

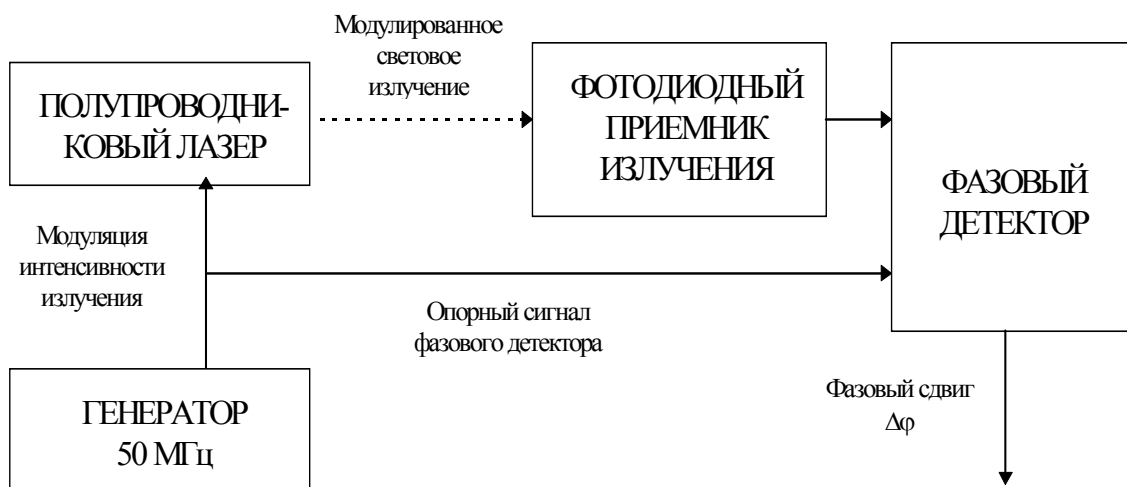
## Лабораторный практикум по ФИЗИКЕ

### ОПТИКА

Митин И.В., Салецкий А.М., Степанов А.В.

ЗАДАЧА 412.

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА



МОСКВА 2002

### Цель работы

Экспериментальное определение скорости света в воздухе и некоторых прозрачных веществах.

### Идея эксперимента

Излучение полупроводникового лазера, модулированное с частотой 50 МГц, попадает в приемник света, удаленный от источника на некоторое расстояние. Измеряя зависимость разности между фазами принимаемого и излучаемого сигналов от расстояния между излучателем и приемником, можно рассчитать скорость света.

#### §1. Фазовая и групповая скорости света.

Скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме (или скорость света) является одной из основополагающих мировых констант. В соответствии с современными представлениями, скорость света является максимально возможной (предельной) скоростью распространения взаимодействия между телами, силовых полей и т.д. Поэтому эксперименты по определению скорости света всегда занимали особое место среди физических измерений.

Известно, что система уравнений Максвелла, записанная для однородной изотропной среды в отсутствие токов и зарядов, позволяет получить два уравнения для взаимно перпендикулярных векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}(\vec{r}, t)$ :

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon \mu \cdot \varepsilon_0 \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \varepsilon \mu \cdot \varepsilon_0 \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная;  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м  $\approx 12.57 \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная;  
 $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды;  
 $\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды.

Решения этих уравнений, называемых *волновыми уравнениями*, описывают электромагнитную волну, распространяющуюся в пространстве. Так как уравнения (1) и (2) одинаковы по форме, в дальнейшем будем рассматривать лишь уравнение (1) для вектора  $\vec{E}(\vec{r}, t)$ . Пусть, например, компоненты вектора  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  зависят только от одной пространственной переменной  $z$ . Тогда любое решение уравнения (1) может быть представлено в виде некоторой функции  $\bar{\Phi}$ , зависящей от аргумента  $t \pm z/v$ :

$$\vec{E}(z, t) = \bar{\Phi}(t \pm z/v),$$

где

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu \cdot \varepsilon_0 \mu_0}}. \quad (3)$$

Физическая величина  $v$  имеет смысл скорости распространения электромагнитной волны в среде, причем знак «минус» соответствует волне, распространяющейся в положительном направлении оси  $z$ , знак «плюс» - в отрицательном направлении.

В случае вакуума ( $\varepsilon = \mu = 1$ ) скорость распространения:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}. \quad (4)$$

Наиболее интересным представляется случай, когда функция  $\bar{\Phi}$  является гармонической функцией. Запишем решение уравнения (1) в виде плоской монохроматической волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси  $z$ :

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) + \varphi\right] = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi),$$

где  $\omega$  - циклическая частота;

$k = \frac{\omega}{v}$  - волновое число;

$\omega t - kz + \varphi$  - фаза волны.

Найдем скорость перемещения поверхности постоянной фазы (или *фазовую скорость*) вдоль оси  $z$ . Для этого продифференцируем по времени выражение

$$\omega t - kz + \varphi = \text{const},$$

в итоге получим:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\omega}{k} = v. \quad (5)$$

Таким образом, физическая величина  $v$ , задаваемая формулами (3) и (5), есть *фазовая скорость* распространения монохроматической электромагнитной волны.

Если характеризовать монохроматическую волну периодом колебаний  $T$  и длиной волны  $\lambda$ , то можно записать:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad v = \frac{\lambda}{T}.$$

Выражение (4) для  $v$  можно переписать в виде:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad (6)$$

где  $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$  - *показатель преломления* среды, равный отношению скорости распространения света в вакууме к фазовой скорости распространения света в среде.

Обратим внимание на то, что при переходе электромагнитной волны из одной среды в другую частота  $\omega$  (и период  $T$ ) остается неизменной, а изменяется длина волны  $\lambda$  (и волновое число  $k$ ). В частности, при переходе света из вакуума в среду с показателем преломления  $n$  длина волны уменьшается в  $n$  раз, а волновое число возрастает в  $n$  раз.

Из многочисленных экспериментов известно, что в общем случае показатель преломления  $n$  любой среды (кроме вакуума) зависит от частоты  $\omega$  распространяющегося в среде света, т.е. среда характеризуется *дисперсией*. Следовательно, фазовая скорость также зависит от частоты. Как известно, идеальной монохроматической волны с частотой  $\omega$  не существует в природе, так как такая волна должна была бы быть бесконечно протяженной и в пространстве, и во времени. С помощью такой волны, если бы она и существовала, невозможна передача информации – происходит только перенос энергии. Поэтому для передачи информации используются световые импульсы ограниченной длительности, которые можно представить в виде интеграла Фурье, т.е. в виде суммы бесконечного числа монохроматических составляющих. Часто световые импульсы называют *волновыми пакетами*. При распространении такого светового импульса в среде с дисперсией происходит его деформация, или «расплывание» волнового пакета. Если среда обладает сильной дисперсией, то форма импульса может измениться существенным образом. Если же дисперсия невелика, то о скорости распространения импульса можно говорить как о скорости распространения какой-либо его точки, например, максимума его амплитуды. Такую скорость обычно называют *групповой* скоростью.

Чтобы найти выражение для групповой скорости, рассмотрим распространение в среде с дисперсией двух монохроматических волн с одинаковыми амплитудами и близкими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\begin{aligned} \bar{E}_1(z,t) &= \bar{E}_0 \cdot \cos(\omega_1 t - k_1 z), \\ \bar{E}_2(z,t) &= \bar{E}_0 \cdot \cos(\omega_2 t - k_2 z). \end{aligned}$$

Тогда для результирующей волны получим:

$$\bar{E}(z,t) = \bar{E}_1(z,t) + \bar{E}_2(z,t) = 2 \cdot \bar{E}_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z\right) \cdot \cos(\omega t - kz),$$

где  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_1, \omega_2$ ;  $\Delta k = k_1 - k_2 \ll k_1, k_2$ ;

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \gg \Delta\omega; \quad k = \frac{k_1 + k_2}{2} \gg \Delta k.$$

Эту волну можно представить как гармоническую волну с медленно меняющейся «амплитудой»  $\bar{A}(z,t) = 2 \cdot \bar{E}_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z\right)$ . Тогда скорость распространения максимума «амплитуды», или групповую скорость  $u$ , можно найти, продифференцировав по  $t$  выражение, стоящее под знаком косинуса:

$$u = \frac{\Delta\omega}{\Delta k},$$

или в пределе

$$u = \frac{d\omega}{dk}. \quad (7)$$

Из соотношений (5) и (7) можно найти связь между фазовой и групповой скоростями:

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(k \cdot v)}{dk} = v + k \cdot \frac{dv}{dk}. \quad (8)$$

Так как  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  и  $dk = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \cdot d\lambda$ , то формула (8) представима в виде:

$$u = v + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{dv}{(-2\pi \cdot d\lambda)} \cdot \lambda^2 = v - \lambda \cdot \frac{dv}{d\lambda}, \quad (9)$$

называемой *формулой Рэлея*.

Если известна зависимость показателя преломления среды от частоты  $n=n(\omega)$ , то из соотношений

$$k = \frac{\omega}{c} \cdot n, \quad \frac{dk}{d\omega} = \frac{n}{c} + \frac{\omega}{c} \cdot \frac{dn}{d\omega} = \frac{n + \omega \cdot \frac{dn}{d\omega}}{c}$$

следует

$$u = \frac{c}{n + \omega \cdot \frac{dn}{d\omega}}. \quad (10)$$

Полученные соотношения позволяют ответить на вопрос, почему измерения скорости света в среде с показателем преломления  $n$  иногда дают значения, отличные от  $c/n$ . В частности, Майкельсон, измеряя скорость распространения света в сероуглероде, обнаружил, что она в 1,75 раза меньше скорости света в вакууме. В то же время показатель преломления сероуглерода, найденный на основе измерения углов падения и преломления на границе двух сред, равен  $n=1,64$ . Оказалось, что сероуглерод обладает сильной дисперсией, в результате групповая скорость  $u$  оказалась существенно меньшей, чем фазовая  $v$ , равная  $c/n$ . При измерении скорости света в среде мы обычно имеем дело с распространением световых импульсов, поэтому в таких экспериментах измеряется не фазовая, а групповая скорость.

Формула (7) для групповой скорости была получена при условии, что волновой пакет состоял из двух монохроматических составляющих. Реально волновой пакет является совокупностью целого набора длин волн шириной  $\Delta\lambda$  (или  $|\Delta k| = \frac{2\pi}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda = \frac{k}{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ ). Из формул (8)-(9) можно заметить, что групповая скорость  $u$  является постоянной для волнового пакета только при условии, что величина  $\frac{dv}{d\lambda}$  (или  $\frac{dv}{dk}$ ) остается неизменной для всего диапазона длин волн данного волнового пакета. Только в этом случае групповая скорость является адекватной характеристикой распространения волнового пакета в диспергирующей среде и световой импульс будет распространяться, слабо изменяя свою форму.

## §2. Скорость света с точки зрения молекулярного строения вещества.

Как отмечалось выше, фазовая скорость света  $v$  в веществе в  $n$  раз меньше скорости света  $c$  в вакууме. Несомненный интерес представляет выяснение причин такого уменьшения скорости света с точки зрения строения вещества. Рассмотрим предложенную в [3] модель, основанную на уравнениях классической физики и дающую согласующиеся с экспериментом результаты.

Так как размеры ядер атомов существенно меньше расстояний между отдельными атомами, то любую среду можно рассматривать как вакуум с редкими вкраплениями вещества (ядра атомов). Когда в среде распространяется световая волна, то под действием электрического поля волны (влиянием магнитного поля можно пренебречь) возникают колебания электронов и атомных ядер. В классической электронной теории дисперсии принято считать, что воздействие поля существенно сказывается только на характере движения внешних (или оптических) электронов. Оптический электрон рассматривается как затухающий осциллятор с характерной собственной частотой колебаний  $\omega_0$  и коэффициентом затухания  $\gamma$ . Уравнение движения электрона под действием внешнего электрического поля волны имеет вид:

$$\ddot{\bar{r}} + 2\gamma \dot{\bar{r}} + \omega_0^2 \bar{r} = -\frac{e}{m} \cdot \bar{E}_0 \cdot e^{-i\omega t},$$

где  $\bar{r}$  - смещение электрона из положения равновесия.

Данное уравнение является уравнением вынужденных колебаний, его решение представляет собой суперпозицию собственных затухающих колебаний на частоте, близкой к  $\omega_0$ , и вынужденных незатухающих колебаний на частоте возбуждения  $\omega$ . Амплитуда и фаза вынужденных колебаний после затухания собственных колебаний зависят от соотношения собственной частоты  $\omega_0$  и частоты вынуждающего поля  $\omega$ . Теория дисперсии подробно рассматривается в литературе (см., например, [1]-[4]), здесь мы приведем только конечные результаты.

При выполнении условия  $\omega \approx \omega_0$  в веществе возникает поглощение, в результате энергия падающей волны превращается в тепловую энергию движения атомов. Отметим, что обычно существуют не одна, а целый набор собственных частот, поэтому каждое вещество может иметь полосы поглощения.

Если же частота  $\omega$  не попадает в полосы поглощения вещества, то атомы, колеблющиеся на частоте  $\omega$ , становятся источниками вторичных волн, когерентных первичной (падающей) волне. Таким образом, в среде распространяются (и интерферируют!) две волны - первичная (падающая) и вторичная (создаваемая колеблющимися электронами). Для нахождения параметров вторичной волны можно воспользоваться теорией дифракции (метод кольцевых зон Френеля). Из этой теории известно, что суммарное излучение вторичных источников, расположенных в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения первичной волны, составляет половину (по амплитуде) излучения от первой зоны Френеля. При этом напряженность поля вторичной волны смещена по фазе на  $\frac{\pi}{2}$  от поля первичной волны. Амплитуда вторичной волны будет пропорциональна числу вторичных источников (т.е. концентрации атомов) и амплитуде колебаний этих источников (т.е. дипольному моменту отдельного атома). В результате можно показать (см.[3], §68), что при прохождении слоя вещества толщиной  $L$  с показателем преломления  $n$ , возникает дополнительная (по сравнению с распространением волны в вакууме) разность фаз  $\Phi$ , задаваемая формулой:

$$\Phi = (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L.$$

Такую же формулу можно получить, если считать, что фазовая скорость распространения света в среде в  $n$  раз меньше скорости света в вакууме. Таким образом, уменьшение фазовой скорости света в среде можно объяснить интерференцией излучения от вторичных источников (колеблющихся оптических электронов) и первичной волны.

Отметим, что если на вещество падает световой импульс, то его фронт должен распространяться через вещество со скоростью света в вакууме  $c$ , так как существует определенное время установления вынужденных колебаний. И только после затухания собственных колебаний оптических электронов фазовая скорость света уменьшится до значения

$$v = \frac{c}{n}.$$

### §3. Измерение скорости света.

#### §3.1. Основные принципы измерения скорости света.

Принцип действия установки для нахождения скорости света основан на измерении времени прохождения световым импульсом заданного расстояния. Если приемник света удален от источника на некоторое расстояние  $L$ , то световой импульс от источника будет зарегистрирован с временным запаздыванием  $\Delta t$ , определяемым соотношением

$$\Delta t = L/u,$$

где  $u$  - скорость распространения импульса.

Обычно для измерений используют не световой импульс, а модулированное оптическое излучение, т.е. интенсивность света изменяется по гармоническому закону с частотой  $\omega$ . Тогда запаздывание приводит к тому, что фаза принимаемого сигнала будет отличаться от фазы излучаемого сигнала. Разность фаз  $\Delta\phi$  пропорциональна величине запаздывания  $\Delta t$  и определяется выражением:

$$\Delta\phi = \omega \Delta t = 2\pi\Delta t/T,$$

где  $T$  – период модуляции. Измерение разности фаз излучаемого и принимаемого сигналов позволяет определить величину временного запаздывания, а тем самым и скорость распространения сигнала.

Так как излучаемый и принимаемый сигналы изменяются по гармоническому закону, то при  $\Delta t = T$  разность фаз  $\Delta\varphi = 2\pi$  и, следовательно, сигналы неотличимы друг от друга. Поэтому необходимо, чтобы время запаздывания  $\Delta t$  не превышало периода модуляции  $T$ . Кроме этого, для надежной регистрации соответствующего фазового сдвига время запаздывания  $\Delta t$  не должно быть и много меньше периода  $T$ . Следовательно, время запаздывания  $\Delta t$  должно быть сравнимо с периодом  $T$ , но не превышать его.

Если модуляцию интенсивности излучения осуществлять на частотах порядка нескольких десятков мегагерц, то «длина волны» такого модулированного света составляет несколько метров. В этом случае оказывается возможным провести измерения скорости света на установке размера порядка 1 метра.

Функциональная схема установки показана на рис. 1.

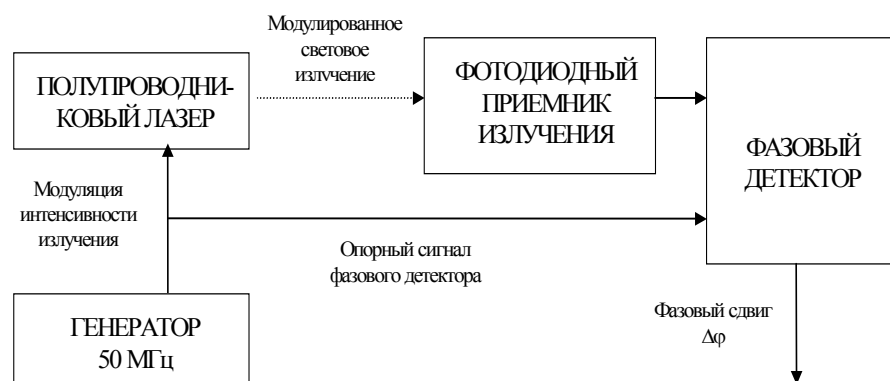


Рис. 1. Функциональная схема установки.

Источником светового излучения (длина волны  $\lambda \approx 0.65 \mu\text{м}$ ) является полупроводниковый инжекционный лазер. Интенсивность излучения изменяется во времени (модулируется) путем изменения тока накачки лазера с помощью генератора, который вырабатывает близкое к гармоническому напряжение с частотой 50 МГц. Излучение, пройдя фиксированное (регулируемое) расстояние, попадает на приемник. Приемником света служит полупроводниковый фотодиод. Сигнал фотодиода усиливается и подается на фазовый детектор. На другой вход фазового детектора подается так называемый опорный сигнал, относительно которого измеряется сдвиг фазы  $\Delta\varphi$  принимаемого сигнала. Опорным сигналом служит выходной сигнал генератора, модулирующего интенсивность света.

Помимо временной задержки, возникающей при распространении света от источника к приемнику, величина регистрируемой разности фаз зависит также от временных задержек при распространении по проводам сигнала модуляции интенсивности лазера и опорного сигнала, а также от фазовых сдвигов в электронных схемах установки. Этот дополнительный сдвиг фаз не зависит от расстояния между источником и приемником, а также от среды распространения светового излучения. Величина дополнительного фазового сдвига не существенна при измерениях, так как интерес представляет лишь изменение разности фаз с изменением расстояния.

### §3.2. Принцип работы фазового детектора.

Фазовый детектор измеряет разность фаз между сигналом, поступающим с выхода приемника излучения, и опорным сигналом. Поскольку измерение разности фаз непосредственно на частоте модуляции 50 МГц технически неудобно, используется предварительное понижение частоты сигналов в область звуковых частот. При этом информация о разности фаз сигналов сохраняется.

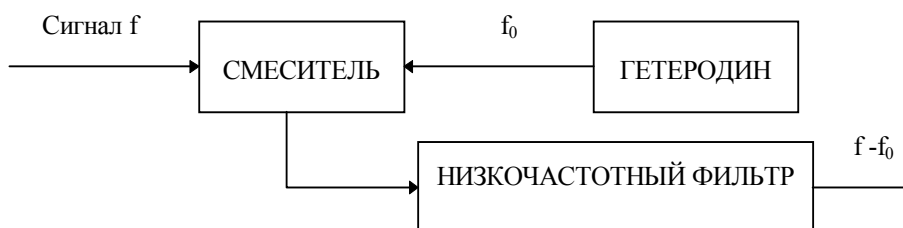


Рис.2. Схема понижения частоты.

Используемая схема понижения частоты представлена на рис.2. В ее состав входят вспомогательный генератор (гетеродин), смеситель и низкочастотный фильтр. Гетеродин вырабатывает гармонический сигнал с частотой  $f_0$ , близкой к частоте исходного сигнала  $f$ , которую необходимо понизить. Смеситель представляет собой нелинейное электронное устройство, выходной сигнал которого содержит составляющую, пропорциональную произведению входных сигналов.

Пусть, к примеру, входной сигнал и сигнал с гетеродина имеют вид:

$$x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \cdot \sin(2\pi f t + \Delta\varphi), \quad x_{\text{гет}} = A_{\text{гет}} \cdot \sin(2\pi f_0 t),$$

где  $\Delta\varphi$  - разность фаз. Тогда на выходе смесителя получится сигнал, пропорциональный выражению:

$$\begin{aligned} x_{\text{вых}} &\sim x_{\text{вх}} \cdot x_{\text{гет}} = A_{\text{вх}} \cdot A_{\text{гет}} \cdot \sin(2\pi f t + \Delta\varphi) \cdot \sin(2\pi f_0 t) = \\ &= \frac{A_{\text{вх}} \cdot A_{\text{гет}}}{2} \cdot (\cos(2\pi(f - f_0)t + \Delta\varphi) - \cos(2\pi(f + f_0)t + \Delta\varphi)) \end{aligned}$$

Таким образом, сигнал на выходе смесителя представляет собой сумму гармонических сигналов с частотами, равными разности частот  $f - f_0$  и сумме частот  $f + f_0$ . При этом информация о разности фаз  $\Delta\varphi$  сохраняется и в выходном сигнале. С помощью низкочастотного фильтра, подключенного к выходу смесителя, выделяется составляющая с разностной частотой  $f - f_0$ , а остальные составляющие выходного сигнала смесителя подавляются. Разностную частоту принято также называть промежуточной частотой. В экспериментальной установке частота гетеродина выбрана такой, чтобы разностная частота лежала в диапазоне звуковых частот (порядка сотен герц - единиц килогерц). Операция понижения частоты осуществляется как с сигналом, идущим от фотоприемника, так и с опорным сигналом.

Рассмотрим теперь процедуру измерения разности фаз двух гармонических сигналов на разностной частоте.

Прежде всего, каждый из сигналов преобразуется в сигнал прямоугольной формы. Преобразование производится с помощью специальной электронной схемы – компаратора. Выходное напряжение компаратора равно нулю, если значение входного сигнала отрицательное, и равно некоторому положительному постоянному значению  $A$  при положительном значении входного сигнала. Выходной сигнал компаратора относится к типу цифровых или логических сигналов, которые могут иметь лишь два значения, условно принимаемые за логический нуль (0) и за логическую единицу (1). Так как данный сигнал был получен из синусоидального, то и длительности «нулевого» и «единичного» промежутков равны.

Далее с помощью стандартной цифровой микросхемы для полученных цифровых сигналов выполняется логическая операция «исключающее ИЛИ». Сигналы подаются на два входа микросхемы, и выходной сигнал принимает значение 0, если входные сигналы имеют одинаковые значения, и принимает значение 1, если значения входных сигналов не совпадают. На рис.3 показан результат выполнения этой операции над цифровыми сигналами, которые получены из гармонических сигналов, имеющих фазовый сдвиг относительно друг друга.

Из рис.3 видно, что выходной сигнал схемы «исключающее ИЛИ» имеет вид прямоугольных импульсов. Период следования импульсов равен половине периода входных сигналов  $T$ , а длительность импульсов равна задержке  $\Delta t$  одного входного сигнала относительно другого.

Затем полученный импульсный сигнал преобразуется в константу, равную среднему значению  $U$  импульсного сигнала за период  $T$ . Нетрудно заметить, что среднее значение  $U$  может быть найдено по формуле:

$$U = 2A \cdot \frac{\Delta t}{T}, \quad \Delta t \leq T/2,$$

где  $A$  – амплитуда импульсного сигнала (напряжение, соответствующее логической единице). Таким образом, в результате усреднения получается напряжение, пропорциональное задержке и,

следовательно, фазовому сдвигу входных сигналов. В описываемой установке операция усреднения сигнала реализована с помощью интегрирующей RC-цепочки.

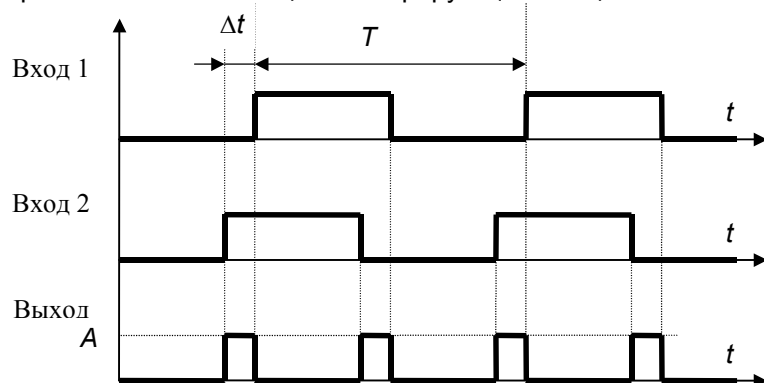


Рис.3. Схема работы устройства «исключающее ИЛИ»

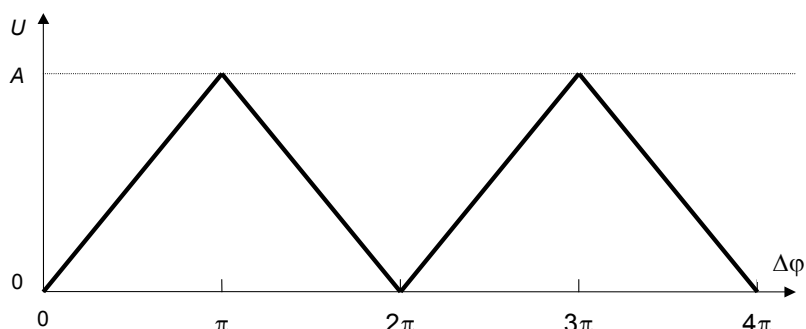


Рис.4. Зависимость выходного напряжения  $U$  фазового детектора от разности фаз  $\Delta\varphi$ .

Зависимость выходного напряжения  $U$  фазового детектора от разности фаз  $\Delta\varphi$  между входными сигналами представлена на рис.4. При нулевой разности фаз (нулевой задержке) длительность импульсов на выходе схемы «исключающее ИЛИ» равна нулю, следовательно, и среднее напряжение  $U$  равно нулю. С увеличением разности фаз напряжение линейно растет и достигает максимального значения, равного  $A$ , когда входные сигналы находятся в противофазе (сдвиг фаз  $\pi$ ). При дальнейшем увеличении фазового сдвига напряжение линейно уменьшается и достигает нулевого значения при разности фаз, равной  $2\pi$ . После этого картина повторяется с периодом  $2\pi$ . Максимальное значение напряжения  $A$  на выходе фазового детектора равно напряжению логической единицы элемента «исключающее ИЛИ» и для данной установки составляет приблизительно 5 вольт.

Величину  $A$  легко определить экспериментально. Если на Вход 1 сигнал не будет поступать (например, луч лазера можно перекрыть рукой), то выходной сигнал схемы «исключающее ИЛИ» будет повторять сигнал на Входе 2. Следовательно, напряжение на выходе фазового детектора будет равно  $A/2$ .

#### §4. Проведение экспериментальных исследований.

##### §4.1. Блок-схема установки.

Общая блок-схема установки представлена на рис.5.

В блоке передатчика находятся полупроводниковый лазер и генератор синусоидального напряжения, модулирующий интенсивность лазерного излучения с частотой 50МГц. Передатчик соединяется с блоком приемника с помощью коаксиального кабеля, по которому передается опорный сигнал для фазового детектора. По этому же кабелю в передатчик поступает постоянное напряжение питания.

В блоке приемника находится регистрирующая часть установки. Лазерный луч падает на полупроводниковый фотодиод; сигнал фотодиода, пропорциональный интенсивности излучения, усиливается высокочастотным усилителем и подается на смеситель, понижающий частоту сигнала в область звуковых частот. С помощью аналогичного смесителя понижается частота опорного сигнала. Оба смесителя работают от одного гетеродина, поэтому значения промежуточной частоты сигнала фотодиода и опорного сигнала одинаковы. Амплитуда сигнала фотодиода на



промежуточной частоте пропорциональна интенсивности излучения, принимаемого фотодиодом. Этот сигнал используется для оптической юстировки установки по максимуму амплитуды сигнала и выведен на внешний разъем блока приемника.

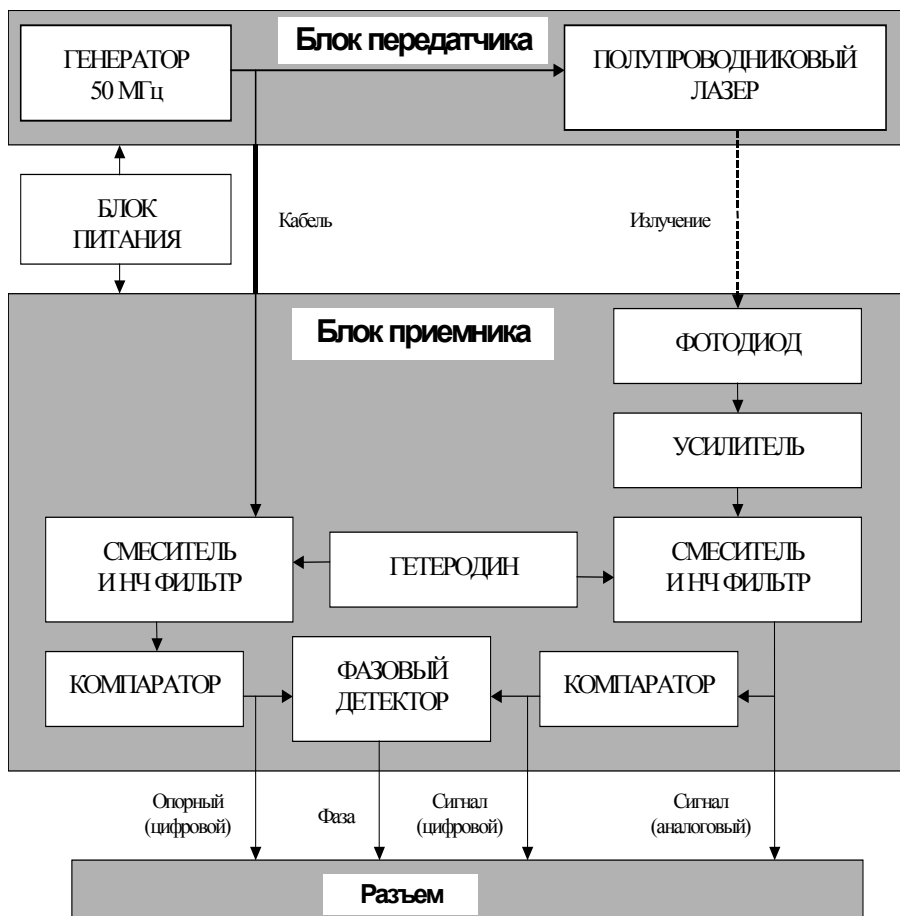


Рис.5. Блок-схема установки

Далее сигнал фотодиода и опорный сигнал преобразуются с помощью двух идентичных компараторов в цифровую форму. Эти цифровые сигналы с промежуточной частотой имеют ту же разность фаз, что и высокочастотные сигналы фотодиода и опорного сигнала. Оба цифровых сигнала выведены на разъем блока приемника.

Разность фаз сигнала фотодиода и опорного сигнала измеряется фазовым детектором, включающим элемент «исключающее ИЛИ» и интегрирующую RC-цепочку. Выходное напряжение детектора выведено на разъем блока приемника. Зависимость выходного напряжения от разности фаз входных сигналов была рассмотрена ранее (см. рис.4). Точное значение угла наклона этой характеристики, равное  $A/\pi$  определяется при калибровке. При измерениях следует избегать значений выходного напряжения, близких к экстремальным из-за нелинейности характеристики реального фазового детектора в этой области.

Питание установки осуществляется от внешнего источника постоянного напряжения 8 вольт. Напряжение питания подается на разъем блока приемника.

#### §4.2. Схема экспериментальной установки.

Блоки передатчика и приемника размещены на оптической скамье 1 (рис.6), представляющей собой установленный на двух опорах стержень квадратного сечения.

Передатчик (лазер) 4 размещен на основании 2, которое может перемещаться по стержню при вращении ручки 3, расположенной на основании.

Приемник 5 установлен стационарно в гнезде на конце скамьи. Перед приемником на специальной консоли 6 находится собирающая линза 7, фокальная плоскость которой совпадает с плоскостью фотоприемника. Необходимость использования такой линзы связана с тем, что при перемещении передатчика вдоль оптической скамьи луч лазера немного смещается, а поскольку фотоприемник расположен строго в фокусе линзы, то такие смещения не сказываются на работе системы. При юстировке системы линза должна быть отведена в сторону.

На опоре рядом с приемником размещена панель 8 с разъемами, на которую поступают сигналы от приемника (см. рис.5)<sup>1</sup>:

- 1) аналоговый (синусоидальный) с выхода смесителя и НЧ фильтра;
- 2) опорный цифровой (прямоугольный) с выхода компаратора опорного канала;
- 3) измеряемый цифровой (прямоугольный) с выхода компаратора измерительного канала;
- 4) аналоговый (напряжение) с фазового детектора, пропорциональный разности фаз.

К первым трем разъемам можно подключить осциллограф 9 для визуального контроля работы измерительной схемы. К четвертому разъему подключен цифровой вольтметр 10. Значение измеряемого напряжения изменяется при перемещении передатчика.

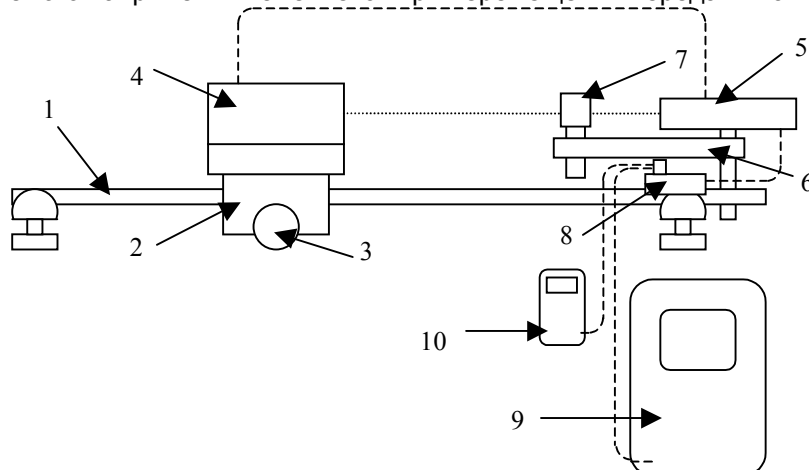


Рис.6. Схема экспериментальной установки.

Вдоль скамьи установлена шкала (на рисунке не показана), с помощью которой определяются координаты излучателя.

Эксперимент по измерению скорости света в веществе проводится на трех образцах длиной около 30 сантиметров: один - из оргстекла, два других – кюветы с жидкостями (вода и глицерин). Каждый из образцов размещен в корпусе, имеющем две вертикальные стойки. Все три образца располагаются в специальном держателе из оргстекла, находящемся рядом с установкой.

**Внимание! Будьте предельно аккуратны!!!** Образцы с жидкостями находятся в стеклянных кюветках. Вблизи одной из стоек имеется стеклянный отросток, через который кюветка заполнялась жидкостью. При установке образцов в опоры необходимо следить, чтобы не отбить этот отросток и не разбить кюветку. По окончании измерений образец необходимо сразу же поставить на его место в специальном держателе.

Для размещения образца на пути лазерного луча на скамью устанавливаются две специальные опоры (на рисунке не показаны), в гнезда которых вставляются поочередно стойки держателей каждого из образцов.

#### §4.3. Выполнение измерений.

Перед началом измерений следует провести юстировку системы – необходимо так установить излучатель, чтобы при его перемещении вдоль скамьи луч, выходящий из него, всегда попадал точно на фотоприемник (линза 7 должна быть отведена в сторону). Корпус излучателя закреплен на основании четырьмя винтами, их регулировка требует определенного опыта. Поэтому обычно система уже настроена, в случае необходимости проведения дополнительной юстировки следует обратиться к преподавателю или лаборанту. Самостоятельно проводить юстировку **не рекомендуется**.

Для проверки качества юстировки необходимо:

- ввести в пучок линзу 7 так, чтобы сфокусированное излучение попадало точно на фотоприемник;
- подключить осциллограф к разъему 1 и получить на экране синусоидальный сигнал;
- перемещая излучатель вдоль всей скамьи, убедиться, что синусоида на экране осциллографа наблюдается устойчиво, ее амплитуда изменяется незначительно (в пределах 20-30 процентов)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Число разъемов на панели 8 может быть уменьшено.

<sup>2</sup> Вследствие несовершенства установки при изменении направления перемещения излучателя возможно смещение луча и существенное изменение амплитуды. Поэтому при изменении направления перемещения следует слегка изменить положение линзы.

### Упражнение 1. Измерение скорости света в воздухе.

1. Проведите юстировку системы, как описано выше.  
 2. Перекройте рукой луч излучателя так, чтобы излучение не попадало на приемник. Синусоидальный сигнал на экране осциллографа пропадет. Запишите значение напряжения  $U_0$  на шкале цифрового вольтметра. Как отмечалось выше, оно будет равно половине амплитудного значения сигнала с выхода фазового детектора (см. рис.4):

$$U_0 = A/2.$$

3. Установите излучатель на расстоянии 10-15 сантиметров от приемника. Установите линзу 7 так, чтобы амплитуда сигнала на экране осциллографа была максимальной.

Запишите значения координаты  $x_1$  излучателя и напряжения  $U_1$  на выходе фазового детектора.

4. Перемещая излучатель вдоль скамьи с шагом 5 сантиметров, снимите зависимость  $U_i(x_i)$ . Следите за тем, чтобы при измерениях амплитуда сигнала на экране осциллографа изменялась незначительно. Если это условие не выполняется, то следует либо еще раз провести юстировку, либо слегка изменить положение линзы и добиться максимальной амплитуды сигнала на экране осциллографа.

5. Постройте график зависимости  $U_i(x_i)$ . Эта зависимость должна быть линейной. По графику, используя метод наименьших квадратов (МНК), найдите тангенс угла наклона  $\left(\frac{\Delta U}{\Delta x}\right)_{\text{экс}}$ .

Получите оценку погрешности этой величины.

6. В соответствии с приведенными выше рассуждениями и рис.4 амплитудному значению  $A$  сигнала на выходе фазового детектора соответствует разность фаз  $\Delta\varphi = \pi$  или разность хода

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2\nu},$$

где  $c$  – искомая скорость света;

$\nu=50\text{МГц}$  - частота<sup>3</sup> модуляции;

$\lambda$  - «длина волны» модулированного излучения (не путать с длиной волны излучения лазера!).

Тогда значение тангенса угла наклона должно определяться по формуле:

$$\left(\frac{\Delta U}{\Delta x}\right)_{\text{теор}} = \frac{A}{\Delta x} = \frac{2U_0 \cdot 2\nu}{c} = \frac{4U_0 \cdot \nu}{c}. \quad (11)$$

Отсюда можно рассчитать значение скорости света:

$$c = \frac{4U_0 \cdot \nu}{\left(\frac{\Delta U}{\Delta x}\right)_{\text{экс}}}. \quad (12)$$

Получите оценку погрешности найденного значения скорости света.

7. Повторите измерения, перемещая излучатель к приемнику с шагом 5 сантиметров. Сравните полученные результаты.

### Упражнение 2. Измерение скорости света в веществе.

1. Установите излучатель на расстоянии 40-60 сантиметров от приемника. Установите линзу так, чтобы амплитуда сигнала на экране осциллографа была максимальной. Запишите значение напряжения  $U_1$  на выходе фазового детектора.

2. Не перемещая излучатель, установите между ним и приемником держатель с образцом из органического стекла. Для этого установите на скамью две специальные опоры, в которые вставляются стойки держателей образца. Установите образец так, чтобы лазерный луч проходил через его центральную часть.

Так как образец является толстой пластинкой, торцы которой в общем случае не параллельны, то луч после прохождения образца может сместиться, и, как следствие, существенно уменьшится выходной сигнал. В этом случае уберите линзу и постарайтесь уменьшить величину смещения. Для этого, варьируя высоту закрепления одной из стоек образца, добейтесь минимального смещения луча в вертикальном направлении. Если смещение луча в горизонтальном направлении велико (около 1 см), то разверните образец на 180 градусов вокруг вертикальной оси.

<sup>3</sup> Точное значение частоты модуляции указано на установке.

Установите линзу и добейтесь максимальной амплитуды сигнала на осциллографе. Запишите получившееся значение напряжения  $U_2$  на выходе фазового детектора.

3. Появление образца приводит к дополнительной разности хода

$$\Delta x = (n - 1) \cdot d ,$$

где  $n$  – показатель преломления вещества,  $d$  – длина образца. Тогда

$$\left( \frac{\Delta U}{\Delta x} \right)_{\text{экс}} = \frac{|U_2 - U_1|}{(n - 1) \cdot d} . \quad (13)$$

Сопоставляя формулы (11) и (13), получим для показателя преломления:

$$n = 1 + \frac{|U_2 - U_1| \cdot c}{4U_0 \cdot v \cdot d} . \quad (14)$$

4. Аккуратно снимите образец и установите его на место в специальном держателе. Зафиксируйте значение напряжения на выходе фазового вольтметра. Если оно сильно отличается от первоначального значения  $U_1$ , то следует повторить измерения.

5. Рассчитайте по формуле (14) значение показателя преломления. Оцените погрешность найденного значения.

6. Найдите скорость света в веществе  $v$  из соотношения:

$$v = \frac{c}{n} .$$

7. Измените положение излучателя и повторите измерения в соответствии с пунктами 2-6. При существенном расхождении результатов проведите измерения еще раз.

8. По изложенной выше методике проведите измерения показателя преломления и скорости света для остальных образцов.

**Внимание! Будьте предельно аккуратны при установке образцов с жидкостями!!!**

По окончании измерений образец необходимо сразу же поставить на его место в держателе.

#### Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. Гл. XX. С. 417-431.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986. Гл. 2. С. 126-136.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1985. §8, 68.
4. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. §12.