



СВОЙСТВА СВЧ-ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА У РАСТВОРА С АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ РЕАКЦИЕЙ БРИГГСА–РАУШЕРА

Д. А. Усанов, А. П. Рытик

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского»

Определены диэлектрические проницаемости структурных элементов раствора с химической автоколебательной реакцией Бриггса–Раушера по результатам измерений спектров отражения и прохождения взаимодействующего с ними СВЧ-излучения в диапазоне от 5 до 8 ГГц. Показано, что этот раствор может обладать свойствами фотонного кристалла с изменяющейся во времени шириной запрещенной зоны.

Ключевые слова: СВЧ-фотонный кристалл, автоколебательная реакция.

DOI:10.18500/0869-6632-2016-24-1-31-36

Еще в 1896 году немецкий химик Р. Лизеганг обнаружил, что в капле раствора нитрата серебра AgNO_3 на фотопластинке, покрытой слоем желатина, который содержит хромпик $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{K}_7$, образуются агрегаты мелких кристаллов $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в виде концентрических колец, напоминающих годовые кольца на спиле дерева [1]. В автоколебательной реакции Белоусова–Жаботинского процесс организации пространства определяется кинетическими параметрами – скоростями реакций, соотношением положительных (активация) и отрицательных (угнетение) обратных связей в реакционной цепи. Следовательно, пространственная организация структуры легко поддается регулированию. Таким образом, автоколебательные химические реакции могут образовывать периодические области с чередующимися параметрами, в том числе электрическими. Подобные периодические структуры получили название «фотонные кристаллы» [2–4]. Эти структуры состоят из периодически расположенных элементов, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В природе уже обнаружены разнообразные материалы с фотонно-кристаллическими свойствами. Среди них благородный опал, базальные спиккулы стеклянных морских губок, покрытие крыльев африканских бабочек-парусников (*Princeps nireus*), перламутровое покрытие раковин моллюсков, усики морской мыши и щетинки многощетинкового червя.

Следует отметить, что определенный интерес представляют аперiodические фотонные кристаллы с медленно меняющимся периодом [5].

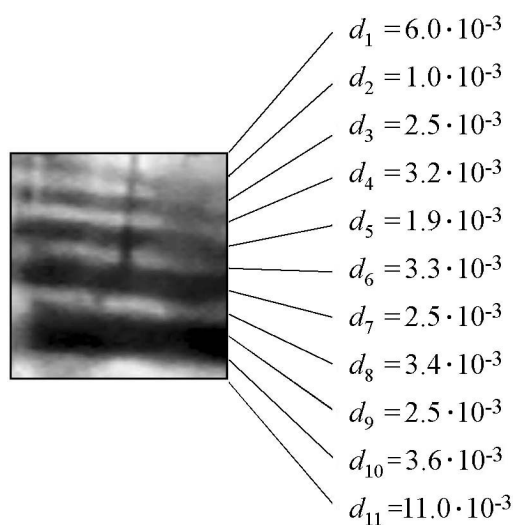


Рис. 1. Структура, полученная в непромешиваемом растворе реакции Бриггса–Раушера: слева показана фотография колбы с реакцией, справа – измеренные толщины образовавшихся в растворе реакции прозрачных и синих областей

объема реакции (рис. 1). В ходе реакции области с фазой, в которой преобладает крахмал-йодид, располагаются приблизительно периодически. В конце реакции эти области расплываются, и условие периодичности нарушается.

Таким образом, в определенный период времени раствор, в котором протекает реакция, можно считать подобным фотонному кристаллу. Роль периодических элементов в нем выполняют области, образующиеся в ходе непромешиваемой автоколебательной реакции БР (см. рис. 1).

В зависимости от концентрации исходных компонент длины областей концентрационных волн в реакции БР могут принимать значения от 0.5 до 3.0 мм. Диэлектрическая проницаемость, полученная для области прозрачной среды раствора, составляла около 10.0, а для области, в которой преобладает крахмал-йодид (синего цвета) – около 40.0. Для измерения диэлектрической проницаемости раствора реакции БР был выбран диапазон частот от 5 до 8 ГГц, для этого использовалась установка Agilent 85070E с опцией Dielectric Probe Kit. Информация об изменении диэлектрической проницаемости, концентрации йода и измерении спектров прохождения и отражения поступала на панорамный индикатор и плату АЦП компьютера, затем эти данные обрабатывались с помощью программы Microsoft Excel. Измерение диэлектрической проницаемости в различных фазах реакции БР проводили при постоянном перемешивании раствора реакции. Поскольку значения диэлектрической проницаемости зависят от температуры, а ход реакции зависит от степени освещенности, то все измерения были проведены при одинаковых условиях по зацветке раствора реакции, температуре в помещении и температуре растворов. Для регистрации химических изменений в среде реакции, в частности, концентрации йода использовали рН-метр-иономер серии «Эксперт-001» с датчиками: ионоселективный электрод «Йод», датчик растворенного кислорода ДКТП, датчик температуры. Предел обнаружения электродов составляет от 10^{-6} до 1 моль/литр.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с фотонными структурами, в виде периодических в пространстве концентрационных структур в непромешиваемом растворе с автоколебательной реакцией Бриггса–Раушера (БР), названной «йодными часами».

При протекании реакции БР постоянно перемешиваемый раствор реакции изменяет цвет от прозрачного до синего. Если раствор реакции не перемешивать, то спустя некоторое время в прозрачном растворе от его поверхности к дну колбы появляются периодические области синего цвета, это области с фазой реакции, в которой преобладает крахмал-йодид. Общее количество областей может быть до 5 для 50 мл общего

Исследование структуры фотонного кристалла на основе реакции БР проводили с использованием генератора качающейся частоты типа Г4-142 и панорамного измерителя КСВН типа Я2Р-67. В вертикально расположенную волноводную секцию устанавливали фторопластовую перегородку, над которой размещали раствор для реакции. Перед регистрацией диэлектрической проницаемости и измерением спектров прохождения проводилась калибровка в слое дистиллированной воды.

На рис. 2 показана усредненная по серии экспериментов зависимость значений диэлектрической проницаемости и значения концентрации йода от времени при их одновременной регистрации. Из рисунка видно совпадение тенденции в изменении диэлектрической проницаемости и концентрации йода. После того, как раствор полностью стал непрозрачным (отсутствие автоколебательного режима), колебания диэлектрической проницаемости прекратились. Для середины полосы непропускания (фотонной запрещенной зоны), по условию Брэгга, должно выполняться требование кратности длины элемента фотонного кристалла половине длины распространяющейся в нем волны. С учетом размеров областей и диэлектрических проницаемостей элементов фотонного кристалла частота, соответствующая условию Брэгга для данного фотонного кристалла, должна находиться в окрестности 6 ГГц. С учетом измеренных значений толщин получившихся полос (см. рис. 1) был проведен расчет коэффициента прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру раствора реакции. Для расчета использовали метод матриц передачи между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны аналогично тому, как это было подробно описано, например, в [6]. Для расчета дополнительно проводили кондуктометрию гомогенизированного раствора реакции в различных фазах. В частности, для синего цвета раствора проводимость составляла 20 мСм, для прозрачного – 10 мСм.

Общий вид измеренного и рассчитанного спектров прохождения раствора реакции БР в режиме автоколебаний в диапазоне от 5 до 8 ГГц для выбранного момента времени показан на рис. 3. Отметим, что влияние измерительного СВЧ-сигнала (уровень мощности 10 мВт) в этом диапазоне частот на характер протекания реакции

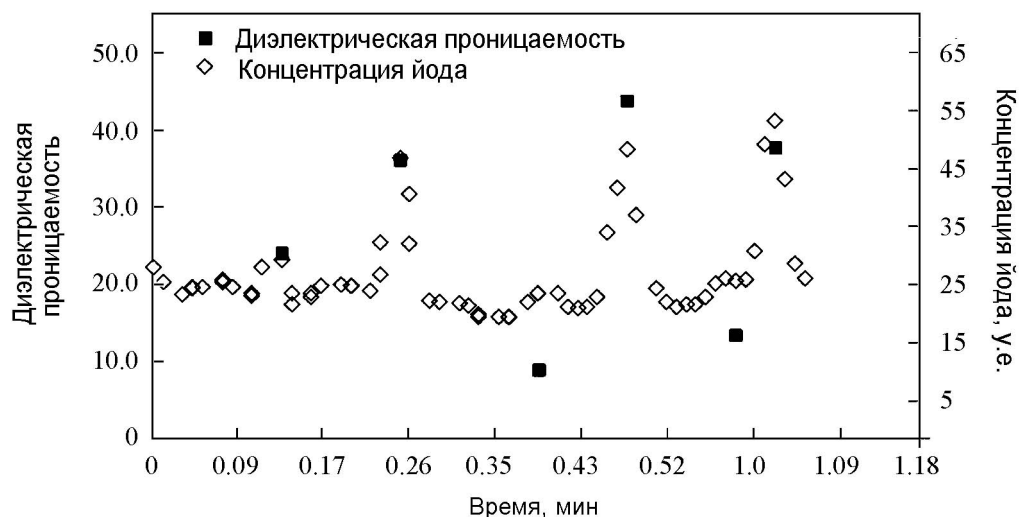


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости и изменения концентрации йода от времени

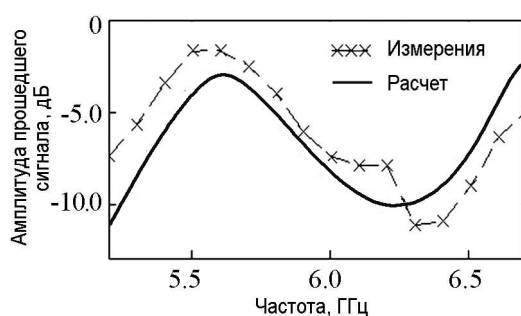


Рис. 3. Рассчитанный и измеренный спектр прохождения через раствор с реакцией Бриггса–Раушера в диапазоне частот от 5 до 8 ГГц

обнаружено не было. Ранее такое влияние было установлено на частоте 129 ГГц, что авторы [7] связывают с резонансным взаимодействием на этой частоте излучения с входящим в состав элементов реакции кислородом.

Спектр прохождения исследуемой фотонной структуры, приведенный на рис. 3, характеризуется наличием в окрестности 6 ГГц частотной области, запрещенной для распространения электромагнитной волны, – аналога запрещенной зоны в кристаллах. Наличие такой запрещенной зоны в спектре характерно для структур, называемых СВЧ-фотонными кристаллами. Как видно из рисунка, результаты расчета качественно согласуются с экспериментом. Отличие рассчитанной амплитуды прошедшего сигнала через структуру от результатов измерений может быть объяснено тем, что при расчете предполагалась резкое изменение границ между отдельными элементами рассматриваемой системы, а в эксперименте эти границы являются несколько размытыми. Кроме того, измерение диэлектрической проницаемости проводилось в объеме перемешиваемой реакции для одной фазы (прозрачный или синий цвет раствора), в то время как в случае неперемешиваемого объема с образовавшимися структурами полос концентрация реагентов несколько отличалась от характерной для случая перемешивания. Это, в свою очередь, могло отразиться на изменении диэлектрической проницаемости слоя и изменить спектр прохождения сигнала.

Таким образом, показана возможность проявления свойств фотонного кристалла у раствора автоколебательной реакции Бриггса–Раушера. Выявлен зонный характер спектра прохождения исследованного типа фотонного кристалла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Библиографический список

1. Самойлович М.И., Цветков М.Ю. Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 8
2. Бецкий О.В., Майбородин А.В., Рытик А.П. и др. Молекулярные НИТРАНС-спектры газов метаболитов в терагерцовом и ИК-диапазонах частот и их применение в биомедицинских технологиях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2007. № 8–9. С. 89.
3. Самойлович М.И., Цветков М.Ю. Редкоземельные опаловые нанокomпозиты для нанофотоники // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 8.
4. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот: Обзор // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 1. С. 3.

5. Андреев А.В. Фокусировка пучков при отражении от кристаллов и многослойных периодических структур с переменным периодом // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74, № 1. С. 8.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения// ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112.
7. Рытик А.П., Усанов Д.А. Влияние электромагнитного излучения на автоколебательную реакцию Бриггса–Раушера // Журнал физической химии. 2013. Т. 87, № 5. С. 891.

Поступила в редакцию 14.12.2015
После доработки 15.03.2016

PROPERTIES OF MICROWAVE PHOTONIC CRYSTAL FOR SOLUTION WITH THE SELF-OSCILLATORY BRIGGS–RAUSCHER REACTION

D. A. Usanov, A. P. Rytik

Federal State-Funded Educational Institution
of Higher Professional Education «Saratov State University»

In the article the description of dielectric constant of the structural elements of the chemical solution with the self-oscillating reaction Briggs–Rauscher, as measured reflection and transmission spectra of interacting with them the microwave radiation in the range of 5 to 8 GHz. It is shown that the solution may has properties of the photonic crystal with time-varying band gap.

Keywords: Microwave photonic-bandgap structures, self-oscillating reaction.

DOI:10.18500/0869-6632-2016-24-1-31-36

References

1. *Samojlovich M.I., Cvetkov M.Yu.* // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2008. № 10. P. 8 (in Russian).
2. *Beckij O.V., Majborodin A.V., Rytik A.P.* // Biomedicinskaya radioelektronika. 2007. № 8-9. P. 89 (in Russian).
3. *Samojlovich M.I., Cvetkov M.Y.* // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2006. №10. P.8 (in Russian).
4. *Vendik I.B., Vendik O.G.* // ZHTF. 2013. Т. 83, вып. 1. p. 3 (in Russian).
5. *Andreev A.V.* Fokusirovka puchkov pri otrazhenii ot kristallov i mnogoslojnyh periodicheskikh struktur s peremennym periodom // Pis'ma v ZhJeTF. 2001. Т. 74, № 1. S. 8 (in Russian).

6. Usanov D.A., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogoljubov A.S. Izmerenija tolshhiny nanometrovyh sloev metalla i jelektroprovodnosti poluprovodnika v strukturah metall–poluprovodnik po spektram otrazhenija i prohozhdenija jelektromagnitnogo izlucheniya // ZhTF. 2006. T. 76, vyp. 5. S. 112 (in Russian).
7. Rytik A.P., Usanov D.A. // Zhurnal Fizicheskoj Himii. 2013. T. 87, № 5. P. 891 (in Russian).

Ссылка на статью: Усанов Д.А., Рытик А.П. Свойства СВЧ-фотонного кристалла у раствора с автоколебательной реакцией Бриггса–Раушера // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 1. С. 31–36.

Paper's reference: Usanov D.A., Rytik A.P. Properties of microwave photonic crystal for solution with the self-oscillatory Briggs–Rauscher reaction // Izvestija VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2016. Vol. 24, № 1. P. 31–36.



Усанов Дмитрий Александрович – родился (1943) в Менделеевске (Татарстан). Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1965). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «физика полупроводников и диэлектриков» (1972, СГУ) и диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «радиофизика, включая квантовую радиофизику» (1989, СГУ). Заведующий кафедрой физики твердого тела (с 1985, СГУ), проректор СГУ по научной работе (1989–2013). Заслуженный деятель науки Российской Федерации (1998). Обладатель Государственной научной стипендии РАН для учёных (2000). Автор монографий и более 200 статей в центральной и зарубежной печати, 174 авторских свидетельств и патентов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru



Рытик Андрей Петрович – родился в Саратове (1980). Защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук (2006, СГУ). В 2010 году присвоено ученое звание доцента по кафедре медицинской физики. Область научных интересов: биомедицинская физика, физика взаимодействия терагерцового излучения с физическими средами. Опубликовал более 100 статей в отечественных и зарубежных журналах.

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского
E-mail: ra4csz@yandex.ru