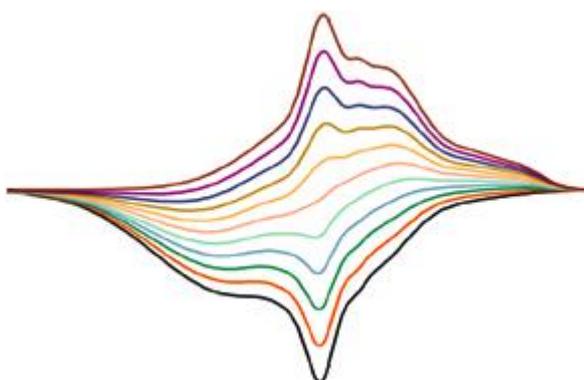


**В.А. Асеев, А.Н. Бабкина, Л.Ю. Миронов,
Р.К. Нурыев**

**МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.А. Асеев, А.Н. Бабкина, Л.Ю. Миронов,
Р.К. Нурыев**
**МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата



**Санкт-Петербург
2020**

Асеев В.А., Бабкина А.Н., Миронов Л.Ю., Нурыев Р.К., Методы и техника исследования оптических материалов – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 56 с.

Рецензент(ы):

Колобкова Елена Вячеславовна, доктор химических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический университет);

Учебно-методическое пособие содержит описания четырех лабораторных практикумов по образовательному курсу «Основы фотоники». Данные лабораторные практикумы разработаны для изучения оптических свойств материалов фотоники. Каждый практикум содержит лаконичную базу необходимых теоретических сведений, описание лабораторного стенда, условия и порядок проведения экспериментальной части практикума, а также контрольные вопросы для самостоятельной подготовки. В результате успешного прохождения практикума студенты получают необходимые знания, умения и навыки для изучения материалов фотоники и аналитической обработки экспериментальных результатов.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Асеев В.А., Бабкина А.Н., Миронов Л.Ю., Нурыев Р.К., 2019

Содержание

Введение	6
Лабораторная работа «Моделирование волоконного эрбиевого усилителя» 7	
Введение.....	7
Принцип работы эбиевого волоконного усилителя для линий оптической связи	8
Устройство эрбиевого волоконного усилителя	11
Основные характеристики волоконных эрбиевых усилителей.....	13
Коэффициент усиления	14
Выходная мощность и энергетическая эффективность	15
Усиленное спонтанное излучение и шум усилителя	15
Ширина и равномерность полосы усиления	16
Порядок выполнения лабораторной работы	17
Контрольные вопросы для самостоятельного изучения	20
Лабораторная работа «Квантовый выход и время затухания люминесценции в стекле»	22
Излучательные и безызлучательные переходы	22
Иттербий-эрбиевые стекла.....	25
Методика измерения кинетики затухания люминесценции.....	26
Методика расчета радиационного времени жизни и квантового выхода.....	27
Порядок выполнения лабораторной работы	28
Порядок определения времени жизни по кривой затухания.....	29
Порядок определения квантового выхода.....	29
Содержание отчета по лабораторной работе	29
Контрольные вопросы для самостоятельного изучения.....	30
Лабораторная работа «Исследование кинетических свойств фотохромных стекол»	31
Введение.....	31
Механизм светочувствительности	32
Потемнение фотохромных стекол.....	34
Обесцвечивание фотохромных стекол	36
Изменение свойств фотохромных материалов	40
Порядок выполнения работы.....	42
Контрольные вопросы для самостоятельного изучения	44
Лабораторная работа «Определение шероховатости поверхности и толщины оптических покрытий методом двухлучевой интерференции»	45

Методы определения шероховатости	46
Назначение и устройство МИИ-4.....	49
Порядок выполнения работы.....	51
Контрольные вопросы для самостоятельного изучения.....	53
Список литературы	54

СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

УФ – ультрафиолетовый

ИК - инфракрасный

ФТР – фототерморефрактивное (стекло)

λ – длина волны

n – показатель преломления

ε – диэлектрическая проницаемость

ω, ν – частота излучения

T – температура

I – интенсивность излучения

E – амплитуда электрической компоненты поля электромагнитной волны

c – скорость света в вакууме

t – время

τ – время жизни люминесценции

h – постоянная Планка

$\sigma_{12}(\lambda)$ – сечение поглощения

Введение

Целью данного учебно-методического пособия является подготовка студентов к лабораторному практикуму по образовательному курсу «Основы фотоники». Лабораторный практикум разработан для реализации образовательных программ высшего образования бакалавриата по направлению 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и включает в себя четыре лабораторные работы, фокусирующиеся на изучении определенных аспектов современных материалов фотоники.

Учебно-методическое пособие содержит описания четырех лабораторных работ, лаконичную базу необходимых теоретических сведений, описание лабораторного стенда, условия и порядок проведения экспериментальной части практикума, а также контрольные вопросы для самостоятельной подготовки.

В теоретической части рассмотрены физические явления и законы, лежащие в основе работы устройств и материалов фотоники, таких как волоконные усилители, фотохромные стекла, оптические покрытия. Экспериментальная часть содержит информацию по исследованию данных устройств и материалов, их основных характеристик и свойств. Дополнительные вопросы направлены на углубление знаний в данных областях в процессе самостоятельной подготовки.

В результате успешного прохождения практикума студенты получают необходимые знания, умения и навыки для изучения материалов фотоники и аналитической обработки экспериментальных результатов.

Лабораторная работа «Моделирование волоконного эрбиевого усилителя»

Цель лабораторной работы: исследование мощностных характеристик кварцевого волоконного усилителя, активированного ионами эрбия.

Объект исследования: Кварцевый волоконный усилитель, активированный ионами эрбия.

Задачи, решаемые в лабораторной работе:

1. Изучить устройство и принцип работы эрбиевого волоконного усилителя для линий оптической связи;
2. Изучить основные параметры эрбиевых волоконных усилителей;
3. Исследовать зависимость выходной мощности эрбиевого волоконного усилителя от длины волны накачки;
4. Исследовать зависимость выходной мощности эрбиевого волоконного усилителя от мощности излучения накачки.

Введение

При распространении оптического сигнала в кварцевом волокне из-за потерь неизбежно происходит ослабление исходного оптического сигнала на 10 – 20 дБ через каждые 50 – 100 км. Сигналы ниже -30 дБ необходимо усиливать до уровня ~30 дБ, чтобы избежать потери информации и или ухудшения качества передачи. Существует два типа устройств, способных поддерживать оптический сигнал на должном уровне: регенераторы и оптические усилители. Первые представляют собой оптоэлектронные и электрооптические преобразователи, а вторые представляют собой усилители, принцип работы которых основан на усилении оптического сигнала без преобразования в электрический. Однако наиболее часто используемые – все же вторые, так как они обладают рядом неоспоримых преимуществ, таких как:

- ✓ В первую очередь, попадание рабочего диапазона усилителей, активированных ионами эрбия, в область наименьших потерь оптических кварцевых волокон (что, на самом деле, довольно удачное совпадение);
- ✓ Следствием первого пункта также будет низкий уровень шума от самого усилителя и относительная простота интеграции в волоконно-оптические линии связи;
- ✓ Немаловажно также и непосредственное усиление оптических сигналов, то есть усиление исходного сигнала без преобразования в электрический и обратно;
- ✓ Одно из важнейших преимуществ оптического эрбиевого усилителя – исключительная возможность одновременного усиления различных длин волн.

Принцип работы эрбиевого волоконного усилителя для линий оптической связи

Принцип работы эрбиевого усилителя заключается в усилении исходного оптического сигнала вынужденным излучением. В некотором смысле, это аналогично принципу создания лазерного излучения. Суть происходящих процессов можно описать следующим образом: через участок оптического волокна, активированного трехвалентными ионами эрбия, в котором создана *инверсия населенности*, проходит исходный и уже ослабленный оптический сигнал, и в результате за счет вынужденных переходов происходит его усиление до необходимого значения.

Населенностью энергетического уровня называется количество ионов в единице объема с некоторым значением энергии, соответствующим определенному энергетическому уровню. Населенность основного уровня максимальна тогда, когда все ионы находятся в основном состоянии. Это состояние возникает при отсутствии энергии накачки. При этом населенности всех остальных уровней минимальны. Соответственно процесс, при котором населенность любого энергетического уровня выше основного, называют *инверсией населенности*. Если в этом случае в среду попадает излучение с определенной энергией, которая должна соответствовать энергии перехода из метастабильного состояния в основное, то происходит излучательный переход иона с метастабильного уровня на основной (рисунок 1) с испусканием фотона. Это вероятностный процесс, зависящий от многих факторов. Основной вклад вносит мощность накачки. В результате происходит увеличение числа фотонов, то есть происходит усиление света. Если же исходный сигнал отсутствует, то возбужденные ионы спонтанно релаксируют на основной уровень с испусканием фотона.

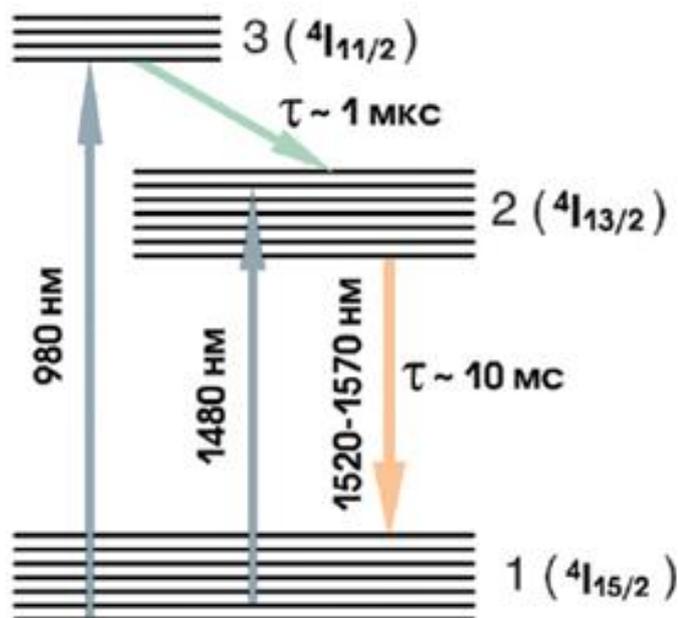


Рисунок 1 – Тривиальная схема энергетических уровней ионов эрбия (Er^{3+})

Для ионов эрбия инверсия населенности наступает при переходе около половины ионов на метастабильный уровень 2. Если населенность основного и метастабильного уровней равны, то в этом случае говорят о том, что мощность накачки достигла *пороговой мощности*. Усиление света в эрбиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. Максимум полос поглощения и люминесценции находится в области 1,54 мкм (рисунок 2). Т.е. они, вообще говоря, совпадают. И если мощность накачки ниже пороговой, то в таком случае наблюдается ослабление сигнала из-за его поглощения.

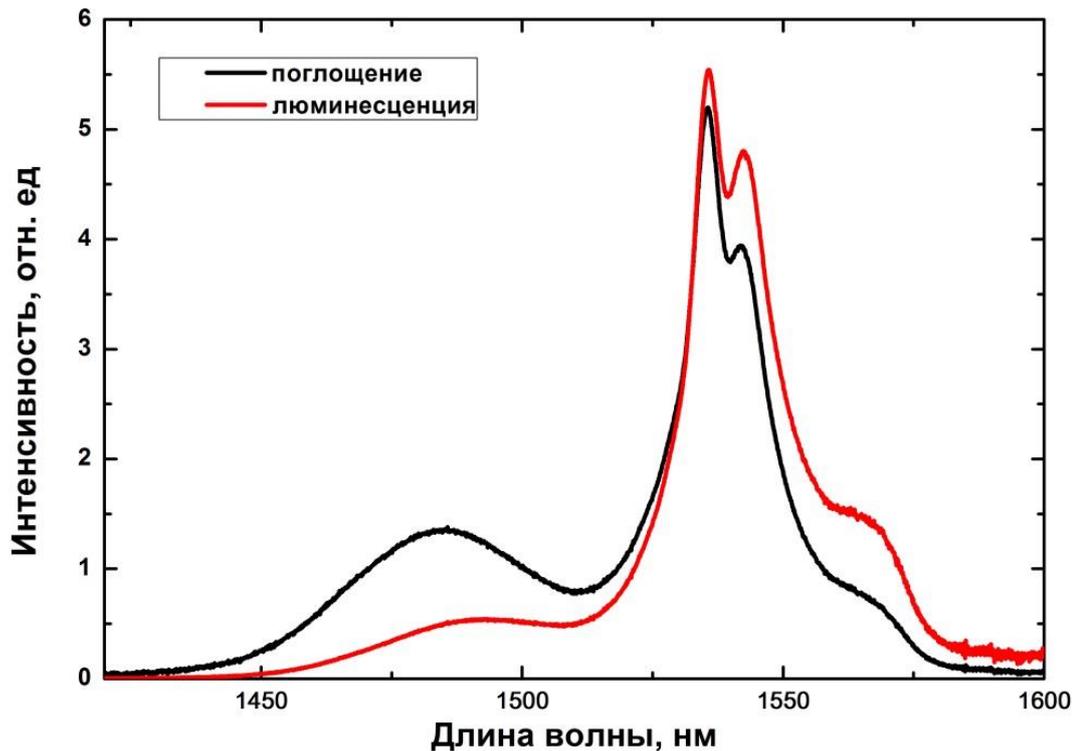


Рисунок 2 – Нормированные спектры поглощения и люминесценции для кварцевого стекла, активированного ионами эрбия

Существует два способа создания инверсии населенности в эрбиевых волоконных усилителях. В первом случае используется трехуровневая схема, то есть накачка производится на длине волны около 980 нм на верхний метастабильный уровень ${}^4I_{11/2}$. Далее происходит быстрая безызлучательная релаксация на долгоживущий уровень ${}^4I_{13/2}$ и вынужденный переход с этого уровня на основной уровень ${}^4I_{15/2}$ под действием сигнала с длиной волны 1,5 мкм. Данный способ позволяет вносить в сигнал меньший дополнительный шум, за счет того, что накачка и сам сигнал достаточно сильно разнесены по спектру длин волн. Однако за счет потери части энергии на безызлучательный переход относительно сложно получить высокие коэффициенты усиления. Альтернативный вариант – квазитрехуровневая схема накачки. Суть сводится к тому, что накачка происходит

на длине волны 1480 нм. При такой накачке происходит переход на верхний штарковский подуровень уровня $^4I_{13/2}$, далее безызлучательная релаксация на нижний штарковский подуровень, и затем вынужденный переход с длиной волны 1,5 мкм. За счет более высокого сечения поглощения для перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$, а также меньших потерь на безызлучательный переход можно получить более высокий коэффициент усиления. Недостатком же будет совпадение длины волны накачки и длине волны передачи сигнала. Это неизбежно сказывается на соотношении сигнал/шум в худшую сторону.

Если населенность основного состояния максимальна, и накачка отсутствует, то система способна только поглощать излучение. То есть усиление отсутствует вовсе или, иначе, происходит отрицательное усиление.

Мощность накачки влияет на число ионов в возбужденном состоянии. Увеличение мощности приводит к увеличению соответствующих ионов. В результате уменьшается коэффициент поглощения, то есть происходит *просветление*, а затем усиление излучения. Усиление сигнала характеризует *коэффициент усиления*. Зависимость коэффициента усиления от мощности накачки является экспоненциальной (рисунок 3). Конечная концентрация ионов-активаторов определяет переход в насыщение P_n .

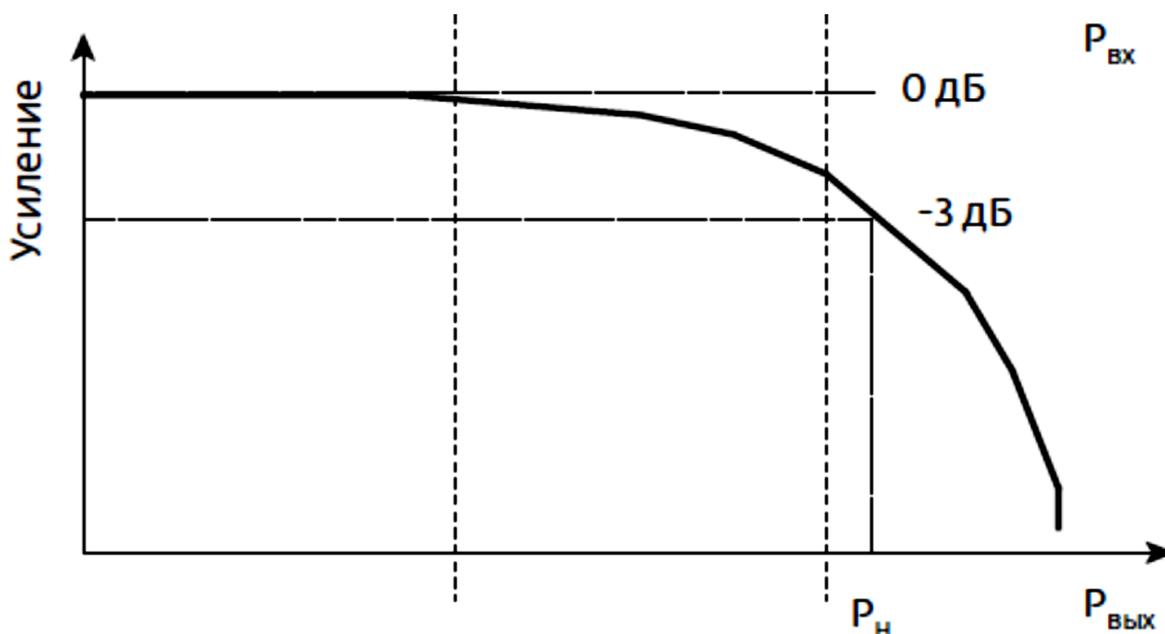


Рисунок 3 – Зависимость усиления сигнала от мощности накачки

Смещение спектра усиления в более длинноволновую область относительно спектра поглощения (рисунок 4) приводит к тому, что для усиления в длинноволновой части спектра требуется меньшее значение инверсии населенности.

Трехуровневая схема накачки эрбиевого волоконного усилителя имеет две чрезвычайно важных особенности: пороговую мощность накачки и длину усилителя. Пороговая мощность характеризует нулевые потери в оптическом волокне, т.е. его «просветление». Превышение пороговой мощности, а значит и нулевых потерь, приводит к усилению сигнала. Пороговая мощность накачки зависит от активатора, его концентрации, структуры самого волокна, длины волны накачки. Длина усилителя характеризует эффективность усиления и поглощение в самом усилителе. Она зависит от частоты сигнала. При недостаточной длине усилителя излучение накачки будет использоваться лишь частично. В противном случае излучение исходного сигнала будет поглощаться.

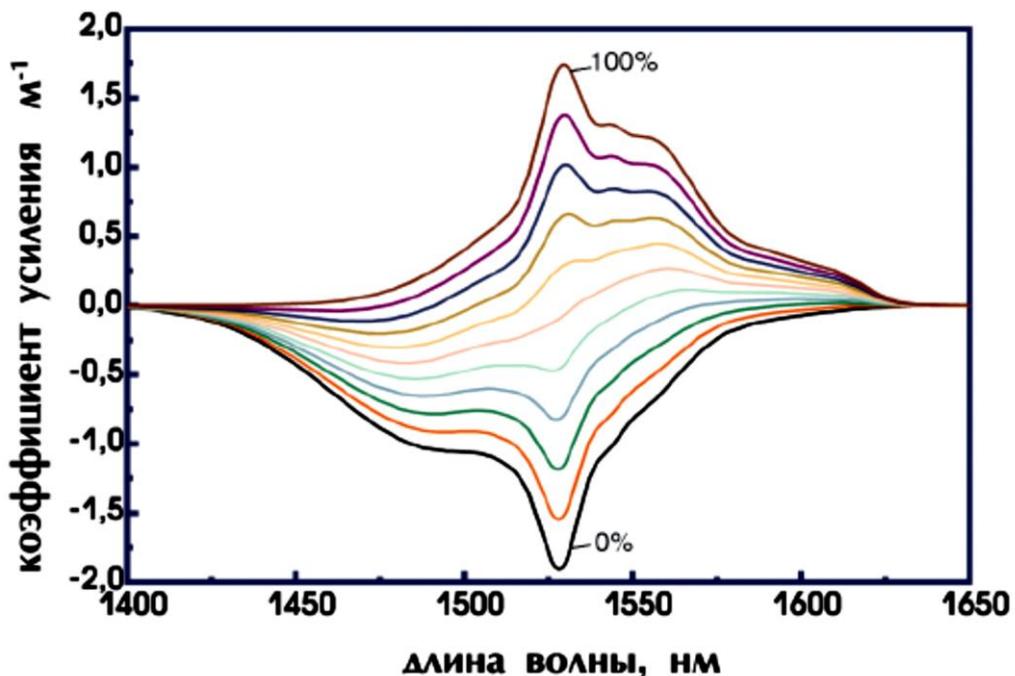


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления эрбиевого волокна от относительной населенности метастабильного уровня энергии

Устройство эрбиевого волоконного усилителя

Эрбиевый усилитель представляет собой кварцевое волокно, активированное ионами редкоземельных элементов (в данном случае – эрбия). Помимо активатора, также легируют модификаторами, влияющими на распределение ионов-активаторов по объему или смешивающими спектр эрбия. Принципиальная схема усилителя с попутной накачкой представлена на рисунке 5.

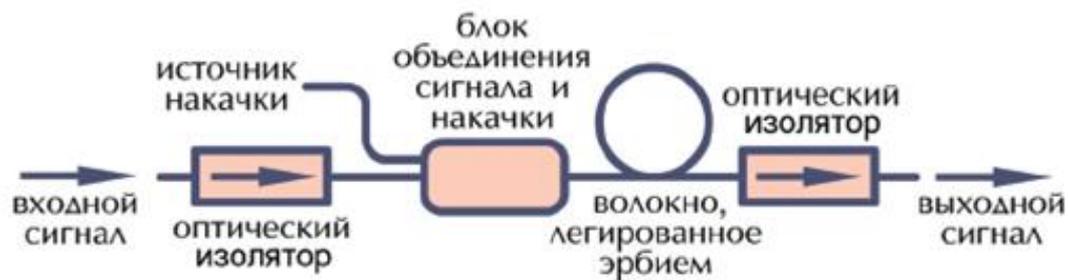


Рисунок 5 –Принципиальная схема эрбиевого усилителя

Существуют три основных типа эрбиевых усилителей. Первый – усилитель мощности, который служит для усиления излучения полупроводниковых лазеров, образующих информационный канал. Данный типа усилителя используется на входе в систему передачи информации, так как полупроводниковые диоды не могут обеспечивать выходной сигнал ~30 дБ. Второй тип - линейный усилитель, который служит для усиления сигнала в промежуточных точках оптоволоконной линии для компенсации затухания сигнала при его прохождении по оптоволокну. И третий тип усилителя – предусилитель, который устанавливается в конце оптоволоконной линии перед приемным устройством. Данный усилитель обеспечивает улучшение соотношения сигнал/шум на устройствах, регистрирующих информационный сигнал. Типичное усиление таких устройств 18 - 23 дБ.

Минимальная концентрация ионов-активаторов определяется длиной активного волокна и в итоге влияет на стоимость усилителя. Помимо прочего, неточности изготовления активной среды большой длины могут давать дополнительные потери. Порядки концентрации активаторов $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Увеличение же концентрации приводит к появлению двух негативных процессов – это сегрегация активатора и ион-ионное взаимодействие (миграция и ап-конверсия). Сегрегация активатора связана с относительно низкой растворимостью редкоземельных ионов в кварцевом стекле и проявляется в том, что нарушается равномерное распределение ионов-активаторов по объему. То есть появляются зоны, где активатор отсутствует, и локальные зоны, где концентрация превосходит нормальную на порядки. В зонах повышенной концентрации более активно идут кооперативные процессы, что в общем случае приводит к тому, что усиление в данных областях не наблюдается. Уменьшение усиления в первую очередь связано с процессом тушения при больших концентрациях активаторов. Этот процесс называется ап-конверсия (рисунок 6).

Механизм ап-конверсии заключается в следующем: при больших концентрациях эрбия формируются так называемые кластеры из ионов, между которыми происходит передача энергии. Следствием будет то, что один ион безызлучательно перейдет в основное состояние (этот процесс называется релаксация), а второй удвоит свою энергию и перейдет на соответствующий

энергетический уровень. Это пагубно сказывается на эффективности усиления сигнала.

Накачка происходит на длинах волн 980 и 1480 нм, соответствующих полосам поглощения ионов эрбия. Устройства, пропускающие световые сигналы только в одном направлении, называются оптическими изоляторами. Они пресекают отражения, связанные с неоднородностями волокна, которые в общем случае являются паразитными и вносят шум в работу усилителя. Принцип работы оптического изолятора основан на эффекте Фарадея. В изоляторе магнитооптическая среда изготавливается такой длины, чтобы поворот плоскости поляризатора составлял 45° . И перед и после нее ставятся поляризаторы, плоскости которых повернуты друг относительно друга на 45° . Тогда свет в прямом направлении пройдет через поляризаторы, не испытывая изменений, а отраженный полностью погасится.

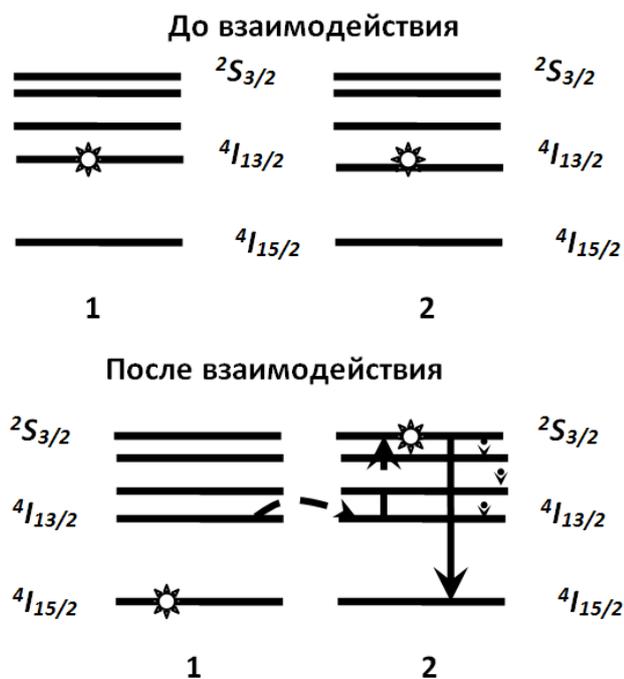


Рисунок 6 – Механизм ап-конверсии для ионов Er^{3+} . Пунктирными стрелками показаны безызлучательные, сплошными – излучательные процессы

Основные характеристики волоконных эрбиевых усилителей

Основные характеристики усилителей:

- коэффициент усиления;
- полезная мощность сигнала усилителя (выходная мощность);

- шум-фактор, характеризующий изменение соотношения сигнал/шум (до и после усилителя);
- мощность усиленного излучения;
- спектральная ширина полосы усиления;
- равномерность полосы усиления – изменение коэффициента.

Коэффициент усиления

Мощность сигнала dP_S изменяется для участка волокна dx следующим образом:

$$dP_S = \{\sigma_{21}(\lambda)N_2 - \sigma_{12}(\lambda)N_1\}P_S dx, \quad (1)$$

где N_1 и N_2 – населённости уровней, $\sigma_{12}(\lambda)$ – сечение поглощения сигнала, а $\sigma_{21}(\lambda)$ – сечение вынужденного излучения. Сечение вынужденного излучения связано с сечением поглощения выражением:

$$g_1\sigma_{12} = g_2\sigma_{21} \quad (2)$$

Для эрбия отношение кратностей вырождения основного и возбужденного уровней равно $g_1/g_2 = 8/7$.

При накачке малой мощности $N_2 \ll N_1$, где N_i – концентрации ионов эрбия соответствующих уровней, первым членом в (1) можно пренебречь, в результате получится классическая формулировка закона Бера:

$$dP_S = \{-\sigma_{12}(\lambda)N_1\}P_S dx, \quad (3)$$

$$P(x) = P(0)e^{-\sigma_{12}N_1 x} = P(0)e^{-kx}, \quad (4)$$

где k – коэффициент поглощения, а сечение поглощения:

$$\sigma_{12} = k/N \quad (5)$$

Когда мощность накачки достаточная, то $dP_S > 0$ и сигнал усиливается. Выражение в фигурных скобках получает смысл коэффициента усиления.

Коэффициент усиления из (1) – дифференциальный. Интегральный коэффициент усиления же равен:

$$Gain = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal-out}}{P_{signal-in}} \right), \quad (6)$$

где (6) $P_{signal-out}$ – выходная мощность, а $P_{signal-in}$ – входящая мощность сигнала.

Программное обеспечение в данной лабораторной работе работает с интегральным коэффициентом усиления. Типичные значения коэффициента усиления составляют 30 дБ.

Выходная мощность и энергетическая эффективность

Энергетическая эффективность определяется отношением изменения мощности сигнала к мощности накачки:

$$PCE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{pump}} \quad (7)$$

Для обеспечения высокой энергетической эффективности нужно передать энергию практически всех фотонов накачки фотонам сигнала. Отношение числа фотонов сигнала NF_S , появившихся в процессе усиления сигнала, к числу NF_P поглощенных фотонов накачки называется квантовой эффективностью накачки $QE = NF_S/NF_P$. Так как энергия фотона выходного излучения меньше энергии фотона накачки, то энергетическая эффективность меньше квантовой и зависит от соотношения длин волн накачки λ_p и сигнала λ_s :

$$PCE = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} QE \quad (8)$$

Для эрбиевых волоконных усилителей используют две длины волны накачки. Длина волны 1480 нм обеспечивает максимальную энергетическую эффективность. Длина волны 980 нм обеспечивает меньшее значение шума.

Усиленное спонтанное излучение и шум усилителя

Возбуждённые ионы эрбия могут релаксировать в основное состояние посредством люминесценции. Излучение спонтанного перехода с возбужденного уровня на основной не коррелировано с входным сигналом усилителя. Тем не менее, оно также усиливается за счёт вынужденных переходов. В англоязычной научной литературе это излучение получило название “amplified spontaneous emission” (ASE) – усиленное спонтанное излучение. Термин отражает суть не в полной мере, поскольку усиленное излучение уже не является спонтанным: усиление происходит за счёт вынужденных переходов. В отечественной литературе наряду с ним встречается термин «*суперлюминесценция*». В данной лабораторной работе используется термин ASE. Спектр ASE занимает тот же диапазон, что и спектр люминесценции, но несколько отличается от него и зависит

от накачки. Это не удивительно, спектр ASE отражает не только спектральную зависимость люминесценции, но и коэффициента усиления. Очень важно, что ASE имеется на частоте сигнала, а значит, является источником шума усилителя.

Для характеристики качества оптического усилителя вводится параметр N_f , получивший название шум-фактор. Величина шум-фактора является мерой ухудшения отношения сигнал/шум входного когерентного сигнала.

$$N_f = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{P_{ASE}}{h\nu\Delta\nu} + 1 \right) \left(\frac{P_{signal-in}}{P_{signal-out}} \right) \right], \quad (9)$$

где P_{ASE} – выходная мощность в мВт в ASE волне на длине волны сигнала; ν – частота сигнала и соответствующей ASE волны; $\Delta\nu$ – спектральная полоса, представленная ASE волной; $P_{signal-out}$ – выходная мощность сигнала в мВт на конце усилителя; $P_{signal-in}$ – заданная мощность сигнала (мВт) в начале усилителя.

Значение шум-фактора 3 дБ является минимально возможным для усилителей любого типа с большим усилением. Типичные значения шум-фактора серийных эрбиевых волоконных усилителей достигают 5 дБ. Если во входном сигнале присутствует «классический» шум, например, усиленное спонтанное излучение от предыдущего усилителя, то ухудшение отношения сигнал/шум будет меньше значения шум-фактора:

$$1 < \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} \leq N_f \approx 2n_{sp} = \frac{\bar{N}_2}{\left(\bar{N}_2 - \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{\sigma_e(\lambda_s)} \bar{N}_1 \right)} \quad (10)$$

Ширина и равномерность полосы усиления

Ширина полосы усиления определяется спектром излучения ионов-активаторов в волокне. Под действием поля окружения уровни ионп-активатора расщепляются на подуровни (штарковское расщепление). При этом величина расщепления влияет на ширину полосы излучения.

Увеличение длины волокна позволяет увеличивать коэффициент усиления вплоть до длины волны 1560 нм, при превышении которой усиление резко падает. Ширина полосы усиления равна порядка 30 нм.

Существует несколько полос усиления. Первая – стандартная полоса усиления – называется conventional band (C band или C-диапазон). Вторая – длинноволновая – long wavelength band (L band или L-диапазон). Спектральные характеристики усиления для этих диапазонов представлены на рисунке 7. Для оптических сигналов C-диапазона такой усилитель будет работать поглотителем. Поэтому перед усилением оптические сигналы разделяются по диапазонам C и L, и для каждого используется свой усилитель. Схема каскадного усилителя

представлена на рисунке 8. Третья полоса – коротковолновая – short wavelength band (S band или S-диапазон). Эта полоса находится в области 1480 – 1530 нм.

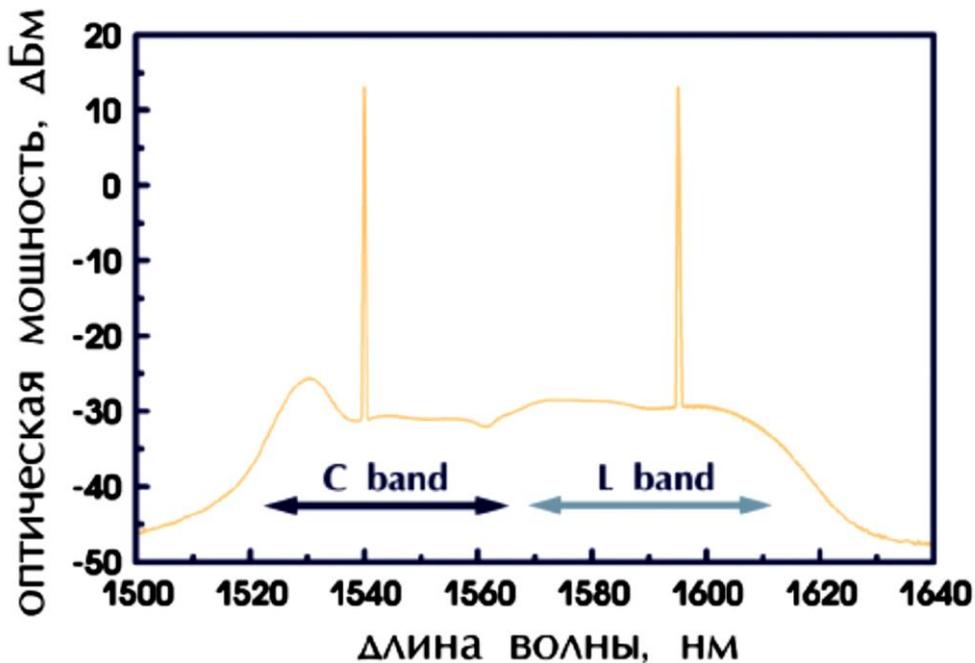


Рисунок 7 – Спектральные характеристики двухдиапазонного усилителя

Интенсивность люминесценции ионов эрбия в S-диапазоне аналогична L-диапазону, но одним из существенных недостатков коротковолновой полосы является сильное поглощение сигнала. Для достижения необходимого соотношения сигнал/шум используют более мощные источники накачки, чем для других полос. Второй недостаток – сильная конкуренция между усилением в S-диапазоне и люминесценцией в C-диапазоне, для которого условия усиления являются более благоприятными.

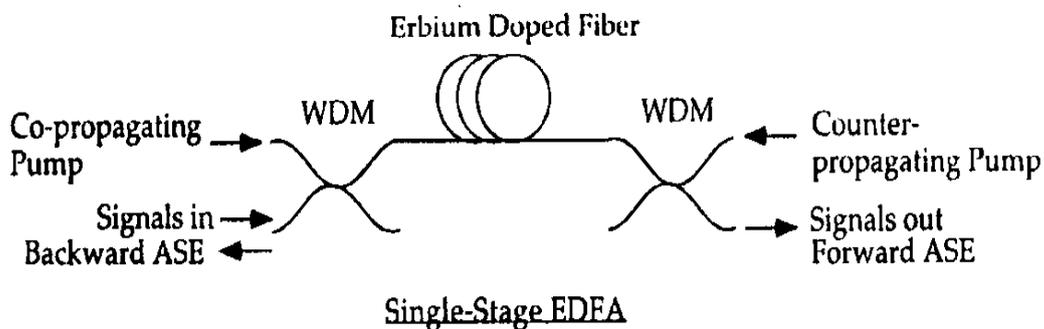


Рисунок 8 – Схема однокаскадного усилителя

Порядок выполнения лабораторной работы

В ходе выполнения лабораторной работы должны быть определены параметры усилителя с заданными параметрами (длина, выходная мощность, мощность ASE). В данном случае варьируемыми параметрами являются тип волокна длина волны и мощность накачки. В OASIX® длина волны указана в нанометрах, мощность мВт, длины волокна в метрах. Также при найденных параметрах усилителя будет необходимо определить мощность насыщения.

Для этого необходимо выполнить следующие действия

1. В главном окне (рисунок 9) нужно выбрать «**Type**» (тип волокна) и далее «**Single Stage**» (один каскад);
2. Затем «**Setup**» и далее «**Output**», следует поставить флаг напротив «**Gain**» и «**ASE**». Все остальные флаги следует снять;
3. Выбрать пункт «**Setup**» и далее «**Stage 1**» (один каскад). В результате откроется меню «**Stage 1 Parameters**» (параметры первого каскада). Следующие пункты с 5 по 13 выполняются в этом окне (рисунок 10);
4. Используя пункт «**Select Fiber**» (выбор волокна), выбирается волокно для моделирования. В программе реализованы 4 различных типа волокна, отличающиеся концентрацией эрбия и толщиной активной зоны: тип 1 обладает максимальным удельным усилением и шумом, тип 4 минимальным;
5. В поле «**First Signal Power**» вводится значение 0,001 мВт;
6. В поле «**First Signal Wavelength**» вводится значение длины волны сигнала из своего варианта задания (таблица 1);
7. В поле «**Co Pump Wavelength**» (длина волны попутной накачки) и в поле «**Counter Pump Wavelength**» (длина волны встречной накачки) вводится длина волны накачки из интервала 960-999 нм или 1450-1500 нм. Первый диапазон дает меньше шумов, второй дает большее значение усиления;
8. В ячейку «**Steps**» вводится число значений накачки (не менее 20);
9. В колонке «**Start**» вводится первое значение мощности накачки «**Copropogating Pump Power**»
10. Начальное значение мощности 0.5 мВт. Для «**Counterpropogating Pump Power**» значение 0;
11. В поле значения длины усилителя «**1st Stage Length**» (длина первого каскада) вводится начальное значение 0,1. Конечное значение берется из своего варианта задания;
12. Установить флажок внутреннего цикла «**Inner**» напротив «**1st Stage Length**»;
13. В поле колонки «**Stop**» вводится конечное значение мощности накачки, равное начальному значению мощности. Количество шагов 10;
14. Нажать кнопку моделирования и ввести имя выходного файла в диалоговом окне;

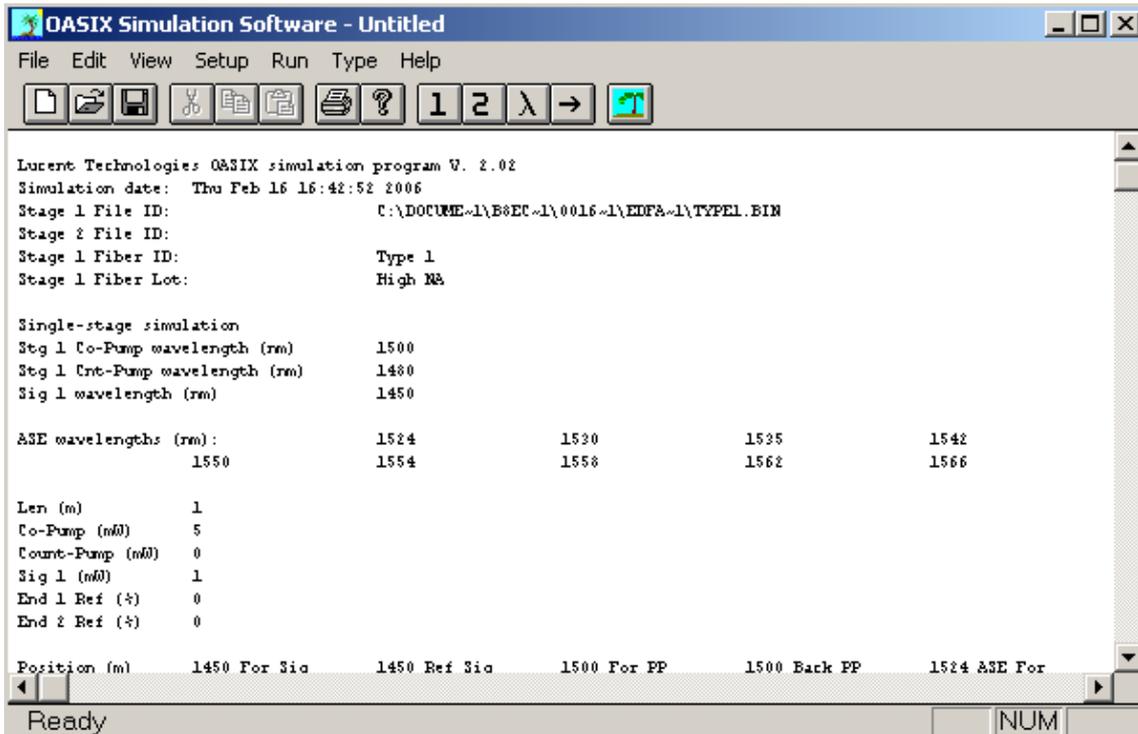


Рисунок 9 – Основное меню программы OASIX®

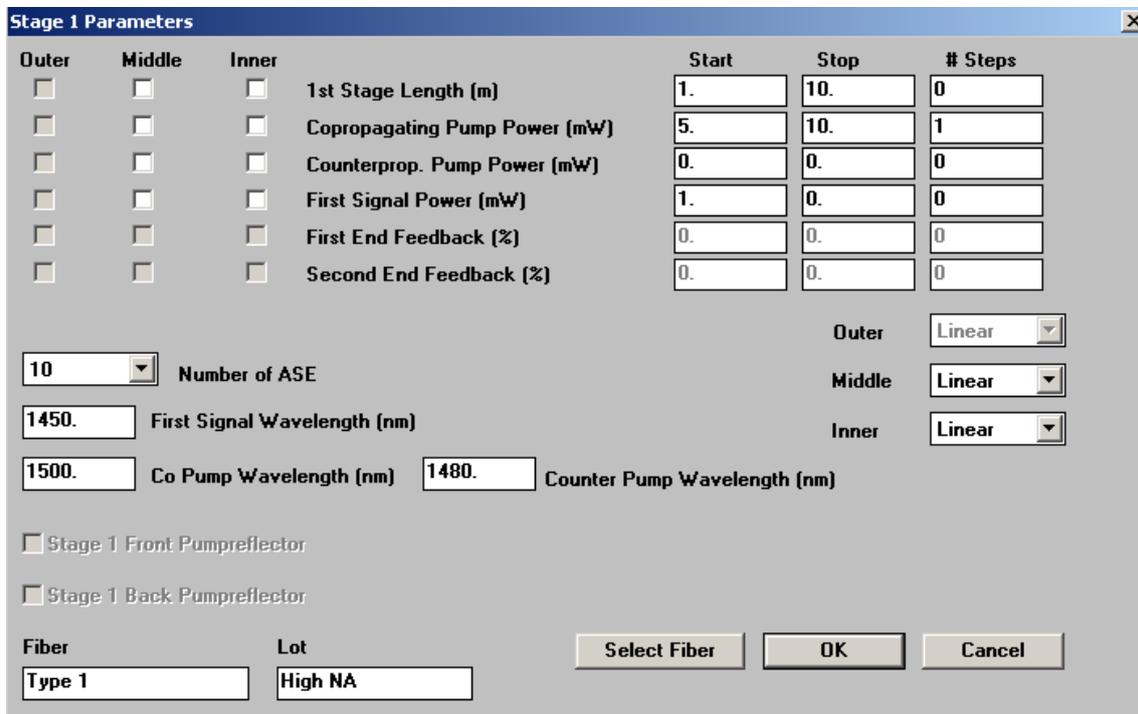


Рисунок 10 – Окно «Параметры первого каскада» программы OASIX®
15. Если мощность на выходе усилителя не соответствует указанной в задании, следует изменить следующие параметры: тип волокна, мощность и длину

волны накачки до получения совпадения со значением из задания. При этом необходимо, чтобы значение мощности ASE также не превышало указанное в задании. Изменение мощности накачки проводить в соответствии с пунктом 10, длины волны накачки в соответствии с пунктом 8, тип волокна п 5.

16. Постройте зависимости полного усиления (Total gain) от длины волокна.

17. Для определения мощности насыщения надо найти значение мощности сигнала, при котором коэффициент усиления уменьшится в 2 раза. Коэффициент усиления определяется по формуле 6. Для получения значений надо увеличивать значение мощности на входе (поле First signal Power) на порядок. Провести моделирование для не менее чем 6 значений мощности входного сигнала.

18. Постройте зависимости полного усиления коэффициента усиления от мощности входного сигнала и определите мощность насыщения.

Таблица 1 – Варианты задания

№ варианта	Длина усилителя, м	Выходная мощность, мВт	Мощность ASE /длина волны нм	Длина волны сигнала, нм
1.	10	0,160	0,080/1530	1560
2.	15	0,150	0,006/1565	1565
3.	18	0,200	0,006/1555	1555
4.	22	0,040	0,027/1551	1551
5.	25	0,300	0,010/1560	1560
6.	28	0,100	0,011/1520	1550
7.	30	0,013	0,040/1542	1570
8.	33	0,640	0,030/1555	1555
9.	33	1,030	0,040/1560	1560
10.	38	1,060	0,070/1555	1555
11.	39	0,370	0,020/1550	1550
12.	41	1,110	0,011/1540	1555
13.	44	0,940	0,050/1560	1560
14.	45	0,770	0,040/1550	1550
15.	49	0,840	0,045/1555	1555
16.	50	2,000	0,100/1560	1560

Контрольные вопросы для самостоятельного изучения

1. Каково устройство эрбиевого волоконного усилителя?

2. Какие модификаторы добавляют в эрбиевый усилитель?
3. Чем отличаются схемы с попутной и встречной накачкой?
4. Какие преимущества и недостатки есть у схемы со встречной накачкой?
5. На каких длинах волн достигается наибольшая эффективность накачки?

Лабораторная работа «Квантовый выход и время затухания люминесценции в стекле»

Цель лабораторной работы: Изучение затухания люминесценции, понятий квантового выхода и времени жизни люминесценции на примере лазерных стёкол, активированных ионами эрбия.

Объект исследования: Лазерные стекла, активированные ионами эрбия.

Задачи, решаемые в лабораторной работе:

1. Изучение методов:
 - Экспериментальное определение кинетики затухания люминесценции;
 - Расчет среднего времени жизни люминесценции;
 - Расчет радиационного времени жизни люминесценции по методу Фюхтенбауэра – Ладенбурга;
 - Определение квантового выхода люминесценции;
2. Ознакомление с явлением переноса энергии электронного возбуждения между локальными оптическими центрами. Ознакомление с основными механизмами переноса энергии;
3. Для ряда лазерных стекол, активированных различными концентрациями ионов эрбия:
 - Выполнить измерение кинетики затухания люминесценции;
 - Провести расчет радиационного времени жизни;
 - Рассчитать значения квантовых выходов люминесценции;
 - Построить зависимости рассчитанных квантовых выходов люминесценции от концентрации ионов эрбия для двух серий лазерных стекол.

Излучательные и безызлучательные переходы

В любой квантово-механической системе возможны переходы между стационарными уровнями энергии. Поглощение фотона связано с переходом системы из состояния с низкой энергии в состояние с более высокой энергией. Наоборот, при переходе системы из состояния с более высокой энергией в состояние с более низкой энергией происходит ее выделение, которое может происходить как излучательным путем, так и безызлучательными. В случае излучательного перехода происходит испускание фотона с энергией равной величине энергетического зазора:

$$E_k - E_i = h\nu \quad (1)$$

Спектр поглощения любой квантово-механической системы формируется набором переходов из состояний с низкой энергией в состояния с высокой

энергией, спектр испускания формируется за счет обратных переходов. Сущность безызлучательных переходов заключается в обмене энергией с другими системами при различных взаимодействиях. Примерами таких взаимодействий могут быть столкновения атомов или молекул в газовой фазе.

В простейшем случае двухуровневой системы (основной уровень j и возбужденный i) после начала воздействия возбуждающего излучения возникает нестационарный процесс роста населенности на возбужденном уровне. Если источник возбуждения действует продолжительное время, происходит установление стационарного режима, при котором населенность на возбужденном уровне не изменяется. После прекращения возбуждения населенность на верхнем уровне начинает снижаться. Если принять момент прекращения возбуждения за 0 , а населенность на возбужденном уровне за $n(0)$, то изменение населенности будет описываться следующей формулой:

$$dn_i = - (\Sigma A_{ij})n(i)dt - (\Sigma d_{ij})n(i)dt, \quad (2)$$

где A_{ij} и d_{ij} - вероятности излучательных и безызлучательных переходов с уровня i на j . Интегрируя данное выражение получим:

$$n_i(t) = n_i(0) \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

то есть населенность возбужденного уровня убывает экспоненциально и при бесконечном времени обращается в 0 . Скорость убывания данной экспоненты определяется как:

$$\tau^{-1} = A_{ij} + d_{ij} \quad (4)$$

Величина τ называется временем жизни люминесценции или временем жизни возбужденного состояния. Время жизни возбужденного состояния численно равно времени, в течение которого населенность уровня уменьшается в e раз. Также время жизни возбужденного состояния равно среднему времени пребывания квантово-механической системы в возбужденном состоянии и обратно пропорционально сумме вероятностей излучательных и безызлучательных переходов. При отсутствии безызлучательных переходов время жизни принимает максимальное значение. Данное значение обычно называют радиационное время жизни. При наличии каких-либо безызлучательных переходов происходит уменьшение времени жизни люминесценции. Изменение мощности излучения люминесценции на частоте, соответствующей переходу $i \rightarrow j$ (ν_{ij}), после прекращения возбуждения задается следующим выражением:

$$W_{ij}(t) = W_{ij}(0) \exp(-t/\tau), \quad (5)$$

Таким образом, закон затухания люминесценции имеет такую же запись, как и закон изменения населенности возбужденного уровня.

Данные рассуждения справедливы для двухуровневых систем и не учитывают возможное влияние температуры на вероятности безызлучательных переходов. На практике такие закономерности обычно наблюдаются при малых концентрациях ионов-активаторов в активной среде и низких температурах. Увеличение температуры обычно сопровождается ростом вероятности безызлучательных переходов. В то же время, при увеличении концентрации активатора в материале увеличивается вероятность процессов, связанных с взаимодействием оптических центров между собой, что приводит к уменьшению времени жизни люминесценции. Явление уменьшения времени жизни люминесценции при возрастании количества излучающих центров обычно называют концентрационным тушением люминесценции. Как правило, тушение люминесценции сопровождается отклонением кривой затухания люминесценции от экспоненциальной. При наличии сильного взаимодействия между оптическими центрами затухание часто представляет собой наложение множества экспонент.

Эффективность процесса люминесценции определяется величиной, называемой квантовым выходом люминесценции. Квантовым выходом называется отношение количества излученных фотонов к количеству поглощенных фотонов. Прямое измерение квантового выхода является сложной методической задачей. Существует альтернативный метод определения квантового выхода люминесценции, состоящий в измерении времени жизни люминесценции и расчете радиационного времени жизни оптических центров. В таком случае квантовый выход определяется как отношение экспериментально измеренного времени жизни к радиационному времени жизни. В отсутствие безызлучательных переходов радиационное время жизни и экспериментальное время жизни совпадают, то есть квантовый выход равен единице.

Существует два основных параметра, определяющих вероятность безызлучательного переноса энергии. Для процессов безызлучательного переноса энергии характера сильная зависимость от расстояния между взаимодействующими оптическими центрами. Характер зависимости от расстояния может быть различным при реализации разных механизмов безызлучательного переноса энергии. Вторым важным параметром является наличие резонанса между донором и акцептором энергии. Поскольку среднее расстояние между ионами-активаторами уменьшается при увеличении концентрации активатора в среде, одновременно с увеличением концентрации происходит увеличение вероятности безызлучательного переноса энергии. Таким образом, исследование концентрационных зависимостей квантового выхода позволяет определить наилучшую концентрацию активатора в активной среде.

Иттербий-эрбиевые стекла

В настоящее время стекла, активированные ионами эрбия, широко применяются в оптике. Лазерные материалы на основе эрбия имеют несколько основных преимуществ. Эрбиевые лазеры работают на длине волны 1,5 мкм. Это оптимальная длина волны для передачи сигналов по оптическим линиям связи, а также это безопасная спектральная область для зрения.

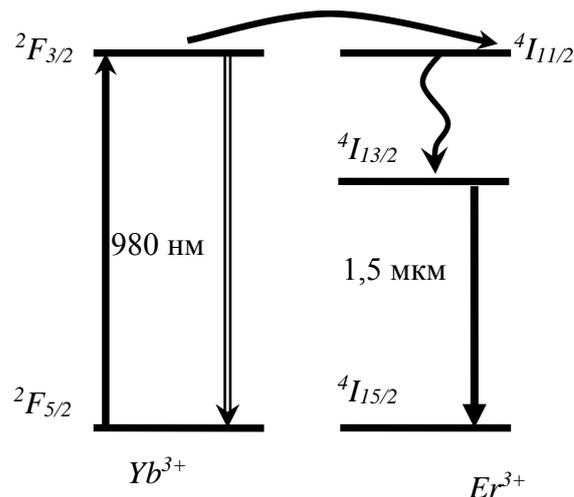


Рисунок 1 – Схема передачи электронного возбуждения от иттербия к эрбию

Эффективность прямого возбуждения ионов эрбия крайне низка из-за слабых полос поглощения. Возможны два подхода к решению этой проблемы. Во-первых, можно использовать волоконные активные среды, в которых за счет длины активного элемента возможно обеспечить необходимую мощность. Во-вторых, эффективность возбуждения ионов эрбия можно повысить с помощью явления сенсбилизации через ионы иттербия. Сущность явления сенсбилизации люминесценции заключается в передаче энергии от эффективно поглощающего центра к слабо поглощающему центру.

Для ионов эрбия эффективными сенсбилизаторами являются ионы иттербия, которые обладают интенсивной полосой поглощения в области 0,9 - 1,02 мкм с шириной порядка 1000 см^{-1} . Процесс сенсбилизации люминесценции эрбия схематически показан на рисунке 1. При сенсбилизации заселение возбужденного уровня эрбия ($^4I_{11/2}$) осуществляется в основном через перенос энергии $Yb^{3+} \rightarrow Er^{3+} (^4I_{11/2}) \rightarrow Er^{3+} (^4I_{13/2})$.

Расчет радиационного времени жизни люминесценции редкоземельных ионов выполняется по двум основным методам: теории Фюхтенбауэра-Ланденбурга и Джада-Офельта. Первый метод расчета радиационного времени жизни - более простой и будет использован в данной

работе. Теория Фюхтенбауэра-Ланденбурга дает выражение для связи коэффициента поглощения и коэффициентов Эйнштейна для системы с двумя вырожденными уровнями. При этом предполагается, что в рассматриваемом спектральном диапазоне показатель преломления матрицы не меняется. Важным результатом является выражение для связи радиационного времени жизни и сечения поглощения редкоземельного иона:

$$\tau_{rad}^{-1} = 8 \cdot \pi \cdot c \cdot n^2 \cdot \tilde{\nu}^2 \cdot \frac{8}{7} \cdot \int \sigma_{abs}(\nu) d\nu, \quad (6)$$

где c – скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме, n – показатель преломления среды, $\tilde{\nu}$ – частота, соответствующая максимуму полосы поглощения, $\int \sigma_{abs}(\nu) d\nu$ – интегральное сечение поглощения основного резонансного перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$.

Методика измерения кинетики затухания люминесценции

На рисунке 2 изображена схема установки для экспериментального определения кинетики затухания люминесценции.

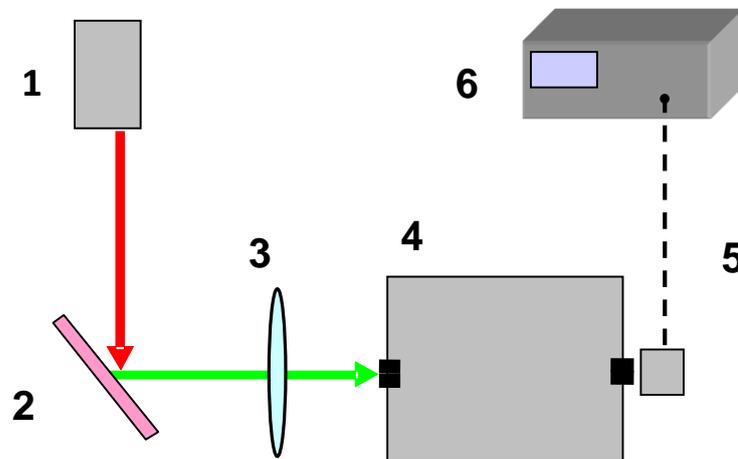


Рисунок 2 – Экспериментальная схема для измерения времени жизни люминесценции. Обозначения: (1) – импульсный лазер; (2) – образец; (3) – короткофокусный объектив; (4) – монохроматор; (5) – InGaAs-приемник; (6) – осциллограф

Измерение кинетики затухания производится следующим образом. Люминесценция образца лазерного стекла возбуждается импульсным излучением лазера. Люминесценция фокусируется объективом и проходит через

монохроматор на приемник излучения, соединенный с осциллографом. На экране осциллографа наблюдается кривая затухания люминесценции. Необходимо отметить, что длительность импульса возбуждения при таком методе измерения должна быть на порядок меньше измеряемого времени жизни.

Полученную кривую затухания люминесценции необходимо нормировать по максимуму на единицу (рисунок 3). В таком случае среднее время жизни люминесценции определяется через площадь под кривой затухания.

В данной работе исследуются 2 концентрационных ряда стекол, активированных ионами эрбия и иттербия.

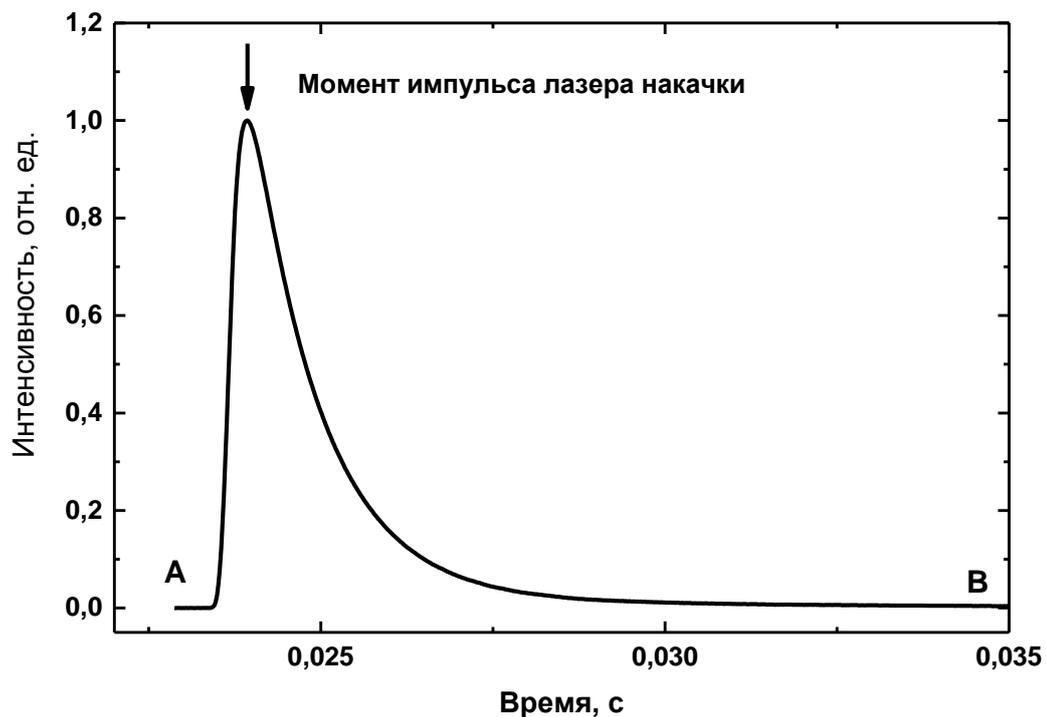


Рисунок 3 – Кинетика затухания люминесценции

Методика расчета радиационного времени жизни и квантового выхода

Интегральное сечение поглощения находится следующим образом:

1. Производится измерение пропускания (T) образца стекла, активированного ионами эрбия, в диапазоне длин волн 1400–1700 нм;
2. По формуле $k(\lambda) = \ln(T)/t$, где t – толщина образца в см⁻¹, определяется коэффициент поглощения;
3. Далее путем деления коэффициента поглощения на концентрацию ионов эрбия (N_{Er}) находится зависимость сечения поглощения от длины волны $\sigma(\lambda) = k(\lambda)/N_{Er}$. Концентрация ионов эрбия в этом случае имеет размерность числа частиц в кубическом сантиметре;

4. Производится перевод шкалы длин волн в шкалу волновых чисел, имеющих размерность см^{-1} , после чего выполняется интегрирование полученного спектра;

5. Для расчета квантового выхода люминесценции перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ применяется следующая формула (7):

$$q = \left(\frac{\tau_{\text{эксн}}}{\tau_{\text{рад}}} \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

где $\tau_{\text{эксн}}$ – экспериментально определенное время жизни люминесценции перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, $\tau_{\text{рад}}$ – радиационное время жизни люминесценции перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить лазер и осциллограф в сеть, включить компьютер;
2. Закрепить измеряемый образец в держатель;
3. Запустить программу **осциллограф**, щелкнув на соответствующем ярлыке. Запустить измерения осциллографа кнопкой **Run**;
4. Запустить лазер кнопкой **LD**;
5. Включить синхронизацию в окне **Trigger**, нажав кнопку **ON**. Отключить второй канал измерения нажав на соответствующую кнопку **Channel2**;
6. Вывести на экран осциллографа кривую затухания люминесценции таким образом, чтобы кривая занимала максимальную площадь экрана. Для этого необходимо выбрать соответствующий масштаб по осям времени (Time/Div) и интенсивности (Volt/Div). При помощи ползунков Position расположить кривую распада так, чтобы до возбуждающего импульса и в конце распада значение интенсивности было равно 0 (точки А и В на рис. 3). Вывести ползунком значение уровня синхронизации (Trigger) так, чтобы уровень синхронизации проходил приблизительно по уровню равному 80% от интенсивности сигнала;
7. Записать полученную кривую затухания в файл, выбрав меню File→Save DSO data. Ввести название файла и нажать **сохранить**;
8. Выключить лазер. Вытащить измеренный образец;
9. Для следующего образца повторить пункты 2 – 6.

Порядок определения времени жизни по кривой затухания

1. Открыть файл с данными. Выделить один из импульсов распада люминесценции. Опустить точки А и В на 0 (рисунок 3);
2. Определить начало распада люминесценции. Для этого определить последнее из максимальных значений интенсивности. Принять данное значение по оси времени (X) за 0. Для этого необходимо вычесть данное значение времени из всех остальных;
3. Определить цену деления по X. Например, строка $125 = 5 \text{ ms}$;
4. Масштабировать координату X по времени, т.е. разделить координату X кривой затухания на цену деления оси X и получить зависимость изменения интенсивности люминесценции от времени;
5. Нормировать столбец Y на единицу, т.е. определить максимальное значение по оси Y и разделить столбец Y на это значение;
6. Построить зависимость нормированной интенсивности люминесценции от времени;
7. Определить площадь под кривой затухания люминесценции. Величина этой площади будет временем затухания люминесценции;
8. Построить зависимость значений времени жизни люминесценции от концентрации ионов эрбия.

Порядок определения квантового выхода

1. По формуле (6) определить значение радиационного времени жизни люминесценции;
2. По формуле (7) для всех измеренных образцов определить квантовый выход люминесценции;
3. Построить зависимость квантового выхода люминесценции от концентрации ионов эрбия.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Основные сведения из теории.
2. Краткое описание методики измерения кинетики затухания люминесценции;
3. Зависимость натурального логарифма нормированной интенсивности люминесценции от времени для всех измеренных образцов из каждого ряда;
4. Расчет радиационного времени жизни для каждого из рядов образцов;
5. Концентрационная зависимость времени затухания люминесценции и квантового выхода для образцов серий 1 и 2. Анализ данной зависимости;

6. Выводы.

Контрольные вопросы для самостоятельного изучения

1. Что такое время затухания люминесценции?
2. Какой физический смысл имеет радиационное время жизни? Почему экспериментально измеренное время жизни меньше радиационного?
3. От чего зависит величина снижения квантового выхода с ростом концентрации?
4. Почему для различных стекол различаются радиационные времена жизни?

Лабораторная работа «Исследование кинетических свойств фотохромных стекол»

Цель лабораторной работы: изучение кинетических свойств фотохромных стекол

Объект исследования: фотохромные стекла, активированные микрокристаллами галоидного серебра и галоидной меди.

Задачи, решаемые в лабораторной работе:

1. С помощью лабораторной установки измерить для заданных фотохромных стекол исходное значение оптической плотности D_0 ;
2. Измерить для заданных фотохромных стекол значение оптической плотности ΔD_τ после воздействия активирующего излучения за заданный промежуток времени (τ);
3. Измерить для заданных фотохромных стекол значение оптической плотности ΔD_p после прекращения облучения за выбранный промежуток времени;
4. Измерить для заданных фотохромных стекол значение критерия релаксации $K_p = \Delta D_p / \Delta D_\tau$, (1)

Введение

Явление обратимого изменения оптической плотности (или окраски) вещества под действием света называют явлением фотохромизма. Данное свойство имеется у широкого класса материалов как органической природы, так и неорганической. Фактически, почти все стеклообразные материалы, которые не поглощают видимую часть спектра, т.е. являются прозрачными в данном диапазоне, могут считаться в некоторой степени фотохромными. Однако данный термин используется исключительно для стекол, в которых это свойство сильно выражено и имеет практическое применение.

Существует условно два больших класса ФХС (фотохромных стекол): гомогенные и гетерогенные. К первым относят натриево-силикатные стекла, легированные ионами Ce^{3+} и Eu^{2+} , которые в состоянии менять свою валентность под действием излучения, что приводит к непосредственному изменению в спектрах поглощения, а значит и, в большинстве случаев, к изменению окраски стекла. К сожалению, данная группа стекол не нашла практического применения. Причина кроется в том, что такие стекла обладают сложными условиями синтеза и ограниченным сроком жизни, так как нарушается обратимость процесса потемнения.

Гетерогенные стекла – это композитные материалы, в которых в стеклообразной матрице равномерно распределены светочувствительные нанокристаллы, например, хлориды серебра или меди.

Механизм светочувствительности

При воздействии на кристаллы $AgCl$ ультрафиолетового излучения в них происходит межзонное поглощение, которое можно наглядно представить, как поглощение квантов света внешними электронами ионов хлора. В результате поглощения световой энергии электрон, изначально локализованный вблизи конкретного иона Cl , приобретает достаточную энергию, чтобы преодолеть потенциальный барьер, удерживающий его возле данного иона, и получает возможность свободно перемещаться в периодическом потенциале кристаллической решетки в форме квазичастицы – электрона проводимости, обладающего эффективной массой, отличной от массы изолированного электрона.

На месте иона хлора, где произошел акт поглощения, образуется электронная вакансия. Внешние электроны с ближайших ионов хлора могут преодолеть прозрачный потенциальный барьер, образованный ионами серебра, и заполнить эту вакансию. В результате этого вакансия перемещается на тот ион Cl , с которого перешел электрон. Таким образом, вакансия, оставшаяся после первоначального возбуждения электрона проводимости, может также перемещаться по кристаллу как некая частица, дырка, обладающая своей эффективной массой. Стоит отметить, что, в отличие от электронов проводимости, мобильность дырок в ионных кристаллах мала.

Описанный процесс межзонного поглощения происходит в том случае, если энергия квантов возбуждающего света больше либо равна ширине запрещенной зоны проводника E_g . При энергиях фотонов, меньших E_g , образование электрон-дырочных пар все еще может иметь место, однако образующиеся в таком случае электроны проводимости и дырки не могут свободно перемещаться по кристаллу отдельно друг от друга, так как они связаны друг с другом посредством электростатического взаимодействия. Хлорид серебра представляет собой ионный кристалл с большой шириной запрещенной зоны, около 3 эВ, обусловленной большой электроотрицательностью хлора, то есть он поглощает излучение с длиной волны менее 413 нм. Электрон и дырка образуют новую квазичастицу – экситон, которая движется поступательно как единое целое, но в то же время имеет внутреннее состояние, обусловленное вращением электрона и дырки вокруг их общего центра массы.

Так как энергия связи двух разноименных зарядов отрицательна, энергия экситона меньше энергии свободных носителей заряда, и для генерации экситона в кристалле необходимо поглощение фотона с энергией, меньшей E_g на величину связи электрона и дырки. Если энергия тепловых колебаний решетки велика по

сравнению с энергией связи экситона, образующиеся экситоны практически сразу распадаются на отдельные электрон и дырку при поглощении фононов, и в спектрах поглощения экситон не фиксируется. Однако при достаточно низких температурах экситонное поглощение становится наблюдаемым в спектрах поглощения в виде выраженного пика на границе межзонного поглощения кристалла.

Электрон проводимости или дырка могут образовывать связанные состояния не только друг с другом. Сама возможность их свободного движения в кристаллической решетке обеспечивается тем, что положения квазичастицы возле каждого из узлов решетки характеризуются одинаковой энергией, и, если не принимать во внимание электростатическое взаимодействие между двумя квазичастицами, электрон проводимости и дырка не могут «выбрать», возле какого конкретно иона им находиться, поэтому они способны двигаться во всем объеме кристалла.

Наличие любых *дефектов* нарушает трансляционную симметрию кристаллической решетки, поэтому энергия носителей заряда в области дефектов отличается от энергии в идеальной кристаллической решетке. Неоднородности решетки могут как отталкивать квазичастицы, служа центрами рассеяния, так и притягивать их. В последнем случае электрон проводимости или дырка могут быть локализованы в области дефекта на дискретных энергетических уровнях. Дефекты, способные захватывать носители заряда, включают в себя межузельные атомы, вакансии, поверхностные дефекты и т.д.

Уровни носителей заряда в связанном состоянии в области точечного дефекта во многом схожи с уровнями электрона в атоме водорода: притягивающий потенциал дефекта можно описывать как кулоновское притяжение электрона проводимости или дырки к точечному заряду. В отличие от уровней в атоме водорода, только основное состояние захваченного точечным дефектом электрона проводимости достаточно удалено от края зоны проводимости, «вакуума», в то время как все возбужденные состояния находятся вблизи дна этой зоны, и электрон в возбужденном состоянии легко может покинуть дефект под действием тепловых колебаний. Аналогичное явление наблюдается для дырок, чьи связанные состояния расположены вблизи края валентной зоны.

Описанное различие связано с тем, что, если в основном состоянии электрон или дырка фактически локализованы в точечном дефекте, заполняя его, при переходе в возбужденные состояния данные квазичастицы отдаляются от дефекта, оставаясь связанными с ним; таким образом, в возбужденных состояниях носители заряда находятся в области ближайших к дефекту ионов, а не на самом дефекте. Поэтому перевод электрона или дырки в возбужденные состояния практически равносителен ионизации дефекта и требует сравнительно больших усилий, в то время как дальнейшие переходы из возбужденного состояния требуют значительно меньших энергий.

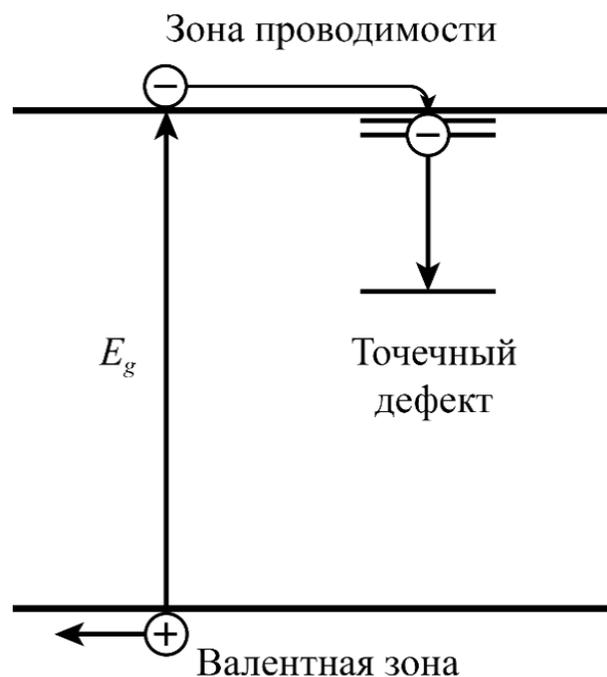


Рисунок 1 – Энергетическая схема захвата электрона проводимости точечным дефектом

Электрон проводимости, находящийся в области точечного дефекта, может быть захвачен им. Как видно из рисунка 1, захват производится в два этапа. Первоначально электрон попадает на возбужденные состояния, локализуясь в области ближайших к точечному дефекту ионов, в ходе чего он отдает часть своей энергии тепловым колебаниям решетки. Далее электрон может либо вновь «оторваться» от дефекта, приобретя недостающую энергию от фононов, либо перейти в основное состояние, заполняя дефект, в ходе чего излучается квант света. Аналогичным образом соответствующие дефекты могут захватывать положительные дырки.

Потемнение фотохромных стекол

Как было обнаружено при исследовании фотоэмульсий, используемых в фотографии, микрокристаллы $AgCl$, составляющие основу фотоэмульсии, содержат на своей поверхности так называемые *центры светочувствительности*, образующиеся в ходе роста микрокристаллов и представляющие собой небольшие пятна из нейтральных атомов серебра. Эти пятна практически не взаимодействуют со светом, однако они являются дефектами кристалла, способными эффективно захватывать электроны проводимости. При межзонном поглощении в кристалле хлорида серебра подвижные электроны проводимости быстро находят центры светочувствительности и захватываются ими, в результате чего на поверхности этих центров образуется избыточный отрицательный заряд.

Хлорид серебра обладает ионной проводимостью, обусловленной наличием межузельных ионов Ag^+ и катионных вакансий, которые могут двигаться при приложении электростатического поля. Под действием электрического поля захваченных электронов межузельные ионы Ag^+ движутся по направлению к центру светочувствительности и, рекомбинируя с электронами проводимости, нейтрализуют избыточный заряд на нем. В ходе этого процесса образуются нейтральные атомы Ag , которые добавляются к уже существующим и тем самым увеличивают размер серебряного пятна.

Дырки, генерируемые в ходе межзонного поглощения, так же притягиваются к отрицательно заряженным электронам проводимости, поэтому для образования серебряного пятна необходимо, чтобы процесс нейтрализации заряда центра светочувствительности ионами серебра происходил быстрее, чем взаимная рекомбинация электронов проводимости и дырок, то есть дырки должны обладать малой мобильностью по сравнению с подвижностью межузельных ионов серебра.

При комнатных температурах дырки в кристаллах $AgCl$ могут передвигаться только в ходе процесса, похожего на миграцию F -центров. Как известно, F -центр представляет собой анионную вакансию в ионном кристалле, точечный дефект, захвативший электрон проводимости, благодаря чему он может поглощать в видимом диапазоне. Аналогично, вакансия в кристалле хлорида серебра, образованная отсутствием положительно заряженного иона Ag^+ , может захватить дырку, в результате чего образуется нейтральный центр, который не взаимодействует с отрицательно заряженным серебряным пятном. Спустя какое-то время катионная вакансия и дырка как единое целое диффундируют к поверхности кристалла, где дырка, рекомбинируя с ионом Cl , образует нейтральный атом хлора. Таким образом, под воздействием высокоэнергетического излучения в кристалле $AgCl$ образуются разделенные в пространстве области, состоящие из нейтрального серебра и хлора.

Серебряные частицы ответственны за поглощение фотохромных стекол в видимом диапазоне после потемнения. Электроны проводимости в металле представляют собой плазму, имеющую резонансную частоту. При воздействии на нее света с частотой меньше резонансной электрическое поле световой волны индуцирует колебания электронной плазмы. Кванты этих колебаний – *плазмоны* – распространяются по поверхности металла, по аналогии с волнами на поверхности воды. Сами электроны проводимости при этом колеблются в одном положении, а не движутся вдоль поверхности. Таким образом, процесс поглощения света частицами серебра можно представить как генерацию поверхностных плазмонов в них.

Важно отметить, что в случае фотоэмульсий нейтральные атомы Cl , образующиеся на поверхности светочувствительных микрокристаллов, уходят от места реакции, поэтому процесс распада $AgCl$ под действием излучения является необратимым. В фотохромных стеклах, однако, кристаллы хлорида серебра

помещены в жесткую матрицу, препятствующую отводу продуктов реакции, поэтому под действием тепловых колебаний или излучения определенных длин волн возможна рекомбинация нейтральных атомов серебра и хлора с образованием изначального кристалла $AgCl$.

Подводя итог, можно сказать, что разложение кристаллов (потемнение фотохромных стекол) хлорида серебра при воздействии на них ультрафиолетового света возможно благодаря следующим факторам:

- a) Кристаллы $AgCl$ обладают ионной проводимостью, обусловленной движением ионов металла;
- b) При поглощении света в кристалле хлорида серебра образуются электроны проводимости с высокой подвижностью, которые захватываются уже существующей областью из атомов серебра;
- c) Дырки, образующиеся при поглощении, обладают малой подвижностью и медленно диффундируют к поверхности кристалла хлорида серебра.

Обесцвечивание фотохромных стекол

Обесцвечивание фотохромных стекол, обусловленное рекомбинацией нейтральных атомов металла и галогена, во многом похоже на процесс потемнения, происходящий в обратном порядке. Выделяют *термическое* обесцвечивание, вызванное тепловыми колебаниями решетки, и *оптическое* обесцвечивание, вызванное воздействием света, к которому фотохромное стекло становится чувствительным после активации светочувствительной фазы. Рассмотрим для начала обесцвечивание в фотохромных стеклах с кристаллами хлорида серебра.

При поглощении кванта света либо фонона с достаточно большой энергией электроны из металлической частицы Ag_n на поверхности могут переходить в зону проводимости кристалла $AgCl$. В результате этого серебряное пятно приобретает положительный заряд, и в кристалле возникает электролитический ток. Межузельные ионы Ag^+ движутся в направлении от металлического пятна, а катионные вакансии движутся к металлическому пятну как отрицательно заряженные квазичастицы. Иными словами, ионы серебра из центра светочувствительности движутся внутрь кристаллической решетки $AgCl$ и заполняют вакантные положения.

Электрон проводимости, возбужденный из металлической частицы, может быть захвачен атомами хлора, в результате чего он рекомбинирует с одним из этих атомов, образуя ион Cl^- . Таким образом, под действием энергетического возмущения области из нейтральных атомов хлора и серебра постепенно исчезают, и кристалл возвращается к своему первоначальному состоянию, в котором он состоит из ионов серебра и хлора. Очевидно, для того чтобы такой процесс мог иметь место, атомы хлора не должны покидать поверхность кристаллов $AgCl$, что

достигается в фотохромных стеклах благодаря наличию жесткой матрицы стекла, препятствующей выходу продуктов реакции из стекла.

Для изначального перевода электрона из частицы Ag_n в зону проводимости $AgCl$ требуется энергия порядка 1 эВ, что соответствует длине волны порядка 1200 нм. Таким образом, излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне в той или иной мере приводит к релаксации фотохромного стекла, содержащего хлорид серебра в качестве светочувствительной фазы. Однако энергия 1 эВ слишком велика для того, чтобы процесс релаксации мог быть вызван тепловыми колебаниями при комнатной температуре. Понятно, однако, что фотохромные стекла, содержащие в своем составе только кристаллы хлорида серебра, не смогут обесцвечиваться «сами по себе».

Реальные фотохромные стекла содержат в качестве светочувствительной фазы микрокристаллы $AgCl$ с включениями сенсibilизатора $CuCl$. В ходе потемнения данных стекол ионы Cu^+ служат эффективными ловушками для дырок, образующихся при межзонном поглощении. Ионы Cu^{2+} , образующиеся при захвате дырок, кроме всего прочего, вносят значительный вклад в поглощение фотохромного стекла в видимом диапазоне.

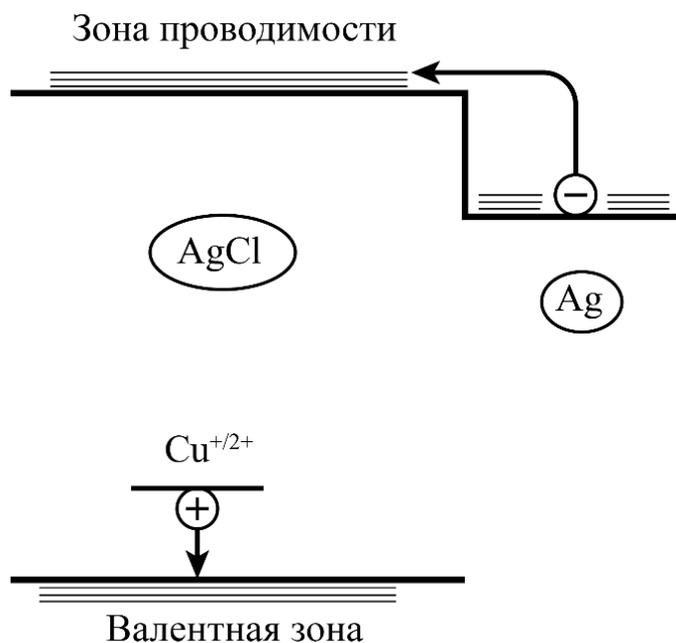


Рисунок 2 – Два механизма обесцвечивания фотохромного стекла, содержащего микрокристаллы $AgCl$ и $CuCl$

Термическое обесцвечивание в стеклах с хлоридами серебра и меди может происходить в ходе обратного перевода дырки, захваченной ионом меди, в валентную зону кристалла, как это показано на рисунке 2. Энергия этого перехода достаточно мала, чтобы он мог осуществляться под действием тепловых колебаний. Свободная дырка, образовавшаяся в результате такого процесса, может

диффундировать к поверхности металлического пятна, где она рекомбинирует с одним из нейтральных атомов серебра, образуя ион Ag^+ , в дальнейшем заполняющий вакантные позиции в кристаллической решетке хлорида серебра.

Таким образом, часть центров светочувствительности может релаксировать под действием одних лишь тепловых колебаний при комнатных температурах, а часть – не может. По этой причине, релаксация фотохромных стекол в отсутствие обесцвечивающего излучения не происходит в полной мере. Для количественной оценки того, насколько эффективно проходит термическое обесцвечивание фотохромного стекла, используют критерий релаксации, представляющий собой отношение изменения оптической плотности стекла после процесса обесцвечивания в течении времени t , $D_{exp}-D_t$, к наведенной оптической плотности в ходе потемнения:

$$\Delta D = D_{exp} - D_0, \quad (2)$$

$$k(t) = (D_{exp} - D_t) / (D_{exp} - D_0) \quad (3)$$

На рисунке 3 показаны типичные кривые потемнения и обесцвечивания фотохромных стекол. Построение этих кривых при комнатной температуре позволяет получить основные технические параметры, характеризующие ФХС. Оптическая плотность до облучения считается по (4) и отвечает за исходный спектр пропускания стекла. В необлученном состоянии D_0 обычно довольно маленькая (0,05 – 0,1):

$$D_0 = -\lg(\tau_0) \quad (4)$$

В результате облучения же происходит изменение оптической плотности, которое описывается выражением:

$$dc/dt = k_a I_a (C^* - c) - k_f c - k_b I_b, \quad (5),$$

где k_b , k_f , k_a – постоянная оптического обесцвечивания, постоянная термического обесцвечивания и постоянная активации соответственно; I_a и I_b – интенсивности активирующего и обесцвечивающего излучения соответственно; C^* и c – концентрации центров чувствительности и центров окраски соответственно.

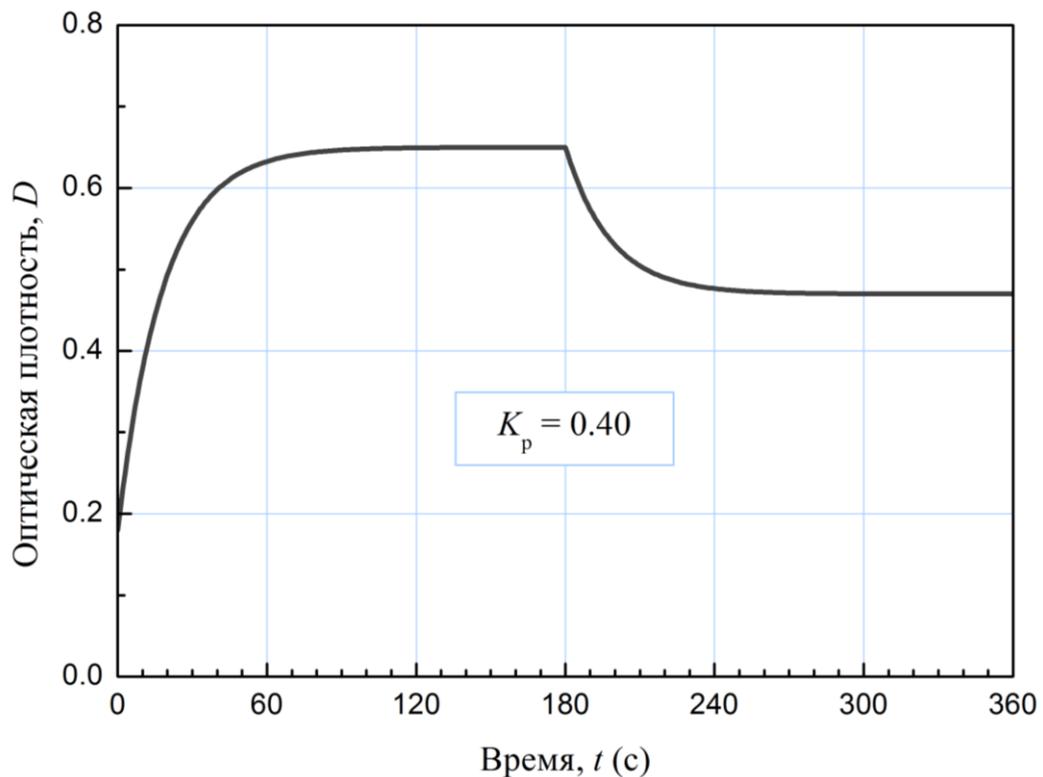


Рисунок 3 – Кривые потемнения и релаксации образца фотохромного стекла

Следует сказать также, что по устоявшемуся определению центры окраски являются точечными дефектами кристаллической решетки, которые представляют собой два типа вакансий (электронных или дырочных), поглощающих в спектральных областях, в которых собственное поглощение кристалла отсутствует.

Уравнение (5) описывает кинетических процессы в довольно упрощенной форме. Изменение оптической плотности происходит по значительно более сложному механизму. При облучении источниками света с непрерывным (сплошным) спектром всегда присутствуют спектральные области, приводящие к противоположным процессам. То есть часть спектра приводит к потемнению, другая же приводит к обесцвечиванию. Более того, равновесная концентрация определяется динамическим соотношением между константами потемнения и обесцвечивания в реальных условиях. При этом данные процессы являются активационными, то есть константы из уравнения (5) увеличиваются с ростом температуры. При снижении температуры до определенного значения равновесная концентрация центров окраски (c_p) увеличивается. Одновременно с этим уменьшается постоянная активации, т.е. скорости потемнения. Когда она становится равной нулю, потемнения стекла не происходит вообще. Сам процесс потемнения стекла стремится к равновесному состоянию, т.е. $dc/dt=0$. Равновесная

концентрация центров окраски (c_p) же будет зависеть от указанных выше критериев:

$$c_p = k_a I_a C^* / (k_a I_a + k_b I_b + k_f) \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что, когда процессы оптического и термического обесцвечивания равны нулю ($k_b = k_f = 0$), c_p - равновесная концентрация определяется только концентрацией центров чувствительности (C^*). В то же время, если k_f и k_b увеличиваются, то c_p уменьшается. Если значение k_f много больше остальных, то c_p становится пропорциональной интенсивности активирующего излучения I_a . В противоположность этому, чем больше k_f , тем больше должна быть интенсивность активирующего излучения для достижения одной и той же величины потемнения.

Из рисунка 3 видно, что по окончании процесса релаксации оптическая плотность образца не уменьшается до исходного состояния, что свидетельствует о наличии в стекле центров окраски, устойчивых к тепловым колебаниям при комнатной температуре.

Изменение свойств фотохромных материалов

Принцип измерения фотохромных свойств заключается в следующем. Через образец пропускается интенсивный поток широкополосного излучения, и измеряется интегральное поглощение в видимой области спектра (рисунок 4). Для облучения используется имитатор солнечного света (ксеноновая лампа) с интенсивностью падающего на образец света 50000-80000 лк. При регистрации процесса потемнения в измерительный канал после образца вводится калиброванный ослабляющий фильтр 3. Это нужно для того, чтобы ослабить падающее излучение, так как измерять мощные световые потоки с высокой чувствительностью является сложной технической задачей. Далее снимается через равные промежутки времени сигнал с фотометра. При исследовании кинетики обесцвечивания фильтр вводится перед образцом, таким образом через образец проходит только зондирующий сигнал. Сопоставление оптических плотностей после облучения и релаксации дает величину «критерия релаксации» (3).

$$K_p = D_{180} - D^*_{180} / D_{180} - D_0 \quad (7)$$

где D_{180} - наведенная оптическая плотность после 180 секунд облучения стекла, D^*_{180} - оптическая плотность через 180 с релаксации этого же стекла.

Величина обесцвечивания ФХС через 180 с будет характеризоваться критерием релаксации. Если происходит полное обесцвечивание, то критерий релаксации будет равен 1.

Одним из специализированных приборов для измерения фотохромизма является прибор ИФС-3. Он предназначен для автоматизированного измерения коэффициентов пропускания оптических материалов с переменным светопропусканием, в том числе фотохромных стёкол, при их активации световым излучением и последующей релаксации. Прибор может работать в одном из двух режимов: автономном и с управлением от РС.

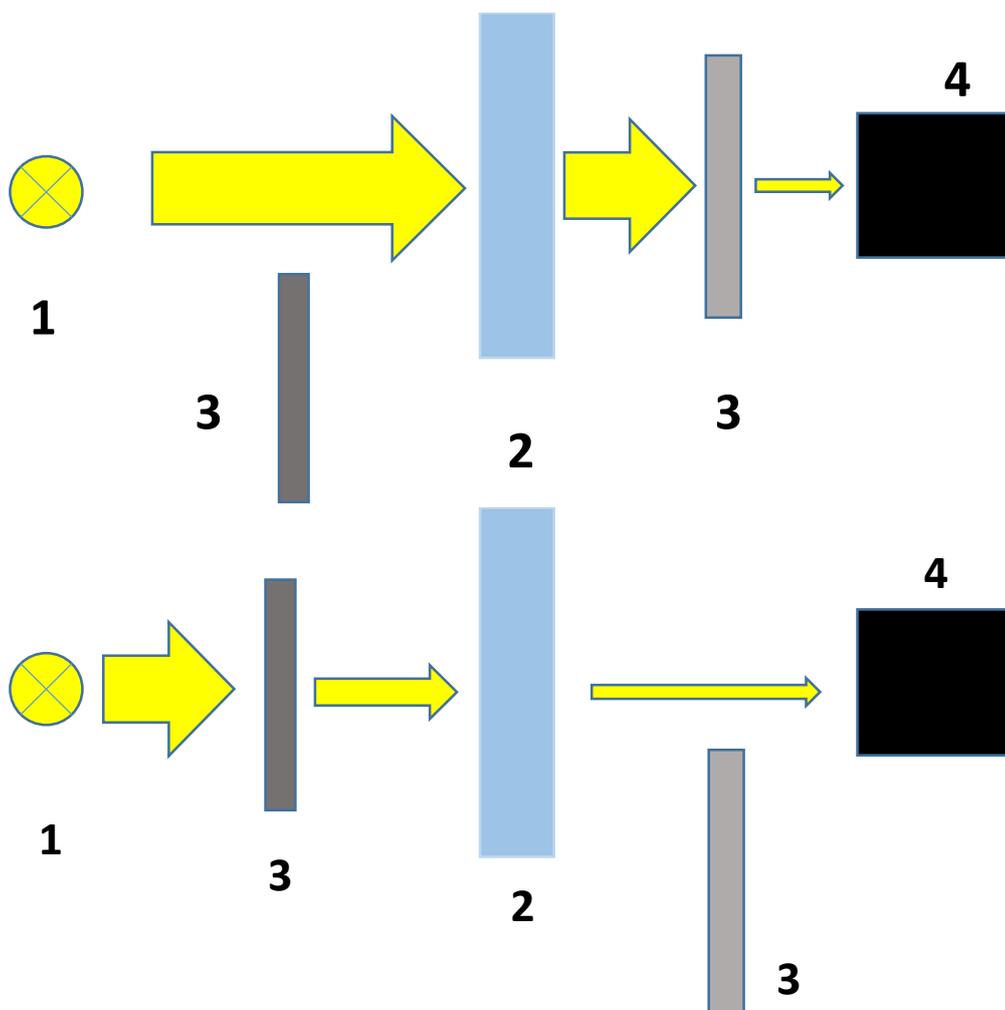


Рисунок 4 – Принцип действия фотометрической установки для измерения кинетических характеристик фотохромных стекол: 1- ксеноновая лампа; 2 – образец фотохромного стекла; 3 – светофильтры, 4 – фотометр

Таблица 1 – Основные характеристики ИФС-3:

Характеристика	Значение
освещенность образца	до 80000 лк
погрешность измерения коэффициента пропускания	Не более 1%
диапазон измерения времени облучения	1 - 999 с
Диапазон измерения времени обесцвечивания	2 - 999 с
Периодичность снятия отсчетов пропускания	1-10 с

На лицевой панели ИФС-3 расположены светодиодный дисплей и набор кнопок. Дисплей состоит из трех групп индикаторов, на которые выводятся значения коэффициентов пропускания ФХС: начальный, во время активации через каждые 5 секунд (по окончании активации остается конечное значение) и после релаксации. Назначение кнопок управления:

- **СТОП** – остановка процесса измерения и сброс в исходное состояние, значение **Т.а.** и **Т.р.** восстанавливается из энергонезависимой памяти, на дисплей выводится "000 00 00".
- **Т.а.** – установка времени активации, рядом с кнопкой включается светодиод. На дисплей выводится значение времени: "XXX". **Т.а.** должно быть в пределах 1...999С.
- **Т.р.** – установка времени релаксации, рядом с кнопкой включается светодиод. На дисплей выводится значение времени: "XXX". **Т.р.** должно быть в пределах 2...999 с.
- 0..9 – набор значения времени, при наборе цифры сдвигаются справа налево.
- **ЗП** – запись текущих **Т.а.** и **Т.р.** в энергонезависимую память при необходимости.
- **100** – калибровка 100% перед измерениями (без образца), на дисплей выводится освещенность зоны образца в относительных единицах: "XXX" (должно быть 800 ± 200).
- **ПУСК** – запуск процесса измерения с образцом ФХС, с текущими **Т.а.** и **Т.р.**
- **ПК** – режим работы с управлением от РС, рядом с кнопкой включается светодиод, на дисплей выводится «РС», переход в автономный режим производится нажатием на кнопку **СТОП**.

Порядок выполнения работы

В ходе работы каждому студенту необходимо провести измерения пропускания 2 образцов фотохромных материалов. Один из образцов измеряется в ручном режиме, другой в автоматическом.

Работа в автономном (ручном) режиме:

1. Включить прибор;
2. Убедиться в том, что в измерительном канале нет образца;
3. Проверить готовность, для чего нажать кнопку «100», без кассеты для установки образца должна загореться величина не менее 700;
4. Выставить параметры измерения время потемнения 180 сек, время релаксации 180 сек. Шаг измерения 5 сек;
5. Установить образец в держатель для образцов и поместить его в измерительный канал;

6. Нажать на кнопку «Пуск». На дисплей будет выводиться следующее: в первой позиции – начальный коэффициент пропускания ($K_{пр}$) образца, во второй – $K_{пр}$ через каждые 5 секунд экспозиции (остается $K_{пр}$ по окончании **Т.а.**), в третьей – $K_{пр}$, по окончании **Т.р.** Каждое измерение и окончание процесса сопровождаются звуковым сигналом. Остановить процесс измерения можно кнопкой **СТОП**.
7. Записать результаты измерений в таблицу измерений (таблица 2).

Для полученных в данном режиме данных следует также выполнить следующие действия:

- а) Построить зависимость $D(t)$, где D рассчитывается по формуле (4);
- б) Рассчитать степень потемнения по формуле (2);
- с) Рассчитать критерий релаксации по формуле (7).

Работа в автоматическом режиме:

1. Включить прибор;
2. Прогреть 30 минут;
3. Перевести прибор в режим управления от РС (кнопка «ПК»);
4. На компьютере запустить файл ifs2.exe. Далее работа производится в режиме простого диалога;
5. После окончания измерений программа создает в этом же подкаталоге файл ifs.dat с измеренными данными и дополнительной информацией (дата, время, параметры и комментарий). Этот файл может быть загружен в Excel для дальнейшей обработки, создания графика и т.д. Следующие измерения создадут новый файл ifs.dat, который заменит предыдущий. Файл ifs.dat с результатами измерений следует переименовать;
6. Внести полученные результаты в таблицу 2.

Таблица 2. Определение степени потемнения и критерия релаксации фотохромного стекла (наименование стекла или образца)

Время измерения t , сек	Пропускание, τ , %	Оптическая плотность
...		

Для результатов, полученных в данном режиме, следует также выполнить следующие действия:

- а) Построить график зависимости $D(t)$;
- б) Построить график зависимости оптической плотности от релаксации;
- с) Рассчитать степень потемнения по формуле (2);
- д) Рассчитать критерий релаксации по формуле (7).

Контрольные вопросы для самостоятельного изучения

1. Дайте развернутое определение термина «Фотохромизм».
2. Опишите механизмы потемнения и релаксации фотохромных материалов.
3. Объясните роль галогенов и металлов в процессах потемнения и обесцвечивания.
4. Как зависит величина пропускания фотохромных стекол от температуры при потемнении и обесцвечивании?

Лабораторная работа «Определение шероховатости поверхности и толщины оптических покрытий методом двухлучевой интерференции»

Цель лабораторной работы: ознакомиться с интерферометрическими методами контроля параметров оптических поверхностей на примере микроинтерферометра МИИ–4.

Шероховатостью называют совокупность неровностей поверхности, которые образуют рельеф поверхности, выделяемый с использованием базовой длины. Базовая линия предназначается для оценки шероховатости поверхности и проводится определенным образом относительно ее профиля. Шероховатость поверхности влияет на механическую прочность деталей, а также на коэффициент трения и износостойкость. Для оптических поверхностей шероховатость является критическим параметром, влияющим на качество создаваемого изображения. Существует 14 классов шероховатости поверхности, которые оцениваются по системе средней линии 1 (рисунок 1) с помощью параметров R_a и R_z , характеризующих высоты неровностей и измеряемых в пределах базовой длины l .

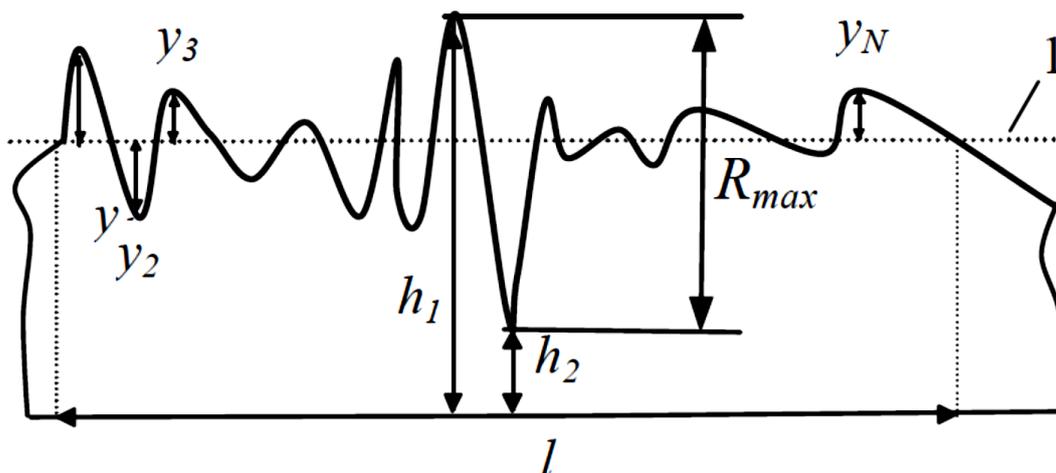


Рисунок 1 – Профиль поверхности

Базовая длина выбирается в зависимости от заданного класса шероховатости. Для разных классов шероховатости она составляет от 0,08 мм до 8,0 мм. За среднюю линию профиля принимается такая линия, которая разделяет измеряемый профиль таким образом, что сумма квадратов расстояний y_1, y_2, \dots, y_N , изображенных на рисунке 1, принимала минимальное значение на базовой длине.

Параметр R_a – это среднее арифметическое отклонение точек профиля поверхности от средней линии. Другим параметром для оценки шероховатости является R_z , который определяется как усредненная разность пяти самых высоких и самых низших точек с базовой длины.

Методы определения шероховатости

Методы определения шероховатости можно разделить на контактные и бесконтактные. К контактным методам измерения шероховатости относится профилометр, который формирует изображение профиля поверхности с помощью контактного датчика, представляющего собой острую алмазную иглу с системой обратной связи. После приведения иглы в соприкосновение с поверхностью она перемещается параллельно поверхности, при прохождении иглой микронеровностей профилометр регистрирует механические колебания иглы и преобразует их в электрический сигнал. Данный метод просто и легко доступен в эксплуатации, однако зачастую приводит к повреждению измеряемой поверхности.

Бесконтактные методы измерения шероховатости относятся к оптическим методам и подразделяются на три основных:

1. Растровый метод;
2. Метод светового свечения и теневой метод;
3. Микроинтерференционный метод.

Сущность растрового метода заключается в наложении на исследуемую поверхность стеклянной пластины, на которую нанесены равноудаленные параллельные линии (растр). При освещении образца с растром в местах наличия микронеровностей наблюдаются искажения, так называемые муаровые полосы, которые вызваны наложением штрихов реальной сетки и ее отражения от исследуемой поверхности. Определение величины неровностей производится с помощью микроскопа. Такая методика применяется для поверхностей, на которых есть выделенное направление. Примером могут служить царапины на поверхности от механической обработки.

При использовании метода светового сечения поверхность освещается узким пучком света, формируемым с помощью щели. При отражении от поверхности шероховатости вносят искажения в изображение щели, по которым рассчитываются параметры шероховатости. Теневой метод является усовершенствованным вариантом этой методики. В дополнение к методу светового сечения ставится линейка со скошенным ребром, которая срезает отраженный пучок. При этом на измеряемой поверхности наблюдается тень, верхняя часть которой повторяет изучаемый профиль. Анализ данного изображения дает информацию о параметрах и характере шероховатости.

Наиболее точным методом определения шероховатости является микроинтерференционный метод, основанный на наблюдении искажений интерференционных полос, создаваемых с участием испытуемой поверхности. Для наблюдения полос применяется прибор, в котором интерферометр совмещен с микроскопом. Интерференционная картина получается при совмещении пучков света, отраженных от исследуемой поверхности и эталонного зеркала.

Интерференционная картина представляет собой набор чередующихся светлых и темных полос (рисунок 2).

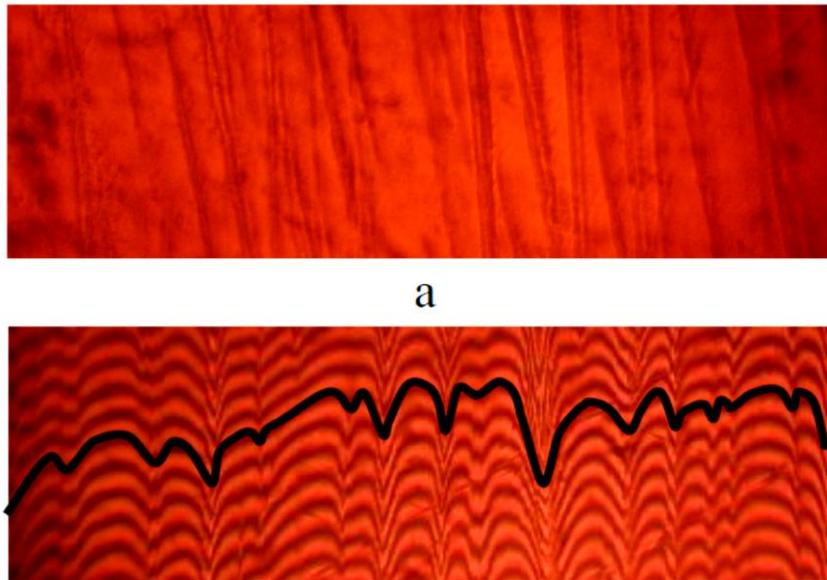


Рисунок 2 – Фотографии поверхности и интерференционной картины в красном свете

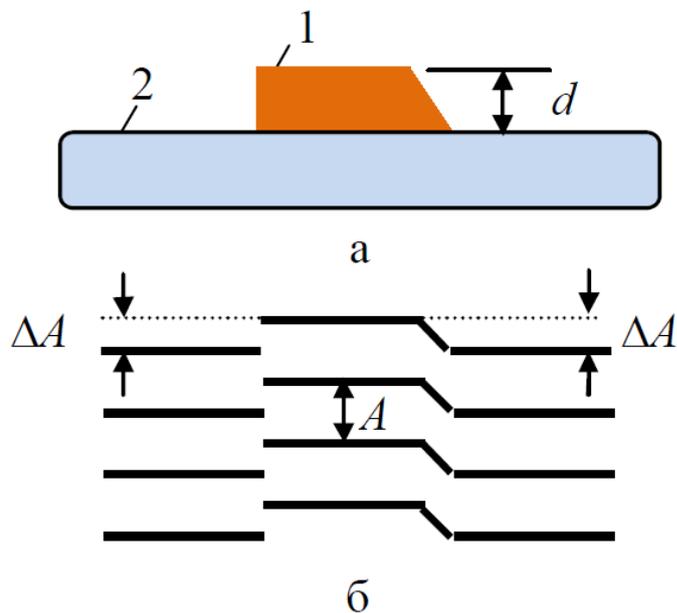


Рисунок 3 – Определение толщины слоя d по изменению положения полос интерференции

Также микроинтерференционный метод позволяет определять толщину пленок на поверхности подложки. В таких измерениях интерференционная картина формируется отражением света от поверхности пленки и подложки.

Толщину покрытия d вычисляется по формуле:

$$d = \frac{\Delta A \lambda}{A 2}, \quad (1)$$

где ΔA – искривление полосы на изображении штриха, A – ширина полосы. Значения ΔA и A должны быть измерены с помощью окулярного микрометра по следующим формулам:

$$\Delta A = x_1 - x_2, \quad (2)$$

$$A = x_3 - x_4, \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – это значения, соответствующие положению полос. Их определяют по шкале окулярного микрометра как показано на рисунке 7. Значение погрешности $\Delta A/A$ составляет примерно 0,05, а погрешность измерения $\delta h = 0,015$ мкм.

В случае резкой границы между пленкой и подложкой (случай а на рисунке 3) будет наблюдаться картина, представленная на рисунке 4.

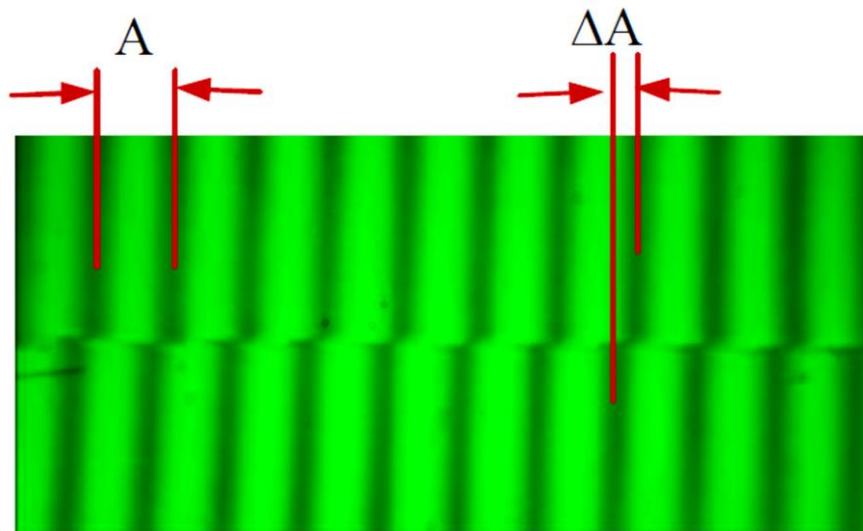


Рисунок 4 – Фотография интерференционной картины при введенном зеленом светофильтре

При измерении пленки с резкой границей возможно возникновение грубой ошибки при использовании монохроматического света. Для таких измерений необходимо использовать белый свет для определений нулевого порядка интерференции (рисунок 5).

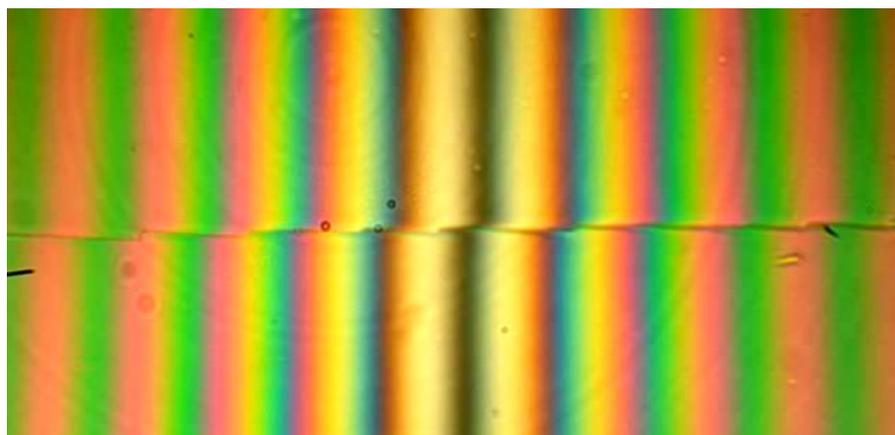


Рисунок 5. Фотография интерференционной картины в белом свете

Назначение и устройство МИИ-4

Основным назначением микроинтерферометра модели МИИ-4 является визуальное наблюдение, оценка и измерением шероховатости поверхности. На основе измерений, проводимых на МИИ-4, можно определить параметры шероховатости поверхности. На рисунке 6 представлена схема МИИ-4.

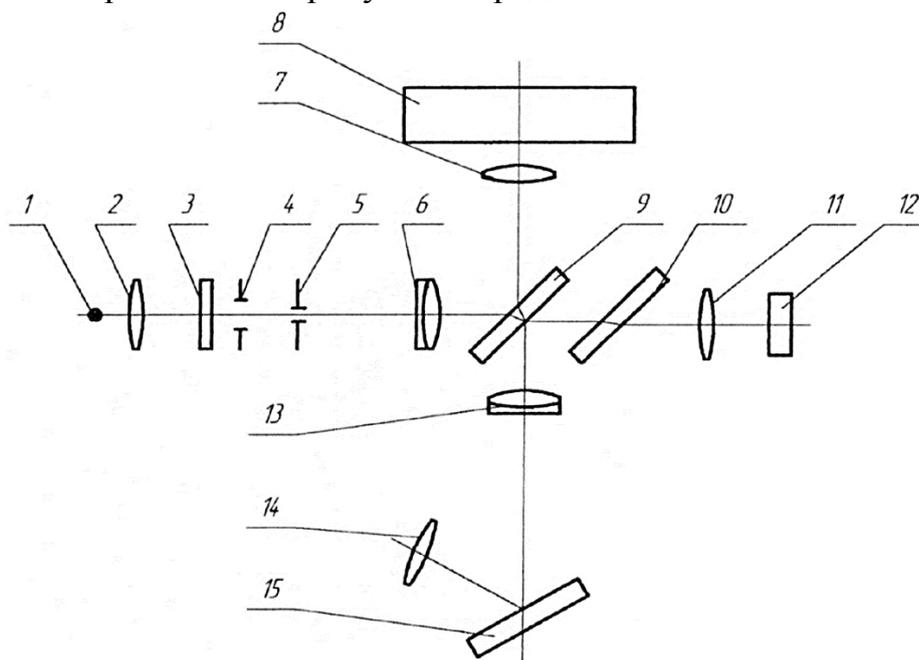


Рисунок 6 – Оптическая схема микроинтерферометра МИИ – 4

Линза 2 служит для проецирования белого света от источника 1 на апертурную диафрагму 4, ограничивающую проходящий световой пучок. С помощью этих элементов создается равномерная освещенность на диафрагме 5, расположенной в фокусе объектива 6. Прибор допускает работу не только в белом

свете, но также и в зеленом или оранжевом при использовании светофильтров 3. С помощью светоделителя 9 производится разделение исходного пучка света на два. Первый пучок направляется на контролируемую поверхность, обозначенную цифрой 8, в то время как второй проходит на эталонное зеркало 12. После отражения пучки света проходят обратно и совмещаются пластиной 9. Интерференционные полосы наблюдаются через окуляр-микрометр 14.

Исследуемый объект помещается на предметный столик, при этом контролируемая поверхность находится снизу. Поверхность стола должна быть установлена перпендикулярно к оптической оси элемента 7. Для изменения ширины интерференционных полос используется смещение объектива 11. При этом можно изменить и направление полос с помощью поворота объектива вокруг оптической оси.

Присутствие дефектов в виде царапин и прочих механических повреждений вызывает искажение полос на интерференционной картине, при этом по форме искажений можно судить о профиле поверхности деталей. Для вычислений глубины царапин на поверхности используется (1).

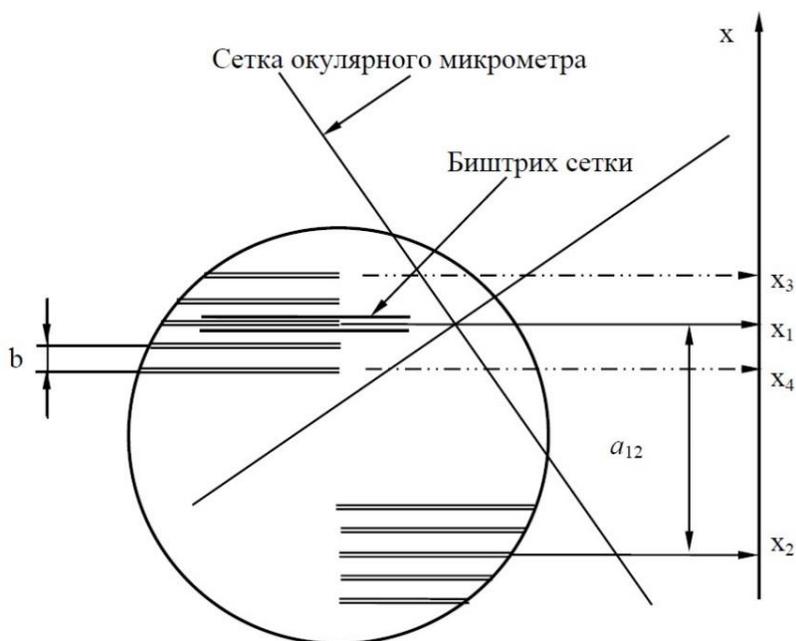


Рисунок 7 – Вид поля зрения микроинтерферометра при измерении высоты ступеньки

При наличии пленки на контролируемой детали в месте ее обрыва присутствует дефект в виде ступеньки. Чтобы измерить высоту такого дефекта, проводят измерение величины разрыва, то есть расстояния a_{12} (рисунок 7). Точность измерения можно повысить, при измерении расстояния не между соседними полосами, а между несколькими полосами путем его усреднения:

$$\Delta A = x_1 - x_2, \quad (4)$$

$$A = (x_3 - x_4)/k, \quad (5)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – это значения координат полос, определенные по шкале окулярного микрометра. Пример определения этих значений приведен на рисунке 7, число интервалов для усреднений k равно 4.

Порядок выполнения работы

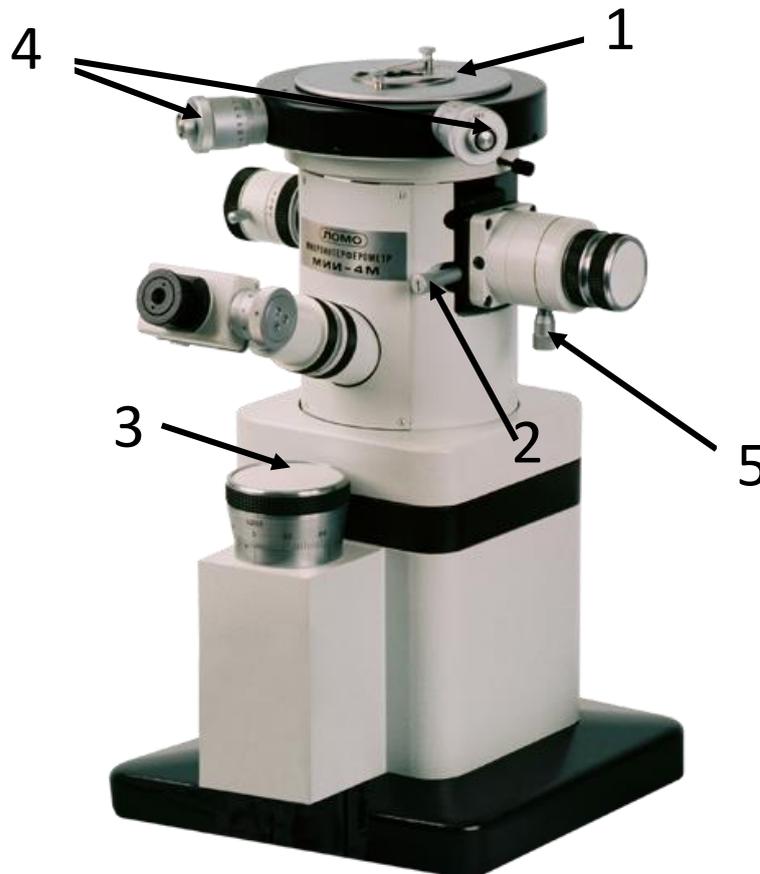


Рисунок 8 – Фотография МИИ–4М

1. Процедура подготовки прибора к выполнению лабораторной работы:
 - 1.1. Подключить блок питания к сети. После подключения питания зажечь лампу;
 - 1.2. Разместить исследуемый образец на предметном столике 1;
 - 1.3. Рукоятка 2 должна быть установлена на «вертикальное» положение стрелки-указателя. Микрометрический винт 3 служит для фокусировки на поверхности исследуемого образца;

- 1.4. Повернуть рукоятку 2 до положения указателя (стрелки) на «горизонтально». В объективе будет наблюдаться интерференционная картина;
- 1.5. Ручкой 5 отрегулировать интервал между полосами;
- 1.6. Поставить нить перекрестья таким образом, чтобы совместить с направлением царапин одну линию, а другую с направлением интерференционных полос;
- 1.7. Измерение величины интервала A между интерференционными полосами и величины ΔA проводится следующим образом. Перекрестие окулярного микрометра наводится на соответствующие участки интерференционных полос, при этом снимают отсчеты по шкале и микрометрическому барабану. Рассчитывают высоту неровности в соответствии с формулой $h = \Delta A \lambda / 2A$. При наблюдении в белом свете $\lambda / 2 = 270$ нм, при выполнении измерения в монохроматическом свете используют две длины волны - $\lambda = 566$ нм и $\lambda = 600$ нм (зеленый и желтый светофильтры соответственно). Необходимо провести измерения шероховатости на участке с базовой длиной 500 мкм, по результатам измерений рассчитать R_z :

$$R_z = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + \dots + (h_9 - h_{10})}{5} \quad (6)$$

Использовать табличные значения для определения класса шероховатости поверхности (таблица 1)

2. Измерение толщины поверхности:
 - 2.1. Образец положить пленкой вниз на предметный столик 1;
 - 2.2. Рукоятка 2 устанавливается в положение, при котором стрелка-указатель находится «вертикально». Микрометрический винт 3 служит для фокусировки на поверхности исследуемого образца. Винты 4 используются для перемещения ступеньки на поверхности образца в поле зрения микроскопа;
 - 2.3. Рукоятка 2 переводится в положение «горизонтально». В объективе будет наблюдаться интерференционная картина;
 - 2.4. Ручкой 5 отрегулировать интервал между полосами;
 - 2.5. Измерение интервала между полосами A и изгиба ΔA проводится при наведении перекрестие окулярного микрометра на интерференционные полосы, при этом снимают отсчеты по шкале и микрометрическому барабану. Толщина покрытия на поверхности образца определяется по формуле (1).
Таблица 1 – Классы шероховатости поверхностей

Класс шероховатости	Обозначение	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей R_z , мкм	Базовая длина l , мм
1	$\nabla 1$	40 – 80	160 – 320	8
2	$\nabla 2$	20 – 40	80 – 160	
3	$\nabla 3$	10 – 20	40 – 80	
4	$\nabla 4$	5 – 10	20 – 40	2,5
5	$\nabla 5$	2,5 – 5	10 – 20	
6	$\nabla 6$	1,25 – 2,5	6,3 – 10	0,8
7	$\nabla 7$	0,63 – 1,25	3,2 – 6,3	
8	$\nabla 8$	0,32 – 0,63	1,6 – 3,2	
9	$\nabla 9$	0,16 – 0,32	0,8 – 1,6	0,25
10	$\nabla 10$	0,08 – 0,16	0,4 – 0,8	
11	$\nabla 11$	0,04 – 0,08	0,2 – 0,4	
12	$\nabla 12$	0,02 – 0,04	0,1 – 0,2	
13	$\nabla 13$	0,01 – 0,02	0,05 – 0,1	0,08
14	$\nabla 14$	– 0,01	– 0,05	

Контрольные вопросы для самостоятельного изучения

1. Что такое нулевой порядок интерференционной картины?
2. Для чего используются зеленый и оранжевый светофильтры в МИИ–4?
3. Объяснить принцип работы микроинтерферометра. Каково назначение всех частей МИИ–4?
4. Что такое шероховатость поверхности и какими параметрами она характеризуется?
5. Каков диапазон высот неровностей поверхности, измеряемый на микроинтерферометре МИИ–4?

Список литературы

1. А.И. Сидоров, Основы фотоники: физические принципы и методы преобразование оптических сигналов в устройствах фотоники. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2014, 150 с.
2. Волоконно-оптические датчики. Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера. 2008, 520 с.
3. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
4. А.И. Сидоров, Н.В. Никоноров, Нанофотоника и наноплазмоника. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2014, 108 с.
5. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., and Payne D.N., «High-gain rare-earth doped fiber amplifier at 1.54 μm », in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, Washington, DC., Vol.3, p.167 1987.
6. Desurvire E.E., Simpson R.J., and Becker P.C., «High-gain Erbium doped traveling-wave fiber amplifier», Opt. Lett., 1987, v.12, pp.888 - 890.
7. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., and Payne D.N., «Low noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm », Elect. Lett., 1987, v.23, pp.1026 - 1028.
8. Zyskind J.L., Nagel J.A., and Kidorf H.D., «Erbium-doped fiber amplifiers for optical communications», in Optical Fiber Telecommunications, v. IIB, edited by I.P. Kaminov and T.L. Koch, Academic Press, San Diego, 1997, pp.13 - 68.
9. Desurvire E. Erbium-doped fiber amplifiers. A Wiley-Interscience publication, 1994.
10. Дианов Е.М., Карпов В.И., Курков А.С., Протопопов В.Н. «Методы сглаживания спектра усиления эрбиевых волоконных усилителей». Квантовая электроника 1996, т.23, сс.1059 - 1064.
11. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С., Медведков О.И., Протопопов В.Н. «Фотоиндуцированные внутриволоконные решетки показателя преломления для связи мод сердцевины-оболочка», Квантовая электроника, 1997, т. 24, сс. 151–154.
12. Барачевский В.А., Лошков Г.И., Цехомский В.А. «Фотохромизм и его применение» М. «Химия», 1977, 279 с.
13. Цехомский В.А. «Фотохромные оксидные стекла». Физ. и Хим. стекла, 1978, 4, № 1, сс. 3-21.
14. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. Physics and Chemistry of Photochromic Glasses. CRC Press LLC, 1998, 190 p.

Нурыев Рустам Какабаевич
Миронов Леонид Юрьевич
Асеев Владимир Анатольевич
Бабкина Анастасия Николаевна

**Методы и техника исследования оптических
материалов**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49