

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

*Виноградова Г.Н., Воронин Ю.М., Ермолаева Г.М., Каманина Н.В.,  
Смирнов В.Н., Шилов В.Б.*

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
**Учебное пособие к лабораторным работам**



Санкт-Петербург  
2007

УДК 621.373

Виноградова Г.Н., Воронин Ю.М., Ермолаева Г.М., Каманина Н.В., Смирнов В.Н., Шилов В.Б. Лазерные технологии. Учебное пособие к лабораторным работам. - СПб: ГУ ИТМО., 2007. - 46 с.

Учебное пособие предназначено для студентов четвертого курса инженерно-физического факультета. В настоящее издание включены описания пяти лабораторных работ по курсу «Лазерные технологии».

Рекомендовано к изданию Ученым Советом факультета Фотоники и оптоинформатики. Протокол Совета №4 от 22.12.06 г.

© Санкт-Петербургский государственный  
университет информационных технологий  
механики и оптики, 2007

© Авторы: Виноградова Г.Н., Воронин Ю.М.,  
Ермолаева Г.М., Каманина Н.В., Смирнов В.Н.,  
Шилов В.Б., 2007.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>Лабораторная работа №1 «ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ПРОЗРАЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»</b> .....	<b>7</b>
Цель работы.....	7
Краткие теоретические сведения.....	7
Способы измерения порога.....	10
Описание лабораторной установки.....	12
Порядок выполнения работы.....	13
Содержание отчета.....	15
Вопросы для подготовки.....	15
Литература.....	15
<b>Лабораторная работа №2 «СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОРОГОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ПРОЗРАЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»</b> .....	<b>16</b>
Цель работы.....	16
Краткие теоретические сведения.....	16
Описание лабораторной установки.....	18
Порядок выполнения работы.....	19
Содержание отчета.....	21
Вопросы для подготовки.....	21
Литература.....	21
<b>Лабораторная работа №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК»</b> ...	<b>22</b>
Цель работы.....	22
Краткие теоретические сведения.....	22
Словарь используемых терминов.....	25
Описание лабораторной установки.....	28
Порядок выполнения работы.....	29
Содержание отчета.....	30
Вопросы для подготовки.....	30
Литература.....	31
<b>Лабораторная работа №4 «БЛИЖНЕПОЛЬНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ РАСТРОВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП»</b> .....	<b>32</b>
Цель работы.....	32
Объект исследования.....	32
Задачи, решаемые в работе.....	32
Краткие теоретические сведения.....	32

Формирование эванесцентного поля.....	33
Описание принципиальной схемы и составных элементов ТРОМ...	33
Порядок выполнения работы.....	35
Содержание отчета.....	36
Литература .....	36
<b>Лабораторная работа №5 «ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННОЙ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ».....</b>	<b>39</b>
Цель работы.....	39
Краткие теоретические сведения.....	39
Описание лабораторной установки.....	42
Порядок выполнения работы.....	45
Содержание отчета.....	45
Литература.....	45

## ВВЕДЕНИЕ

Приведены краткие теоретические сведения и описание пяти лабораторных работ, вошедших в учебное пособие по курсу лекций “Лазерные технологии”. В их основу легли разработанные методики и результаты ряда научно-исследовательских работ, сравнительно недавно выполнявшихся в Государственном оптическом институте им. С.И.Вавилова. Основная цель настоящего лабораторного практикума: привить студентам навыки работы с лазерами различных режимов генерации (от непрерывного до импульсного длительностью 20 пс), длиной волны генерации (от УФ до средней ИК-области спектра) и мощности. Кроме того, практикум позволяет продемонстрировать широкие возможности использования лазерного излучения в научных экспериментах различного назначения.

Первые две работы посвящены измерениям порогов разрушения в объеме и на поверхности оптических элементов, изготовленных из щелочно-галогидных кристаллов (NaCl и KCl), под действием импульсов излучения CO<sub>2</sub> лазера с поперечным разрядом. Выполнение этих работ позволяет не только обрести навык измерения порогов, но и разобраться в причинах различия порогов разрушения в объеме и на поверхности элемента, а также причинах различия порогов разрушения передней (обращенной к линзе, фокусирующей лазерное излучение) и задней поверхности элемента.

Следующая работа посвящена исследованию закономерностей изменения временных характеристик фуллеренсодержащих нематических жидкокристаллических диспергированных систем при воздействии на мезофазу импульсного напряжения питания. Выполнение работы должно способствовать расширению навыков экспериментальной работы, ознакомлению с новейшими разработками фуллеренсодержащих сред и их оптическими и динамическими свойствами (на примере эффекта Фредерикса), а также оптимизации временных характеристик структур, широко используемых в лазерной технике, медицине и дисплейной технике.

Цель четвертой лабораторной работы состоит в практическом ознакомлении с принципиальной схемой, устройством и особенностями работы ближнепольного туннельного растрового оптического микроскопа (ТРОМ). Сверхвысокое разрешение ТРОМ (в 10 - 100 раз выше дифракционного предела) достигается путем регистрации распределения интенсивности света непосредственно у поверхности образца с помощью светопроводящего остррия-зонда, который сканирует поверхность по строке и кадру. В состав ТРОМ входят компьютер, блок электронного управления, плата сопряжения, лазерный осветитель и программное обеспечение. В ходе выполнения работы предстоит изучить устройство оптико-механических узлов ТРОМ, ознакомиться программным

обеспечением, методами исследования образцов, регистрации и обработки изображения.

Цель последней работы состоит в ознакомлении с методом определения дисперсионных параметров оптических информационных широкополосных волокон при помощи ультракоротких лазерных импульсов. Экспериментально временная дисперсия волокна определяется по сопоставлению длительности импульсов, прошедших через волокно, и опорных импульсов, прошедших через воздушную линию задержки соответствующей длины. В качестве тестовых импульсов используются одиночные импульсы длительностью  $\sim 20$  пс. Измерения временной формы пробных импульсов излучения и импульсов излучения с выхода волокна производятся с помощью скоростной щелевой камеры с временным разрешением 6 пс и чувствительностью 50 нДж.

## Лабораторная работа №1

### «ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ПРОЗРАЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

#### *Цели работы*

- ознакомиться с основными механизмами инициирования процессов, приводящих к формированию разрушений в объеме и на поверхности прозрачных диэлектриков под действием импульсов лазерного излучения;
- обрести навыки измерения порогов разрушения оптических материалов;
- ознакомиться с оптической схемой установки;
- освоить методику измерения порога;
- провести измерения порога разрушения предложенного материала (NaCl, KCl, лабораторный воздух).

#### *Краткие теоретические сведения*

Исследования лазерного разрушения прозрачных диэлектриков ведутся практически с момента создания лазеров с модулированной добротностью. Интерес к этой проблеме продиктован как необходимостью выяснения принципиальных вопросов физики взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом, так и практической потребностью в оптических материалах, пригодных для создания высоконадежных мощных лазерных систем. Часто в литературе наряду с термином разрушение используют как эквивалентное ему наименование пробой. Его использование предпочтительнее, когда речь идет о формировании лазерной искры в газах. Тем не менее, ниже разрушение и пробой будут использоваться как синонимы.

Различают два вида пробоя - собственный и несобственный. В первом случае имеют в виду пробой, инициируемый в самой матрице и не связанный с наличием в материале дефектов, например, поглощающих неоднородностей (ПН). Механизмы собственного пробоя (лавинная или многофотонная ионизация и пороговое сужения запрещенной зоны диэлектрика) реализуются при острой фокусировке и интенсивностях излучения  $10^{11} - 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> при использовании сложных и дорогостоящих лазерных установок. Последнее связано, в частности, с необходимостью исключения влияния на развитие пробоя различного рода дефектов, прежде всего поглощающих неоднородностей (ПН) – субмикронного размера включений сильно поглощающих веществ.

Одним из основных понятий физики взаимодействия лазерного излучения с веществом является порог разрушения. Принято различать два вида порогов – физический и технический. Физическим порогом разрушения материала называют такую плотность энергии или мощности (интенсивность) излучения, при которой происходят необратимые изменения оптических характеристик образца (пропускания, рассеяния, отражения) исследуемого материала. Изменение указанных характеристик является следствием образования разрушения, формирование которого сопровождается яркой вспышкой оптического излучения. Техническим порогом разрушения называют такую плотность энергии или мощности излучения, при которой нарушается работоспособность изделия, изготовленного из исследуемого материала, вследствие изменений его оптических характеристик, превышающих допустимые. Ясно, что порог пробоя – одна из важнейших характеристик оптических материалов, определяющая возможности их использования для изготовления оптических элементов лазерных установок.

Надежно установлено, что в большинстве случаев лучевая прочность реальных сред ограничена развитием несобственного пробоя, инициируемого нагревом ПН. Нагрев их ведет к разрушению материала, обусловленному появлением локальных проплавов, разрастанию размеров поглощающей области вокруг ПН за счет включения различных механизмов поглощения, термохимических и фотохимических реакций, возникновению термических напряжений. Наличие в материале ПН ведет к снижению порога пробоя на несколько порядков по сравнению с порогом собственного пробоя и к зависимости порога от размера облучаемой области.

В настоящей работе измеряется порог именно этого вида пробоя. Пробой при околопороговых интенсивностях излучения сопровождается вспышкой свечения, ростом рассеяния и образованием в каустике фокусирующей излучение линзы одного или нескольких микроразрушений. Число последних растет с ростом интенсивности вплоть до образования макроразрушения.

Установлено, что порог разрушения реальных сред имеет вероятностную природу. Кроме того, он зависит от времени воздействия и, как уже упоминалось, диаметра облучаемой области. В связи с этим его измерения должны производиться в условиях обязательного контроля параметров импульса лазерного излучения и размера (площади) облучаемого пятна. С целью получения сопоставимых данных о порогах разрушения, измеренных в конкретных условиях для данного материала, с результатами измерений, полученных в иных условиях для того же или других материалов, необходимо вместе со значениями порогов приводить указанные параметры.



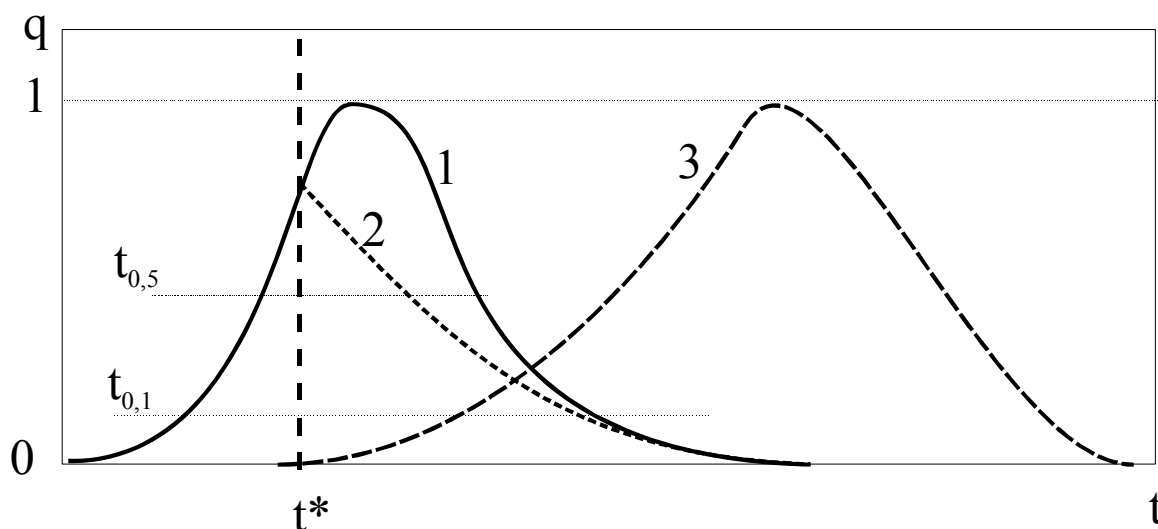


Рис. 1. Осциллограммы сигналов, регистрируемых при образовании разрушения. 1 – импульс лазерного излучения, 2 – импульс лазерного излучения, прошедшего через образец и плазму пробоя, 3 – импульс оптического излучения, сопровождающего образование разрушения.

Обычно приводят полную энергию лазерного импульса, измеряемую калориметром или другим калиброванным приемником,  $E$  (Дж), длительности импульса (Рис. 1) на уровне 0,1 его максимальной интенсивности  $t_0$  и на полувысоте  $t_{0,5}$ , а также площадь эквивалентного облучаемого пятна  $S$ .

$$S = 2\pi \int_0^{\infty} f(r) r dr$$

где  $f(r)$  - функция распределения облученности в пределах пятна воздействия по  $r$ , нормированная так, что  $f(0) = 1$ . Определение  $S$  представляет собой самостоятельную, довольно трудоемкую задачу. При гауссовом распределении интенсивности (энергии) в пучке интегрирование дает

$$S = 2\pi \int_0^{\infty} f(r) r dr = \sigma.$$

Воздействие импульса излучения на мишень обычно оценивают плотностью энергии  $Q = E/S$  и (или) интенсивностью  $q = Q/t_{0,5}$ . Для порогового импульса соответственно приводят  $Q^*$  и  $q^*$ .

При выполнении специальных исследований, например, направленных на выяснении механизма разрушения, результат воздействия характеризуют также значениями момента начала разрушения  $t^*$  (Рис. 1) и энерговклада  $E(t^*)$  к моменту  $t^*$ , а также  $Q(t^*)$  и  $q(t^*)$ .

Для определения  $t^*$  используют осциллограммы сигналов с приемников, регистрирующих соответственно интенсивность лазерного излучения, прошедшего через образец и зону воздействия (начало обрезания прошедшего импульса), и интенсивность оптического излучения, сопровождающего процесс разрушения.

Обычно при измерениях порога разрушения образец облучается от нескольких раз до нескольких десятков раз, причем каждое облучение проводится в новом месте образца.

Существует несколько способов измерения порога. Ниже описаны некоторые из них.

### ***Способы измерения порога***

1. Суть широко используемого способа определения порога состоит в том, что образец последовательно облучают серией из 20-30 импульсов с нарастающей интенсивностью в области значений  $q_{\min} < q < q_{\max}$ , где  $q_{\min}$  - интенсивность, при которой разрушение заведомо не наблюдается, а  $q_{\max}$  - интенсивность, при которой разрушение наблюдается наверняка. Границы этой области грубо определяются в результате первых нескольких облучений с различными значениями  $q$ .

Для каждого воздействия с интенсивностью  $q_k$  фиксируется его результат – наличие или отсутствие разрушения. Воздействие на образец импульса с одной и той же интенсивностью  $q_k$  в разных зонах образца может приводить к неоднозначным результатам с точки зрения образования разрушений. Поэтому повторные воздействия с одним и тем же значением  $q_k$  не являются бесполезными. Анализируя полученные данные определяют  $q_{\min(+)}$  - минимальное значение интенсивности в пределах серии облучений, при котором разрушение наблюдалось и  $q_{\max(-)}$  - максимальное значение интенсивности, при котором разрушение отсутствовало. За порог разрушения принимают

$$Q^* = (1/2)[q_{\max(-)} + q_{\min(+)}] \pm (1/2)|q_{\max(-)} - q_{\min(+)}|$$

Следует иметь в виду, что второе слагаемое не является погрешностью измерений, а характеризует разброс порога, обусловленный статистической природой разрушения.

2. Образец подвергают воздействию нескольких серий облучения с одной и той же интенсивностью в каждой серии, увеличивая интенсивность в области значений  $q_{\min} < q < q_{\max}$  от значения  $q_{\min}$ , при котором разрушение заведомо отсутствует, до  $q_{\max}$ , при котором оно наверняка наблюдается при каждом воздействии. Область значений  $q$  от  $q_{\min}$  до  $q_{\max}$  разбивают на равные интервалы, так что, например,  $q_k$  и  $q_{k+1}$  соответствуют границам одного из интервалов, а их число  $\geq 10$ . Для каждого значения  $q_k$  проводят  $n \geq 10$  облучений, фиксируя для каждого

облучения наличие или отсутствие разрушения. Если в рамках серии разрушение наблюдалось  $m_k$  раз, то величиной  $p_k = m_k/n_k$  оценивают вероятность разрушения при интенсивности  $q_k$ . По результатам измерений строят кривую  $p = f(q)$ , которая демонстрирует зависимость вероятности разрушения от интенсивности излучения. При этом величина порога пробоя, отвечающая вероятности появления разрушения, равной 0,5, хорошо согласуется с величиной порога разрушения, измеряемой первым способом. Величина же интенсивности излучения, соответствующая  $p \sim 0$ , позволяет определить величину  $q_m$ , характеризующую свойства основного типа ПН исследуемого образца и отличающуюся тем, что при  $q \leq q_m$  пробой не наблюдается. Если же он развивается, то обусловлен нагревом ПН другого типа с более низким значением порога.

3. Для определения порога разрушения образец облучают импульсами излучения с интенсивностями  $q > q^*$ , определяя по осциллограмме  $q(t)$  величину  $q^* = q(t^*)$ . На второй канал используемого в измерениях двухлучевого осциллографа подается один из сигналов 2-3 (Рис. 1), позволяющих фиксировать момент начала разрушения  $t^*$ . Для этой цели используются вспомогательные приемники оптического излучения, регистрирующие начало обрезания лазерного импульса в зоне разрушения или появление яркой вспышки свечения плазмы, сопровождающей процесс разрушения.

4. В основу этого способа положена зависимость от интенсивности излучения числа микроразрушений, образующихся при нагреве поглощающих неоднородностей (ПН) и формирующихся в той части облучаемой области, в пределах которой  $q > q_m$ , где  $q_m$  - порог образования микроразрушения. Образец облучают двумя сериями импульсов лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности  $f(r) = \exp(-r^2/\sigma^2)$  и одинаковыми в каждой серии интенсивностями  $q_{01} > q_m$  и  $q_{02} > q_m$ . После каждого облучения с помощью микроскопа подсчитывают число микроразрушений  $N_k$  и для каждой серии находят среднее число микроразрушений  $\langle N_1 \rangle$  и  $\langle N_2 \rangle$ , образовавшихся в образце в пределах каустики линзы. Границы области, в пределах которой проводят подсчет, определяют следующим образом. Длину области  $l$  выбирают исходя из требования неизменности интенсивности излучения на оси пучка  $q_0$ . При использовании линз с  $F \gg l$  это условие легко выполняется. Радиус  $r^*$  области, соответствующий условию  $q \geq q_m$ , находят из условия  $q_m = q_0 \exp[-(r^*)^2/\sigma^2]$ . Тогда объем области (в виде цилиндра) составляет  $V = \pi l (r^*)^2$ , а число микроразрушений в ней после одного из облучений  $N = \pi l (r^*)^2 C$ , где  $C$  - концентрация ПН в испытуемом образце, а  $(r^*) = \sigma \ln(q_0/q_m)$ . После проведения облучений и подсчетов  $\langle N_1 \rangle$  и  $\langle N_2 \rangle$

находят  $\ln q_m = (\langle N_2 \rangle \ln q_{01} - \langle N_1 \rangle \ln q_{02}) / (\langle N_2 \rangle - \langle N_1 \rangle)$ . Кроме того определяют концентрацию ПН -  $C = (\langle N_2 \rangle - \langle N_1 \rangle) / \pi \sigma^2 l (\ln q_{02} - \ln q_{01})$ .

Следует иметь в виду, что первые два способа могут быть использованы для определения порогов как собственного, так и несобственного пробоя. Третий способ предпочтительнее использовать для сред, не содержащих ПН, а последний – лишь для сред, содержащих ПН, однородно распределенные по объему и обладающие одним и тем же порогом  $q_m$  образования микроразрушения.

### Описание лабораторной установки

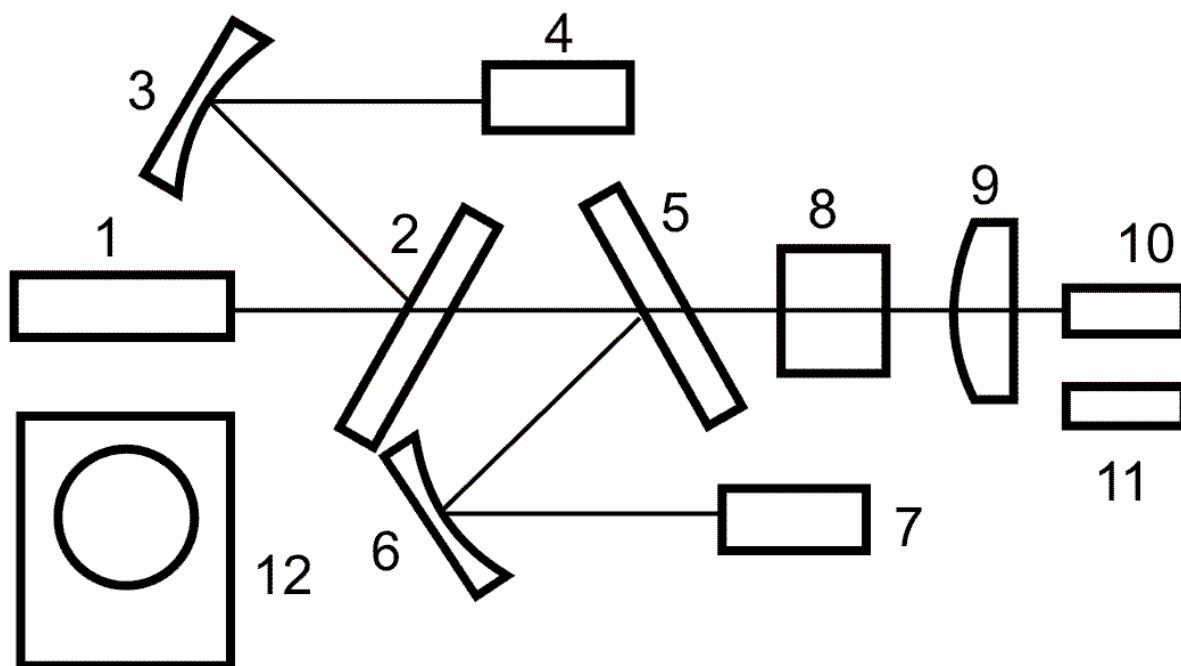


Рис. 2. Схема лабораторной установки.

Лабораторная установка, оптическая схема которой представлена на рис. 2, включает следующие приборы и элементы оборудования: 1 – ТЕА CO<sub>2</sub> - импульсный лазер, работающий на длине волны 10,6 мкм, 2,5 – отводящие пластины из фтористого бария, 3,6 – зеркала, 4 – германиевый малоинерционный приемник на увлечении носителей заряда, 7- пирозлектрический приемник, работающий в режиме интегрирования лазерного импульса, 8 – набор ослабляющих фильтров, 9 – линза из фтористого бария, фокусирующая лазерное излучение в образец, 10 – образец из NaCl или KCl; в случае измерения порога пробоя газа – лабораторный воздух, 11 – калориметр ИМО – 2, 12 – двухлучевой осциллограф с памятью С 8-14.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством  $\text{CO}_2$  - лазера. С помощью преподавателя приготовить газовую смесь ( $\text{CO}_2$ :  $\text{N}_2$ :  $\text{He} = 2:1:7$ ), необходимую для его работы, в специальном резервуаре, заполняемом из баллонов с указанными газами.
2. Включить осциллограф и калориметр для прогрева.
3. Собрать установку по схеме, представленной на рис. 2 и провести предварительную юстировку с помощью  $\text{He} - \text{Ne}$  лазера.
4. Открыть вентиль резервуара со смесью, обеспечив ее поступление в газоразрядную камеру  $\text{CO}_2$  лазера. Включить питание лазера и проверить наличие генерации.
5. Проверить правильность ранее выполненной юстировки. Для этой цели, используя бумагу, зачерченную мягким карандашом и светящуюся под действием интенсивного излучения, убедиться, что лазерное излучение попадает на приемники и образец согласно схеме и предварительной юстировке.
6. Подать сигналы с приемников 4 и 7 на осциллограф. Производя запуски лазера, выбрать скорость развертки и чувствительность каналов для удобной регистрации сигналов.

Форма импульса излучения используемого  $\text{CO}_2$  лазера показана на рис. 3. В первом пике импульса длительностью 100 нс заключено  $\sim 0,5$  полной энергии импульса генерации длительностью 2 мкс.

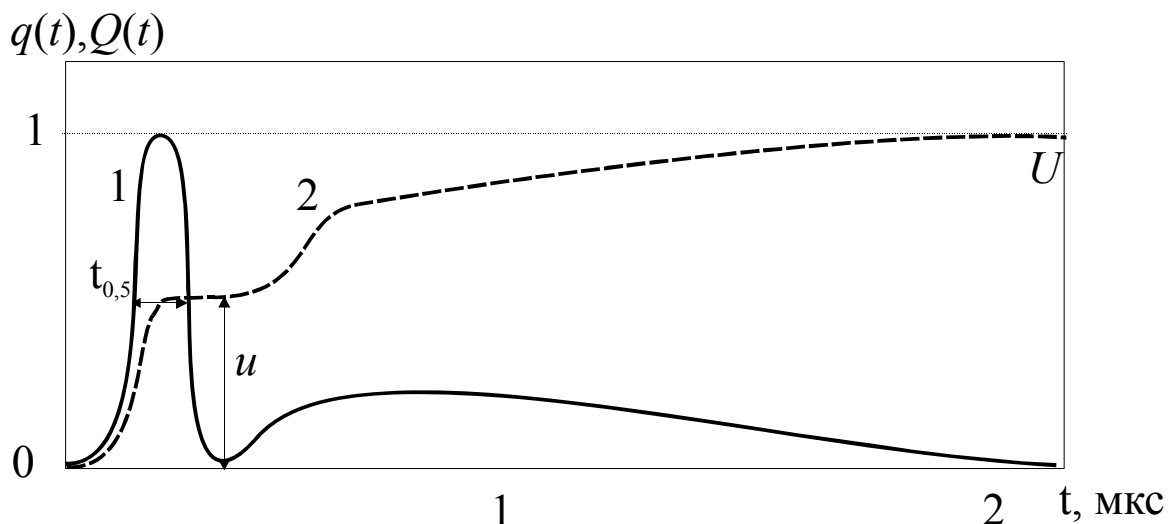


Рис. 3. Сигналы, регистрируемые осциллографом при проведении измерений. 1 – лазерный импульс  $q(t)$ , регистрируемый малоинерционным приемником, 2 – интеграл лазерного импульса  $Q(t)$ , регистрируемый пироэлектрическим приемником (7) – Рис.2.

Инициирование разрушения, как правило, имеет место под действием первого (главного пичка). В связи с этим необходимо измерить энергию  $E_0$ , заключенную именно в этом главном пичке. Поскольку калориметр измеряет полную энергию импульса  $E$  и ей соответствует отсчет с экрана осциллографа –  $U$ , а энергии в первом пичке соответствует отсчет –  $u$ , то из рис. 3 следует, что  $E_0 = (u/U)E = uA$ . Здесь  $A = E/U$  - калибровочный коэффициент, необходимый для проведения измерений порога.

7. Провести калибровку приемника 7. Для этой цели калориметр 11 устанавливается в положение, занимаемое образцом 10 так, чтобы излучение лазера фокусировалось линзой 9 в центр защитной крышки измерителя. Для предотвращения порчи прибора, излучение, направляемое в калориметр, ослабляется фильтрами 8. Сняв крышку и проводя запуски лазера, измерить калориметром энергию  $E \times T$  (где  $T$  – пропускание фильтра 8), а на экране осциллографа измерить  $U$  в делениях шкалы. Тогда, зная пропускание фильтра  $T$ , определить величину калибровочного коэффициента  $A = E/U$ . Провести измерение  $E$  и  $U$  5-10 раз, занося результаты в таблицу 1 для вычисления  $\langle A \rangle$ ,  $S$ ,  $S(\langle A \rangle)$ .  $\langle A \rangle = (1/n)\Sigma A_k$ ;  $S = \sqrt{[1/(n-1)] \cdot \Sigma (A_k - \langle A \rangle)^2}$ ;  $S(\langle A \rangle) = S/\sqrt{n}$ .

Таблица 1.

№	$E_k \times T$ , Дж	$E_k$ , Дж	$U_k$ , дел. шкалы	$A_k = E_k/U_k$ , Дж/дел.
1.				
2.				
3.				

8. Убрать со скамьи калориметр и установить на двухкоординатном столике образец таким образом, чтобы фокус линзы располагался в соответствие с поставленной задачей в объеме исследуемого образца. Используя первый из описанных способов измерения порога разрушения, провести облучения образца 20-30 раз, каждый раз смещая его в новое положение и меняя набор фильтров 8.

После каждого облучения в таблицу 2 заносятся пропускания всех использовавшихся фильтров  $T_i$ , их произведение  $\prod T_i = T_k$ ,  $u_k$  и результат облучения: (+) - наличие пробоя, или (-) - отсутствие пробоя.

9. Для каждого воздействия последовательно вычислить:  $E_{0k} = \langle A \rangle u_k$ ,  $E_k = T_k \cdot E_{0k} = \langle A \rangle u_k T_k$ , и  $q_k = \langle A \rangle u_k T_k / st_{0,5} = E_k / st_{0,5}$ . При расчете  $q_k$  использовать  $t_{0,5} = 100$  нс и  $S = 5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>.

10. Провести анализ результатов последних колонок таблицы 2. Порог исследованного образца равен  $q^* = 0,5[q_{\min(+)} + q_{\max(-)}] \pm 0,5|q_{\min(+)} - q_{\max(-)}|$ , где  $q_{\min(+)}$  - минимальное значение из рассчитанных значений  $q_k$ , при котором наблюдалось разрушение, а  $q_{\max(-)}$  - максимальное значение из рассчитанных  $q_k$ , при котором разрушение не наблюдалось.

Таблица 2.

№	$T_{ik}$	$T_k$	$u_k$ дел. шкалы	$E_{ок}$ Дж	$E_k$ Дж	$q_k$ , МВт/см <sup>2</sup>	Результат +/-

### **Содержание отчета**

1. Теоретическая часть (краткие сведения об оптическом пробое).
2. Схема лабораторной установки и ее описание.
3. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
4. Расчет погрешности измерений (обработка результатов Таблицы 1).
5. Выводы по работе (результаты измерений и вычислений).

### **Вопросы для подготовки**

1. Что такое оптический пробой?
2. Чем отличаются собственный и несобственный оптический пробой?
3. Порог оптического пробоя (физический и технический)?
4. Способы измерения величины оптического пробоя?
5. Как проводится калибровка приемника? Пояснить, как прокалибровать второй из приемников, регистрирующей форму импульса лазерного излучения.

### **Литература**

1. Имас Я.А. Оптический пробой прозрачных диэлектриков. Обзор экспериментальных работ. Минск: Инст. тепло- и массообмена АН БССР, 1982. 60 с.
2. Бонч-Бруевич А.М., Диденко И.А., Капорский Л.Н. Низкопороговый оптический пробой газов вблизи поверхности. Обзор экспериментальных работ. Минск: Инст. тепло- и массообмена АН БССР, 1985. 60 с.
3. Маненков А.А., Прохоров А.М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел. // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 179-211.
4. Крутякова В.П., Смирнов В.Н. Оценка концентрации поглощающих неоднородностей и порогов оптического пробоя в объеме прозрачного диэлектрика. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 3. С. 534-537.

## Лабораторная работа №2

### **«СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОРОГОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ПРОЗРАЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»**

#### ***Цели работы***

- ознакомиться с причинами и особенностями разрушения поверхностей оптических элементов, изготовленных из прозрачных диэлектриков (щелочно-галогидные кристаллы NaCl и KCl), с основными причинами различия порогов разрушения прозрачного диэлектрика при фокусировке излучения в объем и на поверхность образца исследуемого материала;
- разобраться в причинах различия порогов разрушения передней (ближайшей к линзе, фокусирующей излучение на образец) и задней поверхностей исследуемого образца (например, плоско-параллельной пластины);
- ознакомиться с оптической схемой установки, методиками ее калибровки и измерения порогов пробоя первым способом из описанных в руководстве к лабораторной работе №1;
- выполнить измерения порогов разрушения передней и задней поверхностей пластины;
- сравнить величину полученного отношения порогов с его теоретическим значением.

#### ***Краткие теоретические сведения***

В разделе «Краткие теоретические сведения» руководства к лабораторной работе №1 изложены основные сведения из раздела силовой оптики, посвященного исследованиям разрушения конденсированных сред под действием импульсов лазерного излучения. С ними необходимо ознакомиться до начала выполнения настоящей работы. При этом основное внимание уделено разрушению прозрачного диэлектрика при фокусировке излучения в объем образца. Надежно установлено, что в подавляющем большинстве случаев лучевая прочность (порог разрушения) реальных сред ограничена развитием несобственного оптического пробоя, инициируемого нагревом поглощающих неоднородностей (ПН). Практически важно, что данных о значении лучевой прочности материалов, полученных при измерениях в объеме оптических элементов, абсолютно недостаточно для оценки их работоспособности. Дело в том, что лучевая прочность последних ограничена более низкими порогами



разрушения их поверхностей по сравнению с порогами пробоя в объеме используемых материалов.

Это связано с существенно более высокой концентрацией разнообразных дефектов, содержащихся в поверхностном слое по сравнению с их концентрацией в объеме материала. Не следует сбрасывать со счетов и возможность того, что сечения поглощения ПН, содержащихся в объеме материала, ниже, чем у ПН поверхностного слоя. К опасным ПН, ответственным за снижение порога пробоя в объеме материала, следует отнести ПН, обусловленные технологией выращивания кристаллов. ПН, определяющие величину порога пробоя поверхности, и тем самым лучевую прочность элемента, обусловлены технологией обработки поверхности, условиями хранения, оседанием пыли и др. Нагрев ПН, локализованных в поверхностном слое образца, лазерным излучением ведет к инициированию приповерхностной плазмы оптического пробоя в окружающем образце газе (например, в воздухе), нагреву поверхности УФ излучением плазмы и растрескиванию поверхностного слоя под действием температурных напряжений. Существенно, что порог инициирования плазмы у поверхности образца в газе значительно ниже (низкопороговый оптический пробой) порога пробоя газа вдали от облучаемой мишени (лазерная искра).

Установлено, что пороги разрушения поверхностей, например плоско-параллельной пластины различны, причем лучевая прочность поверхности зависит от того проходит ли лазерный луч, пересекая рассматриваемую поверхность, из менее плотной среды в более плотную или наоборот. Это связано с различием сложения полей падающей и отраженной волн, а именно, вблизи передней поверхности падающая и отраженная волны находятся в противофазе, а вблизи задней поверхности – в фазе. Это приводит к тому, что электрическое поле вблизи задней поверхности оказывается выше, чем у передней даже с учетом потерь при отражении от передней поверхности пластины. В результате при нормальном падении излучения на пластину отношение порогов разрушения передней и задней поверхностей оказывается равным  $4n^2/(n + 1)^2$ , где  $n$  – показатель преломления материала пластины.

Воздействие импульса излучения на мишень обычно оценивают плотностью энергии  $Q = E/S$  и (или) интенсивностью  $q = Q/t_{0,5}$ , где  $S$  – площадь облучаемого пятна  $t_{0,5}$  – полуширина лазерного импульса. Для порогового импульса соответственно приводят  $Q^*$  и  $q^*$ .

При выполнении специальных исследований, например, направленных на выяснение механизма разрушения, результат воздействия характеризуют также значениями момента начала разрушения  $t^*$  (Рис. 1, лаб. работа №1) и энерговыклада  $E(t^*)$  к моменту  $t^*$ , а также  $Q(t^*)$  и  $q(t^*)$ .

Для определения  $t^*$  используют осциллограммы сигналов (2) или (3) с приемников, регистрирующих, соответственно, интенсивность лазерного излучения, прошедшего через образец (2) и интенсивность оптического излучения, сопровождающего процесс разрушения (3).

Обычно при измерениях порога разрушения образец облучается от нескольких раз до нескольких десятков раз, причем каждое облучение проводится в новом месте образца.

Существует несколько способов измерения порога. Четыре из них описаны в руководстве к работе №1. В настоящей работе будет использоваться первый из них.

Для каждого воздействия с интенсивностью  $q_k$ , зависящей от энергии лазерного импульса и пропускания установленных фильтров, фиксируется его результат – наличие или отсутствие разрушения. Воздействие на образец импульса с одной и той же интенсивностью  $q_k$  в разных зонах образца может приводить к неоднозначным результатам, с точки зрения образования разрушений. Поэтому повторные воздействия с одним и тем же значением  $q_k$  не являются бесполезными. Анализируя полученные данные определяют  $q_{\min(+)}$  - минимальное значение интенсивности в пределах серии облучений, при котором разрушение наблюдалось и  $q_{\max(-)}$  - максимальное значение интенсивности, при котором разрушение отсутствовало. За порог разрушения принимают

$$q^* = (1/2)[q_{\max(-)} + q_{\min(+)}] \pm (1/2)|q_{\max(-)} - q_{\min(+)}|$$

Следует иметь в виду, что второе слагаемое не является погрешностью измерений, а характеризует разброс порога, обусловленный статистической природой разрушения.

### ***Описание лабораторной установки***

Лабораторная установка, оптическая схема которой представлена на рис.2 (См. лаб. работу №1) включает следующие приборы и элементы оборудования: 1 – CO<sub>2</sub> - импульсный лазер, работающий на длине волны 10,6 мкм, 2,5 – отводящие пластины из фтористого бария, 3,6 – зеркала, 4 – германиевый малоинерционный приемник на увлечении носителей заряда, 7- пироэлектрический приемник, работающий в режиме интегрирования лазерного импульса, 8 – набор ослабляющих фильтров, 9 – линза из фтористого бария, фокусирующая лазерное излучение в образец, 10 – образец из NaCl или KCl; в случае измерения порога пробоя газа – лабораторный воздух., 11 – калориметр ИМО – 2, 12 – двулучевой осциллограф с памятью С 8-14.

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством  $\text{CO}_2$  - лазера. С помощью преподавателя приготовить газовую смесь ( $\text{CO}_2$ :  $\text{N}_2$ :  $\text{He} = 2: 1: 7$ ), необходимую для его работы, в специальном резервуаре, заполняемом из баллонов с указанными газами.
2. Включить осциллограф и калориметр для прогрева.
3. Собрать установку по схеме, представленной на рис. 2 и провести предварительную юстировку с помощью  $\text{He} - \text{Ne}$  лазера.
4. Открыть вентиль резервуара со смесью, обеспечив ее поступление в газоразрядную камеру  $\text{CO}_2$  лазера. Включить питание лазера и проверить наличие генерации, проведя несколько пробных запусков.
5. Проверить правильность ранее выполненной юстировки. Для этой цели, используя бумагу, зачерненную мягким карандашом и светящуюся под действием интенсивного излучения, убедиться, что лазерное излучение попадает на приемники и образец согласно схеме и предварительной юстировке.
6. Подать сигналы с приемников 4 и 7 на осциллограф. Производя запуски лазера, выбрать скорость развертки и чувствительности каналов для удобной регистрации сигналов.

Форма импульса используемого  $\text{CO}_2$  лазера показана на рис. 3 (лаб. работа № 1). В первом пичке лазерного импульса (1) -  $q(t)$  длительностью 100 нс заключено 0,5 полной энергии импульса генерации длительностью 2 мкс. Осциллограмма (2) отражает ход во времени  $Q(t)$ .

Инициирование разрушения, как правило, имеет место под действием первого (главного пичка). В связи с этим необходимо измерить энергию  $E_0$ , заключенную именно в этом главном пичке. Поскольку калориметр измеряет полную энергию импульса  $E$ , из рис. 3 следует, что  $E_0 = (u/U)E = u A$ , где  $A = E/U$ .

7. Провести калибровку приемника 7. Для этой цели калориметр 11 устанавливается в положение, занимаемое образцом 10 так, чтобы излучение  $\text{CO}_2$  лазера фокусировалось линзой 9 в центр защитной крышки измерителя. Для предотвращения порчи прибора, излучение, направляемое в калориметр, ослабляется фильтрами 8. Сняв крышку и проводя запуски лазера, измерить калориметром энергию  $E \times T$  (где  $T$  – пропускание фильтра 8), а на экране осциллографа измерить  $U$  в делениях шкалы. Тогда, зная пропускание фильтра  $T$ , определить величину калибровочного коэффициента  $A = E/U$ . Провести измерение  $E$  и  $U$  5-10 раз, заносая результаты в таблицу 1 для вычисления среднего арифметического результатов серии измерений



### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть (краткие сведения о причинах более низких значений порога разрушения поверхности оптического элемента по сравнению с порогом разрушения в объеме; причины различия порогов разрушения передней и задней поверхности).
2. Схема лабораторной установки и ее описание.
3. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
4. Расчет погрешности измерений (обработка результатов Таблицы 1).
5. Выводы по работе (результаты измерений и вычислений).

### ***Вопросы для подготовки***

1. Чем определяется величина порога разрушения поверхности оптического элемента?
2. Причины различия порогов разрушения передней и задней поверхностей оптического элемента? Вывести соотношение, связывающее их пороги.
3. Как провести фокусировку лазерного излучения на заднюю поверхность исследуемой пластины?

### ***Литература***

5. Имас Я.А. Оптический пробой прозрачных диэлектриков. Обзор экспериментальных работ. Минск: Инст. тепло- и массообмена АН БССР, 1982. 60 с.
6. Бонч-Бруевич А.М., Диденко И.А., Капорский Л.Н. Низкопороговый оптический пробой газов вблизи поверхности. Обзор экспериментальных работ. Минск: Инст. тепло- и массообмена АН БССР, 1985. 60 с.
7. Маненков А.А., Прохоров А.М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел. // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 179-211.
8. Крутякова В.П., Смирнов В.Н. Оценка концентрации поглощающих неоднородностей и порогов оптического пробоя в объеме прозрачного диэлектрика. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 3. С. 534-537.

### Лабораторная работа №3

## «ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК»

### *Цель работы*

Изучение закономерностей изменения временных характеристик фуллеренсодержащих нематических жидкокристаллических систем при воздействии на мезофазу импульсного напряжения питания. Ознакомление с новейшими разработками фуллеренсодержащих сред и их оптическими и динамическими свойствами (на примере эффекта Фредерикса). Формирование навыков экспериментальной работы и расчетной оценки, а также оптимизации временных параметров структур, широко применяемых в дисплейной технике.

### *Краткие теоретические сведения*

Открытые в 30-х годах прошлого столетия, жидкие кристаллы в настоящее время интенсивно исследуются и применяются в силу своих уникальных фотоупругих, электрооптических и нелинейных оптических свойств. Рассматриваются способы их синтеза и тестирования, методы введения в различные фоточувствительные полимерные и наноструктурированные среды; расширяются области их использования. Эти вещества находят применение в лазерной физике, медицине, дисплейной технике.

Жидкие кристаллы (ЖК) – особое термодинамическое состояние вещества, промежуточное между кристаллическим твердым телом и аморфной жидкостью и характеризующееся определенным порядком в расположении молекул. В этом состоянии имеет место анизотропия механических, электрических, магнитных и оптических свойств. По классификации выделяют три типа жидких кристаллов – нематические, холестерические и смектические. ЖК, входящие в каждую из групп, различаются физическими свойствами. Это различие следует из их структуры.

У нематических ЖК (НЖК) под микроскопом можно обнаружить наличие микроструктуры в виде нитей (“нема” – по-гречески “нить”), концы которых либо свободны, либо связаны стенками емкости, в которой находится изучаемое вещество. Основные черты нематической мезофазы графически представлены на рис. 1. Нематики проявляют следующие особенности.

1. Отсутствует дальний порядок в расположении центров тяжести

молекул, что проявляется в полной свободе перемещений центров тяжести отдельных молекул в пространстве.

2. Существует дальний порядок в ориентации молекул, что отражается на всех макроскопических тензорных свойствах. Молекулы НЖК имеют тенденцию устанавливаться параллельно некоторой общей оси. Направление их преимущественной ориентации принято характеризовать единичным вектором  $\vec{n}$ . Этот вектор называется директором. Во всех известных случаях имеется полная симметрия вращения молекул относительно оси  $\vec{n}$ .

3. Направление вектора  $\vec{n}$  в пространстве произвольно; на практике оно определяется слабыми силами (например, ориентирующим влиянием стенок сосуда). Эта ситуация характерна для систем с нарушенной симметрией вращения.

4. Состояния директоров  $\vec{n}$  и  $(-\vec{n})$  неразличимы. Например, если отдельная молекула имеет постоянный дипольный момент\*, то число диполей, направленных “вверх”, равно числу диполей, направленных “вниз”.

5. Нематическая фаза встречается только среди веществ, у которых правая и левая формы неразличимы. Каждая молекула, входящая в состав вещества, должна быть тождественна своему зеркальному изображению (ахиральность\*).

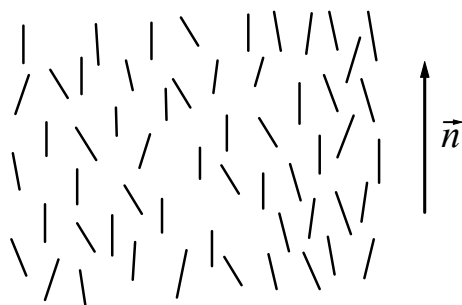


Рис. 1. Расположение молекул в нематической мезофазе

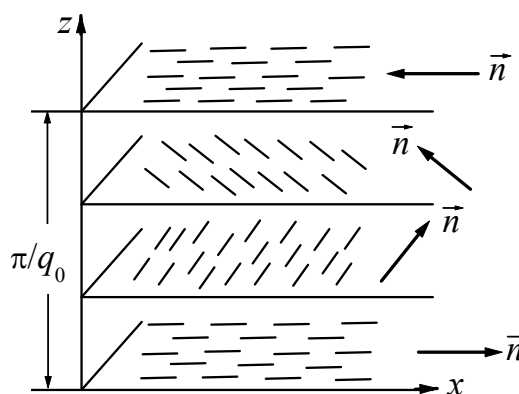


Рис. 2. Расположение молекул в холестерической мезофазе

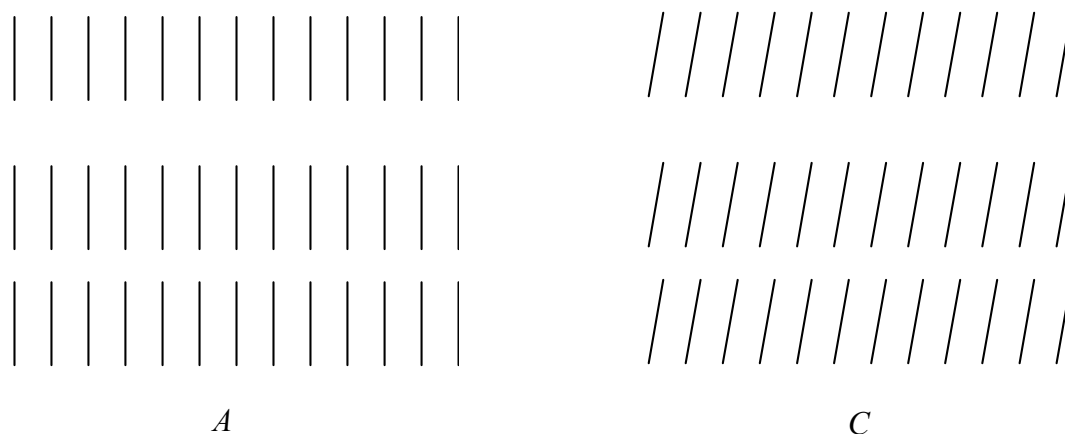
Холестерическая мезофаза отличается от НЖК тем, что она состоит из оптически активных молекул. Как следствие, структура имеет винтовую ось симметрии, расположенную нормально к направлению предпочтительной ориентации молекул (рис. 2).

Это обусловлено тем, что каждая молекула холестерика наряду с плоской конфигурацией имеет боковую метильную  $\text{CH}_3$ -группу,

расположенную над или под плоскостью. При такой конфигурации атомов в молекулах следует, что направление ориентации длинных осей молекул в каждом слое отклонено примерно на  $15'$  по сравнению с предыдущим слоем. Эти отклонения суммируются по всей толщине вещества, что и приводит к образованию спиральной молекулярной структуры.

Смектические ЖК (“смегма” – по-гречески “мыло”) по структуре более близки к твердой фазе, и в них наблюдается дополнительно к ориентационной упаковке слоистая упаковка. Характерным примером смектического ЖК является мыльный пузырь. В нем внешняя и внутренняя поверхности пузырьков, между которыми находится вода, представляют собой смектические слои. Взаимное притяжение молекул мыла в поверхностных слоях создает необходимое для устойчивости пузыря поверхностное сцепление.

Возможны различные типы упаковок молекул в слоях смектического ЖК, т. е. У смектиков проявляется полиморфизм. В смектике А (рис. 3, слева) длинные оси молекул ориентируются перпендикулярно смектическим слоям. Смектик А, так же, как и нематики, оптически одноосен, и  $\vec{n}$  совпадает с оптической осью. Оптическая индикатриса у смектика А подобна индикатрисе нематика. Наклонная смектическая называется смектической С-фазой (рис. 3, справа). Она обладает оптической двуосностью. Как правило, у большинства веществ с С-фазой наблюдается переход в А-фазу, хотя обратное преобразование редко реализуется.



*Рис. 3. Расположение молекул в смектиках А и С*

Смектики работают в микросекундном временном диапазоне, нематики – в миллисекундном. Однако, в силу того, что существуют определенные трудности в процессах ориентации смектиков, а также, учитывая их дороговизну, в ряде практических применений, например, в дисплейной технике, используются именно нематики. Таким образом,



встает задача оптимизации временных параметров нематиков для обеспечения работы с ними, по крайней мере, на частоте телевизионного стандарта, 25 Гц.

В настоящее время используют новые физические принципы, связанные с введением фоточувствительных комплексов с фуллеренами\*, позволяющих существенно сократить времена переключения нематиков из состояния с максимальным двулучепреломлением\* (когда свет через систему не проходит) в состояние с минимальным значением двулучепреломления (наблюдается прохождение света, например, лазерного луча через ЖК). В этом случае наблюдаются процессы нового структурирования мезофазы с установлением другого параметра порядка\* и изменением локальной поляризуемости и макрополяризации среды.

Стоит отметить, что оптическая анизотропия\* (например, двулучепреломление  $\Delta n$ ) ЖК довольно велика. Ее значение может достигнуть 0.5, что существенно выше, чем таковое для твердых кристаллов. Для сравнения, самым большим двулучепреломлением среди твердых веществ обладают кристаллы нитрата натрия; значение двулучепреломления составляет 0.25. В настоящей работе используются ЖК смеси с  $\Delta n=0.22$ , а для осуществления переключения из закрытого в открытое состояние к ЖК прикладывается напряжение питания в форме прямоугольных импульсов.

### ***Словарь используемых терминов***

*Ахиральность* – Свойство системы быть тождественной своему зеркальному отражению, или, если это не так, то система должна быть рацемической (1:1) смесью правой и левой форм вещества.

*Хиральность* – понятие в стереохимии, характеризующее свойство объекта быть несовместимым со своим изображением в идеальном плоском зеркале.

[Источники:

П. Де Жен, Физика жидких кристаллов, пер. с англ., под ред. проф. А.С. Сонина, М.: Мир. 1977, 400 с.

Советский энциклопедический словарь /Под ред. А. М. Прохорова. 2-е изд. М.: Сов. энцикл. 1983, 1600 с. (С. 1445)].

*Двулучепреломление ЖК максимальное.* Среди последних разработок ЖК-структур можно выделить системы с большой величиной двулучепреломления,  $\Delta n > 0.4$ . Указанное значение оптической анизотропии достигнуто в ЖК с полярными NCS-группами. Эти системы характеризуются высокими значениями температуры плавления, увеличенной вязкостью, но, к сожалению, пониженной фотостабильностью.

[Источник: Gauza S., Wu J., Wu S.-T., “Molecular engineering of high birefringence liquid crystals”//Book for Abstracts of XV Conference on Liquid Crystals, с.25; 13-17 October 2003, Zakopane, Poland, 203 с.].

*Оптическая анизотропия* – различие оптических свойств среды в зависимости от направления распространения в ней оптического излучения (света) и его поляризации. Оптическая анизотропия проявляется в двойном лучепреломлении, дихроизме, изменении эллиптичности поляризации света и во вращении плоскости поляризации, происходящем в оптически активных веществах. Естественная оптическая анизотропия кристаллов обусловлена неодинаковостью по различным направлениям поля сил, связывающих атомы решетки. Естественная оптическая активность веществ, которые проявляют ее в любом агрегатном состоянии, связана с асимметрией строения отдельных молекул таких веществ и обусловленным ею различием во взаимодействии этих молекул с излучением различных поляризаций, а также с особенностью возбужденных состояний электронов и «ионных остовов» в оптически активных кристаллах. Наведенная (искусственная) оптическая анизотропия возникает в средах, от природы оптически изотропных под действием внешних полей, выделяющих в таких средах определенное направление. В качестве внешних полей могут выступать электрическое, магнитное, тепловое поля, механические напряжения, а также поле сил в потоке жидкости.).

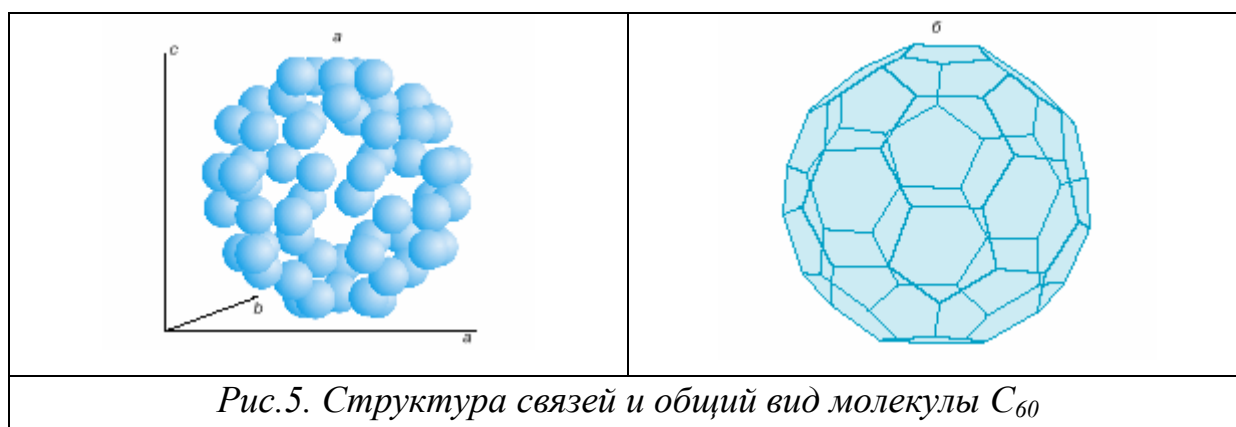
[Источник: Физический энциклопедический словарь под ред. А.М. Прохорова, М.: Советская энциклопедия. 1983, 928 с. (С.495)].

*Параметр порядка ЖК* – степень упорядоченности ЖК, которая характеризуется величиной отклонения направления длинных осей молекул от направления директора жидкого кристалла: 
$$S = \frac{3 \langle \cos^2 \theta \rangle - 1}{2},$$
 где  $\theta$  – угол между длинной осью молекулы и директором. В твердом кристалле  $S=1$ , в изотропной жидкости  $S=0$ , в жидкокристаллическом состоянии вещества параметр порядка  $0.3-0.4 < S < 1$ .

[Источник: Беляев В. В. Вязкость нематических жидких кристаллов. М.: Физматлит. 2002, 224 с.].

*Фуллерен*. В настоящее время понятие “фуллерены” применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода  $C_n$ , где  $n \geq 60$ , и к твердым телам на их основе. В молекулах  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{84}$  все атомы углерода находятся на сферической или на сфероидальной поверхностях. В этих молекулах атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников или пятиугольников, покрывающих поверхность сферы или сфероида. Центральное место среди фуллеренов занимает молекула

$C_{60}$ , которая характеризуется наиболее высокой симметрией и как следствие, наибольшей стабильностью. В этой молекуле, напоминающей покрывку футбольного мяча и имеющей структуру правильного усеченного икосаэдра, атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников, так что каждый шестиугольник граничит с тремя шестиугольниками и тремя пятиугольниками, а каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками. Таким образом, каждый атом углерода в молекуле  $C_{60}$  находится в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника и принципиально неотличим от других атомов углерода. Действительно, в спектрах ядерного магнитного резонанса для чистого образца  $C_{60}$  регистрируется единственный пик. В молекуле  $C_{60}$  атомы углерода связаны между собой ковалентной связью, причем длины связей  $C-C$  и  $C=C$  составляют  $\sim 0.139$  и  $0.144$  нм соответственно. Радиус молекулы  $C_{60}$ , установленный на основе данных рентгеноструктурного анализа, составляет  $\sim 0.357$  нм. Между молекулами фуллерена в кристалле существует слабая ван-дер-ваальсовская связь, обусловленная тем, что в электрически нейтральной молекуле отрицательный заряд электронов и положительный заряд ядра разнесены в пространстве. В результате молекулы могут поляризовать друг друга, т. е. приводить к смещению в пространстве центров положительного и отрицательного зарядов, что приводит к их взаимодействию. Поскольку молекула  $C_{60}$  содержит фрагменты с пятикратной симметрией (пентагоны), которые запрещены для неорганических молекул, молекула фуллерена является органической молекулой, а сам фуллерен представляет собой молекулярный кристалл, являющийся связующим звеном между органической и неорганической материей.



В отличие от молекул  $C_{60}$ , спектр ядерного магнитного резонанса молекул  $C_{70}$  состоит из пяти пиков. Данный факт хорошо согласуется с представлением о структуре  $C_{70}$ , которая отличается от  $C_{60}$  введением в

последнюю 10-ти атомов углерода в экваториальную область сферы с последующим ее растяжением. Молекула  $C_{70}$  по форме представляет мяч для регби.

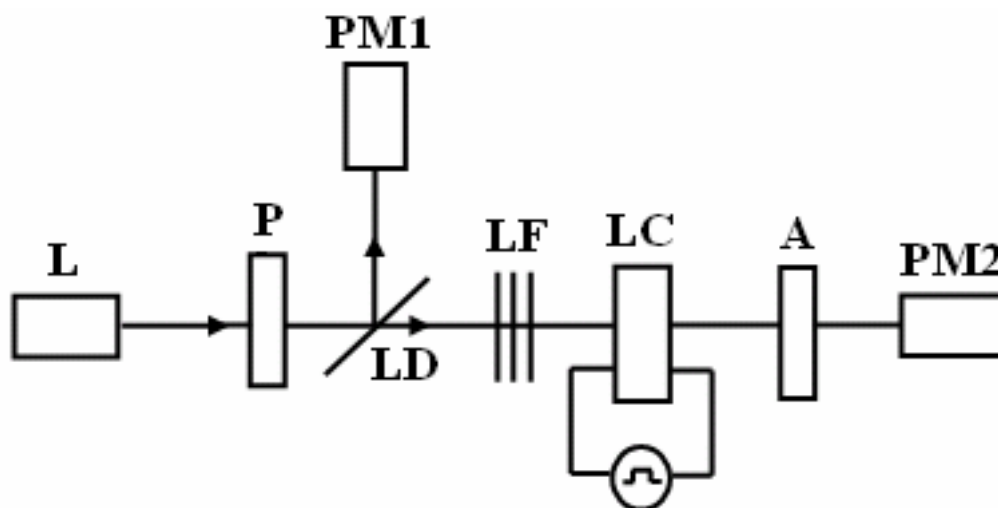
Фуллерены обладают уникальной способностью изменять свои свойства при легировании – от диэлектрических до сверхпроводящих, от диамагнитных до ферромагнитных. При этом важна чистота исходного материала, а следовательно, не последнюю роль играет способ получения кластеров. Данные молекулы существенно влияют на термические свойства материалов: считается, что фуллерены легко заполняют свободное пространство между молекулами, улучшая термические и прочностные параметры материала. Фуллерены способны выступать в качестве эффективных сенсibilизаторов органических систем, в том числе полимерных и жидкокристаллических. При этом изменяются свойства как самой органической матрицы, так и фуллеренов (например, может измениться его сродство к электрону). Считается, что фуллерены выступают либо в качестве основы полимерной цепи, либо являются соединительным элементом.

[Источники: Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Кластер  $C_{60}$  – новая форма углерода. // УФН. 1991. Т. 161. № 7. С. 173–192; Мастеров В. Ф. Физические свойства фуллеренов // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 1. С. 92–99; Каманина Н. В. Новые оптические материалы – фуллерены. Свойства и области применения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2002. 60 с.].

### ***Описание лабораторной установки***

На рис.4. приведена схема экспериментальной установки, используя которую можно определить временные параметры ЖК-структуры. Регистрируется изменение пропускания излучения He-Ne-лазера ( $\lambda = 633$  нм) через ячейку, помещенную между скрещенными поляризаторами. В эксперименте исследуются времена нарастания электрооптического отклика по первой осцилляции пропускания, четко фиксируется переход в соседнее экстремальное положение на S-кривой, что соответствовало изменению фазовой задержки на  $\pi$ . Изучается изменение электрооптического отклика структуры в зависимости от амплитуды импульса питания и частоты следования импульсов напряжения питания. К ячейкам прикладывается напряжение питания в форме прямоугольных импульсов с варьируемой амплитудой (A) 10-60 В, длительностью ( $\tau_{sup}$ ) от 5 до 100 мс и частотой следования ( $1/T$ ) от 0.5 до 100 Гц. Стоит сказать, что выбором импульсного напряжения питания удастся избежать существенного влияния поляризационных эффектов на временные параметры, что играет негативную роль при постоянном

напряжении питания, а также может вызывать диссоциацию молекул жидкого кристалла, ведущую к неуправляемой модуляции жидкокристаллического директора. Времена переключения ЖК устройства определяются следующим образом. Время включения определяется как время нарастания электрооптического отклика структуры от уровня 0.1 до уровня 0.9 его максимального значения. Время выключения соответствует времени затухания отклика от максимума до уровня 0.1.



*Рис.4. Экспериментальная схема для исследования временных характеристик жидкокристаллических ячеек:*

*L – He-Ne лазер; P – поляризатор; LD – делитель пучка; LF – светофильтры; LC – ЖК-ячейка; A – анализатор; PM1 и PM2 – фотодиоды.*

#### **Порядок выполнения работы**

1. Включить сеть, включить блок питания лазера, генератор импульсов питания, блок питания фотодиодов, осциллограф.
2. Настроить анализатор таким образом, чтобы в начале работы на фотодиод не проходил световой сигнал.
3. Установить ЖК-ячейку под углом 45 градусов по отношению к плоскости поляризации лазерного излучения.
4. Подвести питание к ЖК-ячейке. Для этого генератор импульсов перевести из режима «внутренний» в режим «внешний».
5. Настроить осциллограф, получить электрооптический отклик ЖК-ячейки на экране осциллографа.
6. Провести измерение переднего и заднего фронта электрооптического отклика, как сказано выше (см. параграф «Описание лабораторной установки»).

7. Провести варьирование амплитудой импульса питания, провести варьирование частотой следования импульсов питания, повторить измерения времен включения и выключения электрооптического отклика.
8. Построить зависимости  $\tau = f(A)$ ;  $\tau = f(1/T)$ .
9. Определить среднеквадратичную погрешность.

### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть (краткие сведения)
2. Схема лабораторной установки и ее описание
3. Таблицы с результатами измерений и вычислений

Номер измерения	Варьируемый параметр (амплитуда импульса питания или частота его следования)	Время включения	Время выключения	Примечание

4. Построение графиков полученных экспериментальных зависимостей
5. Расчет погрешности измерений
6. Выводы по работе

### ***Вопросы для подготовки***

1. Что такое ЖК-мезофаза вещества?
2. , Какие типы ЖК Вы знаете?
3. Где используются ЖК-структуры?
4. В каком временном диапазоне осуществляется переключение нематических и смектических ЖК из состояния с максимальным двулучепреломлением в состояние с минимальным двулучепреломлением?
5. Как измеряются временные параметры ЖК-ячейки?

### *Литература*

1. Адамчик А., Стругальский З. Жидкие кристаллы. М.: Сов. радио, 1979. 160 с.
2. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
3. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО Наука, 1994. 214 с.
4. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.
5. Каманина Н. В. Новые оптические материалы – фуллерены. Свойства и области применения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 60 с.
6. Каманина Н. В. Жидкие кристаллы – перспективные материалы оптоэлектроники. Свойства и области применения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2004. 84 с.
7. Пространственные модуляторы света /А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
8. Сонин А. С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983. 320 с.
9. Kamanina N.V., Zubtsova Yu.A., Shulev V.A., Mikhaïlova M.M., Murashov S.V., Denisyuk A.I., Butyanov S.V. and Yu I. Sapurina Self-organization and dynamic characteristics study of nanostructured liquid crystal compounds //Solid State Phenomena. 2005. Vol. 106. P. 145-148.
10. Каманина Н.В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 4. С. 445-454.
11. Беляев В., Иванов В. Лучшее со всех точек зрения //Электронные компоненты. 2004. №10. С. 31-33.

## Лабораторная работа №4

### «БЛИЖНЕПОЛЬНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ РАСТРОВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП»

#### *Цель работы*

Практическое ознакомление с принципиальной схемой, устройством и особенностями работы ближнепольного туннельного растрового оптического микроскопа.

#### *Объект исследования*

Ближнепольный туннельный растровый оптический микроскоп (ТРОМ) в составе: компьютер, блок электронного управления, плата сопряжения, лазерный осветитель, программное обеспечение.

#### *Задачи, решаемые в работе*

1. Изучение принципиальной схемы ТРОМ.
2. Изучение устройства оптико-механических узлов микроскопа.
3. Ознакомление с программным обеспечением.
4. Ознакомление с методами исследования образцов, регистрации и обработки изображения.

#### *Краткие теоретические сведения*

Ближнепольная микроскопия - направление оптической микроскопии, которое позволяет получать изображения с пространственным разрешением, не ограниченным дифракционным пределом. Сверхвысокое разрешение (в 10 – 100 раз выше дифракционного предела разрешения  $\lambda/2$ ) достигается путем регистрации распределения интенсивности света непосредственно у поверхности образца (на расстоянии 0,1 – 0,01 мкм от поверхности) с помощью светопроводящего острия-зонда с радиусом закругления при вершине равном 0,1- 0,01 мкм. Для этого наноразмерный оптический зонд (приемник или источник света) сканирует поверхность по строке и кадру и в каждой точке растра измеряет интенсивность светового поля. По этому массиву данных компьютер формирует изображение, пространственное разрешение которого определяется радиусом закругления зонда и его расстоянием от образца, но не зависит от длины волны используемого излучения. [1].

ТРОМ [2] является одной из разновидностей ближнепольного микроскопа. Принцип работы ТРОМ основан на регистрации распределения интенсивности света в эванесцентном (затухающем по экспоненциальному закону) поле, возникающем у поверхности прозрачного образца при освещении её в условиях полного внутреннего отражения [3,4]. Эванесцентное поле содержит информацию о



наноструктурах на поверхности образца, так как оно модулируется микрорельефом поверхности и локальными изменениями показателя преломления приповерхностного слоя.

### ***Формирование эванесцентного поля при полном внутреннем отражении***

При падении электромагнитной волны на границу раздела двух сред ( $n_1 > n_2$ ) под углом большим, чем угол полного внутреннего отражения в оптически менее плотной среде, возникает волна, распространяющаяся вдоль границы раздела с амплитудой, быстро убывающей в направлении перпендикулярном этой границе:

$$E(x, z, t) = E_0 \exp(-z/d) \exp[-i(\omega t - kx)]$$

Значения амплитуды  $E_0$  затухающей (эванесцентной) волны на границе раздела двух сред и коэффициента затухания эванесцентного поля ( $d$ ) определяются выражениями [2]:

$$|E_0|^2 = \frac{2n_1^2 \cos^2 \theta}{n_1^2 - n_2^2} |E_i|^2; \quad d = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{(n_1 \sin \theta)^2 - n_2^2}}$$

где  $E_i$ ,  $\theta$ ,  $\lambda_0$  - амплитуда падающей волны, угол падения и длина волны излучения в вакууме, соответственно;  $n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления оптически плотной и оптически менее плотной среды, соответственно.

### ***Описание принципиальной схемы и составных элементов ТРОМ***

На рис.1 показана принципиальная схема ТРОМ, созданного в лаборатории микроскопии сверхвысокого разрешения ГНЦ РФ "ГОИ им. С.И. Вавилова". В качестве источника света используется твердотельный или гелий-неоновый лазер ЛГ-37А. Узел осветителя микроскопа состоит из лазера 1, поляризатора 2 и зеркала 3. Лазерный луч проходит через поляризационный регулятор интенсивности 2 и направляется на призму 7 зеркалом 3 с наружным покрытием. Осветитель установлен на столике, который позволяет перемещать его в трех взаимно-перпендикулярных направлениях на 10 мм и изменять угол падения лазерного луча на гипотенузную грань призмы в пределах от  $30^\circ$  до  $50^\circ$  с точностью  $0,5^\circ$ . Отраженный от подошвы призмы луч выводится за пределы микроскопа.

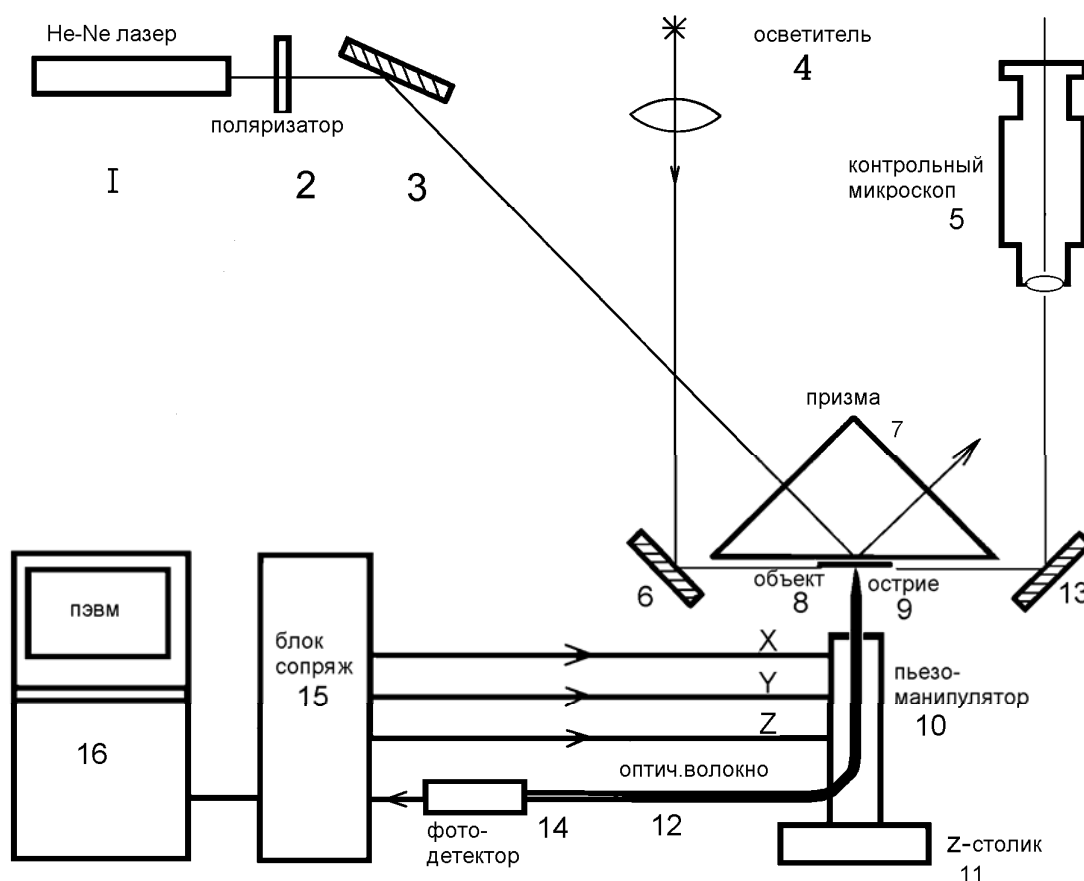


Рис. 1. Схема ближнепольного туннельного растрового оптического микроскопа:

1 – He-Ne лазер, 2 – поляризационный регулятор интенсивности, 3, 6, 13 – зеркала, 4 – вспомогательный осветитель, 5 – контрольный микроскоп, 7 – призма, 8 – объект, 9 – стекловолоконное острие, 10 – пьезоманипулятор, 11 – столик Z-подачи, 12 – оптическое волокно, 14 – фотоприемник, 15 – блок сопряжения, 16 – ПЭВМ.

Исследуемый образец 8 устанавливается на гипотенузной грани призмы 7 на оптическом контакте, или осуществляется режим полного внутреннего отражения в самом образце с помощью входной и выходной призм, устанавливаемых на его поверхности. Эванесцентное поле у поверхности образца преобразуется в распространяющееся излучение с помощью острия 9, сформированного на конце волоконного световода 12. Использование острий с малым радиусом закругления позволяет избежать существенного влияния материала острия на распределение эванесцентного поля. Для приближения острия к образцу и его сканирования в микроскопе используется трехкоординатный пьезоманипулятор 10 и прецизионный механический столик 11. Механический столик предназначен для грубого приближения острия к

образцу и позволяет перемещать острие на 7 мм с шагом 0,06 мкм. Для контроля процесса грубого подвода острия к образцу используется вспомогательный микроскоп 5, осветитель 4, зеркала 6 и 13. Двухкоординатное сканирование острия вдоль поверхности образца осуществляется схемой электронного управления 15.

Выходящее из оптического волокна 12 излучение регистрируется фотоумножителем 14. С выхода ФЭУ сигнал поступает в блок управления 15 и используется для выработки напряжения обратной связи, которое поддерживает неизменным расстояние между образцом и вершиной острия в процессе сканирования, а также формирования изображения с помощью ПЭВМ 16. В микроскопе используются два сменных крестообразных пьезоманипулятора, обеспечивающих сканирование участка образца с максимальным размером 200 x 200 мкм и 15 x 15 мкм. Максимальная величина перемещения острия в перпендикулярном к поверхности направлении равна, соответственно, 10 мкм и 1 мкм. Блок электронного управления обеспечивает сканирование любого произвольного участка из максимальной площади сканирования с минимальными размерами 100 нм x 100 нм. Минимальный шаг перемещения острия равен 1 мкм при максимальном поле сканирования и 0,5 нм при минимальном.

Электронный блок ТРОМ позволяет осуществлять управление микроскопом и регистрировать топографический рельеф исследуемой поверхности в аналоговом режиме с записью на двухкоординатном самописце или подключать ПЭВМ через плату сопряжения. Управляющая программа микроскопа обеспечивает оперативное управление процессом измерения, математическую обработку и отображение полученных данных.

Программное обеспечение позволяет:

- проводить коррекцию нелинейности пьезоманипулятора,
- калибровку увеличения,
- запись изображения любого произвольного участка из максимальной площади сканирования,
- производить двадцатикратное зуммирование изображения,
- строить сетку сечений и изолиний,
- сохранять созданное изображение в графическом файле РСХ,
- строить двух- и трехмерные изображения поверхности образца,
- производить преобразование координатных осей,
- проводить предварительную обработку изображения и др.

Обычно ТРОМ работает в режиме фиксированного значения туннельного светового потока, воспринимаемого острием. В этом случае электронно-механическая обратная связь с помощью пьезоманипулятора поддерживает неизменным установленное оператором значение тока ФЭУ путем соответствующего изменения расстояния острие - образец, и, таким

образом, кончик оптического острия отслеживает рельеф оптически однородной поверхности образца.

Острия изготавливаются из одномодовых градиентных кварцевых волокон путем дифференциального химического травления или вытяжки разогретого до вязкотекучего состояния локального участка волокна. Форма и радиус закругления кончика острий контролируются в просвечивающем электронном микроскопе. На рис. 2 показано топографическое изображение участка фазовой решетки для контроля асферических поверхностей. Решетка изготовлена методом ионнолучевого травления поверхности стеклянной заготовки. Примерно одинаковая крутизна переднего и заднего фронтов канавок указывает на достаточную протяженность и малую конусность острия. Освещение решетки под углом больше критического осуществляется через ее тыльную поверхность с помощью миниатюрной призмы, установленной на оптическом контакте. Вывод отраженного луча осуществляется через аналогичную призму.

### ***Порядок выполнения работы***

Изготовить острие на конце волоконно-оптического световода в соответствии с указаниями руководителя работы. Оценить качество острия с помощью микроскопа при увеличении 100-500 крат.

Закрепить острие в держателе манипулятора (сканатора) ТРОМ.

Рукояткой вертикального перемещения острия установить кончик острия на 0,5 - 1 мм ниже плоскости столика образцов.

Направить на острие лазерный луч. Включить схему регистрации и убедиться в наличии сигнала на выходе ФЭУ.

Установить на предметный столик ТРОМ цилиндрическую, сферическую или прямоугольную призму полного внутреннего отражения с известным показателем преломления.

При помощи элементов юстировки осветителя направить на призму лазерный луч под углом больше критического и установить точку отражения лазерного луча над острием. Перекрытием лазерного луча убедиться в наличии фонового сигнала.

Рукоятками грубого и тонкого перемещения острия приблизить его к гипотенузной грани призмы на расстояние 1 - 10 мкм до появления и начала возрастания туннельного тока. Контролировать процесс приближения острия с помощью вспомогательного микроскопа при увеличении 10 -100 крат путем наблюдения прямого и зеркального изображений острия.

Включить сканирование по строке и убедиться в отсутствии дрейфа пьезоэлектрического сканатора. После прекращения дрейфа включить сканирование по строке и кадру.

### Содержание отчета

1. Описание принципиальной схемы микроскопа и отдельных узлов ТРОМ.
2. Описание последовательности действий при работе на микроскопе (установка волоконно-оптического световода, юстировка лазерного луча, включение микроскопа, регистрация и обработка изображения).
3. Ближнепольное изображение элементов структуры образца (например, рис. 2).

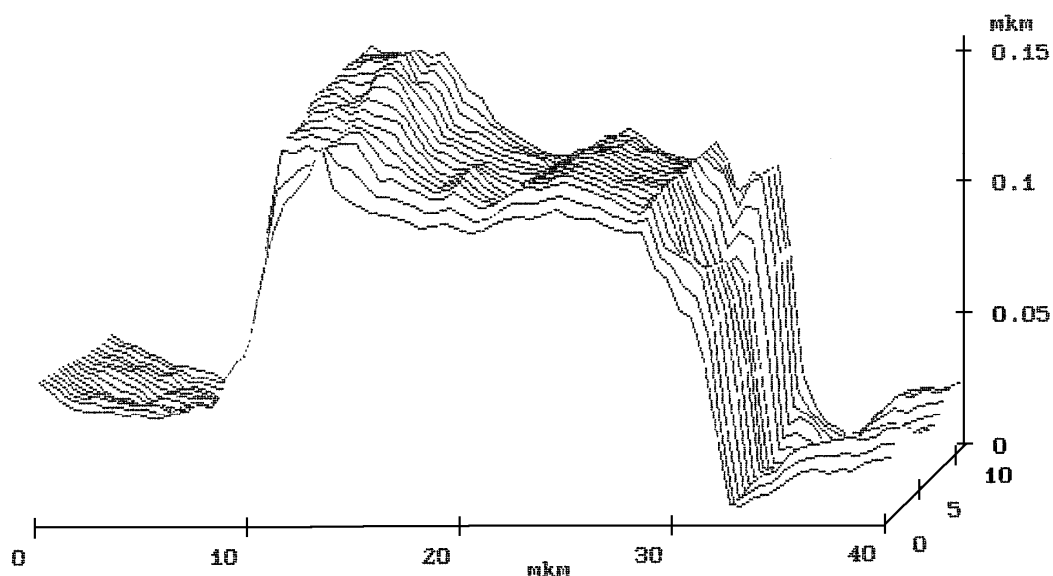


Рис. 2. Ближнепольное изображение участка фазовой решетки для контроля асферических поверхностей. Решетка была изготовлена методом ионного травления поверхности полированной стеклянной пластины толщиной 5 мм и представляет собой концентрические канавки глубиной 0,1 – 0,2 мкм с переменным шагом.

### Литература

1. Папаян Г.В., Воронин Ю.М., Щетнев Ю.Ф., Киченко Е.В. Ближнепольный туннельный растровый оптический микроскоп. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 12. С. 81-84.
2. Pohl D.W., Denk W. Optical stethoscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$  // Applied Physical Letters. 1984. Vol. 44. № 7. P. 651-653.
3. Reddick R.C., Warmack R.J., Ferrell T.L. New form of scanning optical microscopy // Phys. Rev., 1989. Vol. B 39. № 1. P. 767-770.

4. Courjon D., Sarayeddine K., Spajer M. Scanning tunneling optical microscopy // *Optics commun.* 1989. Vol. 71. № 1. P. 23-28.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
6. Барноски М. Введение в интегральную оптику. М.: Мир. 1997. 367 с.
7. Воронин Ю.М. Принципиальные схемы и основные элементы ближнепольных растровых оптических микроскопов. // *Оптический журнал.* 1995. N 6. С. 4-13.
8. Binnig G., Rohrer H., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy. // *Phys. Rev. Lett.* 1982. № 49. P. 57-61.
9. Pohl D.W., Denk W., Lanz M. Optical steroscopy: Image recording with resolution  $1/20$ . // *Appl. Phys. Lett.* 1984. Vol. 44. № 7. P. 651-653.
10. Папаян Г.В., Воронин Ю.М., Щетнев Ю.Ф. и др. Регистрация затухающего светового поля при полном внутреннем отражении в условиях фотонной туннельной микроскопии. // *Оптический журнал.* 1993. № 6. С. 8-11.

## Лабораторная работа №5

### «ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННОЙ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ»

#### *Цель работы*

Ознакомление с методом определения дисперсионных параметров оптических информационных широкополосных волокон при помощи ультракоротких лазерных импульсов. Информационные широкополосные волокна используются в системах сверхскоростной сверхплотной передачи кодированных данных и каналах дистанционного контроля временной формы лазерных импульсов.

#### *Краткие теоретические сведения*

Оптические волоконные световоды способны по сравнению с традиционными электрическими кабелями передавать огромные потоки информации, в том числе с минимальными искажениями информацию о развитии во времени интенсивности лазерных импульсов с высоким разрешением (до единиц пикосекунд) [1]. Для этих целей используются диэлектрические световоды круглого сечения, состоящие из двух или нескольких концентрических слоев диэлектрика. В общем случае показатель преломления внутреннего слоя является функцией радиальной координаты. Фактически оптические волокна представляет собой нить из стекла, кварца или полимерного материала, сердцевина которой имеет показатель преломления  $n_1$ , а оболочка –  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ). В приближении геометрической оптики лучи, входящие под малыми углами к оси волокна, испытывают полное внутреннее отражение на поверхности раздела сердцевины и оболочки и распространяются только по сердцевине. Величины диаметра сердцевины и разность показателей преломления ( $n_1 - n_2$ ) определяют число типов волн (мод), которые могут распространяться по волокну при заданной длине волны света. Профиль показателя преломления сердцевины (изменение  $n_1$  вдоль радиуса сердцевины) может быть П-образный, или изменяющийся по заданному закону (градиентные волокна).

Важнейшими характеристиками оптического волокна являются оптические потери, дисперсия групповых скоростей и оптическая нелинейность. Учет этих характеристик особо важен при создании информационных линий в ультрафиолетовой (УФ) области спектра.

Для передачи по волоконным кабелям УФ-лазерных импульсов субнаносекундной длительности используются специальные оптические волокна из кварца. Назначение таких волоконных кабелей – передача информации о форме лазерного импульса для контроля его временного профиля. Волоконные кабели используются для передачи лазерного

излучения к измерительной аппаратуре в условиях, когда прямая доставка излучения по воздуху на вход регистрирующей аппаратуры или затруднена, или невозможна (как, например, в случае контроля параметров многопучкового лазерного облучения термоядерных мишеней [2]). Обычно для этих целей используются кварцевые градиентные многомодовые волокна с диаметром сердцевины от 50 до 500 мкм. В оптических волокнах, передающих данные о развитии нестационарных процессов, дисперсия играет чрезвычайно важную роль и определяет достоверность получаемой информации. Существует три основных типа дисперсии: материальная, межмодовая и внутримодовая. Нелинейная дисперсия, связанная с зависимостью показателя преломления от плотности мощности распространяющегося в волокне излучения, здесь не рассматривается, так как в информационном режиме процесс распространения излучения должен быть линейным.

Дисперсия волоконных световодов определяется по уширению сверхкоротких лазерных импульсов после их прохождения через световодной кабель известной длины. При использовании лазерных импульсов низкой мощности с соотношением длительности ( $\tau$ ) и спектральной полосы ( $\Delta\nu$ ) близким к предельному ( $\tau \cdot \Delta\nu \sim 1$ ) в многомодовых волокнах влияние материальной, внутримодовой, а также нелинейной дисперсий пренебрежимо малы и искажения импульсов, связанные с их уширением при прохождении волоконной линии, фактически определяются межмодовой дисперсией, которая задается профилем показателя преломления градиентного волокна<sup>1</sup>. Поэтому главным фактором, определяющим уширение импульсов в многомодовых оптических кабелях, является межмодовая дисперсия, величина которой зависит от поперечного профиля показателя преломления световода. А именно многомодовые широкоапертурные волокна используются в системах контроля временного профиля лазерных импульсов рабочих каналов накачки термоядерной мишени в установках лазерного термоядерного синтеза (2).

На основании решения кинетических уравнений распространения излучения в оптическом световоде, построенных на основе уравнений Максвелла, оптимальный профиль показателя преломления для рассматриваемого случая минимизации межмодовой дисперсии может быть представлен в виде следующей функции:

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - \Delta_{i\ddot{o}i} \left( \frac{r}{r_{\ddot{n}\ddot{a}\ddot{o}\ddot{a}\ddot{a}}} \right) \right]^{\frac{1}{2} \alpha_{i\ddot{o}i}} \quad (1),$$

<sup>1</sup> Для передачи субнаносекундных импульсов волокна с П-образным профилем не могут быть применены



где  $n(r)$  - радиальное распределение показателя преломления,  $n_1$  - показатель преломления в центре сердцевины,  $\Delta_{i\ddot{o}i} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  - относительное приращение показателя преломления, определяющее апертуру волокна,  $\alpha_{\text{проф}}$  - параметр формы профиля<sup>2</sup>.

Для обеспечения минимальной межмодовой дисперсии и соответствующего распределения профиля показателя преломления  $n(r)$  в выражении (1) параметр  $\alpha_{\text{проф}}$ , зависящий от величины относительного приращения показателя преломления  $\Delta_{i\ddot{o}i}$ , длины волны и материальной дисперсии среды, должен быть оптимальным.

Оптимальное значение  $\alpha_{\text{проф}}$  определяется выражением:

$$\alpha_{i\ddot{o}i}^{opt} = 2 - 2P - \Delta_{i\ddot{o}i} \frac{(4 - 2P)(3 - P)}{(5 - 4P)} \quad (2),$$

где  $P$  – дисперсионный параметр профиля

$$P = \frac{n_1}{n_1 - \frac{dn_1}{d\lambda}} \times \frac{\lambda}{\Delta_{i\ddot{o}i}} \times \frac{d(\Delta_{i\ddot{o}i})}{d\lambda}$$

Реализация оптимального профиля происходит на стадии формирования преформы (заготовки), из которой вытягивается волокно. Преформа изготавливается с использованием метода газовой молекулярной эпитаксии (метод MCVD), обеспечивающей внедрение по заданному закону добавок в заготовку из чистого кварца [2].

Временная дисперсия оптоволоконных кабелей и непосредственно оптического волокна определяется по уширению во времени исходного импульса лазера после его прохождения по волокну. В гауссовом приближении длительность выходного импульса может быть вычислена по формуле:

$$\tau_{\text{вых}} = \sqrt{(\tau_{\text{и}}^2 + \Delta^2)} \quad [\text{пс}], \quad (3),$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность исходного импульса,  $\Delta$  – аппаратная функция волоконной линии [пс], определяемая временной межмодовой дисперсией.

Для характеристики волоконных кабелей конкретной длины используют понятие погонной дисперсии  $\delta = \Delta/l$  [пс/м], где  $l$  – длина линии [м]. Параметр  $\delta$  не является дисперсионным параметром волокна, а

---

<sup>2</sup>) при  $\alpha_{i\ddot{o}i} = 2$  профиль показателя преломления параболический, при  $\alpha_{\text{проф}} = \infty$  - профиль ступенчатый.

определяет дисперсионную характеристику конкретного волоконного кабеля, т.к. параметр  $\delta$  не аддитивен по длине.

Непосредственно волокно как продукт может быть охарактеризовано параметром временной дисперсии  $\beta$  [пс<sup>2</sup>/м], определяемым из условий аддитивности дисперсионной аппаратной функции волоконной линии. Если предположить, что  $\Delta_i$  является дисперсионной характеристикой кабеля единичной длины, то для кабеля, составленного из  $N$  волоконных отрезков единичной длины выражение (3) приобретает вид:

$$\tau_{\text{аио}}^2 = \tau_{\text{е}}^2 + \sum_{i=1}^N \Delta_i^2 \quad (4)$$

и при переходе от суммы отрезков к линейной длине параметр временной дисперсии  $\beta$  определяется как

$$\beta = \frac{\Delta^2}{l} \text{ [пс}^2\text{/м]} \quad (5)$$

и при указанном выше способе расчета уширения импульса параметр  $\beta$  не зависит от длины тестируемого образца (в отличие от погонной дисперсии  $\delta$ ).

Из рассмотренного следует, что погонная временная дисперсия уменьшается по величине при увеличении длины волоконного кабеля, что и подтверждается экспериментом.

### ***Описание лабораторной установки***

Экспериментально временная дисперсия волокна определяется по сопоставлению длительности импульсов, прошедших через волоконный образец, и опорных импульсов, прошедших через воздушную линию задержки соответствующей длины. В качестве тестовых импульсов используются одиночные импульсы длительностью  $\approx 20$  пс вблизи  $\lambda = 342$  нм с энергией  $E \approx 10^{-9}$  Дж.

Схема измерительной установки представлена на рис. 1.

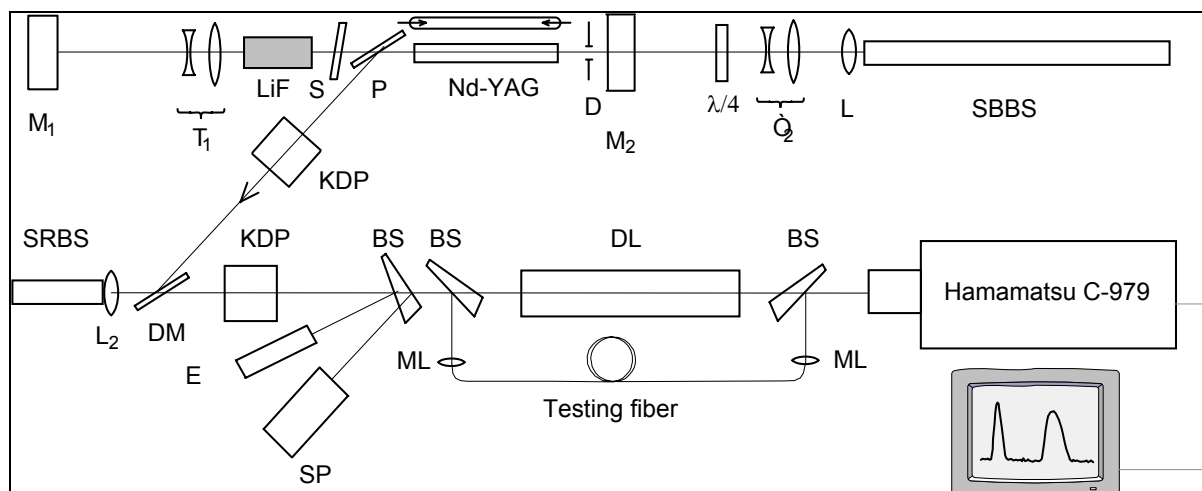


Рис. 1. Схема измерительной установки

Лазер: Nd-YAG – активный элемент лазера на алюмо-иттриевом гранате,  $M_1$  и  $M_2$  – зеркала лазерного резонатора.  $T_1$  – телескоп. LiF – пассивный модулятор добротности.  $S$  – спектральный селектор (фильтр Фабри-Перо),  $P$  – зеркальный поляризационный элемент,  $D$  – внутрирезонаторная апертурная диафрагма;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластина на 1,06 мкм,  $T_2$  – телескоп,  $L$  – линза, SBBS – компрессор на основе обратного вынужденного рассеяния, Манделштама-Бриллюэна в  $CCl_4$ , KDP – удвоители частоты, SRBS – компрессор на основе вынужденного обратного комбинационного рассеяния в сжатом водороде, DM – дихроичное зеркало,  $E$  и  $SP$  – измерители энергии и спектра, BS – светоделители, ML – микрообъективы, DL – зеркальная линия задержки, Testing fiber – тестируемое волокно, Hamamatsu C979 – скоростная целевая камера.

Источник лазерных пикосекундных импульсов состоит из стартового моноимпульсного одномодового одночастотного (TEM<sub>00q</sub>) YAG-Nd лазера с длительностью импульсов  $\Delta t \cong 5-7$  нс и выходной энергией  $E \cong 30 - 50$  мДж. На обратном ходе его активный элемент используется как однопроходный усилитель. Исходные импульсы ( $\lambda=1,06$  мкм) сжимаются в компрессоре на основе вынужденного обратного рассеивания Манделштама-Бриллюэна в  $CCl_4$  до длительности  $\Delta t \cong 400$  пс. После компрессии импульсы излучения удваиваются по частоте ( $\lambda = 532$  нм) в оптически нелинейном кристалле KDP и сжимаются во втором каскаде компрессора на основе вынужденного обратного комбинационного рассеивания в кювете с  $H_2$  высокого давления до длительности  $\Delta t \cong 15 - 20$  пс, со стоксовым смещением по спектру до  $\lambda = 680$  нм. Импульсы излучения на длине волны  $\lambda = 340$  нм, получаются удвоением частоты во втором кристалле KDP.

Измерения временной формы пробных импульсов излучения и импульсов излучения с выхода оптоволокну производится с помощью скоростной щелевой камеры "Hamamatsu C-979" с временным разрешением  $\Delta t = 6$  пс и чувствительностью 50 нДж. Принцип работы щелевой камеры на основе ЭОПа с временной разверткой иллюстрируется рисунком 2.

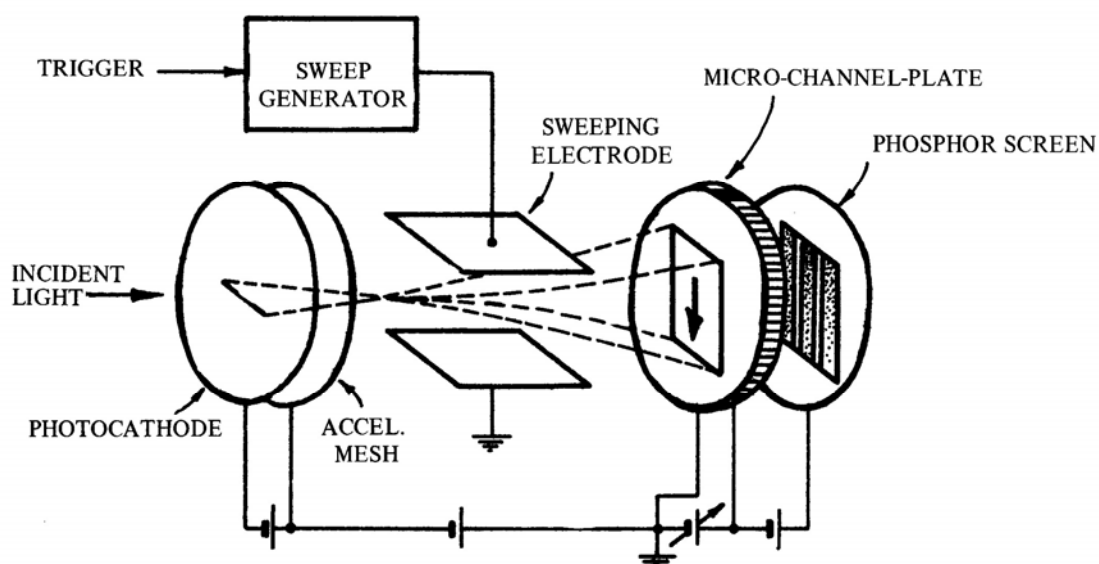


Рис. 2. Функциональная схема щелевой камеры.

*INCIDENT LIGHT* – падающий свет, *PHOTOCATHODE* – фотокатод, *ACCEL. MASH* – ускоряющая сетка, *SWEEPING ELECTRODE* – электроды развертки, *MICRO-CHANNEL PLATE* – микроканальная пластина, *PHOSPHOR SCREEN* – люминесцентный экран, *TRIGGER* – запуск, *SWEEP GENERATOR* – генератор развертки.

Для одновременного наблюдения временной формы входных и выходных лазерных импульсов входное излучение разделяется на два канала: в первом канале импульсы излучения вводятся в тестируемое оптоволокно после необходимого ослабления, во втором - импульсы излучения задерживаются во времени в многоходовой афокальной четырехзеркальной оптической линии задержки на время, необходимое для компенсации времени прохождения излучения в оптоволокне. Импульсы пробного излучения, прошедшие оптическую линию задержки и импульсы прошедшие оптоволокно, подаются на вход скоростной камеры с небольшим временным сдвигом друг относительно друга так, чтобы их временной профиль одновременно наблюдался на выходе камеры за один кадр регистрации. Для обработки и архивации данных информация с цифрового выхода камеры передается на персональный компьютер.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Формирование торцов волоконного образца с контролем качества под микроскопом и по форме выходного излучения опорного He-Ne лазера.
2. Установка волокна в измерительную схему. Согласование оптических длин волокна и оптической линии задержки.
3. Проведение измерений длительности входного и выходного импульсов (длительность при измерениях определяется в числе каналов дискредитации исходного сигнала, один канал соответствует длительности 1,7 пс).

### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть (краткие сведения).
2. Схема лабораторной установки и ее описание.
3. Таблица с результатами измерений и вычислений  $\delta$  и  $\beta$ .
4. Расчет среднеквадратичной погрешности величины погонной дисперсии  $\delta$ .
5. Выводы по работе.
6. Вопросы для подготовки:
  - 1) Виды временной дисперсии в волоконных системах и причины их возникновения.
  - 2) Отличия параметров  $\delta$  и  $\beta$ .
  - 3) Принцип работы скоростных щелевых камер.

### ***Литература***

1. Андрушко Л.М., Вознесенский В.А., Каток И.Б. и др. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи. / под ред. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко Киев: Техника. 1988. 239 с.
2. Ermolaeva G.M., Eron'yan M.A., Dukelskii K.V., Komarov A.V., Kondratev Yu.N., Serkov M.S., Tolstoy M.N., Shilov V.B., Shevandin V.S., Powell H.T., Thompson C.E., Low-dispersion optical fiber highly transparent in the UV spectral range. // Opt. Eng. 2004. Vol. 43. № 12. P. 1-8.



Кафедра основана в 2002 году под названием «Оптическая физика и современное естествознание» в составе факультета «Фотоники и оптоинформатики». Первое организационное заседание состоялось 5 сентября 2002 года в помещении лаборатории «Фотофизики поверхности»). Первым заведующим кафедрой был избран Михаил Наумович Либенсон, возглавлявший лабораторию «Фотофизики поверхности» ГОИ им. С.И. Вавилова.

Либенсон Михаил Наумович – известный ученый-физик, внесший значительный вклад в силовую оптику и фотофизику, лауреат Государственной премии СССР, доктор физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Соросовский профессор.

Преподавателями кафедры стали сотрудники ГОИ – академик РАН Е.Б. Александров, член корр. А.М. Бонч-Бруевич, профессора: Н.В. Каманина, В.Н. Смирнов, В.Б. Шилов; доценты: А.А. Ветров, Г.Н. Виноградова, Ю.М. Воронин, Г.С. Жданов, В.Л. Комолов, Г.А. Марциновский.

2004-2006 г. кафедру возглавлял доктор тех. наук, профессор А.И. Степанов, а с 2006 года и по настоящее время ею руководит доктор физ.-мат. наук, профессор А.В. Федоров.

В настоящее время кафедра имеет высококвалифицированный преподавательский коллектив, в котором один академик РАН, 8 докторов наук и 5 кандидатов наук. Сотрудниками кафедры ОФиСЕ опубликовано более десяти монографий.

Галина Николаевна Виноградова  
Юрий Михайлович Воронин  
Галина Михайловна Ермолаева  
Наталья Владимировна Каманина  
Валентин Николаевич Смирнов  
Валерий Борисович Шилов

## **ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Учебное пособие и учебных пособий к лабораторным работам

В авторской редакции

Компьютерный набор и верстка

авторская

Дизайн обложки

авторский

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета

информационных технологий механики и оптики

Лицензия ИД №00408 от 05.11.99

Подписано к печати 15.12.06

Отпечатано на ризографе      Тираж 100 экз. Заказ 997.

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных  
технологий, механики и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

