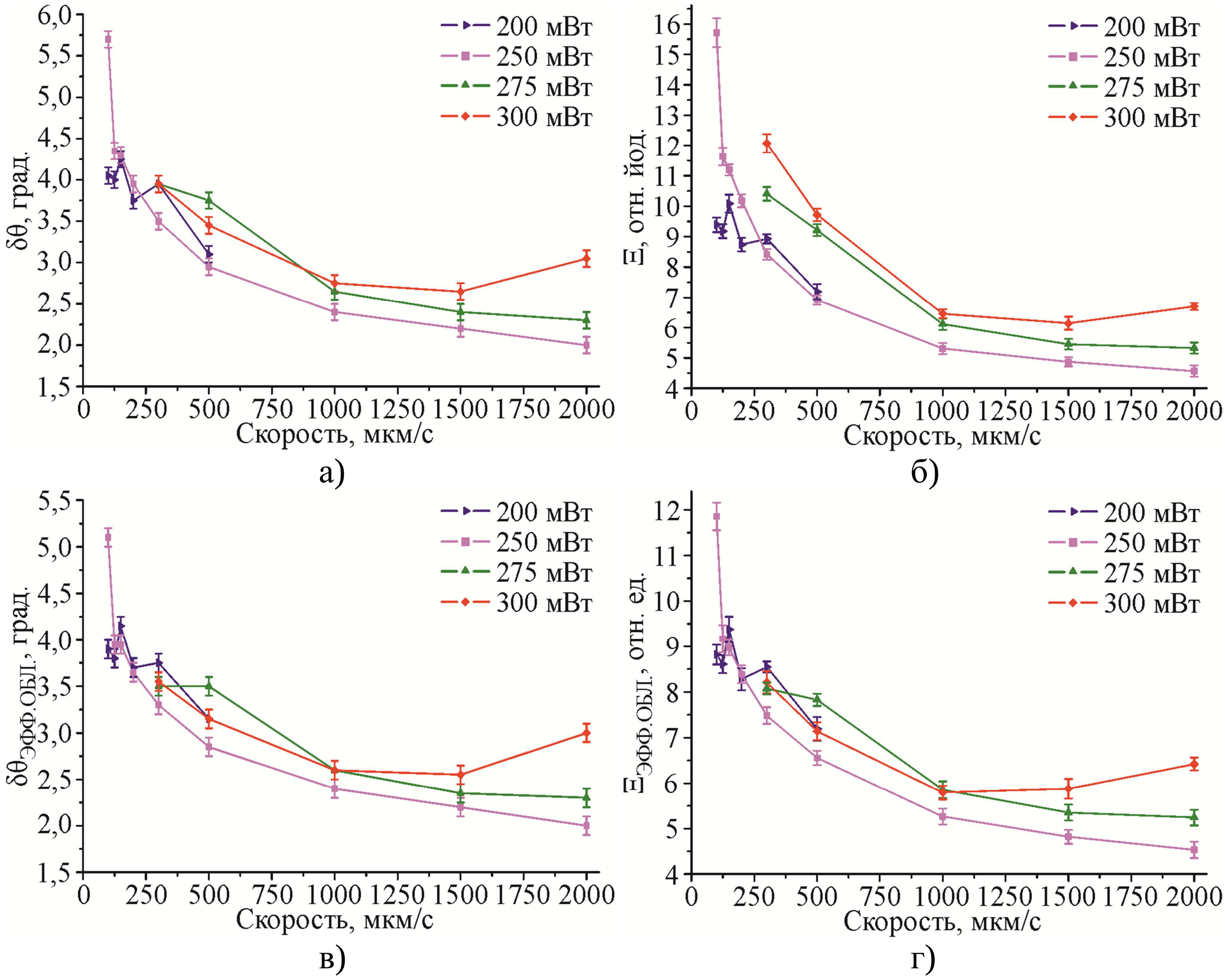


Рис. 3.22. Определение параметров упорядоченности ТЛИППС, сформированных на плёнке гафния: общая упорядоченность структур (параметры DLOA (а) и НПУР (б)); упорядоченность дорожек в эффективно записанных областях ТЛИППС (параметры DLOA$_{ЭФФ.ОБЛ.}$ (в) и НПУР$_{ЭФФ.ОБЛ.}$ (г))

Интересно отметить, что с увеличением скорости сканирования записывающего пучка, параметры упорядоченности ТЛИППС, сформированных на плёнках гафния, улучшаются. То есть в исследуемых диапазонах мощностей и скоростей сканирования записывающего пучка, все ключевые параметры качества ТЛИППС (дефектность и упорядоченность) улучшаются с увеличением скорости сканирования, а производительность записи при этом монотонно возрастает. Таким образом, полученные результаты показывают, что гафний является перспективным материалом, для высокопроизводительного формирования ТЛИППС с высокой степенью упорядоченности структур.

В таблице 3.2 приведены результаты обработки СЭМ изображений ТЛИППС, записанных при воздействии на образец в течение 1 секунды неподвижным астигматическим гауссовым пучком при различных параметрах мощности записывающего пучка. Внешний вид СЭМ изображений исследуемых ТЛИППС после фильтрации дефектов структуры и областей, не модифицированных лазерным излучением, представлен на рис. 3.23.

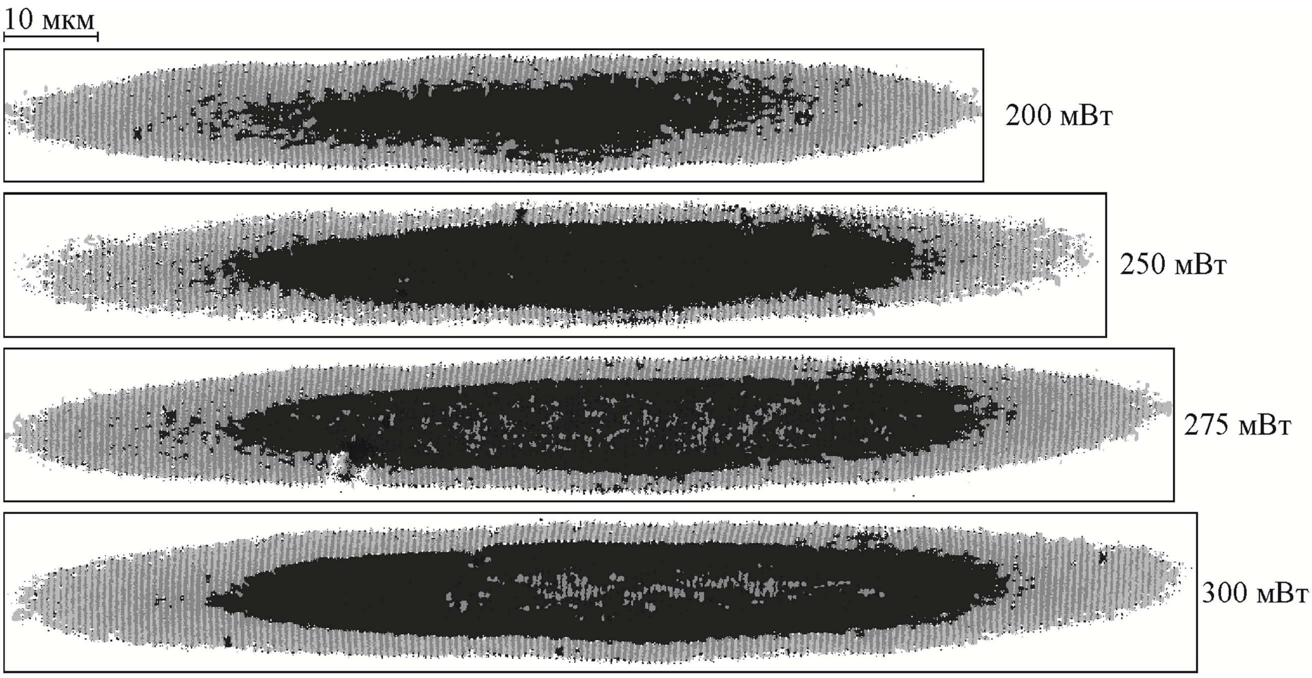


Рис. 3.23. Обработанные микроизображения ТЛИППС, записанных на плёнке гафния неподвижным астигматическим гауссовым пучком, после фильтрации дефектов структур и областей, не модифицированных лазерным излучением

Таблица 3.2 – Результат обработки СЭМ изображений ТЛИППС, записанных на плёнке гафния, при воздействии на образец неподвижным астигматическим гауссовым пучком

Мощность, мВт	ПМО, мкм^2	ОПД, %.	DLOA$_{Эфф_обл.}$, град.	НПУР$_{Эфф_обл.}$, отн. ед.
200	970.2±1.6	39.9±1.4	5.6±0.2	13.5±1.0
250	1052.7±0.6	59.0±1.1	6.2±0.2	14.4±0.7
275	1339.6±0.4	49.9±1.1	4.95±0.3	12.3±0.5
300	1411.9±0.5	50.4±1.1	5.25±0.3	12.4±0.4

Анализ данных структур, как и для ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома неподвижным лазерным пучком, не показал существенного влияния мощности пучка на упорядоченность периодической структуры в эффективно записанной области. При этом значение параметров упорядоченности исследуемых ТЛИППС лежит в диапазоне 4.95°–6.2° для параметра $DLOA_{Эфф\_обл.}$ и 12.3–14.4 для параметра $НПУР_{Эфф\_обл.}$, что соизмеримо с данными, полученными при модификации неподвижным пучком тонких плёнок хрома (4.9°–6.1° для параметра $DLOA_{Эфф\_обл.}$ и 11.7–14.0 для параметра $НПУР_{Эфф\_обл.}$). Другими словами, полученные результаты показывают, что при статичной модификации тонких плёнок хрома и гафния в исследуемых диапазонах мощности лазерного излучения (200–300 мВт для гафния и 250–340 мВт для хрома), упорядоченность структур в эффективно записанной области ТЛИППС не имеет прямой зависимости ни от мощности записывающего пучка, ни от материала.

3.3. Выводы к главе 3

- Разработан метод количественной оценки лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, который основан на анализе карт угловой ориентации пикселей на их микроизображениях и позволяет определять такие характеристики, как относительная площадь дефектов исследуемых структур, прямолинейность и параллельность дорожек в них, а также производительность записи, как функцию технологических параметров. Преимуществом метода является попиксельная обработка микроизображений, что позволяет исследовать структуры со сложной формой границы и даёт возможность исключать из анализа упорядоченности области дефектов, общая площадь которых может быть сопоставима с площадью эффективно записанной периодической структуры. Последнее минимизирует влияние дефектных областей на определение прямолинейности и параллельности записанных дорожек формирующих ЛИППС.
- Для термохимических ЛИППС, сформированных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм), были впервые получены новые

количественные характеристики таких параметров как относительная площадь дефектов, прямолинейность и параллельность дорожек структуры, а также производительность записи в зависимости от мощности и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного фемтосекундного гауссова пучка.

- Для термохимических ЛИППС, сформированных на плёнках хрома, высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры были получены при скоростях сканирования, не превышающих ~ 100 мкм/с. При этом относительная площадь дефектов и упорядоченность структур, сформированных при скорости сканирования лазерного записывающего пучка 100 мкм/с, практически не зависит от его мощности. Относительная площадь дефектов на исследуемых структурах составила около 2–3% в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–340 мВт. Однако при дальнейшем увеличении скорости сканирования относительная площадь дефектов возрастает пропорционально мощности записывающего пучка, а также ухудшается и упорядоченность сформированной периодической структуры.
- Для термохимических ЛИППС, сформированных на плёнках гафния, высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры были получены при мощности пучка 250 мВт и скорости сканирования 2000 мкм/с (относительная площадь дефектов ~ 2%). При уменьшении скорости сканирования наблюдается постепенное переэкспонирование центральной области ТЛИППС, из-за чего увеличивается относительная площадь дефектов структуры (до 46% при скорости сканирования 100 мкм/с). Увеличение скорости сканирования, помимо уменьшения относительной площади дефектов структуры, приводит также и к улучшению упорядоченности дорожек записываемых ТЛИППС. Таким образом, анализ ТЛИППС, сформированных на плёнках гафния показал, что в исследуемых диапазонах мощностей и скоростей сканирования записывающего пучка дефектность и упорядоченность улучшаются с увеличением скорости сканирования, а производительность записи при этом монотонно возрастает. Полученные результаты показывают, что гафний является перспективным

материалом для высокопроизводительной записи термохимических ЛИППС с высокой степенью упорядоченности структур.

Результаты проведённого исследования, описанные в данной главе, опубликованы в работах [217-224].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы

1. Предложены и экспериментально исследованы схемы видеорегистрации дифракционной картины в прошедшем или отражённом от исследуемого ДОЭ свете, в диапазонах угла дифракции не менее чем ±80° и азимутального угла 0°–360°, с использованием объёмного рассеивающего экрана, установленного между исследуемым элементом и системой видеорегистрации. Показано, что при использовании полусферического рассеивающего экрана для регистрации дифракционной картины в заявленном угловом диапазоне достаточным является использование четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. В свою очередь, использование рассеивающего экрана, имеющего форму сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне ±45° от оси его симметрии приближена к форме полусферы, или оптоволоконного рассеивающего экрана с регулярным расположением волокон, торцы которых образуют входную сферически вогнутую и выходную плоскую поверхности экрана, позволяет регистрировать дифракционную картину в заявленном угловом диапазоне с помощью всего одной видеокамеры с проекционным объективом расположенной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана.

По результатам проведённого исследования созданы два оптико-электронных устройства дифрактометрического контроля параметров ДОЭ. В первом при регистрации дифракционной картины в отражённом свете используется полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами, расположенными вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. Диапазон периодов элементов, контролируемых на созданном устройстве, составляет 0.45–6.47 мкм. Второе устройство на базе инвертированного оптического микроскопа реализует одновременный визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете. В данном устройстве при регистрации дифракционной картины используется оптоволоконный рассеивающий экран с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским.

2. Предложен и экспериментально апробирован метод дифрактометрического контроля в отражённом свете при изготовлении РОЭ, предназначенных для работы в дальнем ультрафиолете на пропускание. Он основан на анализе дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом, сформированных вблизи рабочей области РОЭ. Предложенный метод позволяет осуществлять контроль не на расчётной длине волны, а с использованием лазерного источника видимого диапазона, длина волны которого и угол падения пучка на тестовые решетки выбираются из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции на отражение для расчётных параметров их микрорельефа. Влияние деструктивной интерференции на измерение нулевого порядка дифракции устраняется путем установки РОЭ через слой иммерсионной жидкости на опорную пластину (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие) из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый элемент. Применение данного метода для контроля подложек, включающих в себя группу РОЭ (с двумя тестовыми решётками для каждого элемента), позволило значительно повысить скорость оценки погрешности их изготовления.

3. Разработан и экспериментально исследован метод поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутоновой фотолитографии. Он основан на анализе параметров тестовых синусоидальных решеток. Их использование позволяет получать полные характеристические кривые на каждом технологическом этапе изготовления элемента без искажения результатов измерения вблизи резких перепадов рельефа, свойственных решеткам с кусочно-непрерывным профилем. Это даёт возможность подбирать параметры экспонирования фоторезиста, измерять отклонение полученной формы профиля и

определять необходимую функцию пропускания растрового фотошаблона, дающую минимальные погрешности формируемого микрорельефа.

4. Разработан метод количественной оценки лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, который основан на анализе карт угловой ориентации пикселей на их микроизображениях и позволяет определять такие характеристики, как относительная площадь дефектов исследуемых структур, прямолинейность и параллельность дорожек в них, а также производительность записи, как функцию технологических параметров. Преимуществом метода является попиксельная обработка микроизображений, позволяющая исследовать структуры сложной формы и исключать дефекты при анализе упорядоченности. Последнее минимизирует влияние дефектных областей на определение прямолинейности и параллельности записанных дорожек ЛИППС.

5. Для термохимических ЛИППС, сформированных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм), были впервые получены новые количественные характеристики таких параметров как относительная площадь дефектов, прямолинейность и параллельность дорожек структуры, а также производительность записи в зависимости от мощности и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного фемтосекундного гауссова пучка. Полученные результаты показали, что на плёнках хрома, высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры формируются при скоростях сканирования, не превышающих ~ 100 мкм/с (в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–340 мВт). В то время как для термохимических ЛИППС на плёнках гафния было получено, что дефектность и упорядоченность улучшаются с увеличением скорости сканирования как минимум до 2000 мкм/с, а производительность записи при этом монотонно возрастает (в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–300 мВт). Полученные результаты показывают, что гафний является перспективным материалом для высокопроизводительной записи термохимических ЛИППС с высокой степенью упорядоченности структур.

В рамках выполнения работы получен один патент на изобретение (Приложение 1) и один акт о внедрении результатов диссертационной работы (Приложение 2).

Автор диссертации выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю Королькову Виктору Павловичу за постановку интересных научных задач, постоянную помощь и многочисленные обсуждения аспектов работы. Также автор благодарит Хомутова Владимира Николаевича за совместную работу по разработке методов дифрактометрического контроля параметров ДОЭ, а также Достовалова Александра Владимировича и Микерина Сергея Львовича – за совместную работу по исследованию термохимических ЛИППС. Отдельно необходимо отметить огромный вклад в повышение моей квалификации Александра Григорьевича Полещука, ушедшего из жизни в 2017 году. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН за постоянное содействие в работе. Также хочу поблагодарить Говорову Дарью Сергеевну и Милойчикову Ирину Алексеевну за помощь в оформлении диссертации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДК – дифракционная картина

ДОЭ – дифракционный оптический элемент

ДП – дифракционный порядок

ДУФ – дальний ультрафиолет

ДЭ – дифракционная эффективность

ЛИППС – лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры

НПУР – нормированная площадь под графиком углового распределения

ОП – опорная подложка

ОПД – относительная площадь дефектов

ОРЭ – оптоволоконный рассеивающий экран

ПМО – площадь модифицированной области

ПСЗ – производительность сканирующей записи

РОЭ – рельефно-фазовые оптические элементы

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

ТЛИППС – термохимические лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры

ТЛР – тестовая линейная решётка

ТСР – тестовая синусоидальная решётка

УК – угловая когерентность

УР – угловое распределение

ФП – фотоприёмник

ФШ – фотошаблон

DLOA (dispersion in the LIPSS orientation angle) – Параметр прямолинейности дорожек формирующих периодическую структуру (определяется как полуширина на полувысоте графика углового распределения пикселей обрабатываемого микроизображения)

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

α – угол дифракции

m – номер дифракционного порядка

λ – длина волны

θ – угол падения пробного пучка

d – период структуры

η – дифракционная эффективность

P_m – мощность излучения в дифракционном порядке с номером m

P_{in} – мощность пробного пучка

L – увеличение оптического пути в зависимости от угла дифракции при использовании плоского рассеивающего экрана

β – угол расходимости

r – радиус кривизны рассеивающего экрана

Θ_{ps} – размер дифракционного порядка на поверхности полусферического рассеивающего экрана

Θ'_{ps} – размер дифракционного порядка в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности полусферического рассеивающего экрана

f_{ps} – искажение поперечного размера дифракционных порядков, зарегистрированных видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана

x'_{ps} – координаты центров дифракционных порядков, зарегистрированных с поверхности полусферического рассеивающего экрана, в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры

x'_{rps} – координаты центров дифракционных порядков, зарегистрированных с поверхности рассеивающего экрана №1, в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры

x'_{par} – координаты центров дифракционных порядков, зарегистрированных с поверхности параболического рассеивающего экрана, в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры

Θ_{rps} – размер дифракционного порядка на поверхности рассеивающего экрана №1

Θ_{par} – размер дифракционного порядка на поверхности параболического рассеивающего экрана

Θ'_{rps} – размер дифракционного порядка в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности рассеивающего экрана №1

Θ'_{par} – размер дифракционного порядка в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры при регистрации дифракционной картины с поверхности параболического рассеивающего экрана

$\delta\alpha$ – ошибка определения угла дифракции

h_p – высота асферического рассеивающего экрана

Δ_p – расстояние от исследуемого элемента до нижней точки асферического рассеивающего экрана

Δ_{oe} – расстояние от исследуемого элемента до нижней точки оптоволоконного рассеивающего экрана

h_{oe} – высота сферического сегмента выполненного в первом торце оптоволоконного рассеивающего экрана

$\varnothing_{\text{отв}}$ – диаметр пропускающего окна, выполненного в оптоволоконном рассеивающем экране для ввода излучения пробного пучка

NA – числовая апертура пробного пучка

R_c – радиус кривизны сферического сегмента, выполненного в первом торце оптоволоконного рассеивающего экрана

h_f – высота оптоволоконного рассеивающего экрана

α_{min} – минимально регистрируемый угол дифракции

α_{max} – максимально регистрируемый угол дифракции

J – соотношение площадей торцов оптоволоконного рассеивающего экрана

S_1 – площадь первого торца оптоволоконного рассеивающего экрана

S_2 – площадь второго торца оптоволоконного рассеивающего экрана

$\varnothing_1$ – диаметр первого торца оптоволоконного рассеивающего экрана

$\varnothing_2$ – диаметр второго торца оптоволоконного рассеивающего экрана

P – мощность излучения лазерного записывающего пучка

V – скорость сканирования записывающего лазерного пучка

b_1 – коэффициент искажения правой стенки синусоидальной формы профиля металл/оксидной решётки

b_2 – коэффициент искажения левой стенки синусоидальной формы профиля металл/оксидной решётки

h_{Ti} – высота плёнки металла, напылённой на подложку

h_{TiO2} – высота оксидных выступов

$h_{TiO2\_слой}$ – высота оксидного слоя, покрывающего металлическую плёнку

F_{PB} – отношение объема сформированного оксида к объему израсходованного металла

$h_{ТЛР}$ – высота тестовой линейной решётки

P_{ref} – опорная мощность для определения дифракционной эффективности

T – коэффициентом заполнения растровой ячейки фотошаблона

$\delta\theta$ – полуширина на полувысоте графика углового распределения пикселей (параметр DLOA)

$\Delta\alpha$ – шаг дискретизации по углу ориентации при построении графика углового распределения

Ξ – нормированная площадь под графиком углового распределения пикселей (параметр НПУР)

D – относительная площадь дефектов

Pix_D – количество пикселей, характеризующих дефектные области сформированной ТЛИППС

Pix_Σ – общее количество пикселов структуры ТЛИППС на обрабатываемом микроизображении.

Pix_S – физический размер одного пикселя на микроизображении

$S_{мо}$ – площадь модифицированной области

$S_{сз}$ – площадь сканирующей записи

X_{scan} – зарегистрированная длина следа ТЛИППС (в пикселах) на обрабатываемом микроизображении

Pix_{SY} – физическая ширина пикселя на микроизображении

$f_{Л}$ – фокусное расстояние линзы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сисакян И. Н. и др. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов //Компьютерная оптика. – 1988. – №. 03. – С. 94.
2. Казанский Н. Л., Мурзин С. П., Трегуб В. И. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов //Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – №. 4. – С. 481-486.
3. Kazanskiy N. L. et al. Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action //Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49. – №. 11. – Pp. 1264-1267.
4. Мурзин С. П., Герхард Л. Лазерная сварка разнородных металлических материалов с использованием дифракционных оптических элементов //Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – №. 6. – С. 848-855.
5. Мурзин С. П., Блохин М. В. Селективная модификация двухфазной стали DP 1000 лазерным воздействием с применением дифракционного оптического элемента //Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – №. 5. – С. 773-779.
6. Karpeev S. V. et al. Fibre sensors based on transverse mode selection //Journal of Modern Optics. – 2007. – Vol. 54. – №. 6. – Pp. 833-844.
7. Egorov A. V., Kazanskii N. L., Serafimovich P. G. Using coupled photonic crystal cavities for increasing of sensor sensitivity //Computer Optics. – 2015. – Vol. 39. – №. 2. – Pp. 158-162.
8. Khonina S. N., Savelyev D. A., Kazanskiy N. L. Vortex phase elements as detectors of polarization state //Optics Express. – 2015. – Vol. 23. – №. 14. – Pp. 17845-17859.
9. Коронкевич В. П. и др. Бифокальная дифракционнорефракционная интраокулярная линза //Автометрия. – 1997. – №. 6. – С. 26-41.
10. Баум О. И. и др. Новые методы биофотоники для повышения эффективности и безопасности лазерных технологий модификации

фиброзной оболочки глаза //Вестник офтальмологии. – 2018. – Т. 134. – №. 5. – С. 4-14.

11. Баум О. И. и др. Формирование контролируемого пространственного распределения лазерного излучения для коррекции формы и рефракции роговицы глаза //Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 1. – С. 87-93.
12. Лукин А. В., Мустафин К. С. Голографические методы контроля асферических поверхностей //Оптико-механическая промышленность. – 1979. – №. 4. – С. 53-59.
13. Коронкевич В. П. и др. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы //Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – №. 1 – С. 4-23.
14. Burge J. H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics //International Conference on Optical Fabrication and Testing. – International Society for Optics and Photonics, 1995. – Vol. 2576. – Pp. 258-269.
15. Finogenov L. V. et al. 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffractive optical elements //Measurement science and technology. – 2007. – Vol. 18. – №. 6. – P. 1779.
16. Завьялов П. С. и др. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов //Автометрия. – 2008. – Т. 44. – №. 2. – С. 23-31.
17. Kazanskiy N. L., Popov S. B. Machine vision system for singularity detection in monitoring the long process //Optical Memory and Neural Networks. – 2010. – Vol. 19. – №. 1. – Pp. 23-30.
18. Kazanskiy N. L., Popov S. B. The distributed vision system of the registration of the railway train //Computer optics. – 2012. – Vol. 36. – №. 3. – Pp. 419-428.
19. Подлипнов В. В. и др. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям //Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42. – №. 5. – С. 877-884.

20. Денисюк Ю. Н., Соскин С. И. Голографическая коррекция деформационных аберраций главного зеркала телескопа //Опт. и спектр. – 1971. – Т. 31. – №. 6. – С. 992-999.
21. Слюсарев Г. Г. Оптические системы с фазовыми слоями //Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1957. – Т. 113. – №. 4. – С. 780-783.
22. Тудоровский А. И. Объектив с фазовой пластинкой //Оптика и спектроскопия. – 1959. – Т. 6. – С. 198-210.
23. Dobson S. L., Sun P., Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging //Applied optics. – 1997. – Vol. 36. – №. 20. – Pp. 4744-4748.
24. Ditto T. D. Three-dimensional microscopy using a diffraction grating primary objective //Photonics North 2004: Photonic Applications in Astronomy, Biomedicine, Imaging, Materials Processing, and Education. – International Society for Optics and Photonics, 2004. – Vol. 5578. – Pp. 167-179.
25. Herzig H. P. et al. Diffractive optical elements for space communication terminals //Space Optics 1994: Space Instrumentation and Spacecraft Optics. – International Society for Optics and Photonics, 1994. – Vol. 2210. – Pp. 104-112.
26. Насыров Р. К. Разработка дифракционной оптики для настройки оптических систем //Интерэкспо Гео-Сибирь, СибОптиа-2108.– 2018. – Т. 1. – С. 84-87.
27. Волков А. В., Казанский Н. Л., Успленьев Г. В. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОЭ //Компьютерная оптика. – 1999. – №. 19. – С.137-142.
28. Василевский А. С. и др. Математическое моделирование голограммного светоформирующего диффузора //Мир голографии. – 2013. – С. 43-58.
29. Гусарова Н. И. и др. Голограммные зеркала окулярной системы очков ночного видения //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение». – 2010. – №. 4. – С. 39-49.
30. Одиноков С. Б., Бондарев Л. А. Технологии голографической защиты пластиковых карт //Мир карточек. – 1999. – №. 6. – С. 24-30.

31. Одиноков С. Б. Николаев А. И. Борьба с подделками при помощи голограмм. – 1999. – №. 1. – С. 23-25.
32. Одиноков С. Б., Николаев А. И. Голографические технологии на защите фармпрепаратов. – 2003. – №. 2. – С. 32–39.
33. Goncharsky A., Goncharsky A., Durlevich S. Diffractive optical element with asymmetric microrelief for creating visual security features //Optics Express. – 2015. – Vol. 23. – №. 22. – Pp. 29184-29192.
34. Wlodarczyk K. L. et al. Tamper-proof markings for the identification and traceability of high-value metal goods //Optics express. – 2017. – Vol. 25. – №. 13. – Pp. 15216-15230.
35. Полещук А. Г., Коронкевич В. П. Новый облик оптики //Наука из первых рук. – 2006. – №. 5. – С. 18-29.
36. Сойфер В. А., Волков А. В. Методы компьютерной оптики. – М. : Физматлит, 2003.
37. Полещук А. Г., Коронкевич В. П. Лазерные методы трехмерного микроструктурирования оптических поверхностей //3D лазерные информационные технологии/Под ред. П. Е. Твердохлеба. Новосибирск: ЗАО НПП «Офсет». – 2003. – С. 243-310.
38. Одиноков С. Б. и др. Перспективы применения голограммных и дифракционных элементов в оптических системах приборов визуального наблюдения, прицеливания и дополненной реальности //HOLOEXPO: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 11-13.
39. Kovalev M. S. et al. Optical wavefields measurement by digital holography methods //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 1096. – №. 1. – P. 012112.
40. Martínez-Calderon M. et al. Tailoring diamond’s optical properties via direct femtosecond laser nanostructuring //Scientific reports. – 2018. – Vol. 8. – №. 1. – P. 14262.

41. Banerji S. et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? //Optica. – 2019. – Vol. 6. – №. 6. – Pp. 805-810.
42. Doskolovich L. L. et al. Design and investigation of color separation diffraction gratings //Applied Optics. – 2007. – Vol. 46. – №. 15. – Pp. 2825-2830.
43. Belotelov V. I. et al. Magnetooptical properties of perforated metallic films //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – Vol. 310. – №. 2. – Pp. e843-e845.
44. Raguin D. H., Morris G. M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region //Applied optics. – 1993. – Vol. 32. – №. 7. – Pp. 1154-1167.
45. Bräuer R., Bryngdahl O. Design of antireflection gratings with approximate and rigorous methods //Applied optics. – 1994. – Vol. 33. – №. 34. – Pp. 7875-7882.
46. Хонина С. Н., Алмазов А. А. Формирование гауссовых пучков с помощью винтовых фазовых ДОЭ //Компьютерная оптика. – 2002. – №. 24. – С. 102-109.
47. Полещук А. Г. и др. Дифракционные фильтры для управления излучением мощных лазеров //Автометрия. – 1998. – №. 6. – С. 38-46.
48. Сойфер В. А., Котляр В. В., Досколович Л. Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники //Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. – №. 4.
49. Su V. C. et al. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications //Optics express. – 2018. – Vol. 26. – №. 10. – Pp. 13148-13182.
50. Гущо Ю. П. Фазовая рельефография. – М. : Энергия, 1974.
51. Грейсух Г. И., Ефименко И. М., Степанов С. А. Оптика градиентных и дифракционных элементов. – Радио и связь, 1990.
52. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов //Л.: ГОИ. – 1984. – 146 с.
53. Данилов В. А. и др. Оптические элементы, фокусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную линию //Препринт ФИАН СССР. – 1983. – №. 69.

54. Гончарский А. В., Попов В. В., Степанов В. В. Введение в компьютерную оптику. – М. : МГУ, 1991.

55. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем //Л.: машиностроение. – 1986. – Т. 986. – С. 223.

56. Голуб М. А. и др. Синтез пространственных фильтров для исследования поперечного модового состава когерентного излучения //Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – №. 9. – С. 1866-1868.

57. Коронкевич В. П., Пальчикова И. Г. Современные зонные пластинки //Автометрия. – 1992. – №. 1. – С. 86-100.

58. Голуб М. А. и др. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики //Автометрия. – 1988. – №. 1. – С. 70-82.

59. Dammann H., Görtler K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms //Optics communications. – 1971. – Vol. 3. – №. 5. – Pp. 312-315.

60. Бобров С. Т. и др. Дифракционные решётки с порядками одинаковой интенсивности //Голографические системы//Науч. тр./НЭТИ, Новосибирск. – 1978. – №. 2. – С. 123-129.

61. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Л. : Машиностроение, 1975.

62. Sweeney D. W., Sommargren G. E. Harmonic diffractive lenses //Applied Optics. – 1995. – Vol. 34. – №. 14. – Pp. 2469-2475.

63. Хонина С. Н., Карпеев С. В. Генерация поляризационно неоднородных лазерных пучков высокого порядка на основе применения ДОЭ //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №. 4. – С. 29-38.

64. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения //Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1962. – Т. 144. – №. 6. – С. 1275-1278

65. Быковский Ю. А., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Объемные дифракционные решетки с наклонными слоями в тонкопленочных

оптических волноводах //Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5. – №. 12. – С. 2628-2630.

66. Новиков И. А. Многофункциональный голографический оптический клиновидный элемент и его некоторые применения //Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – №. 6. – С. 41-52.

67. Зубко А. Е. и др. О применении чирпированной брэгговской решетки в качестве зеркала резонатора пикосекундного Nd: YAG-лазера //Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №. 2. – С. 147-149.

68. Корольков В. П. и др. Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG:Nd3+ //Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – №. 2. – С. 117-121.

69. Clark P. P., Londono C. Production of kinoforms by single point diamond machining //Optics News. – 1989. – Vol. 15. – №. 12. – Pp. 39-40.

70. Saastamoinen T. et al. Fabrication of hybrid optical line generator by direct machining //Optics express. – 2018. – Vol. 26. – №. 3. – Pp. 2335-2340.

71. Fang F. Z. et al. Manufacturing and measurement of freeform optics //CIRP Annals. – 2013. – Vol. 62. – №. 2. – Pp. 823-846.

72. d'Auria L. et al. Photolithographic fabrication of thin film lenses //Optics communications. – 1972. – Vol. 5. – №. 4. – Pp. 232-235.

73. Бобров С. Т. и др. Изготовление голографических оптических элементов методами фотолитографии и ионного травления //Оптическая голография и ее применение в промышленности. – 1976. – С. 31-32.

74. Swanson G. J. Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements. – Massachusetts inst of tech lexington lincoln lab, 1989. – №. TR-854.

75. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка //Автометрия. – 1985. – Т. 6. – С. 38-42.

76. Спектр Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов //Автометрия. – 1985. – №. 6. – С. 34.

77. Полещук А. Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий //Автометрия. – 1991. – №. 6. – С. 66-76.
78. Popovic Z. D., Sprague R. A., Connell G. A. N. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays //Applied optics. – 1988. – Vol. 27. – №. 7. – Pp. 1281-1284.
79. Daly D. et al. The manufacture of microlenses by melting photoresist //Measurement Science and Technology. – 1990. – Vol. 1. – №. 8. – Pp. 759-766.
80. O'Neill F. T., Sheridan J. T. Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments //Optik. – 2002. – Vol. 113. – №. 9. – Pp. 391-404.
81. Urey H., Powell K. D. Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays //Applied optics. – 2005. – Vol. 44. – №. 23. – Pp. 4930-4936.
82. Lin C. P., Yang H., Chao C. K. Hexagonal microlens array modeling and fabrication using a thermal reflow process //Journal of micromechanics and microengineering. – 2003. – Vol. 13. – №. 5. – Pp. 775-781.
83. Yang H. et al. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process //Journal of micromechanics and microengineering. – 2004. – Vol. 14. – №. 8. – Pp. 1197-1204.
84. Денисюк Ю. Н. Принципы голографии //Л.: ГОИ.-1978.–125С. – 1979.
85. Гинзбург В. М., Степанова Б. М. Голография. Методы и аппаратура //под ред. ВМ Гинзбург и БМ Степанова.-М.: Сов. Радио.-1974.-155 с. – 1974.
86. Ersoy O. Construction of point images with the scanning electron microscope: A simple algorithm //Optik. – 1976. – Vol. 46. – №. 1. – Pp. 61-66.
87. Fujita T., Nishihara H., Koyama J. Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography //Optics letters. – 1981. – Vol. 6. – №. 12. – Pp. 613-615.
88. Коронкевич В. П. Изготовление киноформных оптических элементов в халькогенидных тонких пленках //Автометрия. – 1976. – №. 5. – С. 3-9.
89. Ведерников В. М. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов //Тезисы докладов Всес. конф. «Автоматизация

научных исследований на основе применения ЭВМ». – 1979. – ИАиЭ СО АН СССР.

90. Полещук А. Г. и др. Киноформы. Оптическая система для синтеза элементов //Новосибирск. – 1979. – Препринт 99. – ИАиЭ СО АН СССР.
91. Gale M. T., Knop K. The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing //Industrial Applications of Laser Technology. – International Society for Optics and Photonics, 1983. – Vol. 398. – Pp. 347-353.
92. Gale M. T. et al. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists //Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33. – №. 11. – Pp. 3556-3566.
93. Волков А. В., Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю. Формирование микрорельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников //Компьютерная оптика. – 2002. – №. 24. – С. 74-77.
94. Абрамский А. Ю. и др. Разработка химико-гальванических процессов для литографического производства трёхмерных микроструктур //Гальванотехника и обработка поверхности. – 2010. . – Т. 18. – №. 2. – С. 11-18.
95. Gale M. T. Replication technology for diffractive optical elements //Diffractive and Holographic Device Technologies and Applications IV. – International Society for Optics and Photonics, 1997. – Vol. 3010. – Pp. 111-124.
96. Коронкевич В. П. и др. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома //Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12. – №. 4. – С. 755-761.
97. Вейко В. П. и др. Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур //Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36. – №. 4. – С. 562-571.
98. Poleshchuk A. G. et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure //Applied Optics. – 1999. – Vol. 38. – №. 8. – Pp. 1295-1301.

99. Полещук А. Г. и др. Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур //Автометрия. – 2010. – Т. 46. – №. 2. – С. 86-96.

100. Veiko V. et al. Picosecond laser registration of interference pattern by oxidation of thin Cr films //Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 404. – Pp. 63-66.

101. Camacho-López S. et al. Polarization-dependent single-beam laser-induced grating-like effects on titanium films //Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 255. – №. 5. – Pp. 3028-3032.

102. Öktem B. et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses //Nature photonics. – 2013. – Vol. 7. – №. 11. – Pp. 897-901.

103. Dostovalov A. V., Korolkov V. P., Babin S. A. Formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti films by a femtosecond IR Gaussian beam: regimes, limiting factors, and optical properties //Applied Physics B. – 2017. – Vol. 123. – №. 1. – P. 30.

104. Dostovalov A. V. et al. Study of the formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Cr, Ti, Ni and NiCr films under femtosecond irradiation //Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – №. 7. – Pp. 631-637.

105. Gnilitskyi I. et al. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: Physical origin of regularity //Scientific reports. – 2017. – Vol. 7. – №. 1. – P. 8485.

106. Dostovalov A. V. et al. Oxide composition and period variation of thermochemical LIPSS on chromium films with different thickness //Optics express. – 2018. – Vol. 26. – №. 6. – Pp. 7712-7723.

107. Dostovalov A. V., Korolkov V. P., Babin S. A. Simultaneous formation of ablative and thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation //Laser Physics Letters. – 2015. – Vol. 12. – №. 3. – P. 036101.

108. Dostovalov A. V. et al. Optimal regimes of thermochemical LIPPs formation on surfaces of different metals //2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). – IEEE, 2016. – Pp. 4932-4936.

109. Dostovalov A. V. et al. Influence of femtosecond laser pulse repetition rate on thermochemical laser-induced periodic surface structures formation by focused astigmatic Gaussian beam //Laser Physics Letters. – 2019. – Vol. 16. – №. 2. – P. 026003.

110. Dostovalov A. V. et al. LIPSS on thin metallic films: New insights from multiplicity of laser-excited electromagnetic modes and efficiency of metal oxidation //Applied Surface Science. – 2019. – №. 491. – Pp. 650-658.

111. Korolkov V., Belousov D. Application of nanotechnologies to the problems of diffractive optics //2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – IEEE, 2020. – Pp. 1-8.

112. Hessler T. et al. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements //Applied optics. – 1998. – Vol. 37. – №. 19. – Pp. 4069-4079.

113. Корольков В. П. и др. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол //Автометрия. – 1998. – Т. 27. – №. 6. – С. 27-37.

114. Zhou P., Burge J. H. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms //Applied optics. – 2007. – Vol. 46. – №. 5. – Pp. 657-663.

115. Полещук А. Г. и др. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных и конформальных оптических элементов в процессе изготовления //Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40. – №. 6. – С. 818-829.

116. Korolkov V. P. et al. Freeform corrector for laser with large aperture YAG:ND^{3+} active element //Optical Engineering. – 2014. – Vol. 53. – №. 7. – P. 075105.

117. Yang L. et al. Surface profilometry with a fibre optical confocal scanning microscope //Measurement Science and Technology. – 2000. – Vol. 11. – №. 12. – Pp. 1786-1791.

118. Gale M. T. et al. Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation //Applied optics. – 1993. – Vol. 32. – №. 14. – Pp. 2526-2533.

119. Cu-Nguyen P. H. et al. Tunable hyperchromatic lens system for confocal hyperspectral sensing //Optics express. – 2013. – Vol. 21. – №. 23. – Pp. 27611-27621.

120. Shan M., Tan J. Modeling focusing characteristics of low F-number diffractive optical elements with continuous relief fabricated by laser direct writing //Optics express. – 2007. – Vol. 15. – №. 25. – Pp. 17032-17037.

121. Zahid A. et al. Replication of periodic structure on 2D acrylic lens attained as a diffractive optical element in reflectance domain //Journal of Physics Communications. – 2017. – Vol. 1. – №. 4. – P. 045006.

122. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – 2004.

123. Яминский И. В., Багров Д. В. Основы атомно-силовой микроскопии //М.: НОУДПО "Институт АйТи". – 2011. – 128 с.

124. Бессмельцев В. П. Разработка программных средств контроля качества защитных синтезированных голограмм по данным различных оптических систем измерения //HOLOEXPO: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 80-84.

125. de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography //Advances in Optics and Photonics. – 2015. – Vol. 7. – №. 1. – Pp. 1-65.

126. Symeonidis M. et al. High-resolution interference microscopy of binary phase diffractive optical elements //OSA Continuum. – 2019. – Vol. 2. – №. 9. – Pp. 2496-2510.

127. Волков А. В. Контроль параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием тестовых дифракционных структур //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2001. – №. 12. – С. 179-185.

128. Полещук А. Г. и др. Методы контроля оптических элементов с микрорельефом //Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2016). – 2016. – С. 8-14.

129. Шиманский Р. В. Метод контроля погрешностей изготовления прецизионных синтезированных голограмм на круговых лазерных записывающих системах //Автометрия. – 2019. – Т. 55 – №. 3. – С. 113-119.

130. Быстров Ю. А., Колгин Е. А., Котлецов Б. Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.: Радио и связь. – 1988. – 168 с.

131. Kiryanov V. P., Nikitin V. G., Verkhogliad A. G. Development and research of the scanning method for testing of diffraction optical elements //Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. – International Society for Optics and Photonics, 2002. – Vol. 4900. – Pp. 977-982.

132. Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Черкашин В. В. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции //Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35. – №. 2. – С. 196-202.

133. Cai W. et al. Diffractive optics calibrator: measurement of etching variations for binary computer-generated holograms //Applied optics. – 2014. – Vol. 53. – №. 11. – Pp. 2477-2486.

134. Колючкин В. В. и др. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов //Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – №. 4. – С. 515-520.

135. Kolyuchkin V. V. et al. The device for automated quality inspection and authentication of security holograms //Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – Vol. 10679. – P. 1067912.

136. Wang S. et al. Motionless and fast measurement technique for obtaining the spectral diffraction efficiencies of a grating //Review of Scientific Instruments. – 2018. – Vol. 89. – №. 7. – P. 073102.

137. Волков В. В. и др. Оптические методы измерения размеров топологического рисунка БИС и СБИС //Микроэлектроника. – 1980. – Т. 9. – №. 6. – С. 554-563.

138. Kleinknecht H. P., Meier H. Linewidth measurement on IC masks and wafers by grating test patterns //Applied Optics. – 1980. – Vol. 19. – №. 4. – Pp. 525-533.

139. Волков В. В. и др. Измерение размеров элементов ИС с учётом реального профиля травления по дифракционной картине //Микроэлектроника. – 1984. – Т. 13. – №. 1. – С. 64-73.

140. Никитин А. В. Дифрактометрический метод контроля фотошаблонов //Электронная техника. Сер. 3. – 1982. – Вып 1(97) – С. 95-97.

141. Владимиров С. Н. и др. Способ измерения размеров тестовых элементов рисунка фотошаблонов /А. с. №643747 СССР МКИ G01B 11/24 – Опубл. 1979, Бюл. №3

142. Born M., Wolf E. Principles of Optics //6th edition, pergamon press, Oxford. – 1986.

143. Белоусов Д. А. Оптико-электронный сканер дифракционной эффективности //19 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ – 19. матер.конф. – 2013 – С. 434-435.

144. Белоусов Д. А. Цифровой сканер распределения дифракционной эффективности синтезированных голограмм //Студент и научно-технический прогресс. Инструментальные методы и техника экспериментальной физики: материалы 51 междунар. науч. студ. конф. – 2013 – С. 9.

145. Белоусов Д. А. Оптико-электронный дефектоскоп дифракционных оптических элементов //Сборник докладов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии». – 2014. – Т. 1. – С. 69-70.

146. Белоусов Д. А. Прибор для измерения дифракционной эффективности в широком динамическом диапазоне //Материалы всероссийской научной

конференции молодых учёных «Наука технологии инновации». – 2014. – Ч. 1. – С. 15-19.

147. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой //Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – №. 5. – С. 678-686.

148. Белоусов Д. А. и др. Метод регистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне для контроля периодов и угловой ориентации структур дифракционных оптических элементов //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С.35-39.

149. Belousov D. A. et al. Laser beam diffraction inspection of periodic metal/oxide structures with submicron period //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Vol. 11030. – P. 110301C.

150. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Устройство для измерения индикатрисы рассеяния света структурированными поверхностями //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 5. – №. 2. – С.128-131.

151. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне //Автометрия. – 2018. – Т. 54 – №. 2. – С. 35-42.

152. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Контроль параметров микрорельефа синтезированных голограмм методом анализа дифракционной картины //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 5. – №. 2. – С.32-36.

153. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Дифракционный метод контроля поверхностных нано и микроструктур компьютерно-синтезированных голограмм //Голография. Наука и практика. – 2017. – С. 150-153.

154. Belousov D. A. et al. Spectral data of refractive index and extinction coefficient for thin films of titanium group metals used for fabrication of optical microstructures //Data in brief. – 2020. – Vol. 28. – P. 104903.

155. Korolkov V. P. et al. Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Vol. 11030. – P. 110300A.

156. Belousov D. A. et al. Determination of linewidth for metal/oxide gratings by measured diffraction efficiency in several orders //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2020. – Vol. 11551. – P. 115511N.

157. MATLAB. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mathworks.com/products/matlab.html

158. Johnson, K. Grating Diffraction Calculator (GD-Calc). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kjinnovation.com/

159. PCGrate. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.pcgrate.com

160. Швец В. А. и др. Эллипсометрия–прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением //Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – №. 3. – С. 72-84.

161. Windt D. L. et al. Optical constants for thin films of Ti, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Hf, Ta, W, Re, Ir, Os, Pt, and Au from 24 Å to 1216 Å //Applied optics. – 1988. – Vol. 27. – №. 2. – Pp. 246-278.

162. Гафний (Hf). Оптические константы. Refractiveindex.info. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Hf&page=Windt

163. Sarkar S. et al. Hybridized guided-mode resonances via colloidal plasmonic self-assembled grating //ACS applied materials & interfaces. – 2019. – Vol. 11. – №. 14. – Pp. 13752-13760.

164. Диоксид титана (TiO_2). Оптические константы. Refractiveindex.info. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=TiO2&page=Sarkar

165. Malitson I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica //Josa. – 1965. – Vol. 55. – №. 10. – P. 1205-1209.

166. Плавленый кварц. Оптические константы. Refractiveindex.info. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson
167. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – 1976.
168. Насыров Р. К. и др. Влияние ошибок изготовления ДОЭ на распределение интенсивности света в задачах мультипликации и гомогенизации пучков //HOLOEXPO2019: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана. – 2019. – С.211-215.
169. Белоусов Д. А., Корольков В. П. Контроль дифракционной эффективности в отражённом свете дифракционных структур рассчитанных на пропускание // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 1. – С. 151-155.
170. Belousov D. A., Korolkov V. P., Nasyrov R. K. Optimization of test gratings and their measurement at manufacturing of diffractive optics and conformal correctors //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – Vol. 10818. – P. 1081814.
171. Korolkov V. P. et al. Multi-channel scanning measuring system for testing of diffractive structures and thin transparent films //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Vol. 11030. – P. 110301E.
172. Белоусов Д. А., Корольков В. П., Насыров Р. К. Формирование и характеризация тестовых синусоидальных решёток для производственного контроля конформальных элементов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 1. – С. 129-133.
173. Белоусов Д. А., Корольков В. П., Насыров Р. К. Профилометрическая и дифрактометрическая характеризация синусоидальных тестовых решёток при производстве конформальных и дифракционных оптических элементов //HOLOEXPO: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 215-219.

174. Ripoll O., Kettunen V., Herzig H. P. Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications //Optical Engineering. – 2004. – Vol. 43. – №. 11. – Pp. 2549-2549.
175. Рефрактометр ИРФ-22. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mmt.zp.ua/userfiles/files/instruction/refraktometr_irf_22.pdf
176. Корольков В. П., Конченко А. С. Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решёток //Автометрия. – 2012. – Т. 48. – №. 2. – С. 119-127.
177. Korolkov V. P. et al. Etch depth mapping of phase binary computer-generated holograms by means of specular spectroscopic scatterometry //Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52. – №. 9. – P. 091722.
178. Корольков В. П., Остапенко С. В. Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа //Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – №. 7. – С. 34-41.
179. Интерферометр Физо «IntelliumZ100». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sigatec.free.fr/download/intelliumZ100%20Sigatec.pdf
180. Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers //Journal of Applied Physics. – 1965. – Vol. 36. – №. 11. – Pp. 3688-3689.
181. Hwang T. Y., Guo C. Angular effects of nanostructure-covered femtosecond laser induced periodic surface structures on metals //Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108. – №. 7. – P. 073523.
182. Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium nitride coatings for tribological applications //Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 418. – Pp. 572-579.
183. Bonse J., Krüger J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon //Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108. – №. 3. – P. 034903.
184. Liu W. et al. Manipulation of LIPSS orientation on silicon surfaces using orthogonally polarized femtosecond laser double-pulse trains //Optics express. – 2019. – Vol. 27. – №. 7. – Pp. 9782-9793.

185. Schwarz S. et al. Surface Plasmon Polariton Triggered Generation of 1D-Low Spatial Frequency LIPSS on Fused Silica //Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8. – №. 9. –P. 1624.

186. Liang F., Vallée R., Leang Chin S. Pulse fluence dependent nanograting inscription on the surface of fused silica //Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100. – №. 25. – P. 251105.

187. Boinovich L. B. et al. Femtosecond laser treatment for the design of electro-insulating superhydrophobic coatings with enhanced wear resistance on glass //ACS applied materials & interfaces. – 2014. – Vol. 6. – №. 3. – Pp. 2080-2085.

188. Florian C. et al. Controlling the wettability of steel surfaces processed with femtosecond laser pulses //ACS applied materials & interfaces. – 2018. – Vol. 10. – №. 42. – Pp. 36564-36571.

189. Ramsden J. J. et al. The design and manufacture of biomedical surfaces //CIRP annals. – 2007. – Vol. 56. – №. 2. – Pp. 687-711.

190. Vorobyev A. Y., Guo C. Femtosecond laser structuring of titanium implants //Applied surface science. – 2007. – Vol. 253. – №. 17. – Pp. 7272-7280.

191. Nuutinen T. et al. Control of cultured human cells with femtosecond laser ablated patterns on steel and plastic surfaces //Biomedical microdevices. – 2013. – Vol. 15. – №. 2. – Pp. 279-288.

192. Vorobyev A. Y., Guo C. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals //Applied Physics A. – 2007. – Vol. 86. – №. 3. – Pp. 321-324.

193. Cerkauskaite A. et al. Form-birefringence in ITO thin films engineered by ultrafast laser nanostructuring //ACS Photonics. – 2017. – Vol. 4. – №. 11. – Pp. 2944-2951.

194. Dusser B. et al. Controlled nanostructrures formation by ultra fast laser pulses for color marking //Optics express. – 2010. – Vol. 18. – №. 3. – Pp. 2913-2924.

195. Jwad T. et al. Laser induced ripples' gratings with angular periodicity for fabrication of diffraction holograms //Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 453. – Pp. 449-456.

196. ALPHANOV. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.alphanov.com/en/news/femtosecond-lasers-opportunity-anti-counterfeiting-industry

197. de La Cruz A. R. et al. High speed inscription of uniform, large-area laser-induced periodic surface structures in Cr films using a high repetition rate fs laser //Optics letters. – 2014. – Vol. 39. – №. 8. – Pp. 2491-2494.

198. Liu P. et al. Direct writing anisotropy on crystalline silicon surface by linearly polarized femtosecond laser //Optics letters. – 2013. – Vol. 38. – №. 11. – Pp. 1969-1971.

199. Liu P. et al. Self-organizing microstructures orientation control in femtosecond laser patterning on silicon surface //Optics express. – 2014. – Vol. 22. – №. 14. – Pp. 16669-16675.

200. Rebollar E. et al. Assessment and formation mechanism of laser-induced periodic surface structures on polymer spin-coated films in real and reciprocal space //Langmuir. – 2011. – Vol. 27. – №. 9. – Pp. 5596-5606.

201. Gregorčič P. et al. Formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on tool steel by multiple picosecond laser pulses of different polarizations //Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 387. – Pp. 698-706.

202. Le Harzic R. et al. Large-area, uniform, high-spatial-frequency ripples generated on silicon using a nanojoule-femtosecond laser at high repetition rate //Optics letters. – 2011. – Vol. 36. – №. 2. – Pp. 229-231.

203. Giannuzzi G. et al. Large area laser-induced periodic surface structures on steel by bursts of femtosecond pulses with picosecond delays //Optics and Lasers in Engineering. – 2019. – Vol. 114. – Pp. 15-21.

204. Shen M. et al. High-density regular arrays of nanometer-scale rods formed on silicon surfaces via femtosecond laser irradiation in water //Nano letters. – 2008. – Vol. 8. – №. 7. – Pp. 2087-2091.

205. Hammouti S. et al. Titanium nitride formation by a dual-stage femtosecond laser process //Applied Physics A. – 2018. – Vol. 124. – №. 6. – P. 411.

206. Sipe J. E. et al. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory //Physical Review B. – 1983. – Vol. 27. – №. 2. – P. 1141.

207. Varlamova O. et al. The laser polarization as control parameter in the formation of laser-induced periodic surface structures: Comparison of numerical and experimental results //Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – №. 12. – Pp. 5465-5469.

208. Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures //J. Laser Appl. – 2012. – Vol. 24. – №. 4. – P. 042006.

209. Derrien T. J. Y. et al. Rippled area formed by surface plasmon polaritons upon femtosecond laser double-pulse irradiation of silicon: the role of carrier generation and relaxation processes //Applied Physics A. – 2014. – Vol. 117. – №. 1. – Pp. 77-81.

210. Gurevich E. L. Mechanisms of femtosecond LIPSS formation induced by periodic surface temperature modulation //Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 374. – Pp. 56-60.

211. Shugaev M. V. et al. Mechanism of single-pulse ablative generation of laser-induced periodic surface structures //Physical Review B. – 2017. – Vol. 96. – №. 20. – P. 205429.

212. Groenendijk M., Meijer J. Microstructuring using femtosecond pulsed laser ablation //International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. – LIA, 2005. – Vol. 2005. – №. 1. – P. M408.

213. Bonse J., Krüger J. Probing the heat affected zone by chemical modifications in femtosecond pulse laser ablation of titanium nitride films in air //Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – №. 5. – P. 054902.

214. Bonse J. et al. Laser-induced periodic surface structures—a scientific evergreen //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2016. – Vol. 23. – №. 3. – Pp. 109-123.

215. Müller F., Kunz C., Gräf S. Bio-inspired functional surfaces based on laser-induced periodic surface structures //Materials. – 2016. – Vol. 9. – №. 6. – P. 476.

216. Bonse J. et al. Applications of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) // Laser-based Micro- and Nanoprocessing XI. – Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10092. – P. 100920N.
217. Белоусов Д. А. и др. Метод обработки микроизображений для анализа структур ТЛИППС //Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – №. 6. – С. 936-945.
218. Достовалов, А. В. и др. Влияние скорости сканирования на формирование ТЛИПСС радиально-симметричным и эллиптическим гауссовым фемтосекундным лазерным пучком //Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5. – № 3. – С. 157-172.
219. Достовалов А. В. и др. Фемтосекундная лазерная запись астигматическим гауссовым пучком периодических структур на плёнке хрома // Материалы Восьмого Российского семинара по волоконным лазерам. – 2018. – С. 198-199.
220. Корольков В. П. и др. Методы характеризации метал/оксидных решеток, формируемых методами прямой лазерной записи //HOLOEXPO: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2018. – С. 191-196.
221. Белоусов Д. А. и др. Анализ упорядоченности и дефектности структур ТЛИППС сформированных на тонких плёнках Hf астигматическим гауссовым пучком //Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). – 2020. – С. 372-377.
222. Белоусов Д. А. и др. Высокопроизводительная запись ТЛИППС на тонких плёнках Hf астигматическим гауссовым пучком фемтосекундного лазера //Материалы девятого Международного семинара по волоконным лазерам. – 2020. – С. 150-151.
223. Korolkov V. P. et al. Perspectives of laser local oxidation nanolithography for fabrication of subwavelength and high-na diffractive optical elements

//International Symposium "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-2019). Book of Abstracts. – 2019. – P. 87.

224. Dostovalov A. V. et al. Fast formation of hybrid periodic surface structures on Hf thin-film by focused femtosecond laser beam //Proceedings of SPIE. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Vol. 11183. – P. 111830U.

225. OrientationJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/

226. ImageJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://imagej.net/ImageJ

227. Schindelin J. et al. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis //Molecular reproduction and development. – 2015. – Vol. 82. – №. 7-8. – Pp. 518-529.

228. Rezakhaniha R. et al. Experimental investigation of collagen waviness and orientation in the arterial adventitia using confocal laser scanning microscopy //Biomechanics and modeling in mechanobiology. – 2012. – Vol. 11. – №. 3-4. – Pp. 461-473.

229. Püspöki Z. et al. Transforms and operators for directional bioimage analysis: a survey //Focus on Bio-Image Informatics. – Springer, Cham, 2016. – Pp. 69-93.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2634372

Устройство для контроля углового положения дифракционных порядков дифракционных элементов (варианты)

Патентообладатель: ***ФАНО России Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) (RU)***

Авторы: ***Полещук Александр Григорьевич (RU), Белоусов Дмитрий Александрович (RU)***

Заявка № **2016121799**

Приоритет изобретения **01 июня 2016 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **26 октября 2017 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **01 июня 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)

А К Т

16.12.2020 № 500-20/26144

Снежинск

О внедрении результатов диссертационной работы Белоусова Д. А. «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток»

Разработанный Белоусовым Д. А. метод контроля рельефно-фазовых оптических элементов при их изготовлении на всех этапах растровой полутоновой технологии, основанный на формировании и анализе тестовых структур с синусоидальной формой профиля, был применён при изготовлении широкоапертурных конформальных оптических корректоров. Они предназначены для компенсации искажений волнового фронта излучения мощных твердотельных лазеров, которые вызваны неоднородностями активных элементов $YAG:Nd^{3+}$. Данные корректоры были разработаны и изготовлены в рамках договоров на выполнение научно-исследовательских работ № 12/12/2016 и № 17/01-18 между ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» и ИАиЭ СО РАН.

Использование разработанного метода контроля позволило оптимизировать процесс изготовления широкоапертурных конформальных оптических корректоров и повысить их качество.

Директор М.Е. Железнов

ОГРН 1027401350932 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» ИНН 7423000572 РФЯЦ-ВНИИТФ РОСАТОМ 1 г. Снежинск

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Выписка из протокола заседания бюро Объединённого учёного Совета по физическим наукам СО РАН

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(СО РАН)

**Объединенный ученый совет
по физическим наукам**

630090, Новосибирск 90,
проспект Академика Лаврентьева, 17
Телефон: (383) 330-05-63
Телефакс: (383) 330-71-63 / 330-05-63
E-mail: shalagin@iae.nsk.su;
a.kharlamov@sb-ras.ru;

ВЫПИСКА
из протокола заседания бюро Объединенного ученого Совета
по физическим наукам СО РАН
от 12 декабря 2019 г.
Состав Бюро Совета: 15. Присутствовало: 10

СЛУШАЛИ: О важнейших результатах полученных учеными Сибирского отделения РАН в 2019 году.
ПОСТАНОВИЛИ: По результатам тайного голосования признать Важнейшими результатами 2019 г и рекомендовать в доклад Президенту РФ и Правительству РФ о состоянии фундаментальных наук в Российской Федерации и за рубежом и важнейших научных достижениях, полученных российскими учеными в 2019 году следующие результаты готовые к практическому применению:

1. Лазерная установка для автоматизированного бесконтактного 3D контроля прямолинейности канала ствола («Струна») (КТИ НП СО РАН), авторы: П. С. Завьялов, Л.В. Финогенов, Д.В. Скоков, Д.Р. Хакимов, А.А. Гущина, А.В Ермоленко
2. Миниатюрный квантовый стандарт частоты (ИЛФ СО РАН) авторы: М.Н. Скворцов, С.М. Игнатович, В.И. Вишняков, Н.Л. Квашнин, В.А. Васильев, И.С. Месензова, А.О. Макаров, Д.В. Бражников, В.И. Денисов, А.В. Тайченачев, С.Н. Багаев
3. Высокопроизводительная запись термохимических лазерно-индуцированных периодических структур на пленках металлов (ИАиЭ СО РАН), авторы: Достовалов А.В., Корольков В.П., Бабин С.А., Терентьев В.С., Окотруб К.А., Бронников К.А., Белоусов Д.А.
4. Широкополосный магнитометр слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой (КНЦ СО РАН, ИФ СО РАН), авторы: А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, Н.М. Боев, А.В. Изотов, А.В. Бурмитских

Председатель ОУС
по физическим наукам академик РАН Шалагин А.М.

Секретарь ОУС
по физическим наукам к.ф.-м.н. Харламов А.Г.