

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В.И. Быков
К.П. Мельник
А.А. Шмидт

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ЖАМЕНА**

Методические указания по лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 535:53(075.8)
ББК 22.34я73
Б95

Быков, Виталий Иванович

Б95 Изучение электрооптического эффекта в интерферометре Жамена: Методические указания по лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки / В.И. Быков, К.П. Мельник, А.А. Шмидт. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 17 с.

Представлены методические указания по лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки. Цель данной работы: изучение интерферометра Жамена, экспериментальное исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах. Определение электрооптического коэффициента.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 535:53(075.8)
ББК 22.34я73

© Быков В.И, Мельник К.П.,
Шмидт А.А. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2024

Содержание

1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть	5
2.1 Интерференция волн	5
2.2 Интерферометры	9
2.3 Принцип действия адаптивного интерферометра	10
2.4 Конфигурации двулучевых интерферометров	11
2.5 Интерферометр Жамена	11
3 Экспериментальная часть	12
3.1 Электрооптический эффект.....	12
3.2 Контрольные вопросы	14
3.3 Задание.....	15
3.4 Методические указания по выполнению работы	15
3.5 Порядок выполнения работы	16
3.6 Содержание отчета.....	16
Список литературы.....	17

1 Введение

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

В ходе выполнения работы у студентов формируются следующие навыки:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности;
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований.

2 Теоретическая часть

2.1 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 накладываемых 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 накладываемых 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 (рис. 2.1)

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 амплитудам 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.

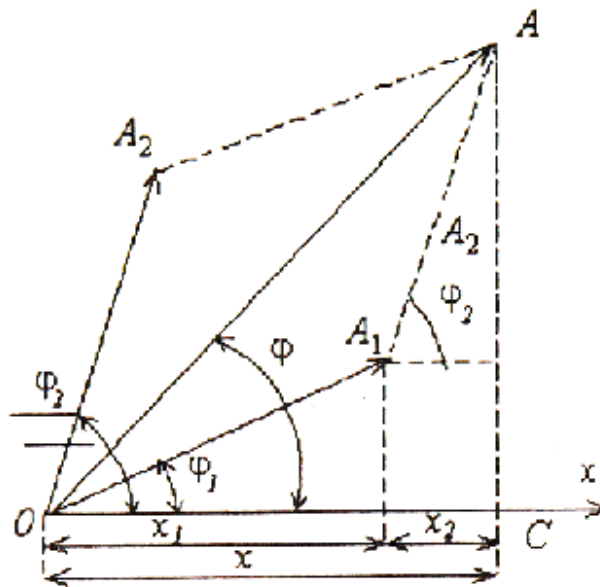


Рисунок 2.1 - Сложение волн в одном направлении

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 ω , что и вектора A_1 и A_2 , так что результирующее движение будет гармоническим колебанием с частотой ω . 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 δ возбуждаемых волнами колебаний остается постоянной во времени, то волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн δ 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:

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.1)$$

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

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.2)$$

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 (2.2) 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. рис.2.1).

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 3 м. 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. 2.2). 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 ωt , то первая волна возбуждает 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 ω/c на $2\pi/\lambda_0$ (λ_0 – длины волны в вакууме), выражению для разности фаз можно придать вид

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (2.3)$$

где

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1 \quad (2.4)$$

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

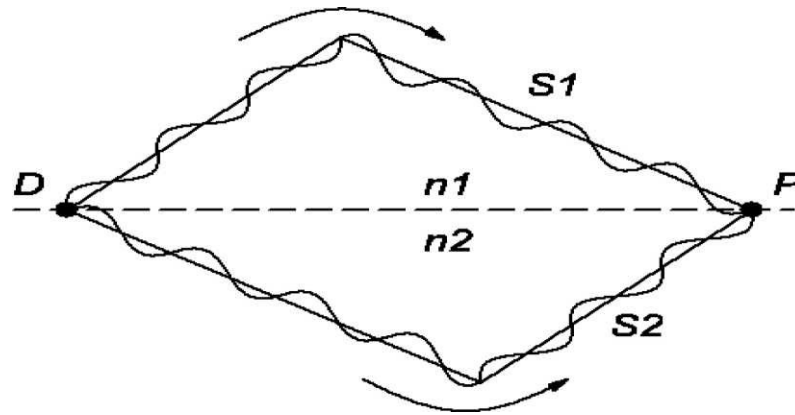


Рисунок 2.2 - Разделение волны на две когерентные волны

Из периодичности тригонометрической функции формулы (2.2 -2.3) видно, что если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме,

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (2.5)$$

То разность фаз δ оказывается кратной и 2π колебания, возбуждаемые в точке P обеими волнами, будет происходить с одинаковой фазой. Таким образом, (2.5) есть условие интерференционного максимума. Если Δ равна полуцелому числу длин волн в вакууме,

$$\Delta = \pm (m+1/2)\lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (2.6)$$

То $\delta = \pm(2m+1)\pi$ так что колебания в точке P находятся в противофазе. Следовательно, (2.6) есть условие интерференционного минимума.

2.2 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.

2.3 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.

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.

2.4 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).

2.5 Интерферометр Жамена

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

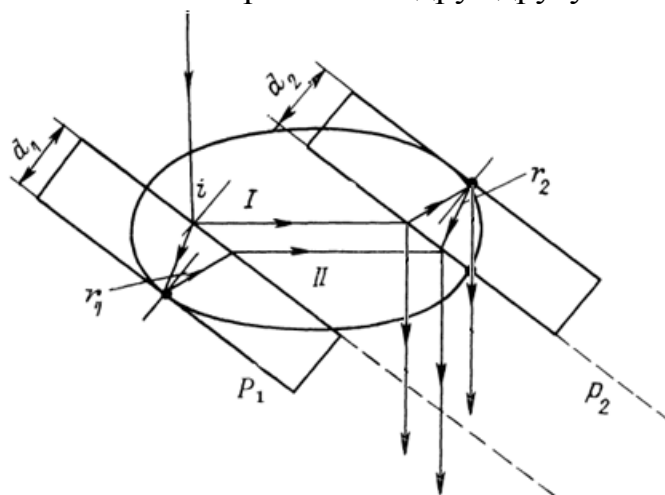


Рисунок 2.3 - Оптическая схема интерферометра Жамена

Поверхности пластин покрыты плотным отражающим слоем, расположенные под углом $i=45^\circ$ 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

3 Экспериментальная часть

3.1 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 (r 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 r 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 Δn в зависимости от напряженности приложенного электрического поля описывается следующими формулами:

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

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

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 (у 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 δ_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 - Δn для световой волны с поляризацией, направленной вдоль оси X. При этом показатель преломления для световой волны, поляризованной вдоль Y, останется прежним.

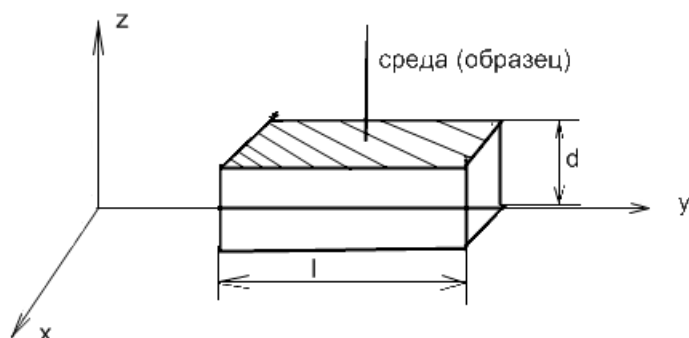


Рис.13

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 δ , равный:

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

где l -длина среды, λ -длина волны света в вакууме, Δn -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

3.2 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?

3.3 Задание

1. Изучение интерферометр Жамена
2. Экспериментальное исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах.
3. Определение электрооптического коэффициента.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности и готовность формулировать цели и задачи научных исследований.

3.4 Методические указания по выполнению работы

В данной работе измеряется линейный электрооптический коэффициент r 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 r_{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:

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

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

$$I'_{1,2} = I - I_{\text{cp}}; \quad I_{\text{cp}} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$$

где I - текущее значение фототока.

Изменение показателя преломления Δn в зависимости от напряженности приложенного электрического поля описывается формулой:

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

где r - линейный электрооптический эффект, n - показатель преломления вещества в отсутствие внешнего электрического поля, E - напряженность электрического поля.

Выразим электрооптический коэффициент:

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

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

3.5 Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания лазера ЛГ.
2. Включить цифровой двухканальный 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 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.
5. По результатам экспериментальных исследований дать расшифровку интерферограмм. По формулам вычислить (с погрешностью) линейный электрооптический коэффициент r_{33} Кристалла КТ
6. Порядок выключения приборов: уменьшить до нуля выходное напряжение высоковольтного источника; выключить тумблеры «Вкл. высокое», «Высокое»,
7. «Сеть»; выключить блок питания лазера, перевести наружный шунт микроамперметра на грубый предел.

3.6 Содержание отчета

1. Титульный лист, содержащий название вуза, кафедры, название и номер лабораторной работы, наименование дисциплины, по которой выполнена работа, № группы и ФИО студентов, входящих в подгруппу, дату исполнения, ФИО преподавателя, год;

2. Основная часть, к которой относятся цель работы, лабораторное задание, полученные по работе результаты.

3. Выводы по результатам работы, которые являются важной частью отчета и подлежат защите

Список литературы

1 М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – С.-Петербург: Наука, 1992. – 320с.

2 С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко, А.Л. Толстик, В.В. Шепелевич. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2008. –Т. 38, №11. – С. 1059-1069.

3 А.А. Kamshilin, R.V. Romashko, Yu.N. Kulchin. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 105. – P. 031101.

4 А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Г.В. Симонова, Л.А. Кабанова, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, В.И. Быков, Ю.Ф. Каргин. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 9. – С. 847-852.

5 Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.

6 T.J. Hall, M.A. Fiddy, M.S. Ner. Detector for an optical-fiber acoustic sensor using dynamic holographic interferometry // Opt. Lett. – 1980. – V. 5. – P. 485-487.

7 S.M. Shandarov, A.A. Kolegov, N.I. Burimov, V.I. Bykov, V.M. Petrov, Yu.F. Kargin. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam // Phys. Wave Phenomena. – 2009. – V. 17. – P. 39-44.

8 Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А., Курмашев Ш.Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

9 Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах : монография / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 242 с., http://edu.tusur.ru/training/publications?chair_id=13&page=17.

10 Взаимодействие световых волн на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах :

сб. статей / под ред. С.М. Шандарова и А.Л. Толстика. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. И радиоэлектроники, 2007. – 100 с.