

УДК 615.849.19.03:616.1

*Я.В. Павлова, С.И. Сакович, П.П. Черненко***Определение степени когерентности лазерного излучения при прохождении через кровь человека**

В последнее время возрос интерес к биостимулирующему эффекту, обусловленному низкоинтенсивным излучением гелий-неонового лазера, и связанному с ним механизму взаимодействия. Однако количественная информация об этом явлении весьма скудна, и поэтому молекулярный механизм биостимулирующего действия излучения гелий-неонового лазера совершенно не ясен. Например, возникает вопрос, чем объяснить особую чувствительность биологических объектов к облучению красным светом на фоне систематического облучения белым светом, в спектре которого содержится красная компонента примерно такой же мощности? Часто ссылаются на особую роль когерентности лазерного излучения на биологические объекты [1]. Поэтому предстоит провести детальные количественные исследования биостимулирующего эффекта, прежде чем удастся понять его механизм на молекулярном уровне.

В настоящей работе исследовался процесс потери когерентности излучения гелий-неонового лазера при прохождении через слой крови. Кровь выбрана в качестве объекта исследования, так как в клинической медицине решение ряда задач диагностики и терапевтического воздействия связывают с прохождением излучения через кровь.

Понятие когерентности в оптике впервые было введено для описания явлений дифракции и интерференции. Классический анализ когерентности реальных оптических полей базируется на теории электромагнитного поля Максвелла и теории случайных функций. В качестве характеристик поля используют измеряемые экспериментально величины: средние значения интенсивности излучения. Существуют два крайних случая когерентных волн: полностью когерентная волна и полностью некогерентная волна [2]. Полностью некогерентная волна создается источником, образованным множеством независимых излучателей, например атомов, поэтому представляет собой суперпозицию большого числа волн с различными частотами в некотором спектральном интервале. Волны, созданные элементарными излучателями, можно рассматривать как независимые со случайными фазами. Тогда в силу центральной предельной теоремы оптическое поле является случайным гауссовым,

или нормальным, с нулевым средним значением амплитуды. Поэтому полностью некогерентную волну называют также гауссовой. Волновая оптика оперирует понятиями идеально когерентных и идеально некогерентных световых пучков. В первом случае суперпозиция пучков приводит к сложению амплитуд и, следовательно, к явлению интерференции. Во втором случае при суперпозиции суммируются интенсивности, поэтому интерференция не возникает. В действительности оба эти случая не что иное, как математическая идеализация, поскольку реальные световые пучки частично влияют друг на друга, т.е. коррелируют между собой.

Таким образом, в действительности ситуация является промежуточной и соответствует случаю частично когерентных световых пучков. Суперпозиция таких пучков дает интерференционную картину, видимость которой меньше видимости интерференционной картины, образуемой полностью когерентными пучками. Так как когерентность поля обуславливается когерентностью излучателей (которые оказываются в ряде случаев взаимно синхронизированными), очевидно, что необходимо рассматривать «промежуточные» состояния между состояниями когерентности и некогерентности, т.е. состояния частичной когерентности. В отличие от тепловых источников света для лазеров характерна сильная связь между излучающими атомами и создаваемыми ими полями. Причина такой сильной связи – механизм вынужденного испускания света. Очень важно также, что из-за нелинейности среды возникает взаимосвязь между различными видами колебаний в резонаторе лазера. Поэтому, строго говоря, совместное распределение вероятностей для поля излучения лазера в различных пространственно-временных точках не является гауссовым. Световое поле лазера обнаруживает корреляцию высших порядков, не приводящую к интерференционным эффектам. Хотя для описания статистических свойств лазера требуется знание корреляционных функций высших порядков, для многих прикладных задач оказывается возможным ограничиться нахождением функции второго порядка. Поэтому в дальнейшем оптическое поле будем описывать с помощью функции когерентности

второго порядка [3]. Корреляционная функция второго порядка отражает корреляцию между амплитудами светового пучка в двух пространственно-временных точках. Когерентность второго порядка наглядно прослеживается в опыте Юнга. Связь теоретического описания когерентности второго порядка с данными интерференционных измерений дает комплексная степень когерентности, нормированная величина [3]

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)}}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{11}(0), \Gamma_{22}(0)$ – корреляционные функции второго порядка, $\Gamma_{12}(\tau)$ – взаимная функция когерентности. Измеряя полную интенсивность и интенсивность отдельных пучков света, прошедших через каждое отверстие, можно определить функцию $\gamma_{12}(\tau)$. Мерой контрастности интерференционной картины служит видимость в точке Р

$$\mathcal{V}(P) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

где I_{\max}, I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности в непосредственной окрестности точки Р.

Для одинаковых по интенсивности пучков света в опыте Юнга модуль комплексной степени когерентности равен видимости интерференционной картины, которую можно найти экспериментально. Для описания корреляции излучения с самим собой, т.е. в одной и той же точке пространства, но в отличающиеся на τ моменты времени, используют понятие временной когерентности. Атомы излучают с неопределенностью в величине частоты $\frac{1}{\tau_{\text{ког}}}$, и оптическое из-

лучение складывается из наборов цугов волн, затухающих тем быстрее, чем короче $\tau_{\text{ког}}$. За промежуток времени усреднения инерционного фотодетектора колебания, существовавшие в начальный момент, уступают место колебаниям нового цуга волн с той же частотой, но со случайно измененной фазой. Поэтому когерентность излучения с самим собой существует для задержки во времени τ , не превышающей $\tau_{\text{ког}}$. Применительно к двум оптическим колебаниям время когерентности означает, что их разность фаз не успевает измениться на величину, сравнимую с 180° , за промежуток времени $\tau_{\text{ког}}$.

Степень временной когерентности может быть измерена при помощи интерферометра Майкельсона. Измерение степени пространственной когерентности излучения при прохождении через щель проводилось на эксперимен-

тальной установке с использованием интерференционной схемы Юнга (рис. 1). Излучение гелий-неонового лазера расширяется и коллимируется посредством двух линз Л1 и Л2, после чего направляется на экран Э. Отверстия О1 и О2 в экране становятся источниками вторичных волн, которые линза Л3 сводит в фокальную плоскость, где расположена щелевая диафрагма Д. Интенсивность света в плоскости диафрагмы определяется по показаниям вольтметра постоянного тока, подключенного к нагрузке ФЭУ.

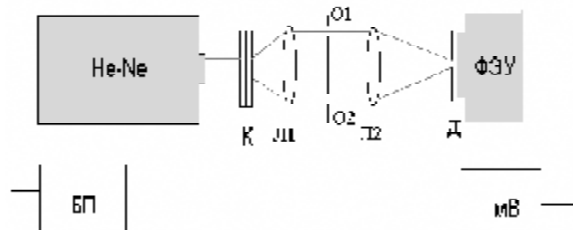


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения степени пространственной когерентности

Для измерения степени пространственной когерентности лазерного излучения необходимо сначала добиться одинаковой интенсивности света от каждого из отверстий О1 и О2. С этой целью следует перекрывать поочередно отверстия в экране, перемещая его поперек оптической оси и контролируя интенсивность света в плоскости диафрагмы Д по величине тока ФЭУ. Затем надо установить ширину щели диафрагмы Д много меньшую размера интерференционной полосы, но достаточную для регистрации интенсивности света с помощью ФЭУ. Измеряя интенсивность в максимуме и соседнем минимуме интерференционной картины, можно рассчитать степень пространственной когерентности как видимость интерференционной картины. Таким образом определялась когерентность излучения гелий-неонового лазера при прохождении через воздух. Затем на пути пучка помещалась кювета с кровью. Измерения степени временной когерентности излучения при прохождении через кровь проводились на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 2.

Практически параллельный пучок излучения гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda=0,63$ мкм падает на полупрозрачную пластинку П. Здесь пучок разделяется на два взаимно перпендикулярных пучка. Отраженный пластинкой П пучок падает на зеркало З₁, отражается назад, вновь попадает на пластину, где снова разделяется на две части. Одна из них идет к источнику и не представляет интереса, а другая попадает на линзу Л. Прошедший сквозь пластину П пучок

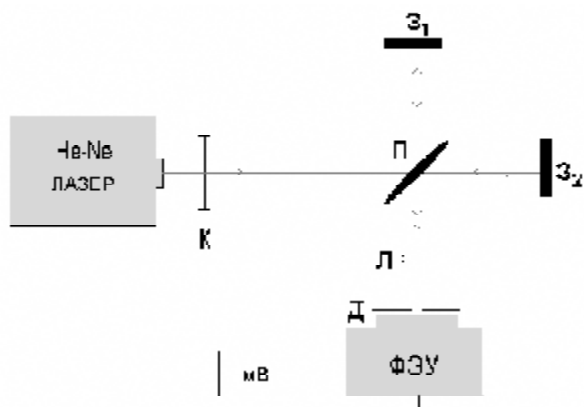


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения степени временной когерентности

от источника падает на зеркало З₂, возвращается к П и частично возвращается к Л. Таким образом, от одного источника получаются два пучка примерно одинаковой интенсивности, которые распространяются после разделения пластинкой П, затем снова встречаются и образуют интерференционную картину. В ходе эксперимента по определению степени пространственной и временной когерентности получены следующие результаты (использовались кюветы с толщинами от 0,1 до 1,08 мм). Степень пространственной когерентности лазерного излучения при прохождении через воздух составила 0,9. При прохождении через слои крови, равные 0,1 и 1,08 мм, — 0,82, 0,13 соответственно. Относительная погрешность измерений 2,3% (рис. 3).

Степень временной когерентности в указанном диапазоне толщин слоев крови изменялась от 60 до 40% (рис. 4).

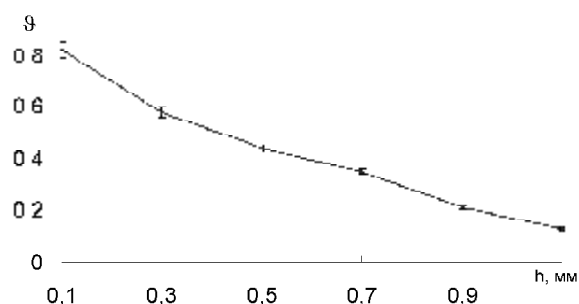


Рис. 3. Зависимость степени пространственной когерентности лазерного излучения от толщины слоя крови

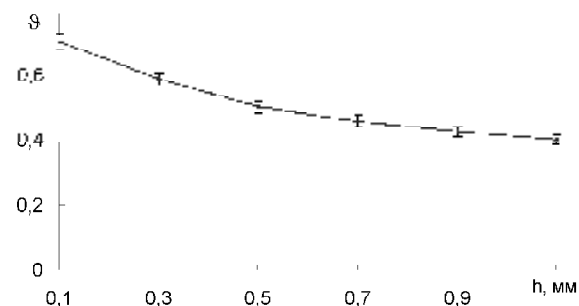


Рис. 4. Зависимость степени временной когерентности лазерного излучения от толщины слоя крови

Проведенные эксперименты показывают, что излучение при прохождении через слой крови становится менее когерентным. Другими словами, эффекты биостимуляции и лечебного воздействия неоднозначно зависят от когерентности излучения, что не противоречит результатам подобных экспериментов [1].

Авторы благодарят профессора В.И. Букатого за помощь в работе.

Литература

1. Кару Т.И. Зависимость биологического действия низкоинтенсивного видимого света на клетки HeLa от когерентности, дозы, длины волны и режима облучения / Т.И. Кару, Г.С. Календо, В.С. Летохов, И.И. Лобко // Квантовая электроника. — 1982. — Т. 9. — №9.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы : учебное пособие для вузов. — М., 1999.
3. Перина Я. Когерентность света. — М., 1974.