

09

Свойства фотонного кристалла, образованного раствором с автоколебательной реакцией Бриггса—Раушера

© Д.А. Усанов, А.П. Рытик

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: ra4csz@ya.ru

Поступило в Редакцию 20 ноября 2015 г.

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

В последнее время наблюдается интерес к исследованиям нового класса различного типа периодических структур, называемых „фотонными кристаллами“ [1–3]. Эти структуры состоят из периодически расположенных элементов, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре прохождения таких структур имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны, — аналог запрещенной зоны в кристаллах. В сверхвысокочастотном диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [4,5], так и с использованием планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой [6].

В природе имеются разнообразные материалы с фотонно-кристаллическими свойствами. Среди них благородный опал, механизм формирования которого аналогичен процессам, действующим в биологических системах [1,7]. В работе [7] исследованы фотонно-кристаллические свойства природных биоминеральных кристаллов — базальных спикул стеклянных морских губок. Авторами [7] было показано, что наблюда-

ющаяся в базальных спикулах периодичность аксиальных цилиндрических слоев из двуокиси кремния нанометрового масштаба приводит к образованию запрещенных фотонных зон.

Данная работа посвящена исследованию особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с фотонными структурами в виде периодических в пространстве концентрационных структур в неперемешиваемом растворе с происходящей в нем автоколебательной реакцией Бриггса–Раушера (БР), названной „йодными часами“ [8].

В ходе реакции БР спустя некоторое время в прозрачном растворе от его поверхности к дну колбы появляются периодически расположенные области синего цвета, это области с фазой реакции, в которой преобладает крахмал–йодид. Общее количество областей может быть до 5 для 50 ml общего объема реакции (рис. 1). В конце реакции эти области расплываются, и условие периодичности нарушается.

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

В зависимости от концентрации исходных компонентов длины областей концентрационных волн в реакции БР могут принимать значения от 0.5 до 3 mm. В данной работе толщина прозрачной полосы принималась равной 2 mm, толщина синей полосы 3 mm, соответственно длина элемента фотонного кристалла могла составлять около 5 mm.

Для измерения диэлектрической проницаемости раствора реакции БР был выбран диапазон частот от 5 до 30 GHz и использовалась установка Agilent 85070E с опцией Dielectric Probe Kit. Информация об изменении диэлектрической проницаемости и измерении спектров прохождения и отражения поступала на панорамный индикатор и плату аналого-цифрового преобразователя компьютера, затем эти данные обрабатывались с помощью программы Microsoft Excel. Измерение диэлектрической проницаемости в различных фазах реакции БР проводили при постоянном перемешивании раствора реакции. Данные изменения концентрации йода в ходе автоколебательного процесса также обрабатывались с помощью этой же программы. Поскольку значения диэлектрической проницаемости зависят от температуры, а ход реакции зависит от степени освещенности, то все измерения были проведены при одинаковых условиях по засветке раствора реакции,

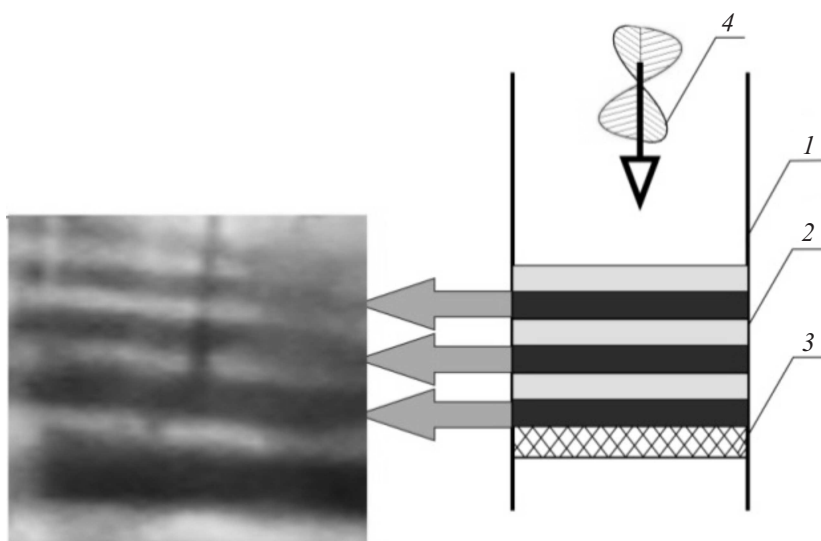


Рис. 1. Структура, полученная в непромешиваемом растворе реакции БР: слева показана фотография колбы с реакцией БР, справа — схематическое представление структуры: 1 — прямоугольная волноводная секция, 2 — раствор реакции БР с периодически расположенными концентрационными волнами, 3 — перегородка; 4 — падающая волна.

температуре в помещении и температуре растворов. На рис. 2 показаны усредненная по серии экспериментов зависимость значений диэлектрической проницаемости, а также значения концентрации йода во времени при их одновременной регистрации.

Из рис. 2 видно совпадение тенденции в изменении диэлектрической проницаемости и концентрации йода. После того как раствор стал полностью непрозрачным (отсутствие автоколебательного режима), колебания диэлектрической проницаемости прекратились.

Для регистрации химических изменений в среде реакции, в частности концентрации йода, использовали рН-метр-иономер серии „Эксперт-001“ с датчиками: ионоселективный электрод „Иод“, датчик растворенного кислорода, датчик температуры.

Измеренная диэлектрическая проницаемость для области прозрачной среды раствора составляла около 10, для области, в которой

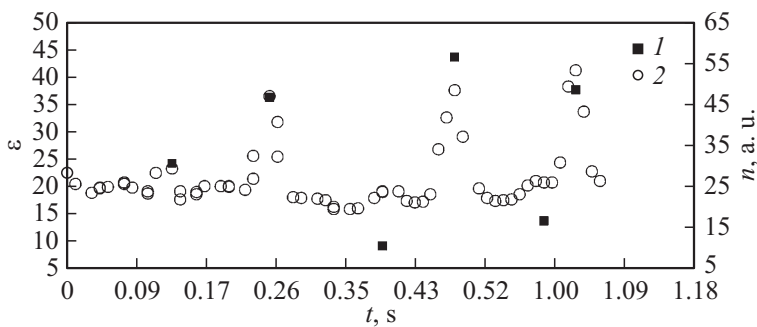


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости (1) и изменения концентрации йода (2) от времени.

преобладает крахмал–йодид (синего цвета), — около 40. Для расчета электрической длины областей фотонного кристалла воспользуемся соотношением [9]

$$l_1\sqrt{\epsilon_1} + l_2\sqrt{\epsilon_2} = \frac{\lambda_0}{2},$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве; ϵ_1 и ϵ_2 — значение диэлектрической проницаемости в первой и второй области среды; l_1 и l_2 — значения длин областей. Подставив в соотношение (1) измеренные значения диэлектрической проницаемости $\epsilon_1 = 10$, $\epsilon_2 = 40$ и длины областей фотонного кристалла $l_1 = 2$ mm и $l_2 = 3$ mm, получим

$$0.2 \cdot \sqrt{10} + 0.3 \cdot \sqrt{40} = 25.3 \text{ mm} = \frac{\lambda_0}{2}.$$

Из этого соотношения рассчитаем значение половины длины волны в свободном пространстве λ_0 . Полученная величина $\lambda_0/2$ равна 25.3 mm, что соответствует значению частоты ~ 6.26 GHz. По условию Брэгга эта частота должна соответствовать середине зоны, запрещенной для распространения волны.

Для теоретического описания зависимости характеристик прохождения волны через исследуемую структуру использовалась методика, основанная на сшивании тангенциальных компонент поля плоской волны на границах областей фотонного кристалла и применении метода матриц для областей с соответствующими значениями постоянной

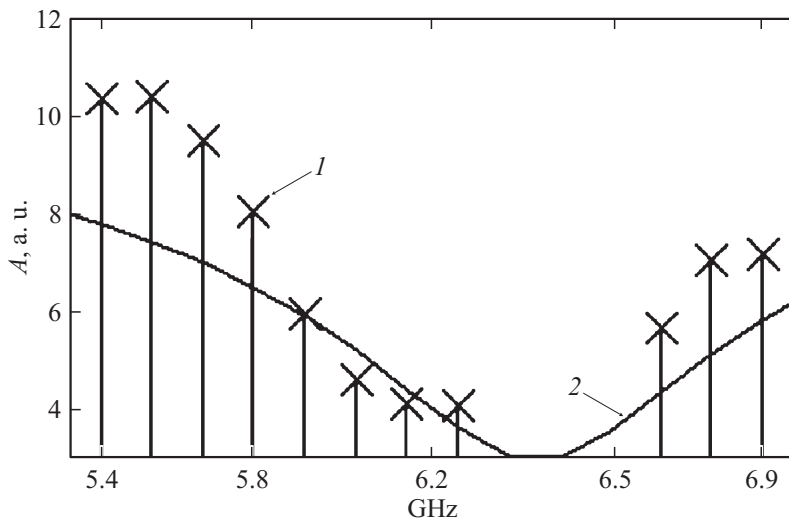


Рис. 3. Измеренный (1) и рассчитанный (2) спектр прохождения через раствор с реакцией БР в окрестности частоты 6 GHz.

распространения, аналогично тому, как это описано, например, в [10]. Диапазон полосы непропускания, согласно расчету, проведенному с использованием этой методики, получался равным ~ 1.5 GHz.

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

Общий вид измеренного и рассчитанного спектров прохождения раствора реакции БР в режиме автоколебаний в диапазоне от 5 до 8 GHz для выбранного момента времени показан на рис. 3. Результаты измерений и расчета спектра прохождения исследуемой фотонной структуры характеризуются наличием в окрестности частотной области 6 GHz, запрещенной для распространения электромагнитной волны, — аналога запрещенной зоны в кристаллах, рассчитанный и измеренный диапа-

зоны полосы непропускания получались равными примерно 1.5 GHz. Отличие рассчитанной амплитуды прошедшего через структуру сигнала от результатов измерений может быть обусловлено тем, что при расчете предполагалась неизменность соответствующих отдельных элементов периодической системы вдоль фотонного кристалла, в эксперименте эти размеры несколько изменяются.

Таким образом, выявлен зонный характер спектра прохождения предложенного типа фотонного кристалла, измеренные и рассчитанные значения амплитуды прошедшего сигнала находятся в качественном согласовании, т. е. показана возможность проявления свойств фотонного кристалла у раствора автоколебательной реакции Бриггса–Раушера.

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

Список литературы

- [1] *Самойлович М.И., Цветков М.Ю.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 8–14.
- [2] *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 1. С. 3–28.
- [3] *Никитов С.А.* // Природа. 2012. № 1. С. 51–60.
- [4] *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V. et al.* // Proc. 37rd European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
- [5] *Yeoul T., Chang K.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. V. 49. P. 549–553.
- [6] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А.* // Радиотехника. 2003. № 8. С. 26–30.
- [7] *Кульчин Ю.Н., Багаев С.Н., Букин О.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 15. С. 1–7.
- [8] *Жаботинский А.М., Огмер Х., Филд Р.* и др. Колебания и бегущие волны в химических системах. М.: Мир, 1988.
- [9] *Yariv A., Yeh P.* Optical waves in crystals. N.Y.: Wiley, 1980. P. 618.
- [10] *Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю.* // Изв. вузов. Электроника. 2011. № 90. С. 71–77.