

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ДВУХЛУЧЕВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ**

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу  
«Оптические и акустооптические методы обработки информации»  
для студентов направления подготовки  
200600 и 200700 «Фотоника и оптоинформатика»

**Зайцева, Оксана Владимировна**  
**Мельник, Константин Петрович**  
**Быков, Виталий Иванович**

Двухлучевые интерферометры: методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Оптические и акустооптические методы обработки информации» для студентов направления подготовки 200600 и 200700 «Фотоника и оптоинформатика» / О.В. Зайцева, К.П. Мельник, В.И. Быков; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 40 с.

Целью настоящего практикума является изучение двухлучевых интерферометров Майкельсона, Маха\_Цандера и Жамена и их применения для исследований оптической однородности оптических элементов и электрооптических коэффициентов нелинейных кристаллов.

Предназначено для студентов очной, очно-заочной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика», по дисциплине «Оптические и акустооптические методы обработки информации»

© Зайцева Оксана Владимировна, 2012  
© Мельник Константин Петрович, 2012  
© Быков Виталий Иванович, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ДВУХЛУЧЕВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ**

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу  
«Оптические и акустооптические методы обработки информации»  
для студентов направления подготовки  
200600 и 200700 «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчики

магистрант каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ О.В. Зайцева

магистрант каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ К.П. Мельник

доцент каф. физики  
\_\_\_\_\_ В.И. Быков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г

## **Введение**

В настоящее время значительный интерес уделяется разработке высокочувствительных волоконно-оптических измерительных систем (ВОИС), защищенных от медленных изменений внешних условий. Данная задача может быть решена путем использования для обработки сигналов ВОИС динамических голограмм, сформированных в фоторефрактивных кристаллах (ФРК). При этом для формирования голограммы, как правило, используется пропускающая геометрия, в рамках которой лучи распространяются в кристалле под малым углом в одном направлении. Однако для быстрой и эффективной записи такой голограммы необходимо прикладывать к кристаллу сильное электрическое поле. Это делает измерительную систему сложной, дорогой и энергоемкой. Вместе с тем, эффективность голограммы может быть существенно повышена в случае ее записи в отражательной геометрии, когда лучи распространяются в кристалле навстречу друг другу. При этом могут быть достигнуты высокие коэффициенты усиления без приложения к кристаллу внешнего электрического поля.[3]

Преимущества бесконтактных методов и средств вибрационного контроля и точного позиционирования с использованием лазеров по сравнению с контактными методами определили причины широкого их использования.

Бесконтактные методы основаны на сравнении параметров, подлежащих контролю, с длиной волны излучения лазера. Эти методы являются наиболее точными по сравнению с другими методами измерения. С помощью лазерных приборов могут быть измерены амплитуды колебаний от долей ангстрема до нескольких метров в практически неограниченном частотном диапазоне, а линейные перемещения – от долей микрона до десятков метров.

<b>Оглавление</b>	
<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Литературный обзор</b> .....	5
1.1 Интерференция волн.....	5
1.2 Интерферометры.....	11
1.3 Принцип действия адаптивного интерферометра.....	12
1.4 Конфигурации двулучевых интерферометров.....	13
1.5 Интерферометр Майкельсон.....	13
Лабораторная работа №1. Изучение основных явлений интерференции света с помощью интерферометра Майкельсона.....	14
1.6 Маха-Цендера.....	22
Лабораторная работа №2. Исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах на базе интерферометра Маха-Цендера.....	23
Масштабная линейка.....	26
1.7 Жамен.....	27
Лабораторная работа №3. Изучение электрооптического эффекта в интерферометре Жамена.....	29
<b>Список рекомендованной литературы</b> .....	36

# 1. Литературный обзор

## 1.1 Интерференция волн.

Интерференция волн — взаимное усиление или ослабление амплитуды двух или нескольких когерентных волн, одновременно распространяющихся в пространстве. Сопровождается чередованием максимумов и минимумов (пучностей) интенсивности в пространстве. Результат интерференции (интерференционная картина) зависит от разности фаз накладывающихся волн.

Интерферировать могут все волны, однако устойчивая интерференционная картина будет наблюдаться только в том случае, если волны имеют одинаковую частоту и колебания в них не ортогональны. Интерференция может быть стационарной и нестационарной. Стационарную интерференционную картину могут давать только полностью когерентные волны. Например, две сферические волны на поверхности воды, распространяющиеся от двух когерентных точечных источников, при интерференции дадут результирующую волну, фронтом которой будет сфера.

При интерференции энергия волн перераспределяется в пространстве. Это не противоречит закону сохранения энергии потому, что в среднем, для большой области пространства, энергия результирующей волны равна сумме энергий интерферирующих волн.

При наложении некогерентных волн средняя величина квадрата амплитуды результирующей волны равна сумме квадратов амплитуд накладывающихся волн. Энергия результирующих колебаний каждой точки среды равна сумме энергий ее колебаний, обусловленных всеми некогерентными волнами в отдельности.

Нагляднее будет рассмотреть сложение волн в одном направлении на методе векторных диаграмм (рис1)

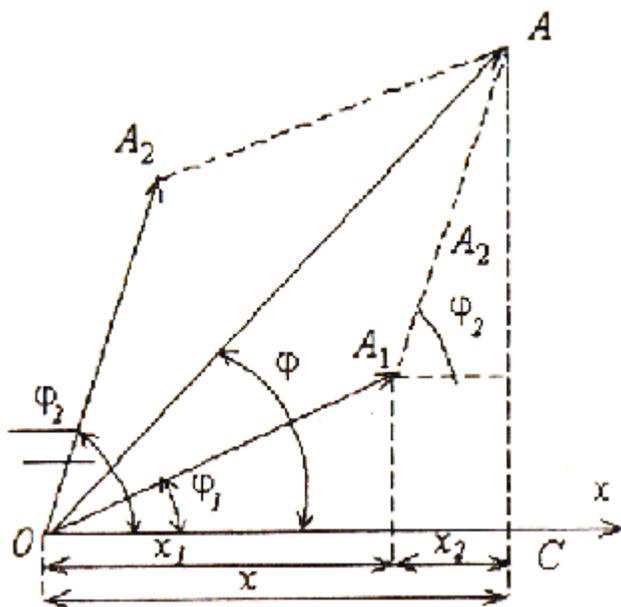


Рис.1 Сложение волн в одном направлении

Рассмотрим две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2).$$

Представим обе волны с помощью векторов  $A_1$  и  $A_2$ , по модулю соответствующих амплитуд и направленных под углами к оси  $Ox$ , равными начальным фазам. Так как угловая скорость волн  $A_1$  и  $A_2$  одинакова, то вся картина их взаимного расположения не будет меняться по сравнению с начальной. Вектор  $A$  результирующего колебания можно строить по правилам сложения векторов для начального положения. Чтобы картина расположения

векторов не изменялась, вектор  $A$  должен вращаться с той же угловой скоростью  $\omega$ , что и вектора  $A_1$  и  $A_2$ , так что результирующее движение будет гармоническим колебанием с частотой  $\omega$ . Амплитуда  $A$  как видно из рис.1.1, будут определяться соотношениями:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\delta,$$

где  $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$ .

Если разность фаз  $\delta$  возбуждаемых волнами колебаний остается постоянной во времени, то волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн  $\delta$  непрерывно изменяется, принимая с равной вероятностью любые значения, вследствие чего среднее по времени значение  $\cos \delta$  равно нулю. Поэтому

$$\langle A^2 \rangle = \langle A_1^2 \rangle + \langle A_2^2 \rangle.$$

Отсюда, приняв во внимание соотношение  $I \sim A^2$ , приходим к выводу, что интенсивность, наблюдаемая при наложении некогерентных волн, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$I = I_1 + I_2 \tag{1}$$

В случае когерентных волн  $\cos \delta$  имеет постоянное во времени (но свое для каждой точки пространства) значение, так что

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta \tag{2}$$

где  $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} \sigma(t) + \phi_0$ . В тех точках пространства, для которых  $\cos \delta > 0$ ,  $I$  будет превышать  $I_1 + I_2$ ; в точках для которых  $\cos \delta < 0$ ,  $I$  будет меньше  $I_1 + I_2$ . Таким образом, при наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности. Это явление называется интерференцией волн. Особенно отчетливо проявляется интерференция в том случае, когда интенсивность обеих интерферирующих волн одинакова:  $I_1 = I_2$ . Тогда согласно (2) в максимумах  $I = 4I_1$ , в минимумах же  $I = 0$ . Для некогерентных волн при том же условии получается всюду одинаковая интенсивность  $I = 2I_1$  (см. 1).

Из сказанного вытекает, что при освещении какой-либо поверхности несколькими источниками света (например, двумя лампочками) должна, казалось бы, наблюдаться интерференционная картина с характерным для нее чередованием максимумов и минимумов интенсивности. Однако из повседневного опыта известно, что в указанном случае освещенность поверхности монотонно убывает по мере удаления от источников света и никакой интерференционной картины не наблюдается. Это объясняется тем, что естественные источники света не когерентны.

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых многими атомами. Отдельные атомы излучают цуги волн длительностью порядка  $10^{-8}$  с и протяженностью около 3м. Фаза нового цуга никак не связана с фазой предыдущего цуга. В испускаемой телом световой волне излучение одной группы атомов через время порядка  $10^{-8}$  с сменяется излучением другой группы, причем фаза результирующей волны претерпевает случайные изменения.

Когерентные световые волны можно получить, разделив (с помощью отражений или преломлений) волну, излучаемую одним источником, на две части. Если заставить эти две волны пройти разные оптические пути, а потом

наложить их одна на другую, наблюдается интерференция. Разность оптических длин путей, проходимых интерферирующими волнами, не должна быть очень большой, так как складывающиеся колебания должны принадлежать одному и тому же результирующему цугу волн. Если эта разность будет порядка 1 м, наложатся колебания, соответствующие разным цугам, и разность фаз между ними будет непрерывно меняться хаотическим образом.

Пусть разделение на две когерентные волны происходит в точке D (рис. 2). До точки P первая волна проходит в среде с показателем преломления  $n_1$  пусть  $s_1$ , вторая волна проходит в среде с показателем преломления  $n_2$  пусть  $s_2$ . Если в точке O фаза колебаний равна  $\omega t$ , то первая волна возбудит в точке P колебания  $A_1 \cos[\omega(t - s_1/v_1)]$ , а вторая волна – колебаний  $A_2 \cos[\omega(t - s_2/v_2)]$  ( $v_1 = c/n_1$  и  $v_2 = c/n_2$  – фазовые скорости волн).

Следовательно, разность фаз колебаний, возбуждаемых волнами в точке P, будет равна

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \frac{\omega}{c} (n_2 s_2 - n_1 s_1).$$

Заменив  $\omega/c$  на  $2\pi/\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длины волны в вакууме), выражению для разности фаз можно придать вид

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \tag{3}$$

где

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1 \tag{4}$$

Есть величина, равная разности оптических длин проходимых волнами путей и называемая оптической разностью хода.

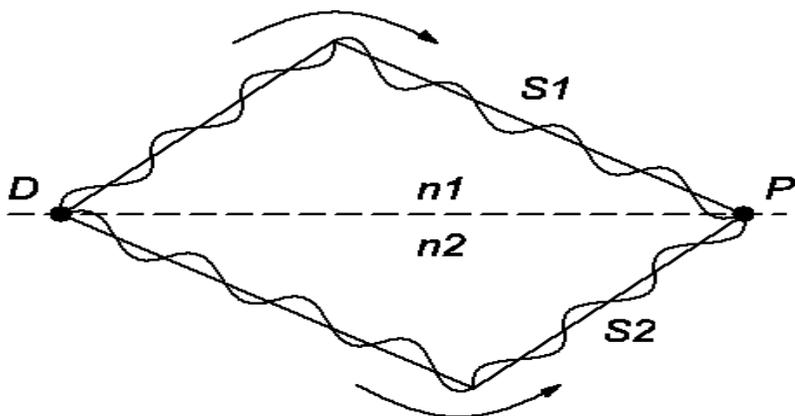


Рис.2 разделение волны на две когерентные волны

Из периодичности тригонометрической функции формулы (2-3) видно, что если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме,

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (5)$$

То разность фаз  $\delta$  оказывается кратной  $2\pi$  и колебания, возбуждаемые в точке  $P$  обеими волнами, будут происходить с одинаковой фазой. Таким образом, (1.5) есть условие интерференционного максимума.

Если  $\Delta$  равна полуцелому числу длин волн в вакууме,

$$\Delta = \pm (m+1/2) \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) \quad \dots \dots \dots (6)$$

То  $\delta = \pm(2m+1)\pi$ , так что колебания в точке  $P$  находятся в противофазе. Следовательно, (1.6) есть условие интерференционного минимума.

### **Вопросы**

1. Что такое интерференция?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Методы сложения когерентных волн
4. Что такое оптическая разность хода

## **1.2 Интерферометры.**

Интерферометр — измерительный прибор, принцип действия которого основан на явлении интерференции. Принцип действия интерферометра заключается в следующем: пучок электромагнитного излучения (света, радиоволн и т. п.) с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее количество когерентных пучков. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и возвращается на экран, создавая интерференционную картину, по которой можно установить смещение фаз пучков.

Принцип действия всех интерферометры одинаков, и различаются они лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется. Пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе. В месте схождения пучков наблюдается интерференционная картина, вид которой, т. е. форма и взаимное расположение интерференционных максимумов и минимумов, зависит от способа разделения пучка света на когерентные пучки, от числа интерферирующих пучков, разности их оптических путей (оптической разности хода), относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света.

Методы получения когерентных пучков в интерферометре очень разнообразны, поэтому существует большое число различных конструкций интерферометров. По числу интерферирующих пучков света оптические интерферометры можно разбить на многолучевые и двухлучевые.

### **1.3 Принцип действия адаптивного интерферометра**

Отличие адаптивного интерферометра от классического заключается в том, что в первом вместо обычного светоделительного элемента (куба или зеркала) используется среда, в которой постоянно записывается динамическая голограмма [5].

Формирование голограммы происходит в фоторефрактивном кристалле непосредственно при попадании на него оптического излучения. Дополнительная обработка (проявление, фиксация и т.п.) не требуется. Таким же образом, при помощи света голограмма может быть стерта. Свет вызывает внутри кристалла перераспределение зарядов, и в течение характерного времени (времени записи) устанавливается динамическое равновесие между распределениями интенсивности записывающего света и электрического заряда. Если параметры световых волн, формирующих голограмму, изменяются быстро, за время меньше времени записи, то голограмма не успевает следовать за ними. К «быстрым» здесь следует отнести изменения, вызванные воздействием исследуемого объекта (или физической величины). Для таких изменений голограмма будет «заморожена» (аналог статической голограммы), что обеспечит преобразование на ней световых волн и получение информации об объекте.

В противном случае, если параметры световых волн меняются медленно (за время, превышающее характерное время записи), что, как правило, характерно для большинства температурных влияний или, например, медленного накопления механических напряжений в исследуемом объекте, то в

кристалле запишется новая голограмма, заменив старую. Как следствие, изменения параметров световых волн, а, следовательно, и отрицательное влияние внешних факторов на измерительную систему будут компенсированы изменениями, произошедшими в голограмме. В этом заключается общий принцип адаптивности измерительной системы на основе применения динамических голограмм. Таким образом, динамическая голограмма является своего рода фильтром низких частот, что позволяет компенсировать влияние на интерферометр любых медленно изменяющихся внешних воздействий.

#### **1.4 Конфигурации двулучевых интерферометров**

Оба интерферометра, гомогенный и гетерогенный могут быть настроены с помощью дифференциальных детекторов, использующих два сбалансированных фотоприемника, чтобы исключить синфазный шум. Эта схема уже была описана Scruby и Drain (1990).

#### **1.5 Интерферометр Майкельсон**

Основная схема интерферометра Майкельсона изображена на рис.2.3. Свет от протяженного источника  $S$  попадает на плоскопараллельную разделительную пластинку  $P_1$ , покрытую полупрозрачным тонким слоем серебра из алюминия. Эта пластинка частично пропускает, частично отражает свет, разделяя падающий пучок на два взаимно перпендикулярных пучка. Первый пучок пройдя через пластинку  $P_1$ , отражается обратно зеркалом  $M_1$ , а затем частично отражается от пластинки  $P_1$  в направлении  $AO$ . Второй пучок, отразившись от покрытой металлом поверхности пластинки  $P_1$ , направляется к зеркалу  $M_2$ , отражается от него, снова проходит через пластинку  $P_1$  и далее идет в направлении  $AO$ , как и первый пучок.

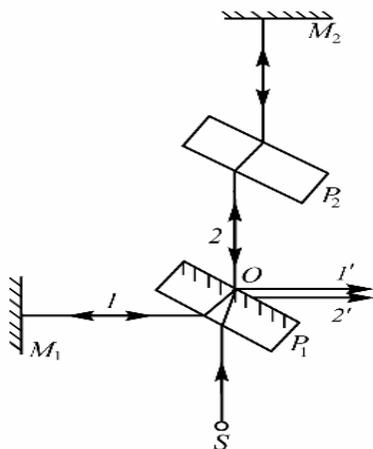


Рисунок 3 – Схема интерферометра Майкельсона

Интенсивность выходного сигнала в интерферометре Майкельсона:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left\{ 4 \frac{\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) \right\} \quad (7)$$

Где  $I_1, I_2$  - интенсивности опорного и измеряемого лучей,  $\lambda$  - длина волны лазера,  $2(x_1 - x_2)$  - геометрическая разность хода лучей, а  $x_1$  - расстояние до опорного зеркала,  $x_2 = x(t)$  - расстояние до оптического узла.

Исходя из формулы (7) видно, что изменение интенсивности от максимума до минимума соответствует перемещению зеркала на  $\frac{\lambda}{4}$  (изменение фазы на  $\pi$ ).

Таким образом от одного и того же источника получаются два пучка лучей одинаковой интенсивности, идущих в зрительную трубу, где и наблюдаются интерференционные полосы. [4]

**Лабораторная работа №1. Изучение основных явлений интерференции света с помощью интерферометра Майкельсона**

Цель работы изучения явления интерференции в интерферометре Майкельсона. Определение передаточной функции оптического узла.

Идея эксперимента: При движении одного из зеркал интерферометра изменяется интенсивность интерференционной картины. По характеру изменения интенсивности можно определить разность хода лучей.

#### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4

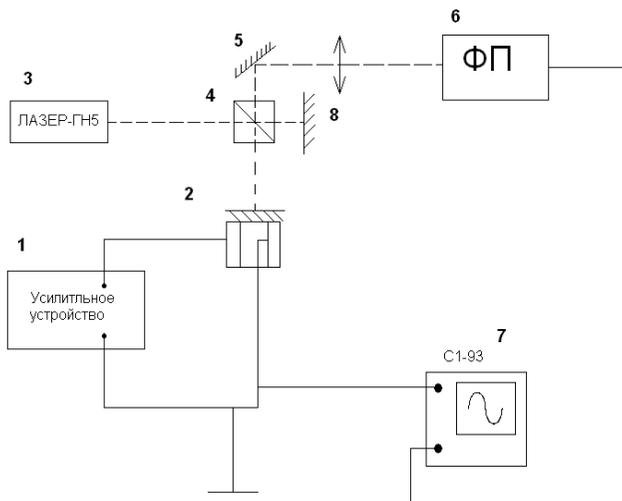


Рис.4 Схема экспериментальной установки

Установка состоит из: лазера, интерферометра Майкельсона с зеркалом на пьезокерамике в одном из плеч, поворотных зеркал, фотодиода, осциллографа и генератора низкочастотных колебаний.

Луч лазера(1) (ГН-5 с длиной волны  $\lambda=632$  нм и выходной мощностью 5мВт), попадает на светоделительный кубик(2), где делится на два. Один из лучей идет на опорное зеркало(3), другой — на зеркало, прикрепленное к пьезокерамике(4). Отраженные от зеркал лучи совмещаются на разделительной плоскости светоделительного кубика.

Результирующая интерференционная картина попадает на поворотное зеркало(5), а затем на фотодиод(6), электрический сигнал с которого регистрируется осциллографом(7).

На второй вход осциллографа подается сигнал с пьезокерамики для контроля над амплитудой.

При помощи низкочастотного генератора синусоидального сигнала(8) и трансформатора(9) на вход пьезокерамического цилиндра подается синусоидальное напряжение амплитудой до 100 В и регулируемой частоты сигнала до 10000 Гц.

#### Пьезокерамический элемент (оптический узел).

В зависимости от предназначения пьезоэлементы могут иметь самую разнообразную конфигурацию — от плоской до объемной (сферы, полусферы и т. п.). Цилиндрическая формы пьезокерамического элемента обеспечивает плоскопараллельное перемещение зеркала с минимальными искажениями.

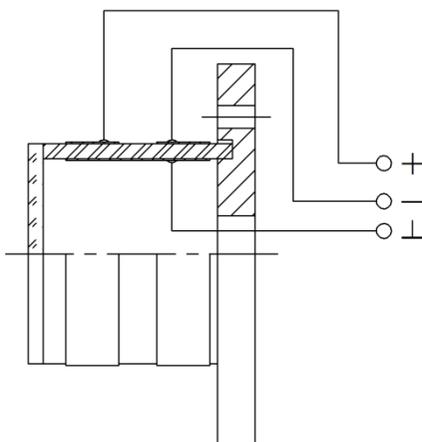
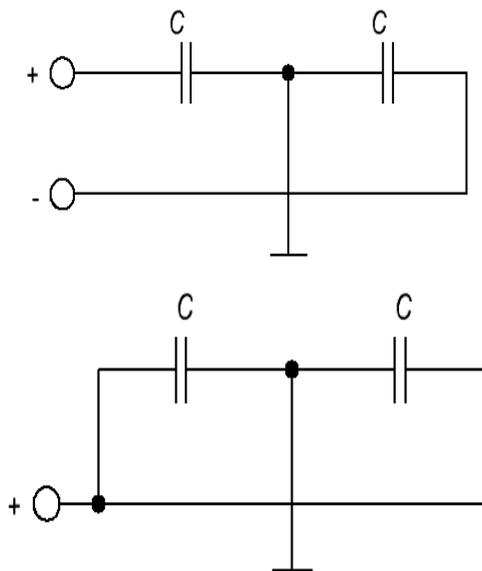


Рисунок 5 – Способ подачи напряжения на электроды при двухполярном включении

Эквивалентные схемы данного узла представлены ниже.



а

б

Рисунок 3.2.2 – Схемы включения оптического узла: параллельное (а) и последовательное (б)

Возможны два варианта включения обкладок: параллельное (а) и последовательное (б). Благодаря такому подключению можно управлять амплитудой перемещения зеркала. Подавая разные полярности, как показано на рисунке 3.2.2 (б), можно получать разное итоговое напряжение, тем самым получая синусоиду малой амплитуды.

Фотоприемник

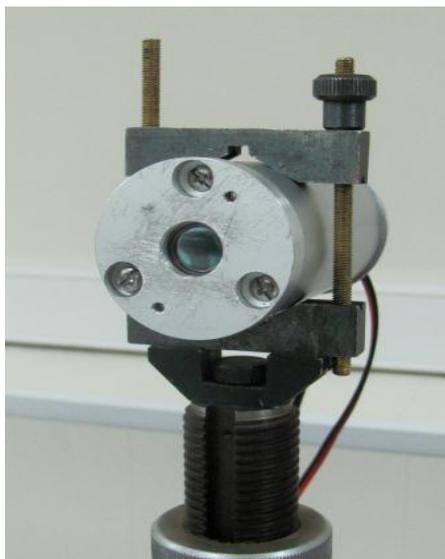


Рисунок 6 – Общий вид

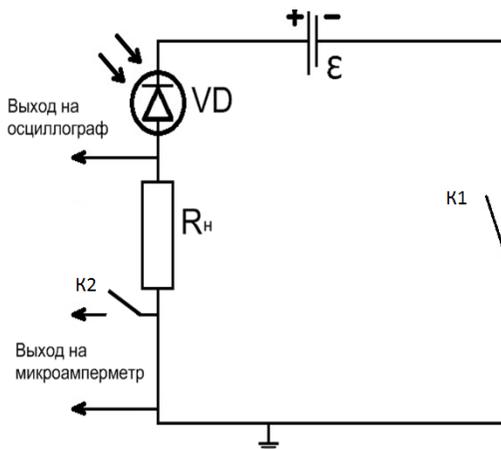


Рис. 7 – Эквивалентная схема фотоприемника

На задней части корпуса выведены гнезда подключения амперметра и осциллографа, а так же размещены тумблеры К1(питание) и К2(амперметр) устройства

#### Методика проведения эксперимента

При подаче напряжение на оптический узел происходит изменение положения зеркала, соответственно меняется фаза и интенсивность интерференционной картины, которую можно зафиксировать фотоприемником.

Измеряя интенсивность интерференционной картины мы можем определить изменение положение зеркала и зная подаваемое напряжение можем определить передаточную функцию оптического узла.

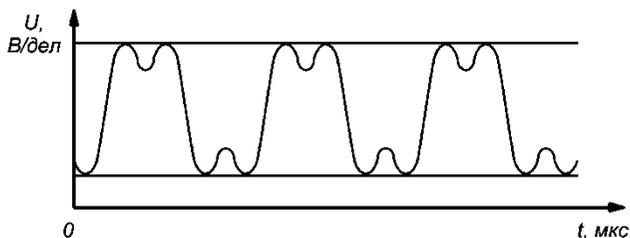
#### Юстировка интерферометра

После отражения от обоих зеркал лазерные пучки снова проходят через светоделительный куб, после чего на выходе интерферометра на экране Р, можно увидеть два световых пятна, образованных пучками, пришедшими из двух каналов интерферометра. В этом можно убедиться,

перекрывая последовательно каждый из каналов листом черной бумаги. Эти два пятна могут быть смещены друг относительно друга, говорит о наличии наклона одного зеркала относительно другого и относительно оптической оси. Пятна необходимо максимально точно совместить друг с другом путем наклона зеркала 8 (рис.) с помощью юстировочных винтов оптического узла, поворачивая которые можно наклонять платформу, на которой закреплено зеркало, по двум осям. Вращая по очереди эти винты, добиться полного совмещения световых пятен на экране. После этого на экране должна появиться интерференционная картина в виде системы концентрических интерференционных полос.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с устройством интерферометра Майкельсона.
2. Включить питание лазера ГН-5.
3. Провести юстировку интерферометра Майкельсона (юстировка проводится преподавателем, либо лаборантом)
4. Включить тумблеры К1 и К2 фотоприемника. Убедится в работоспособности батареи фотоприемника(средний фототок должен быть на уровне 100 мА)
5. Отключить тумблер К2
6. Включить осциллограф
7. Установить значение напряжения 500мВ/дел.; установить значение временной развертки 1 мс/дел
8. Подсоединить выходной кабель к осциллографу
9. Включить генератор синусоидального напряжения, установить частоту 1кГц
10. Поднять напряжение на оптический узел, до тех пор пока не появится осциллограмма изображенная на рисунке



11. Зафиксировать полученную интерференционную картину. Из полученной интерференционной картины рассчитать изменение фазы по формуле 3.1.
12. Определить амплитуду колебаний зеркала оптического узла по рассчитанной фазе
13. Определить значение передаточной функции для заданной частоты.
14. Изменить частоту на 1 кГц. Повторить пункты 10-13.
15. Повторить пункт 14 еще пять раз.
16. Построить график зависимости передаточной функции от частоты.
17. Отключить приборы

Контрольные вопросы.

1. Тип интерферометра Майкельсона
2. Как определяется оптическая разность хода?
3. Какие данные можно получить из полученной на осциллограммы
4. Что такое передаточная функция?

## 1.6 Маха-Цендера

Оптическая схема основана на интерферометре **Маха-Цендера**.

Переменный коэффициент разложения света He-Ne-лазера мощностью 5 МВт (или в качестве альтернативы аргон - ионный лазер) достигается за счет использования акустооптического модулятора (АОМ).

В 1891 г. Цендер и в 1892 г. Мах независимо друг от друга предложили новый интерферометр, принципиальная схема которого показана на рис. 4.3. Параллельный пучок лучей  $a$ , входящий в интерферометр, разделяется полупрозрачной пластиной 1 на пучки  $a_1$  и  $a_2$ , которые после отражения от зеркал 2 и 4 вновь соединяются полупрозрачной пластиной 3 и интерферируют. Интерференционную картину можно наблюдать в направлении  $N$  или  $N'$ , но направление  $N$  предпочтительнее. На рассматриваемом рисунке изображено так называемое «начальное» положение зеркал интерферометра, при котором разность хода равна нулю, а соответственные лучи  $a_1$  и  $a_2$  параллельны и наложены друг на друга. При этом в любой плоскости, перпендикулярной к  $N$ , наблюдается бесконечно широкая полоса нулевого порядка.

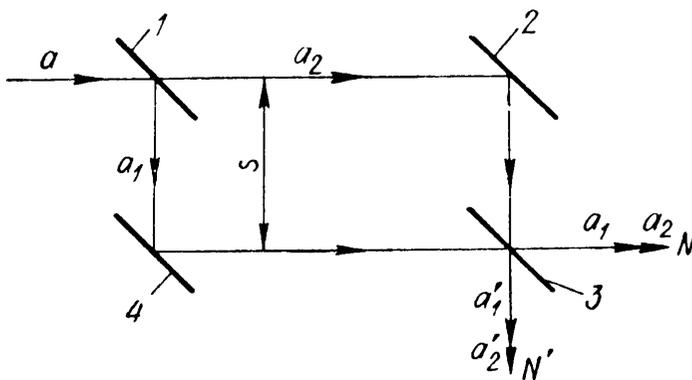


Рисунок 8 Принципиальная схема интерферометра Маха-Цендера

Эта схема аналогична схеме интерферометра Жамена, так как зеркала 1 и 4 эквивалентны пластине 1, а зеркала 2 и 3 – пластине 3). Преимущество схемы

Маха-Цендера заключается в том, что пучки лучей  $a_1$  и  $a_2$  можно развести на большое расстояние  $s$ , а полосы равной толщины нетрудно локализовать в произвольной плоскости; ее недостаток – в меньшей устойчивости по отношению к вибрациям и колебаниям температуры.

Поворотами зеркал интерферометра можно изменять угол между пучками  $a_1$  и  $a_2$  и регулировать ширину и направление полос. Если в начальном положении интерферометра повернуть одно из зеркал, то точки пересечения пар соответственных лучей будут лежать на его поверхности, то есть плоскость локализации совпадет с поверхностью зеркала. Но если повернуть два зеркала (например, пластины 1 и 3), то можно получить контрастные полосы заданной ширины, локализованные в любой плоскости.

### **Лабораторная работа №2. Исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах на базе интерферометра Маха-Цендера.**

Цель работы: знакомство с устройством интерферометра Маха-Цендера, исследование интерференционных картин при наличии и отсутствии дефектов в покровном стекле..

Идея эксперимента: при помещении в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера покровного стекла происходит изменение показателя преломления за счет его неоднородности. По характеру изменения можно определить разность хода вносимое стеклом.

Методика проведения эксперимента:

Рассмотрим интерференционную картину кристалла с дефектом поверхности:

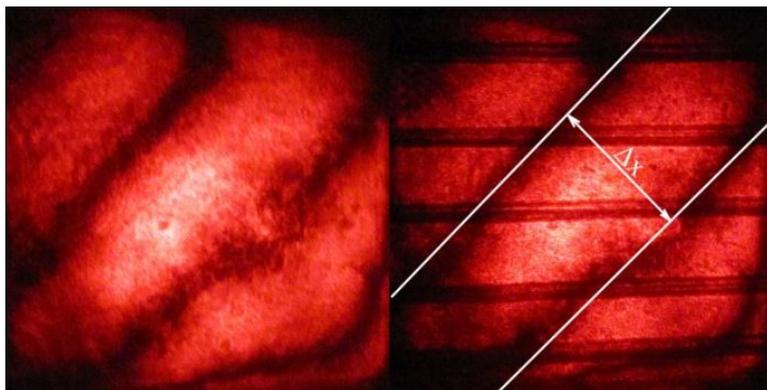


Рис.9– Интерференционная картина кристалла с дефектом поверхности (слева – без измерительной пластинки, справа – с измерительной пластинкой)

Так как интерференционные полосы прямые и имеют одинаковую толщину, то в кристалле присутствует дефект в виде скоса одной из поверхностей (интерференция клина).

Исходя из отсчётных полос, расстояние между полосами равно  $\Delta x = 4$  мм. Это позволяет оценить размер дефекта, решив классическую задачу на интерференцию клина:

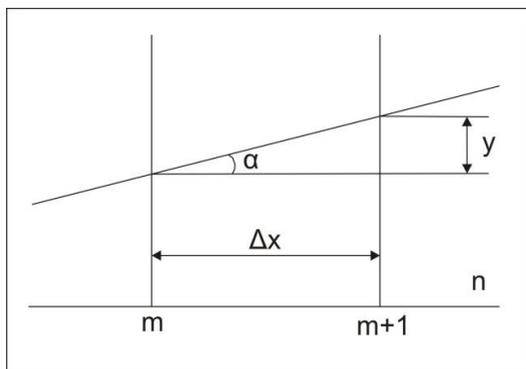


Рисунок 10 – Схема получения интерференции клина

Угол клина можно оценить как

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{\Delta x} \quad (4.2)$$

Разность хода лучей

$$\Delta = 2yn, \quad (4.3)$$

в то же время:

$$\Delta = [2(m+1) + 1] \frac{\lambda}{2n} - [2m + 1] \frac{\lambda}{2} = \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (4.4)$$

Приравняем правые части данных выражения и выразим величину  $y$ :

$$2yn = \lambda \Rightarrow y = \frac{\lambda}{2n} \quad (4.5)$$

Подставим величину  $y$  в выражение для угла клина:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2n \cdot \Delta x} \quad (4.6)$$

Исходя из того, что мы используем He-Ne лазер, длина волны будет равна  $\lambda = 0,6328$  мкм, а так как данный кристалл типа КТР, то для этой длины волны показатель преломления равен  $n = 1,76$ . [12] Рассчитаем угол клина для данного случая:  $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-5}$  рад  $\approx 9,28''$ .

### Юстировка

При юстировке интерферометра микрометренными поворотами одного из зеркал добиваются того, чтобы выходящие из интерферометра пучки лучей  $a_1$  и  $a_2$  (рис. 4.3) шли в одном направлении. Выполнение этого требования проверяют, наблюдая с помощью зрительной трубы, совместились ли друг с другом изображения малого светящегося отверстия, расположенного в фокальной плоскости объектива коллиматора. Затем включают дополнительный объектив и, пользуясь монохроматическим светом, наблюдают широкие интерференционные полосы в выбранной плоскости  $P$  (рис. 4.3). Обычно полосы размываются при попытке изменить их ширину или при увеличении диаметра светящегося отверстия. Последовательными поворотами двух зеркал (например,

1 и 3) получают контрастные полосы требуемой ширины при наличии широкого источника света. После этого осторожно перемещают одно из зеркал по нормали к его поверхности до появления в поле зрения интерференционных полос в белом свете. Если при этом контрастность полос ухудшится, ее улучшают повторными поворотами зеркал.

Юстировка интерферометров типа Маха-Цендера затруднена тем, что при изменении одной из трех регулируемых величин (угла  $\theta$  между соответственными лучами, координаты  $l$  плоскости локализации и разности хода  $\Delta$ ) обычно меняются и две другие. Чтобы облегчить юстировку, расстояние между зеркалами 1 и 2 (рис. 4.4, а) часто делают вдвое большим, чем между зеркалами 1 и 4. Если исследуемый объект помещен посередине между 3 и 4, то плоскость локализации  $P$  сопряжена с поверхностью зеркала 2. При этом поворотами зеркала 2 можно менять ширину и направление полос без изменения их контрастности. [3]

### Масштабная линейка

Масштабная линейка ИП (см рис. 4.1) представляет собой стеклянную пластинку с нанесёнными на неё через 2 мм отсчётными линиями:

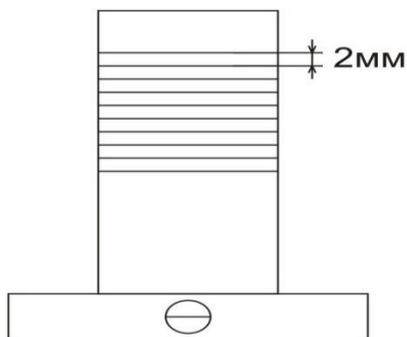


Рисунок 11 – Масштабная линейка

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с устройством интерферометра Маха-Цандера.
2. Включить питание лазера ГН-5
3. Провести юстировку интерферометра Маха-Цандера (юстировка проводится преподавателем, либо лаборантом)
4. Установить исследуемое стекло в одно из плеч интерферометра
5. Установить масштабную линейку на пути луча, после его выхода непосредственно из интерферометра.
6. Включить ЦК, зафиксировать полученную интерференционную картину
7. Используя полученное изображение, оценить ширину полос интерференционной картины
8. Используя методику расчета, оценить его дефекты.
  9. Рассчитать угла клина по формуле
  10. Из полученных результатов сделать вывод, о неоднородности стекла

### Контрольные вопросы

1. Назначение измерительной линейки
2. Дайте определение следующим понятиям: интерференция, интерферометр
3. Что такое показатель преломления

#### **1.7 Жамен**

Оптическая схема интерферометра **Жамена** (рис.2.3) представляет собой сочетание двух плоскопараллельных пластин одинаковой толщины, установленных приблизительно параллельно друг другу.[4]

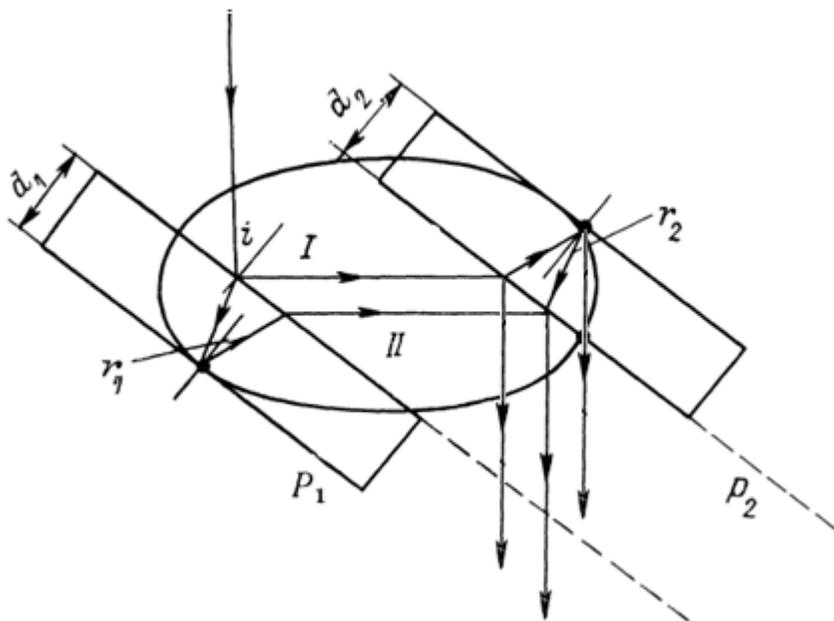


Рис.12

Поверхности пластин покрыты плотным отражающим слоем, расположенные под углом  $i=45^0$  к падающему пучку лучей. Две ветви интерферометра *I* и *II*, образуемые при отражении от поверхностей первой пластины, далее после второй, как видно из рисунка, соединяются и дают соответствующий интерференционный эффект. Результирующая разность хода, возникающая в интерферометре, определяется разностью разностей хода, возникающей в каждой из пластин

$$\Delta = 2d_1 n \cos r_1 - 2d_2 \cos r_2$$

Здесь  $d_1$  и  $d_2$  – толщины первой и второй пластин;  $n$  – показатель преломления стекла;  $r_1$  и  $r_2$  – углы падения на вторую поверхность пластин.

Если пластины строго параллельны друг другу, то разность хода пучков (а также пучков лучей, идущих под небольшими углами к этим лучам) равна нулю и в плоскости наблюдается равномерная освещённость. Для возникновения интерференционной картины необходимо создать некоторый

угол между пластинами в вертикальной или горизонтальной плоскости. Тогда при наличии такого угла, например в горизонтальной плоскости между пластинами, будем иметь при  $d_1=d_2$

$$\Delta = 4dn \sin \left[ \frac{r_1 + r_2}{2} \right] \sin \left[ \frac{r_1 - r_2}{2} \right] = 2nd \sin r \Delta r.$$

Здесь принято, что  $r_1+r_2 \sim 2r$ .

Высокие требования предъявляются к плоскопараллельности пластин. Для получения контрастных полос равного наклона необходимо, чтобы выходящие из интерферометра соответственные пучки лучей  $a_2$  и  $b_1$  были параллельны друг другу.

Достоинствами интерферометра Жамена являются его простота и высокая стабильность наблюдаемой интерференционной картины, так как изменение расстояния между пластинами из-за температуры или из-за тряски не вносит изменений разности хода, поэтому он может быть использован, например, для измерений показателя преломления. Однако малое расстояние между ветвями интерферометра, определяемое толщиной стеклянных пластин, ограничивает возможности этого прибора. Если объект находится в одной из ветвей, могут иметь место температурные влияния. Небольшое расстояние между ветвями интерферометра приводит также ограничению размера объекта

### **Лабораторная работа №3. Изучение электрооптического эффекта в интерферометре Жамена.**

Цель работы: Изучение интерферометра Жамена, экспериментальное исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах. Определение электрооптического коэффициента.

#### Электрооптический эффект

Электрооптическим эффектом называется изменение показателя преломления

вещества под действием внешнего электрического поля. Если показатель преломления изменяется линейно с изменением напряженности электрического поля, то такой эффект носит название линейного электрооптического эффекта, или эффекта Поккельса. В случае квадратичной зависимости показателя преломления от напряженности приложенного электрического поля эффект называется эффектом Керра. Эффект Поккельса наблюдается только в кристаллах, у которых отсутствует центр симметрии и он принципиально анизотропен, т.е. зависит от направления распространения света, его поляризации и электрического поля относительно кристаллографических осей. Квадратичный электрооптический эффект наблюдается во всех материалах и может быть как анизотропным (кристаллы), так и изотропным (жидкости). Эффект Поккельса, как правило, больший по сравнению с квадратичным электрооптическим эффектом, широко используется при конструировании модуляторов света.

Электрооптический эффект (как линейный, так и квадратичный) можно описать при помощи электрооптических коэффициентов ( $\gamma$  и  $K$  соответственно), которые связывают изменение показателя преломления с изменением напряженности приложенного электрического поля. К веществам, в которых наблюдается наибольший линейный электрооптический эффект, относятся ниобат лития, танталит лития, дигидрофосфат калия. Электрооптические коэффициенты  $\gamma$  в этих кристаллах существенно различаются для различных ориентаций поляризации света, направления его распространения и электрического поля. Наибольшим квадратичным электрооптическим эффектом обладает нитробензол и сероуглерод. Эти среды изотропны (жидкости) и электрооптический коэффициент  $K$  одинаков во всех направлениях.

Изменение показателя преломления  $Dn$  в зависимости от напряженности приложенного электрического поля описывается следующими формулами:

$$\Delta n = n^3 r \frac{E}{2} \quad \text{-для}$$

эффекта Погеля

$$\Delta n = n^3 K \frac{E}{2} \quad \text{ффекта Керра}$$

где  $n$ -показатель преломления, соответствующий выбранной геометрии распространения света,  $E'$  – напряженность электрического поля,  $r$ - линейный электрооптический коэффициент,  $K$  - квадратичный электрооптический коэффициент.

Рассмотрим процесс распространения световой волны через среду (рис.1а), в которой показатель преломления  $n$  одинаков для волн, поляризованных вдоль оси  $X$  и вдоль оси  $Y$  ( $y$  вектора напряженности электрического поля волны параллельны  $X$  и  $Y$ ). Скорости распространения этих волн в среде одинаковы и равны  $v=c/n$ , где  $c$ -скорость света в вакууме, т.е. дополнительный фазовый сдвиг между векторами  $E_x$  и  $E_y$ , обусловленный различными скоростями распространения, не возникает. На рис.2а показано мгновенное распределение напряженности  $E$  электрического поля волны для двух поляризаций (вдоль  $X$  и вдоль  $Y$ ). Если падающий свет имеет произвольную поляризацию (эллиптическую, круговую, линейную), определяемую исходным фазовым сдвигом  $\delta_1$  между векторами  $E_x$  и  $E_y$ , то форма этой поляризации в рассматриваемом случае не изменится. Пусть вдоль оси  $X$  приложено электрическое поле  $E$  (рис.13), приводящее к изменению показателя преломления -  $\Delta n$  для световой волны с поляризацией, направленной вдоль оси  $X$ . При этом показатель преломления для световой волны, поляризованной вдоль  $Y$ , останется прежним.

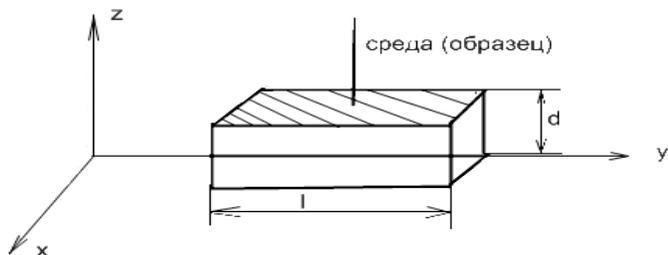


Рис.13

В этом случае скорости распространения для волн с X и Y поляризацией будут различны:

$$V_x = \frac{c}{n - \Delta n} \quad \text{для поляризации вдоль X}$$

$$V_y = \frac{c}{n} \quad \text{для поляризации вдоль Y}$$

В этом случае между векторами  $E_x$  и  $E_y$  возникает фазовый сдвиг  $\delta$ , равный:

$$\delta = \frac{2\pi l}{\lambda} [n - (n - \Delta n)] = \frac{2\pi l}{\lambda} \Delta n$$

где  $l$ -длина среды,  $\lambda$ -длина волны света в вакууме,  $\Delta n$ -изменение показателя преломления. Таким образом, при распространении света через оптическую среду, в которой показатели преломления различны для разных поляризаций, происходит непрерывное изменение формы поляризации света, определяемое фазовым

### Методика эксперимента

В данной работе измеряется линейный электрооптический коэффициент  $\gamma$  для кристалла КТР, соответствующий направлению распространению света вдоль кристаллографической оси  $Y$ , ось  $Z$  направлена вверх, причем направление оси  $Z$  совпадает с направлением поля. Линейный электрооптический коэффициент при такой геометрии взаимодействия максимален и в литературе обозначается как  $\gamma_{33}$ . Показатель преломления равен  $n=1,850$  при  $\lambda=0,53\text{мкм}$ .

Интенсивность интерференционной картины (значения фототока) изменяется по закону:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Здесь:

$$\varphi_{1,2} = \arcsin \frac{I'_{1,2}}{A};$$

$$A = 2\sqrt{I_1 I_2} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2};$$

$$I'_{1,2} = I - I_{cp};$$

$$I_{cp} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$$

$I$  – текущее значение фототока.

Изменение показателя преломления в зависимость  $\Delta n$  от напряженности приложенного электрического поля описывается формулой:

$$\Delta n = n^3 r \frac{E}{2}$$

где  $\gamma$  – линейный электрооптический эффект,  $n$  – показатель преломления вещества в отсутствие внешнего электрического поля,  $E$  – напряженность электрического поля.

Выразим электрооптический коэффициент:

$$r = \frac{2\Delta n}{n^3 E} = \frac{2\Delta\phi\lambda d}{12\pi n^3 U} = \frac{2\Delta\phi\lambda d}{2\pi n^3 l U^2} = \frac{\Delta\phi\lambda d}{\pi n^3 U l}$$

Где:  $E = \frac{U}{d}$  - напряженность электрического поля.

### Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания лазера ЛГ.
2. Включить цифровой двуканальный осциллограф OWON PDS 5022S.
3. Убедившись, что ручки регулировки выходного напряжения высоковольтного источника находятся в крайнем левом положении, включить тумблер «Сеть» на передней панели прибора. После небольшого прогрева включить тумблер «Высокое» и тумблер «Вкл. высокое»
4. Изменяя выходное напряжение высоковольтного источника ступенчатыми
5. переключателями (от 0,7 до 2,5 кВ), снять зависимость фототока от напряжения. ВНИМАНИЕ! Не следует долго держать кристалл КТР под высоким напряжением. Включение максимального напряжения должно производиться на короткое время, после чего переключатель регулировки выходного напряжения должен быть возвращен в одно из левых положений.
6. По результатам экспериментальных исследований дать расшифровку интерферограмм. По формулам вычислить (с погрешностью) линейный электрооптический коэффициент  $r_{33}$  Кристалла КТ
7. Порядок выключения приборов: уменьшить до нуля выходное напряжение высоковольтного источника; выключить тумблеры «Вкл. высокое», «Высокое»,
8. «Сеть»; выключить блок питания лазера, перевести наружный шунт микроамперметра на грубый предел.

### Контрольные вопросы

1. Тип интерферометра Жамена??

2. Почему интерферометр Жамена можно считать поляризатором?
3. Оптическая разность хода в интерферометре Жамена?
4. Что такое электрооптический эффект?
5. Как определить электрооптический коэффициент?

### Список рекомендованной литературы

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. - СПб.: Наука, 1992. - 320 с.
2. Одулов С.Г., Соскин М.С., Хижняк А.И. Лазеры на динамических решетках: Оптические генераторы на четырехволновом смещении. - М.: Наука, 1990. - 272 с.
4. Стурман Б.И., Фридкин В.М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
5. Solyman L., Webb D.J., Grunnet-Jepsen A. The physics and applications of photorefractive materials. – Oxford: Clarendon Press, 1996. - 495 p.
6. Бельдюгин И.М., Золотарев М.В., Свиридов К.А. Теория и применение оптических приборов на основе четырехволнового взаимодействия в фоторефрактивных кристаллах // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. - № 3. - С. 52-81; № 4. - С. 72-89.
7. Shandarov S.M., Nazhestkina N.I., Kobozev O.V., Kamshilin A.A. Nonlinearity of a response in photorefractive crystals with a square-wave applied field // Appl. Phys. B. – 1999. – V. 68, № 5. - P. 1007-1012.
8. Stepanov S.I. Applications of photorefractive crystals // Repts. Progr. Phys. – 1994. – V. 57. – P. 39-116.
9. Изванов А.А., Мандель А.Е., Хатьков Н.Д., Шандаров С.М. Влияние пьезоэффекта на процессы записи и восстановления голограмм в фоторефрактивных кристаллах // Автометрия. – 1982. - №2. - С. 79-84.
10. Степанов С.И., Шандаров С.М., Хатьков Н.Д. Фотоупругий вклад в фоторефрактивный эффект в кубических кристаллах // ФТТ. – 1987. – Т. 24, №10. – С. 3054-3058.
11. Шандаров С.М., Шепелевич В.В., Хатьков Н.Д. Изменение тензора диэлектрической проницаемости в кубических фоторефрактивных пьезоэлектрических кристаллах под действием электрического поля

- голографической решетки // Опт. и спектр. – 1991. – Т. 70, №5. – С. 1044-1048.
12. Shandarov S.M. Influence of piezoelectric effect on photorefractive gratings in electro-optic crystals // Appl. Physics A. – 1992. - V. 55. - P. 91-96.
  13. Kobozev O.V., Shandarov S.M., Kamshilin A.A., Prokofiev V.V. Light-induced absorption in a Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub> crystal // J.Opt.A: Pure Appl. Opt. – 1999. V. 1. - P. 442-447.
  14. Плесовских А.А., Шандаров С.М., Агеев Е.Ю. Динамика фоторефрактивного отклика в кристаллах силленитов с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками // ФТТ. – 2001. - Т. 43, вып. 2. - С. 242-245.
  15. Плесовских А.М., Шандаров С.М. Влияние постоянного внешнего поля на динамику фоторефрактивного отклика в кристаллах с двукратно ионизируемыми донорными центрами и мелкими ловушками // ФТТ. – 2002. – Т. 44, вып.1. – С. 57-61.
  16. Стурман Б.И., Подвиллов Е.В., Каменов В.П., Нипполайнен Е., Камшилин А.А. Векторное взаимодействие волн в кубических фоторефрактивных кристаллах // ЖТЭФ. – 2001. - Т. 119, вып. 1. - С. 125-142.
  17. Литвинов Р.В., Шандаров С.М., Чистяков С.Г. Двухволновое взаимодействие на фоторефрактивной решетке в кубических гиротропных кристаллах при сильной связи // ФТТ. – 2000. - Т. 42, вып. 8. - С. 1397-1403.
  18. Красноперов В.Ю., Литвинов Р.В., Шандаров С.М. Неоднаправленное двухпучковое взаимодействие в фоторефрактивном силикате висмута, находящемся в знакопеременном электрическом поле // ФТТ. – 1999. - Т. 41, вып. 4. - С. 632-637.
  19. Агеев Е.Ю., Шандаров С.М., Веретенников С.Ю., Мартьянов А.Г., Карташов В.А., Камшилин А.А., Прокофьев В.В., Шепелевич В.В..

- Двухволновое взаимодействие на отрагательной решетке в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ . // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, №4. – С. 343-345. Плесовских А.М., Шандаров С.М., Мартыанов А.Г., Мандель А.Е., Буримов
20. Н.И., Шаганова Е.А., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В.. Векторное двухволновое взаимодействие на отрагательных голографических решетках в кубических гиротропных фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. - 2005. - Т. 35, № 2. - С. 163-168.
  21. Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Shandarov S.M., Kargin Yu.F., Volkov V.V. Adaptive correlation filter based on dynamic reflection hologram formed in photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  crystal // Optical Review. – 2005. - V. 12, No 1. - P. 58-60.
  22. Ромашко Р.В., Шандаров С.М., Кульчин Ю.Н., Буримов Н.И., Лимарев Д.А., Каргин Ю.Ф., Волков В.В. Адаптивный спекл-интерферометр на основе фоторефрактивной отрагательной голограммы // Известия РАН, серия физическая. – 2005. –Т. 69, № 8. - С. 1139-1141.
  23. Литвинов Р.В., Полковников С.И., Шандаров С.М. Самовозбуждение взаимно обращенных световых волн в кубическом гиротропном фоторефрактивном кристалле с приложенным меандровым электрическим полем // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, №2. – С.167-172.
  24. Гусельникова А.В., Шандаров С.М., Плесовских А.М., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н. Векторное четырехволновое взаимодействие света на отрагательных решетках в кристаллах титаната висмута // Оптический журнал. – 2006. - Т. 73, № 11. - С. 22-27.
  25. Kargin Yu.F., Egorysheva A.V., Volkov V.V., Burkov V.I., Shandarov S.M., Mandel A.E., Skorikov V.M. Growth and characterization of doped

Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub> single crystals // J. of Crystal Growth. - 2005. - V. 275, No 1-2. - P. e779-e784.

26. Буримов Н.И., Шандаров С.М. Структура упругих и электрических полей, возникающих вблизи границы кристалла LiNbO<sub>3</sub> при фотогальваническом механизме записи фоторефрактивных решеток // ФТТ. – 2006. - Т. 48, в. 3. -С. 491-496.

Учебное пособие

Зайцева О.В., Мельник К.П., Быков В.И.

Двухлучевые интерферометры

Методические указания к лабораторному практикуму  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40