

Глава 2 Тезисы и обзоры.

В начале этой главы хочется показать некоторые фотографии, сделанные российским учёным практиком, который много лет занимается исследованием различного вида биологических объектов. Это Анатолий Михальцов, который живёт в городе Омске. Но главное, он активно занимается обучением детей различного возраста - основам световой микроскопии. Да что там “основам”, очень даже научной микроскопией он занимается и передаёт свой опыт своим ученикам. Некоторые ученики участвуют в профессиональных конкурсах и конференциях, готовят свои работы как настоящие научные исследования, становятся номинантами различных научных мероприятий. А ещё Анатолий умеет делать интересные фотографии объектов; в этой области он значительно преуспел.

В конце концов, задачей разработки, создания микроскопа является именно получение фотографий реальных объектов, исследуемых под микроскопом. Чем выше качество таких фотографий, тем более удачным можно считать проект по созданию микроскопа, на котором эти фотографии выполнены. Конечно, можно и нужно смотреть в микроскоп глазами, но при этом резюме об исследуемом объекте будет отражением субъективного мнения конкретного исследователя. Фотография объекта, наоборот, даёт возможность объективной оценки исследуемого объекта – в результате дискуссии многих исследователей. Конечно, фотографии реальных объектов должны давать возможность решать “исследовательские” задачи; но многие из фотографий могут представлять также художественную ценность, поскольку выглядят очень красиво. Фигуры 2.1-2.7 показывают некоторые такие фотографии.....

2.1 Групповое проектирование оптических приборов.

Концепция так называемого группового проектирования оптических приборов на протяжении нескольких десятилетий была основным “аргументом” одного из интересных инженеров - *Рагузина Р.М.*, который реализовал эту концепцию во многих российских световых микроскопах. Было большой честью работать вместе с таким выдающимся инженером, было много споров, дискуссий и несколько совместных проектов. Здесь можно попытаться обобщить основные положения группового проектирования, которые этот выдающийся инженер последовательно применял на практике.

При групповом проектировании наибольшее методическое значение имеют следующие положения системного подхода:

- Разделение и соединение составных частей в целое и изучение связей между ними.
- Выполнение требований целостности, инвариантности, иерархичности, функциональности, структурности, развития.....

.....дополнительные аналитико-проектные этапы. Кроме того, благодаря повышению серийности используются более эффективные технология и метрология.

Однако, при групповом проектировании необходима соответствующая организация труда разработчиков в соответствии с сущностью группового проектирования.

Так на начальных этапах при составлении структурно-функциональных схем, выявлении основных базовых решений, касающихся конструкции оптических схем и других составных частей, следует рассматривать как можно больше вариантов. При необходимости предварительно проводят научно-исследовательскую работу. Однако после принятия решения следует строго соблюдать условия целостности, иерархичности, инвариантности, соблюдения базовых параметров и других требований, вытекающих из теории группового проектирования.

К числу недостатков группового проектирования следует отнести:

1. Большая инерционность группы оптических приборов, чем отдельного прибора.
2. Дополнительные затраты времени на подготовительный анализ на начальном этапе и значительное повышение сложности проектирования, вследствие резкого увеличения числа связей.
3. Сложность вопросов, связанных с квантованием параметрических рядов различных составных частей (узлов, деталей, размеров и т.п.) и определением оптимального типа прибора.

При рациональной организации группового проектирования эти трудности могут быть значительно снижены. Для этого процесс разработки должен иметь непрерывный характер, то есть через промежутки 10-15 лет (соответствующие интервалам времени смены поколений приборов) должна производиться замена ранее разработанного поколения оптических приборов на новое. При соблюдении такой последовательности происходит замена устаревших приборов улучшенными. При этом часть полученных ранее результатов либо используется полностью, либо требует лишь частичной доработки.

2.3 Краткая классификация микроскопических объектов.

Все объекты исследований в области микроскопии можно отнести к двум группам - прозрачным и непрозрачным (см. Фигуру 2.8). Прозрачные объекты включают биологические объекты (бактерии, клеточные структуры), некоторые минералы и кристаллы, эмульсионные препараты; непрозрачным - руды, угли, минералы, металлы.

Объекты, входящие в каждую из этих групп, можно разделить на амплитудные и фазовые. Амплитудные объекты изменяют амплитуду света, прошедшего или отраженного от них, и поэтому могут быть видны через микроскоп без каких-либо дополнительных оптических устройств. Фазовые препараты не изменяют

амплитуду света, проходящего через них или отраженного от них, а только изменяют его фазу, к которой глаз не чувствителен, поэтому такие объекты не видны в обычном микроскопе, и для их наблюдения требуется использование специальных устройств, таких как фазовый, интерференционный контраст и др.

..... поверхности линз фазовых контрастирующих колец. Опытным путем установлено, что величина разброса выходных зрачков объективов не должна превышать 3-5 мм, в этом случае, например, механизм фокусировки системы линз Бертрана не требует высоких точностей исполнения, а габариты оптики оптимальны. Заметим, что для объективов малых увеличений выполнение требования унификации положения зрачков с сильными объективами ведет к значительному усложнению оптических конструкций. Решающую роль в этом случае играют технико-экономические характеристики.

Следует также рассмотреть вопрос о рациональном расположении промежуточной плоскости изображения на микроскопе и, в связи с этим, об определении оптимального значения высоты окуляра. В настоящее время принято, что промежуточная плоскость изображения расположена на 13 мм ниже опорной плоскости окуляра. Сегодня некоторые фирмы при переходе к выпуску микроскопов с увеличенными полями зрения уменьшили этот размер до 10 мм без изменения посадочных диаметров окуляров. Появляющаяся при этом расфокусировка на микроскопе устраняется перефокусировкой объективов.

Это новшество, однако, не решает проблему всесторонне. Есть мнение, что целесообразным решением было бы вынесение промежуточной плоскости изображения на срез окулярных труб, определяющих опорный торец окуляров, или, что еще лучше, вынос выше на 10-15 мм. Подобное решение обеспечивает не только решение проблемы увеличения поля зрения, но и позволяет эффективно работать с промежуточным изображением, например, удобно устанавливать в поле зрения различные шкалы, сетки, указатели и т.п.

Таким образом, современное развитие микроскопии привело к необходимости пересмотра или дополнения отдельных норм и стандартов. Большинство из приведенных выше выводов основано на практике разработки современных микроскопов.

2.7 Оптическая система современного микроскопа.

Система современного микроскопа строится по принципу агрегатного проектирования, когда из имеющихся в наличии оптико-механических элементов, конструктор-разработчик, а также потребитель могут собирать прибор, функционально наиболее полно отвечающий заданным свойствам [2]. Система может перестраиваться при использовании различных наборов стандартных оптико-механических узлов, реализуя широкую гамму исследований в проходящем свете - методами прямого, косого освещения, контрастирования, коноскопирования и др. Возможность применения микрофотонасадок и видеопроективов для ПЗС матриц позволяет осуществлять документирование проводимых исследований.

С целью осуществления возможности применения во многих модификациях приборов оптические элементы имеют независимую пространственно-абберационную коррекцию, что гарантирует их полную совместимость. В результате этого при использовании исследователем различных методик микроскопирования результирующее качество оптического изображения.....

.....оптических элементов значительны. Однако, главное препятствие в получении качественного освещения - наличие некоторой зоны пересечения (и воздействия друг на друга) световых трубок близкой интенсивности, но различного функционального назначения.

Фигуры 2.9b and 2.9c показывают трёхкомпонентную и многокомпонентную осветительные системы. Они реализуют новый подход к организации световых потоков в осветительных системах микроскопов. Используется модифицированный способ "по-Кёлеру" при телецентрическом ходе главных лучей, что позволяет в полной мере использовать преимущества частично коллимированного света для повышения локальной контрастности освещаемых элементов структур. Источник света располагается в передней фокальной плоскости коллектора, передняя фокальная плоскость каждого последующего компонента располагается в задней фокальной плоскости предыдущего, а освещаемый объект - в задней фокальной плоскости конденсора [4]. Такая компоновка даёт очевидные преимущества в проведении юстировочных операций, позволяет достигнуть ахроматической абберационной коррекции осветительных пучков. Но главное, что при этом соблюдается принцип независимой пространственно-абберационной коррекции отдельных компонентов. Это означает, что коллекторные, конденсорные, а также сопрягающие масштабирующие системы осветителя могут заменяться на другие, функционально аналогичные, без ущерба по отношению к результирующему качеству освещения исследуемого объекта. Именно таким образом предусмотрены смена, например, системы фонаря с коллектором (при использовании, например, более мощного источника света) и конденсорной системы (возможность использования различных методик исследований на микроскопе - фазового контраста, косого освещения и т.п.). Оптические системы осветителей современных микроскопов предусматривают наличие промежуточных плоскостей изображения, что может быть использовано для достижения дополнительных эффектов освещения. Описанный способ построения осветительных систем гарантирует стабильность, высокий контраст и хорошую равномерность освещения. Применение специальных технологий при производстве оптических деталей, а также использование несферических преломляющих поверхностей позволяет получить контрастное и равномерное

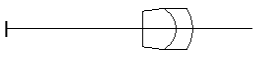
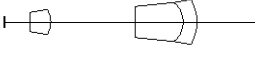

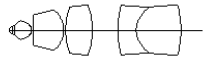
освещение исследуемых структур на большом предметном поле, при высоких значениях числовой апертуры осветительных пучков.

2.7.2 Система визуального наблюдения.

Она определяет основные потребительские свойства микроскопа как наблюдательного прибора с дифракционно ограниченным качеством изображения. Состоит из увеличительной части, строящей конгруэнтное изображение объекта, и наблюдательной, работающей непосредственно с глазом исследователя. Особый интерес представляет вопрос о принципах построения хода лучей и формирования изображения в увеличительной части. В работе [5] предложены рациональные габаритные схемы микроскопов. На Фигуре 2.10 схематично представлено отличие конечной длины тубуса и бесконечной.

В микроскопах конечной длины тубуса параметры h , S' , и L жёстко стандартизованы и зависят друг от друга. В реально изготовленных.....

Таблица 2.4 Принципиальные оптические схемы простейших объективов микроскопа.

Технические параметры		Оптическая схема	Описание оптического дизайна
Увеличение x числовая апертура	Рабочее расстояние, мм		
5x0.10	24.7		Один компонент, выполненный в виде склейки из положительной и отрицательной линз.
10x0.25	3.80		Первый компонент выполнен в виде положительной линзы с плоской первой поверхностью или вогнутой, обращённой вогнутостью к объекту; второй компонент выполнен в виде склейки из положительной и отрицательной линз.
20x0.40	0.58		
40x0.65	0.65		Первый компонент выполнен в виде положительной линзы с плоской первой поверхностью или вогнутой, обращённой вогнутостью к объекту; второй компонент – одиночная положительная линза; третий компонент выполнен в виде склейки из положительной и отрицательной линз.
25x1.0 м.и.	1.0		Первый компонент выполнен в виде положительной линзы с плоской первой поверхностью или вогнутой, обращённой вогнутостью к объекту; второй и третий компоненты – одиночные положительные линзы; четвёртый компонент выполнен в виде склейки из отрицательной и положительной линз.
32x0.9 в.и.	0.85		
50x1.0 м.и.	0.32		
63x0.85	0.15		
63x1.15 в.и.	0.20		
100x1.20 в.и.	0.12		
100x1.25 м.и.	0.11		
100x1.30 м.и.	0.12		

.....выполненный из тяжёлого флинта и обращённый вогнутостью к пространству изображений.

При этом появляется возможность также частичного, либо полного (в зависимости от количества N положительных одиночных линз во фронтальной части) исправления кривизны изображения. Для оптимального распределения абберационной нагрузки, а также для получения более технологичных конструкций один из одиночных положительных компонентов возможно расположить между склеенным и отрицательным мениском [12]. На основе описанного принципа может быть проведён расчет комплекта микрообъективов – стигмахроматов и планахроматов, выпускаемых в настоящее время серийно. Основные технические характеристики и принципиальные оптические схемы этих микрообъективов представлены в Таблице 2.5.

2.10.4 Простейшие микрообъективы с коррекцией для двух длин волн либо спектральных диапазонов (типа дуалхромат).

Для микроскопических задач, связанных с фокусировкой лазерного излучения в спектральной области вне видимого диапазона, требуются микрообъективы, которые очень хорошо скорректированы в отношении сферической аберрации для максимальных апертур. Особенностью расчёта таких объективов является то, что сферическая аберрация.....

Таблица 2.13 Описания оптических конструкций некоторых типов конденсоров. (Продолжение)

№ п/п	Оптическая схема	Характеристика	Описание оптической конструкции
5		Конденсор апланато-ахроматический, A=1.44 масляной иммерсии	Первый компонент – положительная линза, склеенная из положительной плоско-выпуклой и отрицательной линз; второй компонент – положительный мениск, обращенный вогнутостью к плоскости предмета; третий компонент – отрицательный мениск, обращенный выпуклостью к плоскости предмета, выполнен склеенным из положительной и отрицательной линз; четвертый компонент – положительная линза, как частный случай поверхность, обращенная к ПД осветителя, выполнена несферической, например, параболической.

В Таблице 2.13 приведены описания оптических конструкций некоторых типов конденсоров. Рассмотренный подход позволяет унифицировать и стандартизировать общие параметры конденсоров и систем освещения микроскопа, а также выполнить свободную комплектацию микроскопов - конденсорами различных типов и конструкций.

2.12 Условия получения равномерного светораспределения, создаваемого осветительными устройствами

Хочется сказать несколько добрых слов о профессоре *Натаровском С.Н.*, с которым было приятно работать вместе несколько лет. Он интересен тем, что последовательно адаптировал лучшие результаты российских ученых и исследователей - к теории и практике световой микроскопии. Сам он также является выдающимся теоретиком и практиком микроскопии; он внес большой вклад в дело применения новых технологий в микроскопии, а его теоретические исследования часто используются в практике современной науки о микроскопах. Реализованы некоторые совместные проекты.

Задачей любого осветительного устройства является обеспечение высоко качественного освещения объекта. Под качественными характеристиками будем понимать достаточную для регистрации изображения объекта освещенность, светораспределение, приемлемое для удовлетворительного восприятия изображения (чаще всего равномерное), и ряд других характеристик, о которых скажем ниже. Г.Г. Слюсарев утверждал [14], что центрированная оптическая система может обеспечить равномерное светораспределение в какой-либо из плоскостей, если в каком-либо сечении световых пучков, идущих через эту систему, имеется равномерное светораспределение. Если такового нет, то центрированная система равномерное светораспределение не создаст, но, тем не менее, такие системы составляют основную часть различного рода осветительных устройств.

Общеизвестная формула [7]

$$E \approx \tau \cdot \pi \cdot B \sin^2 \sigma' \cos^4 \omega \quad (2.1)$$

- Меньший, чем у лампы накаливания, световой поток светодиода можно отнести к его недостаткам (временным), но это же позволяет при высоких светотехнических характеристиках устранить нагрев кожуха фонаря.

- Геометрия светящегося тела светодиода, конструкция колпака позволяют получать световой пучок ограниченным в пространстве телесным углом меньшим 4π , что дает возможность реализовать в микроскопе все виды и методы освещения, все виды исследования микрообъекта.

- Использование цветных фильтров позволяет, как и в случае с лампой накаливания, изменять спектральный состав освещающих пучков, в том числе выделять узкие области спектра.
- Спектральные характеристики цветных светодиодов позволяют при одновременном использовании трех или более светодиодов при управлении их интенсивностями получать освещение в белом свете, или в какой-либо иной цветовой гамме, практически во всем цветовом пространстве XYZ.
- Весьма перспективным является использование линеек или матриц светодиодов, что позволяет, активно управляя свечением отдельных светодиодов матрицы, реализовать различные формы освещающих апертур с «мгновенным» переходом от одного типа освещения к другому (от светлого поля к темному полю); также появляется возможность реализации синтезированной апертуры. Последнее позволяет активно влиять на разрешающую способность и, что не менее важно, снизить требования к коррекции аберраций осветительного устройства.
- Одиночные светодиоды можно рекомендовать для использования в качестве источника света в микроскопах массового сегмента
- Матрицы и линейки светодиодов можно рекомендовать для использования в более сложных моделях микроскопов, при этом они могут устанавливаться непосредственно в апертурной диафрагме конденсора.
- Целесообразно рассмотреть возможность использования светодиодных светящихся панелей.....

2.18 Методика расчета конструкций объективов насыпного типа

Инженер, ктн *Крынин Л.И.*, много лет занимающийся проектированием и испытанием фотообъективов, также внес значительный вклад в развитие световой микроскопии. При разработке новых объективов для микроскопов наши многочисленные споры и обсуждения были очень полезны, опыт и рекомендации этого человека оказали значительную помощь в нашей работе. Было приятно работать вместе несколько лет, когда были реализованы некоторые совместные проекты.....

... переднего фокуса объектива. С помощью дополнительной тубусной оптической системы изображение тест-объекта проецируется на приёмник, расположенный строго в плоскости заднего фокуса тубусной системы. В этой установке, в отличие от стенда для контроля компонентов требуется весьма точная фокусировка на тест-объект, поэтому должен быть разработан алгоритм т.н. автофокуса, обеспечивающего несколько итераций при фокусировке. Далее как в стенде контроля компонентов происходит сравнение реального и теоретического изображений либо количественный анализ реального изображения. Если качество изображения не удовлетворительное, в автоматическом режиме (без разборки объектива) с помощью второго “грубого” шагового двигателя производится подвижка назначенных в документации компонентов вдоль и перпендикулярно оси. Затем снова производится фокусирование на тест-объект. Одновременно с процессом сборки по специальному алгоритму осуществляется мониторинг качества изображения как функции обратной связи. При попеременной работе двух шаговых двигателей – сборки объектива можно добиться в течение нескольких минут, причём основные временные затраты такой автоматизированной сборки приходятся на первые итерации фокусирования. Когда качество изображения становится удовлетворительным, компоненты закрепляются, рабочий корпус вставляется в чистовой; в автоматическом режиме выполняется подгонка микрообъектива по высоте.

Автоматизация сборки и контроля объективов для микроскопов в процессе их изготовления является весьма сложной задачей. Нет сомнения, что она будет решена, в том числе, за счёт совершенствования элементной базы изделий микроэлектроники и системотехники, которые в настоящее время, не в полной мере соответствуют критериям качества, задаваемым оптическими системами. Принцип работы основных оптико-механических систем остаётся неизменным – проекция изображения тест-объекта на приёмник для последующего исследования.

2.21 Концепция линии автоматизированной сборки микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов

В связи с темой этого обсуждения хотелось бы немного рассказать о доценте *Цохере К.П.* из Университета Ильменау в Германии. Это довольно веселый и жизнерадостный человек, который в свое время помог нашим специалистам адаптироваться к «западным жизненным ценностям». Конечно, он отличный специалист и знаток техники; именно он предложил концепцию «адаптивного отбора», которая затем была перенесена в оптико-механическую промышленность. Было большим успехом работать вместе несколько лет и реализовывать совместные проекты.

Автоматизация сборки многих оптико-механических и оптико-электронных функциональных устройств и узлов является весьма сложной задачей. Обусловлено это тем, что отклонения характеристик материалов оптических деталей, погрешности их размеров, формы рабочих и.....

.....и из условия гашения получим

$$\gamma_2 + \gamma_1 = \frac{\alpha_c + \alpha_{ob}}{2}.$$

При использовании одной пластинки $\lambda/2$, то, если она будет располагаться до конденсора, для её азимутального угла получим

$$\gamma = \frac{\alpha_c + \alpha_{ob}}{2},$$

а если после объектива, то $\gamma = -\frac{\alpha_c + \alpha_{ob}}{2}$.

Возможен вариант установки пластинки $\lambda/2$ внутри системы, например, между φ_c и $\varphi_{об.}$, тогда для γ будем иметь

$$\gamma = \frac{\alpha_{ob} - \alpha_c}{2}.$$

Этот случай интересен тем, что пластинку $\lambda/2$ можно установить внутри микрообъектива в соответствии с Фигурой 2.106. Обращает на себя внимание сходство фрагмента, включающего пластинку $\lambda/2$ и последнего компонента современных микрообъективов типа ОСХ, с компенсатором по Фигуре 2.107 б. Разворачивая пластинку, можно получить компенсацию для разных условий, например, различных лучей.

В результате можно сделать следующие выводы:

- Разработаны алгоритм и программа, позволяющая рассчитывать угол поворота плоскости колебаний для любого луча, рассчитывать степень гашения в поляризационном микроскопе, афокальные компенсаторы (по С.Иноуэ).
- Расчеты по указанной программе показали нецелесообразность использования афокальных компенсаторов поворота плоскости колебаний, авторами предложено для этой цели использовать полуволновую пластинку, вводимую в состав микрообъектива или конденсора.
- Показано аналитически и проверено численным методом то, что максимальный угол поворота плоскости колебаний соответствует углу между плоскостями колебаний и распространения луча не 45 град., а несколько большему значению.

2.24 Интерферометрический контроль качества линз и объективов

Профессор *Кирилловский В.К.* также один из учителей. Он также внес большой вклад в развитие световой микроскопии, главным образом разработав и внедрив в производство некоторые оригинальные методы тестирования оптических....

.....Изменение оптической разности хода, соответствующее смещению нулевой полосы в прозрачной пленке, можно определить по формуле:

$$\Delta_{tr} = N_{tr} \lambda.$$

Толщина прозрачной пленки:

$$h_{tr} = \frac{N_{tr} \lambda}{2(n-1)} = \frac{c_{tr} \lambda}{2b(n-1)}, \text{ где } n > 1.$$

При измерении на двухлучевом микроинтерферометре МИИ-4 наибольшая толщина пленки ограничивается лишь глубиной резкого изображения, так как в пределах этой глубины прибор обеспечивает удовлетворительный контраст полос. Учитывая, что у непрозрачной пленки полосы локализируются на поверхностях P и E , имеем

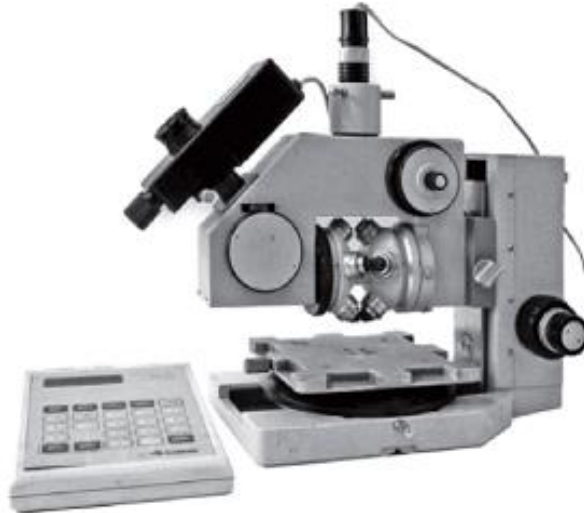
$$h = T = \frac{\lambda}{2A^2}, \text{ где } T - \text{глубина резкого изображения.}$$

У прозрачной пленки системы полос локализируются на плоскостях E и E' . Так как плоскость E' расположена на расстоянии $h(n-1)/n$ над плоскостью E , то в этом случае

$$h_{\max} = \frac{\lambda n}{2A^2(n-1)}.$$

2.26 Микроскоп светового сечения ПСС-3

Этот микроскоп - еще одно интересное устройство, которое позволяет проводить измерения в «микрометрическом диапазоне». По сути, это оригинальный двойной микроскоп, он тоже производится на российской фирме «Ломо» [84]. Техническое решение принципиальной системы микроскопа заслуживает более подробного описания. На Фигуре 2.123 показан общий вид ПСС-3.



Фигура 2.123 Общий вид микроскопа ПСС-3

Микроскоп предназначен для измерения бесконтактным методом параметров шероховатости Rz и Rmax в диапазоне от 0.5 до 400 мкм, а также может быть использован для измерения высот отдельных неровностей и толщин непрозрачных пленок. Измерение и обработка результатов измерения производятся с помощью фотоэлектрического окулярного микрометра со сменными окулярами и оснащенного процессорным блоком с оригинальным программным обеспечением. Прибор применяется в машиностроительной, приборостроительной промышленности, в лабораториях научно-исследовательских институтов и в цеховых условиях. В приборе предусмотрен вывод изображения исследуемого объекта через специальный адаптер на цифровой приемник размером до 1/2". Также исследования объекта и измерения могут выполняться с помощью визуального канала при наблюдении в окуляр.

Основные технические характеристики:

Линейное увеличение прибора от 25x до 640x

Линейное увеличение объективов 2,5x; 4x; 16x, 40x

Линейное увеличение окуляров..... 10x; 12,5x, 16x

Линейное поле зрения окуляров, мм20, 14, 11

Источник света – осветитель светодиодный, мощность 3Вт.

Габаритные размеры микроскопа, мм

– ширина210 mm

– длина..... 420 mm

– высота..... 460 mm

Масса прибора, кг10

В состав микроскопа входят следующие основные части:

- головка с основными оптическими элементами;
- штатив с фокусирующим механизмом;
- предметный столик;
- микрометр (в комплекте);
- осветитель светодиодный с источником вторичного электропитания.

2.26.1 Принцип работы

Принцип работы прибора основан на применении метода светового сечения исследуемой поверхности.

Прибор представляет собой систему из двух микроскопов: микроскопа, проектирующего изображение светящейся щели на шероховатую поверхность (МР), и микроскопа наблюдения (МО).

Сущность метода светового сечения заключается в следующем:

На шероховатую поверхность под углом α к нормали проецируется изображение узкой освещенной щели. Это промежуточное изображение щели принимает форму профиля поверхности и наблюдается с помощью микроскопа, оптическая ось которого составляет угол β с нормалью к поверхности.

$$V_{ob} = \frac{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_{p \max} - \sin \sigma_{p0}} V_{ob \max}.$$

При этом,

$$J = n_p y_p \sin \sigma_p = n_p \frac{y'_p}{V_{ob}} \sin \sigma_p = n_p y'_p \frac{\sin \sigma_{p \max} - \sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}} \frac{\sin \sigma_p}{V_{ob \max}}.$$

При $\sin \sigma_p = \sin \sigma_{p \max}$,

$$J = J_0 = n_p y'_p \frac{\sin \sigma_{p \max}}{V_{ob \max}}.$$

Пусть $\Delta J = J - J_0$. Тогда

$$\frac{\Delta J}{J_0} = \frac{\sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_{p \max}} \frac{\sin \sigma_{p \max} - \sin \sigma_p}{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}}. \quad (2.37)$$

Из формулы (2.37) следует, что при $\sigma_{p0} = 0$ отношение $\Delta J / J_0 = 0$. Таким образом, для соблюдения условия $J = \text{const}$ необходим линейный характер взаимосвязи параметров $V_{ob} = V_{ob}(n_p \sin \sigma_p)$, причём линия в системе координат $(V_{ob}, n_p \sin \sigma_p)$ может иметь любой наклон, но должна проходить через точку $(0,0)$.

2.28 Разработка “микроскопов микронного разрешения” для редуционной фотолитографии.

Эта дискуссия затрагивает некоторые технические решения систем редуционной оптической фотолитографии, построенных на принципе получения изображения объекта с уменьшением. Можно обсудить основные тенденции проектирования систем редуцирования, предложить практические технические решения построения таких систем. Также можно предложить некоторые оригинальные оптические системы, которые соответствуют требованиям, указанным выше.

Проекционная фотолитография в общем случае может быть выполнена путем одновременного переноса всех элементов топологического слоя на пластину. Обычный метод переноса для редуционной фотолитографии - это поэлементная проекция отдельных фрагментов или прямое формирование рисунка в слое фоторезиста посредством сфокусированного светового луча, поэтому высокая апертура объективов является наиболее важным условием редуционной фотолитографии. Можно принять, что в таком случае получается только небольшая часть изображения шаблона, полное изображение может быть получено путем синхронного сканирования или перемещения шаблона и пластины или путем перемещения самих объективов. Пример так называемого “Редуционного степпера” может идентифицировать принципы проекционной фотолитографии....

.....Стоит также учитывать, что применение иммерсии существенно уменьшает полезный выход годных изделий, поскольку иммерсию нельзя отнести к квазистабильным субстанциям по химическому составу - в ней всегда будут присутствовать либо образовываться различные включения в виде, например, атмосферного газа. Кроме того, несмотря на существенный прогресс в освоении иммерсионной фотолитографии, наличие жидкости значительно усложняет технологический процесс получения изображения, вносит специфические ошибки, является очень затратным и требует использования дополнительных прецизионных устройств.

Поэтому переход на более короткую длину волны 121,6 нм и применение безиммерсионной системы кажется логичным. Вместе с тем можно надеяться, что разрабатываемые сегодня технологии получения иммерсионных жидкостей (отличных от воды, которая на 185 нм также, как и воздух, теряет прозрачность) будут успешно реализованы и в более коротком спектральном диапазоне, что даст возможность дальнейшего повышения числовой апертуры и разрешающей способности объектива.

Фигура 2.142 иллюстрирует оптический расчёт объектива, имеющего монохроматическую коррекцию для длины волны 121,6 нм. Представлена принципиальная оптическая схема объектива, а также графики основных остаточных aberrаций. Этот объектив рассчитан для работы с выходной числовой апертурой 0.90

и линейным полем в пространстве изображений 1.25 мм. Фокусное расстояние объектива составляет 10 мм. В качестве оптического материала используется кристалл MgF₂.

Был выполнен прототип оптического дизайна объектива сегмента Ni-End. Это монохромат, использующий диоптрическую оптику из кристалла фторида магния для работы на длине волны 121,6 нм. Числовая апертура объектива 0.90, линейное поле 23 мм, коэффициент уменьшения 5x (линейное увеличение -0,2x). Объектив содержит 26 одиночных линз, максимальный диаметр некоторых достигает 500 мм. На Фигуре 2.143 показаны конструктивные параметры и оптическая схема этого объектива. Эта оптическая схема не является окончательной и требует дальнейшего более точного расчета. Однако показана принципиальная возможность создания такого объектива.

2.29 Построение зеркальной литографической оптики

Многие люди ожидали, что переход на рентгеновскую оптику станет настоящей революцией в практической Ni-End литографии. Предпосылок для такой революции было много: в первую очередь, переход на длину волны, более чем в десять раз короче, чем используемые сегодня, обещал значительное повышение разрешающей способности. Вторым важным фактором был отказ (хотя и вынужденный) от линзовых объективов, имеющих гигантские размеры. Это предполагало существенное снижение стоимости оборудования. Также всем казалось, что существует реальная возможность достигнуть большего выхода годных деталей при существенном увеличении производительности нового оборудования – по отношению к старому.