

УДК 535.8

В.М. Косарев

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА

В работе предлагается способ измерения длины когерентности квазимонохроматического света, основанный на измерении разности хода интерферирующих лучей до величины, при которой интерференционные полосы исчезают. В качестве измерительного устройства используется микроинтерферометр МИИ-4У4.2, изначально предназначенный для контроля качества обработки металлических поверхностей, близких к зеркальным.

Длина когерентности света является одним из основных его параметров. Если разность хода Δ интерферирующих лучей меньше длины их когерентности D , то интерференционная картина наблюдается. Если $\Delta > D$, то интерференционной картины нет. При плавном изменении Δ (например, путем перемещения одной из отражающих поверхностей) момент исчезновения интерференционных полос соответствует ситуации, когда $\Delta = D$ [1]. Этим обстоятельством можно воспользоваться для измерения длины когерентности используемого света.

В литературе есть описание способа измерения D , основанного на измерении Δ интерферирующих лучей до величины, при которой интерференционные полосы исчезают, и предназначенного для использования в лабораторном практикуме по общей физике [2].

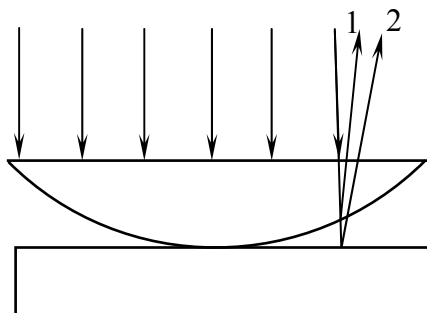


Рисунок 1 – Схема наблюдения интерференционной картины, используемой в [2]

В нем с помощью биологического микроскопа наблюдают в отраженном свете интерференционную картину, возникающую при интерференции луча 1, отраженного от выпуклой поверхности линзы (см. рис. 1), и луча 2, отраженного от плоской поверхности стеклянной пластинки. Множество таких лучей из параллельного пучка, падающего сверху, формирует интерференционную картину, которую обычно называют «кольца Ньютона». Геометрическая разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 определяется соответствующим удвоенным расстоянием от выпуклой поверхности линзы до плоской поверхности пластинки. Линза с помощью специального приспособления крепится к объективу микроскопа.

Разность хода интерферирующих лучей увеличивают путем подъема тубуса вместе с объективом (а значит, и вместе с линзой). При этом интерференционные кольца сбегаются к центру интерференционной картины и исчезают там. С помощью микровинта, вращение которого приводит к перемещению тубуса, измеряют то максимальное перемещение линзы d , при котором исчезает последнее кольцо интерференционной картины. Величину длины когерентности D рассчитывают по формуле $D = 2d$.

Недостатками способа, предлагаемого в [2], являются: 1. Для его реализации необходима перестройка биологического микроскопа для наблюдения интерференционной картины в отраженном свете и для осуществления перемещения линзы вместе с тубусом. 2. Способ измерения длины когерентности квазимонохроматического света путем изменения разности хода интерферирующих лучей имеет несколько разновидностей. В учебной лаборатории желательно показать хотя бы некоторые из них. Способ, предлагаемый в [2], не дает такой возможности.

В предлагаемом нами способе измерения длины когерентности квазимонохроматического света, основанного на измерении изменения разности хода интерферирующих лучей до величины, при которой интерференционные полосы исчезают, в качестве измерительного устройства используется микроинтерферометр МИИ-4У4.2, изначально предназначенный для контроля качества обработки металлических поверхностей, близких к зеркальным. Причем для измерения длины когерентности он не требует никаких переделок. В качестве квазимонохроматического света используется свет лампы накаливания микроинтерферометра, пропущенный через встроенный интерференционный светофильтр.

Оптическая схема микроинтерферометра представлена на рисунке 2, где показан ход одного луча из параллельного пучка, падающего на светоделительную пластинку 4.

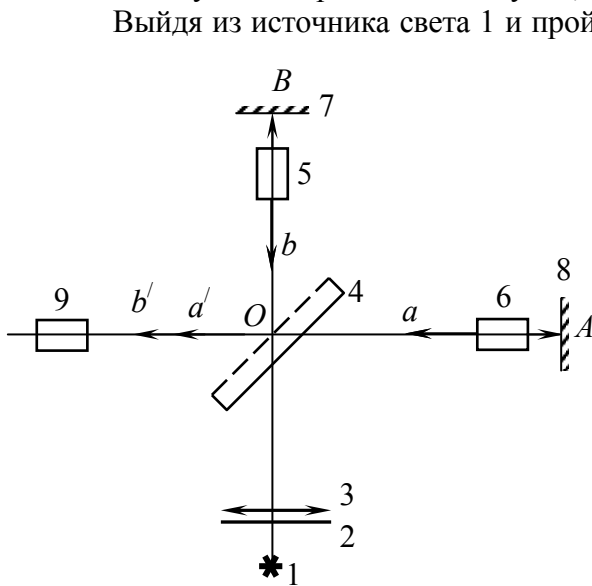


Рисунок 2 – Оптическая схема микроинтерферометра

Только в том случае, если слева от пластинки 4 встречаются «цуги-братья», будет формироваться устойчивая интерференционная картина, которую наблюдают через окуляр 9. Следовательно, разность хода $\Delta = 2(OA - OB)$, а значит, отставание (или опережение) одного цуга a относительно другого цуга b , не должна превышать длину цуга D , которая и есть длина когерентности, т.е. $\Delta \leq D$ (1). Это обязательное условие формирования устойчивой интерференционной картины.

Для сравнения путей, пройденных цугами a и b после светоделительного слоя 4 до их встречи слева от пластинки 4, будем откладывать пути для лучей типа b вдоль направления OA . Фактически таким способом мы строим мнимое изображение исследуемого зеркала 7 в полупрозрачном слое 4. Т.е. можно считать, что лучи a отражаются от эталонного зеркала 8, а лучи b – от изображения $7'$ исследуемого зеркала (рисунок 3а). Т.е. мы свели задачу к интерференции светового пучка на воздушной прослойке между 8 и $7'$, которая примет форму клина, если слегка повернуть исследуемое зеркало 7. В этом случае, если световой пучок, падающий на светоделительную пластинку 4, параллельный, наблюдаются так называемые полосы равной толщины, которые имеют форму прямых линий, параллельных ребру клина. Расстояние между полосами l (для нашего случая нормального падения светового пучка на клин и когда он воздушный) равно:

$$l = \frac{\lambda}{2\alpha}, \tag{2}$$

где λ – длина волны света, α – угол клина [1].

Если перемещать изображение $7'$ параллельно самому себе (в микроинтерферометре это делается путем перемещения объектива 5), то интерференционная картина

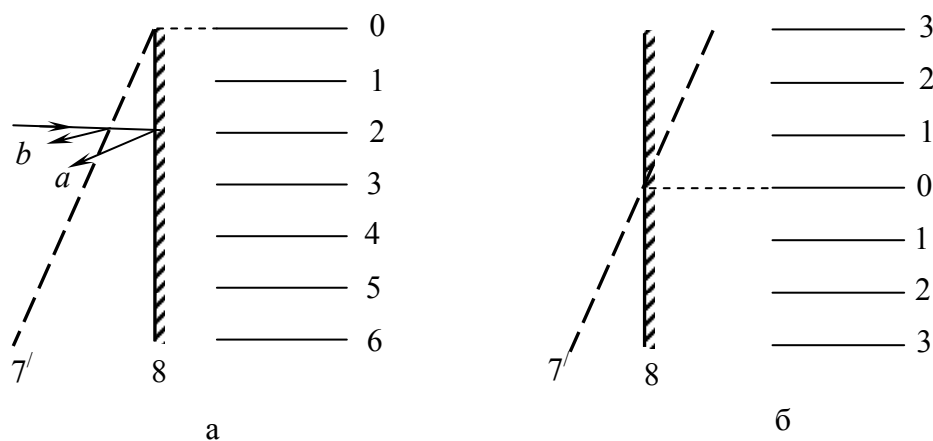


Рисунок 3 – Возникновение интерференционной картины в микроинтерферометре при двух положениях изображения $7'$ исследуемого зеркала

будет смещаться, причем число полос N , на которое сместится интерференционная картина, и перемещение объектива 5 (а значит, и изображения $7'$) h связаны формулой [1]:

$$h = \frac{\lambda}{2} N \tag{3}$$

На рисунке 3 показаны два положения эталонного зеркала 8 и изображения $7'$, а справа – схематически положение интерференционных полос с соответствующими порядками интерференции. Максимум нулевого порядка всегда располагается там, где пересекаются 8 и $7'$. В случае использования белого света он всегда белый, четкий. Максимумы остальных порядков окрашенные, т.к. их положения зависят от длины волны λ .

Если вместо исследуемого зеркала 7 использовать выпуклую поверхность сферической линзы, то мы будем наблюдать кольца Ньютона. На рисунке 4 представлены два положения изображения $7'$ выпуклой сферической поверхности линзы относительно эталонного зеркала 8 и соответствующие интерференционные картины.

В случае а) максимум нулевого порядка расположен в центре интерференционной картины, где изображение сферической поверхности линзы касается эталонного зеркала. Если объективом 5 (рисунок 2) удалять изображение сферической поверхности $7'$ от зеркала 8, кольца начнут сбегаться к центру картины (похожая ситуация реализуется в работе [2]). И когда удвоенное кратчайшее расстояние от изображения поверхности линзы до эталонного зеркала станет больше или равным длине когерентности, кольца полностью исчезнут. Если изображение сферической поверхности смещать вправо, кольцо нулевого порядка будет расширяться, а кольца более высоких порядков будут следовать за ним (рисунок 4, б).

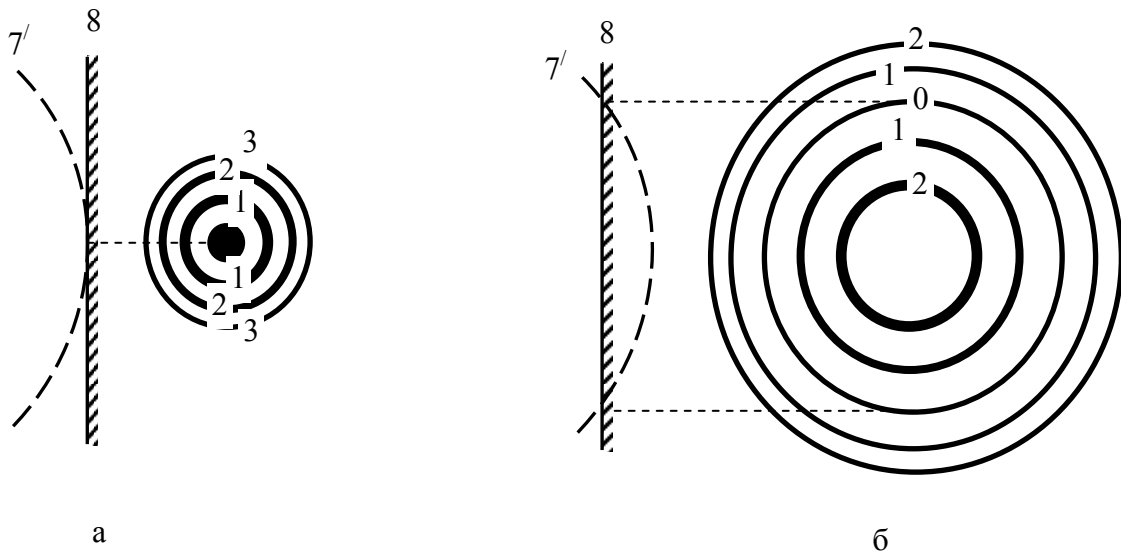


Рисунок 4 – Возникновение интерференционной картины в микроинтерферометре при двух положениях изображения 7' исследуемой линзы

Микроинтерферометр МИИ-4У4.2 изображен на фото (рисунок 5). 1 – это кожух лампочки накаливания, 2 – ее блок питания. Для получения квазимонохроматического света используются интерференционные светофильтры, вставленные в пластину 3. В зависимости от положения этой пластины свет проходит либо через зеленый, либо через желтый светофильтр, либо мимо них. Спектры пропускания светофильтров изображены на рис. 6, где по горизонтали отложена длина волны света λ в нм, а по вертикали – коэффициент пропускания $\tau = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}}$, где $I_{0\lambda}$ – интенсивность падающего на свето-

фильтр света, I_λ – прошедшего через него. Исследуемое зеркало (либо линза) кладется на столик 10. С помощью ручки 11 можно опускать шторку, расположенную внутри, перекрывая тем самым световой пучок, идущий к эталонному зеркалу 8. Тогда микроинтерферометр работает как обычный отражательный микроскоп. При открытой шторке наблюдается интерференционная картина через окуляр 9, совмещенный с измерительной головкой типа МПВ-1-15×, позволяющий производить измерения деталей интерференционной картины (например, расстояния между интерференционными полосами). Цена деления микровинта измерительной головки $0,3 \cdot 10^{-6}$ м. Перемещение объекта 5 осуществляется вращением микровинта 12, цена деления которого $3 \cdot 10^{-6}$ м.

Как уже указывалось, способ измерения длины когерентности квазимонохроматического света, основанного на измерении изменения разности хода интерферирующих лучей до момента исчезновения интерференционных полос, имеет несколько разновидностей. Это связано с тем, что интерференционную картину можно наблюдать на воздушной прослойке между двумя плоскими поверхностями (воздушный клин), между плоской и сферической поверхностью (кольца Ньютона). Кроме того, наблюдая интерференционную картину на воздушном клине, ситуацию, когда $\Delta = D$ (т.е. когда интерференционные полосы в определенном месте клина исчезают), можно оценивать либо путем перемещения одной из поверхностей, либо считая число наблюдаемых интерференционных полос.

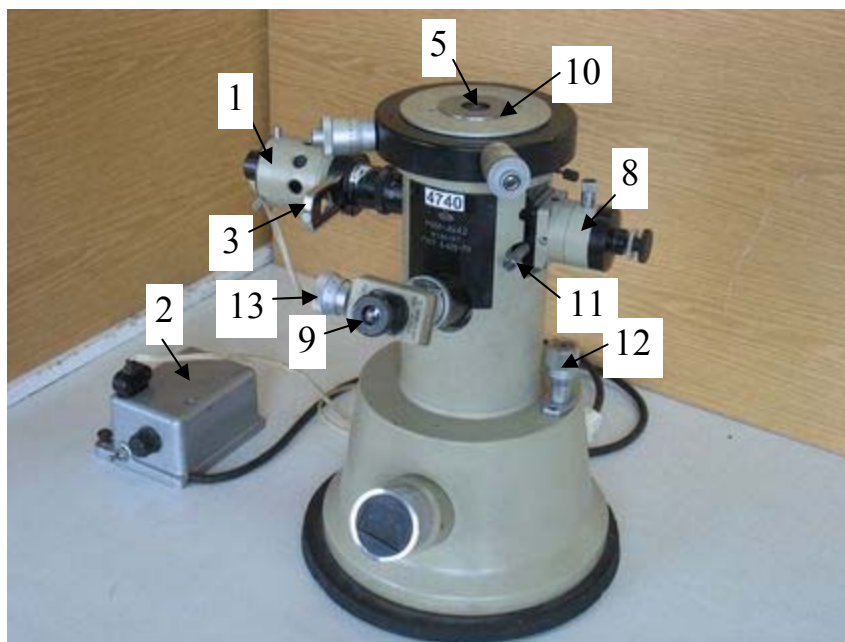


Рисунок 5 – Фотография микроинтерферометра МІИ-4У4.2

1. Кладем на столик 10 плоское зеркало. Пластины 3 ставим в среднее положение; в этом случае интерферометр работает в белом свете. Ручкой 11 перекрываем пучок света, идущий к эталонному зеркалу. Интерферометр работает как обычный отражательный микроскоп. Вращением микровинта 12 добиваемся, чтобы в окуляр 9 четко была видна поверхность зеркала, лежащего на столике. Ручкой 11 открываем световой пучок, идущий к эталонному зеркалу 8. В окуляре видны интерференционные полосы в виде прямых линий, причем максимум нулевого порядка резко выделяется своей четкостью и отсутствием окраски. Вращением микровинта 12 перемещаем максимум нулевого порядка в центр поля зрения окуляра, записываем показания микровинта d . Вращением микровинта на измерительной головке окуляра наводим на максимум нулевого порядка перекрестие, видимое в поле зрения окуляра. Пластиной 3 вводим в световой пучок желтый интерференционный светофильтр. При этом количество интерференционных полос резко увеличивается, полосы становятся монохромными. Медленно вращаем микровинт 12. Все полосы начинают перемещаться. Следим за контрастностью тех полос, которые находятся в районе перекрестия, т.е. где находился максимум нулевого порядка. Вращаем микровинт 12 до тех пор, пока контрастность полос в районе перекрестия не станет нулевой – полосы исчезнут. Делаем отсчет d_2 по микровинту 12. Величину длины когерентности D находим по формуле $D = 2(d_2 - d_1)$.

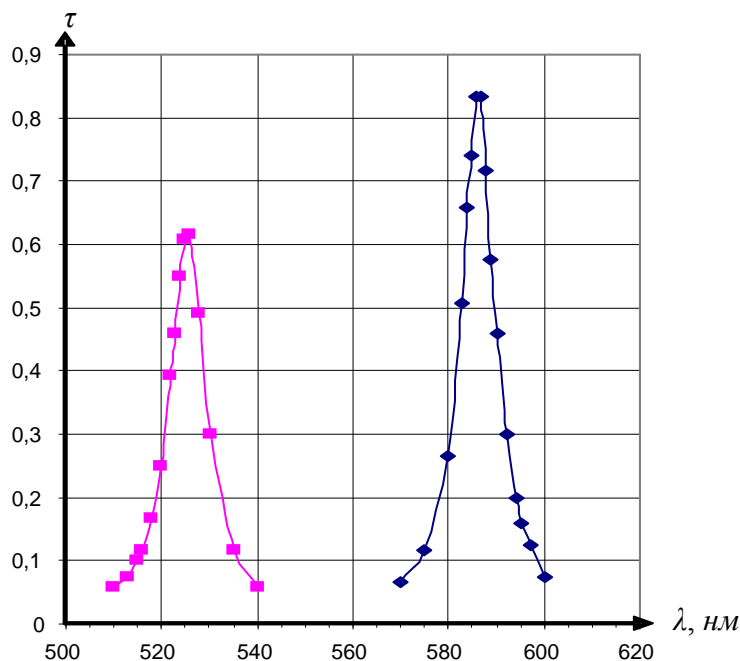


Рисунок 6 – Спектры пропускания желтого и зеленого интерференционных светофильтров

2. На столике 10 по-прежнему плоское зеркало. Пластину 3 ставим в среднее положение, интерферометр работает в белом свете. Вращением микровинта 12 перемещаем максимум нулевого порядка на край поля зрения окуляра. Вращением микровинта 13 на измерительной головке окуляра совмещаем перекрестие с максимумом нулевого порядка. Пластиной 3 вводим в световой пучок желтый интерференционный светофильтр. Последовательно наводя перекрестие окуляра (путем вращения микровинта 13 на измерительной головке) на каждую интерференционную полосу, считаем число N видимых полос. Длина когерентности определяется по формуле $D = \lambda N$.

3. На столик 10 вместо плоского зеркала кладем линзу выпуклой поверхностью вниз. Радиус кривизны этой поверхности $1,1 \cdot 10^{-2}$ м. Работая в белом свете, наблюдаем интерференционную картину «кольца Ньютона». Вращением микровинта 12 добиваемся, чтобы в центре картины находился максимум нулевого порядка. Делаем отсчет d_1 . Это соответствует ситуации, изображенной на рисунке 4а. Пластиной 3 вводим в световой пучок интерференционный светофильтр. Вращаем микровинт 12. Кольца начинают сбегаться к центру картинке. Вращаем микровинт до тех пор, пока в центре картины не исчезнет последнее видимое кольцо. Делаем отсчет по микровинту d_2 . Величину длины когерентности D находим по формуле $D = 2(d_2 - d_1)$.

Все измерения, описанные в пунктах 1 – 3, можно проводить и с зеленым светофильтром, беря соответствующие значения λ_3 ($\lambda_{жс} = 586$ нм, $\lambda_3 = 526$ нм).

С точки зрения величины погрешности измерений, предпочтение следует отдать варианту 2, т.к. в нем присутствует только случайная погрешность, связанная с определением места в интерференционной картине, где ее контрастность падает до нуля (полосы исчезают). В вариантах 1 и 3, кроме аналогичной случайной ошибки, присутствует систематическая погрешность, связанная с ценой деления микровинта 12, по которому делаются отсчеты перемещения объектива. При количестве измерений равном 10 и заданной надежности 0,9 это увеличивает погрешность примерно в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие : Для вузов. Т. IV. Оптика – 3-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2005. – 792 с.
2. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике : Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / В.Н. Александров, С.В. Бирюков, И.А. Васильева и др.; под ред. Е.М. Гершензона и А.Н. Мансурова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 464

V. Kosarev. The Way of Measurement of Length of Coherence of Quasi-monochromatic Light

The way of measurement of length of coherence of quasi-monochromatic light, based on measurement of a difference of a course interference beams up to size at which interference fringes disappear is offered in the article. As a measuring device microinterferometer МИ-4У4.2 is used, initially intended for quality assurance of processing metal surface, close to mirror.