

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОТОХРОМНЫХ СТЕКОЛ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Оптическое материаловедение»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата
12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика»

Томск
2021

УДК 535-1/-3
ББК 22.344
Д 95

Рецензент:

Мандель А. Е., профессор каф. СВЧиКР, д-р физ.-мат. наук

Авторы:

В. Дю, А. С. Акрестина, Г. В. Симонова, М. Г. Кистенёва

Дю, Валерия

Д 95 Исследование кинетических свойств фотохромных стёкол: Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Оптическое материаловедение» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика» / В. Дю [и др.]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 14 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Исследование кинетических свойств фотохромных стёкол» для студентов, обучающихся по дисциплине «Оптическое материаловедение» по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика».

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол №90 от 19.05.2021 г.

УДК 535-1/-3
ББК 22.344

© Дю В., Акрестина А. С.,
Симонова Г. В., Кистенёва М. Г., 2021
© Томск. гос. ун-т. систем упр. и
радиоэлектроники, 2021

Оглавление

1 Введение	4
2 Теоретическая часть	4
2.1 Принцип фотохромизма	4
2.2 Потемнение фотохромных стёкол	5
2.3 Параметры фотохромных материалов	6
3 Описание и работа спектрофотометра СФ-2000.....	8
3.1 Технические характеристики	8
3.2 Принцип действия спектрофотометра	8
3.3 Устройство спектрофотометра.....	8
3.4 Процедура включения спектрофотометра и запуска управляющего программного обеспечения.....	10
3.4.1 Подготовка к работе	10
3.4.2 Процедура запуска сканирования спектра	11
3.4.3 Завершение работы.....	12
4 Контрольные вопросы	13
5 Задание	13
6 Содержание отчета.....	14
Литература	14

1 Введение

Во второй половине XX в. фотохромные материалы благодаря своим свойствам (светочувствительность, изменение показателя преломления, обратимость фотоиндуцированных изменений и др.) нашли практическое применение для создания светозащитных устройств с переменным светопропусканием, в качестве регистрирующих сред с высокой разрешающей способностью, в системах скоростной обработки и вывода оптических и электрических сигналов, модуляции излучения и в других областях науки и техники.

Целью лабораторной работы является изучение кинетических свойств фотохромных стёкол, измерение оптической плотности образца фотохромного стекла до облучения, добавочной оптической плотности после выбранного промежутка облучения активирующим излучением, измерение критерия релаксации фотохромного стекла. Изучение устройства и принципа действия спектрофотометра СФ-2000.

2 Теоретическая часть

Фотохромизм – это обратимое изменение окраски или оптической плотности материала под действием облучения.

В основе фотохромизма лежит чувствительность некоторых веществ к свету, точнее – к электромагнитной радиации определенной длины волны, которая вызывает изменение их цвета, при отсутствии же активирующей радиации происходит возврат в исходное состояние. Обратный процесс в фотохромных веществах инициируется температурой и видимым светом.

2.1 Принцип фотохромизма

Основа фотохромного процесса в неорганических материалах та же самая, что и при процессе фотографирования: разложение галоидного серебра под действием света. Под действием света кристаллы галогенида серебра распадаются, выделяя металлическое серебро, которое формирует изображение на пленке. Красящие центры в фотохромных стёклах – частицы металлического серебра. Однако принципиальное отличие заключается в обратимости процесса в фотохромных стёклах, в то время как обычную фотоэмульсию можно "засветить" только один раз. Причина состоит в невозможности перемещения галогена в стекле на большие расстояния. Галоген (обычно хлор) остается в достаточной близости от микрокристаллов серебра и после прекращения действия световых фотонов рекомбинирует с серебром, т. е. прежнее пропускание восстанавливается.

Кроме этого, фотохромизм неорганических веществ зарожден обратимыми процессами фотопереноса электронов, которые приводят к изменению валентности ионов металлов, обратимыми реакциями фотодиссоциации соединений, к возникновению центров окраски различного типа и др.

К органическим фотохромным материалам относятся спиропираны, дитизонаты и фталоцианины металлов, полициклические углеводороды и некоторые другие органические соединения. Фотохромизм органических веществ обусловлен некоторыми фотофизическими процессами, такими как поглощение света при переходе атомов или молекул из основного синглетного в возбуждённые синглетные или триплетные состояния (изменение окраски связано с изменением заселенностей электронных уровней при влиянии на вещество очень мощных световых потоков), и многочисленными фотохимическими реакциями, сопровождающимися перестройкой валентных связей (при диссоциации, окислительно-восстановительных химических реакциях) или изменением конфигурации молекул (цис-транс-изомерия). Например, в органических фотохромных стёклах применяются три группы

фотохромных органических соединений: оксазины, пираны и фульгиды. Для активации фотохромного процесса, обусловленного присутствием этих веществ, нужен свет более узкого диапазона, чем для стеклянных линз.

2.2 Потемнение фотохромных стёкол

Следует сказать, что важной характеристикой фотохромных стёкол является величина оптической плотности D . Величина пропускания в начальной точке процесса τ_0 характеризует начальное пропускание образца стекла, или исходную оптическую плотность D_0 :

$$D_0 = -\lg \tau_0. \quad (2.1)$$

В фотохромных материалах процесс потемнения (изменения оптической плотности) под действием облучения обусловлен увеличением концентрации центров окраски и может быть описан следующим выражением:

$$\frac{dc}{dt} = k_a I_a (C^* - c) - k_f c - k_b I_b c, \quad (2.2)$$

где C^* – концентрация центров чувствительности;

c – концентрация центров окраски;

I_a – интенсивность активирующего излучения;

I_b – интенсивность обесцвечивающего излучения (в случае облучения белым светом, например, солнечным, всегда присутствует как свет, вызывающий потемнение стекла, так и свет, вызывающий его оптическое обесцвечивание);

k_a, k_f, k_b – константы активации, термического обесцвечивания, оптического обесцвечивания соответственно.

Сам процесс потемнения стекла стремится к равновесному состоянию, т. е. $\frac{dc}{dt} = 0$.

Равновесная концентрация центров окраски (c_p) будет определяться выражением:

$$c_p = \frac{k_a I_a C^*}{k_a I_a + k_f + k_b I_b} \quad (2.3)$$

Из уравнения (2.3) следует, что, когда термическое и оптическое обесцвечивания равны нулю ($k_b = k_f = 0$), равновесная концентрация определяется только концентрацией центров чувствительности C^* . В реальных условиях равновесная концентрация определяется динамическим соотношением между константами потемнения и обесцвечивания. Поэтому, когда k_b и k_f растут, равновесная концентрация уменьшается. Можно также увидеть, что когда константа термического обесцвечивания (k_f) значительно превышает две другие константы, равновесная концентрация центров окраски (c_p) становится пропорциональной интенсивности активирующего излучения (I_a). С другой стороны, чем выше константа термического обесцвечивания, тем больше требуется интенсивность активирующего излучения для достижения одной и той же величины потемнения.

Следует отметить, что уравнение (2.2) – это упрощенное описание сложных кинетических процессов в фотохромных стёклах. Так, природа процессов потемнения и обесцвечивания носит активационный характер, поэтому все приведенные константы изменяются (растут) с температурой. В результате этого, при понижении температуры до определенных пределов наблюдается рост равновесной концентрации центров окраски (c_p),

но одновременно уменьшается и константа скорости потемнения (k_a) и, когда она становится равной нулю (при температуре жидкого азота, например), потемнение материала не происходит.

На рис. 2.1 представлены кривые процессов потемнения и восстановления в фотохромных материалах.

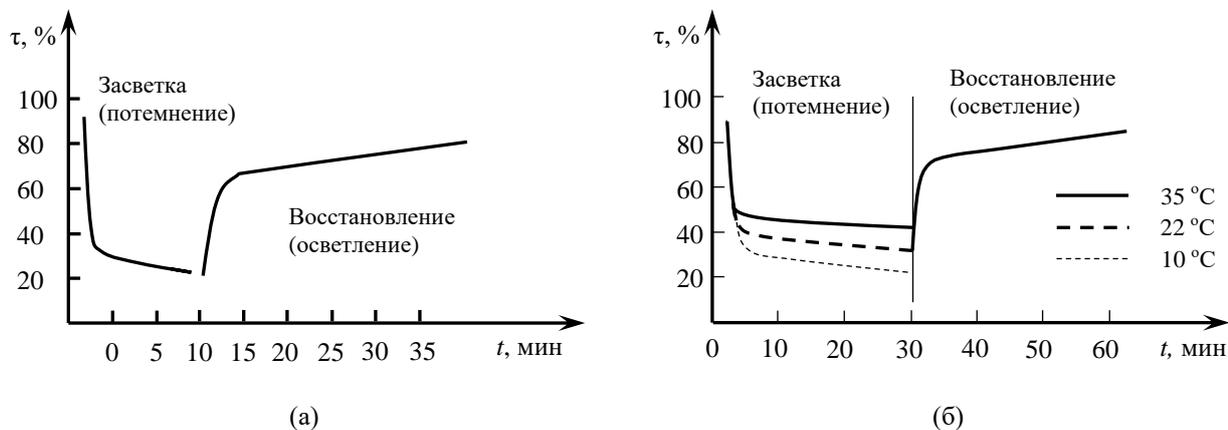


Рисунок 2.1 – Кривые переходных процессов для фотохромных материалов:
а – стекло; б – пластик

2.3 Параметры фотохромных материалов

Рассмотрим основные параметры фотохромных материалов.

Диапазон изменения коэффициента пропускания (или **оптической плотности**) определяется его наименьшей и наибольшей величинами (в самом прозрачном и самом темном состоянии) при облучении фотохромного материала определённой толщины (обычно 2 мм) источником излучения, близким по спектру к солнечному излучению. Отношение максимального коэффициента пропускания к минимальному характеризует **контраст** фотохромного материала. Для универсальных фотохромных материалов значение этого параметра составляет 3:1.

На фотохромные свойства материала влияет температура окружающей среды. Чем выше температура, тем меньше максимальная степень потемнения фотохромных стёкол. Физически снижение контраста при повышении температуры можно объяснить следующим образом. Фотохромия представляет собой двухфазный фотохимический процесс. В первой фазе фотохромные молекулы изменяют свою пространственную конфигурацию в ответ на воздействие излучения определенных длин волн. Как только интенсивность излучения снижается, молекулы во второй фазе процесса возвращаются в исходное состояние. При повышении температуры фотохромные молекулы могут возвратиться в исходное состояние (высокий коэффициент пропускания) за счет возрастания собственной кинетической энергии, а не изменения интенсивности излучения. На сегодняшний день новые фотохромные стекла проявляют меньшую зависимость от температуры окружающей среды.

Следующий важный параметр фотохромного материала – **скорость затемнения**. Обычно она дается в виде процентного изменения коэффициента пропускания света за определенный промежуток времени, либо в виде кривых для переходных процессов (рис. 2.2). Для лучших сортов фотохромных материалов типичное время на потемнение при засветке обычно составляет около 1 мин., а на осветление – при размещении в темноте и изменениях коэффициента пропускания на 70 – 80 % от максимального затемнения – около 5 мин. Считается, что глаз замечает сорокапроцентное изменение коэффициента пропускания в сравнении с исходным состоянием. Лучшие сорта фотохромных материалов такое

«минимально заметное на глаз» изменение коэффициента пропускания обесцвечивают за 10 – 30 секунд.

По кривым переходных процессов также можно судить и о контрасте фотохромного материала, и о влиянии температуры на его свойства. Для применения фотохромного материала в очковой оптике важна его **спектральная характеристика**. На рис. 2.2 представлены типичные спектральные характеристики коэффициента пропускания качественного универсального серого фотохромного стекла в двух состояниях – прозрачном и затемненном.



Рисунок 2.2 – Типовая спектральная характеристика коэффициента пропускания серого фотохромного стекла

Коэффициент пропускания серых фотохромных стёкол в просветлённом состоянии в видимом диапазоне практически не зависит от длины волны падающего излучения. Фотохромные стёкла коричневого цвета, как правило, на длине волны около 520 нм, имеют относительно узкую линию поглощения. Спектральные характеристики качественных фотохромных материалов отличаются плавным ходом кривых, без заметных колебаний величины коэффициентов пропускания. В противном случае появляются нежелательные цветовые оттенки, смешивающиеся с основным тоном. Приведенные на рис. 2.2 кривые спектрального коэффициента пропускания свидетельствуют о достаточно сильном поглощении ультрафиолетового излучения фотохромным стеклом, и это обстоятельство отмечается как достоинство фотохромных материалов, обеспечивающих эффективную защиту глаз от УФ-излучения.

Величина исходной оптической плотности D_0 , определяемой выражением (2.1), является очень важной характеристикой фотохромных стёкол, т.к. она определяет свойства материала в исходном необлученном состоянии. Для большинства фотохромных стёкол оптическая плотность колеблется в пределах 0,05 – 0,1.

Сопоставление процесса потемнения и обесцвечивания дает **критерий релаксации**:

$$K_p = \frac{D_d - D_{rel}^*}{D_d - D_0}, \quad (2.4)$$

где D_d – оптическая плотность стекла после облучения (термического потемнения);

D_{rel}^* – оптическая плотность стекла после темновой релаксации (термического обесцвечивания).

Величина K_p характеризует насколько полно прошло обесцвечивание фотохромного стекла за определённый промежуток времени. Из выражения (2.4) очевидно, что, если критерий релаксации $K_p \approx 1$, то стекло достигло почти полного обесцвечивания. С другой стороны, если за этот интервал наведенное поглощение не обесцвечивается совсем, то $K = 0$. В настоящее время существуют фотохромные стёкла, у которых критерий релаксации при

комнатной температуре равен 0 (стекло марки ФХС-2) и около 1 (стекло марки ФХС-4). Такой же диапазон критерия релаксации можно реализовать при варьировании температуры.

3 Описание и работа спектрофотометра СФ-2000

3.1 Технические характеристики

- а) Спектральный диапазон, нм.....от 190 до 1100
- б) Предел допускаемого значения абсолютной погрешности спектрофотометра при измерении спектральных коэффициентов направленного пропускания, %.....1,0
- в) Предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности спектрофотометра при измерении спектральных коэффициентов направленного пропускания, %.....0,2
- г) Характеристики ультрафиолетового канала (канала «У»):
 - 1) спектральный диапазон, нмот 190 до 390
 - 2) пределы допускаемого значения абсолютной погрешности установки длины волны.....±0,4
 - 3) минимальный выделяемый спектральный интервал, нм.....1
- д) Характеристики видимого и ближнего инфракрасного канала (канала «В»):
 - 1) спектральный диапазон, нмот 390 до 1100
 - 2) пределы допускаемого значения абсолютной погрешности установки длины волны.....±0,8
 - 3) минимальный выделяемый спектральный интервал, нм.....1
- е) Источники излучения при работе в спектральном диапазоне:
 - 1) от 190 до 390 нм.....дейтериевая лампа
 - 2) от 390 до 1100 нм.....галогенная лампа
- ж) Приемники излучения.....ПЗС-линейка типа TCD 1304 AP
- з) Время прогрева спектрофотометра, мин.....30

3.2 Принцип действия спектрофотометра

Принцип действия спектрофотометра основан на измерении отношения двух световых потоков: светового потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец).

В световой поток от источника излучения поочередно вводятся затвор для определения темного сигнала, расположенный внутри спектрофотометра, контрольный образец и исследуемый образец.

Коэффициент исследуемого образца рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{I - I_T}{I_K - I_T}, \quad (3.1)$$

где I – сигнал, пропорциональный световому потоку, прошедшему через исследуемый образец;

I_K – сигнал, пропорциональный световому потоку, прошедшему через контрольный образец;

I_T – сигнал, пропорциональный темновому току приёмника.

3.3 Устройство спектрофотометра

Оптическая схема спектрофотометра приведена на рисунке 3.1. Она состоит из оптических схем двух каналов («У» и «В»). Каждый из каналов представляет собой

полихроматор, построенный на основе вогнутой дифракционной решетки с коррекцией аберраций.

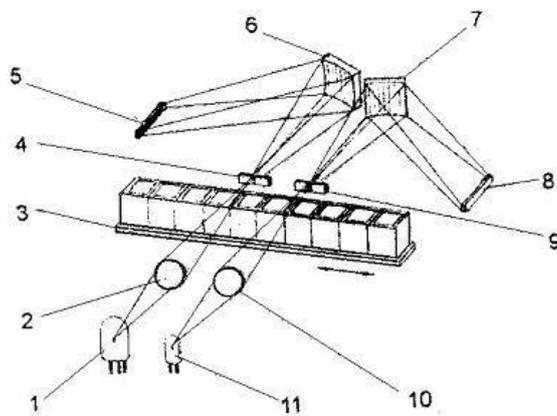


Рисунок 3.1 – Оптическая схема спектрофотометра СФ-2000

Свет от источника ультрафиолетового излучения 1, попадая на объектив 2, направляется им на образец 3 и затем проецируется на входную щель 4 канала «У» спектрофотометра. Затем световой пучок попадает на дифракционную решетку 6, после чего дифрагированный свет фокусируется на поверхности многоэлементного приемника 5.

Аналогично, свет от видимого излучения 11, попадая на объектив 10, направляется на образец 3, проецируется на входную щель 9 канала «В» спектрофотометра. Затем световой пучок направляется на дифракционную решетку 7, после чего дифрагированный свет фокусируется на поверхности многоэлементного приемника 8.

Каждый из многоэлементных приемников регистрирует свой спектральный диапазон одновременно. Принцип многоэлементного приемника состоит в преобразовании светового сигнала в электрический, причем величина электрического сигнала прямо пропорциональна как величине светового сигнала, так и времени освещения приемника (экспозиции).

Конструктивно спектрофотометр выполнен в виде единого блока (рис. 3.2), в состав которого входят:

- осветитель с двумя источниками излучения. При работе спектрофотометра осветитель закрыт защитным кожухом;
- автоматизированное кюветное отделение;
- полихроматор с двумя многоэлементными приемниками и двумя дифракционными решетками;
- электронные блоки и модули, обеспечивающие функционирование спектрофотометра.

Элементы оптической системы закрыты светонепроницаемым кожухом, который закреплен винтами на основании.



Рисунок 3.2 – Внешний вид спектрофотометра СФ-2000

Основание с полихроматором, осветителем и кюветным отделением, а также электронные блоки и модули размещены в поддоне, закрытом сверху кожухом с откидной крышкой, обеспечивающей доступ к кюветному отделению и рукояткам щелей. Съемный кожух обеспечивает доступ к источникам излучения.

3.4 Процедура включения спектрофотометра и запуска управляющего программного обеспечения

3.4.1 Подготовка к работе

1. Включить спектрофотометр, установив тумблер **СЕТЬ** в положение **1** (Включено), при этом должен загореться светодиод (рис. 3.2), расположенный на передней панели спектрофотометра, должен включиться вентилятор, расположенный на боковой стенке кожуха прибора и должна произойти установка устройства перемещения кювет в начальное положение.

Повторное включение спектрофотометра должно производиться не ранее, чем через 1 минуту после выключения сетевого тумблера. При повторном включении дейтериевой лампы следует дать ей остыть и только после этого включать снова.

2. Включить компьютер. Дождаться загрузки операционной системы.

3. Убедиться, что с момента включения спектрофотометра прошло не менее 30 секунд и запустить программу «Сканирование». Найдите на рабочем столе ярлык, изображенный на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Ярлык программы «Сканирование»

Откроется рабочее окно управления спектрофотометром (рис. 3.4).

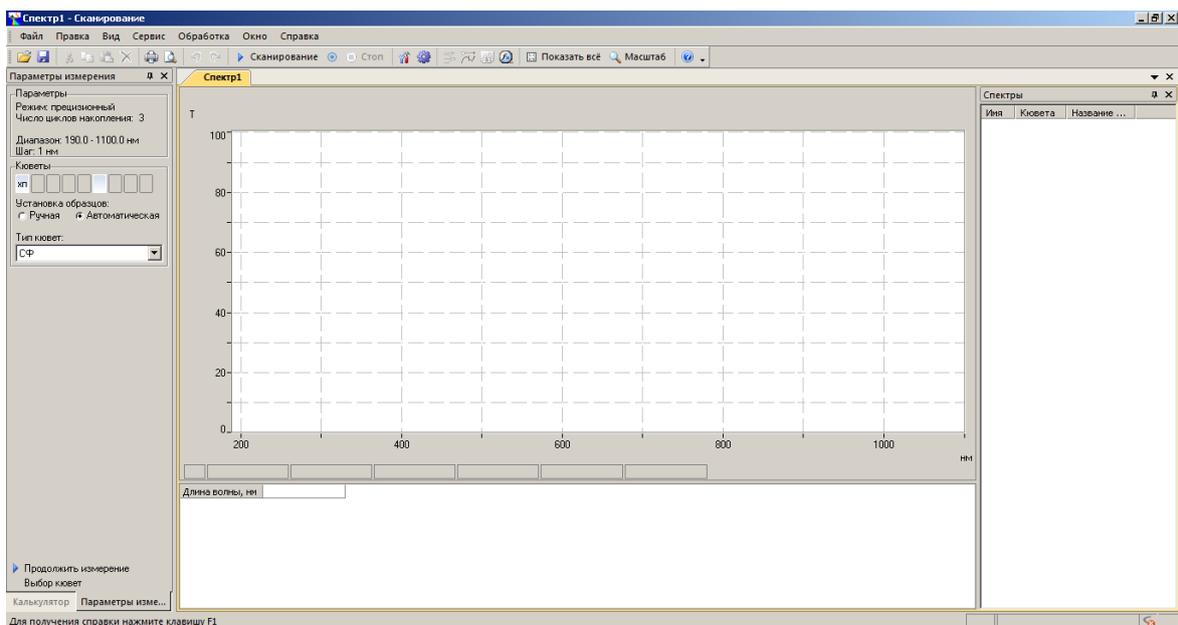


Рисунок 3.4 – Окно управления спектрофотометра

4. Убедиться, что программа имеет связь с прибором (в правом нижнем углу в строке состояния имеется пиктограмма, сообщающая о наличии связи с прибором). В случае, если связь отсутствует, необходимо сделать двойной щелчок по пиктограмме, убедиться, что прибор включен и подключен к компьютеру и, в появившемся диалоговом окне «Соединение с прибором», нажать кнопку **ПОДКЛЮЧИТЬ**.

5. Убедиться, что включена лампа, диапазон работы которой соответствует планируемым измерениям:

- лампа ультрафиолетового канала предназначена для диапазона 190 – 395 нм;
- лампа видимого канала предназначена для диапазона 395 – 1100 нм.

При необходимости можно включить лампу с помощью команды «Сервис/Панель управления». Выбрать нужный канал и нажать кнопку **ВКЛЮЧИТЬ**.

6. Перед началом измерений необходимо выполнить **ПРОГРЕВ ПРИБОРА И ЛАМПЫ**. Измерения на приборе следует производить не ранее чем после тридцатиминутного прогрева, включая время прогрева источников излучения. Следует иметь в виду, что соответствующий источник включиться только после запуска программного обеспечения и установки параметров спектрального диапазона, соответствующего включению данного источника.

3.4.2 Процедура запуска сканирования спектра

1. В меню «Вид» отметить нужный вариант представления результатов измерения:

- единицы пропускания;
- процент пропускания;
- оптическая плотность.

2. На панели «Параметры измерения» в позиции «Тип кювет» выбрать из выпадающего списка вариант «СФ», в позиции «Установка образцов» отметить вариант «Автоматическая».

3. Нажать на панели инструментов кнопку **СКАНИРОВАНИЕ**. На экране появится окно установки параметров измерения (рис. 3.5).

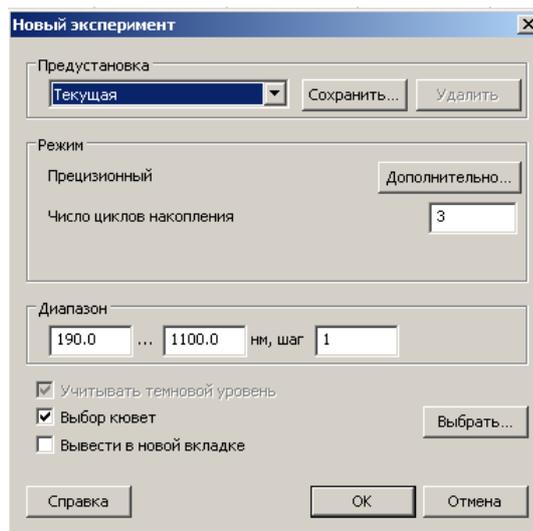


Рисунок 3.5 – Параметры измерения

4. Выбрать тип экспозиционного режима, нажав на кнопку **ДОПОЛНИТЕЛЬНО**. Откроется окно для установки дополнительных параметров. Для точных количественных измерений нужен прецизионный режим.

5. Установить число циклов накопления (заводская установка – 3). В случае «Ручного режима» указать также время экспозиции.

Точные значения сохраненных величин зависят от режима сканирования и числа накоплений. При возрастании числа накоплений ошибка падает в корень квадратный от числа регистраций.

6. Установить спектральный диапазон и шаг измерения (в качестве десятичного разделителя используется символ «.» – точка).

7. Произвести выбор кювет, нажав кнопку «Выбрать» (рис. 3.5). Измерение можно выполнить с учетом разницы оптических плотностей кювет. Нумерация кювет начинается с нуля. В эту позицию установить раствор сравнения или, если регистрируется спектр относительно воздуха, ничего не устанавливать. Нажать кнопку «ОК», и окно выбора кювет исчезнет. В выбранную кювету держателя поместить исследуемый образец.

8. Установить держатель с образцом на направляющие подвижной каретки таким образом, чтобы рукоятка держателя, отмеченная белой точкой, оказалась в кюветном отделении справа. Закрыть крышку прибора и нажать «ОК» на окне «Новый эксперимент», после чего запустится процедура сканирования.

9. После окончания сканирования в графическом окне появится спектр.

10. Сохранить полученные результаты с помощью команды «Файл/Сохранить...». Спектр можно сохранить в двух видах – в виде спектра и в текстовом формате. При работе со спектром необходимо его отметить: для этого в окне «Спектры» щелкнуть по имени спектра – сделать его активным.

3.4.3 Завершение работы

1. Закрыть рабочее окно программы, при необходимости ответить на запросы о сохранении данных. После этого будет осуществлен выход из программы.

2. Установить сетевой тумблер спектрофотометра в положение «0».

3. Выключить компьютер.

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение термина «Фотохромизм».
2. Какие фотохромные стёкла вам известны?
3. Какая принципиальная особенность заложена в природу гетерогенных фотохромных стёкол?
4. Как зависит величина равновесного потемнения стекла от константы скорости потемнения и константы скорости обесцвечивания?
5. Как влияет температура на процесс потемнения фотохромных стёкол?
6. В каких областях и как применяются фотохромные стёкла?
7. Опишите оптическую схему спектрофотометра СФ-2000.

5 Задание

1. Включить спектрофотометр СФ-2000, следуя указаниям, описанным в пункте 3.4. Задать следующие параметры измерения:
 - а) представление результатов измерения – «Оптическая плотность»;
 - б) диапазон длин волн от 300 до 1100 нм, шаг сканирования – 1 нм;
 - в) номер кюветы.
2. Установить фотохромное стекло в выбранную кювету держателя, после поместить в спектрофотометр.
3. Запустить сканирование. Сохранить полученные значения.
4. Собрать экспериментальную схему, указанную на рис. 5.1. Фотохромное стекло облучить ультрафиолетовой лампой в течение 3 минут и затем повторить пункт 3.

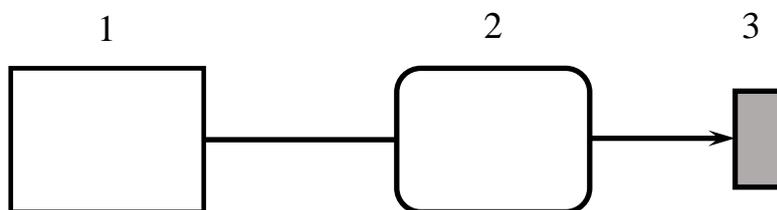


Рисунок 5.1 – Блок-схема установки: 1 – блок питания; 2 – УФ лампа; 3 – образец фотохромного стекла

5. Далее образец релаксирует в течение 3 минут. Повторить пункт 3.
6. Построить график зависимости оптической плотности фотохромного стекла от длины волны для трех состояний. Выбрать три значения длин волн, при которых наблюдаются значительные изменения в спектрах оптической плотности; для них рассчитать следующее:
 - а) степень потемнения:
$$\Delta D = D_d - D_0, \quad (4.1)$$
где D_0 – начальная оптическая плотность стекла;
 D_d – оптическая плотность стекла после засветки лампой.
 - б) критерий релаксации;
 - в) интенсивность излучения, падающего на стекло.Данные расчетов занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Определение степени потемнения и критерия релаксации фотохромного стекла

λ , нм	t_n , мин	D_0	ΔD	K_p

7. Оформить отчёт о проделанной работе.

6 Содержание отчета

При составлении отчёта необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчёта о лабораторной работе. В соответствующих разделах отчёта необходимо представить:

- схему экспериментальной установки;
- таблицы экспериментальных данных;
- результаты расчётов, предусмотренных заданием;
- графики экспериментальных зависимостей $D_0(\lambda)$, $D_d(\lambda)$, $D_{rel}^*(\lambda)$;
- выводы.

Литература

1. Симонова, Г. В. Оптические свойства твердых тел: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Г. В. Симонова, М. Г. Кистенёва. – Томск: ТУСУР, 2016. – 126 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5935>.
2. Барачевский, В. А. Фотохромизм и его применение / В. А. Барачевский, Г. И. Лашков, В. А. Цехомский. – М.: Химия, 1977. – 280 с.
3. Зверев, В. А. Оптические материалы. Часть 2: учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 248 с.