

УДК 520.872, 535.8:532.72

А.В.Крайский, Т.В.Миронова

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ: КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ОПОРНОЙ ВОЛНОЙ

АННОТАЦИЯ

Проведено сравнение результатов, полученных в схеме голографической записи с нестационарной опорной волной с линейным изменением частоты по координате и во времени и результатов корреляционной обработки цифровых фотографий, сделанных со случайным фоновым экраном (Background Oriented Schlieren), для процесса взаимной диффузии двух жидкостей.

**ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОПОРНАЯ ВОЛНА,
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, ДИФФУЗИЯ ЖИДКОСТЕЙ**

ВВЕДЕНИЕ

Для визуализации и измерения величины оптических неоднородностей широкое распространение получил корреляционный фоновый метод (Background Oriented Schlieren). Представляет интерес сравнение результатов исследования какого-либо процесса, приводящего к появлению оптических неоднородностей среды, полученных корреляционным методом, с результатами, полученными другими методами. В настоящей работе мы сопоставляем результаты для процесса взаимной диффузии двух бесцветных жидкостей. Данные получены путем корреляционной обработки цифровых фотографий случайного фонового экрана, сделанных в белом свете сквозь кювету, в которой происходит процесс диффузии. Эталонном для сравнения служат результаты, полученные нами для той же задачи значительно раньше методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии с нестационарной опорной волной [1 - 4] для лазерного излучения, прошедшего через кювету, в которой идет процесс взаимной диффузии.

При взаимной диффузии двух прозрачных жидкостей с горизонтальной границей раздела показатель преломления $n(t,x)$ является функцией времени и вертикальной координаты. Если предположить, что показатель преломления зависит только от концентрации вещества одного сорта, а поведение концентрации описывается решением уравнения диффузии с коэффициентом D , не зависящим от концентрации, то и показатель преломления смеси жидкостей будет подчиняться уравнению диффузии:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Функция

$$\varphi(t,x) = d \cdot n(t,x), \quad (2)$$

где d – толщина кюветы, имеет размерность длины и является исследуемой, изменяющейся в процессе диффузии частью оптического пути светового пучка на пути до системы регистрации, как при голографической записи информации, так и при корреляционных фоновых измерениях.

В голографической установке запись сигнала проводилась по схеме двухэкспозиционной интерферометрии, т.е. запись сигнальной волны, прошедшей через исследуемую кювету накладывалась на такую же запись сигнала без кюветы. Запись проводилась с нестационарной опорной волной с линейным изменением частоты по координате и во времени [4]. Изменение частоты происходило по горизонтальной координате, вдоль границы раздела жидкостей. В качестве исследуемых жидкостей были взяты дистиллированная вода и растворы H_2SO_4 и KCl . При освещении голограммы стационарной опорной волной в восстановленной волне содержалась вся информация об оптических характеристиках процесса. С применением астигматической оптики из восстановленной волны выделялись основные виды зависимостей: пространство - время, пространство - временной спектр, угловой спектр - временной спектр, угловой спектр - время.

Зависимость пространственного распределения сигнала от времени наблюдалась при восстановлении голографической записи в виде картины интерференции модулированного кюветой сигнала с немодулированным сигналом из другой экспозиции. Примеры таких интерферограмм приведены на рис.1. На картине четко видны интерференционные полосы, рисующие пространственно-временной фазовый портрет показателя преломления. В сущности, можно сказать, что каждая интерферограмма представляет собой несколько десятков непрерывных разрешенных во времени кадров. В каждый момент времени зарегистрирована интерференционная картина, по которой можно восстановить профиль показателя преломления по вертикали. Сравнивая два достаточно близких профиля, можно определить производную показателя преломления по времени, которая характеризуется наклоном полосы в рассматриваемой точке. Эти интерференционные картины использовались далее для расчетов других представлений сигнала [1-4].

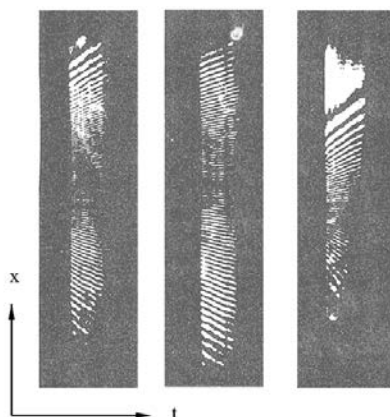


Рис. 1. Примеры интерферограмм (зависимости пространственного распределения сигнала от времени)

Для корреляционной обработки производилась съемка кюветы с диффундирующими жидкостями на фоне случайного экрана. Эксперименты проводились с растворами поваренной соли и этилового спирта различных концентраций. Как и в [1 - 4], особых мер к тщательному наслаиванию одной жидкости на другую с предосторожностями против их перемешивания не требовалось. Жидкости в начале достаточно быстро разделялись с образованием некоторого достаточно узкого профиля перехода от одной жидкости к другой вследствие различия их плотностей. Далее наблюдался процесс диффузии из установившегося начального состояния.

Масштаб «искусственных спеклов» экрана был выбран таким, чтобы размер одного информационного элемента на матрице фотоаппарата составлял ~ 2.5 пикселя. Процесс диффузии проходил в кювете высотой 5 см, толщиной $d = 1$ мм. При съемке расстояние от фоновой картины до кюветы было 40 см, от фоновой картины до фотоаппарата 50 см. Использовался фотоаппарат Olympus μ Tough, фокусное расстояние при съемке 7 мм. Максимальное смещение в приведенных случаях составляло от 5 до 11 пикселей.

Отклонение луча, вызванное прохождением его через кювету, приводило к смещению изображения соответствующего участка случайной картины в плоскости приемной матрицы.

В качестве эталонного изображения была сделана фотография кюветы, заполненной жидкостью одного вида. Затем в процессе диффузии через некоторые интервалы времени также проводилась съемка. Зависимость сдвига от вертикальной координаты определялась при корреляционном сканировании пар фотографий (сделанной в определенный момент времени и эталонной) окном 256×32 пикселя. Окно такой формы, сильно вытянутое по горизонтали, было выбрано для того, чтобы, с одной стороны, не потерять локальность измерений по вертикальной координате, вдоль которой происходит изменение показателя преломления, и, с другой стороны, за счет большого размера по горизонтали, обеспечить достаточную статистическую устойчивость измерений. Результаты измерения градиента показателя преломления показаны на рис.1. Ось абсцисс направлена вниз вдоль центра кюветы.

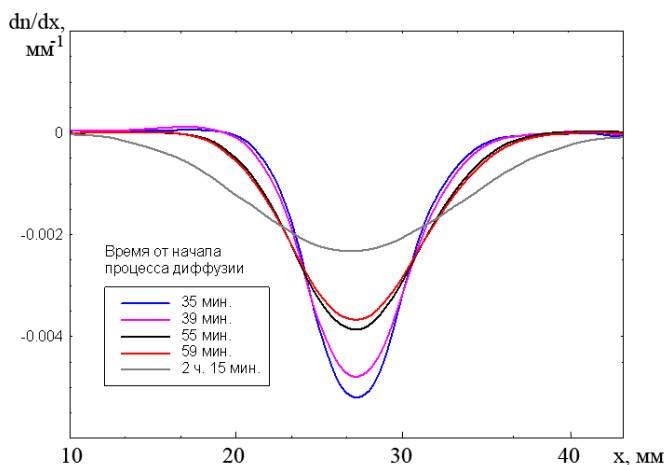
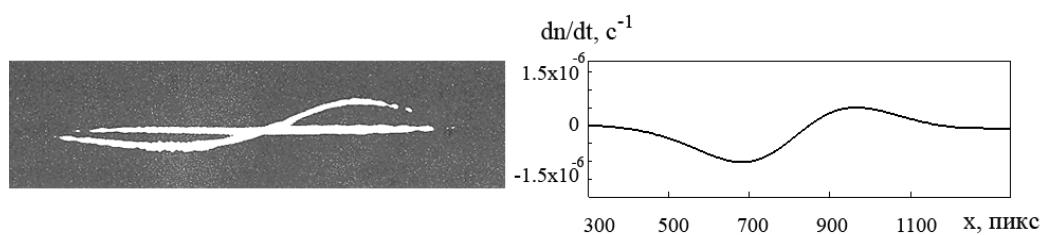


Рис.2. Зависимость градиента показателя преломления (пространственной частоты) от координаты

Если при голографической записи базовым представлением является картина пространство – время, то при корреляционной обработке все остальные представления рассчитываются из зависимостей типа пространство - временной спектр (зависимость градиента показателя преломления от координаты). При интегрировании этих зависимостей восстанавливается профиль показателя преломления по координате. Рассчитывается не абсолютное значение показателя преломления, а разница между показателем преломления оптически менее плотной жидкости на начальной координате и показателем преломления на данной высоте кюветы. Показатель преломления дистиллированной воды $n_1 \sim 1.333$, что дает для трехмолярного раствора NaCl $n_2 \sim 1.364$. Табличное значение 1.362 [5].

Картина пространство – временной спектр, т.е. зависимость производной показателя преломления по времени от координаты, получается при обработке пар фотографий, сделанных с некоторым интервалом по времени. Скорость изменения показателя преломления в зависимости от координаты для некоторого момента времени, показана на рис.3, для голографического эксперимента (а) и для корреляционного фонового метода (б).



а) б)
Рис.3. Зависимость производной показателя преломления по времени от пространственной координаты

Картина, аналогичная зависимости пространственной частоты от времени для голографической записи, представлена на рис.4. Для каждого сделанного кадра на графике отложено максимальное значение градиента показателя преломления. Подобная зависимость обычно применяется для определения коэффициента диффузии оптическими методами.

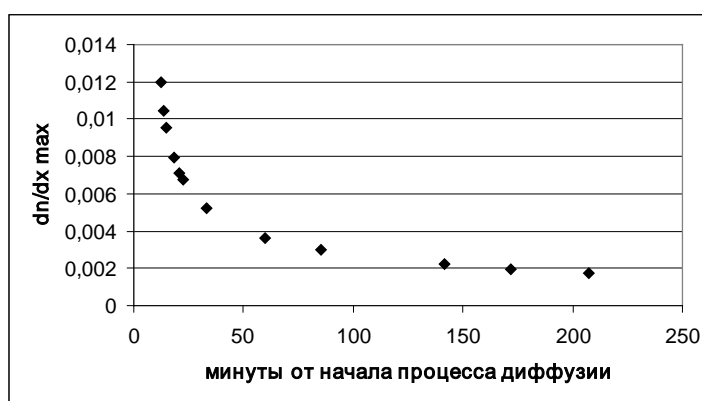


Рис. 4. Зависимость максимального значения градиента показателя преломления от времени для процесса диффузии этиловый спирт (40%) – вода

Для получения коэффициента диффузии удобно представить данные измерений в виде зависимости производной показателя преломления по времени от его второй производной по координате. В случае поведения показателя преломления в соответствии с уравнением диффузии (1) это должна быть пропорциональная зависимость. На рис.5 представлена зависимость первой производной показателя преломления по времени от второй производной по координате, полученная при обработке данных корреляционного фонового метода для раствора NaCl. Видна хорошая пропорциональная зависимость. Для приведенного графика значение коэффициента диффузии для раствора NaCl $D = 1.876 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$. Так же, как и в [2-4] в области границы раздела обе производные одновременно обращаются в 0, что свидетельствует о независимости коэффициента диффузии от концентрации. Следует отметить, что при этом нам совершенно не важно, какое было начальное распределение показателя преломления, поскольку нам не надо использовать решение уравнения диффузии – мы используем полученные из экспериментальных данных части уравнения диффузии.

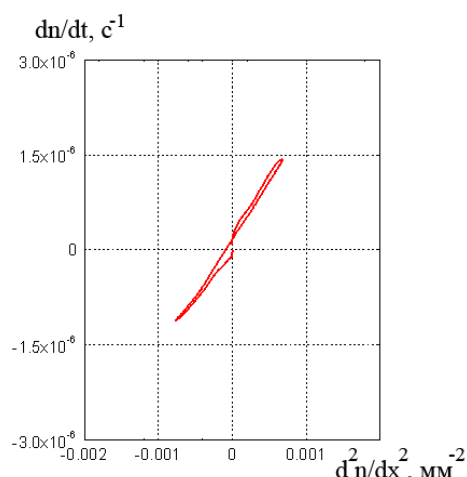


Рис.5. Зависимость производной показателя преломления по времени от второй производной по координате

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что с помощью корреляционного метода возможно исследование рефракционных нестационарных процессов на примере взаимной диффузии двух жидкостей и определение коэффициента диффузии с достаточно хорошей точностью. Результаты близки к полученным с помощью двухэкспозиционной пространственно-временной голографической интерферометрии, при этом экспериментальная реализация корреляционного фонового метода не требует столь прецизионных установок и каких-либо специальных приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крайский А.В.** Голографическая регистрация с нестационарной опорной волной одномерного пространственно-временного оптического сигнала и его анализ. – Препринт ФИАН №222, М., 1988.
2. **Боркова В.Н., Зубов В.А., Крайский А.В.** Голографическая запись и анализ одномерного пространственно-временного оптического сигнала при взаимной диффузии двух жидкостей. – Препринт ФИАН №75, М., 1989. 39 с.
3. **Borkova V.N., Zubov V.A., Krajskij A.V.** Holographic registration with nonstationary reference wave of one-dimensional optical signal and its analysis. – Journal of soviet laser research, v.11, №4, p.305, 1990.
4. **Боркова В.Н., Зубов В.А., Крайский А.В.** Временная голография модулированных оптических сигналов с применением нестационарной опорной волны с линейным изменением частоты по координате и во времени. – Оптика и спектроскопия, 1987, 63, вып.2, с.384-387.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/User:Jzana/Sodium_Chloride-Water_mixture.