ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

ЛЕКЦИЯ 6. ТЕМА 5. ОПТИКА

1. Природа света

Оптика — раздел физики, изучающий свойства и поведение света, а также явления, связанные с распространением электромагнитных волн оптического диапазона. К оптическому диапазону относят электромагнитное излучение с длинами волн приблизительно от 10 нм до 1 мм, охватывающее ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра.

Историческое развитие представлений о природе света прошло три основных этапа. Корпускулярная теория И. Ньютона (конец XVII в.) рассматривала свет как поток материальных частиц. Волновая теория Х. Гюйгенса, развитая в XIX в. О. Френелем, Дж. Максвеллом и Г. Герцем, трактует свет как электромагнитную волну. Максвелл теоретически показал, что свет представляет собой электромагнитную волну, что было подтверждено опытами Герца. Третий этап связан с квантовой теорией (М. Планк, 1900; А. Эйнштейн, 1905), согласно которой свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом: он проявляет волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация) и свойства потока квантов — фотонов с энергией $E = h\nu$, где $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν — частота излучения.

Световая волна — поперечная электромагнитная волна: колебания векторов напряжённости электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей происходят перпендикулярно направлению распространения и взаимно перпендикулярны. Физиологическое и фотохимическое действие света обусловлено главным образом электрической составляющей поля.

2. Скорость распространения света

Скорость света в вакууме — фундаментальная физическая постоянная:

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с} \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}.$$

С 1983 года значение скорости света закреплено точно и лежит в основе современного определения метра (метр — расстояние, проходимое светом в вакууме за 1/299 792 458 с).

Первые определения скорости света — астрономические: метод Рёмера (1676) по запаздыванию затмений спутников Юпитера и метод аберрации света Брэдли (1728). Первое лабораторное измерение выполнил Физо (1849) с помощью вращающегося зубчатого колеса; позднее Майкельсон осуществил измерения вращающегося зеркала с точностью порядка $10^{-4}\%$. Современные методы основаны на независимом точном измерении частоты и длины волны лазерного излучения.

В среде скорость света меньше: $v = c/n$, где n — абсолютный показатель преломления среды, равный отношению скоростей света в вакууме и в данной среде. Для воды $n \approx 1{,}33$, для стекла $n \approx 1{,}5$, для алмаза $n \approx 2{,}4$. Показатель преломления зависит от частоты света, что проявляется в дисперсии.

3. Законы отражения и преломления света

Распространение света в однородной среде описывается законом прямолинейного распространения: в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Закон независимости световых лучей утверждает, что лучи распространяются независимо друг от друга.

При падении света на границу раздела двух прозрачных сред выполняются:

Закон отражения: падающий луч, отражённый луч и нормаль к границе раздела лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения:

$$\alpha' = \alpha.$$

Закон преломления (закон Снелла): падающий луч, преломлённый луч и нормаль лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления постоянно для двух данных сред и равно их относительному показателю преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Оба закона математически выражаются принципом Ферма: свет между двумя точками распространяется по пути, требующему минимального времени. Волновая трактовка законов преломления и отражения дана принципом Гюйгенса: каждая точка среды, до которой доходит волновой фронт, сама становится источником вторичных волн; огибающая вторичных волн определяет положение нового фронта.

4. Полное отражение

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) угол преломления больше угла падения. При некотором предельном угле падения $\alpha_{\text{пр}}$ преломлённый луч идёт вдоль границы раздела ($\beta = 90^\circ$):

$$\sin\alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

При углах падения $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$ свет не проходит во вторую среду — происходит полное внутреннее отражение: энергия падающего луча полностью возвращается в первую среду. Для границы «стекло — воздух» предельный угол составляет примерно $41{,}8^\circ$.

Полное внутреннее отражение лежит в основе работы световодов и волоконной оптики, призматических биноклей, перископов, рефрактометров, алмазной огранки и зеркального отражения в водной среде для подводных наблюдателей.

5. Линзы

Линза — прозрачное тело, ограниченное криволинейными (обычно сферическими) поверхностями. Собирающие линзы превращают параллельный пучок в сходящийся, рассеивающие — в расходящийся. Центр линзы называется оптическим центром, прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, — главной оптической осью.

Основные характеристики линзы:

- **Фокусное расстояние** F — расстояние от оптического центра до фокуса. Для собирающей линзы $F > 0$, для рассеивающей $F < 0$. Величина, обратная F в метрах, — оптическая сила: $D = 1/F$ (измеряется в диоптриях, дптр).
- **Формула тонкой линзы:**

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где d — расстояние от предмета до линзы, f — расстояние от линзы до изображения.

- **Увеличение:** $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$.
- Для линзы в среде с показателем n_0: $\frac{1}{F} = \left(\frac{n}{n_0} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$ — формула изготовителя линзы.

Вследствие сферичности поверхностей реальные линзы обладают аберрациями: сферической, хроматической (зависимость F от длины волны), комой, астигматизмом, дисторсией. Их уменьшают комбинированием линз из разных стёкол и диафрагмированием.

6. Глаз как оптическая система

Оптическая система глаза построена из роговицы, водянистой влаги, хрусталика и стекловидного тела. Главная преломляющая роль принадлежит роговице ($n \approx 1{,}376$) и хрусталику ($n \approx 1{,}386$–$1{,}406$). Суммарная оптическая сила нормального глаза около 60 дптр, фокусное расстояние около 17 мм.

Акомодация — способность глаза изменять оптическую силу за счёт деформации хрусталика цилиарной мышцей, что позволяет фокусировать изображение на сетчатке для предметов на разных расстояниях. Дальность аккомодации ограничена двумя точками: ближайшей (около 10–12 см у молодого человека) и дальнейшей (бесконечность для нормального глаза).

Основные дефекты рефракции:

- **Близорукость (миопия):** фокус перед сетчаткой; коррекция рассеивающими линзами.
- **Дальнозоркость (гиперметропия):** фокус за сетчаткой; коррекция собирающими линзами.
- **Астигматизм:** неодинаковая рефракция в разных меридианах; коррекция цилиндрическими линзами.

Сетчатка содержит рецепторы двух типов: палочки (примерно 120 млн, монохроматическое «сумеречное» зрение, максимальная чувствительность около 500 нм) и колбочки (около 6–7 млн, цветное зрение; пики чувствительности трёх типов колбочек соответствуют синей, зелёной и красной областям спектра). Чувствительность глаза максимальна в зелёной области видимого диапазона.

7. Оптические приборы

- **Лупа** — короткофокусная собирающая линза; даёт мнимое увеличенное изображение, увеличение $\Gamma = \frac{d_0}{F}$, где $d_0 = 25$ см — расстояние наилучшего зрения.
- **Микроскоп** — сочетание короткофокусного объектива и окуляра; увеличение — произведение увеличений объектива и окуляра. Разрешающая способность ограничена дифракцией; полезное увеличение не превышает примерно 10^3.
- **Телескоп** (рефрактор Галилея, рефрактор Кеплера, рефлектор Ньютона) — собирает свет удалённых объектов; разрешающая способность определяется апертурой (дифракционный критерий Рэлея).
- **Фотоаппарат** — объектив с переменным фокусным расстоянием, диафрагма, затвор; светочувствительный приёмник — матрица или плёнка.
- **Проекционные приборы** (киноаппарат, проектор, эпидиаскоп) создают действительное увеличенное изображение на экране.

8. Волновые свойства света. Интерференция света

Интерференция — явление наложения когерентных волн, при котором происходит устойчивое перераспределение энергии в пространстве: в одних точках наблюдается усиление колебаний, в других — ослабление.

Условие максимума при наложении двух волн:

$$\Delta = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

где Δ — оптическая разность хода (произведение геометрической разности хода на показатель преломления). Условие минимума:

$$\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Классический опыт Юнга (1802): свет от узкой щели падает на две близко расположенные щели; волны от них интерферируют, образуя на экране систему чередующихся светлых и тёмных полос. Расстояние между соседними максимумами:

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d},$$

где L — расстояние до экрана, d — расстояние между источниками. Опыт Юнга впервые дал возможность измерить длину световой волны и явился прямым доказательством волновой природы света.

Другие схемы получения интерференционной картины — бипризма Френеля, билинза Билле, зеркала Френеля, кольца Линника.

9. Когерентность световых лучей

Когерентность — согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных процессов. Для интерференции необходимы когерентные волны: с одинаковой частотой и постоянной во времени разностью фаз.

Проблема когерентности световых волн связана с механизмом излучения: элементарные источники (атомы) излучают независимо и отрезками конечной длительности (~10^{-8} с). Поэтому независимые источники некогерентны. Когерентные пучки получают разделением волны одного источника: делением волнового фронта (щели Юнга, бипризма) или делением амплитуды (полупрозрачные пластины, тонкие плёнки).

Различают временну́ю когерентность (характеризуется длиной когерентности $l_{\text{ког}} = c\tau$, где τ — время когерентности; для реальных тепловых источников $l_{\text{ког}}$ порядка микрометров и более) и пространственную когерентность, связанную с конечными размерами источника. Лазеры обладают высокой когерентностью обоих типов, что делает их незаменимыми в интерферометрии и голографии.

10. Интерференция в тонких плёнках. Полосы равной толщины. Кольца Ньютона

При отражении света от тонкой плёнки (толщиной d, показателем n) интерферируют лучи, отражённые от верхней и нижней поверхностей плёнки. Оптическая разность хода:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2},$$

где α — угол падения, а добавка $\lambda_0/2$ учитывает изменение фазы на π при отражении от оптически более плотной среды. Условие максимума (в отражённом свете):

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = k\lambda_0.$$

Интерференция в плёнках объясняет цвета тонких плёнок (масляные пятна, мыльные пузыри, крылья насекомых), а также лежит в основе просветления оптики: на поверхность линз наносят плёнку толщиной $\lambda/4n$, обеспечивающую гашение отражённого света.

Полосы равной толщины — интерференционные полосы, каждая из которых соответствует определённой толщине плёнки; они локализованы на поверхности клина. Пример — клин между двумя стеклянными пластинками: полосы параллельны ребру клина.

Кольца Ньютона — полосы равной толщины в воздушном зазоре между плоской пластиной и плосковыпуклой линзой большой кривизны. Радиусы тёмных колец в отражённом свете:

$$r_k = \sqrt{k\lambda R} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

где R — радиус кривизны линзы. Измеряя радиусы колец при известном λ, определяют R, и наоборот. Кольца Ньютона используют для контроля качества полировки оптических поверхностей.

11. Использование интерференции в науке и технике

- **Интерферометры** (Майкельсона, Жамена, Рэлея, Фабри — Перо) применяются для точных измерений длин, малых перемещений, показателей преломления, контроля плоскостности поверхностей, анализа спектрального состава излучения. Современные лазерные гравитационные обсерватории (LIGO, Virgo) регистрируют изменение длины плеч порядка 10^{-19} м.
- **Просветление оптики** — уменьшение отражения за счёт интерференционных покрытий.
- **Контроль качества обработки поверхностей** — по искажению интерференционных полос выявляют неровности, царапины, отклонения от сферичности с точностью до долей длины волны.
- **Голографическая и спекл-интерферометрия** — измерение деформаций и вибраций.
- **Интерференционные фильтры и покрытия** — селективное пропускание и отражение, многослойные зеркала.
- **Метрология** — эталон длины на основе излучения стабилизированного лазера.

12. Дифракция света

Дифракция — совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями (границы экранов, малые отверстия) и связанных с отклонением от законов геометрической оптики: огибание препятствий светом и проникновение света в область геометрической тени. Дифракция — следствие волновой природы света; она наглядно проявляется при размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны.

Количественное описание даёт принцип Гюйгенса — Френеля: волновой фронт заменяется системой вторичных источников, а результирующее колебание — интерференцией вторичных волн. Метод зон Френеля позволяет качественно разобрать дифракцию на круглом отверстии и диске (существование пятна Пуассона в центре тени диска).

13. Дифракция на щели в параллельных лучах

Дифракция Фраунгофера (в параллельных лучах) на одной щели ширины a наблюдается в фокальной плоскости линзы. Направления на дифракционные минимумы определяются условием:

$$a \sin \varphi = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

В центре — максимум нулевого порядка; по обе стороны — чередующиеся тёмные и светлые полосы. Ширина центрального максимума растёт с длиной волны и уменьшается с ростом ширины щели. Если щель очень широка ($a \gg \lambda$), дифракционная картина вырождается: свет распространяется практически прямолинейно.

14. Дифракционная решётка

Дифракционная решётка — совокупность большого числа одинаковых параллельных щелей одинаковой ширины b, разделённых непрозрачными промежутками a. Величина $d = a + b$ — период решётки. Главные максимумы наблюдаются при условии:

$$d \sin \varphi = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Между главными максимумами расположены добавочные минимумы, а число вторичных максимумов равно $N - 2$, где N — число щелей. Положение максимумов зависит от длины волны, поэтому решётка разлагает белый свет в спектр: это дифракционный спектр, в котором длинноволновые лучи отклоняются сильнее (в отличие от призматического спектра). Разрешающая способность решётки $R = \lambda / \Delta\lambda = kN$ растёт с числом щелей и порядком спектра. Дифракционные решётки — основа спектральных приборов: монохроматоров, спектрографов, спектрометров.

15. Понятие о голографии

Голография — способ записи и восстановления волнового поля, предложенный Д. Габором в 1948 году (Нобелевская премия 1971 г.). В отличие от фотографии, фиксирующей только амплитуду (интенсивность) света, голография регистрирует и фазу волны, что достигается записью интерференционной картины предметной волны с опорной волной от того же когерентного источника.

При освещении голограммы опорной волной восстанавливается полная копия предметной волны, и наблюдатель видит объёмное изображение с полным эффектом параллакса. Практическое развитие метод получил после появления лазеров (работы Ю. Н. Денисюка по цветной голографии на толстослойных средах, Э. Лейта и Ю. Упатниекса по внеосевым голограммам). Голография применяется в голографической интерферометрии, обработке информации, защитных элементах (голограммы на документах и банкнотах), отображении информации.

16. Поляризация поперечных волн. Поляризация света

Поляризация — свойство поперечных волн, состоящее в упорядоченности колебаний вектора $\vec{E}$ относительно направления распространения. Продольные волны поляризации не имеют, поэтому поляризация — прямое доказательство поперечности световых волн.

Свет, у которого направления колебаний $\vec{E}$ во всех плоскостях равновероятны, называется естественным. Если колебания совершаются в одной плоскости, свет — плоско- (линейно-) поляризованный. Возможно также круговая и эллиптическая поляризация.

Закон Малюса: интенсивность света, прошедшего через анализатор,

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где α — угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера: при отражении от диэлектрика под углом α_B, удовлетворяющим

$$\tan \alpha_B = n_{21},$$

отражённый луч полностью поляризован (перпендикулярно плоскости падения); преломлённый луч частично поляризован. При этом отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны.

17. Двойное лучепреломление

Двойное лучепреломление (двулучепреломление) — расщепление светового луча на два при прохождении через анизотропные кристаллы (икосаэдрическая кальцит, кварц, турмалин и др.), открытое Э. Бартолином в 1669 г. на кальците. Один луч (обыкновенный, o) подчиняется закону преломления и имеет постоянный показатель n_o; второй (необыкновенный, e) не подчиняется закону Снелла, его показатель n_e зависит от направления распространения. Оба луча линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Направление, вдоль которого не происходит двойного лучепреломления, — оптическая ось кристалла. Разность показателей $\Delta n = n_e - n_o$ характеризует двупреломление. Явление используется для изготовления призм Николя, волновых пластин, компенсаторов и модуляторов света. Искусственное двойное лучепреломление возникает в телах под механической нагрузкой (эффект фотоупругости) и в диэлектриках в электрическом поле (эффект Керра) — на этом основан метод исследования напряжений в конструкциях.

18. Поляроиды

Поляроид (поляризационный фильтр) — устройство, превращающее естественный свет в линейно поляризованный. Технически реализуются тонкими плёнками из ориентированных полимеров (испарённый гератин, иодхининовые соединения, поливиниловый спирт), обладающих дихроизмом — селективным поглощением света одной поляризации. Поляроиды удобны, дёшевы и допускают большие апертуры, хотя и дают частичную поляризацию.

Применения: поляризационные очки (гашение бликов от отражённых поверхностей), стереокинематография, фото- и киносъёмка, поляриметрия концентрации растворов (сахариметрия), исследование механических напряжений, жидкокристаллические дисплеи.

19. Дисперсия света

Дисперсия света — зависимость показателя преломления вещества от частоты (длины волны) света: $n = f(\lambda)$. Нормальная дисперсия: n убывает с ростом длины волны (фиолетовые лучи преломляются сильнее красных). Аномальная дисперсия наблюдается вблизи полос поглощения вещества и описывается теорией электронного поглощения (применима модель Лоренца).

Первое экспериментальное исследование — разложение белого света призмой И. Ньютоном (1666): белый свет — сложный, состоит из монохроматических составляющих, характеризуемых своей длиной волны. Видимый диапазон: примерно 380–760 нм (от фиолетового к красному). Дисперсия лежит в основе спектрального анализа, работы призменных спектроскопов; следствие дисперсии — хроматическая аберрация линз, устраняемая ахроматическими системами из стёкол с разными дисперсиями (крон и флинт).

20. Виды спектров

- **Сплошные (непрерывные) спектры** — излучают нагретые конденсированные тела (раскалённые твёрдые и жидкие тела, плотные газы); содержат все длины волн непрерывного диапазона.
- **Линейчатые спектры испускания** — излучают атомарные газы и пары при высокой температуре; состоят из отдельных узких линий, характерных для данного химического элемента (изолированные атомы). Структура линий описывается квантовой теорией: переходы между энергетическими уровнями, формула Бальмера — Ридберга для атома водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad R \approx 1{,}097 \times 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

- **Полосатые спектры** — излучают молекулярные газы; полосы, составленные из множества близких линий (колебательно-вращательные переходы).
- **Спектры поглощения (абсорбционные)** — образуются при прохождении сплошного излучения через поглощающие вещества. Атомы поглощают на тех же частотах, на которых излучают: линейчатый спектр поглощения содержит тёмные линии на фоне непрерывного спектра. Фраунгоферовы линии в солнечном спектре — следствие поглощения в атмосфере Солнца; они используются для определения химического состава небесных тел (спектральный анализ, основы которого заложили Бунзен и Кирхгоф в 1859 г.).

Закон Кирхгофа: отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры.

21. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения

Инфракрасное излучение — электромагнитные волны с длинами волн от 760 нм до ~1 мм. Излучается всеми телами, температура которых выше 0 К; наиболее интенсивно — телами при температуре несколько сотен и тысяч кельвинов. Свойства: нагревание поглощающих тел (тепловой эффект), отражение, преломление, огибание препятствий аналогично видимому свету. Применения: термография и тепловизоры, дистанционное зондирование, ночное видение, сушка, спектроскопия молекулярных колебаний, волоконная оптика (области 1,3–1,55 мкм).

Ультрафиолетовое излучение — электромагнитные волны с длинами волн от 10 до 400 нм. Источники: Солнце (значительная часть поглощается озоновым слоем атмосферы), газоразрядные лампы, лазеры. Свойства: сильное фотохимическое и биологическое действие (загар, бактерицидный эффект), вызывает люминесценцию, ионизирует, преломляется и рассеивается сильнее видимого света. Применения: стерилизация, люминесцентный анализ, спектральный анализ, ультрафиолетовая литография в микроэлектронике (экспонирование ниже 200 нм), медицинские и физиотерапевтические процедуры.

22. Рентгеновские лучи: природа и свойства

Рентгеновское излучение открыто В. К. Рентгеном в 1895 году. Это электромагнитное излучение с длинами волн примерно от 10^{-3} до 10 нм, то есть диапазон между ультрафиолетовым и гамма-излучением. Природа — та же электромагнитная, что и у света; рентгеновские фотоны имеют энергию порядка единиц — сотен кэВ.

Источники: рентгеновские трубки (тормозное излучение при резком торможении электронов на аноде и характеристическое излучение — дискретные линии, возникающие при переходах на внутренние электронные уровни атомов; закон Мозли связывает частоту характеристического излучения с атомным номером элемента), синхротроны и накопители (мощное синхротронное излучение), лазерные плазменные источники.

Свойства: большая проникающая способность, зависящая от плотности и атомного номера поглотителя; фотохимическое и ионизирующее действие; вызывают люминесценцию ряда веществ; не отклоняются электрическим и магнитным полями; когерентно рассеиваются на кристаллической решётке — рентгеноструктурный анализ (условие Вульфа — Брэггов: $2d\sin\theta = k\lambda$), установивший атомную структуру кристаллов и биомакромолекул.

Применения: рентгенодиагностика в медицине (рентгенография, компьютерная томография), рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ, дефектоскопия материалов, рентгеновская астрономия, рентгеновская литография. Доза излучения нормируется и контролируется, что учитывает биологическое действие ионизирующего излучения.