

Работа № 3.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД

Т.В. Воробьева, С.А. Старовойтов

Цель работы

Определить показатели преломления оптически прозрачных сред – воды и оптического стекла.

Задачи

1. Измерить оптическую длину пути луча света в воздухе и в оптических средах: в воде и стекле.
2. Рассчитать значения показателей преломления исследуемых сред.

Введение

Решение системы фундаментальных уравнений электродинамики – уравнений Максвелла – для однородной нейтральной непроводящей среды приводит к важнейшему выводу. Электромагнитное поле способно существовать в пространстве самостоятельно, т.е. независимо от электрических зарядов и токов. При этом изменение состояния электромагнитного поля носит волновой характер. Поле такого рода называют электромагнитной волной.

Фазовая скорость электромагнитной волны $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}$, где

ϵ_0 – электрическая постоянная, μ_0 – магнитная постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость вещества, μ – магнитная проницаемость вещества. Для вакуума $\epsilon=1$, $\mu=1$. Таким образом, в вакууме электромагнитная волна распространяется с фазовой скоростью, равной $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, численное значение которой совпадает со скоростью света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с.

Численное совпадение этих величин является доказательством как электромагнитной природы света, так и справедливости уравнений Максвелла.

Скорость света c является одной из важнейших физических констант. Она определяет, как предельную скорость движения материального объекта, так и предельную скорость передачи взаимодействий, передачи информации.

Распространение света (электромагнитной волны) в различных средах происходит с фазовой скоростью, меньшей в $\sqrt{\epsilon\mu}$ раз скорости света в вакууме. Для большинства оптически прозрачных диэлектриков можно принять $\mu = 1$, тогда отличие фазовой скорости света в веществе от скорости света в вакууме определяется коэффициентом $n = \sqrt{\epsilon}$, который называется показателем преломления данного вещества $v = \frac{c}{n}$. (Отношение показателей преломления двух веществ определяет преломление луча света при прохождении границы раздела этих веществ – закон преломления света $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$). В общем случае, скорость света в веществе (а значит, и показатель преломления) зависит от длины волны света. Это явление называется дисперсия.

Использование источников узконаправленного излучения (света) позволяет измерять расстояния до удаленных объектов. В качестве такого источника может быть использован лазер, генерирующий излучение фиксированной длины волны (монохроматичное).

Импульсный метод определения расстояний основан на измерении времени распространения короткого мощного лазерного импульса от источника до отражающей поверхности и обратно. Однако точность измерения времени задержки отраженного сигнала должна быть исключительно высокой.

Действительно, свет в воздухе ($n=1,0003$) проходит расстояние 1 метр приблизительно за 3,3 нс. При измерении расстояний в несколько метров и десятков метров даже при наносекундной точности измерения такой метод будет давать большую погрешность. Применяется импульсный метод в тех случаях, когда расстояние до определяемого объекта составляет сотни и более метров.

Другим лазерным методом измерения расстояния до объекта является **фазовый**. В этом случае источник излучения (лазер) работает не в импульсном режиме, а в режиме модуляции. Непрерывное высокочастотное монохроматичное излучение лазера (частота света в видимом диапазоне

$f \sim 5 \cdot 10^{14}$ Гц) модулируется по амплитуде сигналом низкой частоты ($f_{\text{мод}} \sim$ десятков МГц).

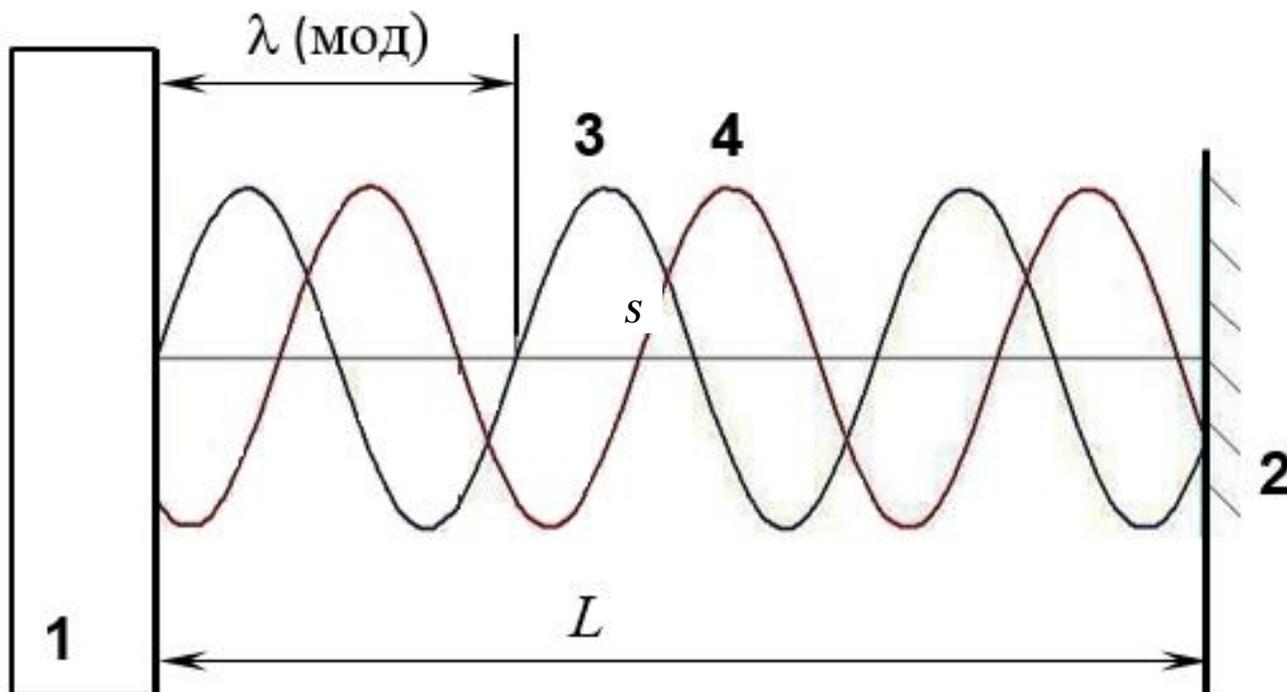


Рис.6.1. Сдвиг фаз сигналов между излученной и отраженной волнами.

- 1.Источник излучения и фотоприемник; 2. Отражающий объект;
3.Излученная волна; 4.Отраженная волна; λ (мод) – длина волны модуляции

Мощность излучения при этом значительно меньше, чем у импульсного лазера. Фотоприемник регистрирует отраженный от объекта сигнал.

Далее происходит сравнение фаз сигнала модуляции от источника и отраженного сигнала. Задержка при распространении света до объекта и обратно приводит к сдвигу фаз этих сигналов (см. рис. 6.1).

Измерение сдвига фаз $\Delta\varphi$ позволяет определить расстояние S до объекта:

$$S = \frac{c}{2f_{\text{мод}}} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi}, \quad (1)$$

здесь скорость света в воздухе принимается равной c , $f_{\text{мод}}$ — частота модуляции, коэффициент $\frac{1}{2}$ учитывает распространение света «туда и обратно».

В таком методе расчета присутствует неоднозначность: если расстояние до объекта будет отличаться на целое число длин волн модулирующего сигнала, фазовый сдвиг будет таким же. Для исключения неоднозначности надо изменить частоту модулирующего сигнала (соответственно, его длину волны), сделать повторное измерение, после чего решить получившуюся систему уравнений.

Недостатками такого метода является небольшая мощность излучения (по сравнению с лазерами, работающими в импульсном режиме), что ограничивает дальность измерений, а также ограниченное быстродействие, связанное с необходимостью измерений на разных частотах модуляции.

Фазовый метод определения расстояний реализован в современных лазерных дальномерах, как бытовых, так и профессиональных.

Описание установки

В данной лабораторной работе измеряется показатель преломления вещества по разности оптических длин путей луча света от источника света до отражательного экрана при наличии и отсутствии этого вещества. Т.к. скорость света в веществе меньше скорости света в вакууме в n раз, то оптическая длина пути света L больше его геометрической длины пути S в n раз: $L = Sn$. Иначе говоря, свету для прохождения некоторого расстояния в веществе требуется в n раз большее время, чем для прохождения того же расстояния в вакууме.

Для измерения оптической длины пути в работе используется дальномер. Этот прибор совмещает в себе следующие узлы:

1. Источник направленного излучения – полупроводниковый лазер.
2. Фотоприемник.
3. Модулятор с изменяемой частотой модуляции.
4. Микропроцессор для вычисления расстояния.

В промежуток между дальномером и отражательным экраном можно помещать оптически прозрачное вещество с показателем преломления n ,
рис. 6.2.

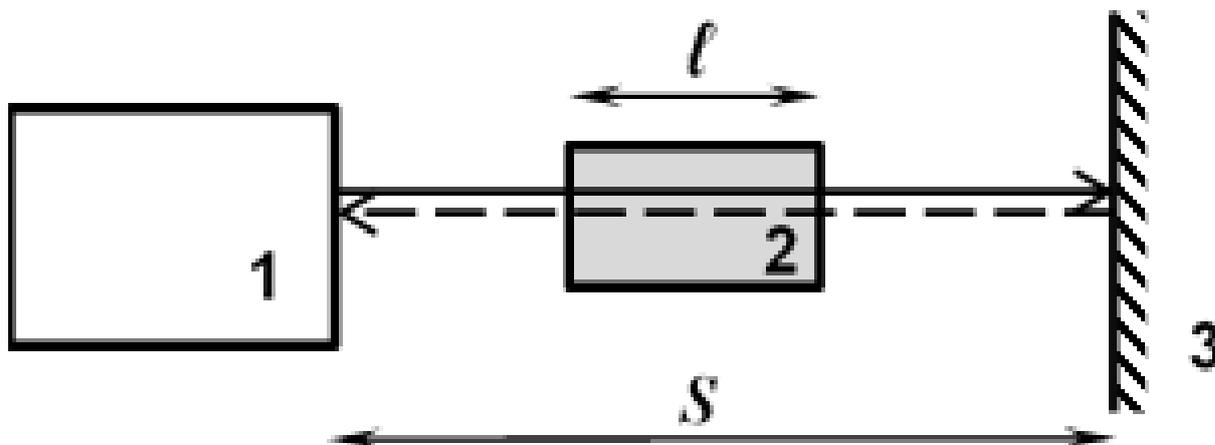


Рис. 6.2Схема экспериментальной установки

1.Дальномер; 2. Оптически прозрачное вещество; 3. Отражающий экран

В отсутствии вещества дальномер измерит геометрическое расстояние между дальномером и экраном. При наличии вещества дальномер измерит оптическую длину пути от дальномера до экрана

$$L = S + \ell(n - 1), \quad (2)$$

где ℓ – геометрический размер образца исследуемого вещества вдоль направления падающего луча.

Обозначим разность оптической и геометрической длин путей $L - S = \Delta$, тогда показатель преломления

$$n = \frac{\Delta}{\ell} + 1. \quad (3)$$

Стеклянная призма имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 100x60x60 мм.

Кювета для воды изготовлена из оргстекла, имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 100х60х60 мм.

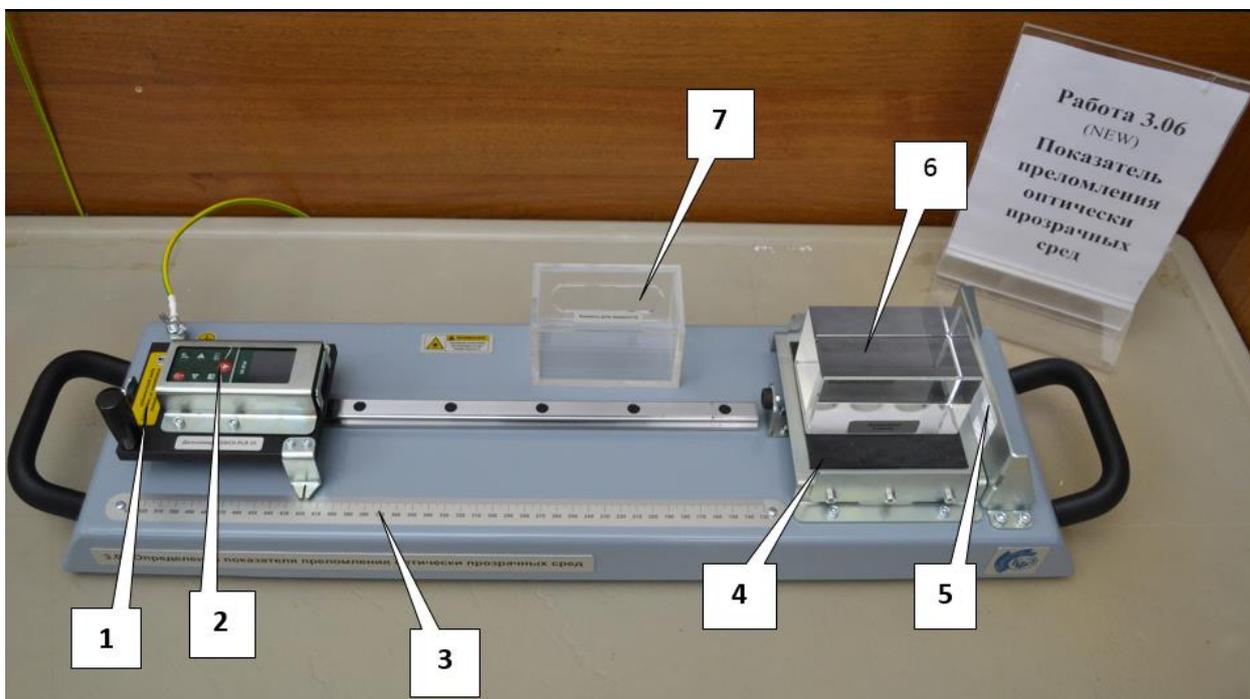


Рис. 6.3. Фотография экспериментальной установки.

1. Подвижная каретка; 2. Дальномер; 3. Линейка; 4. Площадка для оптических образцов; 5. Отражательный экран; 6. Стекло́нная призма; 7. Кювета для воды

Порядок проведения работы

1. Получить у лаборанта стеклянную призму и кювету для воды.
2. Ознакомиться с порядком работы дальномера (см. приложение).
3. Включить дальномер и перевести его в режим измерения от передней грани. **Ни в коем случае не направлять лазерный луч в глаза!**

Проверить правильность работы дальномера. Для этого установите каретку с дальномером на произвольном расстоянии от отражающего экрана и проведите измерение этого расстояния. Убедитесь, что результат измерения расстояния до экрана совпадает с показаниями по линейке.

Показания по линейке считывать напротив прорези в кронштейне подвижной каретки.

4. Вынуть стеклянную призму из коробки-контейнера, **соблюдая предельную осторожность!** Расположить стеклянную призму на площадке для оптических образцов так, чтобы длинная сторона призмы была параллельна лазерному лучу. Задняя грань призмы должна быть параллельна экрану. Переместить дальномер на каретке на наименьшее расстояние до передней грани призмы.

Провести измерения оптической длины пути луча до экрана в стекле L дальномером и геометрической длины пути в воздухе S линейкой. Результаты занести в таблицу 1.

Отодвигая дальномер на держателе от передней грани стеклянной призмы шагами по 20-30 мм провести аналогичные измерения для 10-12 различных расстояний. Каждое измерение провести 2-3 раза, убеждаясь в повторяемости результатов измерения. Результаты занести в таблицу 1.

Проделав измерения, снять стеклянную призму с площадки и убрать ее в коробку-контейнер.

Таблица 1. Результаты измерения оптической длины пути луча через стекло.

№	S	L	$\Delta=L-S$	n
1				
2				
3				
...				
12				
				$\langle n \rangle =$

5. Расположить на оптическом столе прозрачную кювету для воды. Размещение кюветы на оптическом столе провести аналогично размещению стеклянной призмы.

Провести измерение оптического пути лазерного луча до экрана в воздухе и через пустую кювету. Определить поправку $\ell_{эф}$, вносимую стенками кюветы.

Наполнить кювету водой примерно на $\frac{3}{4}$. Провести измерения, аналогичные измерениям п.4 для стекла. Результаты занести в таблицу 2. Вылить воду из кюветы. Сдать стеклянную призму и кювету лаборанту.

Таблица 2. Результаты измерения оптической длины пути луча через кювету с водой.

№	S	L	$\Delta=L-S-\ell_{эф}$	n
1				
2				
3				
...				
12				
				$\langle n \rangle =$

Обработка результатов

1.Стеклянная призма.

Для всех измерений рассчитайте Δ и занесите в столбец 4 таблицы 1. По формуле (3) рассчитайте показатель преломления стекла и занесите в столбец 5 таблицы 1.

Найдите среднее значение показателя преломления.

Рассчитайте погрешность результата измерений.

Запишите окончательный результат.

2. Вода.

Оцените эффективную оптическую толщину стенок кюветы $\ell_{эф}$ как разность оптических путей с пустой кюветой и без нее. Учтите «эффект стенок», заполняя столбец 4 таблицы 2.

Дальнейшее аналогично п.1.

3. Проанализируйте полученные результаты, сравните их с табличными значениями, сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое показатель преломления среды?
2. В чем отличие геометрического и оптического путей света?
3. Чем отличается фазовый метод от импульсного при измерении расстояний с помощью лазера?
4. Как сдвиг фазы модулированного сигнала связан с длиной его оптического пути?

Литература

1. *Савельев И.В.* Курс физики, том 3, изд-во Лань, 2007.
2. *И.Е. Иродов.* Волновые процессы. Основные законы. Изд-во БИНОМ. Лаборатория базовых знаний, 2007.
3. *Б.Д. Агапьев, В.В. Козловский.* Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: метод. Указания. СПб.: изд-во Политехнического ун-та, 2013.

**Инструкция пользователя по работе с дальномером
BOSCHPLR 25**

В данной работе используется дальномер со следующими техническими характеристиками:

Диапазон измерений	0,05 м - 25 м
Точность измерения	± 2 мм/м
Длина волны лазера	635 нм
Мощность излучения	< 1 мВт

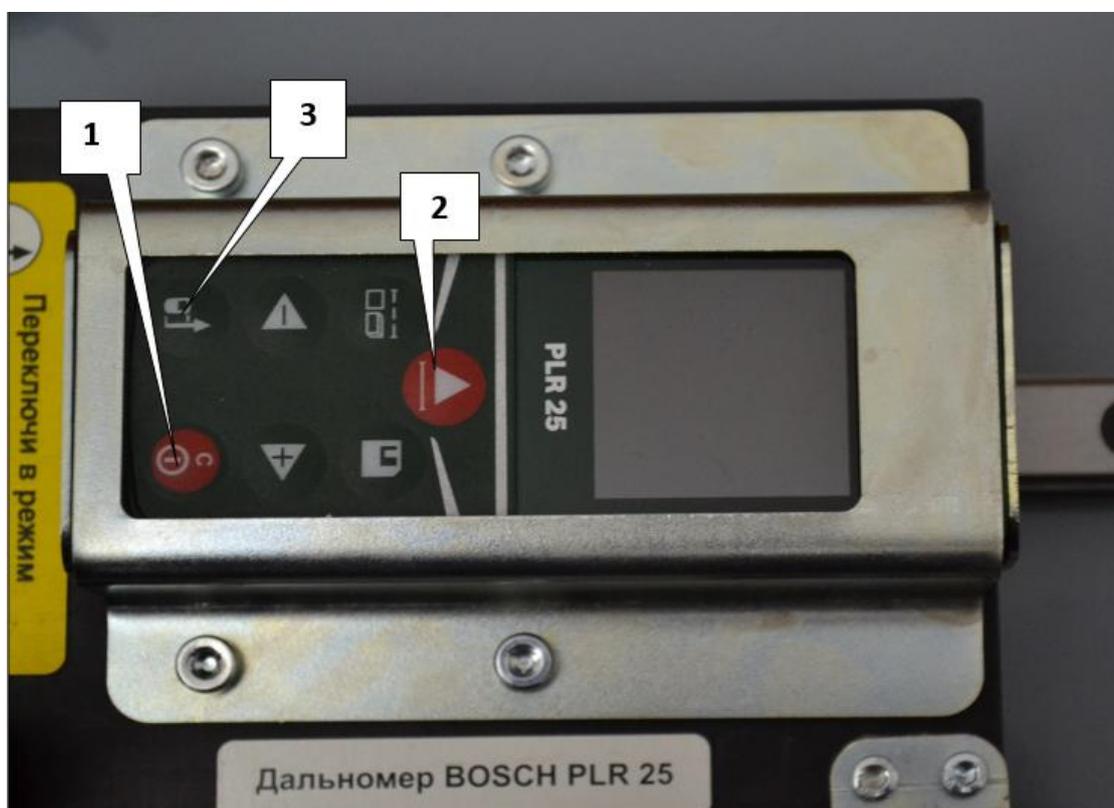


Рис. 6.4. Фотография дальномера (вид сверху)

1. Кнопка включения/выключения; 2. Кнопка активации красного лазерного луча/измерения; 3. Кнопка выбора точки отсчета (от передней грани/ от задней грани).

Измерение:

Нажмите на красную кнопку **1** для включения прибора. Переведите дальномер в режим измерения от передней грани. Для этого нажмите кнопку **3**. В левом верхнем углу дисплея пиктограмма подтвердит произведенное действие.

Нажмите на красную кнопку **2** для активации красного лазерного луча.

Нажмите на красную кнопку **2** еще раз для проведения измерения. Результат измерения отобразится на дисплее. На экране также сохраняется результат предыдущего измерения.

Выключение дальномера осуществляется длительным нажатием на кнопку **1**.

