

УДК 535.361:004.93

ФОТОННАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ВИДЕО**Г. А. Шадрин***Сургутский государственный университет, g_shadrin@mail.ru*

В статье рассматривается новый способ фотонной корреляционной спектроскопии. В качестве приемника излучения используется видеокамера. Полученное цифровое видео обрабатывается на компьютере. В результате получают параметры мутной среды.

Ключевые слова: Фотонная корреляционная спектроскопия, мутные системы, корреляционная функция флуктуаций интенсивности, формула Стокса–Эйнштейна.

PHOTON CORRELATION SPECTROSCOPY USING A DIGITAL VIDEO**G. A. Shadrin***Surgut State University, g_shadrin@mail.ru*

The article deals with a new method of photon correlation spectroscopy. The radiation receiver use your camcorder. Received digital video is processed on a computer. The result is a turbid medium settings.

Keywords: photon correlation spectroscopy, turbid system, correlation function of the intensity fluctuations, Stokes-Einstein formula.

Фотонная корреляционная спектроскопия один из наиболее современных точных методов исследования мутных систем, широко используется в области коллоидов, аэрозолей, взвесей и прочих систем с частицами больше релеевского предела рассеяния.

Этот метод позволяет измерить размер взвешенных частиц, вязкость раствора и другие его характеристики, исследуют поведение различных коллоидных систем, а также полимерных растворов и гелей. В последние годы этот метод используют для анализа физиологических жидкостей в медицинской диагностике. Метод динамического рассеяния света используется также для измерения скоростей потоков жидкости и газа.

Предложенное автором усовершенствование метода имеет большую практическую и научную ценность, позволяя облегчить и упростить применение данного метода. Кроме того, открывает дополнительные возможности для анализа оптических свойств частиц.

Реализовано усовершенствование метода измерения размеров частиц с помощью динамического рассеяния света. В качестве детектора рассеянного света и используется видеокамера. Компьютерная обработка видеофайла позволяет определить параметры рассеяния света на частицах и параметры самих частиц. Приведена блок-схема установки (рисунок 1) и результаты пробных экспериментов.

Принцип измерения размеров частиц основан на измерении и анализе флуктуаций в разные моменты времени интенсивности рассеянного света в объеме, содержащем частицы. Благодаря случайному движению частиц, вызванному некомпенсированными толчками молекул растворителя, интенсивность света осциллирует относительно своего среднего значения. По частоте этих осцилляций можно получить информацию о коэффициенте диффузии частиц, который зависит от размеров частиц. Коэффициент диффузии частиц обратно пропорционален характерному времени релаксации флуктуаций интенсивности рассеянного света. Это характерное время есть время затухания экспоненциальной временной корреляционной функции рассеянного света, которая измеряется с помощью цифрового коррелятора. Размер частиц рассчитывается по формуле Стокса–Эйнштейна, которая связывает размер частиц с их коэффициентом диффузии и вязкостью жидкости.

Хаотическое броуновское движение дисперсных частиц вызывает микроскопические флуктуации их локальной концентрации. В свою очередь, эти флуктуации приводят к локальным неоднородностям показателя преломления среды. При прохождении лазерного луча через такую среду часть света будет рассеяна на этих неоднородностях. Флуктуации интенсивности рассеянного света будут

соответствовать флуктуациям локальной концентрации дисперсных частиц. Информация о коэффициенте диффузии частиц содержится в зависящей от времени корреляционной функции флуктуаций интенсивности.

Временная автокорреляционная функция, согласно определению, имеет следующий вид:

$$G(\tau) = \langle I(0)I(t-\tau) \rangle = \lim_{t_m \rightarrow \infty} \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} I(0)I(t-\tau) dt,$$

где: – интенсивность I имеет различные значения во время t и $(t-\tau)$.

t_m – это время интегрирования (время накопления корреляционной функции).

В соответствии с гипотезой Онзагера, релаксация микроскопических флуктуаций концентрации к равновесному состоянию может быть описана первым законом Фика (уравнением диффузии):

$$\frac{\partial c(\vec{r}, t)}{\partial t} = -D \nabla^2 c(\vec{r}, t)$$

где: – $c(r, t)$ – концентрация и D – коэффициент диффузии частиц.

Можно показать, что в такой системе автокорреляционная функция интенсивности рассеяния света экспоненциально затухает во времени, и характерное время релаксации однозначно связано с D . Корреляционная функция интенсивности рассеянного света (для случая квадратичного детектирования) имеет вид:

$$G(\tau) = a \exp\left(\frac{-2\tau}{t_c}\right) + b$$

$$\frac{1}{t_c} = D_t q^2$$

Волновой вектор флуктуаций концентрации описывается выражением:

$$q = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

где: – a и b – экспериментальные константы, n – показатель преломления жидкости, в которой взвешены дисперсные частицы, λ – длина волны лазерного света и θ – угол рассеяния. [1, 2, 3]

Цель работы состояла в проведении модификации метода фотонной корреляционной спектроскопии с помощью замены системы ФЭУ на более простую и универсальную систему цифровой видеозаписи.

Оптическая схема предложенного фотонного корреляционного спектрометра. В качестве источников света используются лазер: ЛГ-503 (длина волны 0.6328 мкм) Источник питания ЛГ-79-1. В кювету направляется луч лазера. Рассеянный свет собирается под углом 90°. Системой для счета фотонов является видеокамера, каждая ячейка светочувствительной матрицы накапливает заряд пропорциональный количеству фотонов. Данные о зарядах в ячейках трех базовых дополняющих цветов записываются в видеофайл. Компьютер служит для записи и последующего анализа видеофайла. Установка позволяет динамические характеристики рассеянного света. Блок-схема установки приведена на рисунке.1.

Для проверки работоспособности данной установки были проведены измерения размеров мелкодисперсных частиц. В качестве образца были взяты образцы, состоящие из смеси молока и воды (в пропорции – 0,05 мл. молока к 200 мл. воды), образец смеси помещался в установку. Рассеянный луч лазера фиксировался на цифровую видеокамеру. Кадры полученного видео последовательно передавались в программу обработки, где из них выделялся фрагмент из нескольких пикселей соответствующий рассеянному лучу. Данные интенсивности света по всем трем каналам цветности записывались в таблицу для последующей обработки.

В данных расчетах использовалась усредненная интенсивность по всем каналам. Таблица интенсивности нормировалась на 1. Полученная табличная зависимость нормированной интенсивности от номера кадра, что соответствует 1/24 с, использовалась для нахождения временной автокорреляционной функции (рисунок 2). По данной функции строилась зависимость автокорреляционной функции от временного сдвига $R_t(\tau)$

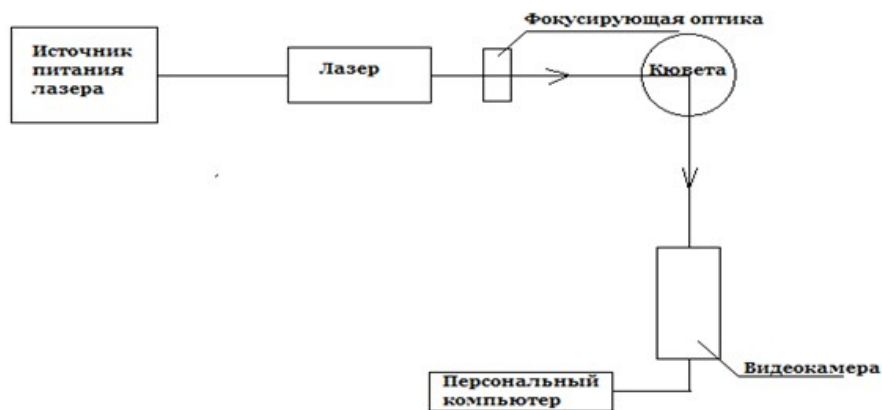


Рис. 1. Блок-схема установки для фотонной корреляционной спектроскопии с помощью анализа видеофайла

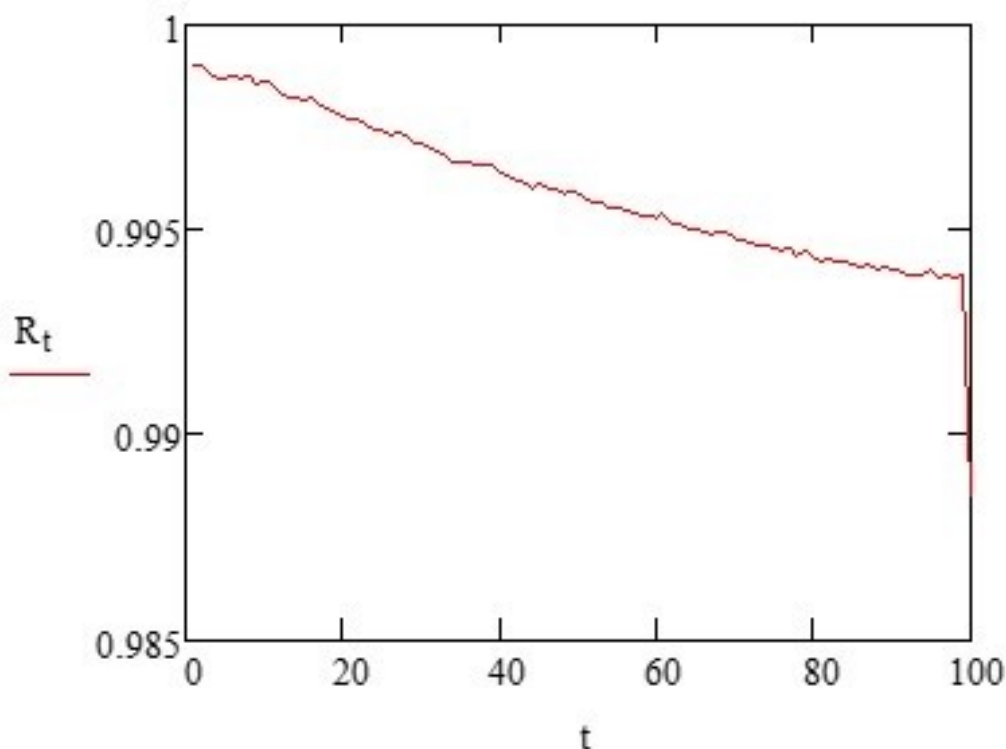


Рис. 2. Экспериментальная автокорреляционная функция $R_t(\tau) = \langle I(0)I(t - \tau) \rangle$, где t — смещение в кадрах

Затем полученная зависимость аппроксимировалась экспонентой и определялось значение времени корреляции t_c (рисунок 3). Найденное значение использовалось для расчёта — коэффициент диффузии частиц $\frac{1}{t_c} = D_t q^2$.

Для нахождения коэффициента диффузии рассчитывается волновой вектор флуктуаций концентрации, при следующих условиях:

$$\theta = \frac{\pi}{2}, \quad \lambda = 0.6328 \text{ мкм}, \quad n = 1.3311, \quad \eta = 0.01002 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (\text{при } t = 20^\circ\text{C}).$$

Полученное значение коэффициента диффузии используя уравнения Стокса-Эйнштейна $D = \frac{k_b T}{6\pi\eta R}$, позволяет определить радиус частиц $R = \frac{k_b T}{6\pi\eta D}$.

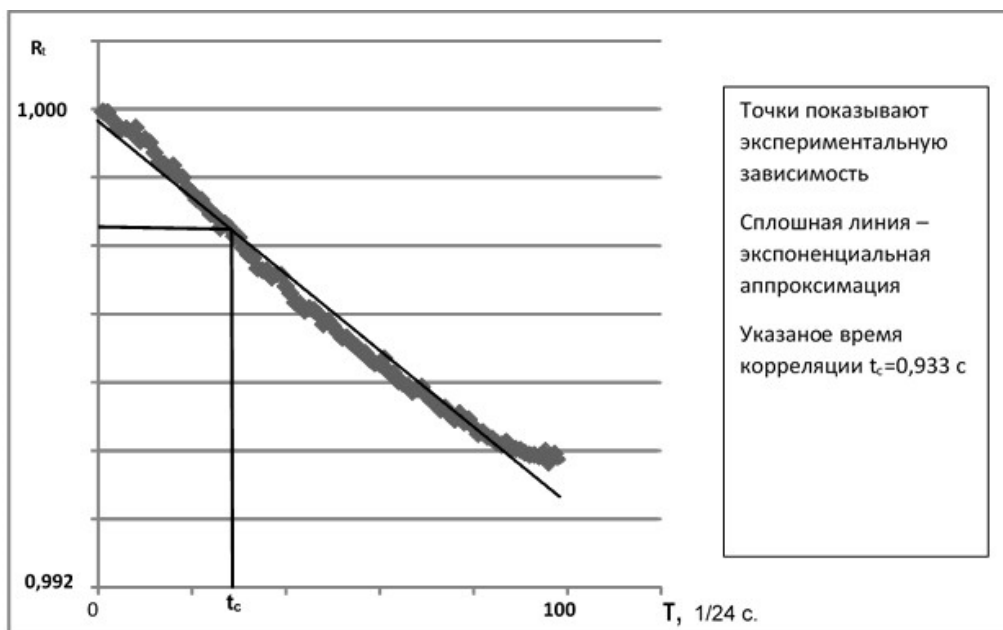


Рис. 3. Аппроксимация автокорреляционной функции

Проведенный опыт дает значение радиуса частиц молока в воде $R = 6,4 \cdot 10^{-6}$ м. В молоке жир присутствует в виде эмульсии или суспензии в молочной плазме. Диаметр жировых шариков колеблется от 0,1 до 20 мкм, средний размер 3-4 мкм [4]. Таким образом полученное в опыте значение размера частиц совпадает с табличным, что подтверждает работоспособность метода.

Таким образом усовершенствованного метода фотонной корреляционной спектроскопии, состоящее в использовании более простой и доступной цифровой видеоаппаратуры, с последующим анализом видеофайла, позволяет упростить регистрацию параметров рассеянного света. Кроме того, данный метод обладает большей информативностью, за счет использования трех каналов разной длины волны. И самое главное позволяет осуществлять измерения дистанционно, на основе видеосъемки рассеянного света от любых источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов / Под ред. Г. Камминса, Э. Р. Пайка. М. : Мир, 1978. 584 с.
2. Berne B. J., R. Pecora. Dynamic Light Scattering with Applications to Chemistry, Biology and Physics. N.Y. : Willey-Interscience, 1976. 376 p.
3. Dynamic Light Scattering: The Method and Some Applications / Ed. by W. Brown. Oxford : Clarendon Press, 1993. 735 p.
4. Химия и физика молока. Учебник для вузов / Под ред. К. К. Горбатова. СПб. : ГИОРД, 2004. 288 с.