

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

В.И. Быков
К.П. Мельник
А.А. Шмидт

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В НЕЛИНЕЙНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА**

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 Исследование электрооптического эффекта в нелинейных оптических кристаллах на базе интерферометра Маха-Цендера: 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. – 16 с.

Представлены методические указания по лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки. Цель работы: знакомство с устройством интерферометра Маха-Цендера, исследование интерференционных картин при наличии и отсутствии дефектов в покровном стекле.

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
3 Экспериментальная часть	12
3.1 Контрольные вопросы	12
3.2 Задание	12
3.3 Методические указания по выполнению работы	13
3.4 Порядок выполнения работы	15
3.5 Содержание отчета	16

1 Введение

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

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.

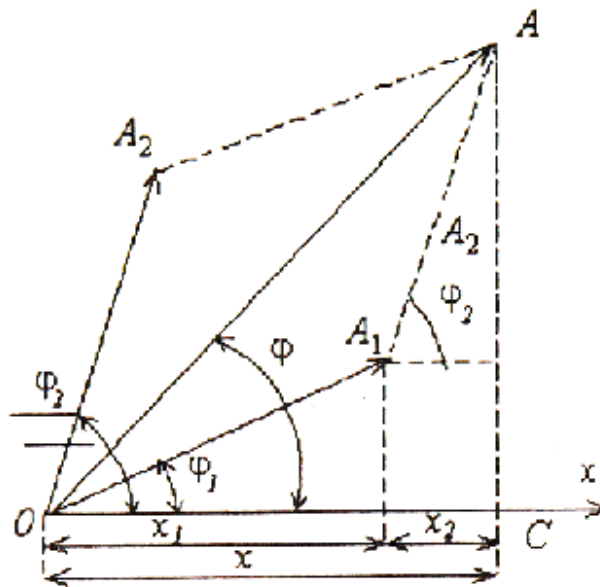


Рисунок 2.1 - Сложение волн в одном направлении

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.

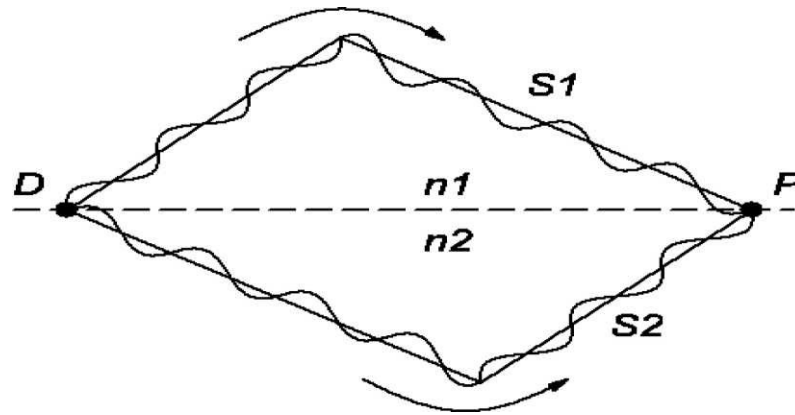


Рисунок 2.2 - Разделение волны на две когерентные волны

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 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. 2.3.

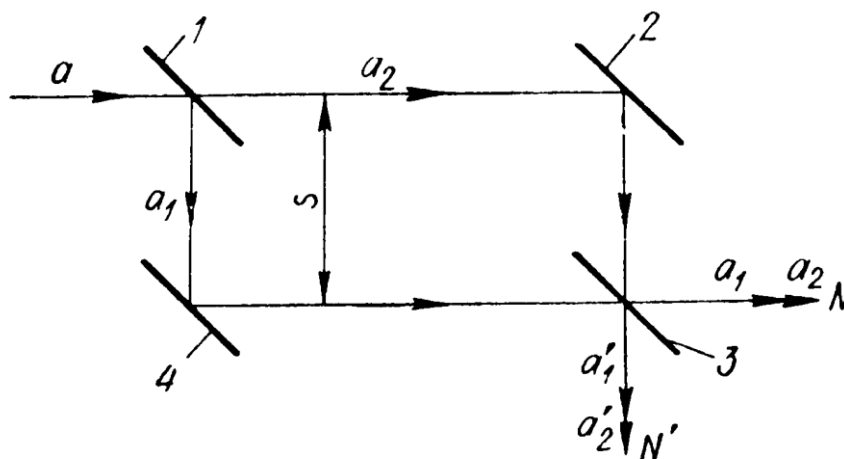


Рисунок 2.3 - Принципиальная схема интерферометра Маха-Цендера

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.

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.

3 Экспериментальная часть

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.

3.1 Контрольные вопросы

- 1 Что такое интерференция?
- 2 Какие волны называются когерентными?
- 3 Методы сложения когерентных волн
- 4 Что такое оптическая разность хода
- 5 Назначение измерительной линейки
- 6 Дайте определение следующим понятиям: интерференция, интерферометр
- 7 Что такое показатель преломления

3.2 Задание

1. Ознакомиться с устройством интерферометра Маха-Цендера
2. Исследовать интерференционные картины при наличии и отсутствии дефектов в покровном стекле.

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.

3.3 Методические указания по выполнению работы

Методика проведения эксперимента

Рассмотрим интерференционную картину кристалла с дефектом поверхности:

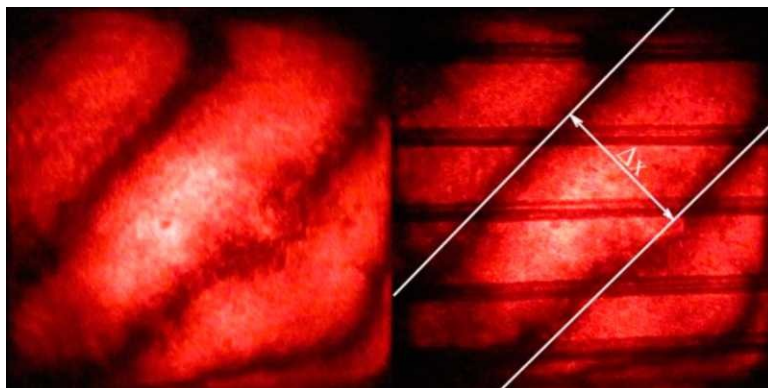


Рисунок 3.1 - Интерференционная картина кристалла с дефектом поверхности (слева - без измерительной пластинки, справа - с измерительной пластинкой)

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 $\Delta x = 4 \text{ мм}$. Это позволяет оценить размер дефекта, решив классическую задачу на интерференцию клина:

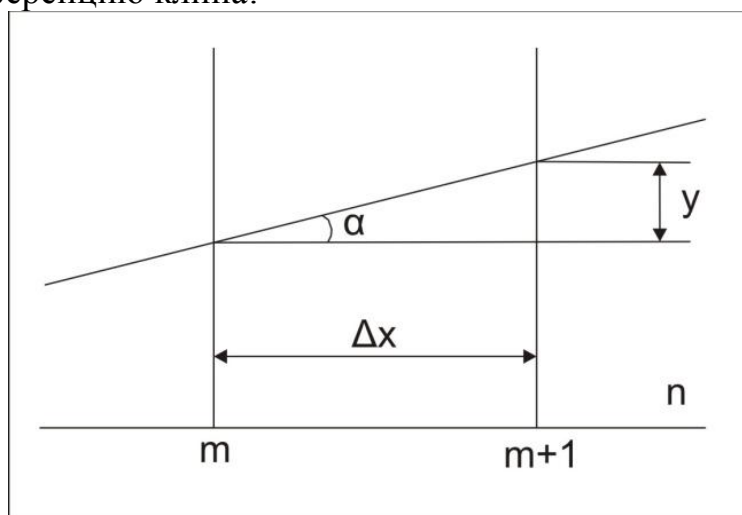


Рисунок 3.2 - Схема получения интерференции клина

Угол клина можно оценить как

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Разность хода лучей

$$\Delta = 2yn. \quad (3.2)$$

в то же время:

$$\Delta = [2(m+1) + 1] \frac{\lambda}{2n} - [2m + 1] \frac{\lambda}{2} = \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (3.3)$$

Приравняем правые части данных выражения и выразим величину :

$$2yn = \lambda \Rightarrow y = \frac{\lambda}{2n} \quad (3.4)$$

Подставим величину y в выражение для угла клина:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2n \cdot \Delta x} \quad (3.5)$$

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 интерферометра

При юстировке интерферометра микрометренными поворотами одного из зеркал добиваются того, чтобы выходящие из интерферометра пучки лучей a_1 и a_2 (рис. 2.3) 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. 2.3). 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 θ между соответственными лучами, координаты l плоскости локализации и разности хода Δ) обычно меняются и две другие. Чтобы облегчить юстировку, расстояние между зеркалами 1 и 2 (рис. 2.3) 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 (рис. 3.3) представляет собой стеклянную пластинку с нанесёнными на неё через 2 мм отсчётными линиями:

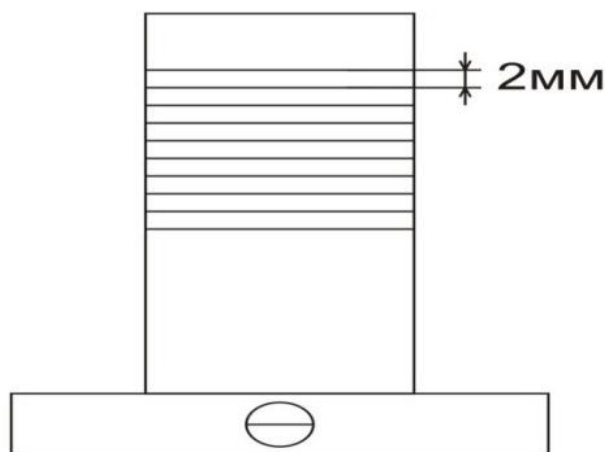


Рисунок 3.3 - Масштабная линейка

3.4 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

3.5 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. Kamshiln, 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. – 980. – 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.