

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана.

С.П. ЕРКОВИЧ

ИЗУЧЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ СВЕТА

И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОГЕРЕНТНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторным работам О-36 и О-37 по курсу общей физики

Под редакцией Л.К.Мартинсона

МГТУ, 1994

В теоретической части методических указаний поясняются понятия временной и пространственной когерентности света. В экспериментальной части дана методика измерения времени когерентности и площади когерентности. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Понятие когерентности света тесно связано с явлением интерференции. В случае интерференции двух световых пучков интенсивность в каждой точке пространства, где происходит их наложение, определяется интерференционной формулой

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta\varphi \rangle \quad (1)$$

Здесь I_1 и I_2 - интенсивности, создаваемые в точке наблюдения каждым из пучков в отдельности; $\delta\varphi$ — разность фаз интерферирующих волн в точке наблюдения, при этом угловые скобки означают временное усреднение за время наблюдения (много большее периода световых колебаний).

Два световых пучка, у которых разность фаз $\delta\varphi$ не изменяется за время наблюдения, называются взаимно когерентными. В этом случае

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

В тех точках пространства, где $\cos \delta\varphi = +1$, имеет место максимум интенсивности

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3)$$

а в тех точках, где $\cos \delta\varphi = -1$, имеет место минимум

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (4)$$

Два пучка, у которых разность фаз за время наблюдения хаотически меняется в широких пределах, называются некогерентными. Такими пучками являются, в частности, пучки волн, испускаемых двумя независимыми источниками, В этом случае $\langle \cos \delta\varphi \rangle = 0$ и, следовательно, третий член в формуле (1), называемый интерференционным членом, равен нулю. Отсюда следует

$$I = I_1 + I_2 \quad (5)$$

т.е. **некогерентные волны не интерферируют**.

В общем случае световые волны не являются строго когерентными или строго некогерентными. Для общего случая минимальное значение $\langle \cos \delta\varphi \rangle$ не достигает -1, а максимальное +1. Поэтому можно записать:

$$\begin{aligned} I_{\text{MAX}} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)| \\ I_{\text{MIN}} &= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)| \end{aligned} \quad (6)$$

где $|\gamma_{12}(\tau)|$ степень взаимной когерентности двух световых пучков. Она не превосходит единицы по модулю и зависит от свойств источников (индексы 1 и 2 относятся к двум источникам) и от разности хода волн или от разности времен распространения света от источников до точки наблюдения. Эта разность времен τ называется временем задержки, или запаздыванием.

Если $|\gamma_{12}(\tau)|=1$, то волны полностью когерентны; если $|\gamma_{12}(\tau)|=0$, то - полностью некогерентны. Волны с промежуточными значениями $|\gamma_{12}(\tau)|$ являются частично когерентными. Различают временную и пространственную когерентность.

1. Временная когерентность

Во многих случаях интерференцию наблюдают при наложении двух световых пучков, полученных от одного и того же источника. Для этого волну, излучаемую источником, расщепляют тем или иным способом на два пучка, а затем, после прохождения ими различного пути, обеспечивают их взаимное наложение. Интерференция наблюдается только в том случае, если разность хода и, следовательно, запаздывание, не слишком велика. В противном случае интерференция не наблюдается.

Понятием временной когерентности источника характеризуют сохранение взаимной когерентности при временном запаздывании двух световых пучков, полученных от одного источника или от одной точки волнового поля. Для таких двух пучков остаются справедливыми соотношения (6), в которых степень взаимной когерентности $|\gamma_{12}(\tau)|$ следует заменить на степень временной когерентности $|\gamma(\tau)|$, зависящей от запаздывания.

Количественной характеристикой временной когерентности может служить время когерентности τ_C - минимальное запаздывание, для которого степень временной когерентности принимает значение, равное нулю. Иногда пользуются понятием длины когерентности Δ_C . Длина когерентности равна произведению времени когерентности на скорость электромагнитного излучения в вакууме. По своему смыслу Δ_C — минимальная разность хода в вакууме, для которой степень временной когерентности принимает значение, равное нулю.

Строго монохроматические источники всегда когерентны; время когерентности у них не ограничено. Если же свет не является монохроматическим, а испускается в некотором узком интервале частот $\Delta\nu$, то $\tau_C=1/\Delta\nu$ и, соответственно,

$$\Delta_C = c / \Delta\nu \quad (7)$$

Принимая во внимание, что длина волны связана с частотой соотношением $\nu=c/\lambda$, получим

$$|\Delta\nu|=c\Delta\lambda/\lambda^2 \quad (8)$$

и, следовательно,

$$\Delta_C = \lambda^2 / \Delta\lambda \quad (9)$$

2. Пространственная когерентность

Понятием пространственной когерентности пучка лучей характеризуют наличие взаимной когерентности двух лучей, выделенных из различных точек сечения светового пучка. При этом взаимная когерентность проверяется по интерференции при запаздывании, равном нулю.

Для этого случая тоже справедлива формула (6), в которой вместо $|\gamma_{12}(\tau)|$ следует подставить степень пространственной когерентности $|\gamma_{12}(0)|$. Количественной характеристикой пространственной когерентности служит площадь когерентности S_C . Это ограниченная кривой $|\gamma_{12}(0)|=0$ площадь нормального сечения пучка лучей, в пределах которой степень пространственной когерентности принимает значения от 1 до 0.

Так как монохроматический пучок лучей, испускаемый точечным источником, всегда когерентен, он имеет неограниченную площадь когерентности. С увеличением размеров источника площадь когерентности сужается. Для вычисления площади пространственной когерентности пользуются теоремой Ван Циттерта – Цернике. В этой теореме доказывается, что степень коге-

рентности двух пучков в точках P_1 и P_2 , освещаемых протяженным источником, пропорциональна амплитуде напряженности поля в точке P_1 дифракционной картины Фраунгофера с центром в P_2 , создаваемой дифракцией на отверстии в непрозрачном экране, которое точно совпадает с исследуемым источником.

Если, в частности, источник представляет собой длинную полосу шириной a , то площадь когерентности оценивается как площадь дифракционного пятна между двумя первыми минимумами дифракции Фраунгофера на щели шириной a . Ширина b этого пятна, как известно, $b = 2\lambda l/a$, где l - расстояние от щели до экрана. Обозначая через $\theta = a/l$ угловой размер источника, видимый со стороны экрана, получим

$$b = 2\lambda/\theta \quad (10)$$

Эта зависимость связывает ширину площади когерентности с угловым размером источника для этого частного случая.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

РАБОТА О-36.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ И ДЛИНЫ ВРЕМЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ. ПРОВЕРКА ЗАВИСИМОСТИ ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ОТ ШИРИНЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Экспериментальная установка.

Для измерения длины когерентности в работе применен интерферометр Релея (рис. 1).

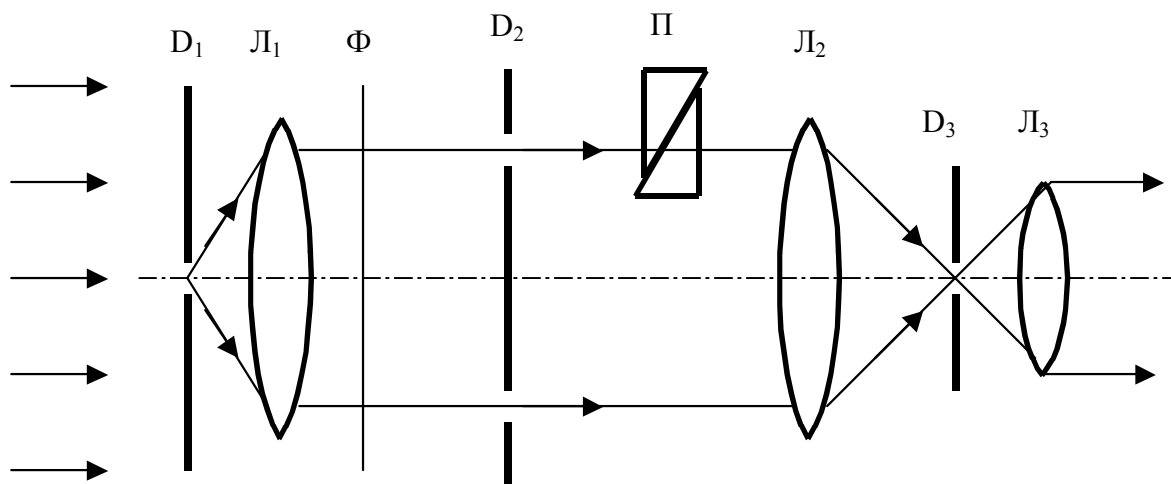


Рис. 1

Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, состоящего из объектива L_1 и узкой щели D_1 , проходит через сменный светофильтр Φ и диафрагму D_2 с двумя щелями и собирается в фокальной плоскости D_3 объектива L_2 зрительной трубы, в окуляре L_3 которой можно наблюдать интерференционную картину. На пути одного из интерферирующих пучков лучей установлена система из двух клиньев Π (эквивалентная плоскопараллельной пластинке переменной толщины), перекрывающая верхнюю половину сечения этого пучка (на рис. 1 это не отражено). Меняя толщину пластинки с помощью микрометрического устройства, можно плавно изменять разность хода лучей. При этом в окуляре зрительной трубы будут видны две системы интерференционных полос, из которых нижняя неподвижна, а верхняя перемещается при изменении разности хода.

С увеличением разности хода контраст верхней системы полос уменьшается. Момент уменьшения до нуля контраста верхней интерференционной картины против центральной (нулевой) полосы нижней картины соответствует разности хода, равной длине когерентности.

Разность хода отсчитывают по показаниям микрометрического винта. Последний имеет две шкалы, из которых одна, на барабане, имеет 100 делений, а вторая, на стебле, 30 делений, каждое из которых соответствует ста делениям шкалы барабана. Таким образом, вся шкала имеет 3000 делений. Одно деление шкалы соответствует разности хода $3,22 \cdot 10^{-8}$ м, т.е. цена деления $K=3,22 \cdot 10^{-8}$ м/дел. Показания шкалы наблюдаются через квадратное окно над окуляром зрительной трубы.

2. Выполнение эксперимента

1. Включите интерферометр в сеть с помощью шнура с вилкой.
2. Сняв верхнюю крышку интерферометра, установите в гнездо светофильтр № 1. Крышку закройте. Значение спектрального интервала и средней длины волны пропускания светофильтра занесите в табл. 1.
3. Поворачивая головку микрометрического винта, добейтесь исчезновения полос интерференции верхней картины против нулевой полосы нижней картины. Показания микрометрического винта L занесите в табл. 1.
4. Выполните такие же измерения для всех остальных светофильтров из набора, полученного у лаборанта. Результаты занесите в табл. 1.
5. Повторите (еще по два раза) измерения, описанные в пп. 3 и 4. Средние результаты L_{CP} занесите в табл. 1.
6. Выключите интерферометр из сети.

Таблица 1

Номер свето-фильтра	λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	L_1 , дел	L_2 , дел	L_3 , дел	L_{CP} , дел.	Δ_C , нм	$\Delta\nu$, c^{-1}	$\Delta\nu^{-1}$, с

3. Обработка результатов эксперимента.

1. По показаниям шкалы интерферометрического винта и цене деления K вычислите длину когерентности для каждого из светофильтров по формуле $\Delta_C = KL_{CP}$. Результаты занесите в табл. 1.
2. По спектральному интервалу пропускания $\Delta\lambda$ вычислите для каждого светофильтра соответствующий интервал частот $\Delta\nu$ по формуле (8). Результат занесите в табл. 1.
3. Постройте в декартовых координатах график зависимости длины когерентности Δ_C от $\Delta\nu^{-1}$.
4. Обозначив $\Delta\nu^{-1}$ через x , а Δ_C через y , вычислите статистические показатели эксперимента \bar{x} , \bar{y} , S_x , S_y , K_{xy} по формулам (10) – (15) руководства [1].
5. Проверьте справедливость соотношения $\Delta_C = c / \Delta\nu$ по выполнению критерия $r \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^2} \geq t_{\alpha, n-2}$ где r - выборочный коэффициент корреляции; n - число опытов; $t_{\alpha, n-2}$ квантиль распределения Стьюдента для уровня значимости α и числа степеней свободы $f=n-2$ (принять уровень значимости $\alpha = 0,1$).
6. Рассматривая соотношение $\Delta_C = c \cdot \Delta\nu^{-1}$ как уравнение линейной регрессии $y = a_1 x$, найдите коэффициент a_1 и его погрешность по соотношениям (21) и (28) руководства [1] при уровне значимости $\alpha = 0,1$.

РАБОТА 0-37.

ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ПЛОЩАДИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ. ПРОВЕРКА ЗАВИСИМОСТИ ПЛОЩАДИ КОГЕРЕНТНОСТИ ОТ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ИСТОЧНИКА.

1. Экспериментальная установка.

В основу измерений положена зависимость полуширины главного максимума дифракции на дифракционной решетке от числа N ее когерентно освещенных щелей

$$\Delta\varphi = \lambda / (N d \cos\varphi) \quad (11)$$

где d - постоянная дифракционной решетки; φ - угол дифракции.

Число N связано с шириной b когерентно освещенного участка соотношением $N=b/d$. Подставляя его в формулу (11), получим

$$b = \lambda / (\Delta\varphi \cos\varphi) \quad (12)$$

Исследуемым источником излучения служит входная щель гониометра, освещенная монохроматическим излучением зеленой линии ртутной дуги при $\lambda = 546$ нм.

В данной работе используется гониометр типа Г5 с предельной допускаемой погрешностью измерения угла не более пяти угловых секунд. Гониометр (рис. 2) состоит из массивного основания 2 с тремя подъемными винтами, вертикальной колонки 14 с коллиматором 12 и осевого устройства с алидадой 6, на которой имеется колонка со зрительной трубой 9. Последнюю вместе с алидадой вращают вокруг вертикальной оси прибора рукой или микрометренным винтом 4 после закрепления алидады зажимным винтом 3. Зрительная труба и коллиматор имеют внутреннюю фокусировку, осуществляемую с помощью винтов 10 и 13. На верхней части вертикальной оси установлен предметный столик 11.

На вертикальной оси прибора посажен стеклянный лимб с ценой деления $20'$ и оцифровкой через градус от 0 до 359. Отсчеты по лимбу производят с помощью отсчетного микроскопа 7, расположенного под окуляром 8 зрительной трубы. Изображения штрихов от двух диаметрально противоположных концов лимба передаются в поле зрения отсчетного микроскопа (рис. 3) в виде прямого верхнего ряда цифр и обратного нижнего ряда. Изображение делений шкалы отсчетного микроскопа (минуты и секунды) и горизонтальный индекс располагаются в правом окне поля зрения.

Чтобы взять отсчет по лимбу, нужно маховичок 5 оптического микрометра повернуть до совмещения верхних и нижних штрихов лимба, видимых в левом окне поля зрения отсчетного

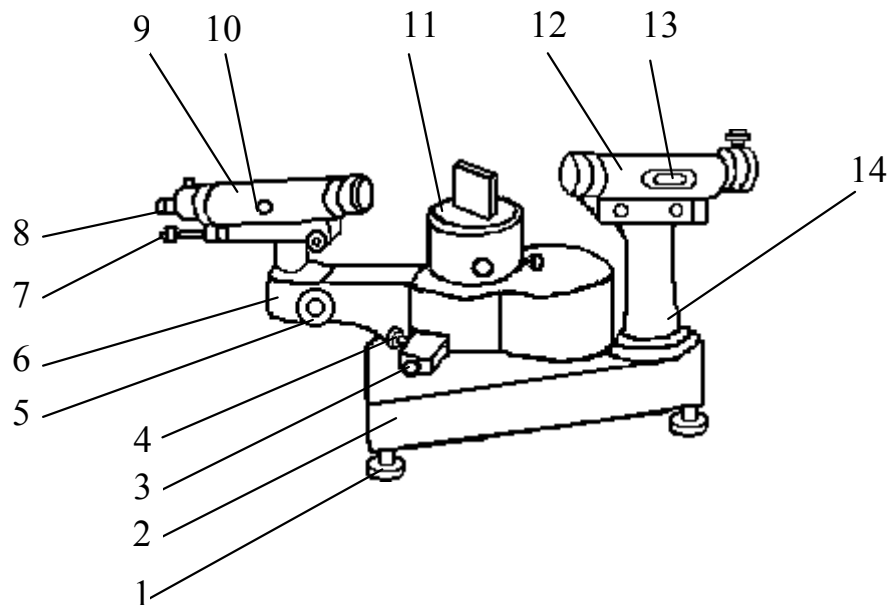


Рис.2

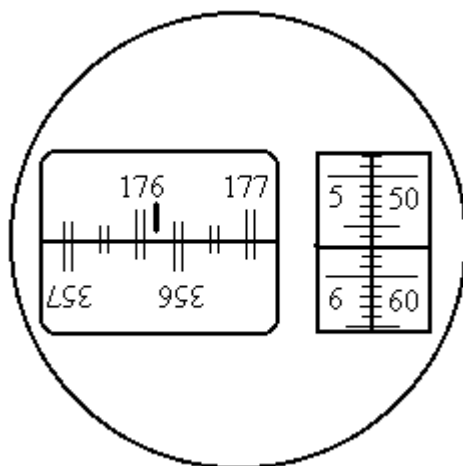


Рис.3

микроскопа. Градусы отсчитывают по верхнему ряду штрихов лимба влево от вертикального индекса до ближайшего оцифрованного штриха. Число десятков минут будет равно числу интервалов между верхним штрихом, по которому взято число градусов и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . Единицы минут отсчитывают в правом окне по левому ряду чисел, а секунды и доли их - по правому ряду чисел, располагающихся над горизонтальным неподвижным индексом.

Отсчет, соответствующий расположению штрихов, изображенному на рис. 3, будет складываться из отсчета по лимбу $176^\circ 10'$ и отсчета по шкале микроскопа $5'57''$. Суммарный отсчет составляет $176^\circ 15'57''$.

2. Выполнение эксперимента

1. Перед щелью коллиматора гониометра установите ртутную лампу. На столик гониометра поместите дифракционную решетку с известной постоянной d .
2. Наблюдая в окуляр зрительной трубы, добейтесь четкого изображения окулярной! сетки поворотом оправы окуляра.
3. Установите ширину входной щели $a=0,04$ мм. Значение ширины щели занесите в табл. 2.
4. Поворачивая зрительную трубу приблизительно до совмещения оптических осей коллиматора и зрительной трубы, уловите центральный максимум дифракционного спектра и убедитесь в четком изображении щели коллиматора в поле зрения трубы. Если изображение размыто, добейтесь резкости с помощью фокусирующего винта 10. Наведите вертикальную нить окулярной сетки на середину изображения. Определите по шкале отсчетного микроскопа угол α_0 , соответствующий середине изображения центрального максимума. Значение угла α_0 занесите в табл. 2.
5. Медленно поворачивая зрительную трубу вправо до появления в поле зрения зеленой линии ртути в спектре первого порядка, наведите вертикальную нить окулярной сетки на середину линии от руки, поддерживая при этом резкость изображения линии с помощью винта 10.
6. Закрепив алидаду гониометра зажимным винтом 3, наведите с помощью микрометрического винта 4 вертикальную нить окулярной сетки на левую границу линии. Отсчитайте по шкалам отсчетного устройства микроскопа угол α_1 , соответствующий левому краю линии. Отсчет сделайте с точностью до одной угловой секунды. Значение угла α_1 занесите в табл. 2.
7. Переведите с помощью микрометрического винта 4 вертикальную нить окулярной сетки на правую границу линии. Отсчитайте, с точностью до одной угловой секунды, по шкалам отсчетного микроскопа угол α_2 , соответствующий правому краю линии. Значение α_2 занесите в табл. 2.

Выполните аналогичные измерения углов α_1 и α_2 , установив ширину щели $a=0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10; 0,11; 0,12; 0,13; 0,14$ мм.

a , мм	a_0	a_1	a_2	φ	$\Delta\varphi$, рад	b , мм	θ , рад	θ^{-1} , рад ⁻¹

3. Обработка результатов эксперимента.

1. По значениям углов α_0 и α_1 вычислите угол φ дифракции для зеленой линии ртути по формуле $\varphi = |\alpha_1 - \alpha_0|$. Результаты, выраженные в градусах, занесите в табл. 2.
2. По значениям углов α_1 и α_2 найдите полуширину главного максимума дифракции для каждого из опытов по формуле $\varphi = |\alpha_1 - \alpha_2|/2$. Результаты, представленные в радианах с точностью до четырех значащих цифр занесите в табл. 2.
3. Вычислите ширину b когерентно освещенного участка по формуле (12), результаты занесите в табл. 2.
4. Вычислите угловую ширину θ источника света (щели) по формуле $\theta = a/l$, где l — фокусное расстояние коллиматора, равное 400 мм. Результаты занесите в табл. 2.
5. Постройте график зависимости ширины когерентно освещенного участка b от θ^{-1} .
6. Обозначив θ^{-1} через x , b через y , вычислите статистические показатели эксперимента \bar{x} , \bar{y} , S_x , S_y , K_{xy} по формулам (10) – (15) руководства [1].
7. Проверьте справедливость соотношения $b = 2\lambda/\theta$ по выполнению критерия $r \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^2} \geq t_{\alpha, n-2}$, где r - выборочный коэффициент корреляции; n - число опытов; $t_{\alpha, n-2}$ квантиль распределения Стьюдента для уровня значимости α и числа степеней свободы $f = n-2$ (принять уровень значимости $\alpha = 0,1$).
8. Рассматривая соотношение $b = 2\lambda/\theta$ как уравнение линейной регрессии $y = a_1 x$, найдите коэффициент a_1 и его погрешность по формулам (21) и (28) руководства [1] при уровне значимости $\alpha = 0,1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерквич С.П. Применение регрессионного и корреляционного анализа для исследования зависимостей в физическом практикуме. Изд-во МГТУ 1994.
2. Савельев И.В. Курс физики М.: Наука, 1989. Т. 2.