

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ АВТОВОЛН – РЕВЕРБЕРАТОРОВ В ПРИЭЛЕКТРОДНОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА*

Чеканов В.В.¹, Кандаурова Н.В.², Чеканов В.С.²

¹ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: chknv1@yandex.ru

²Филиал ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»
в г. Ставрополе, г. Ставрополь, пр. Кулакова 8, candaur18@yandex.ru

Введение

Волны возбуждения – один из основных механизмов передачи сигналов в живых организмах. Известны волны возбуждения в химических, механических, социальных средах. Распространение волн в возбудимых средах отличается от распространения механических и электромагнитных волн. Возбудимая среда имеет особое свойство – накапливать энергию в отдельных элементах и потом обмениваться ею (передавать импульс возбуждения) от одного элемента к другому. Одно из основных свойств возбудимой среды – возможность восстановления после прохождения волны. Это делает возможным возникновение так называемых автоволновых процессов (АВ-процессов), которые аналогичны автоколебательным процессам в сосредоточенных системах. Изучение таких процессов важно для понимания активных сред самой различной природы: биологической, физической, химической.

Наибольший интерес при изучении возбудимых сред представляют собой источники, качественно отличающиеся от генераторов автоколебаний в сосредоточенных системах. Это пейсмекер (ведущий центр), и ревербератор (спиральная волна). Теоретически спиральные волны были предсказаны Винером и Розенблютом [1], ведущие центры – Кринским [2]. Экспериментально они наблюдались в распределенной химически активной среде Жаботинским и Заикиным по изменению цвета раствора [3].

Оба этих типа источников автоволн экспериментально обнаружены в уникальной модельной физической среде – при поверхност-

ном слое магнитной жидкости, преимущество которой заключается в том, что АВ-процесс можно наблюдать и исследовать в режиме реального времени неограниченно долго. Исследованию свойств одного из источников автоволн – ревербератора – посвящена настоящая работа.

Проведение эксперимента и описание результатов

В приповерхностном слое ячейки с магнитной жидкостью, помещенной между двумя электродами, наблюдался автоволновой процесс (АВП) [4]. Для визуализации и исследования этого процесса поверхность ячейки освещалась и отраженные лучи фиксировались фото- или видеоприемником (рисунок 1 а). В многослойной структуре «стекло-проводящая пленка ИТО-слой магнитной жидкости» происходит интерференция отраженных лучей (рисунок 1б) и визуализируется цветная динамичная картина автоволнового процесса (рисунки 2,3).

Методика наблюдения автоволнового процесса в приповерхностном слое магнитной жидкости

Магнитную жидкость типа «магнетит в керосине» помещали в электрохимическую ячейку. Она представляет собой плоский конденсатор, состоящий из двух электродов, один из которых – стекло с проводящим прозрачным покрытием (ИТО). Оптические параметры ИТО-пленки: показатель преломления равнялся $1,78 \pm 0,05$, показатель поглощения равен $0,08 \pm 0,02$ ($\lambda=650$ нм). Толщина l слоя магнитной жидкости – 100 мкм. Концентрация магнетита – 3,1 об%, измеренная по намагниченности насыщения. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon=2,7$, проводимость $\sigma=6,4 \cdot 10^{-7}$ Ом \cdot м $^{-1}$ (измерены на частоте 1000 Гц). Средний размер частиц магнетита ~ 10 нм, толщина защитной оболочки, состоящей из молекул *HOI* $\sim 1,5$ нм. Показатель преломления магнитной жидкости в ячейке $n_4=1,47$, показатель поглощения – $0,06 \pm 0,02$.

На грань призмы падает луч от осветителя с белым светодиодом. Луч отражается от поверхностей «стекло-проводящее покрытие» и «проводящее покрытие – магнитная жидкость» и интерферирует в тонкой пленке ИТО, как показано на рисунке 1б. Отраженный свет оказывается окрашенным («цвета тонких пленок»).

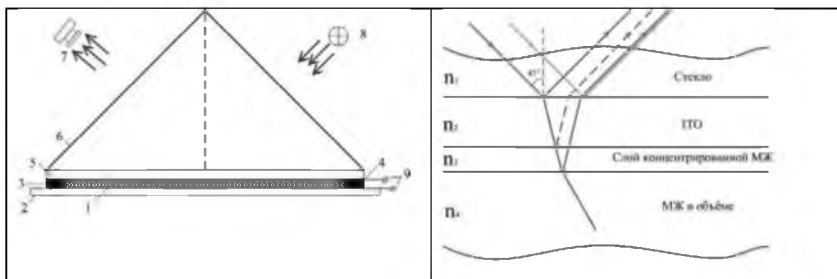


Рисунок 1а - Схема экспериментальной установки:
 1 – магнитная жидкость,
 2,5 – стекла с проводящим прозрачным покрытием (ITO),
 3,4 – изолирующие прокладки из полистирола, 6 – прямоугольная призма, приклеенная иммерсионной жидкостью 7 – фото-кинокамера, 8 – белый светодиод, 9 – электроды

Рисунок 1б - Модель многослойной структуры «стекло-ITO- слой плотноупакованной МЖ - магнитная жидкость» с ходом лучей

При подаче на электроды постоянного напряжения частицы магнетита в результате электро- и диполофореза мигрируют к электродам, образуя приэлектродный слой – тонкую пленку высококонцентрированной плотноупакованной (~ 27%) магнитной жидкости. Показатель преломления жидкости такой концентрации: $n_3 = 1,78 \pm 0,05$, он близок по значению показателю преломления n_2 пленки ITO. Значит, можно считать тонкую проводящую пленку ITO и приэлектродный слой концентрированной магнитной жидкости оптически однородными для падающей световой волны (рисунок 1б). По методике, описанной в работе [5] была измерена толщина приэлектродного слоя концентрированной жидкости, изменяющаяся при увеличении напряжения на электродах в пределах от 0 до 100 нм.

В структуре «ITO + слой частиц магнетита» при освещении ее белым светом наблюдалось изменение цвета света, отражённого от двуслойной структуры – от зелёного до малинового. При подаче импульса напряжения 12.8 В (импульс с фронтом порядка 1 мкс) слой становится неустойчивым: можно наблюдать колебательный процесс: отдельные участки приэлектродного слоя изменяются по толщине, визуальнo наблюдается изменение цвета «зеленый – мали-

новый-зеленый» (рисунок 2а). В некоторый момент времени вследствие случайного процесса один из участков приповерхностного слоя (ансамбль частиц) начинает самопроизвольно возбуждаться и совершать колебания. Такой источник колебаний называется пейсмейкером. От пейсмейкера во все стороны распространяются волны в виде концентрических окружностей (рисунок 2б).

Спиральные волны – ревербераторы

Через несколько секунд (3-5) после начала АВП появляются спиральные волны – ревербераторы (рисунок 2в).

В приэлектродном слое магнитной жидкости наблюдались как одиночные ревербераторы, так и множественные. Время жизни ревербератора ограничено несколькими оборотами. Если в поле наблюдения появляются несколько ревербераторов, то через 20 с остается один ревербератор.

На рисунке 3 показана фотография ревербератора, сделанная через зеленый фильтр: *а* – начало периода вращения ревербератора, *б* – половина периода вращения ревербератора.

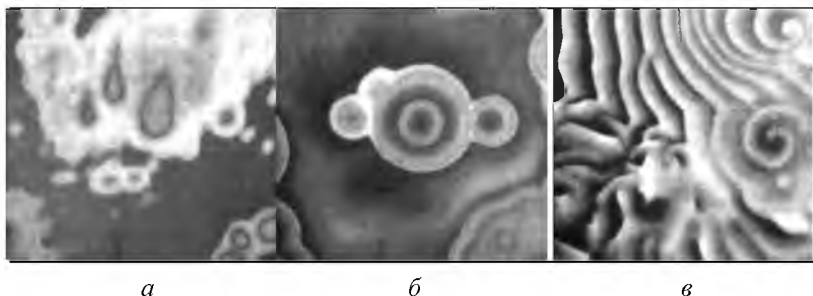


Рисунок 2 - Установление автоволнового режима. *а* – Переходный процесс. Спонтанное колебание приэлектродного слоя, *б* – появление пейсмейкера, *в*- появление ревербераторов.

На фотографии – ячейка 3·4 см

Обратим внимание, что темные линии на фотографиях 3а и 3б, соответствуют красному цвету и близки по форме к эвольвенте. По рисунку видно, что в центре ядра ревербератора существует область (на фотографии она светлая, в цветном изображении – зеленая), соответствующая интерференционной картине отражения от электро-

да при постоянной толщине слоя. То есть в этой области не происходят колебания слоя. Это так называемая сингулярная область. Ее существование следует из следующих рассуждений [6].

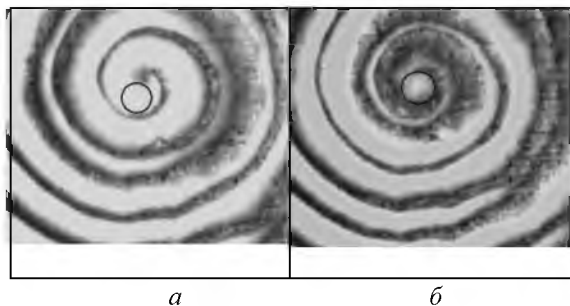


Рисунок 3 - Спиральные волны – ревербераторы в автоволновом процессе:
a – ревербератор в начале периода вращения, *б* – ревербератор через половину периода вращения

Рассматриваемый нами приэлектродный слой является распределенной возбудимой средой, способной формировать импульс в ответ на внешнее воздействие. Возбудимая среда состоит из большого числа отдельных элементов (элементарных площадок приэлектродного слоя или ансамблей частиц), каждый из которых является автономным источником энергии. Автономным источником можно считать энергию, накапливаемую поляризационной емкостью [7]. Отметим, что поляризационная емкость приэлектродного слоя больше статической емкости на 3-4 порядка. Элементы возбудимой среды имеют контакт между собой и могут передавать импульс возбуждения, то есть энергию электрического и гидродинамического взаимодействия от одного к другому. Взаимодействие происходит подобно осцилляторам с короткой связью, где каждый осциллятор связан только с несколькими соседями.

Модель, которая использовалась для описания АВ- процесса в приэлектродном слое магнитной жидкости основана на базовой модели Фитц-Хью–Нагумо и представляет собой систему:

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = f(q_s) - j + D\Delta q_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial j}{\partial t} = \varphi(q_s, j) \quad (2)$$

где функция q_s – поверхностная плотность заряда, D_ρ – величина, имеющая размерность коэффициента диффузии, j – ток, связанный с зарядом, накопленным в ячейке.

Решение уравнений (1), (2), описывающее стационарно вращающийся ревербератор, можно записать в виде [6]:

$$q_s(r, \varphi - \omega t), \quad (3)$$

где ω – частота вращения ревербератора, r – расстояние до центра вращения, φ – фаза колеблющегося элемента. Если зафиксировать время и обойти вокруг ядра спиральной волны по замкнутому контуру, то суммарное изменение фазы будет равно 2π . Из топологии известно, что в такой ситуации внутри контура существует сингулярная точка (или область), в которой нельзя определить значение фазы. По рисунку видно, что по мере приближения к центру вращения элементы слоя не будут совершать колебания, что видно по зеленому цвету области, примыкающей к центру ядра. То есть в центре ядра ревербератора плотность заряда (формула 3) не будет зависеть от времени, значит в этой точке импульс возбуждения, то есть энергия электрического и гидродинамического взаимодействия равна нулю. На рисунках 3 (а, б) окружностью выделена область сингулярности ревербератора.

Если в среде существуют два ревербератора, то в отличие от пейсмейкеров, они не синхронизируются друг с другом, потому что период волн, посылаемых ревербератором, является минимально возможным для данного участка среды. Но ревербератор обладает способностью синхронизировать волны от других источников. Так как ревербератор – это волна с наименьшим возможным периодом, то если в АВ-среде появляется ревербератор (первая колебательная система) и, допустим, рядом существует пейсмейкер (вторая колебательная система), то ревербератор, как более быстрая волна, подстроит частоту окружающих «медленных» волн под себя. Произойдет согласование частот, фаз или других характеристик сигналов, генерируемых взаимодействующими колебательными системами.

Выводы

В электрическом поле вблизи прозрачного электрода образуется нанослой, который влияет на интерференцию света, отраженного

от тонкого прозрачного электрода, что позволяет получать цветные изображения переходного процесса, возникновение пейсмекеров, ревербераторов и наблюдать их динамику гораздо проще, чем в известной цветной химической реакции Белоусова-Жаботинского.

Показано, что ревербератор (спиральная волна) имеет вблизи ядра область сингулярности, в которой не происходит колебаний слоя. Установлено, что ревербератор, как источник с наименьшим периодом, обладает способностью синхронизировать волны от других, более медленных источников. Показано, что если в поле наблюдения появляются несколько ревербераторов, то через некоторое время остается один ревербератор, вероятно, связанный с дефектом поверхности.

Литература:

1. Wiener N., Rosenblueth A. The mathematical formulation of the problem of conduction of impulses in a network connected excitable elements, specifically in cardiac muscle. – Arch. Inst. Cardiol. Mex., 1946, 16, P. 205-265.
2. Кринский В.И., Холопов А.В. // Биофизика, 1967, 12, С. 524-528.
3. Zaikin A.M., Zhabotinsky A.M. //Nature, 1970, 225, P. 535-537.
4. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov V.S. //Journal of Magnetism and Magnetic Materials , 2016, №4.
5. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov V.S. //Journal of Nano- and Electronic Physics , Vol. 8 No 4, 04045(3pp) (2016).
6. Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Сельков Е. Е. Математическая биофизика клетки. М., «Наука», 1978. - 308 с.
7. Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Чеканов В.С. Поляризациянная емкость и сопротивление приэлектродного нанослоя магнитной жидкости в электрическом поле. – Материалы III Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» Курск, 23-25 мая 2017 года.

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Проект № 3.5385.2017/БЧ «Экспериментальное исследование и математическое моделирование межфазных и приповерхностных явлений в тонкой пленке наноструктурированной магнитной жидкости»