

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Т.В. Иванова, А.О. Вознесенская

ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ И КОМПЬЮТЕРНУЮ ОПТИКУ

Конспект лекций



Санкт-Петербург

2013

Иванова Т.В., Вознесенская А.О. ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ И КОМПЬЮТЕРНУЮ ОПТИКУ. Конспект лекций. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 99 с.

В учебном пособии рассматриваются основные направления развития современной прикладной и компьютерной оптики; представлены основные характеристики оптических систем; показаны назначение, основные характеристики и особенности типовых оптических приборов – фотоаппаратов, микроскопов, телескопов и осветительных систем.

Учебное пособие предназначено для студентов первого курса, обучающихся на кафедре Прикладной и компьютерной оптики по направлению подготовки 200400 «Оптотехника», а также может быть полезным всем студентам факультета Опτικο-электронных систем и технологий.

Учебное пособие подготовлено на кафедре Прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Рецензент: доктор технических наук, профессор И.А. Коняхин (НИУ ИТМО)

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 – Оптотехника.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2013
© Т.В. Иванова, А.О. Вознесенская, 2013

Введение

Дисциплина «Введение в специальность» знакомит студентов кафедры Прикладной и компьютерной оптики факультета Оптико-информационных систем и технологий с их будущей профессиональной областью деятельности. В рамках этой дисциплины первокурсники получают представление о задачах и методах современной прикладной и компьютерной оптики. Дисциплина включает в себя лекции, посвященные основным типам оптических систем и их характеристикам, а также тенденциям развития прикладной и компьютерной оптики. Лабораторный практикум дисциплины знакомит студентов с современным программным обеспечением, предназначенным для проектирования оптических систем.

Данное учебное пособие представляет собой конспект лекций по дисциплине «Введение в специальность».

Глава 1 дает представление о понятиях «Направление подготовки», «Федеральный государственный образовательный стандарт», «Образовательный стандарт Национального исследовательского университета», «Основная образовательная программа». В этой же главе рассмотрены основные направления развития современной прикладной и компьютерной оптики.

Глава 2 дает представление об устройстве человеческого глаза. Глаз рассматривается с двух точек зрения: как самостоятельная оптическая система и как приемник изображения, с которым работают многие оптические приборы.

Глава 3 дает представление об основных характеристиках оптических систем.

Главы 4-7 рассматривают назначение, основные характеристики и особенности таких типовых оптических приборов, как фотоаппараты, микроскопы, телескопы и осветительные системы.

1. Направление подготовки и область профессиональной деятельности

На кафедре Прикладной и компьютерной оптики осуществляется обучение студентов по направлению подготовки 200400 «ОпTOTехника».

Направление подготовки – совокупность образовательных программ для бакалавров, магистров различных профилей, интегрируемых на основании общности фундаментальной подготовки.

Профиль подготовки – совокупность основных типичных черт какой-либо профессии (направления подготовки) высшего образования, определяющих конкретную направленность образовательной программы, ее содержание.

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) – комплексная федеральная норма качества высшего профессионального образования по направлению подготовки, обязательная к исполнению всеми высшими учебными заведениями на территории Российской Федерации, имеющими государственную аккредитацию и реализующими основные образовательные программы по данному направлению подготовки.

Основная образовательная программа ВПО (ООП ВПО) – система документов, разработанная и утвержденная вузом на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по соответствующему направлению подготовки.

Университеты, в отношении которых установлена категория «национальный исследовательский университет», вправе реализовывать образовательные программы высшего профессионального и послевузовского профессионального образования на основе образовательных стандартов и требований, устанавливаемых ими самостоятельно.

В соответствии с уровневой системой высшего профессионального образования, студенты могут получить степень бакалавра техники и технологии (4 года обучения), магистра техники и технологии (2 года обучения). Для зачисления в магистратуру необходимо успешно завершить обучение по программе бакалавриата и пройти конкурсные испытания. По завершении магистратуры наиболее перспективным студентам может быть дана рекомендация к поступлению в аспирантуру.

Структура профилей подготовки, реализуемых на кафедре Прикладной и компьютерной оптики, представлена на рис. 1.1.

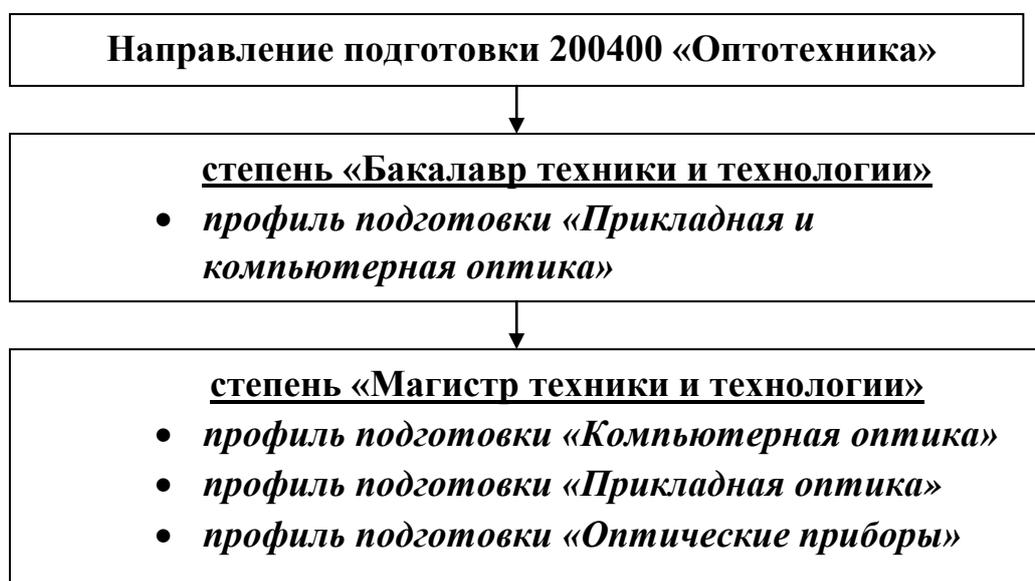


Рис.1.1. Уровневая система подготовки студентов на кафедре Прикладной и компьютерной оптики

Область профессиональной деятельности бакалавров по направлению подготовки 200400 «Опготехника», профиль «Прикладная и компьютерная оптика» включает:

- исследование, разработку, подготовку и организацию производства приборов и систем, основанных на использовании оптического излучения;
- элементную базу опготехники (оптических систем, оптико-электронной и лазерной техники);
- оптическую и лазерную технологии производства и контроля оптических, оптико-электронных элементов, приборов и систем;
- разработку математических моделей, численных методов, программную реализацию и тестирование программного обеспечения для решения задач опготехники;
- автоматизацию проектирования и информационную поддержку жизненного цикла устройств опготехники.

Объектами профессиональной деятельности бакалавров являются:

- взаимодействие электромагнитного излучения оптического диапазона с веществом;

- разработка, создание, использование оптических, оптико-электронных, лазерных приборов, систем и комплексов;
- технологии производства оптических элементов, материалов, приборов и систем;
- лазерные технологии различного назначения;
- элементная база оптической, оптико-электронной и лазерной техники;
- программное обеспечение и компьютерные технологии в оплотехнике;
- математические, численные и компьютерные модели для оптических приложений.

Бакалавр, подготовленный по профилю «Прикладная и компьютерная оптика», может решать профессиональные задачи в соответствии с видами профессиональной деятельности, приведенными в Приложении А.

Рассмотрим подробнее профили подготовки, реализуемые на кафедре Прикладной и компьютерной оптики.

Профиль «Прикладная и компьютерная оптика» (бакалавриат)

Прикладная и компьютерная оптика – базовый профиль подготовки специалистов в области оплотехники. В процессе обучения студенты получают фундаментальную подготовку по дисциплинам гуманитарного, социально-экономического и естественнонаучного циклов, а также приобретают профессиональные навыки в части исследования, разработки и применения математических методов и компьютерных технологий для решения различных задач оплотехники; выполнения синтеза, анализа и оптимизации оптических элементов и систем с помощью специализированного программного обеспечения; компьютерного моделирования и обработки оптического изображения; применения компьютерных методов оптического контроля и компьютерной обработки полученных данных контроля; исследования и создания голограммных оптических элементов и устройств; разработки, компьютерного моделирования и исследования оптических и волоконно-оптических сенсорных устройств.

Профиль «Компьютерная оптика» (магистратура)

Компьютерная оптика – это синтез физической оптики, математики и информатики – интеграция теории, методов и технических средств обработки оптических сигналов с использованием компьютерных технологий. В самом широком смысле слова «компьютерная оптика» – это компьютеры в оптике и оптика в компьютерах. Сюда относятся численные решения прямых и обратных задач распространения излучения в оптических средах, обработка изображений, оптические вычислительные эксперименты, оптические

процессоры и запоминающие устройства, цифровая голография, проектирование элементной базы фотолитографических устройств и др. В более узком смысле компьютерная оптика – это получение на основе применения компьютерных технологий оптических элементов, осуществляющих требуемое преобразование волновых полей. Практическое предназначение компьютерной оптики состоит в расширении элементной базы оптических систем. Помимо традиционных линз, призм и зеркал с помощью современных вычислительных средств и систем управления могут быть получены оптические элементы с более широкими и (или) специфическими функциональными возможностями.

Профиль «Компьютерная оптика» направлен на подготовку специалистов, способных решать комплексные научные и технические задачи оптотехники с широким применением современных математических методов, компьютерного моделирования, специализированного программного обеспечения и информационных технологий.

Профиль отличается универсальностью подготовки – по завершении обучения выпускники способны решать задачи, связанные с программированием и использованием компьютерных технологий не только в области оптотехники, но и в других направлениях науки и техники.

Профиль «Прикладная оптика» (магистратура)

Прикладная оптика – включает в себя разработку оптических схем, проектирование оптических приборов, исследование оптимальных решений компоновки оптических систем оптико-электронных приборов и узлов.

Профиль представляет собой совокупность теоретических и прикладных дисциплин, изучающих общие законы и принципы оптики, теорию оптических систем, оптические измерения и обработку результатов измерений, основы формирования и анализа качества оптического изображения, методы проектирования и исследования различных типов оптических систем, современные коммерческие пакеты программ, предназначенные для автоматизации проектирования оптических систем.

Выпускники, завершившие подготовку по данному профилю, разрабатывают различные типы высокотехнологичных оптических систем и их компоненты, например, объективы фотоаппаратов и видеокамер, зум-объективы, микрообъективы, элементы эндоскопической и медицинской оптики, бинокли, оптические прицелы, наземные и космические телескопы, системы ночного видения и тепловизионные системы, работающие в инфракрасной области спектра, высокоточные проекционные объективы для

микроэлектроники, оптические компоненты сканирующих устройств и оргтехнической аппаратуры, системы освещения и многое другое.

Профиль «Оптические приборы» (магистратура)

Оптические приборы – это устройства, осуществляющие преобразование излучения (передачу, отражение, преломление, поляризацию) какой-либо области спектра (ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной). Они могут увеличивать, уменьшать, улучшать (в редких случаях ухудшать) качество изображения, давать возможность увидеть искомый предмет косвенно.

Профиль сочетает разработку и исследование оптических систем, конструирование высокотехнологичных оптических приборов различного назначения и их компонентов, широкое применение систем автоматизированного проектирования и конструирования, создание программных комплексов для автоматизации подбора конструктивных решений и выполнения типовых операций по выпуску конструкторской документации, исследование и контроль качества оптических приборов и узлов. Профиль также направлен на развитие информационной поддержки жизненного цикла оптических приборов (CALS-технологии) – разработку программного обеспечения для построения единой технологической цепочки автоматизированного создания оптических приборов CAE/CAD/CAM (проектирование/ конструирование/ производство).

1.1. Прикладная оптика и компьютерные технологии

Прикладная оптика объединяет профили подготовки, реализуемые на кафедре Прикладной и компьютерной оптики.

Прикладная оптика – это комплекс теоретических и прикладных дисциплин, изучающих общие законы и принципы оптики, оптическое изображение, основы, методы и технологии проектирования, контроля, аттестации и юстировки оптических систем и оптических приборов.

Природа наделила человека уникальным оптическим прибором – глазом. Человеку всегда хотелось узнать больше об окружающем мире и расширить границы воспринимаемой информации, поэтому были изобретены первые наблюдательные оптические приборы.

Современная прикладная оптика – стремительно развивающаяся область науки и техники, ориентированная на создание оптических приборов различного назначения. По принципу расположения предмета и формируемого изображения оптические приборы делят на четыре группы.

1) Микроскопы. Предмет находится на близком расстоянии, изображение – на бесконечности. Микроскопы расширяют возможности зрения при наблюдении близких, но очень мелких предметов.

2) Телескопы. Предмет удален, изображение – на бесконечности. Телескопические приборы, например, подзорная труба, бинокль, телескоп – расширяют возможности зрения при наблюдении удаленных объектов.

3) Фотоаппараты. Предмет удален, изображение – на близком расстоянии. Фотоаппараты и видеокамеры предназначены для формирования и записи изображения на приемнике изображения (фото- и киноплёнка, ПЗС-матрица).

4) Проекционные приборы. Предмет и изображение находятся на близком расстоянии. Проекционные приборы служат для изменения масштаба и переноса изображения, они либо увеличивают изображение, либо уменьшают во много раз, например, с целью формирования электронных микросхем. Широко известны проекционные объективы и устройства, которые предназначены для демонстрации слайдов, кинофильмов, для печати фотографий, копирования и сканирования изображений.

К отдельной группе оптических приборов относят осветительные устройства, используемые для обеспечения определенных условий освещения и создания специальных световых эффектов.

Компьютерные технологии в настоящее время активно используются при решении задач прикладной оптики на различных этапах жизненного цикла оптических приборов. В частности, компьютерные технологии позволяют быстро и точно выполнить трудоемкие вычисления при проектировании и оптимизации оптических систем, произвести моделирование оптических явлений и визуализировать его результаты, обработать изображения, автоматизировать некоторые этапы проектирования и конструирования оптических приборов.

1.2. Современные направления прикладной и компьютерной оптики

Рассмотрим более подробно некоторые направления деятельности и научных исследований в области прикладной и компьютерной оптики.

Компьютерное проектирование оптических систем

Целью этого направления является получение конструктивных и технологических параметров оптических систем требуемого качества.

Первоначальное формирование конструкционной модели оптической системы может происходить при помощи специальных компьютерных программ **синтеза** оптических систем с требуемыми характеристиками, а также

на основании полученных теоретических формул или путем выбора ближайшего прототипа. Затем наступает этап **анализа**, на котором рассчитывается ход лучей через оптическую систему и по различным характеристикам (показателям) определяется качество оптической системы. К характеристикам оптической системы относятся параксиальные характеристики, величины аберраций, габариты пучков, размеры пятна рассеяния, а также различные специальные характеристики и критерии качества, принятые в оптике. Дальнейшее изменение конструктивных параметров оптической системы для достижения требуемых значений характеристик качества возможно при помощи программ **оптимизации**.

Для компьютерного проектирования оптических систем используется ряд коммерческих специализированных пакетов программ (Zemax, CodeV, Synopsys, OSLO, LightTools, TracePro, OPAL-PC и др.).

Конструирование оптических приборов

Целью этого направления является разработка оптического прибора в целом, начиная с проектирования общей функциональной схемы прибора и заканчивая конструированием его оптических и механических деталей и узлов при активном использовании систем автоматизированного конструирования.

К задачам этого направления относятся исследование общей теории проектирования оптических приборов, анализ технического задания и постановка задачи, разработка функциональной схемы оптического прибора, конструирование различных типов его элементов, деталей и узлов, а также оценка технологичности конструкторских решений.

Автоматизация проектирования оптических приборов

Основной целью автоматизации проектирования оптических приборов является разработка программного обеспечения для построения единой технологической цепочки CAE/CAD/CAM (Computer-Aided Engineering, Computer-Aided Design, Computer-Aided Manufacturing) – проектирование/конструирование/производство с помощью компьютера. Задачи автоматизации проектирования относятся к области CALS-технологий (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) - непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла. CALS-технологии являются современным подходом к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоёмкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и современных информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия, обеспечивающая единообразные способы управления процессами и взаимодействия всех участников этого цикла, реализованная в соответствии с требованиями системы

международных стандартов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными. Русскоязычным аналогом понятия CALS является ИПИ – информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий.

К задачам автоматизации конструирования оптических приборов относится, в первую очередь, разработка специализированных программных приложений, предназначенных для автоматизации выпуска конструкторской документации с учетом требований стандартизации и подбора конструктивных решений. В задачи этого направления входит также трехмерное моделирование конструкции оптических приборов. Кроме этого, данное направление обеспечивает обмен и передачу данных, получаемых на различных этапах проектирования оптических приборов и с использованием различных пакетов программ.

Компьютерное моделирование формирования оптического изображения и оптических явлений

Основной целью этого направления является моделирование работы оптического прибора или физического явления на основе математической методов. Это необходимо в первую очередь для проверки работоспособности и оптимизации характеристик оптического прибора до его изготовления. Также компьютерное моделирование широко используется при проверке новых теоретических положений, математических и вычислительных методов.

Данное направление включает также широкий круг задач моделирования формирования изображения различными изображающими системами (телескопы, микроскопы, фотоаппараты, геодезические, измерительные и другие приборы) различных предметов и при различных условиях освещения (разные виды когерентности и поляризации). В рамках этого направления могут выполняться задачи моделирования различных оптических явлений и процессов, например, моделирование процесса взаимодействия оптического излучения с веществом, моделирование распространения света в оптической среде и пр.

Обработка оптических изображений

Обработку оптического изображения выполняют с целью его коррекции, в частности, уменьшения дефокусировки изображений, устранения смазанного изображения, коррекции слишком больших или коротких экспозиций, устранения шума и др.

Цифровая обработка изображений широко используется при анализе качества оптических элементов и систем по данным их контроля (интерферограммы, гартманограммы и др.).

Обработка изображений специальными оптическими фильтрами (в том числе фазовыми) позволяет извлекать дополнительную информацию из оптического изображения (технологии цифровой фильтрации, распознавания образов, компьютерной томографии и др.).

Уровень современных методов передачи и обработки изображений настолько высок, что становятся реальностью автоматические дистанционные устройства распознавания объектов, работающие в реальном времени и в различных спектральных диапазонах.

Компьютерное управление оптическими приборами и процессами

Работа высокоточных приборов, какими являются оптические измерительные приборы, невозможна без использования компьютеров. Компьютерное управление такими приборами позволяет повысить и точность перемещений в пространстве, и точность управления временными процессами.

К задачам компьютерного управления можно отнести управление приборами оптической астрономии, космическими объектами, автоматизацию оптического эксперимента и оптических измерений. Компьютерное управление позволяет автоматизировать точную сборку и юстировку (наладку) оптических приборов.

Кроме того, компьютерное управление оптическими процессами применяется для контроля оптических систем за пределами видимой области спектра, когда даже высококвалифицированный специалист не может непосредственно влиять на качество сборки или компоновки.

2. Анатомия глаза и зрение

Глаз – это оптический прибор, созданный самой природой. Человеческий глаз интересует нас с двух точек зрения: как оптическая система и как приемник изображения, с которым работают многие оптические приборы.

2.1. Глаз как оптическая система

2.1.1. Строение глаза

На рисунке 2.1. изображен разрез глазного яблока и показаны основные элементы глаза.

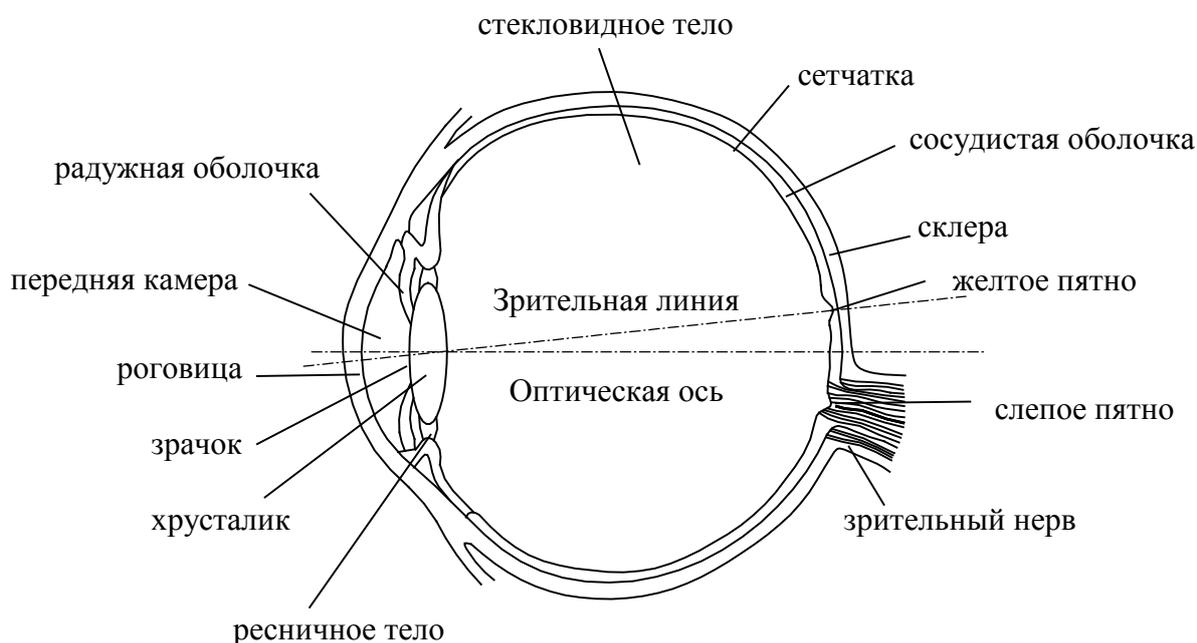


Рис. 2.1. Горизонтальный разрез правого глаза

Глаз представляет собой шаровидное тело (**глазное яблоко**), почти полностью покрытое непрозрачной твердой оболочкой (**склерой**). В передней части глаза оболочка переходит в выпуклую и прозрачную **роговицу**. Склера и роговица обуславливают форму глаза, защищают его и служат местом крепления глазодвигательных мышц. Диаметр всего глазного яблока около 22-24 мм, масса 7-8 г.

Тонкая сосудистая пластинка (**радужная оболочка**) является диафрагмой, ограничивающей проходящий пучок лучей. Через отверстие в радужной оболочке (**зрачок**) свет проникает в глаз. В зависимости от величины падающего светового потока диаметр зрачка может изменяться в пределах от 1 до 8 мм.

Помимо сосудов радужная оболочка содержит большое количество пигментных клеток, в зависимости от их содержания и глубины залегания радужная оболочка имеет различный цвет. Когда в радужной оболочке нет никакого цветного вещества, то она кажется красной от крови, заключенной в пронизывающих ее кровеносных сосудах. В этом случае глаза плохо защищены от света и иногда страдают светобоязнью (альбинизмом), но в темноте превосходят по остроте зрения глаза с темной окраской.

Хрусталик представляет собой двояковыпуклую эластичную линзу, которая крепится на мышцах **ресничного тела**. Ресничное тело обеспечивает изменение формы хрусталика. Хрусталик разделяет внутреннюю поверхность глаза на две камеры: **переднюю камеру**, заполненную водянистой влагой, и **заднюю камеру**, заполненную стекловидным телом.

Внутренняя поверхность задней камеры покрыта **сетчаткой**, представляющей собой светочувствительный слой. Получаемое светочувствительными элементами сетчатки раздражение передается волокнам **зрительного нерва** и по ним достигает зрительных центров мозга. Между сетчаткой и склерой находится тонкая **сосудистая оболочка**, состоящая из сети кровеносных сосудов, питающих глаз.

Место входа зрительного нерва представляет собой **слепое пятно**. Немного выше расположено **желтое пятно** – участок наиболее ясного видения. Линия, проходящая через центр желтого пятна и центр хрусталика, называется **зрительной осью**. Она отклонена от оптической оси глаза на угол около 5° .

2.1.2. Упрощенная оптическая схема глаза

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза – сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение и оно воспринимается как прямое). Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело (рис. 2.2). Особенностью этой системы является то, что последняя среда, проходимая светом непосредственно перед образованием изображения на сетчатке, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы.

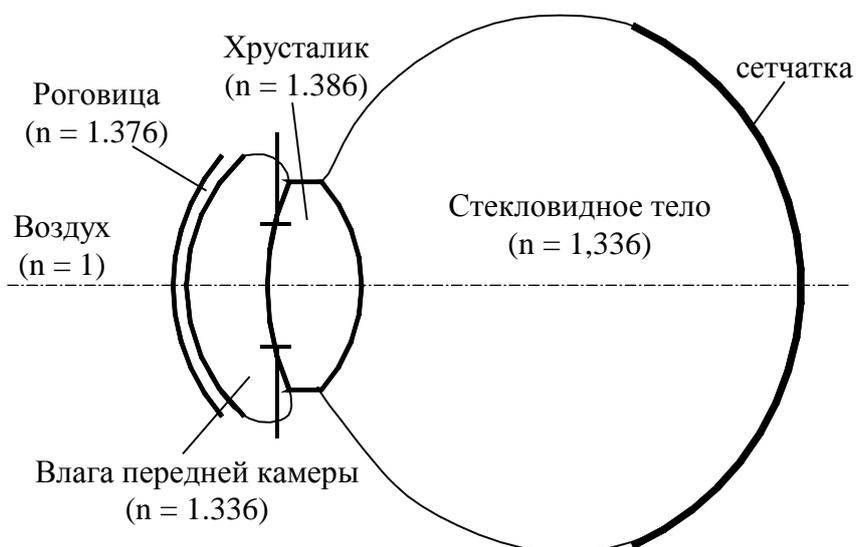


Рис. 2.2. Оптическая система глаза

Преломление света в глазе происходит главным образом на его внешней поверхности – роговой оболочке, или роговице, а также на поверхностях хрусталика. Радужная оболочка определяет диаметр зрачка, величина которого может изменяться произвольным мышечным усилием от 1 до 8 мм.

Оптическая система глаза чрезвычайно сложна, поэтому при расчетах хода лучей обычно пользуются упрощенными, эквивалентными истинному глазу «схематическими глазами». В таблице 2.1 приведены данные для аккомодированного и не аккомодированного глаза.

Таблица 2.1. Данные «схематического глаза»

| № пов-ти | В состоянии покоя | | | В состоянии наибольшей аккомодации | | |
|----------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| | радиус кривизны, мм | осевое расстояние, мм | показатель преломления | радиус кривизны, мм | осевое расстояние, мм | Показатель преломления |
| 1 | 7,7 | 0,5 | 1,376 | 7,7 | 0,5 | 1,376 |
| 2 | 6,8 | 3,1 | 1,336 | 6,8 | 2,7 | 1,336 |
| 3 | 10,0 | 3,6 | 1,386 | 5,3 | 4,0 | 1,386 |
| 4 | -6,0 | 15,0 | 1,336 | -5,3 | 15,0 | 1,336 |
| | Оптическая сила $\Phi = 58$ дптр | | | Оптическая сила $\Phi = 70$ дптр | | |

Оптическая сила глаза вычисляется как обратное фокусное расстояние:

$$\Phi = \frac{1}{f'}, \text{ [дптр]}, \quad (2.1)$$

где f' – заднее фокусное расстояние глаза, выраженное в метрах.

2.1.3. Аккомодация

Аккомодация – это способность глаза приспособливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза.

Аккомодация происходит путем изменения кривизны поверхности хрусталика при помощи натяжения или расслабления ресничного тела. Когда ресничное тело натянуто, хрусталик растягивается и его радиус кривизны увеличивается. При уменьшении натяжения мышцы хрусталик под действием упругих сил увеличивает свою кривизну.

В свободном, ненапряженном состоянии нормального глаза на сетчатке получают ясные изображения бесконечно удаленных предметов, а при наибольшей аккомодации видны самые близкие предметы.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют **дальней точкой** глаза.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке при наибольшем возможном напряжении глаза, называют **ближней точкой** глаза.

При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. При наибольшем напряжении на сетчатке получается изображение предмета, находящегося на расстоянии около 9 см (рис. 2.3).

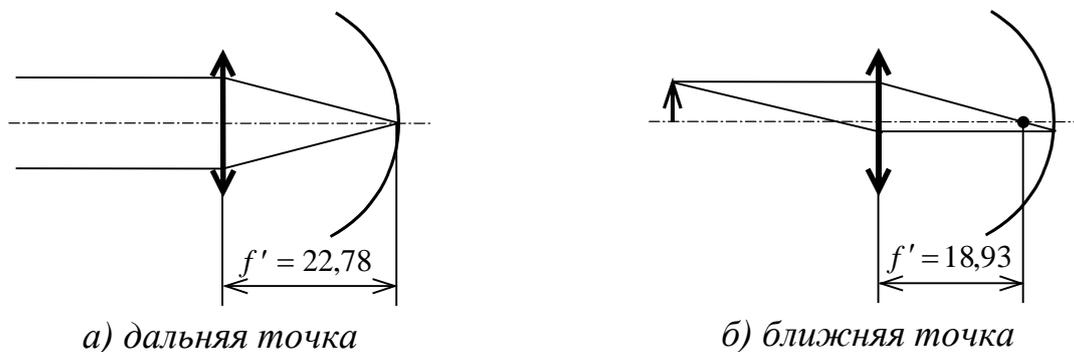


Рис. 2.3. Изображения дальней и ближней точек глаза

Разность обратных величин расстояний между ближней и дальней точками глаза называют **диапазоном аккомодации глаза** (измеряется в дптр).

С возрастом способность глаза к аккомодации постепенно уменьшается. Скажем, в возрасте 20 лет для нормального глаза ближняя точка находится на расстоянии около 10 см (диапазон аккомодации 10 дптр), в 50 лет ближняя точка располагается на расстоянии уже около 40 см (диапазон аккомодации

2.5 дптр), а к 60 годам уходит на бесконечность, то есть аккомодация прекращается. Это явление называется возрастной дальнозоркостью или **пресбиопией**.

Расстояние наилучшего зрения – это расстояние, на котором нормальный глаз испытывает наименьшее напряжение при рассматривании деталей предмета.

В среднем расстояние наилучшего зрения составляет около 25-30 см, хотя для каждого человека оно может быть индивидуальным.

2.2. Глаз как приемник изображения

2.2.1. Строение сетчатки

Сетчатая оболочка – это сложное переплетение нервных клеток и нервных волокон, соединяющих нервные клетки между собой и связывающих глаз с корой головного мозга. Основными светочувствительными элементами (**рецепторами**) являются два вида клеток: одни – в виде стебелька, называемые **палочками** (высота 30 мкм, толщина 2 мкм), другие – более короткие и более толстые, называемые **колбочками** (высота 10 мкм, толщина 6-7 мкм).

Палочки и колбочки различаются по своим функциям: палочки обладают большей чувствительностью, но не различают цветов и являются аппаратом сумеречного зрения (зрения при слабом освещении); колбочки чувствительны к цветам, но зато менее чувствительны к свету и поэтому являются аппаратом дневного зрения. Всего в глазу располагается около 130 миллионов палочек и 7 миллионов колбочек. Распределение рецепторов на сетчатке неравномерно: в области желтого пятна преобладают колбочки, а палочек очень мало; к периферии сетчатки, наоборот, число колбочек быстро уменьшается, и остаются одни только палочки.

На сетчатке имеется особое место, лежащее не на оптической оси, а немного в стороне от нее, ближе к височной части головы, называемое **желтым пятном** вследствие своего цвета. Эта часть сетчатки имеет в середине небольшое центральное углубление – **центральную ямку**. По направлению к этому углублению толщина сетчатки в желтом пятне уменьшается, исчезают почти все промежуточные ее слои и остаются практически только палочки и колбочки с их нервными окончаниями. В самой ямке отсутствуют и палочки, так что в ней все дно выстлано только колбочками. Диаметр желтого пятна – около 1 мм, а соответствующее ему поле зрения глаза – 6-8°. Диаметр центральной ямки – 0,4 мм, поле зрения – 1°.

В желтом пятне к большинству колбочек подходят отдельные волокна зрительного нерва. Вне пределов желтого пятна одно волокно зрительного

нерва всегда обслуживает целые группы колбочек или палочек. По этой причине только в области ямки и желтого пятна глаз может различать тонкие детали, в остальных местах сетчатки целые группы элементов, занимающих сравнительно большую площадь, одновременно передают свое раздражение одному нервному волокну, и воспринимаемая сознанием картина становится грубой, лишенной деталей. Всякое отклонение изображения в сторону от ямки влечет за собою уменьшение четкости изображения, а когда изображение сходит с желтого пятна, то различение мелких деталей предмета совершенно прекращается. Периферическая часть сетчатки служит в основном для ориентирования в пространстве.

В палочках находится особый пигмент – **родопсин**, собирающийся в них в темноте и выцветающий на свету. Восприятие света палочками обусловлено химическими реакциями под действием света на родопсин. Колбочки реагируют на свет за счет реакции **йодопсина**.

Кроме родопсина и йодопсина дно глаза обладает еще одним пигментом черного цвета, роль которого состоит в предохранении светочувствительного аппарата от чересчур сильных световых раздражений. При отсутствии светового раздражения зёрна этого пигмента находятся на задней поверхности сетчатки. Но при воздействии света начинается перемещение зёрен навстречу падающему свету. Они проникают в слои сетчатки и, поглощая значительную часть световой энергии, заслоняют тем самым в сильной степени палочки и колбочки от светового раздражения.

*На месте ствола зрительного нерва располагается **слепое пятно**. В области слепого пятна нет ни колбочек, ни палочек, и этот участок сетчатки не чувствителен к свету. Диаметр слепого пятна 1,88 мм, что соответствует полю зрения 6°. Это значит, что человек с расстояния 1 м может не увидеть предмета диаметром 10 см, если его изображение проектируется на слепое пятно.*

Убедиться, что в глазу существует слепое пятно, можно, проделав следующий опыт: поднести рисунок к глазу на расстояние 10 см, закрыть левый глаз и смотреть



на крестик правым глазом. Если перемещать рисунок, то в какой-то момент изображение левой фигуры будет не видно – оно попадет на слепое

пятно.

2.2.2. Спектральная чувствительность

Оптические приборы, работающие совместно с глазом, имеют дело с той частью потока излучения, которую воспринимает глаз. К ней относится видимая область спектра в интервале длин волн 380 – 780 нм.

Действие излучения смешанных цветов на сетчатку глаза воспринимается как белый свет; излучение, содержащее одну определенную длину волны (мономатическое), воспринимается как цветное. Потоки излучения

одинаковой величины, но соответствующие различной длине волны, вызывают неодинаковые раздражения сетчатки глаза и поэтому воспринимаются глазом как отличающиеся не только по длине волны (по цвету), но и по интенсивности. Наиболее сильное воздействие на глаз оказывает излучение желто-зеленого цвета в интервале длин волн 550 – 570 нм.

Воздействие потока излучения с длиной волны 555 нм условно принимают за единицу; действие на глаз излучений других длин волн в видимом участке спектра оценивают **коэффициентом относительной спектральной чувствительности**:

$$K_{\lambda} = \frac{V_{\lambda}}{V_{\lambda=555}}, \quad (2.2)$$

где V_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность излучения с длиной волны λ ; $V_{\lambda=555}$ – абсолютная спектральная чувствительность для длины волны $\lambda = 555$ нм.

Например, поток излучения оранжевых лучей ($\lambda = 610$ нм) мощностью в 1 Вт создает световое ощущение такой же интенсивности, как поток зеленых лучей ($\lambda = 555$ нм) мощностью 0.5 Вт. Поэтому коэффициент относительной спектральной чувствительности для оранжевых лучей будет $K_{\lambda=610} = 0.5$. Если же необходимо обеспечить одинаковое зрительное ощущение для длин волн 760 нм и 555 нм, то поток излучения для $\lambda = 760$ нм должен быть в 20 000 раз мощнее.

Вид кривой относительной спектральной чувствительности глаза приведен на рис. 2.4. При уменьшении освещенности кривая относительной спектральной чувствительности глаза сдвигается в голубую область, и в сумерках максимум спектральной чувствительности глаза приходится на $\lambda = 515$ нм. Это явление называется **эффектом Пуркинье**.

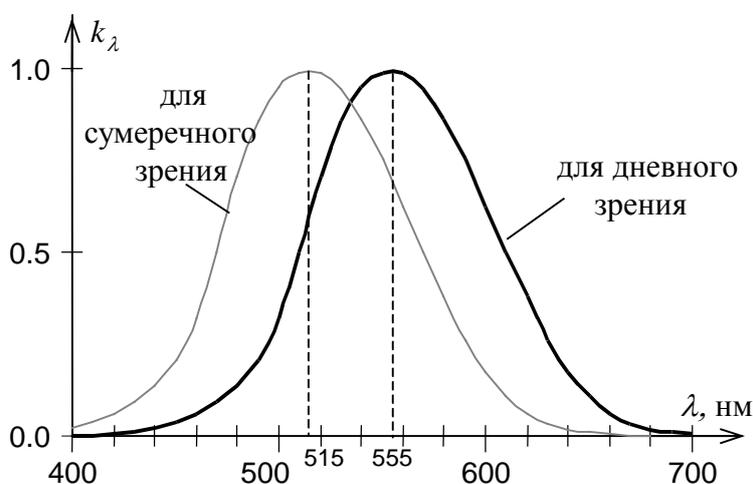


Рис. 2.4. Кривая спектральной чувствительности глаза

Цветовосприятие

В основе восприятия цвета лежат сложные физико-химические процессы, совершающиеся в зрительных рецепторах. Различают три типа «колбочек», проявляющих наибольшую чувствительность относительно трех основных цветов видимого спектра:

- красно-оранжевый (600 – 700 нм);
- зеленый (500 – 600 нм);
- синий (400 – 500 нм).

Особенности цветовой чувствительности клеток определяются различиями в зрительном пигменте. Комбинации возбуждений этих приемников разных цветов дают ощущения всей гаммы цветовых оттенков.

В видеотехнике эти цвета называются тремя первичными цветами – RGB (*Red, Green, Blue*). Все цвета, встречающиеся в природе, можно создать, смешивая свет трех этих длин волн и варьируя их интенсивность. Смесь, состоящая из 100% каждого цвета, дает белый свет. Отсутствие всех цветов дает отсутствие света или черный цвет.

В случае ослабления восприятия одного из цветов цветное зрение может нарушаться. Известны три разновидности частичной цветовой аномалии: «краснослепые», «фиолетослепые» и «зеленослепые». Впервые нарушение цветового зрения было обнаружено у известного английского химика Дж. Дальтона – он не воспринимал красный цвет. Этот дефект зрения стал называться дальтонизмом. Дальтонизм обусловлен изменением в мужской хромосоме и встречается у 5-8% мужчин и лишь у 0,4% женщин.

Восприятие цвета заметно изменяется в зависимости от внешних условий. Один и тот же цвет воспринимается по-разному при солнечном свете и при свете свечей. Однако зрение человека адаптируется к источнику света, что позволяет в обоих случаях идентифицировать свет как один и тот же – происходит **цветовая адаптация** (в темных очках сначала все кажется окрашенным в цвет очков, но этот эффект через некоторое время пропадает). Аналогично вкусу, обонянию, слуху и другим органам чувств восприятие цвета так же индивидуально. Люди могут отличаться друг от друга чувствительностью к диапазону видимого света.

2.2.3. Адаптация

|| Приспособление глаза к изменившимся условиям освещенности называется **адаптацией**.

Различают темновую и световую адаптацию.

Темновая адаптация происходит при переходе от больших яркостей к малым. Если глаз первоначально имел дело с большими яркостями, то

работали колбочки, палочки же были ослеплены, родопсин выцвел, черный пигмент проник в сетчатку, заслоняя колбочки от света. Если внезапно яркость видимых поверхностей значительно уменьшится, то вначале раскроется шире отверстие зрачка, пропуская в глаз большой световой поток. Затем из сетчатки начнет уходить черный пигмент, родопсин будет восстанавливаться, и только когда его наберется достаточно, начнут функционировать палочки.

Так как колбочки совсем не чувствительны к очень слабым яркостям, то сначала глаз ничего не различает, и только постепенно приходит в действие новый механизм зрения. Лишь через 50-60 мин пребывания в темноте чувствительность глаза достигает максимального уровня.

Световая адаптация – это процесс приспособления глаза при переходе от малых яркостей к большим. При этом происходит обратная серия явлений: раздражение палочек, благодаря быстрому разложению родопсина, чрезвычайно сильно, они «ослеплены», и даже колбочки, не защищенные еще зернами черного пигмента, раздражены слишком сильно. Только по истечении достаточного времени приспособление глаза к новым условиям заканчивается, прекращается неприятное чувство ослепления и глаз приобретает полное развитие всех зрительных функций. Световая адаптация происходит в течение 8-10 мин.

Итак, адаптация обеспечивается тремя явлениями:

- изменением диаметра отверстия зрачка;
- перемещением черного пигмента в слоях сетчатки;
- различной реакцией палочек и колбочек.

Зрачок может изменяться в диаметре от 2 до 8 мм, при этом его площадь и, соответственно, световой поток изменяются в 16 раз. Сокращение зрачка происходит за 5 сек, а его полное расширение – за 5 мин.

2.3. Характ ерист ики глаза

2.3.1. Поле зрения глаза

Общее поле зрения глаза громадно, больше, чем у какого либо оптического прибора (125° по вертикали и 150° по горизонтали), но в действительности для ясного различения может быть использована лишь ничтожная часть поля зрения. Поле наиболее совершенного зрения (соответствующее центральной ямке) составляет около 8° по горизонтали и 6° по вертикали, если считать достаточно удовлетворительным зрение в области всего желтого пятна. Вся остальная часть поля зрения служит только для грубого ориентирования в пространстве.

Вследствие этой особенности светочувствительного аппарата глаза для обозрения окружающего пространства приходится совершать непрерывное вращательное движение в своей орбите. Глазное яблоко может вращаться в пределах $45-50^\circ$. Это вращение позволяет проецировать изображения различных предметов на центральную ямку и дает возможность рассмотреть их детально. Движения глаза совершаются без участия сознания и, как правило, не замечаются человеком.

2.3.2. Предел разрешения глаза

В любой оптической системе существует некий конечный предел возможности различать детали отчетливо. Для специалистов в области оптотехники большой интерес представляет величина нижнего **предела разрешения** глазом двух соседних точечных объектов, поскольку эта величина определяет все допуски на характеристики оптических приборов, работающих с глазом.

|| **Угловой предел разрешения глаза** – это минимальный угол, при котором глаз наблюдает отдельно две светящиеся точки.

Угловой предел разрешения глаза составляет около $1'$. Угловой предел разрешения зависит от многих факторов: от контраста предметов, от освещенности, от диаметра зрачка и от длины волны. Кроме того, предел разрешения увеличивается при удалении изображения от центральной ямки и при наличии дефектов зрения.

2.3.3. Диаметр зрачка глаза

Обычно при конструировании приборов для визуальных наблюдений предполагается, что диаметр светового пучка, попадающего в глаз, не превышает 4–5 мм. При расчете таких приборов рассматривается нормальный глаз, не имеющий дефектов зрения.

2.4. Дефекты зрения и их коррекция

Если дальняя точка глаза бесконечно удалена, то такой глаз называют нормальным или **эмметропическим**. При этом глаз хорошо различает предметы и вдали, и вблизи. Это означает, что оптический аппарат глаза (роговица и хрусталик) имеют фокусное расстояние, равное длине оси глаза, и фокус в этом случае попадает точно на сетчатку. При эмметропии изображение от далеко расположенных предметов фокусируется в центральной ямке сетчатки – наиболее чувствительной области воспринимающего аппарата глаза. Несовпадение дальней точки с бесконечно удаленной называют **аметропией** глаза.

Глазу свойственны три основных недостатка:

- **миопия** (близорукость), при которой лучи от бесконечно удаленного точечного источника фокусируются перед сетчаткой (рис. 2.5, а).
- **гиперметропия** (дальнозоркость), при которой истинный фокус лучей от бесконечно удаленного предмета лежит за сетчаткой (рис. 2.5, б).
- **астигматизм**, при котором преломляющая способность глаза различна в разных плоскостях, проходящих через его оптическую ось.

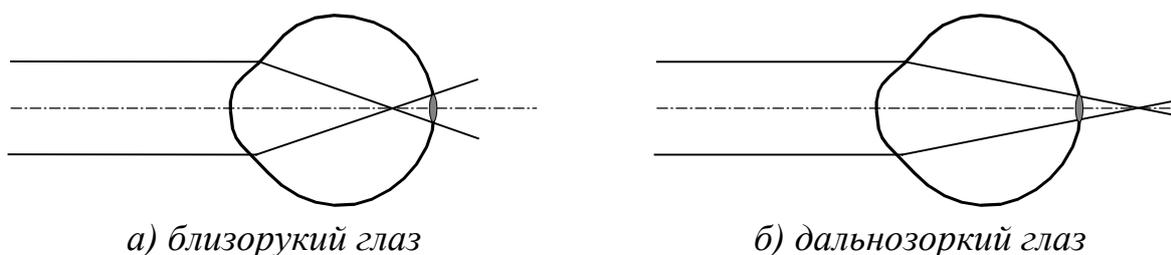


Рис. 2.5. Фокусировка параллельного пучка лучей близоруким и дальнозорким глазом

2.4.1. Близорукость

Причин близорукости может быть две. Первая – удлиненное глазное яблоко при нормальной преломляющей силе глаза. Другая причина – слишком большая оптическая сила оптической системы глаза (более 60 диоптрий) при нормальной длине глаза (24 мм). И в первом, и во втором случаях изображение от предмета не может сфокусироваться на сетчатку, а находится внутри глаза. На сетчатку попадает только фокус от близко расположенных к глазу предметов, то есть дальняя точка глаза приближается от бесконечности на конечное расстояние (рис. 2.6, а).

Чтобы скорректировать близорукость, нужно при помощи очков построить изображение бесконечно удаленной точки в том месте, которое глаз может видеть без всякого напряжения, то есть в дальней точке. Для исправления близорукости используются отрицательные очки (рис. 2.6, б), которые строят изображение бесконечно удаленной точки перед глазом.

Близорукость может быть врожденной, однако чаще всего она появляется в детском и подростковом возрасте, причем по мере роста глазного яблока в длину близорукость увеличивается. Истинной близорукости, как правило, предшествует так называемая ложная близорукость – следствие спазма аккомодации. В этом случае при применении средств, расширяющих зрачок и снимающих напряжение ресничной мышцы, зрение восстанавливается до нормы.

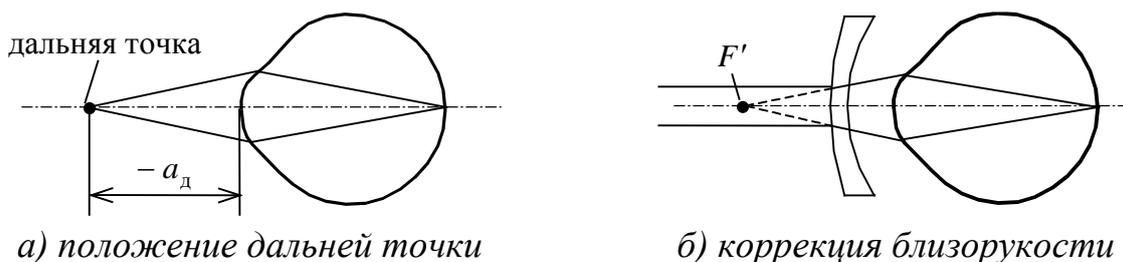


Рис. 2.6. Коррекция близорукости с помощью отрицательной линзы

2.4.2. Дальнозоркость

Дальнозоркость вызывается слабой оптической силой оптической системы глаза для данной длины глазного яблока (либо короткий глаз при нормальной оптической силе, либо малая оптическая сила глаза при нормальной длине). Поскольку дальнозоркий глаз обладает относительно слабой преломляющей способностью, чтобы сфокусировать изображение на сетчатке, увеличивается напряжение мышц, изменяющих кривизну хрусталика, то есть глазу приходится аккомодироваться. Но даже и этого бывает недостаточно, чтобы рассмотреть предметы вдаль. При рассматривании близко расположенных предметов напряжение еще больше возрастает – чем ближе предметы к глазу, тем все дальше за сетчатку уходит их изображение (рис. 2.7, а). Скорректировать дальнозоркость можно при помощи положительных очков (рис. 2.7, б), которые строят изображение бесконечно удаленной точки за глазом.

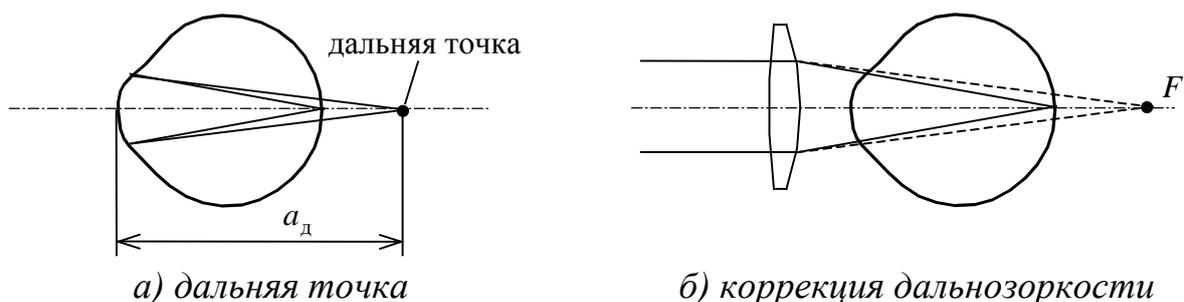


Рис. 2.7. Коррекция дальнозоркости с помощью положительной линзы

У новорожденного глаз немного сдавлен в горизонтальном направлении, поэтому у глаза есть небольшая дальнозоркость, которая проходит по мере роста глазного яблока. При небольшой дальнозоркости зрение вдаль и вблизи хорошее, но могут быть жалобы на быструю утомляемость, головную боль при работе. При средней степени дальнозоркости зрение вдаль остается хорошим, а вблизи – затруднено. При высокой дальнозоркости плохим становится зрение и вдаль, и вблизи, так как исчерпаны все возможности глаза фокусировать на сетчатке изображение даже далеко расположенных предметов.

Аметропия глаза выражается в диоптриях как величина, обратная расстоянию от первой поверхности глаза до дальней точки, выраженной в метрах (см. рис. 2.7, а):

$$A = \frac{1}{a_d} \text{ [дптр]}. \quad (2.3)$$

Оптическая сила линзы, необходимая для коррекции близорукости или дальнозоркости, зависит не только от величины аметропии, но и от расстояния от очков до глаза. Контактные линзы располагаются вплотную к глазу, поэтому их оптическая сила равна аметропии.

Например, если при близорукости дальняя точка находится перед глазом на расстоянии 50 см, то $A = \frac{1}{-0.5} = -2$ дптр, то есть для исправления такой близорукости нужны отрицательные очки с оптической силой $\Phi = -2$ дптр.

Слабая степень аметропии считается до 3 диоптрий, средняя – от 3 до 6 диоптрий и высокая степень – свыше 6 диоптрий.

2.4.3. Астигматизм

Причина астигматизма лежит либо в неправильной, несферической форме роговицы (в разных сечениях глаза, проходящих через ось, радиусы кривизны неодинаковы), либо в нецентричном по отношению к оптической оси глаза положении хрусталика. Обе причины приводят к тому, что для различных сечений глаза фокусные расстояния оказываются неодинаковыми.

При астигматизме в одном глазу сочетаются эффекты близорукости, дальнозоркости и нормального зрения. Может, например, случиться, что для вертикального сечения фокусное расстояние равно нормальному, а для горизонтального – больше нормального. Тогда глаз окажется в горизонтальном сечении близоруким и не сможет видеть ясно горизонтальных линий на бесконечности, а вертикальные будет четко различать. На близком расстоянии благодаря аккомодации глаз прекрасно различит вертикальные линии, а горизонтальные будут расплывчатыми.

Астигматизм чаще всего является врожденным, но может стать следствием операции или глазной травмы. Кроме дефектов зрительного восприятия, астигматизм обычно сопровождается быстрой утомляемостью глаз, понижением зрения и головными болями.

Исправление астигматизма возможно при помощи цилиндрических (собирающих или рассеивающих) линз. Астигматизм обычно сочетается с другими дефектами зрения – близорукостью или дальнозоркостью, поэтому астигматические очки зачастую сочетают в себе и сферические, и цилиндрические образующие.

3. Основные характеристики оптических систем

Для того чтобы понять, как работают оптические приборы, необходимо выяснить, что происходит с излучением, когда оно проходит через оптическую систему, и знать основные характеристики оптических систем.

3.1. Оптическая система

Оптическая система – совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, и содержащая диафрагмы. Оптическая система предназначена для формирования изображения посредством перераспределения электромагнитного поля, исходящего от предмета.

Современный оптический прибор состоит из нескольких блоков и элементов, взаимодействующих между собой. Схематически оптический прибор показан на рис. 3.1.

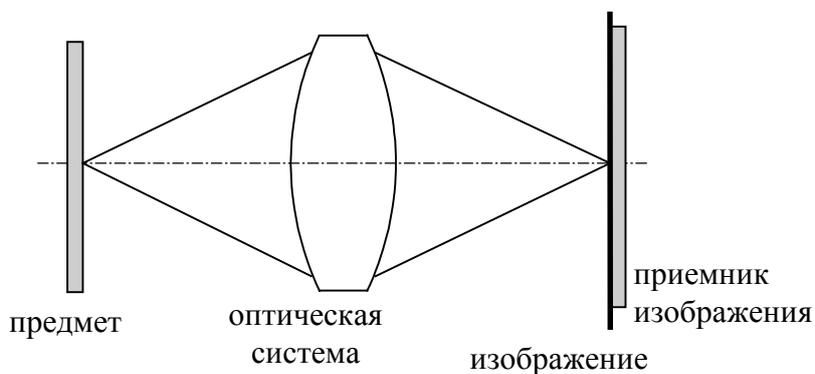


Рис. 3.1. Оптический прибор

Предмет может быть самосветящимся, то есть являться источником излучения (солнце, звезды, лампа накаливания и др.) или несамосветящимся, то есть освещаемым дополнительным источником излучения (обычно через специальную осветительную систему). Приемником изображения может быть человеческий глаз, экран проектора, фотопленка или различные фотоэлектронные устройств (ПЗС-матрица, электронно-оптический преобразователь и т.д.).

Описание работы всего прибора предполагает знание характеристик всех его элементов. Например, разрешающая способность приемника изображения задает требуемое разрешение для оптической системы.

3.2. Присоединительные характеристики

Для правильной работы оптической системы необходимо согласовать ее характеристики с предыдущим звеном (предметом) и последующим (изображением).

3.2.1. Характеристики предмета и изображения

Предмет – это совокупность точек, из которых выходят лучи, попадающие в оптическую систему.

Оптическая система делит все пространство на пространство предметов и пространство изображений, которые могут быть действительными или мнимыми. Для центрированных систем поверхности предмета и изображения считаются плоскостями, перпендикулярными оси, а поле на предмете и изображении – кругами.

Описывать размеры и положение предмета и изображения одним способом не всегда корректно. Рассмотрим описание оптической системы для двух типов предмета и изображения – ближнего и дальнего.

Ближний тип – предмет или изображение расположены на конечном расстоянии. Считается, что от таких предметов исходят расходящиеся пучки лучей. В этом случае полное описание предмета (изображения) представляет собой вектор линейных координат, которые измеряются в мм (таблица 3.1).

Дальний тип – предмет или изображение удалены (расположены в бесконечности). Считается, что от таких предметов исходят параллельные пучки лучей. В этом случае полное описание предмета (изображения) представляет собой вектор угловых координат, точнее тангенсы углов, под которыми виден предмет (изображение) из центра зрачка (таблица 3.1).

Таблица 3.1. Описание предмета и изображения

| Ближний | | Удаленный | |
|---|--|---|--|
| | | | |
| предмет | изображение | предмет | изображение |
| $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ | $\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$ | $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} tg \omega_x \\ tg \omega_y \end{pmatrix}$ | $\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} tg \omega'_x \\ tg \omega'_y \end{pmatrix}$ |

Термины «конечное расстояние» и «бесконечность» достаточно условны и соответствуют степени удаленности предмета (изображения) относительно оптической системы.

Обычно при описании предмета и изображения используют вектор координат $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, но в центрированной оптической системе (обладающей симметрией вращения относительно оптической оси) достаточно одной координаты y .

В зависимости от конкретного типа предмета и изображения возможны четыре различных типа оптических систем.

Если предмет и изображение относятся к дальнему типу, то система называется **телескопической**. Ее основное назначение – наблюдение удаленных объектов. Если предмет – дальнего типа, а изображение – ближнего, то такая система называется **фотографической**, хотя в действительности изображение может формироваться не только на поверхности фотоматериала, но и на поверхности любого другого приемника изображения. Если предмет – ближнего типа, а изображение – дальнего, то это система **микроскопа** (к этим системам относятся также лупы и окуляры). Для **репродукционных систем** предмет и изображение ближнего типа.

Обобщенные размеры поля предмета и изображения ($2y_{0\max}$, $2y'_{0\max}$) – это удвоенные максимальные размеры предмета и изображения. Так же, как и величины предмета (изображения), обобщенные поля для ближнего типа – линейные величины и измеряются в мм, а для дальнего типа – угловые величины.

|| **Передний и задний отрезки** (S , S') – указывают положение предмета (изображения) по отношению к оптической системе.

Для ближнего типа передний отрезок измеряется как расстояние от первой поверхности оптической системы до предмета, а задний отрезок измеряется как расстояние от последней поверхности до изображения (в мм). Для дальнего типа передний и задний отрезки измеряются в обратных миллиметрах (кдптр) относительно входного (выходного) зрачка (таблица 3.1).

Согласно правилу знаков, принятому в оптике (см. Приложение Б), осевые расстояния считаются положительными, если они измеряются по направлению распространения света, то есть слева направо. Для оптических систем с действительными предметом и изображением передний отрезок отрицательный $S' < 0$, а задний положительный $S' > 0$.

Правила построения хода лучей в тонких компонентах приведены в Приложении В.

3.2.2. Зрачковые характеристики

Через оптическую систему проходят не все лучи, которые исходят от предмета. Ограничение размера пучков лучей – результат совместного действия всех имеющихся в оптической системе диафрагм. Однако можно выделить одну диафрагму, которая наибольшим образом ограничивает пучки лучей. Такая диафрагма называется апертурной (рис. 3.2).

Апертурная диафрагма – это диафрагма, которая ограничивает размер осевого пучка, то есть пучка, идущего из осевой точки предмета.

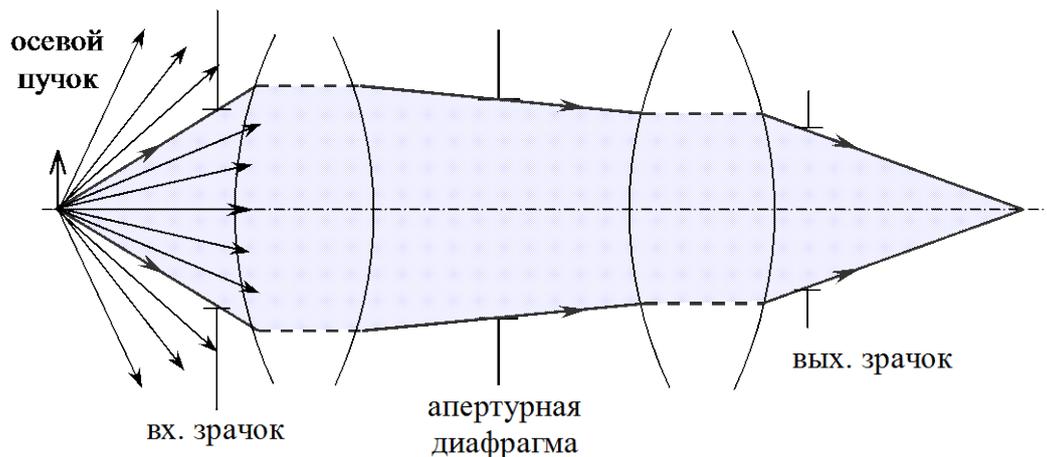


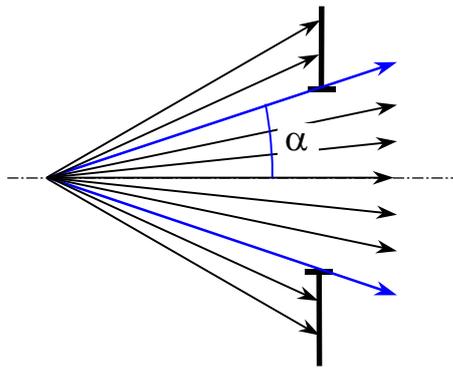
Рис. 3.2. Апертурная диафрагма

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов, сформированное предшествующей частью оптической системы в обратном ходе лучей, называется **входным зрачком оптической системы**.

Выходной зрачок – это изображение апертурной диафрагмы в пространстве изображений, сформированное последующей частью оптической системы в прямом ходе лучей.

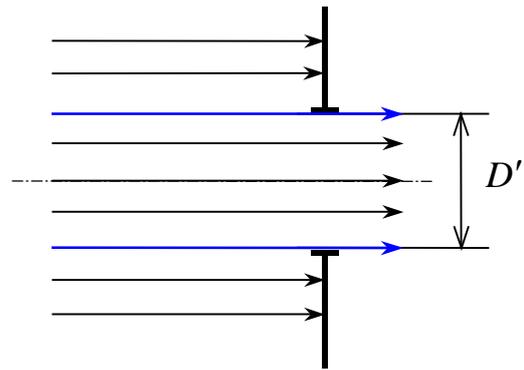
Чтобы определить, какая из диафрагм оптической системы является апертурной, надо найти изображение всех диафрагм в пространстве предметов в обратном ходе лучей. Апертурная диафрагма – это диафрагма, изображение которой видно под наименьшим углом из осевой точки предмета. Если предмет находится на бесконечности, то апертурная диафрагма – это диафрагма, изображение которой имеет наименьшие линейные размеры.

Апертура определяет размер пучка лучей, входящего или выходящего из оптической системы. **Передняя (задняя) апертура** – это размер входного (выходного) зрачка. **Числовая апертура** – это произведение размера зрачка на показатель преломления (рис. 3.3).



близкий предмет: $A = n \cdot \sin \alpha$

близкое изображение: $A' = n' \cdot \sin \alpha'$



удаленный предмет: $A = n \cdot \frac{D'}{2}$

удаленное изображение: $A' = n' \cdot \frac{D'}{2}$

Рис. 3.3. Апертуры

Еще одной важной характеристикой оптической системы является положение входного (выходного) зрачка. Так как изображение чаще всего воспринимается или последующей оптической системой, или глазом, необходимо, чтобы выходной зрачок оптической системы совпадал с входным зрачком прибора или глаза по положению и размерам.

Для удаленного предмета или изображения входной (выходной) зрачок находится близко к оптической системе, поэтому **положение зрачка** (S_p или S'_p) измеряется относительно оптической системы в обратных миллиметрах, то есть в килодиоптриях.

Для близкого предмета или изображения имеет значение положение зрачка относительно предмета или изображения, кроме того, расстояния от зрачка до прибора могут быть бесконечно велики (при телецентрическом ходе лучей), поэтому **положение зрачка** (S_p или S'_p) измеряется в миллиметрах от предмета (изображения).

В системах, формирующих изображение дальнего типа, приемником изображения, как правило, является глаз. Для систем, работающих с глазом, выходной зрачок должен быть по размеру и положению согласован со зрачком глаза. При высокой освещенности объекта (в лабораторных приборах) диаметр зрачка глаза можно принять равным 2 мм. Для приборов, работающих в условиях недостаточной освещенности, диаметр зрачка глаза считают равным 4-6 мм. Для оптических прицелов диаметр зрачка глаза принимают и большие – 8 мм, чтобы при тряске зрачок глаза мог быть совмещен с зрачком прибора

3.2.3. Спектральные характеристики

Спектральные характеристики необходимы для согласования интервала длин волн, для которого предназначена оптическая система. Обычно все

расчеты хода лучей в оптической системе делают для нескольких длин волн из всего спектрального диапазона:

- λ_n, λ_v – нижняя и верхняя границы спектрального интервала;
- λ_0 – центральная (основная) длина волны.

В оптической системе происходят потери света за счет его поглощения стеклом и отражения на поверхностях.

Функция относительного спектрального пропускания $\tau(\lambda)$ показывает, какое количество света пропускает оптическая система по отношению к падающему свету.

Функция относительного спектрального пропускания зависит от длины волны, так как оптическое излучение разной длины волны по-разному поглощается и отражается оптической системой.

3.3. Передаточные характеристики

Передаточные характеристики показывают, как прибор преобразует предмет в изображение.

Воздействие оптической системы на исходящее от предмета излучение сводится, прежде всего, к преобразованию расходящегося пучка лучей, исходящего от предмета, в пучки, сходящиеся на изображении (при этом происходит изменение масштаба предмета). Кроме того, оптическая система ограничивает размеры пучка лучей и ослабляет интенсивность света (за счет поглощения в стекле и потерь на отражение от поверхностей). Это явление влияет на передачу прибором энергии предмета. Немаловажно и то, что оптическая система искажает структуру предмета вследствие нарушения формы пучка лучей. Этот фактор называется аберрациями и определяет качество и структуру изображения.

Таким образом, оптический прибор осуществляет передачу масштаба, энергии и структуры предмета. Следовательно, передаточные характеристики можно разделить на три группы.

3.3.1. Масштабные передаточные характеристики

Масштабные передаточные характеристики описывают передачу оптической системой размеров и формы предмета, то есть преобразование координат на предмете в координаты на изображении.

Обобщенное увеличение – это отношение величины изображения к величине предмета:

$$y' = V \cdot y. \quad (3.1)$$

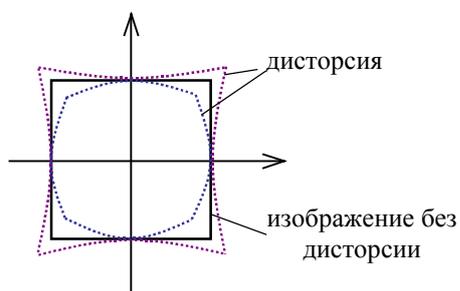
Обобщенное увеличение также связывает между собой входные и выходные апертуры:

$$A = V \cdot A' . \quad (3.2)$$

Увеличение для изображающих приборов каждого типа из-за различного смысла величины предмета и изображения имеет разные размерность и название (таблица 3.2). Обобщенное увеличение в телескопических системах безразмерное и называется угловым увеличением, так как размеры и предмета, и изображения в этом случае угловые. Обобщенное увеличение фотографических систем измеряется в мм (отношение линейной величины изображения к угловой величине предмета) и определяется передним фокусным расстоянием. Обобщенное увеличение микроскопов измеряется в обратных мм и определяется обратным задним фокусным расстоянием. Обобщенное увеличение репродукционных систем безразмерное и называется поперечным увеличением.

Таблица 3.2. Обобщенное увеличение

| Тип | Предмет | Изображение | Обобщенное увеличение | Размерность |
|--------------------------|----------|-------------|--|------------------|
| телескопическая система | Угловой | угловое | угловое увеличение β | – |
| фотографический объектив | Угловой | линейное | переднее фокусное расстояние f | мм |
| микроскоп | Линейный | угловое | обратное заднее фокусное расстояние $\frac{1}{f'}$ | мм ⁻¹ |
| репродукционная система | Линейный | линейное | поперечное увеличение U | – |



В реальных оптических приборах увеличения в различных точках предмета не одинаковы. Это явление называется **дисторсией**. Наличие дисторсии приводит к искажению прямых линий, не проходящих через ось. В этом случае изображение квадратного предмета имеет выпуклые или вогнутые стороны.

Допустимая относительная дисторсия (то есть дисторсия, которая при восприятии глазом не вызывает ощущения, что изображение искажено) – около 5-10%. Более точное исправление дисторсии важно в измерительных приборах, так как наличие дисторсии приводит к нелинейной ошибке измерений. Например, в проекционных системах для производства микросхем допуск на абсолютную дисторсию не превышает 20 нм.

Кроме обобщенного увеличения для некоторых приборов, работающих с глазом (телескопов, микроскопов, луп и окуляров), существует понятие видимого увеличения.

Видимое увеличение – это отношение тангенса угла, под которым предмет наблюдается через оптическую систему, к тангенсу угла, под которым предмет наблюдается невооруженным глазом.

3.3.2. Энергетические передаточные характеристики

Энергетические передаточные характеристики описывают передачу прибором энергии предмета. Поскольку через оптическую систему проходят не все лучи, исходящие из предмета, и поскольку в самой оптической системе происходят потери света на поглощение и отражение, освещенность изображения всегда ниже освещенности предмета.

Светосила H характеризует способность прибора давать более или менее яркие изображения:

$$H = \frac{E'}{E}, \quad (3.3)$$

где E – освещенность предмета, E' – освещенность изображения.

Светосила определяется апертурами и коэффициентом спектрального пропускания.

Функция светораспределения по полю Φ характеризует равномерность изображения:

$$\Phi = \frac{H}{H_0}, \quad (3.4)$$

где H_0 – светосила в центре поля, H – светосила на краю поля.

Основные энергетические величины, используемые в оптике, приведены в Приложении Г.

В рядовых фотографических приборах допускается падение освещенности на краю поля до 20%, в специальных случаях допуск на падение освещенности может быть порядка 1-2%.

3.3.3. Структурные передаточные характеристики

Изображающие приборы с одинаковым увеличением и светосилой могут давать изображения различного качества в смысле передачи тонкой структуры предмета (более или менее резкие, с большим или меньшим количеством

мелких деталей). Способность прибора предавать тонкую структуру предмета относится к числу важнейших свойств изображающего прибора.

Функция рассеяния точки

Функция рассеяния точки (ФРТ) описывает распределение интенсивности в изображении светящейся точки. Изображение светящейся точки называют **пятном рассеяния**.

Поскольку предмет можно представить как совокупность светящихся точек, все изображение можно представить как совокупность ФРТ.

Картина ФРТ для идеальной оптической системы (рис. 3.4) симметрична относительно оптической оси и состоит из центрального максимума (диска Эри) диаметром $1.22 \frac{\lambda}{A'}$ и вторичных максимумов в виде колец.

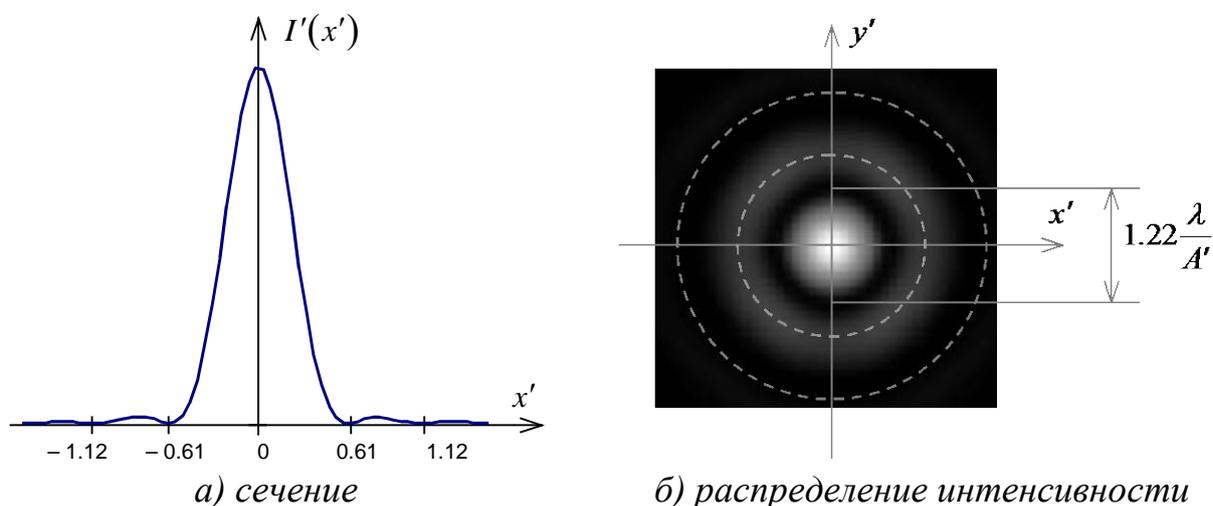


Рис. 3.4. Функция рассеяния точки

Разрешающая способность по Рэлею

Разрешающая способность оптической системы – это способность изображать отдельно два близко расположенных точечных предмета.

Иногда вместо понятия «разрешающая способность» используют понятие **предела разрешения**, то есть минимального расстояния, при котором два близко расположенных точечных предмета будут изображаться как отдельные.

Критерий Релея заключается в том, что при провале в распределении интенсивности изображения двух близких точек в 20% эти точки будут восприниматься как отдельные. Для этого необходимо, чтобы центральный максимум в изображении одной точки приходился бы на первый минимум в изображении другой (рис. 3.4).

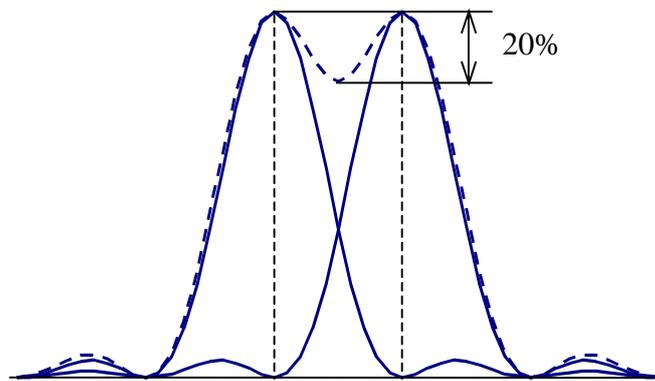


Рис. 3.4. Разрешение двух близких точек

Разрешение по Рэлею характеризует качество изображения астрономических телескопов, спектральных приборов и других оптических систем, для которых предметами являются точки или линии.

Разрешающая способность по Фуко

Критерий Фуко применяется для оценки качества изображения в оптических системах, передающих объекты сложной структуры (например, в фотообъективах). Для определения разрешающей способности по Фуко используется тест-объект (мира Фуко), который состоит из черно-белых штрихов разной толщины (рис. 3.5). Поскольку разрешающая способность оптической системы может зависеть от направления штрихов, в мире Фуко линии располагаются по четырем разным направлениям.

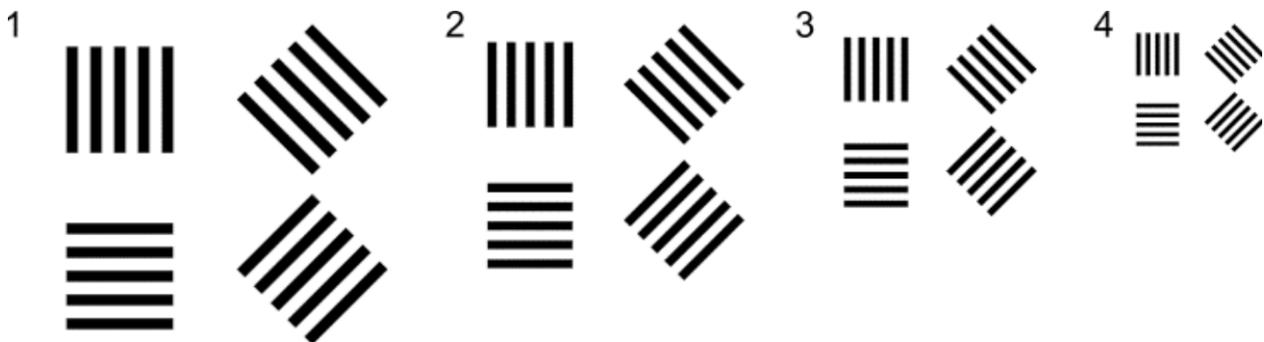


Рис. 3.5. Штриховая мира

Разрешающая способность определяется как максимальная пространственная частота периодического тест-объекта, в изображении которого еще различимы штрихи.

Для удаленного изображения пространственная частота измеряется в количестве линий на единицу угла (лин/рад), а для близкого изображения – в количестве линий на единицу длины (лин/мм).

Разрешающую способность обычно определяют по графику частотно-контрастной характеристики оптической системы (рис. 3.6), которая

показывает зависимость контраста изображения (если точнее – коэффициента передачи контраста) периодического тест-объекта от его пространственной частоты.

Контраст для периодических изображений определяется разницей между максимальной и минимальной интенсивностью. Чем больше контраст, тем лучше различаются мелкие детали изображения. При единичном (абсолютном) контрасте изображение резкое, черно-белое. При нулевом контрасте штрихов на изображении не различить, все изображение однородного серого цвета.

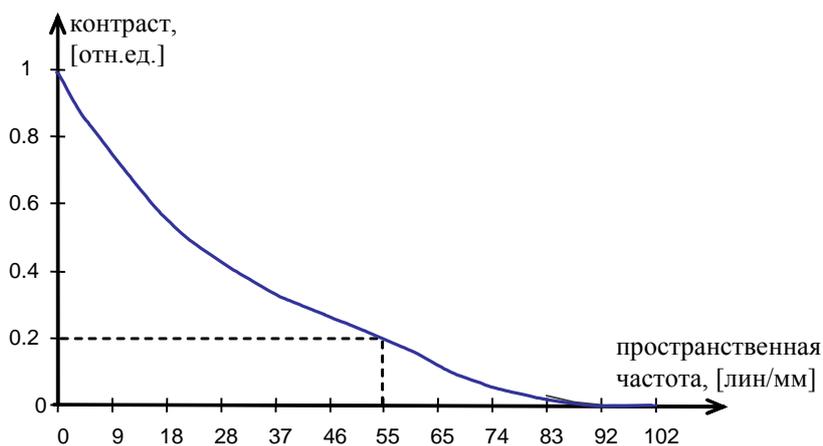


Рис. 3.6. Частотно-контрастная характеристика

Изображение нельзя зарегистрировать или увидеть в том случае, когда контраст на изображении меньше порогового контраста, который зависит от приемника изображения. Поэтому разрешающая способность определяется для заданного контраста (обычно для контраста 0.2). В требованиях к качеству оптической системы обычно указывают предельную частоту для определенного контраста, например, частота 55 лин/мм при контрасте 0.2 (рис. 3.6).

Предельная разрешающая способность для оптических систем определяется апертурами, длиной волны и aberrациями.

Аберрации

Аберрация (лат. – отклонение) – это отклонение хода реального луча от идеального. Аберрации приводят к ухудшению качества изображения.

Существует два фактора, которые влияют на структуру и качество изображения в оптической системе: дифракция и aberrации. Эти факторы действуют совместно. Если aberrации малы и преобладает дифракция, то такие системы называются **дифракционно-ограниченными**. В дифракционно-ограниченных системах величина диска Эри пропорциональна отношению апертуры к длине волны. При полном отсутствии aberrаций ФРТ имеет вид, показанный на рис. 3.4.

Если aberrации велики, и дифракция теряется на фоне aberrаций, то такие системы называются **геометрически-ограниченными**. В геометрически-ограниченных системах формирование изображения вполне корректно описывается с позиций геометрической оптики, без привлечения теории дифракции. В таких системах поперечные aberrации по размерам значительно превосходят диск Эри, а ФРТ ни по размерам, ни по форме не похожа на дифракционную.

Волновая aberrация – это отклонение выходящего волнового фронта от идеального, измеренное вдоль данного луча в количестве длин волн (рис. 3.7):

$$W = \frac{n' \cdot \Delta \ell}{\lambda}. \quad (3.5)$$

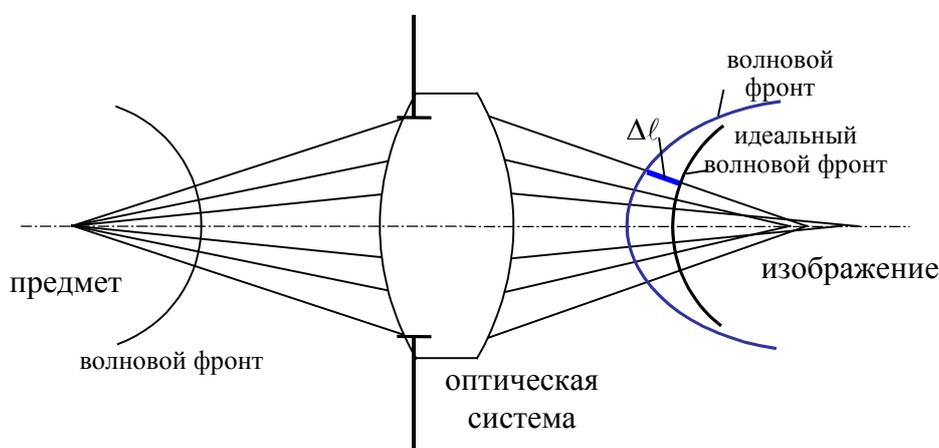


Рис. 3.7. Волновая aberrация

Существуют и другие виды aberrаций, связанных с волновой – поперечные и продольные.

Поперечные aberrации $\Delta x'$, $\Delta y'$ – это отклонения координат точки пересечения реального луча с плоскостью изображения от координат точки идеального изображения (рис. 3.8). Для изображения ближнего типа они выражаются в миллиметрах, для дальнего – в угловой мере (радианы или градусы).

Продольная aberrация $\Delta S'$ – это отклонение координаты точки пересечения реального луча с осью от координаты точки идеального изображения вдоль оси (рис. 3.8). Для изображения ближнего типа продольная aberrация выражается в миллиметрах, для дальнего – в обратных миллиметрах (килодиоптриях).

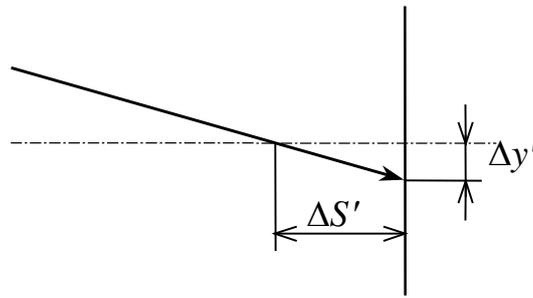


Рис. 3.8. Поперечные и продольные aberrации

Волновая, поперечные и продольная aberrации – это разные формы представления одного явления. При оценке качества изображения за исходную модель aberrационных свойств оптической системы берут волновую aberrацию, то есть о качестве оптической системы судят по величине волновой aberrации. Однако, если aberrации велики, то более целесообразно использовать для оценки качества изображения поперечные aberrации.

В оптической системе могут присутствовать **монохроматические и хроматические aberrации**. Даже если оптическая система работает в узком спектральном диапазоне излучения, в ней присутствуют **монохроматические aberrации**. **Хроматические aberrации** – это проявление зависимости характеристик оптической системы от длины волны излучения, они появляются вследствие дисперсии показателя преломления (зависимости показателя преломления оптических сред от длины волны). Хроматические aberrации приводят к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность. **Хроматизм положения** – это aberrация, при которой изображения одной точки предмета расположены на разном расстоянии от оптической системы для разных длин волн. **Хроматизм увеличения** – это aberrация, при которой увеличение оптической системы зависит от длины волны. Вследствие этого вместо изображения точки образуется цветная полоска.

4. Фотоаппараты

Фотоаппарат – пожалуй, самый распространенный оптический прибор. В наше время фотоаппарат есть практически у каждого. Причем современные компактные фотоаппараты настолько просты в использовании, что многие не представляют себе принципа действия фотоаппарата и не понимают, какие характеристики важны для его работы.

Фотоаппарат как оптический прибор состоит из нескольких составных частей: объектив, видоискатель, система фокусировки, затвор (диафрагма), система экспонометрии и приемник изображения (пленка или ПЗС-матрица). Кроме перечисленных блоков, в состав фотоаппарата обычно входят такие устройства как вспышка, устройство перемотки пленки и др.

4.1. Характеристики объектива фотоаппарата

Объектив фотоаппарата формирует действительное обратное изображение предмета на поверхности приемника изображения. Объектив – самая важная часть фотоаппарата. Рассмотрим его основные характеристики.

4.1.1. Фокусное расстояние фотообъектива

Фокусное расстояние определяет увеличение объектива и поле зрения:

$$y' = f \cdot \operatorname{tg} \omega = -f' \cdot \operatorname{tg} \omega, \quad (4.1)$$

где ω – поле зрения объектива, y' – размер изображения.

Чем меньше фокусное расстояние, тем больше поле зрения и тем меньше увеличение. Размер изображения фотоаппарата определяется диагональю кадра

$g: y' = \frac{g}{2}$. У стандартной пленки размер кадра 35x24 мм, а диагональ кадра около 43 мм.

4.1.2. Поле зрения фотообъектива

Поле зрения объектива называется наибольший угол с вершиной в оптическом центре объектива, при котором все предметы, находящиеся в его пределах, будут изображены объективом в плоскости его кадрового окна (рис. 4.1). За пределами этого угла лежит изображение со значительно меньшими резкостью и яркостью.

Угловое поле зрения определяется отношением диагонали кадра к фокусному расстоянию объектива:

$$2\operatorname{tg} \omega = \frac{g}{f'}. \quad (4.2)$$

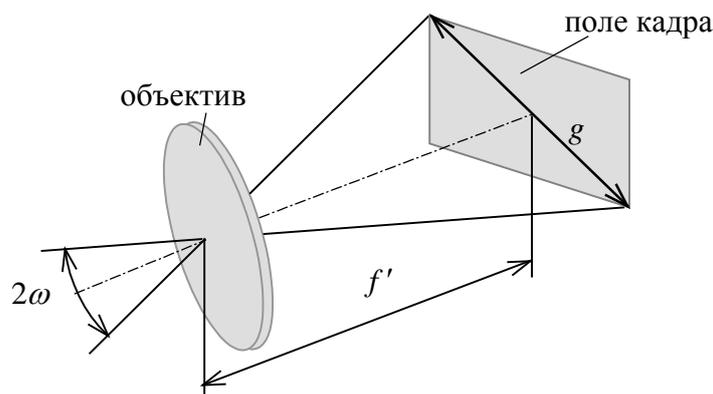


Рис. 4.1. Поле зрения объектива

4.1.3. Относительное отверстие фотообъектива

Относительное отверстие – это абсолютное значение отношения диаметра входного зрачка к заднему фокусному расстоянию объектива:

$$\text{отн.отв.} = D/f'. \quad (4.3)$$

Результат деления D на f' принимает значение меньше единицы. Относительное отверстие принято выражать в виде соотношения $1:k$ (например, $1:3.5$), где k – диафрагменное число (величина, обратная относительному отверстию). Иногда на объективах для обозначения относительного отверстия используют надпись f/k (например, $f/3.5$ эквивалентно записи $1:3.5$ и указывает, что фокусное расстояние в 3.5 раза больше, чем диаметр входного зрачка).

Объективы с большими относительными отверстиями имеют преимущества перед остальными в условиях пониженной освещенности. Однако увеличение относительного отверстия простых объективов приводит обычно к снижению качества изображения, поскольку aberrации наиболее заметны при большой апертуре.

Светосила объектива – способность объектива передавать яркость объекта.

Геометрическая светосила выражается квадратом относительного отверстия:

$$H_r = \left(D/f' \right)^2. \quad (4.4)$$

Существует стандартный ряд относительных отверстий: $1:0.7$; $1:1$; $1:1.4$; $1:2$; $1:2.8$; $1:3.5$; $1:4$; $1:5.6$; $1:8$; $1:11$; $1:16$ и т.д. При переходе от одного

относительного отверстия из этого ряда к следующему диаметр диафрагмы уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, а светосила – в 2 раза.

Объектив называют **светосильным**, если его диафрагменное число $k = 2.8...4.5$, **сверхсветосильным**, если $k < 2$ и **малосветосильным**, если $k > 5.6$.

Фактическая светосила всегда несколько меньше той, которую должно было бы обеспечивать геометрическое относительное отверстие, из-за частичного поглощения света в массе стекла и отражения света от поверхностей линз, граничащих с воздухом.

Эффективная светосила учитывает коэффициент светопропускания фотообъектива:

$$H_{\text{эф}} = \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \cdot \tau, \quad (4.5)$$

где τ – коэффициент светопропускания фотообъектива.

Для увеличения эффективной светосилы и уменьшения бликов используют **просветляющие покрытия**. Принцип действия просветляющих покрытий следующий: на поверхность линз наносят один или несколько слоев тончайшей пленки с определенным показателем преломления. Толщина этой пленки составляет $1/4$ длины волны лучей того цвета, для которого производится просветление оптики ($\lambda/4$). За счет интерференции света, отражаемого передней и задней поверхностями пленки, снижаются потери света на отражение и коэффициент светопропускания линзы увеличивается. Благодаря использованию просветляющих покрытий в современных просветленных объективах разница между геометрической и эффективной светосилой составляет менее 2–3%.

4.1.4. Разрешающая способность фотообъектива

Разрешающая способность фотообъектива – это способность объектива передавать мелкие детали в фотоизображении.

Разрешающая способность фотообъектива выражается максимальным числом штрихов (линий) на 1 мм в центре и на краю фотоизображения. Фотографическая разрешающая способность определяется путем фотографирования штриховой миры и учитывает не только характеристики объектива, но и характеристики фотоматериала.

4.1.5. Глубина резкости фотообъектива

Поскольку у всех объективов есть аберрации, одна точка объекта всегда будет изображаться в виде кружка рассеяния. Однако при рассмотрении

изображения глазом кружок рассеяния обычно не заметен, поскольку разрешающая способность глаза ограничена. Максимально допустимый размер кружка рассеяния, который глаз воспринимает как одну точку, называется **допустимым кругом нерезкости**. Для негативов форматом 24x36 мм допустимый круг нерезкости составляет около 0.03-0.05 мм (учитывая, что изображение увеличивается до фотографии 13x18см и рассматривается с расстояния 25-30 см).

Из рисунка 4.2 видно, что, хотя с наилучшей резкостью изображается тот объект, на который произведена наводка на резкость, действительно резкими получаются объекты, расположенные несколько дальше и ближе от него, то есть имеются передняя и задняя границы, между которыми расположено резко изображаемое пространство.

Глубина резкости объектива – это расстояние между самым ближним и самым дальним предметом, которые при данной диафрагме будут резкими.

Глубина резкости объектива зависит от относительного отверстия и фокусного расстояния. Чем меньше относительное отверстие и фокусное расстояние объектива, тем больше глубина резкости, поскольку диаметр кружков нерезкости уменьшается (рис. 4.2). Например, при $k = 2.8$, передняя граница будет на расстоянии около 15 м, при $k = 16$ – на расстоянии 1.5 м.

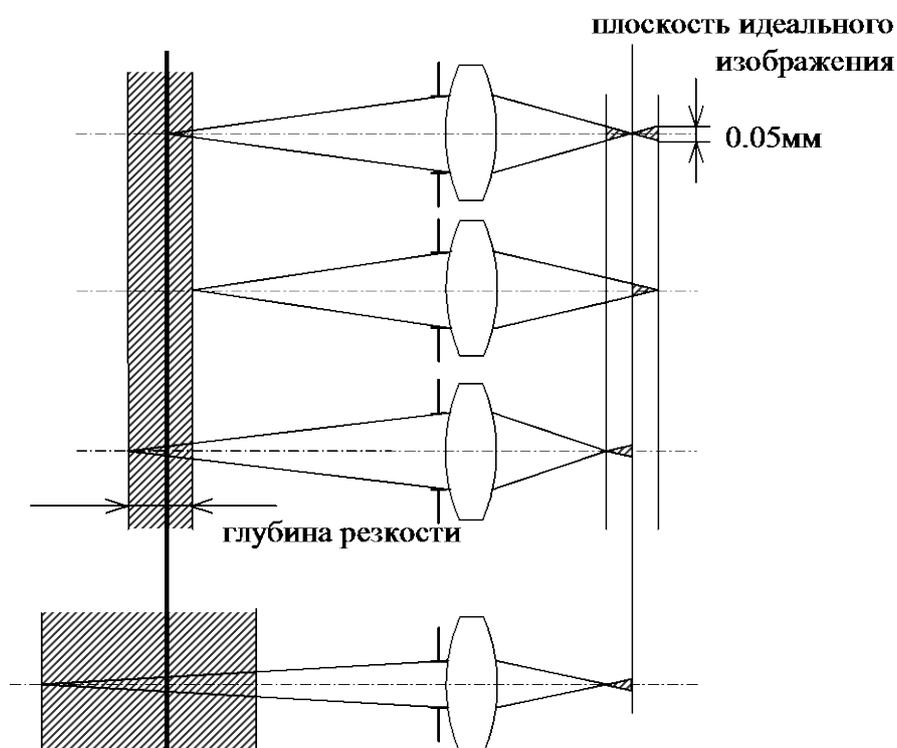


Рис. 4.2. Глубина резко изображаемого пространства

Глубина резкости объектива зависит и от расстояния до объекта: чем дальше объект, тем больше глубина резкости. Благодаря этому возможно такое положение объекта, при котором дальний предел глубины резкости станет равным бесконечности. Съемочное расстояние в этой точке, то есть самое короткое расстояние, при котором «бесконечность» попадает в область глубины резкости, называется **гиперфокальным расстоянием**. Если установить объектив на гиперфокальное расстояние, то область глубины резкости будет простирается от половины гиперфокального расстояния до бесконечности.

Например, если у объектива $f = 35$ мм диафрагма установлена на $k = 11$ и съемочное расстояние установлено на гиперфокальное расстояние 3 м, то все объекты в пределах глубины резкости (от 1.5 м до бесконечности) будут находиться в фокусе.

4.2. Классификация фот объектив ов

В зависимости от поля зрения, которое определяется соотношением фокусного расстояния и диагонали кадра, объективы делятся на три группы:

- нормальные (поле зрения $40 - 60^\circ$);
- широкоугольные или короткофокусные (поле зрения более 60°);
- узкоугольные или длиннофокусные (поле зрения менее 40°).

Объективы с разными фокусными расстояниями служат определенным целям. Во многих жанрах фотографии используются оптимальные фокусные расстояния, которые позволяют добиться необходимого результата, свойственного этому жанру. Например, при съемке пейзажа часто прибегают к широкоугольным объективам с небольшим фокусным расстоянием, а при портретной съемке обычно используют длиннофокусные объективы.

4.2.1. Нормальные объективы

У нормальных объективов фокусное расстояние близко по величине диагонали кадра $f' \approx g$. Для обычной пленки диагональ кадра $g \approx 43$ мм, поэтому к нормальным относят все объективы, фокусное расстояние которых $f' = 40 - 50$ мм. Поле зрения у них около $40 - 60^\circ$.

Через такой объектив кадр и перспектива выглядят примерно так же, как видит человеческий глаз, поэтому у таких объективов наиболее натуральное изображение. Нормальные объективы могут использоваться практически при любых съемках.

4.2.2. Широкоугольные (короткофокусные) объективы

У широкоугольных объективов фокусное расстояние меньше диагонали кадра $f' < g$. Широкоугольные объективы характеризуются небольшим фокусным расстоянием в диапазоне приблизительно $f' = 20 - 35$ мм. Поле зрения у таких объективов больше 60° .

Широкоугольные объективы с фокусным расстоянием 28-35 мм являются наиболее распространенными. Их особенностью является большая глубина резкости, к их недостаткам можно отнести наличие перспективных искажений при съемке близкорасположенных объектов и неравномерное освещение кадра (большее в центре и меньшее по краям). Этот тип объективов предназначен для снимков самого разнообразного жанра, когда необходим большой угол зрения, например при съемке пейзажа или при съемке общим планом в ограниченном пространстве.

Сверхширокоугольные объективы имеют фокусное расстояние приблизительно до 20 мм и охватывают очень большой угол съемки ($2\omega > 100^\circ$), что иногда необходимо для пейзажной или архитектурной съемки. Примером такого объектива может служить объектив типа «Рыбий глаз», поле зрения у которого 180° . Поле изображения у такого объектива обычно круглой формы, а все линии, не проходящие через центр изображения, искажены.

4.2.3. Узкоугольные (длиннофокусные) объективы

Узкоугольные объективы имеют фокусное расстояние больше диагонали кадра $f' > g$, а поле зрения менее 40° . Фокусное расстояние таких объективов больше 50 мм. Обычно в качестве длиннофокусных используются объективы специальной конструкции (**телеобъективы**), которые позволяют добиться большого фокусного расстояния при сравнительно небольшой длине самого объектива.

Так как узкоугольные объективы приближают объект съемки, их используют при съемке удаленных предметов, когда надо увеличить масштаб изображения (например, при $f' = 300$ мм изображение будет в 6 раз крупнее, чем при $f' = 50$ мм). У таких объективов небольшая глубина резкости.

4.2.4. Объективы с переменным фокусным расстоянием

Объективы с переменным фокусным расстоянием (**ZOOM-объективы**) позволяют получать изображения различного масштаба при неизменном расстоянии до объекта съемки. Например, с помощью объектива с диапазоном фокусных расстояний $f = 35 - 70$ мм можно изменить масштаб съемки в два раза.

Оптические системы ZOOM-объективов состоят из большого числа оптических элементов, и изменение их фокусного расстояния обеспечивается путем перемещения внутренних компонентов (рис. 4.3).

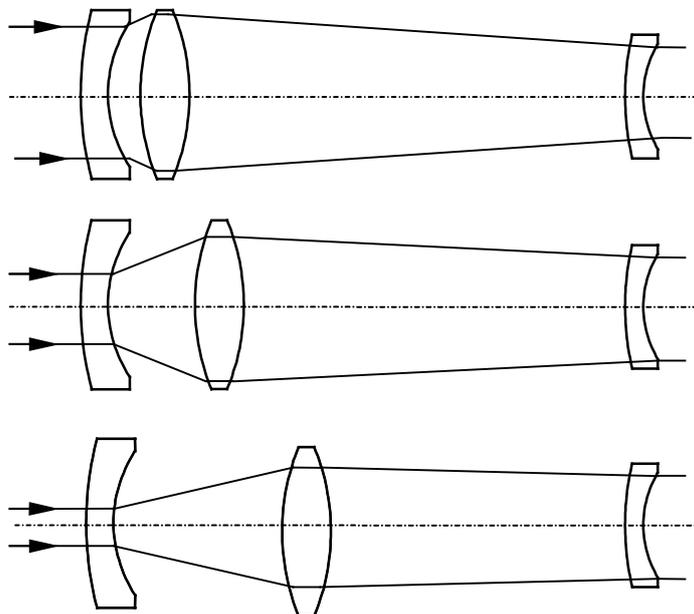


Рис. 4.3. Объективы с переменным фокусным расстоянием

ZOOM объективы могут иметь самый разнообразный диапазон фокусных расстояний, например 17-35 мм, 24-120 мм, 100-300 мм. Относительное отверстие у ZOOM-объективов обычно разное для разных фокусных расстояний. Например, объектив 28-105 мм имеет значения диафрагмы от 3.5 до 4.5, это означает, что минимальное значение относительной диафрагмы для 28 мм - 3.5, а для 105 мм - 4.5. Обозначается это как 28-105/3.5-4.5.

4.3. Видоискат ели

Видоискатель позволяет определить границы изображаемого в кадре пространства и осуществить фокусировку изображения объектов съемки. По устройству видоискателя фотокамеры обычно делят на две группы: зеркальные (у которых в видоискателе видно изображение, прошедшее через объектив) и не зеркальные.

В не зеркальных фотоаппаратах объект съемки виден через специальный видоискатель, не зависящий от объектива. Обычно видоискатель представляет собой примитивную телескопическую систему, увеличение которой соответствует увеличению объектива. Рамки коррекции параллакса позволяют оценить сдвиг реального изображения относительно видимого в видоискателе, который появляется при небольших дистанциях съемки из-за того, что оптические оси объектива и видоискателя не совпадают.

В зеркальных фотоаппаратах между фотопленкой и объективом под углом 45° к оптической оси объектива располагается откидывающееся зеркало, направляющее изображение вверх на матовое стекло. При этом на матовом стекле получается зеркально обращенное изображение (рис. 4.4). Пентапризма с крышкой позволяет рассматривать через видоискатель прямое изображение.

Расстояние до матового стекла и расстояние до пленки одинаковы. При нажатии спусковой кнопки зеркало поднимается вверх и закрывает доступ света в камеру через видоискатель и пентапризму. Затем срабатывает затвор, пропуская лучи на фотопленку, после чего зеркало возвращается в исходное положение.

Зеркальные камеры имеют неоспоримые преимущества. Во-первых, в видоискателе видно то поле кадра, которое и будет на пленке. Во-вторых, зеркальные фотоаппараты позволяют одновременно с определением границ кадра выполнять и наводку объектива на резкость.

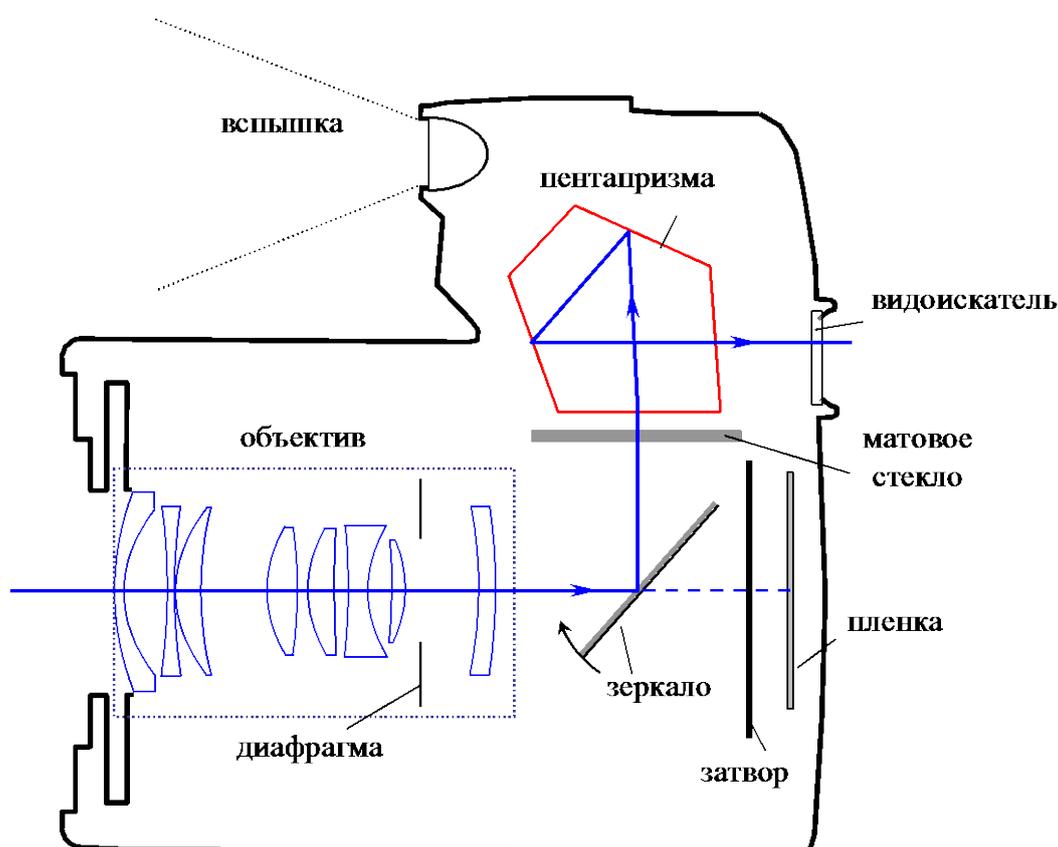


Рис. 4.4. Зеркальный фотоаппарат

4.4. Система фокусировки

В создании качественных снимков одну из важнейших функций выполняет система фокусировки фотоаппарата, то есть устройство наводки на резкость.

В самых простых фотоаппаратах не осуществляется никакой фокусировки объектива (свободный фокус, или focus free). За счет большой глубины резкости удовлетворительные снимки будут приблизительно в диапазоне от 1-1.5 метров до 8-10 метров. Дальше резкость будет немного хуже, а ближе 1.5 метров изображение будет абсолютно нерезким. Для достижения большой глубины резкости объективы таких фотоаппаратов широкоугольные и малосветосильные.

В зеркальных фотоаппаратах на матовом стекле получается изображение, которое можно наблюдать через видоискатель, что позволяет одновременно с определением границ кадра выполнять и наводку объектива на резкость.

При ручном режиме фокусировки фотограф вращением специального кольца на объективе добивается наиболее резкого изображения желаемого объекта на матовом стекле, которое видно через видоискатель. В автофокусном режиме резкость изображения достигается за счет специальных датчиков и механизма перемещающего линзы объектива.

Активный автофокус

Активный автофокус измеряет расстояние до объекта съемки с помощью инфракрасного импульса (расстояние определяется по смещению на фотоэлементе), и камера автоматически фокусируется на этот объект. Особенностью активного автофокуса является то, что расстояние определяется до ближайшего объекта. Прозрачные предметы, такие, как стекло, могут мешать правильной фокусировке.

Активный автофокус может иметь некоторые специальные режимы:

- **Многочуевой автофокус** – камера оценивает расстояние по нескольким точкам на всем поле. Такая система часто исключает ошибки фокусировки за счет того, что резкость наводится не только по центральной части кадра.
- **Точечный замер** – замер расстояния производится по центру кадра (используется более узкая рамка автофокуса вместо стандартной). Этот режим дает возможность сделать снимок в сложных условиях фокусировки, например, когда главный объект съемки располагается на дальнем плане, а второстепенный объект – на переднем плане.

Пассивный автофокус

Принцип действия **пассивного автофокуса** следующий: на частые полосы из светочувствительного материала (матрицу автофокуса) попадает изображение, прошедшее через объектив. Если объект не в фокусе, то изображение размыто и соседние полосы освещаются почти одинаково. Если объект в фокусе, то изображение четкое и разница освещенности соседних полосок значительная. Микропроцессор фотоаппарата анализирует полученную информацию и настраивает объектив до получения контрастного

изображения, после чего сообщает камере расстояние до объекта, а аппарат вычисляет необходимые параметры съемки.

Преимуществом пассивного автофокуса является то, что камера ориентируется на резкость предмета, а не на измерение расстояния (например, съемка через стекло не представляет никакой трудности). С другой стороны, для нормальной работы пассивного автофокуса требуется наличие некоего минимального уровня контрастности объекта и минимального уровня освещенности.

4.5. Экспозиция

Экспозиция – это количество света, попадающее на фотоматериал:
 $\langle \text{экспозиция} \rangle = \langle \text{интенсивность света} \rangle \cdot \langle \text{время воздействия} \rangle.$

Интенсивность света контролируется диафрагмой, время воздействия контролируется выдержкой. Таким образом, есть набор вариантов значения выдержки и диафрагмы, при котором экспозиция не меняется.

Затвор – устройство, позволяющее открывать для света доступ к фотоматериалу.

Выдержка – время, в течение которого затвор фотоаппарата открыт для экспонирования кадра.

Выдержка измеряется в долях секунды (например, 100 означает 1/100 сек.) и может меняться от нескольких секунд до тысячных долей секунды. Существует стандартный ряд выдержек: 1/2000; 1/1000; 1/500; 1/250; 1/125; 1/60; 1/30; 1/15; 1/8; 1/4; 1/2; 1; 2 секунды и т.д.

Для съемки «с руки» (без штатива) рекомендуется использовать выдержки не ниже 1/60 сек. Применение больших выдержек ведет к смазыванию кадра из-за естественного дрожания руки. Для съемки быстродвижущихся объектов рекомендуется использовать минимально возможную выдержку – 1/2000 сек. Такая выдержка позволяет «заморозить» на кадре практически любое движение.

В зеркальных фотоаппаратах диафрагма обычно состоит из нескольких «лепестков», способных двигаться, что позволяет постоянно менять диаметр окна (ириновая диафрагма). Путем изменения диаметра диафрагмы можно регулировать количество света, проходящее через оптическую систему. Чем больше диафрагма, тем меньшую можно установить выдержку, и тем меньше будет глубина резкости.

Чтобы установить правильную экспозицию (диафрагму и выдержку), нужно знать светочувствительность пленки и яркость объекта.

Для измерения яркости объекта созданы автоматические экспонометры. Эти приборы основаны на измерении освещенности фотоэлементом, преобразующим свет в электрический ток. Замерив освещенность, прибор показывает необходимые выдержку и диафрагму в зависимости от светочувствительности используемого фотоматериала. В зеркальных фотоаппаратах для повышения точности освещенность замеряется через объектив («Through the Lens»), что позволяет учитывать световые характеристики и объектива, и светофильтров, установленных на объективе.

Настройка всех автоматических экспонометров предполагает, что от объекта отражается 18% света (среднесерый объект). Это соответствует большинству стандартных ситуаций, однако, если весь кадр занимает черный или белый фон, на снимке в результате получится серый фон. При съемке сюжетов с очень сильной разницей в освещении, например, на ярком солнце, тени получатся черными, а светлые объекты – белыми. В связи с этим, фотограф в нестандартных ситуациях сам должен решать, каким образом скорректировать предлагаемую экспонометром величину, чтобы получить желаемый результат. Экспокоррекция – возможность ввести поправку к экспозиции относительно правильного значения, тогда все кадры будут сниматься с недодержкой или передержкой. Этот режим используется при неравномерном освещении объекта (например, фон значительно темнее или светлее объекта), при сложной световой ситуации (много теней или разных источников света) либо со специальными целями.

4.6. Особенность и цифровых фотоаппаратов

В последнее время большое распространение получили цифровые фотоаппараты. В отличие от пленочных, у цифровых фотоаппаратов приемником изображения является ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью), состоящая из матрицы светочувствительных элементов. Каждый ее элемент заряжается пропорционально интенсивности попавшей на него части изображения, а затем преобразуется в цифровое значение RGB. Полученное цифровым фотоаппаратом изображение, в электронном виде сохраняется в виде файлов в памяти самого фотоаппарата или же дополнительном носителе, вставляемом в фотоаппарат.

Размер изображения у цифровых фотоаппаратов определяется диагональю матрицы. Размер ПЗС-матрицы может быть различным у разных фотоаппаратов, и поэтому для удобства на объективе приводится истинное фокусное расстояние и фокусное расстояние, эквивалентное этому же увеличению у пленочных фотоаппаратов. Например, если размер матрицы 3.5 x 2.4 мм, а фокусное расстояние объектива $f' = 15$ мм, то эквивалентное фокусное расстояние у стандартного пленочного (35 x 24 мм) фотоаппарата будет $f' = 150$ мм.

Фотографическая разрешающая способность для цифровых камер в основном зависит не от объектива, а от матрицы.

Разрешающая способность матрицы определяется количеством элементов, которое обычно выражается в миллионах пикселей (мегапикселах). Обычно матрицы из 3 млн. пикселей имеют размер 2048x1536 пикселей, матрицы из 2 млн. пикселей – 1600x1200 пикселей. Чтобы определить разрешение, с которым цифровая фотография может быть отпечатана на бумаге, нужно разделить количество пикселей на размер отпечатка. Например, при количестве элементов 1600x1200 можно получить отпечаток на бумаге стандартного

формата 10x15 см с разрешением $\frac{1600}{150 \text{ мм}} = \frac{1200}{100 \text{ мм}} \approx 10 \text{ лин/мм}$. Для сравнения

можно сказать, что реальное разрешение стандартного (24 x 36 мм) кадра цветной негативной пленки ISO 100 находится на уровне 100 лин/мм, то есть для фотографии форматом 10 x 15 см разрешение будет

$100 \text{ лин/мм} \cdot \frac{24 \text{ мм}}{100 \text{ мм}} \approx 24 \text{ лин/мм}$.

Конструктивной особенностью цифровых фотоаппаратов является возможность использовать в качестве видоискателя жидкокристаллический дисплей. Кроме того, на жидкокристаллической панели можно увидеть только что сделанные снимки и решить, какие изображения следует сохранить, а какие удалить или переснять. Однако, хотя жидкокристаллический видоискатель очень удобен, при работе с ним быстро разряжаются батареи, поэтому во многих цифровых фотоаппаратах имеется и традиционный оптический видоискатель. Помимо этого, в солнечный день увидеть что-то на ЖК дисплее тяжело – не хватает контраста и приходится фотографировать «вслепую», если в фотоаппарате нет традиционного оптического видоискателя.

Интересной возможностью цифровых фотоаппаратов является автоматическая настройка баланса белого, которая позволяет компенсировать искажения цветов, вызванные разными источниками освещения (солнечный свет, лампа накаливания или флуоресцентный свет). В пленочных камерах такая настройка выполняется либо за счет выбора пленки, либо при помощи компенсирующих светофильтров, одевающихся на объектив.

Классифицируем современные цифровые фотоаппараты.

1) Компактный цифровой фотоаппарат. Характеризуется малыми размерами и весом. Визирование осуществляется по ЖК-экрану, что позволяет точно собрать кадр и удобно для «протокольных» снимков. Иногда включает телескопический видоискатель, синхронизированный с трансфокатором (объективом с переменным фокусным расстоянием). Малый физический размер матрицы означает низкую чувствительность и высокий уровень шумов.

Также этот тип фотоаппаратов отличается отсутствием или недостаточной гибкостью ручных настроек экспозиции.

2) Компактный фотоаппарат с несменным фиксфокальным объективом. Подобен традиционным беззеркальным фотоаппаратам. Предназначен для профессиональной съемки.

3) Сверхкомпактный цифровой фотоаппарат. Обладает крошечной матрицей порядка 1/2,5 видиконовых дюймов, 1 видиконовый дюйм = 15,2 мм). Чтобы получить приемлемое качество снимков, производится агрессивное шумоподавление. Имеет низкую кратность трансфокатора (обычно 3× или 4×), короткое фокусным расстояние. Как правило, не имеет оптического видоискателя.

4) Встроенный цифровой фотоаппарат. Включается в состав других технических устройств. Миниатюрен и неудобен для фотосъемки. Как правило, не обладает механикой объектива и собственных органов управления. Служит большей частью для «протокольных» снимков и пересъемки информации.

5) Псевдозеркальный цифровой фотоаппарат («ультразум»). Внешним видом напоминает зеркальный фотоаппарат, а также, как правило, помимо цифрового дисплея, оснащен электронным видоискателем. Изображение в видоискателе такого аппарата формируется на отдельном цифровом экране, или на поворачивающемся основном экране. Как правило, имеет резьбу на объективе для присоединения насадок и светофильтров. Кратность трансфокатора 6× и выше. Обеспечивает возможность установки нужного режима съемки. Недостатками большинства ультразумов являются скромные возможности в макросъемке и высокое фокусное расстояние на «ближнем» конце. Современные ультразумы в широкоугольной съемке имеют сильную дисторсию, которая корректируется программно. На «дальнем» конце светосила, как правило, невысока.

6) Полузеркальный цифровой фотоаппарат. Обеспечивает наводку по матовому стеклу через съёмочный объектив, однако не обеспечивает возможность менять объектив. В таких аппаратах оптическая схема содержит светоделительную призму, которая направляет от 10 до 50 % светового потока на матовое стекло, а остальное передается на матрицу.

7) Цифровой фотоаппарат со сменной оптикой. Наиболее популярен среди профессиональных фотографов и многих фотолюбителей. Матрица, как правило, «полукадровая» (примерно в 1,5 раза меньше плёночного кадра, по площади в 2-3 раза). При этом, существуют модели с полнокадровой (24 × 36 мм) и даже среднеформатной матрицей. На фокусировочном экране располагается так называемый «фазовый автофокус», быстрый и точный. Оптический видоискатель позволяет уловить эмоции объекта съемки и нажать

на кнопку в нужный момент. К тому же этот видоискатель работает через объектив, так что легко контролировать глубину резкости, применять поляризационные и градиентные фильтры. Сменная оптика позволяет приспособить такой фотоаппарат к любому жанру съёмки. К недостаткам относятся: высокая цена, громкий спуск и большие габариты. Затруднена съёмка из нестандартных ракурсов. Видоискатель покрывает не весь кадр (около 85 % в камерах нижнего уровня), поэтому после съёмки практически обязательна доработка фотографий в графическом редакторе.

8) Цифровой дальномерный фотоаппарат. Предназначен для уличной и репортажной съёмки. Сочетает высокое качество изображения с непревзойдённой оперативностью съёмки.

5. Телескопические системы

5.1. Телескопическая система

Телескопическая система – оптическая система, с помощью которой можно рассматривать увеличенное изображение удаленного объекта.

К числу таких приборов относятся бинокли, зрительные трубы, телескопы, перископы, дальномеры и геодезические приборы (теодолиты, нивелиры и другие).

Схема телескопической системы в простейшем случае состоит из двух компонентов: объектива и окуляра. Располагают их таким образом, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Объектив создает действительное перевернутое изображение предмета в своей задней фокальной плоскости, а окуляр позволяет рассматривать это изображение глазом (рис. 5.1).

Для компенсации дефектов глаза (близорукость, дальнозоркость) в зрительных трубах обычно предусматривается возможность фокусировки (продольного перемещения) окуляра.

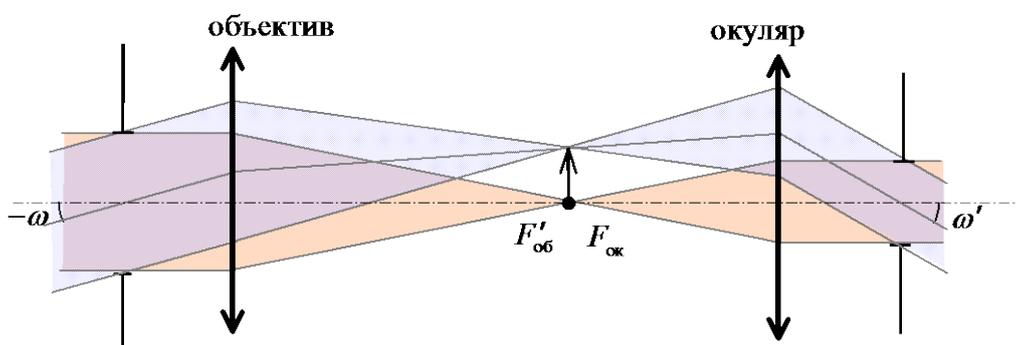


Рис. 5.1. Телескопическая система

Поскольку рассматриваемые предметы находятся бесконечно далеко, входные пучки считаются параллельными. От осевых предметных точек приходят пучки параллельные оптической оси, от внеосевых предметных точек приходят пучки, наклоненные к оси под углом ω (рис. 5.1). Из телескопической системы пучки будут выходить под углом ω' .

Фокусы телескопической системы расположены в бесконечности, фокусные расстояния равны бесконечности.

5.2. Характеристики телескопической системы

Рассмотрим основные характеристики телескопических систем.

5.2.1. Видимое увеличение телескопической системы

Видимое увеличение телескопической системы можно выразить через отношение фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$\Gamma = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \quad (5.1)$$

Если видимое увеличение положительное ($\Gamma > 0$), то изображение прямое. Если видимое увеличение отрицательное ($\Gamma < 0$), то изображение перевернутое. Увеличение измеряется в кратях, то есть в разгах. Увеличение телескопических систем может быть от $2,5^{\times}$ для театральных биноклей до нескольких сотен и тысяч крат для астрономических телескопов.

5.2.2. Поле зрения телескопической системы

Угловое поле зрения телескопической системы зависит от углового поля окуляра и видимого увеличения:

$$tg \omega = \frac{tg \omega'}{\Gamma}. \quad (5.2)$$

Угловое поле окуляра обычно находится в пределах $50 - 70^{\circ}$, видимое увеличение большинства телескопических систем не превышает $10 - 30^{\times}$, поэтому угловое поле телескопических систем не превышает 10° .

5.2.3. Диаметры входного и выходного зрачков телескопической системы

Диаметр выходного зрачка определяется зрачком глаза:

$$D' = D_{гл}. \quad (5.3)$$

При наблюдении объектов через телескопический прибор глаз должен располагаться в плоскости выходного зрачка, тогда весь свет, входящий в объектив под разными углами к оси, попадет в глаз. Телескопические системы, предназначенные для наблюдений в дневное время, должны иметь выходные зрачки 2-5 мм, а в сумеречное время 5-7 мм.

Диаметры входного и выходного зрачков телескопической системы связаны между собой через видимое увеличение:

$$D = D' \cdot \Gamma. \quad (5.4)$$

Светосила телескопического прибора пропорциональна квадрату диаметра входного зрачка:

$$H = gD^2, \quad (5.5)$$

где g – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента пропускания оптической системы.

5.2.4. Угловой предел разрешения телескопической системы

Угловой предел разрешения телескопической системы зависит от диаметра входного зрачка. Если взять среднюю длину волны $\lambda = 0.0005$ мм, то зависимость углового разрешения от диаметра входного зрачка, выраженного в мм, будет следующей:

$$\Psi = 1.22 \frac{\lambda}{D} \text{ [рад]}. \quad (5.5, \text{ а})$$

$$\Psi = \frac{120}{D} \text{ [угл.сек.]}. \quad (5.5, \text{ б})$$

Например, если диаметр входного зрачка 6000 мм, то разрешающая способность телескопической системы составит $\Psi = \frac{120}{6000} = 0.02''$.

При решении задач зачастую возникают сложности при пересчете угловых величин из радиан в угловые секунды. Рассмотрим последовательность расчета. Известно, что 360° соответствует величина $2\pi \approx 6.28$ рад. Также известно, что $1^\circ = 60' = 3600''$. Таким образом, можно выразить величину в угловых секундах через величину в радианах: $X_{\text{угл.сек.}} = (360 \cdot 3600 / 6.28) \cdot X_{\text{рад}} \approx 2 \cdot 10^5 \cdot X_{\text{рад}}$. Соответственно, угловой предел разрешения $\Psi_{\text{угл.сек.}} = (1.22 \cdot 0.0005 \cdot 2 \cdot 10^5) / D \approx 120 / D$.

При наблюдении глазом разрешающая способность телескопического прибора ограничивается пределом разрешения глаза $\Psi_{\text{гл}} = 1' = 60''$. Угловые пределы разрешения телескопа в пространстве предметов и в пространстве изображений связаны между собой через видимое увеличение: $\Psi' = \Psi \cdot \Gamma$, причем $\Psi' = \Psi_{\text{гл}}$. Для того, чтобы глаз полностью использовал разрешающую способность телескопической системы, ее полезное видимое увеличение должно быть $\Gamma_{\text{п}} = \frac{\Psi_{\text{гл}}}{\Psi} = \frac{60}{120} \cdot D = 0.5D$. Однако, поскольку выходные зрачки в телескопических системах различного назначения могут иметь разный диаметр и разрешающая способность глаза в различных условиях наблюдения также может отличаться от стандартной, принято, что полезное увеличение может иметь значение в пределах:

$$0.2D \leq \Gamma_{\text{п}} \leq 0.75D. \quad (5.6)$$

5.3. Схемы телескопических систем

Рассмотрим несколько типовых схем телескопических систем.

5.3.1. Схема Кеплера

В схеме Кеплера объективом и окуляром является положительная оптическая система (рис. 5.2). Объектив создает перевернутое действительное изображение в своей задней фокальной плоскости, которое можно наблюдать с помощью окуляра. Задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра, так что падающий на объектив параллельный пучок лучей выходит из окуляра также параллельным.

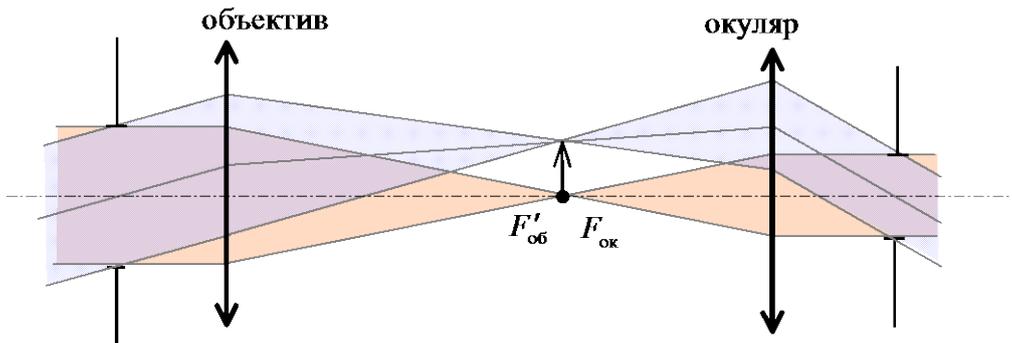


Рис. 5.2. Схема Кеплера

Одним из недостатков схемы Кеплера является большая длина оптической системы ($L = f'_{об} + f'_{ок}$), причем чем больше увеличение, тем длиннее должна быть система Кеплера. Например, при фокусном расстоянии окуляра $f'_{об} = 30$ мм и увеличении $\Gamma = 40\times$, фокусное расстояние объектива $f'_{ок} = f'_{об} \cdot \Gamma = 1.2$ м, а общая длина системы $L = f'_{об} + f'_{ок} = 1.23$ м.

Еще одним недостатком системы Кеплера является перевернутое изображение. Это не имеет особого значения для исследования небесных тел, но представляет неудобство для наблюдения земных объектов. Поэтому в биноклях и зрительных трубах приходится применять **оборачивающие системы**, которые обычно ставятся между объективом и окуляром (рис. 5.3). Оборачивающие системы могут быть линзовые или призмные. Линзовые оборачивающие системы (рис. 5.3) еще больше увеличивают длину всей системы.

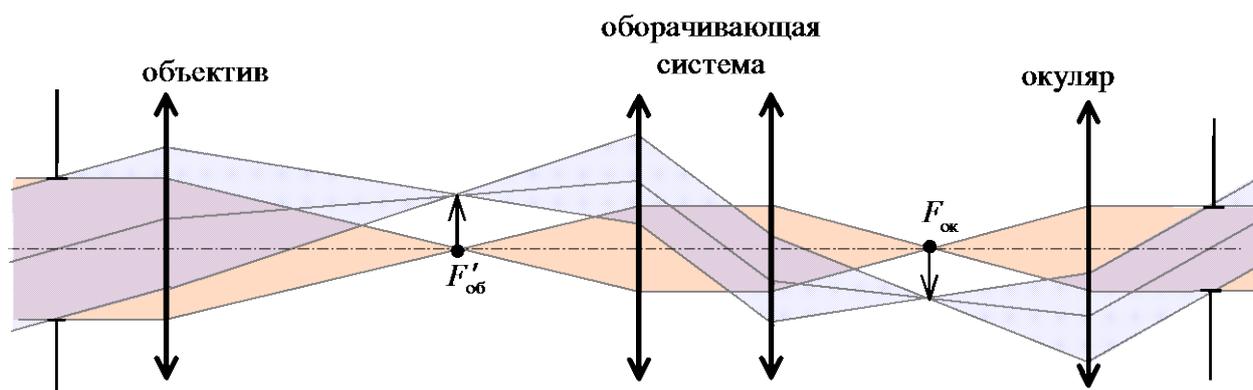


Рис. 5.3. Применение линзовых оборачивающих систем

Призменные оборачивающие системы состоят из стеклянных призм, действующих, как зеркала (рис. 5.4). Они сокращают длину всей системы, но при этом увеличивается масса прибора, к тому же возникают трудности технологического характера, связанные с изготовлением и юстировкой призм. Такие системы обычно используются в биноклях большого увеличения.

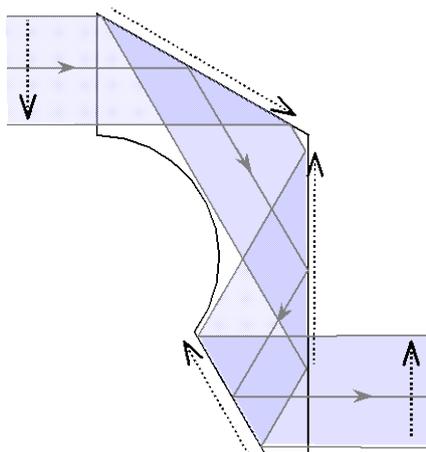


Рис. 5.4. Призменная оборачивающая система

Одним из главных достоинств системы Кеплера является наличие промежуточного изображения в фокусе объектива, куда можно поставить сетку (прозрачную пластинку со шкалой) и с ее помощью производить точные измерения углов и расстояний.

Оптические системы, построенные по схеме Кеплера, используются для телескопов, подзорных труб, дальномеров, морских биноклей большого увеличения (до $20\times$), а также для измерительных систем.

5.3.2. Схема Галилея

В телескопической системе по схеме Галилея в качестве объектива используется положительная оптическая система, а в качестве окуляра – отрицательная (рис. 5.5). Задний фокус положительного объектива совпадает с

передним фокусом отрицательного окуляра. При таком расположении промежуточное изображение отсутствует.

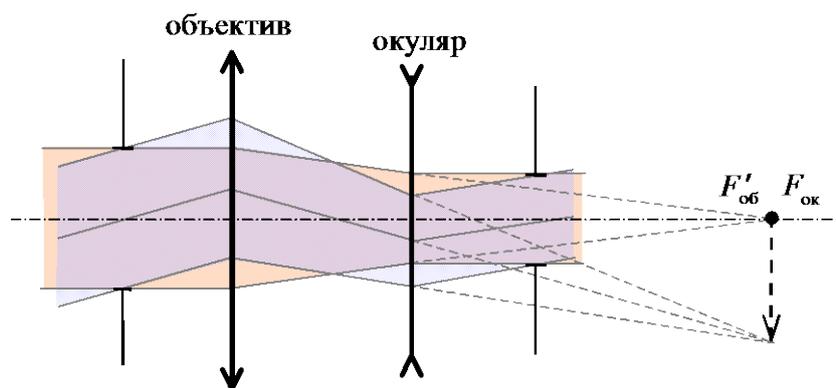


Рис. 5.5. Схема Галилея

Достоинствами схемы Галилея являются прямое изображение и меньшая длина по сравнению со схемой Кеплера. В такой схеме общая длина вычисляется не как сумма, а как разность (по модулю) фокусных расстояний объектива и окуляра: $L = f'_{об} - |f'_{ок}|$. Однако у этой схемы есть и свои недостатки. Во-первых, у системы Галилея малое поле зрения, причем чем больше увеличение телескопа, тем меньше поле зрения. Во-вторых, в системе Галилея отсутствует промежуточное изображение (некуда поставить сетку), поэтому использовать такую систему в измерительных приборах нельзя.

Использование системы Галилея (малая длина и прямое изображение) особенно удобно для театральных биноклей с увеличением от двух до трех крат. Система Галилея также применяется для систем сумеречного и ночного наблюдения и в видоискателях фотоаппаратов и видеокамер.

5.3.3. Схема Кассегрена

Зеркальные объективы телескопических систем образуют изображение путем отражения света от зеркальной поверхности сферической или параболической формы. Наибольшее распространение получила двухзеркальная схема Кассегрена (рис. 5.6). После отражения на главном зеркале пучок лучей попадает на вспомогательное зеркало, которое направляет его обратно — через отверстие в главном зеркале. Фокальная плоскость в этой системе располагается за оправой главного зеркала.

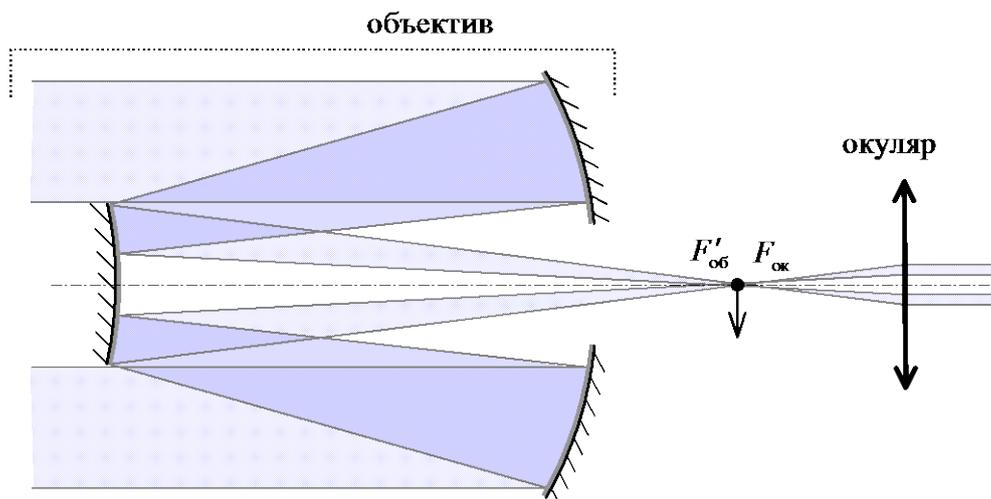


Рис. 5.6. Схема Кассегрена

В фокальной плоскости зеркала могут быть помещены фотопластинки для фотографирования небесных объектов или любая другая светоприемная аппаратура: спектрографы, фотометры и так далее. Изображение либо получается непосредственно на фотографической пластинке, либо исследуется визуально через окуляр.

Схема Кассегрена широко применяется в телескопах; установлена она и в Большом Телескопе Азимутальном (БТА), находящемся на Северном Кавказе с главным зеркалом диаметром 6 метров (вес 650 тонн). Телескоп установлен в башне высотой 53 м с диаметром купола 45,2 м. В настоящее время телескоп обеспечивает выполнение важнейших научных программ.

Расстояние от последней поверхности (от большого зеркала) до фокуса значительно меньше фокусного расстояния, поэтому длина системы Кассегрена с таким объективом может быть в несколько раз короче, чем если бы использовался обычный линзовый объектив.

Для того чтобы обеспечить как можно большее увеличение при стандартном размере выходного зрачка, необходимо применение объективов с предельно большим диаметром. Увеличение диаметра входного зрачка позволяет увеличить и светосилу, и разрешающую способность, что необходимо, скажем, для наблюдения очень слабых звезд. Технически изготовить зеркало большого диаметра легче, чем линзу, так как оптические неоднородности в толще стекла для зеркала не имеют значения, поэтому применение зеркальных систем позволяет увеличить диаметр входного зрачка, а тем самым – увеличение, светосилу и разрешающую способность телескопической системы. К тому же, у зеркальных объективах хроматические aberrации намного меньше, чем у линзовых.

Для получения новых научных данных о звездах и галактиках требуется увеличение размеров телескопа. Но чем больше телескоп, тем труднее добиться

безукоризненного по качеству изображения. На качество изображения влияют земная атмосфера, остаточные aberrации оптической системы, погрешности изготовления оптических поверхностей, термические и весовые деформации оптики, нарушения юстировки телескопа и многое другое.

В 2012 году самым большим наземным оптическим телескопом Земли стал Очень Большой Телескоп (Very Large Telescope или VLT). Данный телескоп является соединением сразу четырех гигантских зеркал в одно виртуальное зеркало диаметром 130 метров. Все четыре телескопа расположены в обсерватории Паранал (Paranal Observatory) в чилийской пустыне Атакама, на высоте 2635 метров над уровнем моря. Чтобы получить общее изображение, инженеры соединили свет, который собирают зеркала телескопов, в единый пучок, приходящий на общий оптический микрочип. Вследствие интерференции сигналы суммируются, время их прихода компенсируется. Данный комплекс обеспечивает высокое разрешение изображения, благодаря четырем аппаратам позволяет изучать тройные звёздные системы и молодые светила, окружённые протопланетными облаками, из которых формируются планеты.

Одним из факторов, наиболее сильно воздействующих на разрешающую способность телескопа, является влияние земной атмосферы. Величина размазывания изображения, вызванного атмосферной турбулентностью (неоднородностью показателя преломления атмосферы), составляет несколько секунд даже в самых лучших с точки зрения астроклимата местах. Это, по крайней мере, в 10 раз больше того, что может дать телескоп, зеркало которого изготовлено с точностью, близкой к теоретическому пределу.

Одним из способов повышения разрешающей способности является размещение телескопа за пределами земной атмосферы. В космических телескопах на качество изображения не влияет неоднородность атмосферы, кроме того, с их помощью можно проводить исследования в области ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, которые земная атмосфера пропускает слабо. Все это позволяет повышать разрешающую способность телескопа в десятки и сотни раз.

6. Микроскопы

Для повышения разрешающей способности глаза (наблюдения мелких предметов, не видимых невооруженным глазом), существуют оптические приборы, дающие увеличенное изображение близко расположенного предмета.

6.1. Лупа

Простейший прибор, предназначенный для увеличения мелких объектов, - лупа.

Лупа – оптическая система, состоящая из линзы или нескольких линз, предназначенная для наблюдения предметов, расположенных на конечном расстоянии.

Если рассматриваемый предмет расположен в передней фокальной плоскости лупы, то от любой точки предмета в глаз наблюдателя поступают пучки параллельных лучей. В этом случае наблюдатель рассматривает предмет без аккомодации (рис. 6.1). Лупа образует мнимое увеличенное изображение на расстоянии наилучшего видения от глаза – 250 мм. Предмет может располагаться и не в передней фокальной плоскости лупы, но в этом случае для рассматривания этого предмета через лупу глазу придется аккомодироваться.

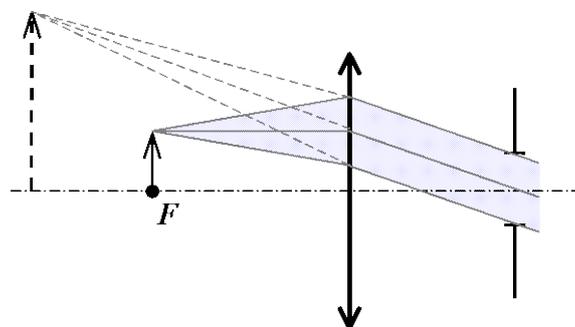


Рис. 6.1. Оптическая схема лупы

Рассмотрим основные характеристики лупы.

6.1.1. Видимое увеличение лупы

Согласно определению, **видимое увеличение** лупы вычисляется как отношение тангенса угла, под которым виден предмет через лупу, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения.

Тангенс угла, под которым виден предмет невооруженным глазом, легко можно вычислить (см. рис. 6.2, а): $tg \omega = \frac{y}{250}$. Если предмет расположен в передней фокальной плоскости лупы (рис. 6.2, б), то угол наблюдения через

лупы можно вычислить как $tg \omega' = \frac{y}{f'}$. Тогда видимое увеличение лупы при отсутствии аккомодации глаза будет вычисляться следующим образом:

$$\bar{\Gamma} = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = \frac{250}{f'}. \quad (6.1)$$

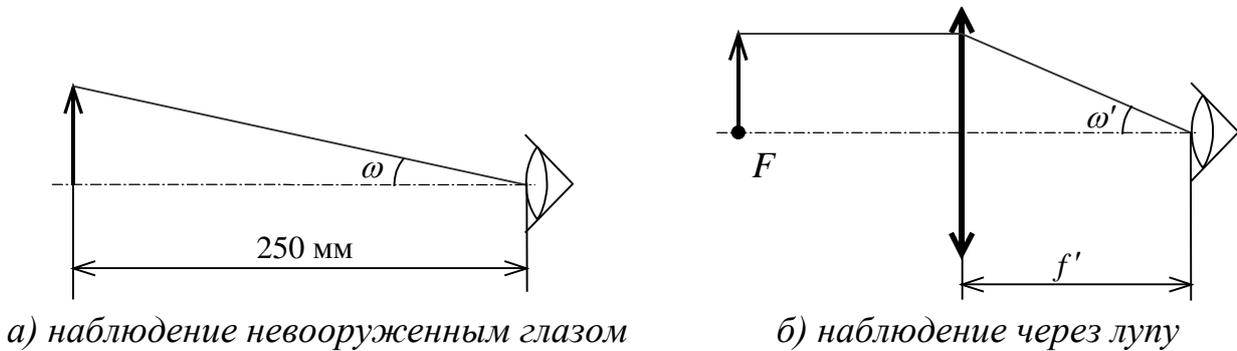


Рис. 6.2. Видимое увеличение лупы

6.1.2. Диаметр выходного зрачка лупы

Вопрос об ограничении световых пучков следует рассматривать в системе «лупа-глаз». В этой системе пучок ограничивается оправой лупы и зрачком глаза. Обычно диаметр лупы гораздо больше диаметра зрачка глаза, поэтому апертурной диафрагмой и одновременно выходным зрачком системы «лупа-глаз» является зрачок глаза:

$$D' = D_{\text{гл}}. \quad (6.2)$$

6.1.3. Поле зрения лупы

На рис. 6.3 представлена лупа диаметром D_l . Зрачок глаза наблюдателя диаметром $D_{\text{гл}}$ расположен на расстоянии S' от лупы.

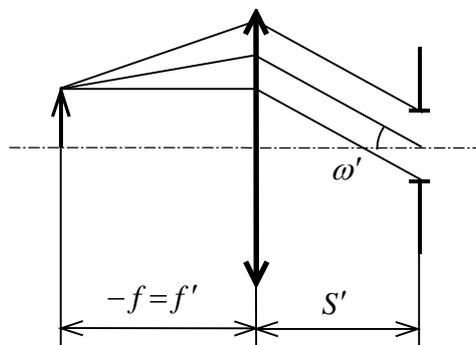


Рис. 6.3. Поле зрения лупы

Размер поля $2\omega'$ в пространстве изображений определяется лучом, идущим через верхний край оправы линзы и верхний край выходного зрачка:

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{D_{л} - D_{гг}}{2S'} \quad (6.3)$$

Соответствующее ему поле в пространстве предметов составит:

$$2y = 2f' \cdot \operatorname{tg} \omega' = f' \cdot \frac{D_{л} - D_{гг}}{S'} \quad (6.4)$$

Из выражения (6.4) следует, что для увеличения поля зрения лупы глаз следует располагать как можно ближе к лупе.

Лупы малого увеличения (до $7\times$) обычно выполняются в виде двояковыпуклой линзы. Лупы более сильного увеличения (от $7\times$ до $15\times$) состоят из двух-трех линз и дают возможность рассматривать предметы размером до 0.01 мм. Поле зрения таких луп может достигать 20° .

6.2. Микроскоп

Микроскоп предназначен для наблюдения мелких объектов с большим увеличением и с большей разрешающей способностью, чем дает лупа. Оптическая система микроскопа состоит из двух частей: объектива и окуляра. Объектив микроскопа образует действительное увеличенное обратное изображение предмета в передней фокальной плоскости окуляра. Окуляр действует как лупа и образует мнимое изображение на расстоянии наилучшего видения (рис. 6.4). По отношению ко всему микроскопу рассматриваемый предмет располагается в передней фокальной плоскости.

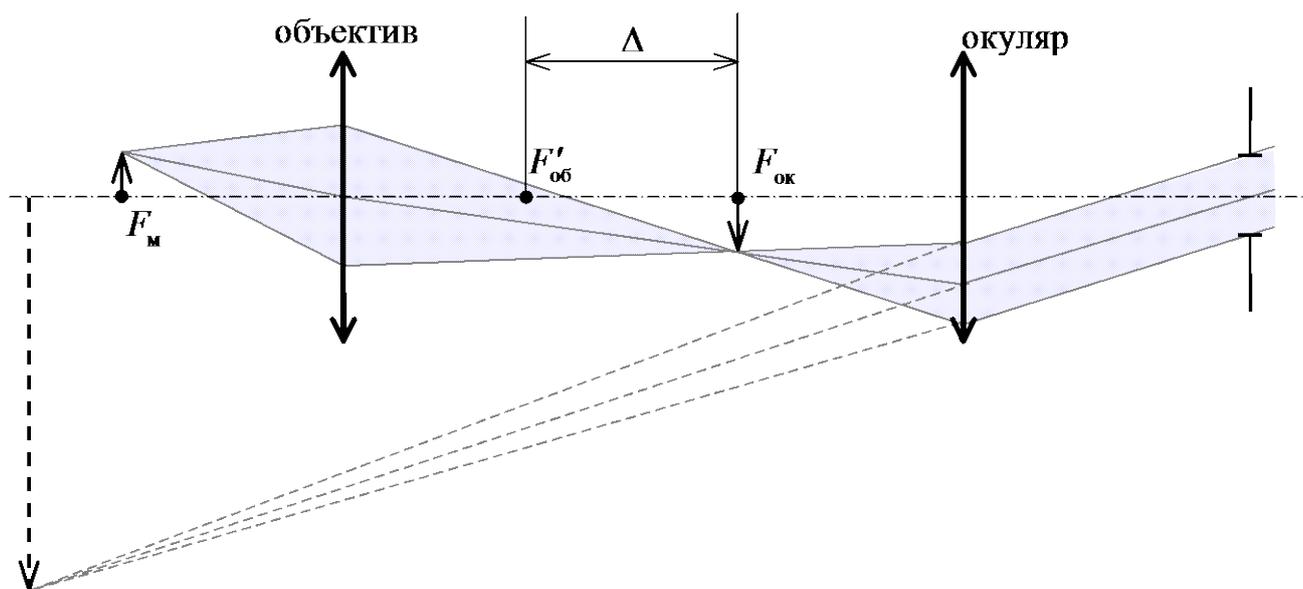


Рис. 6.4. Оптическая схема микроскопа

6.2.1. Увеличение микроскопа

Действие микрообъектива характеризуют его линейным увеличением:

$$V_{об} = -\frac{\Delta}{f'_{об}}, \quad (6.5)$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние микрообъектива, Δ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, называемое оптическим интервалом или оптической длиной тубуса.

Изображение, создаваемое объективом микроскопа в передней фокальной плоскости окуляра, рассматривается через окуляр, который действует как лупа с видимым увеличением:

$$\bar{\Gamma}_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}}. \quad (6.6)$$

Общее увеличение микроскопа определяется как произведение увеличения объектива на увеличение окуляра:

$$\bar{\Gamma} = V_{об} \cdot \bar{\Gamma}_{ок}. \quad (6.7)$$

Если известно фокусное расстояние всего микроскопа, то его видимое увеличение можно определить так же, как и у лупы:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'_м}. \quad (6.8)$$

Как правило, увеличение современных объективов микроскопов стандартизовано и составляет ряд чисел: 10, 20, 40, 60, 90, 100 крат. Увеличения окуляров тоже имеют вполне определенные значения, например, 10, 20, 30 крат. Во всех современных микроскопах имеется комплект объективов и окуляров, которые специально рассчитываются и изготавливаются так, что подходят друг к другу, поэтому их можно комбинировать для получения разных увеличений.

6.2.2. Поле зрения микроскопа

Поле зрения микроскопа зависит от углового поля окуляра ω' , в пределах которого получается изображение достаточно хорошего качества:

$$2y = \frac{500 \cdot \operatorname{tg} \omega'}{\bar{\Gamma}}. \quad (6.9)$$

При данном угловом поле окуляра линейное поле микроскопа в пространстве предметов тем меньше, чем больше его видимое увеличение.

6.2.3. Диаметр выходного зрачка микроскопа

Диаметр выходного зрачка микроскопа вычисляется следующим образом:

$$D' = \frac{500 \cdot A}{\Gamma}, \quad (6.10)$$

где A – передняя апертура микроскопа.

Диаметр выходного зрачка микроскопа обычно немного меньше диаметра зрачка глаза (0.5–1 мм).

При наблюдении в микроскоп зрачок глаза нужно совмещать с выходным зрачком микроскопа.

6.2.4. Разрешающая способность микроскопа

Одной из важнейших характеристик микроскопа является его разрешающая способность. Согласно дифракционной теории Аббе, линейный предел разрешения микроскопа, то есть минимальное расстояние между точками предмета, которые изображаются как отдельные, зависит от длины волны и числовой апертуры микроскопа:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2A}. \quad (6.11)$$

Предельно достижимую разрешающую способность оптического микроскопа можно вычислить, исходя из выражения для апертуры микроскопа ($A = n \cdot \sin \alpha$). Если учесть, что максимально возможное значение синуса угла – единица ($A = n \cdot \sin \alpha = 1 \cdot 1$), то для длины волны $\lambda = 0.5$ мкм разрешающая способность микроскопа составляет: $\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.5}{2 \cdot 1} = 0.25$ мкм.

Из выражения (6.11) следует, что повысить разрешающую способность микроскопа можно двумя способами: либо увеличивая апертуру объектива, либо уменьшая длину волны света, освещающего препарат.

Иммерсия

Для того чтобы увеличить апертуру объектива, пространство между рассматриваемым предметом и объективом заполняется так называемой **иммерсионной жидкостью** – прозрачным веществом с показателем преломления больше единицы. В качестве такой жидкости используют воду ($n = 1.33$), кедровое масло ($n = 1.52$), раствор глицерина и другие вещества. Апертуры иммерсионных объективов большого увеличения достигают величины $A = 1.5$; при этом предельно достижимая разрешающая способность иммерсионного оптического микроскопа составляет $\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.5}{2 \cdot 1.5} = 0.15$ мкм.

Ультрафиолетовое излучение

Другим способом увеличения разрешающей способности микроскопа является применение **ультрафиолетовых лучей**, длина волны которых меньше, чем длина волны видимых лучей. При этом должна использоваться специальная оптика, прозрачная для ультрафиолетового света. Поскольку человеческий глаз не воспринимает ультрафиолетовое излучение, необходимо либо прибегнуть к средствам, преобразующим невидимое ультрафиолетовое изображение в видимое, либо фотографировать изображение в ультрафиолетовых лучах. При длине волны $\lambda = 0.2$ мкм разрешающая

способность микроскопа составляет $\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.2}{2 \cdot 1} = 0.1$ мкм.

Кроме повышения разрешающей способности, у метода наблюдения в ультрафиолетовом свете есть и другие преимущества. Обычно живые объекты прозрачны в видимой области спектра, и поэтому перед наблюдением их предварительно окрашивают. Однако некоторые объекты (нуклеиновые кислоты, белки) имеют избирательное поглощение в ультрафиолетовой области спектра, благодаря чему они могут быть «видимы» в ультрафиолетовом свете без окрашивания.

6.2.5. Полезное увеличение микроскопа

Глаз наблюдателя сможет воспринимать две точки как отдельные, если угловое расстояние между ними будет не меньше углового предела разрешения глаза. Для того чтобы глаз наблюдателя мог полностью использовать разрешающую способность микроскопа, необходимо иметь соответствующее видимое увеличение.

Полезное увеличение – это видимое увеличение, при котором глаз наблюдателя будет полностью использовать разрешающую способность микроскопа, то есть разрешающая способность микроскопа будет такая же, как и разрешающая способность глаза.

Если две точки в передней фокальной плоскости микроскопа расположены друг от друга на расстоянии σ , то угловое расстояние между изображениями этих точек $\Psi' = \frac{\sigma}{f'_M}$. Из выражений (6.11) и (6.8) можно вывести видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{\Gamma} = \frac{500A}{\lambda} \cdot \Psi'. \quad (6.12)$$

Поскольку обычно диаметр выходного зрачка микроскопа около 0.5–1 мм, то угловой предел разрешения глаза составляет 2–4'. Если взять длину волны в

видимой области спектра ($\lambda=0.5$ мкм), то для полезного увеличения микроскопа можно вывести зависимость:

$$500 \cdot A < \bar{\Gamma}_n < 1000 \cdot A. \quad (6.13)$$

Микроскоп с видимым увеличением меньше $500 \cdot A$ не позволяет различать глазом все тонкости структуры предмета, которые изображаются как отдельные данным объективом ($\sigma_m < \sigma_{gl}$). Использование видимого увеличения больше $1000 \cdot A$ нецелесообразно, поскольку разрешающая способность объектива не позволяет полностью использовать разрешающую способность глаза ($\sigma_m > \sigma_{gl}$).

6.3. Метод оды наблюдения

Обычно предметы, исследуемые под микроскопом, сами не светятся и, следовательно, нуждаются в дополнительном освещении. Во многих случаях рассматриваемые предметы представляют собой тонкий срез прозрачного вещества и наблюдаются в проходящем свете. В системах с небольшой числовой апертурой (до 0.25) вполне достаточно рассеянного дневного света, отраженного под углом от вогнутого зеркала. В других случаях необходимо пользоваться искусственными источниками и специальными осветительными системами (см. Главу 7).

Структуру препарата, рассматриваемого через микроскоп, можно различить лишь тогда, когда частицы препарата отличаются друг от друга и от окружающей их среды по поглощению (отражению) света или по показателю преломления. Поэтому, в зависимости от характера препарата, в микроскопии применяются различные методы наблюдения.

6.3.1. Метод светлого поля

Метод светлого поля **в проходящем свете** применяется при исследовании прозрачных препаратов, у которых различные участки структуры по-разному поглощают свет (тонкие окрашенные срезы животных и растительных тканей, тонкие шлифы минералов и другие). Пучок лучей из осветительной системы проходит препарат и объектив и дает равномерно освещенное поле в плоскости изображения. Элементы структуры препарата частично поглощают и отклоняют падающий на них свет.

Метод светлого поля **в отраженном свете** применяется для наблюдения непрозрачных объектов, к примеру, травленных шлифов металлов, биологических тканей и различных минералов. Освещение препарата производится сверху, через объектив, который одновременно выполняет и роль осветительной системы. Изображение, как и при проходящем свете, создается

за счет того, что разные участки препарата неодинаково отклоняют падающий на них свет, а отраженные лучи имеют различную интенсивность.

6.3.2. Метод темного поля

Метод темного поля **в проходящем свете** применяется в биологии, коллоидной химии, минералогии и других областях для получения изображений прозрачных, непоглощающих, а поэтому не видимых при наблюдении в светлом поле объектов. Пучок лучей, освещающих препарат, непосредственно в объектив не попадает. Изображение создается только светом, который рассеивается мелкоструктурными элементами препарата. В поле зрения микроскопа на темном фоне видны светлые изображения мелких деталей, тогда как у крупных деталей видны только светлые края, которые рассеивают освещающие лучи.

Метод темного поля **в отраженном свете** осуществляется путем освещения препарата, например, шлифа металла или биологической ткани, сверху с помощью специальной кольцевой зеркальной системы, расположенной вокруг объектива. Так же как и при проходящем свете, изображение создается только лучами, рассеянными объектом, тогда как лучи света, отраженные от поверхности объекта, в объектив не попадают.

6.3.3. Метод исследования в поляризованных лучах

Метод исследования в поляризованных лучах применяется в проходящем и в отраженном свете для так называемых анизотропных объектов, обладающих двойным лучепреломлением или отражением. Такими объектами являются многие минералы, угли, некоторые животные и растительные ткани и клетки, искусственные и естественные волокна.

При исследовании анизотропных препаратов к обычной схеме микроскопа перед осветительной системой добавляют поляризатор, а после объектива – анализатор, находящиеся в скрещенном либо параллельном положении относительно друг друга. При скрещенных поляризаторе и анализаторе в темном поле зрения микроскопа видны темные, светлые или окрашенные анизотропные элементы объекта. Вид этих элементов зависит от положения объекта относительно плоскости поляризации и от величины двойного лучепреломления. Более точное определение оптических данных объекта делается с помощью различных компенсаторов (неподвижных кристаллических пластинок, подвижных клиньев и пластинок).

6.3.4. Метод фазового контраста

Метод фазового контраста дает возможность получать контрастные изображения прозрачных и бесцветных объектов. К числу таких объектов

относятся, например, неокрашенные биологические препараты, нетравленные шлифы металлов и минералогические объекты. Темные и светлые места в фазово-контрастном изображении соответствуют различным показателям преломления в препарате.

Принцип действия метода основан на том, что незаметные для глаза изменения фазы пучка, прошедшего через объект, можно преобразовать в видимое изменение интенсивности. На пути лучей, не отклоненных из-за дифракции на объекте, располагается так называемая «фазовая пластинка», увеличивающая разность фаз до половины длины волны. Таким образом, лучи могут интерферировать, и прежде не видимый объект проявляется на темном или светлом фоне.

6.4. Типы микроскопов

6.4.1. Световые микроскопы

Наиболее универсальными и потому наиболее распространенными являются биологические микроскопы (например, серии MULTISCOPE™, LABOROSCOPE™, INVERTOSCOPE™, производимые на ЛОМО). Современный биологический микроскоп имеет несколько сменных объективов и окуляров, а также фотоокуляры и проекционные окуляры, предназначенные для фотографирования изображения или его проецирования на экран. В таких микроскопах предоставляется возможность применять различные методы наблюдения (светлое поле, темное поле, метод фазового контраста).

Кроме микроскопов для биологических исследований, выпускаются и различные специализированные микроскопы.

Микроскопы сравнения обеспечивают визуальное сопоставление двух препаратов. Изображение каждого занимает половину поля зрения микроскопа, что позволяет проводить сравнительное изучение объектов.

Контактные микроскопы дают возможность проводить исследования микроскопических структур отдельных участков тканей, прижимая объектив к объекту исследования. ЛОМО производит серию микроскопов МЕТАМ™ для наблюдения, измерения, микрофотографии микроструктур металлов и других непрозрачных экземпляров.

Стереомикроскопы (серии SF™ и MX™) обеспечивают исследование объекта под разными углами зрения. При этом создается стереоскопический эффект, и наблюдаемое изображение воспринимается объемно.

Ультрафиолетовый и инфракрасный микроскопы предназначены для исследования объектов в ультрафиолетовом или инфракрасном участке светового спектра. Они снабжены флуоресцентным экраном, на котором

формируется изображение исследуемого препарата, фотокамерой с чувствительным к этим излучениям фотоматериалом или электронно-оптическим преобразователем.

Поляризационный микроскоп (серия POLAM™) позволяет выявлять неоднородности (анизотропию) структуры при изучении строения тканей и образований в организме в поляризованном свете. Поляризационный микроскоп широко используют в медико-биологических исследованиях при изучении препаратов крови, шлифов зубов, костей и т.п.

Интерференционный микроскоп дает возможность исследовать объекты с низкими показателями преломления света и чрезвычайно малой толщины. В отличие от фазово-контрастного устройства, в интерференционном микроскопе луч света, входящий в микроскоп, раздваивается. Часть проходит через исследуемый объект, а другая – мимо. В окулярной части оба луча соединяются и интерферируют, что позволяет увидеть исследуемую структуру.

Принцип действия **люминесцентного микроскопа** (серия LUMAM™) основан на использовании люминесценции биологических объектов, возникающей под действием ультрафиолетового излучения. Наблюдая или фотографируя препараты в отраженном свете, можно судить о структуре исследуемого образца, что используется в микробиологии и в иммунологических исследованиях. Прямое окрашивание люминесцентными красителями позволяет выявлять такие структуры клеток, которые трудно рассмотреть в световом микроскопе.

Операционный микроскоп (серии МКО™, МХ™) используется для проведения микрохирургических операций в офтальмологии, нейрохирургии и других областях микрохирургии. Микроскоп имеет волоконно-оптическую систему освещения операционного поля, демонстрационное визуальное устройство, фотоприставку; возможно подключение к нему киноаппаратуры для съемки операции и телевизионного наблюдения.

6.4.2. Электронные микроскопы

Электронный микроскоп построен на таком же принципе получения изображения, как и оптический, но вместо видимого света в нем используется пучок электронов.

Роль линз в электронном микроскопе играет совокупность электрических и магнитных полей. Поскольку электронные пучки не воспринимаются непосредственно глазом, в электронном микроскопе изображение либо фотографируется, либо проецируется на экран. Еще одно принципиальное отличие электронного микроскопа от оптического заключается в том, что в

электронном микроскопе контраст создается за счет разного рассеяния электронов от соседних участков.

Длина волны электрона, как известно, во много раз меньше длины волны видимого света. Предел разрешения электронного микроскопа можно вычислить из выражения (6.11) при длине волны 0.005 нм. Даже при апертуре $A=0.01$ предел разрешения электронного микроскопа составит $\sigma = \frac{0.005}{2 \cdot 0.01} = 0.25$ нм, что в 1000 раз меньше, чем в обычном оптическом микроскопе.

Однако, хотя предел разрешения электронного микроскопа несравнимо меньше, чем оптического, у электронного микроскопа есть свои недостатки, в частности, невозможность изучения живых биологических объектов, которые под воздействием пучка электронов мгновенно сгорают.

6.4.3. Сканирующие зондовые микроскопы

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) основаны на другом принципе получения изображения, который позволяет преодолеть дифракционный предел разрешения. Принцип действия таких микроскопов основан на сканировании объекта сверхмалым зондом. Современные СЗМ позволяют регистрировать взаимодействие зонда с отдельными атомами и молекулами, благодаря чему СЗМ по разрешающей способности сопоставимы с электронными микроскопами, а по некоторым параметрам превосходят их. Прошедший или отраженный сигнал регистрируется и используется для формирования трехмерной топографии поверхности образца с помощью компьютерной обработки.

СЗМ в зависимости от принципа взаимодействия зонда и образца разделяют на электронные, атомно-силовые и ближнепольные.

Наиболее интересен ближнепольный растровый сканирующий микроскоп (БРМ), который работает в видимом излучении. Формирование контраста в БРМ может происходить на основе явлений поглощения, поляризации, отражения, люминесценции и др. Эти возможности отсутствуют в электронной и атомно-силовой микроскопии. Кроме того, световой микроскоп является сравнительно дешевым и неразрушающим инструментом исследования и позволяет работать с биологическими и медицинскими препаратами в естественных условиях.

Принцип действия ближнепольного растрового микроскопа заключается в сканировании объекта оптическим зондом на расстоянии меньше длины волны от объекта (в ближнем поле). Роль светового зонда в этом микроскопе выполняют светоизлучающие острия с выходными отверстиями, радиус

которых в 10-20 раз меньше длины волны света. Таким образом, ближнепольный растровый сканирующий микроскоп обеспечивает получение изображения с разрешением в десятки раз выше, чем у обычного микроскопа.

6.4.4. Рентгеновские микроскопы

Рентгеновский микроскоп – устройство для исследования очень малых объектов, размеры которых сопоставимы с длиной волны рентгеновского излучения. Принцип действия основан на использовании электромагнитного излучения с длиной волны от 0,01 до 1 нанометра.

Рентгеновские микроскопы по разрешающей способности находятся между электронными и оптическими микроскопами. Теоретическая разрешающая способность рентгеновского микроскопа достигает 2-20 нанометров, что на порядок больше разрешающей способности оптического микроскопа (до 150 нанометров). В настоящее время существуют рентгеновские микроскопы с разрешающей способностью около 5 нанометров

Разработка и применение рентгеновских микроскопов сопровождаются рядом серьёзных трудностей. Рентгеновские лучи практически невозможно фокусировать обычными линзами. Дело в том, что показатель преломления рентгеновских лучей в различных прозрачных для них средах примерно одинаков и очень мало отличается от единицы. Колебания составляют порядка 10^{-4} - 10^{-5} . Кроме этого, рентгеновские лучи также не отклоняются электрическим и магнитным полями, что не позволяет использовать для фокусировки электрические или магнитные линзы. Однако, в современной рентгеновской оптике в последнее время появились и уже нашли широкое применение линзы, действующие на основе эффекта обратного лучепреломления (основано на различии коэффициентов преломления в конденсированном веществе по отношению к воздуху). Функцию линзы выполняет линзообразная полость внутри материала, получившая название линзы Снигирёва.

Рентгеновские лучи напрямую не воспринимаются человеческим глазом. Поэтому для наблюдения и фиксации результатов приходится применять технические средства (фототехнику или электронно-оптические преобразователи).

Существуют два типа рентгеновских микроскопов – отражательные и проекционные. В отражательных микроскопах используется явление преломления рентгеновских лучей при скользящем падении. Проекционные микроскопы используют высокую проникающую способность рентгеновских лучей. В них изучаемый объект помещается перед источником излучения просвечивается рентгеновскими лучами. Благодаря тому, что коэффициент

поглощения рентгеновских лучей зависит от размеров атомов, через которые они проходят, такой метод позволяет получать информацию не только о структуре, но и о химическом составе изучаемого объекта.

Рентгеновские микроскопы получили широкое применение в различных сферах науки, включая медицину, минералогия, металловедение.

С помощью рентгеновского проекционного микроскопа можно:

- оценить качество тонких покрытий;
- получить микрорентгенографии биологических и ботанических срезов толщиной до 200 мкм;
- применить для анализа смеси порошков лёгких и тяжёлых металлов, при изучении внутреннего строения объектов, непрозрачных для световых лучей и электронов.

Важным достоинством рентгеновских микроскопов является то, что с их помощью можно наблюдать непрепарированные живые клетки.

7. Осветительные системы

Осветительная система – это устройство, предназначенное для освещения несамосветящихся объектов.

В большинстве случаев отдельный источник света не может обеспечить требуемую освещенность предмета и ее равномерность (пришлось бы использовать слишком большой источник или располагать его слишком близко к предмету). Поэтому между источником и предметом помещается оптическая система. Направляющая излучение от источника формируется таким образом, чтобы осветить предмет.

С помощью оптической осветительной системы решают задачу наиболее эффективного использования светового потока, попавшего в систему, и создания требуемой освещенности предмета.

7.1. Типы осветительных систем

7.1.1. Коллектор

Если предмет, который необходимо осветить, находится в бесконечности, то используют оптическую схему коллектора. В коллекторе источник света располагается в переднем фокусе оптической системы, а его изображение локализуется в бесконечности (рис. 7.1).

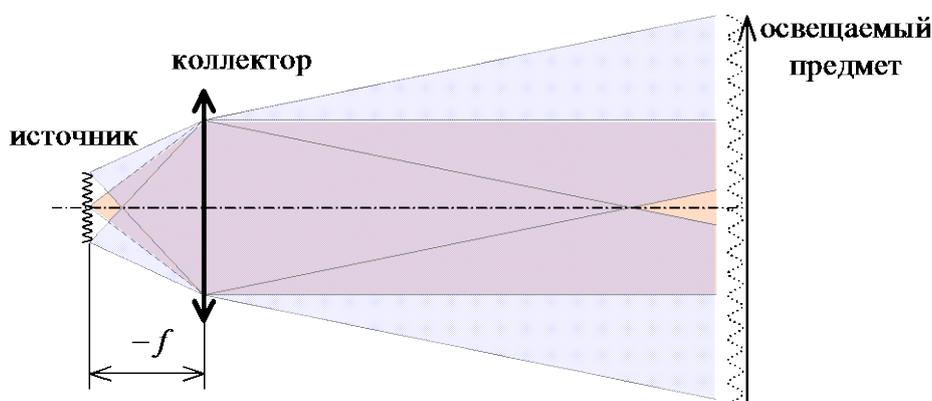


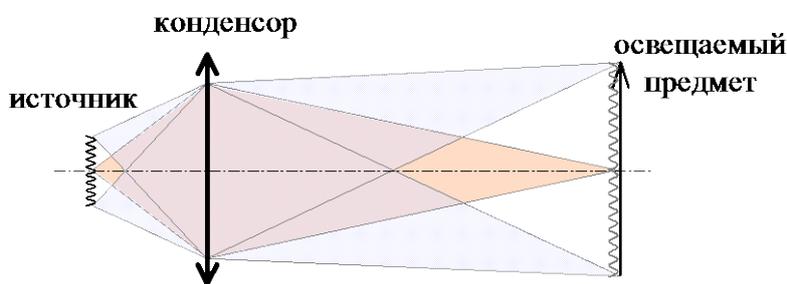
Рис. 7.1. Схема коллектора

7.1.2. Конденсор

Если освещаемый предмет находится на конечном расстоянии, то для его освещения используют конденсор. Возможны два варианта оптической схемы конденсора.

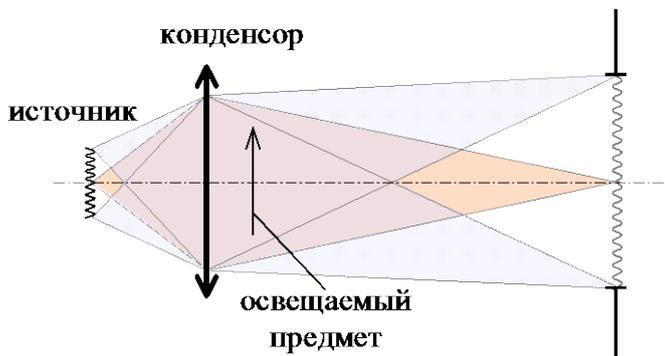
В первой схеме оптическая система проецирует источник света непосредственно на освещаемый предмет (рис. 7.2). Такую схему применяют,

если яркость источника света равномерна и нет опасений, связанных с нагревом предмета (например, диапозитива). В этом случае каждой освещаемой точке предмета будет соответствовать сопряженная с ней точка источника.



*Рис. 7.2. Схема конденсора
(источник проецируется на освещаемый предмет)*

Во второй схеме оптическая система проецирует источник света во входной зрачок последующей оптической системы. Освещаемый предмет располагается в ходе лучей, обычно вблизи конденсора (рис. 7.3). Эту схему применяют при неравномерной яркости источника. В этом случае каждая точка предмета освещается лучами, исходящими из всех точек источника.



*Рис. 7.3. Схема конденсора
(источник проецируется во входной зрачок последующей оптической системы)*

7.2. Осветительные оптические системы

Осветительные оптические системы позволяют улучшить качество освещения, задействовать большую часть светового потока источника и обеспечить более равномерное освещение объекта. Основными элементами осветительных систем являются простые линзы или зеркала (сферические или асферические), а также линзы или зеркала со сложным профилем (линзы Френеля). В качестве элементов осветительных систем могут использоваться растровые системы, световоды и оптическое волокно.

Линзовые осветительные системы содержат только линзы сферической или асферической формы. Степень сложности (число линз) конденсора определяется углом охвата 2α , то есть двойным апертурным углом в пространстве предметов. Чем больше угол охвата, тем сложнее схема конденсора. Максимальный угол охвата для линзовых конденсоров 90° . Простейшая схема конденсора – одиночная линза с углом охвата не более $15 - 20^\circ$.

Зеркальные осветительные системы содержат только зеркальные элементы. Зеркальные осветительные системы отличаются от линзовых большим углом охвата (до 140°) и отсутствием хроматических aberrаций. Кроме того, у зеркальных систем меньше масса, чем у линзовых, и больше коэффициент пропускания. Простейшая зеркальная система – вогнутое сферическое зеркало с предельным углом охвата до 110° . Источник света в такой системе помещается в фокус зеркала, и тогда его изображение получается на бесконечности.

Чтобы избежать повреждений или загрязнений отражающего слоя, в осветительных системах часто применяют стеклянные отражатели, внутреннюю поверхность которых покрывают отражающим слоем. Например, зеркало Манжена состоит из двух сферических поверхностей, одна из которых покрыта отражающим слоем (рис. 7.4). Такое зеркало имеет угол охвата около 140° .

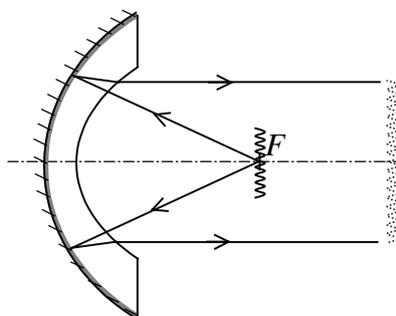


Рис. 7.4. Зеркало Манжена

Зеркально-линзовые осветительные системы содержат зеркальные и линзовые компоненты. Например, линзовая часть системы может располагаться после зеркального компонента. В качестве зеркального компонента могут применяться сферические или асферические зеркала, а в качестве линзовых компонентов – сферические и асферические линзы, или линзы Френеля (рис. 7.5).

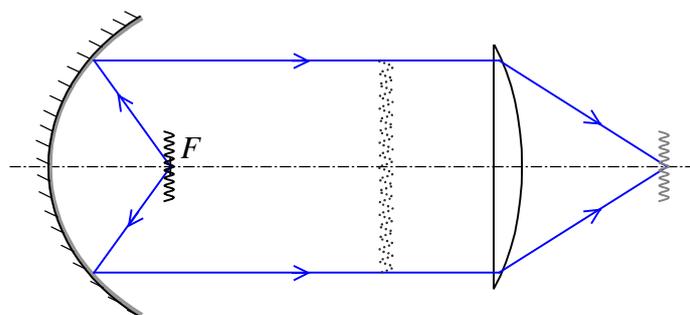


Рис. 7.5. Зеркально-линзовая осветительная система

Линзы Френеля – оптические детали со ступенчатой поверхностью сложного профиля (рис. 7.6). Ступеньки линзы Френеля обычно разграничены концентрическими канавками и представляют собой участки сферических или конических поверхностей. Каждый участок этих поверхностей направляет пучки лучей в требуемое место изображения. Чем меньше расстояние между соседними ступеньками (то есть больше их число), тем лучше исправляются в линзе аберрации.

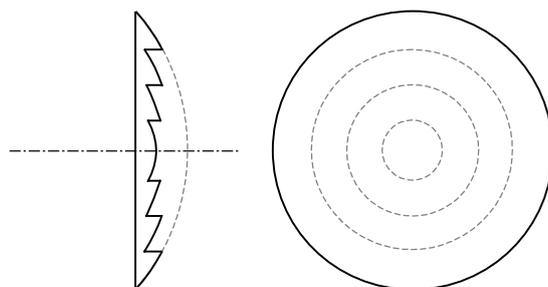


Рис. 7.6. Линза Френеля

Линзы Френеля отличаются большими углами охвата (до $100-120^\circ$) и небольшими аберрациями. Кроме того, они имеют малые габариты (толщины линз) и вес, благодаря чему линзы Френеля используются в некоторых светофорах, в фарах машин. Осветительные системы в простых проекторах часто состоят из одной линзы Френеля (если присмотреться, то можно заметить на экране проектора концентрические окружности).

7.3. Прожектор

Прожектор – это оптическая система, концентрирующая световой поток источника света в узкий пучок для освещения удаленных объектов или для передачи сигналов на большие расстояния (рис. 7.7).

Оптическая система прожектора используется в маяках, театральных прожекторах, в фарах автомобилей и т.д.

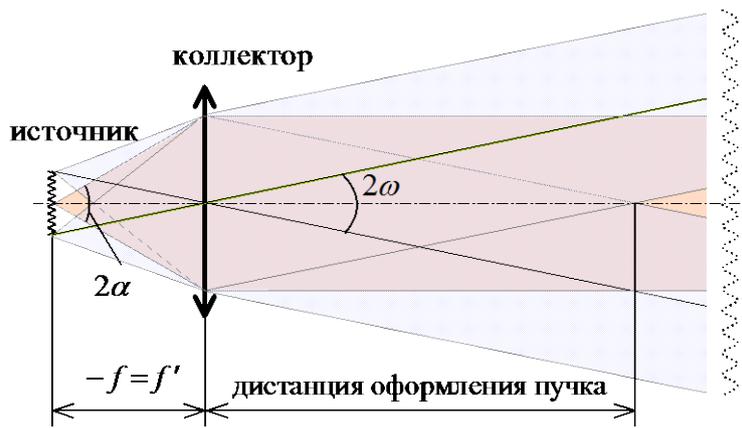


Рис. 7.7. Схема прожектора

Рассмотрим основные характеристики прожектора.

Сила света прожектора (поток излучения на единицу телесного угла) определяется выражением:

$$I_{np} = \tau \pi L \frac{D'^2}{4}, \quad (7.1)$$

где τ – коэффициент пропускания оптической системы, D' – диаметр выходного зрачка, L – яркость источника (поток, излучаемый единицей площади на единицу телесного угла).

Из выражения (7.1) видно, что при одной и той же яркости источника сила света растет пропорционально площади выходного зрачка. Выражение (7.1) справедливо при удалении освещаемого предмета на расстояние, большее, чем **дистанция оформления пучка** (рис. 7.7). Только начиная с этого расстояния в изображении участвуют все лучи, идущие через край выходного зрачка прожектора.

Коэффициент усиления прожектора – это отношение силы света прожектора к силе света источника:

$$k_{np} = \frac{I_{np}}{I_{ист}} = \tau \left(\frac{D'}{d} \right)^2, \quad (7.2)$$

где d – диаметр источника.

Коэффициент усиления прожектора может достигать $k_{np} = 10000$.

Угол рассеяния прожектора зависит от размеров светового тела источника излучения:

$$2\omega' \approx d/f'. \quad (7.3)$$

Из этого выражения следует, что чем больше фокусное расстояние, тем меньше угол рассеяния.

Угол охвата – двойной апертурный угол 2α в пространстве предметов, характеризующий полноту использования светового потока.

7.4. Осветительные системы проекционных приборов

Проекционные приборы предназначены для получения на экране изображений предметов требуемого масштаба. Основными устройствами проектора являются **осветительное**, обеспечивающее равномерное и интенсивное освещение проецируемого предмета, и **изображающее** (проекционное), формирующее на экране изображение требуемого масштаба и качества.

Проекционные приборы разделяют на два класса:

- **диаскопические** – проектируют прозрачные предметы в проходящем свете (например, кинопроекция);
- **эпiscoпические** – проецируют непрозрачные предметы в отражающем свете.

Диаскопическая проекция (проекция в проходящем свете) обеспечивает большую освещенность экрана, чем эпипроекция. Именно ее мы и будем рассматривать.

Возможны два варианта действия осветительной части диаскопа.

Изображение источника света в плоскости входного зрачка проекционного объектива

В такой схеме источник света проецируется во входной зрачок проекционного объектива, а освещаемое кадровое окно находится в ходе лучей (рис. 7.8). В этом случае каждая точка диапозитива освещается светом от всех точек источника, что особенно важно при неравномерной яркости источника, в частности, при использовании лампы накаливания.

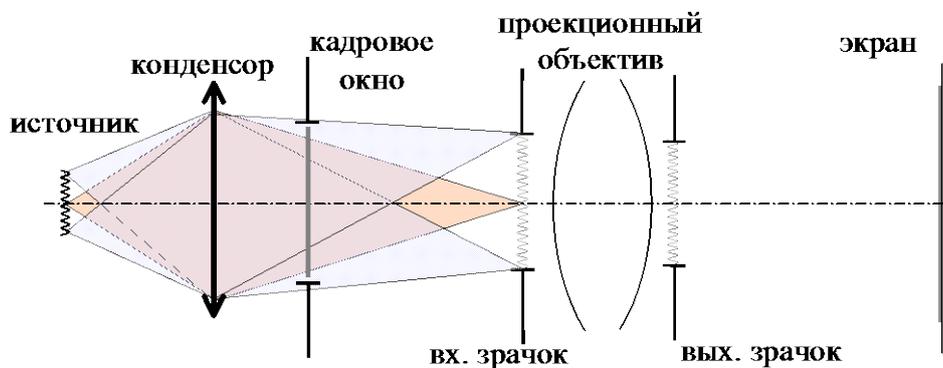


Рис. 7.8. Изображение источника во входном зрачке

Чтобы источник заполнял весь зрачок, увеличение такой осветительной системы должно быть равно отношению диаметра входного зрачка проекционного объектива к диаметру источника:

$$\beta_{осв} = \frac{D}{d}. \quad (7.4)$$

Примером подобной схемы является обычный проектор. Если бы в проекторе использовалась вторая схема, то на экране было бы видно изображение источника света (лампы накаливания).

Изображение источника света в плоскости диапозитива

В этом случае изображение источника совмещается с изображением предмета (рис. 7.9). Такая схема применяется в том случае, если яркость источника равномерна (например, дуговые источники) и если возможное нагревание предмета не играет роли (например, при кинопроекции, когда кадры быстро сменяют друг друга).

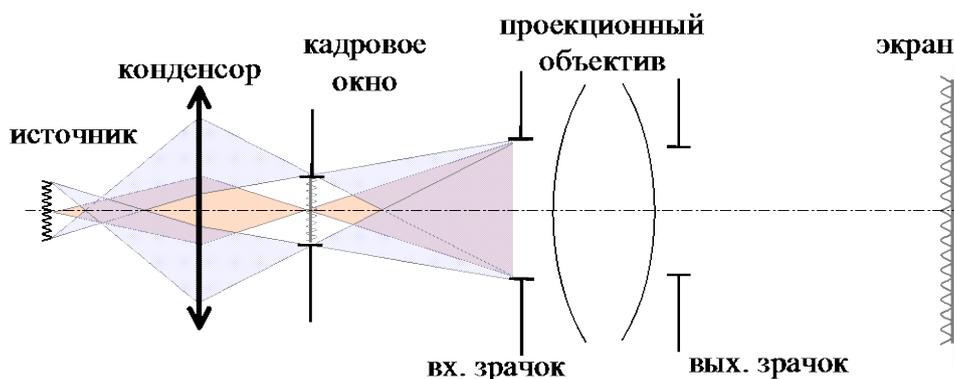


Рис. 7.9. Изображение источника в кадровом окне

Чтобы источник заполнял все кадровое окно, увеличение такой осветительной системы должно быть равно отношению диагонали кадра к диаметру источника:

$$\beta_{осв} = \frac{d_{кадра}}{d}. \quad (7.5)$$

Размер проецируемого предмета определяется диагональю кадра $d_{кадра}$.

В зависимости от требуемого размера изображения (размера экрана) определяется **масштаб проекции** (линейное увеличение) проекционного объектива:

$$\beta_{об} = \frac{d_{экрана}}{d_{кадра}}. \quad (7.6)$$

Разрешающая способность проекционной системы оценивается кружком рассеяния (минимальным размером элемента проецируемого предмета) на кадре или предельной частотой при заданном контрасте.

Освещенность изображения (поток на единицу площади) зависит от фокусного расстояния и относительного отверстия проекционного объектива, коэффициента пропускания осветительной и проекционной частей оптической системы проектора, а также от яркости источника и расстояния между объективом и экраном.

В качестве проекционного объектива чаще всего используются обычные фотообъективы, которые выбирают исходя из требуемых характеристик.

7.5. Осветительные системы микроскопов

Так как большинство объектов, исследуемых с помощью микроскопа, не являются самосветящимися, для работы с ними требуются дополнительные источники света. Осветительная система микроскопа должна обеспечивать получение контрастных и равномерно освещенных изображений.

Наиболее распространенной осветительной системой в микроскопах является система Кёлера (рис. 7.10). В этой схеме источник света проецируется коллектором в плоскость апертурной диафрагмы конденсора. Конденсор проецирует апертурную диафрагму в плоскость входного зрачка микроскопа. Изменяя диаметр апертурной диафрагмы, можно изменять апертуру осветителя, а следовательно, и освещенность входного зрачка. Предметная плоскость располагается между конденсором и объективом микроскопа в ходе лучей. Поскольку входной зрачок микроскопа обычно располагается на бесконечности, предмет освещается параллельными пучками лучей.

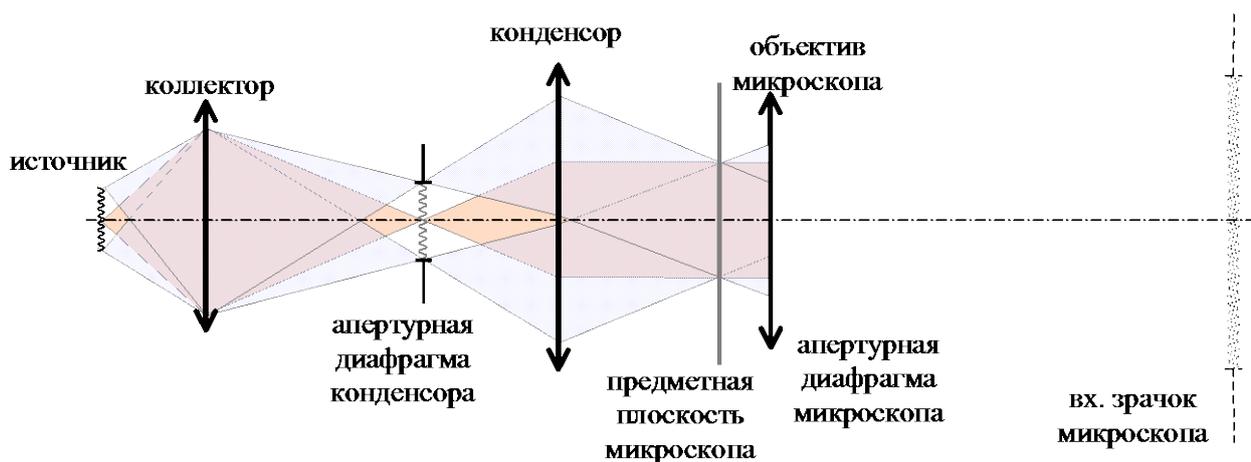


Рис. 7.10. Осветительные системы микроскопов

При такой схеме каждая точка источника света действует одинаково на все точки поля зрения, что обеспечивает равномерную освещенность изображения.

Кроме того, все лучи, попадающие в микроскоп, участвуют в образовании изображения.

Для микроскопии в проходящем свете применяют конденсоры светлого или темного поля. Конденсор светлого поля рассчитан на проходящее освещение препарата, а конденсор темного поля – на освещение препарата полым световым конусом. Чтобы луч света не мешал наблюдателю, пользуются конденсорами, создающими косое световое поле (под углом к оптической оси микроскопа), а также конденсорами для фазово-контрастных исследований, применяются и конденсоры отраженного света (эпиконденсоры), представляющие собой кольцеобразную зеркальную или зеркально-линзовую систему вокруг объектива.

Приложение А. Область профессиональной деятельности выпускников бакалавриата

Согласно основной образовательной программе бакалавриата «Прикладная и компьютерная оптика», выпускник может решать профессиональные задачи по следующим видам профессиональной деятельности:

Научно-исследовательская деятельность бакалавров включает:

- формулирование задачи и разработка плана научного исследования для решения проблемы в области оптотехники на основе сбора, обработки, анализа и систематизации научно-технической информации;
- выбор методик и средств решения поставленной задачи с применением современных инфо-коммуникационных технологий;
- разработку математических моделей и методов моделирования объектов исследования, построение алгоритма решения научно-технической задачи и ее программная реализация;
- моделирование с целью анализа и оптимизации параметров технического решения техники и технологий на основе разработанных и средств исследования и проектирования, включая пакеты прикладных программ;
- разработку оптимального метода и программ экспериментальных исследований технических объектов и технологий, проведение измерений параметров объектов с выбором технических средств и обработкой результатов;
- подготовку научно-технических отчетов, обзоров, публикаций по результатам выполненных исследований с использованием современных средств редактирования и печати;
- управление результатами научно-исследовательской деятельности, защита и коммерциализация прав на объекты интеллектуальной и промышленной собственности.

Проектная деятельность бакалавров включает:

- анализ состояния научно-технической проблемы, составление технического задания, постановка цели и задач проектирования технических объектов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников;
- разработку функциональных и структурных схем технических объектов, структур с установлением технических требований на отдельные блоки и элементы;
- проектирование и конструирование систем, блоков и узлов с использованием средств компьютерного проектирования; проведением проектных расчетов и технико-экономическим обоснованием;

- оценку технологичности конструкторских решений, разработка технологических процессов сборки, настройки, юстировки и контроля блоков, узлов и деталей;
- проведение технических расчетов целевых показателей качества, технико-экономического и функционально-стоимостного анализа эффективности и оптимизации проектируемых объектов;

Производственно-технологическая деятельность бакалавров включает:

- проектирование, разработку и внедрение технологических процессов и контроля качества приборов, систем и элементов технических объектов;
- разработку и проектирование приспособлений, оснастки и специального инструмента, предусмотренных технологией;
- руководство работами по доводке и освоению техпроцессов производства;
- руководство монтажом, наладкой, испытаниями и сдачей в эксплуатацию опытных образцов техники;
- разработку методов инженерного прогнозирования и приборов и систем в процессе их эксплуатации;
- разработку и оптимизацию программ модельных и натуральных экспериментальных исследований по определению показателей качества технических объектов;
- анализ и применение стратегий технического обслуживания и ремонта приборов и систем;
- разработку прикладного программного обеспечения для проектирования технологических процессов и оборудования, в том числе для обслуживания и ремонта приборов и систем.

Организационно-управленческая деятельность бакалавров включает:

- нахождение оптимальных решений при создании отдельных технических объектов с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности;
- организацию работы научно-производственного коллектива, принятие исполнительских решений;
- разработку планов научно-исследовательских работ и управление ходом их выполнения, включая обеспечение соответствующих служб необходимой технической документацией, материалами, оборудованием;
- организацию работ по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых приборов, их элементов;
- поддержку единого информационного пространства планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла производимой продукции;

- проведение маркетинга и подготовка бизнес-планов выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных технических объектов;
- разработку планов и программ организации инновационной деятельности на предприятии;
- управление программами освоения новой продукции и технологии;
- координацию работы персонала для комплексного решения инновационных проблем – от идеи до серийного производства.

Приложение Б. Параксиальные характеристики оптической системы

В геометрической оптике для удобства чтения оптических схем и компьютерных расчетов приняты единые правила знаков (рис. Б.1):

- положительным **направлением света** считается его распространение слева направо;
- **осевые расстояния** между преломляющими поверхностями считаются положительными, если они измеряются по направлению распространения света, то есть слева направо;
- **радиус кривизны поверхности** считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности (поверхность обращена выпуклостью влево);
- **угол между лучом и оптической осью** считается положительным, если для совмещения оси с лучом ось нужно вращать по часовой стрелке;
- **отрезки, перпендикулярные оптической оси**, считаются положительными, если они располагаются над осью.

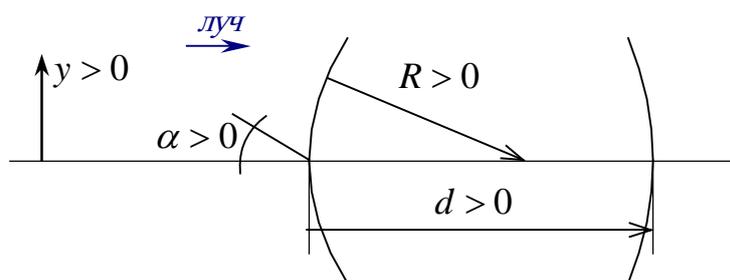


Рис. Б.1. Правило знаков

Одним из основных понятий геометрической оптики являются **сопряженные точки** – точки, одна из которых является изображением другой в соответствии с законами оптики.

Еще одним важным понятием геометрической оптики являются кардинальные точки и отрезки оптической системы. Их называют также **параксиальными характеристиками**, так как они строго выполняются только в параксиальной области (бесконечно близко к оптической оси), в которой отсутствуют аберрации.

Главными плоскостями системы называется пара сопряженных плоскостей, в которых линейное увеличение равно единице. **Главные точки** H и H' – это точки пересечения главных плоскостей с оптической осью.

Плоскость, сопряженная с бесконечно удаленной плоскостью предметов, называется **задней фокальной плоскостью**, а точка пересечения этой

плоскости с оптической осью – **задним фокусом** F' (рис. Б.2). Расстояние от задней главной точки до заднего фокуса называется **задним фокусным расстоянием** f' . Если $f' > 0$, то система называется собирающей (положительной). Если $f' < 0$, то система рассеивающая (отрицательная). Расстояние от последней поверхности до заднего фокуса называется **задним фокальным отрезком** $S'_{F'}$.

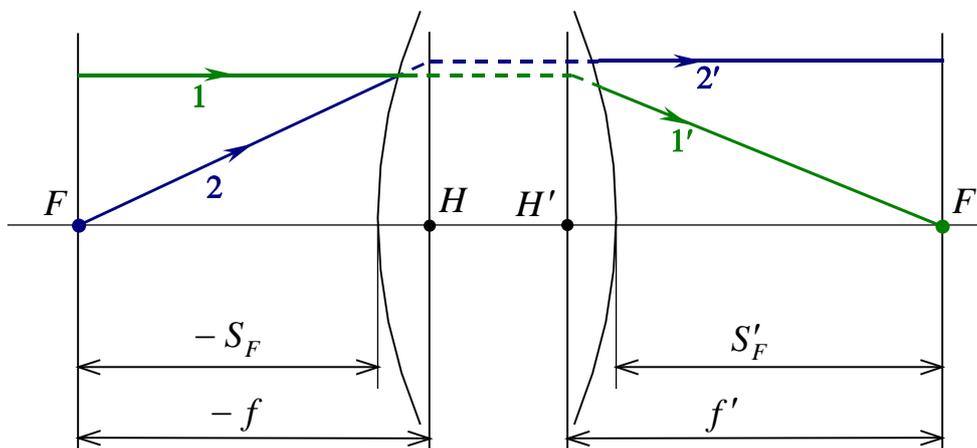


Рис. Б.2. Кардинальные точки и отрезки

Передний фокус F – это точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряженная с бесконечно удаленной точкой, расположенной на оптической оси в пространстве изображений. Если лучи выходят из переднего фокуса, то они идут в пространстве изображений параллельно. **Переднее фокусное расстояние** f – это расстояние от передней главной точки до переднего фокуса. **Передний фокальный отрезок** S_F – это расстояние от первой поверхности до переднего фокуса.

Переднее и заднее фокусные расстояния не являются абсолютно независимыми, они связаны между собой соотношением:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \text{ или } \frac{f'}{n'} = -\frac{f}{n}, \quad (\text{Б.1})$$

где n – показатель преломления в пространстве предметов, а n' – показатель преломления в пространстве изображений.

В том случае, если оптическая система находится в однородной среде (например, в воздухе), то $n = n'$, следовательно, переднее и заднее фокусные расстояния равны по абсолютной величине $|f| = |f'|$.

Приложение В. Построение хода луча в тонких компонентах

Тонкие компоненты – это условное отображение линз, при котором можно пренебречь толщиной линзы, а все лучи идут по законам параксиальной оптики (все параллельные лучи пересекаются в одной точке на фокальной плоскости).

Положительная и отрицательная тонкие линзы обозначаются в виде тонкой стрелки – прямой и перевернутой (рис. В.1). Для тонких компонентов неважны реальные параметры линзы (радиусы кривизны, показатель преломления, толщина), ее единственным параметром является фокусное расстояние, в зависимости от которого и строится ход лучей.



Рис. В.1. Тонкие компоненты

При построении изображения точки, так же, как и при построении хода луча, можно воспользоваться несколькими правилами параксиальной оптики:

- луч, идущий в пространстве предметов параллельно оптической оси, в пространстве изображений проходит через задний фокус;
- лучи, идущие параллельно друг другу, пересекаются в одной точке на фокальной плоскости;
- если линза находится в однородной среде, то луч, идущий через центр линзы не преломляется.

Рассмотрим построение изображения в положительной линзе (рис. В.2).

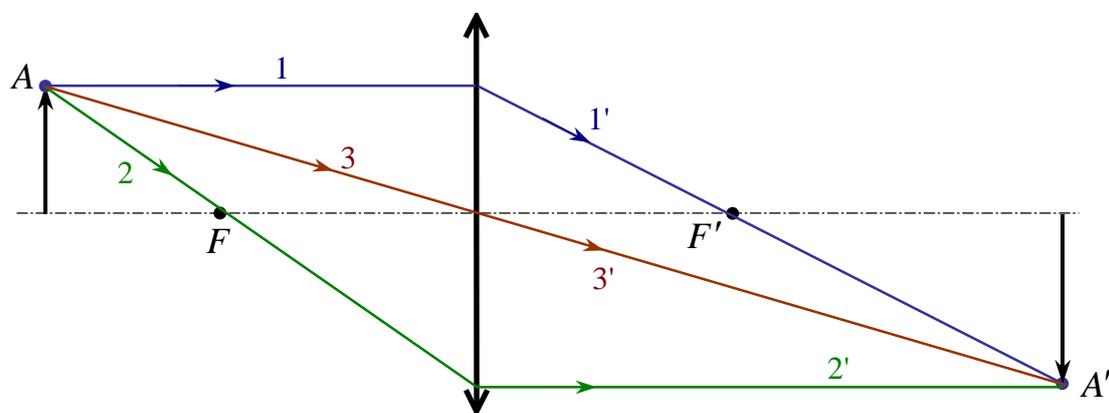


Рис. В.2. Построение изображения в положительной линзе

Для построения изображения A' точки A необходимо построить хотя бы два вспомогательных луча, на пересечении которых и будет находиться точка A' . Вспомогательный луч **1** можно провести через точку A параллельно оптической оси. Тогда в пространстве изображений луч **1'** пройдет через задний фокус линзы. Вспомогательный луч **2** можно провести через точку A и передний фокус линзы. Тогда в пространстве изображений луч **2'** пойдет параллельно оптической оси. На пересечении лучей **1'** и **2'** будет находиться изображение точки A . Еще один вспомогательный луч **3** можно провести через центр линзы, тогда в пространстве изображений его направление не изменится. Теперь в точке A' пересекаются все лучи (**1-2-3**), выходящие из точки A .

В том случае, если вспомогательные лучи не пересекаются в пространстве изображений, мнимое изображение точки будет находиться на пересечении продолжений лучей в пространстве предметов (рис. В.3).

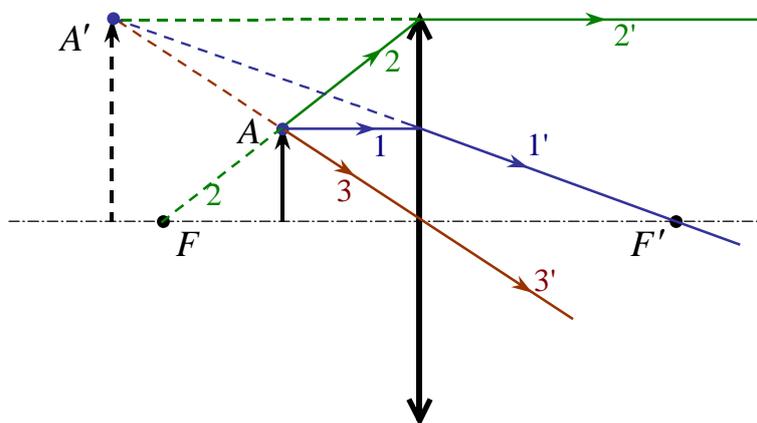


Рис. В.3. Построение мнимого изображения в положительной линзе

При построении изображения точки в отрицательной линзе нужно помнить о том, что задний фокус находится в пространстве предметов, а передний – в пространстве изображений.

Изображение точки через несколько компонентов строится последовательно: изображение точки предыдущей линзой становится предметом для последующей.

При построении хода луча через тонкую линзу также можно воспользоваться вспомогательными лучами, ход которых известен. Рассмотрим несколько способов построения хода луча r (рис. В.4).

Во-первых, можно построить вспомогательный луч, параллельный данному, и проходящий через передний фокус (луч **1**). В пространстве изображений луч **1'** будет идти параллельно оптической оси. Так как лучи r и **1** параллельны в плоскости предметов, то в пространстве изображений они

должны пересекаться в задней фокальной плоскости. Следовательно, луч r' пройдет через точку пересечения луча $1'$ и задней фокальной плоскости.

Во-вторых, можно построить вспомогательный луч, идущий параллельно оптической оси и проходящий через точку пересечения луча r и передней фокальной плоскости (луч 2). Соответствующий ему луч в пространстве изображений (луч $2'$) будет проходить через задний фокус. Так как лучи r и 2 пересекаются в передней фокальной плоскости, в пространстве изображений луч r' пойдет параллельно лучу $2'$.

В том случае, если линза находится в однородной среде, можно построить вспомогательный луч 3 , параллельный лучу r и проходящий через центр линзы. В пространстве изображений его направление не изменится. Так как лучи r и 3 параллельны в пространстве предметов, то в пространстве изображений они будут пересекаться в задней фокальной плоскости, значит, луч r' пройдет через точку пересечения луча $3'$ и задней фокальной плоскости.

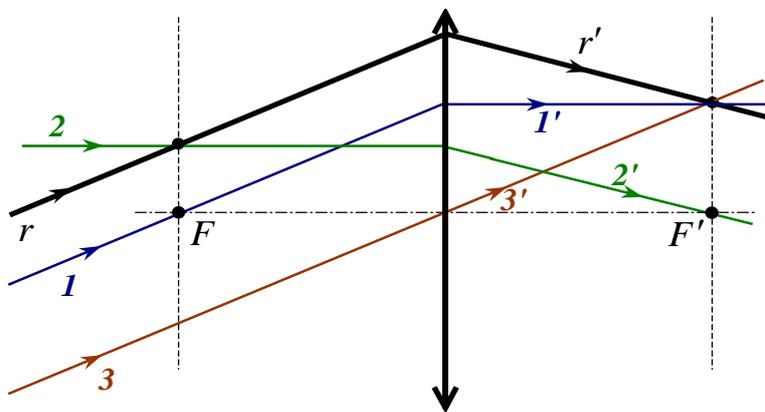


Рис. В.4. Построение хода луча через положительную линзу

Приложение Г. Энергетические величины

Если на некотором расстоянии от источника излучения находится поверхность, через которую проходит электромагнитное излучение, то средняя мощность, переносимая электромагнитным полем за единицу времени, называется **поток излучения** Φ (рис. Г.1). Поток излучения измеряется в ваттах.

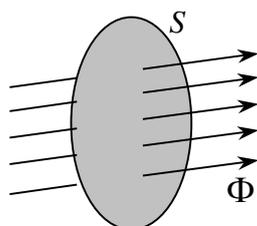


Рис. Г.1. Поток излучения

Для оценки действия излучения на глаз используют понятие **светового потока** – это поток излучения, приведенный к чувствительности среднего глаза. За единицу светового потока принят 1 люмен (лм).

При оценке условий освещения прибегают к понятию светового потока, падающего на поверхность. Поверхностная плотность потока излучения, падающего на данную поверхность, называется **освещенностью**:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (\text{Г.1})$$

где S – площадь поверхности.

Единицей освещенности является люкс (лк). Люксом называется освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает поток в 1 лм.

Для характеристики самосветящихся источников света, а также поверхностей, которые пропускают или отражают падающих на них световой поток, используется поверхностная плотность излучаемого светового потока – **светимость** M . За единицу светимости принимают светимость такой поверхности, которая излучает с 1 м^2 световой поток, равный 1 лм.

Точечный источник излучения характеризуется силой света. **Сила света** – это поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла (часть пространства, ограниченная конической поверхностью), в пределах которого он распространяется (рис. В.2):

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}, \quad (\text{Г.2})$$

где Ω – величина телесного угла.

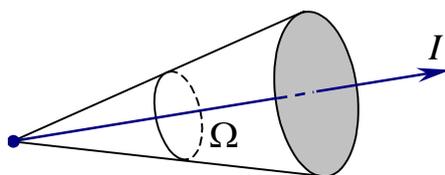


Рис. Г.2. Сила света

Сила света – величина, имеющая направление. За направление силы света принимают ось телесного угла, в пределах которого распространяется поток излучения. Сила света измеряется в канделах (кд).

Для характеристики протяженного источника используется **яркость** – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении.

Если излучающая площадка перпендикулярна направлению излучения, то яркость определяется как отношение силы света к площади площадки:

$$L = \frac{I}{S}. \quad (\text{Г.3})$$

За единицу яркости принимают яркость такой поверхности, которая в перпендикулярном направлении излучает силу света в 1 кд с 1 м².

В общем случае яркость зависит от угла θ между направлением излучения и нормалью к площадке (рис. Г.3):

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \theta}. \quad (\text{Г.4})$$

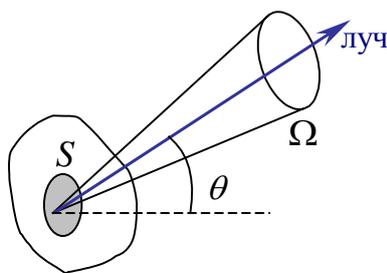


Рис. Г.3. Яркость

Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 446 с.
2. Прикладная оптика: Учебное пособие / Л.Г. Бебчук и др. Под ред. Н.П. Заказнова. 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 320 с.
3. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. Серия: Мир физики и техники. – М: Издательство: Техносфера, 2006. – 424 с.
4. Вознесенский Н.Б., Иванова Т.В., Вознесенская А.О. Основы оптики: Конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 162 с.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики. – СПб: Питер, 2006. – 336 с.
6. Стафеев С. К., Томилин М.Г. Пять тысячелетий оптики: предыстория. – СПб: Политехника, 2006. – 304 с.
7. Верхотуров О.П. Введение в вычислительную оптику. - Новосибирск: СГГА, 1998.– 272 с.
8. Вычислительная оптика: Справочник.3-е изд. Под ред. М.М. Русинова – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 424 с.
9. Бутиков Е.И. Оптика. - СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 608 с.

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| 1. Направление подготовки и область профессиональной деятельности | 4 |
| 1.1. Прикладная оптика и компьютерные технологии | 8 |
| 1.2. Современные направления прикладной и компьютерной оптики..... | 9 |
| 2. Анатомия глаза и зрение | 13 |
| 2.1. Глаз как оптическая система | 13 |
| 2.1.1. Строение глаза..... | 13 |
| 2.1.2. Упрощенная оптическая схема глаза..... | 14 |
| 2.1.3. Аккомодация | 16 |
| 2.2. Глаз как приемник изображения | 17 |
| 2.2.1. Строение сетчатки | 17 |
| 2.2.2. Спектральная чувствительность..... | 18 |
| 2.2.3. Адаптация | 20 |
| 2.3. Характеристики глаза | 21 |
| 2.3.1. Поле зрения глаза..... | 21 |
| 2.3.2. Предел разрешения глаза | 22 |
| 2.3.3. Диаметр зрачка глаза | 22 |
| 2.4. Дефекты зрения и их коррекция | 22 |
| 2.4.1. Близорукость | 23 |
| 2.4.2. Дальнозоркость | 24 |
| 2.4.3. Астигматизм | 25 |
| 3. Основные характеристики оптических систем | 26 |
| 3.1. Оптическая система | 26 |
| 3.2. Присоединительные характеристики | 26 |
| 3.2.1. Характеристики предмета и изображения | 27 |
| 3.2.2. Зрачковые характеристики | 29 |
| 3.2.3. Спектральные характеристики..... | 30 |
| 3.3. Передаточные характеристики..... | 31 |
| 3.3.1. Масштабные передаточные характеристики | 31 |
| 3.3.2. Энергетические передаточные характеристики | 33 |
| 3.3.3. Структурные передаточные характеристики..... | 33 |
| 4. Фотоаппараты | 39 |
| 4.1. Характеристики объектива фотоаппарата | 39 |
| 4.1.1. Фокусное расстояние фотообъектива..... | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2. Поле зрения фотообъектива..... | 39 |
| 4.1.3. Относительное отверстие фотообъектива..... | 40 |
| 4.1.4. Разрешающая способность фотообъектива | 41 |
| 4.1.5. Глубина резкости фотообъектива | 41 |
| 4.2. Классификация фотообъективов..... | 43 |
| 4.2.1. Нормальные объективы..... | 43 |
| 4.2.2. Широкоугольные (короткофокусные) объективы | 44 |
| 4.2.3. Узкоугольные (длиннофокусные) объективы | 44 |
| 4.2.4. Объективы с переменным фокусным расстоянием | 44 |
| 4.3. Видоискатели | 45 |
| 4.4. Системы фокусировки..... | 46 |
| 4.5. Экспозиция | 48 |
| 4.6. Особенности цифровых фотоаппаратов..... | 49 |
| 5. Телескопические системы..... | 53 |
| 5.1. Телескопическая система..... | 53 |
| 5.2. Характеристики телескопической системы..... | 53 |
| 5.2.1. Видимое увеличение телескопической системы..... | 54 |
| 5.2.2. Поле зрения телескопической системы..... | 54 |
| 5.2.3. Диаметры входного и выходного зрачков телескопической системы | 54 |
| 5.2.4. Угловой предел разрешения телескопической системы | 55 |
| 5.3. Схемы телескопических систем..... | 55 |
| 5.3.1. Схема Кеплера..... | 56 |
| 5.3.2. Схема Галилея | 57 |
| 5.3.3. Схема Кассегрена..... | 58 |
| 6. Микроскопы..... | 61 |
| 6.1. Лупа | 61 |
| 6.1.1. Видимое увеличение лупы..... | 61 |
| 6.1.2. Диаметр выходного зрачка лупы | 62 |
| 6.1.3. Поле зрения лупы..... | 62 |
| 6.2. Микроскоп | 63 |
| 6.2.1. Увеличение микроскопа..... | 64 |
| 6.2.2. Поле зрения микроскопа | 64 |
| 6.2.3. Диаметр выходного зрачка микроскопа..... | 65 |
| 6.2.4. Разрешающая способность микроскопа..... | 65 |
| 6.2.5. Полезное увеличение микроскопа | 66 |
| 6.3. Методы наблюдения..... | 67 |
| 6.3.1. Метод светлого поля..... | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3.2. Метод темного поля..... | 68 |
| 6.3.3. Метод исследования в поляризованных лучах..... | 68 |
| 6.3.4. Метод фазового контраста..... | 68 |
| 6.4. Типы микроскопов..... | 69 |
| 6.4.1. Световые микроскопы..... | 69 |
| 6.4.2. Электронные микроскопы | 70 |
| 6.4.3. Сканирующие зондовые микроскопы | 71 |
| 6.4.4. Рентгеновские микроскопы | 72 |
| 7. Осветительные системы..... | 74 |
| 7.1. Типы осветительных систем..... | 74 |
| 7.1.1. Коллектор..... | 74 |
| 7.1.2. Конденсор | 74 |
| 7.2. Осветительные оптические системы | 75 |
| 7.3. Прожектор..... | 77 |
| 7.4. Осветительные системы проекционных приборов | 79 |
| 7.5. Осветительные системы микроскопов | 81 |
| Приложение А. Область профессиональной деятельности выпускников бакалавриата..... | 83 |
| Приложение Б. Параксиальные характеристики оптической системы | 86 |
| Приложение В. Построение хода луча в тонких компонентах | 88 |
| Приложение Г. Энергетические величины..... | 91 |
| Литература | 93 |

НИУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы и успешно реализовал инновационную образовательную программу «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», что позволило выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворять возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях науки. Реализация этой программы создала основу формирования программы дальнейшего развития вуза до 2015 года, включая внедрение современной модели образования.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики была образована в 1996 году путем объединения двух старейших кафедр оптического факультета: кафедры теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики, в результате чего кафедра стала крупнейшей и ведущей в России в области прикладной оптики, оптических приборов и компьютерной оптики.

Кафедра имеет восемь учебно-исследовательских лабораторий: оптических измерений, контрольно-измерительных оптических приборов, микроскопов и медицинских оптических приборов, геодезических приборов, кинофотоприборов, компьютерных средств контроля оптики, исследования качества оптического изображения, а также лабораторию компьютерной оптики. На кафедре работают два сетевых компьютерных класса.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики – ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, ведущего оптического предприятия – ОАО «ЛОМО».

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, премиями Минвуза.

В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;
- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическую оптику;
- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

С 1965 года на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории

дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной оптики, проводимых на кафедре являются:

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа аберраций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);
- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманограммы и т.п.);
- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.);
- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;
- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаниях в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оплотехники, оптических приборов и систем);
- глубоких знаниях прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;
- владении современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сервере: **aco.ifmo.ru**

**Татьяна Владимировна Иванова
Анна Олеговна Вознесенская**

**Введение в прикладную и компьютерную
ОПТИКУ
Конспект лекций**

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

А.О. Вознесенская

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета информационных технологий,
механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.09

Подписано к печати

Заказ № 2589 от 16.01.2013

Тираж экз.

Отпечатано на ризографе

