

самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П.Королева

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе  
и практическим занятиям по курсу "Оптика лазеров"

С а м а р а 1993 [1997]

Автор-составитель В.И.А н и с и м о в

УДК 535.312:621.373.826

Измерение коэффициентов светопропускания оптических материалов и определение показателя преломления: Метод. указания /ИИЦ "Авиатор".  
Авт.-сост. В.И.А н и с и м о в. Самара, 1993. 15 с.

Методические указания включают теоретическую часть, оптические схемы, методики измерений и конкретные задания по выполнению работы, что при отсутствии достаточного количества литературы позволяет подготовиться и осознанно провести лабораторную работу.

Предназначены для студентов четвертого курса (специальность 13.12 "Лазеры") по курсу "Оптика лазеров", а также инженерно-технических работников, проходящих переподготовку по лазерной технике на ФПК СГАУ.

Рецензенты: О.А.Ж у р а г л е в,  
А.Б.К р у т и к о в

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучить физические явления, связанные с прохождением излучения через оптическую среду; изучить методики определения коэффициентов светопропускания оптических материалов; собрать схему установки для измерения светопропускания оптических материалов, провести измерения светопропускания неизвестных образцов оптических материалов, рассчитать показатели преломления материалов и сравнить их со справочными величинами.

К оптическим материалам, используемым в лазерной технике, предъявляются весьма жесткие требования, - в первую очередь к оптическим свойствам. Это связано с эксплуатацией оптических элементов под воздействием мощных потоков лазерного излучения, их контакта в ряде случаев с агрессивными химическими средами, либо воздействием на оптические элементы газовых потоков переменного давления и температуры во время работы лазерных установок. При работе лазерных технологических установок происходит, кроме того, воздействие на выходную оптику мощных потоков ультрафиолетового и видимого излучения. Воздействие перечисленных факторов может существенно изменить оптические свойства элементов лазерной оптики, что в дальнейшем вызывает изменение энергетических и геометрических параметров лазерного излучения, которые, как правило, легко диагностируются как инструментально, так и визуально.

Естественно, после изменения параметров лазера возникает проблема диагностики активной среды, оптических элементов и т.д. Одним из простейших методов диагностики является измерение оптических параметров лазерной оптики. Как известно, главным параметром оптически прозрачных элементов является показатель преломления, с которым связан коэффициент пропускания. Измеряя светопропускание оптических элементов на рабочей длине волны, можно достаточно оперативно сделать вывод о работоспособности оптических элементов и возможности их дальнейшей эксплуатации.

## 1. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ СРЕДЫ

В лазерной технике оптические материалы применяются как для изготовления прозрачных, преломляющих и отражающих элементов (окон, призм, зеркал), так и в качестве поглощающих элементов для приемников лазерного излучения и элементов конструкций резонаторов лазера.

Рассмотрим прохождение излучения, падающего на поглощающую пластинку. Пусть на поглощающую пластинку толщиной  $l$  с коэффициентом отражения поверхности  $R$  падает параллельный поток излучения. Будем считать, что излучение заключено в небольшом спектральном интервале и можно пренебречь зависимостью показателя преломления от частоты. Предположим также, что поток излучения сильно ослабляется в толще пластинки. Тогда отражением от задней поверхности можно пренебречь. Величину поглощенного в пластинке потока можно записать (рис. 1,а):

$$J_{\text{полн}} = J_{\text{пад}}(1-R) - J_{\text{пад}}(1-R)e^{-kl} = J_{\text{пад}}(1-R)(1 - e^{-kl}). \quad (1)$$

Отсюда получаем:

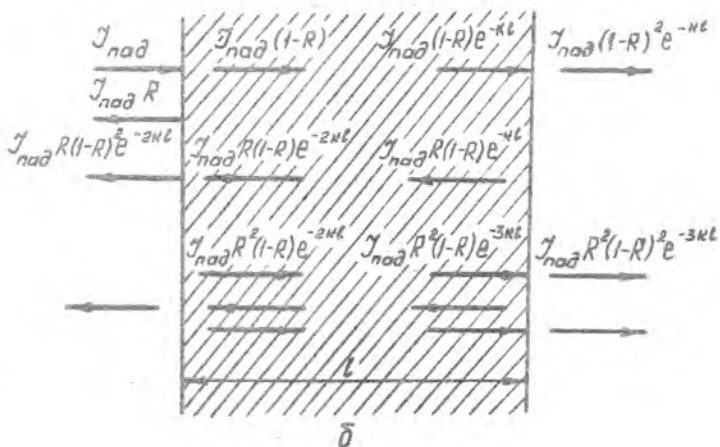
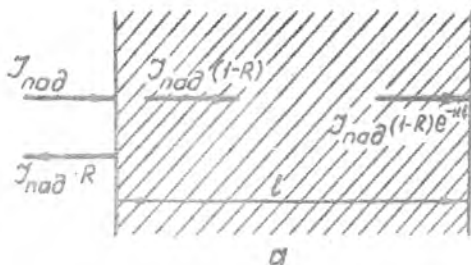
$$K = J_{\text{полн}} / J_{\text{пад}} = (1-R)(1 - e^{-kl}). \quad (2)$$

Выражение (2) может быть использовано при оценке поглощательной и (согласно закону Кирхгофа) излучательной способности реальных тел. Из него видно, что для хорошего поглощения необходима не только большая величина оптической толщины  $kl$  тела, но и малый коэффициент отражения поверхности.

Один из способов уменьшения отражения — чернение поверхности. Во многих случаях достаточно грубая обработка ее (шероховатая поверхность отражает значительно меньше гладкой). Наконец, на поверхность тела можно нанести просветляющий четвертьволновой слой диэлектрика.

В качестве поглощающих материалов чаще всего используют металлы и полупроводники. Спектральная область поглощения металлов очень широка. В полупроводниках она обусловлена шириной запрещенной зоны и наличием в ней примесных уровней.

Существенно иные требования предъявляются к материалам, используемым в окнах, фильтрах и других прозрачных деталях. В этом случае необходимы материалы с малым поглощением в рабочей области спектра. При прохождении через тело потока излучения необходимо учитывать многократные отражения между поверхностями (рис. 1,б). Если излучение



Р и с. I. Прохождение излучения через пластинку толщиной  $l$  в случае большого (а) и малого (б) поглощения

не является монохроматичным, при этом следует производить сложение потоков излучения. Пршедший поток описывается геометрической прогрессией, первый член которой равен  $J_{пад}(1-R)e^{-k\ell}$ , а знаменателем является  $e^{-2k\ell}R^2$ . Тогда

$$J_{прош} = J_{пад} \frac{(1-R)e^{-k\ell}}{1 - e^{-2k\ell}R^2} \quad (3)$$

Прозрачность пластинки  $T_{пл}$  равна:

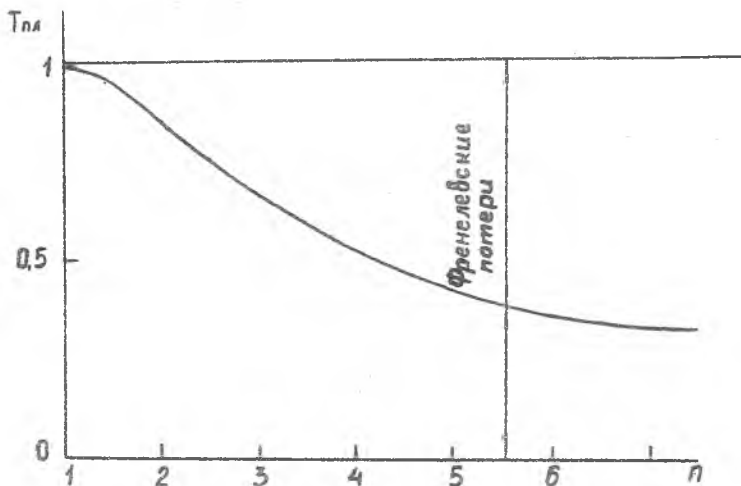
$$T_{пл} = J_{прош} / J_{пад} = \frac{(1-R)e^{-k\ell}}{(1 - e^{-2k\ell}R^2)} \quad (4)$$

Если пренебречь поглощением в среде ( $e^{-k\ell} \approx 1$ ) и воспользоваться фоб-

мулой Френеля, вместо (4) получаем

$$T_{пл} = (1 - R)/(1 + R) = 2n/(n^2 + 1). \quad (5)$$

Прозрачность при большом показателе преломления оказывается невелика. Например, прозрачность пластины из германия при  $\lambda = 10$  мкм ( $n = 4$ ) составляет всего  $T_{пл} = 0,47$ . Потери потока излучения, равные  $1 - T_{пл}$ , в данном случае возникают за счет отражения излучения на поверхностях, поэтому их называют френелевскими потерями (рис. 2).

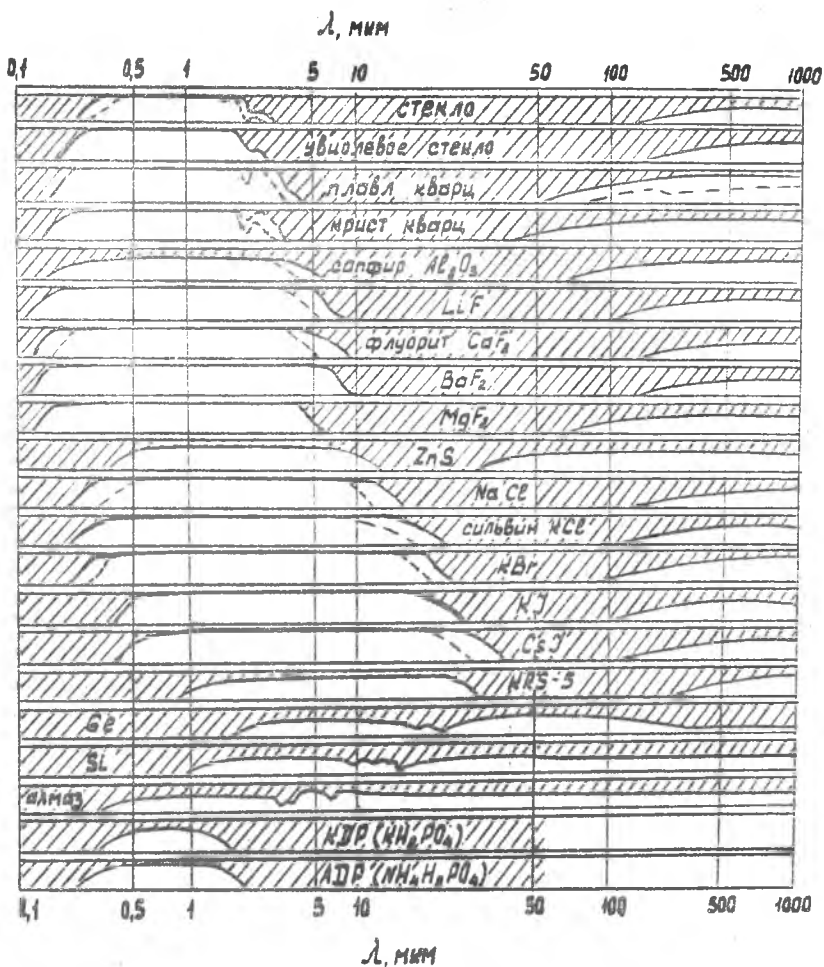


Р и с. 2. Падение прозрачности пластинки из непоглощающего вещества с ростом показателя преломления  $n$

Прозрачные детали обычно изготавливаются из диэлектриков и полупроводников. Области прозрачности и поглощения многих из них приведены на рис. 3. Подробные сведения о прозрачности оптических материалов можно найти в справочной литературе.

В вакуумной УФ-области спектра с длинами волн менее 100 нм все диэлектрики и полупроводники непрозрачны. В этой области приходится пользоваться металлическими пленками, которые при толщине 80–100 нм прозрачны при частотах, лежащих выше плазменной частоты данного металла. Тонкие металлические пленки хрупки, неудобны в работе, не выдерживают большого перепада давления, сквозь них происходит натекание газа. Однако в этой области спектра других прозрачных материалов нет.

При изготовлении призм, предназначенных для разложения излуче-



Р и с. 3. Прозрачность некоторых оптических материалов. По оси ординат отложена величина прозрачности

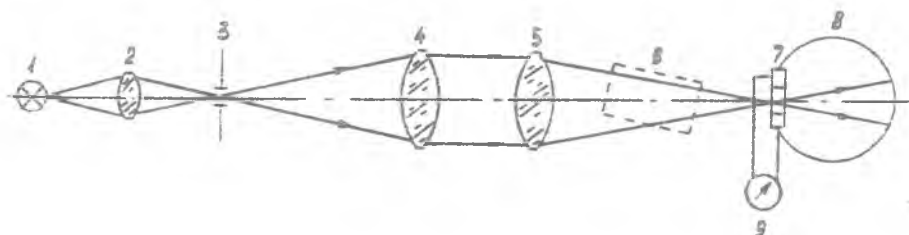
ния в спектр, необходимо выбирать оптические материалы с наибольшей величиной дисперсии  $dn/d\lambda$  и с возможно меньшими потерями. Косвенные сведения о дисперсии могут дать кривые прозрачности (рис. 3), так как дисперсия максимальна на краях области прозрачности.

Для призм в инфракрасной области спектра применяют стекло (до 2,5  $\mu\text{m}$ ), кварц (до 3,5  $\mu\text{m}$ ),  $\text{LiF}$  (до 5  $\mu\text{m}$ ),  $\text{NaCl}$  (до 15  $\mu\text{m}$ ),

$K_{Вр}$  (до 25 мкм),  $C_{67}$  (до 50 мкм). В видимой области наилучшей дисперсией обладает стекло. В ультрафиолете для призм используют кварц (от 0,2 мкм), фторит (от 0,13 мкм), фтористый литий (от 0,11 мкм).

## 2. СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В лазерной оптике имеется тенденция к использованию преимущественно отражающих оптических элементов, выдерживающих воздействие высокоинтенсивных потоков излучения. Вместе с тем практически в любых конструкциях лазеров и лазерных систем имеются оптически прозрачные элементы, предназначенные для решения задач фокусировки, разделения сред, вывода излучения и т.д. К материалам элементов для лазерной техники предъявляются требования минимальности коэффициентов поглощения и рассеяния на рабочей длине волны. В этом случае оперативный контроль качества оптических элементов, например в процессе нанесения покрытий, сводится к измерению коэффициента пропускания на рабочей длине волны, либо спектральной зависимости пропускания в заданном спектральном диапазоне. Рассмотрим некоторые схемы и методики определения коэффициента пропускания.



Р и с. 4. Схема определения интегрального коэффициента пропускания

Для измерения коэффициента пропускания (рис. 4) используют фотометрический шар 8 диаметром 100 мм с селеновым фотозащитным элементом 7 и гальванометром 9 или микроамперметром. В качестве осветителя используют коллиматор, в фокусе объектива 4 которого установлена диафрагма 3 с круглым отверстием, освещенным через конденсор 2 лампой накаливания 1, питающейся от сети стабилизированного напряжения. Дополни-



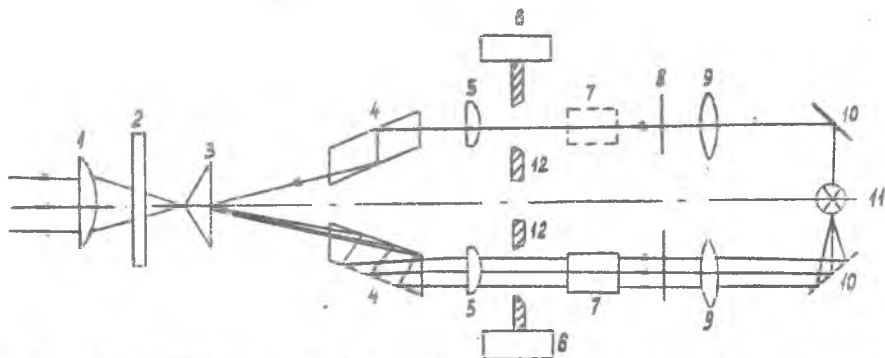
нительный объектив 5 расположен за объективом коллиматора и собирает параллельный пучок в заднем фокусе на отверстии фотоэлемента, помещенного в плоскости шара. Испытуемый образец стекла 6 вводят в сходящийся пучок лучей между объективом 5 и шаром под некоторым углом к оптической оси так, чтобы блик, отраженный от поверхности образца, не попал в объектив 5. Узкое сечение пучка — фокус должен быть снова приведен в плоскость отверстия шара, для чего последний отодвигают приблизительно на одну треть длины образца.

По гальванометру отмечают показания  $m_1$  и  $m_2$ , соответствующие освещенностям шара при установке образца в ходе лучей и без него; коэффициент пропускания

$$T = m_1 / m_2 . \quad (6)$$

Для измерения коэффициента пропускания можно использовать горизонтальный фотометр ФМС-56, на котором коэффициенты пропускания и оптической плотности могут быть измерены с точностью  $\pm 1-2\%$ .

Принцип действия прибора основан на визуальном уравнивании яркостей двух половин поля зрения диафрагмированием входных зрачков. Оптическая схема фотометра приведена на рис. 5. Прибор состоит из двух основных частей, осветителя и фотометрической головки. Осветитель снаб-



Р и с. 5. Оптическая схема фотометра для измерения коэффициента пропускания

жен двумя зеркалами 10 и конденсорами 9, направляющими свет на отверстия диафрагм 12. Для правильной установки освещения оба конденсора и лампа 11 перемещаются в продольном направлении. С внешней стороны за конденсорами в гнезда осветителя вставляют молочные или матовые стекла 8, создающие равномерно рассеянный свет. Фотометрическая го-

ловка представляет собой двойную зрительную трубу с полем зрения  $1^{\circ}15'$ . Перед объективами 5 помещены две диафрагмы, имеющие квадратные отверстия и переменный размер. Каждая диафрагма имеет отсчетный барабан 6 с двумя шкалами с черными и красными делениями. Черные деления шкалы проградуированы от 0 до 100 и служат для отсчета коэффициента пропускания в процентах. Красные шкалы оптической плотности  $D$  разделены в зависимости от коэффициентов пропускания и соответствуют отрицательным десятичным логарифмам:  $D = -\lg \tau$ .

Два световых потока, упавших из отверстия диафрагм, сводятся оптической системой (объективами 5, ромбовидными призмами 4 и бипризмой 3) в одно поле зрения в виде круга, разделенного ребром бипризмы на два полукруга. Глаз наблюдателя, находящийся за окуляром 1 в выходящем зрачке трубы, видит на экране 2 два полукруга различной яркости. При правильном освещении и равном раскрытии отверстий диафрагм яркости полукругов одинаковы.

Перед измерением коэффициента пропускания следует правильно установить патрон с лампой в осветителе. Для этого за осветителем на расстоянии 90–100 см ставят белый лист бумаги и, перемещая патрон с лампой, получают на нем изображение спиралей, причем расстояние между их серединами должно быть равно 70 мм. Если спирали имеют размытое изображение, то конденсоры перемещают до получения резкого изображения. Затем барабаны диафрагм устанавливают на одинаковые отсчеты, например на 100, и, осветив входные отверстия прибора, наблюдают в окуляр. Может оказаться, что при удаленных молочных стеклах изображение спиралей находится не посередине поля зрения, нерезкое или неравномерно освещено. Тогда нужно произвести небольшие перемещения осветителя по высоте и в стороны, а также переместить конденсоры, воспользовавшись юстировочными винтами патрона. После этого молочные стекла снова вставляют в гнезда за конденсорами. Равномерное заполнение отверстий диафрагм светом проверяют с помощью лупы, находящейся за окуляром. Наконец, проверяют интенсивность обоих пучков, идущих из осветителя, для чего, например, левый барабан ставят на отсчет 50 и, слегка перемещая один из конденсоров, добиваются получения на правом барабане отсчета, близкого к 50 с отклонением  $\pm 1$  деление. Приступая к измерениям, оба барабана устанавливают на отсчет 100. Испытуемый образец стекла 7 помещают на предметный столик перед левым отверстием прибора, и окуляр фокусируют на резкое изображение линии раздела поля. При этом правое поле темнее левого. Вращая правый барабан, добиваются уравнивания полей, т.е. фотометрического равновесия.

Отсчет по черной шкале правого барабана составит коэффициент пропускания  $\tau_{np}$ , а отсчет по красной шкале – оптическую плотность  $D_{np}$ . Затем испытуемый образец ставят перед правым отверстием при отсчете на правом барабане 100, а измерения  $\tau_n$  или  $D_n$  ведут левым барабаном.

Настройку на фотометрическое равновесие обеих частей поля и отсчеты по шкалам барабанов производят 5-7 раз с последующим получением среднего значения группы отсчетов  $\tau_{np}$  и  $\tau_n$  или  $D_{np}$  и  $D_n$ .

Окончательные значения  $\tau$  или  $D$  находят с помощью выражений

$$\tau = \tau_{np} \tau_n \quad \text{и} \quad D = (1/2)(D_{np} + D_n).$$

Для измерения спектрального коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$  в ближних ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра применяют спектрофотометры СФ-4, СФ-4А, СФ-26 и другие; в инфракрасной области для длин волн 1 мкм и больше – спектрофотометры ИКС-12, ИКС-21, ИКС-29 и другие.

Спектральный коэффициент пропускания

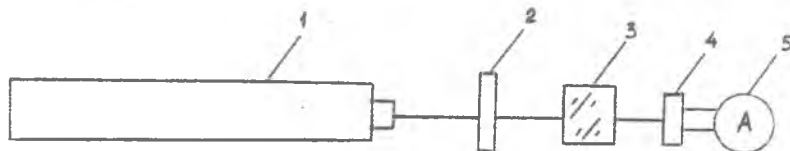
$$\tau_\lambda = \Phi_\lambda / \Phi_{0\lambda} = (1 - \rho_\lambda)^2 10^{-K_\lambda \ell} \quad (7)$$

где  $\Phi_\lambda$  и  $\Phi_{0\lambda}$  – поток монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ , соответственно прошедший образец стекла и упавший на него (начальный поток);  $\rho_\lambda$  – спектральный коэффициент отражения;  $K_\lambda$  – показатель поглощения;  $\ell$  – толщина образца, мм.

Измерения  $\tau_\lambda$  выполняют через 0,05 мкм на крутых участках спектральной кривой и через 0,1-0,2 мкм на пологих участках.

Для вычисления коэффициента отражения  $\rho_\lambda = \frac{(n_\lambda - 1)^2 K_\lambda + 1}{(n_\lambda + 1)^2 K_\lambda + 1}$  показатель преломления стекла должен быть измерен с погрешностью  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ .

Если в качестве осветителя для измерения коэффициента пропускания использовать лазерный излучатель с малой расходимостью, то схема измерений существенно упрощается. Схема измерений приведена на рис.6.



Р и с. 6. Схема измерения коэффициента пропускания

Измерение коэффициента пропускания исследуемого образца 3 проводят следующим образом: лазерное излучение через регулируемый ослабитель 2 направляют на фотоприемник 4, присоединенный к измерительному прибору 5, и с помощью ослабителя 2 устанавливают его величину в пределах последней четверти шкалы измерительного прибора. Регистрируют величину интенсивности  $J_0$ , падающего излучения лазера I, затем вносят исследуемый образец 3 оптического материала и замеряют интенсивность  $J_T$  проходящего излучения. Коэффициент пропускания определяют как отношение интенсивностей

$$T = \frac{J_T}{J_0} \quad (8)$$

Предполагая поглощение и рассеяние в материале и используя формулу Френеля величинами малыми, можно записать зависимость коэффициента пропускания от показателя преломления материала

$$T = \left[ \frac{4n}{(n+1)^2} \right]^2 \quad (9)$$

Таким образом, измеряя коэффициент пропускания, можно определить значение показателя преломления испытуемого материала.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

### З а д а н и е I

Собрать схему измерения коэффициента пропускания согласно рис. 6. Поочередно измерить интенсивности падающего излучения и проходящего через испытуемые образцы. Перед замером нужно убедиться в чистоте поверхностей испытуемого образца путем дыхания на его поверхность. При испарении с поверхности образца частичек влаги, осевших при дыхании, нужно наблюдать, чтобы не было разрывов влажной пленки на испаряемой поверхности, которые сигнализируют о наличии загрязнений в данных участках. Если поверхность окажется загрязненной, то необходимо чистой салфеткой или ватой круговыми движениями механически устранить загрязнения.

Каждый образец измерять в трех точках при угле падения излучения, близком к  $90^\circ$ . При установке образцов нужно держать их за боковые нерабочие поверхности.

Замеры провести трижды для каждого испытуемого образца, изменяя после очередного замера мощность падающего излучения на 25–50%. Измеренные значения внести в таблицу. По формуле (9) вычислить показатели

преломления материалов и сравнить их со справочными значениями. Оценить точность измерений и оформить выводы по работе.

### З а д а н и е 2

Выполнить задание 1, используя материалы прозрачные в ИК-области спектра ( $\text{Ge}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{NaCl}$ ) и составив схему измерений на основе углекислотного инфракрасного лазера и измерителя мощности инфракрасного диапазона длин волн.

### У к а з а н и я к о т ч е т у

При оформлении отчета лабораторной работы указать схематически прохождение излучения сквозь оптически прозрачную непоглощающую среду. Далее необходимо оформить схемы по заданиям №1 и №2, указав тип и марку лазера и его краткие технические характеристики; марку измерительных приборов и приемников излучения с их параметрами. Величины измеренных интенсивностей падающего и прошедшего через испытуемый образец лазерного излучения занести в таблицу. Определить их средние значения и рассчитать величины коэффициентов пропускания и показателей преломления для трех марок оптических материалов. Сравнить рассчитанные значения со справочными величинами показателей преломления. Выполнить анализ проведенной работы и оформить в виде выводов.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Физический смысл показателя преломления оптической среды.
2. Прохождение излучения через оптически прозрачные среды:  
а) без поглощения излучения, б) с малым коэффициентом поглощения, в) с высоким коэффициентом поглощения.
3. Зависимость френелевских потерь в материале от показателя преломления.
4. Какие материалы используют для изготовления оптики в ИК диапазоне спектра длин волн?
5. Из каких материалов и на каких спектральных участках выполняют диспергирующие призмы?
6. Какие оптические схемы можно использовать для определения интегрального и спектрального коэффициентов пропускания?
7. С помощью каких приборов измеряют зависимость светопропуска-

ния от длины волны в видимой и ИЖ-области спектра?

8. Доказать справедливость расчетной формулы для определения показателя преломления через измеренное значение коэффициента пропускания.

9. Какие внешние факторы могут внести погрешность в измерение коэффициента пропускания? Какими способами можно от них избавиться?

10. Какие требования предъявляются к фотоприемнику, измерительному прибору и лазерному излучателю для получения высокой точности измерений?

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Автор-составитель В.И. А н и с и м о в

Редактор Н.С. К у п р и я н о в а  
Техн.редактор Н.М. К а л е н ю к  
Корректор Н.С. К у п р и я н о в а

Лицензия ПР №062080 от 22.01.93

Подписано в печать 26.11.93. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.п.л. 0,7.  
Усл.кр.-отт.0,8. Уч.-изд.л.0,6. Тираж 100 экз.  
Заказ 514. Арт. С-38/93.

Научно-производственный центр "Авиатор"  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.

Участок оперативной полиграфии НПЦ "Авиатор"  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.