

УДК 537.874.6

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМ КРИСТАЛЛОМ**

**А. Ю. Ветлужский**

**Институт физического материаловедения СО РАН**

Статья поступила в редакцию 28 октября 2016 г., после доработки – 10 ноября 2016 г.

**Аннотация.** На примере распространения одиночного гауссова импульса через двумерный фотонный кристалл рассматриваются особенности взаимодействия с такими структурами широкополосных излучений, спектр которых одновременно соответствует как разрешенным, так и запрещенным для прохождения излучения в кристалле диапазонам частот. Показана возможность локализации излучения внутри фотонного кристалла конечных размеров.

**Ключевые слова:** фотонные кристаллы, гауссов импульс, запрещенные зоны, локализация.

**Abstract.** The features of propagation of broadband signals through photonic crystals are studied. The spectrum of broadband signals corresponds to both allowed and forbidden frequency ranges for the transmission of radiation in the crystal. For this purpose by finite differences time domain (FDTD) method the propagation of single Gaussian pulses of different spectral content through the photon crystal representing the two-dimensional square grid formed by the cylindrical GaAs elements is investigated. It is shown that such structure possesses the single complete forbidden band at rather small density of compositing of elements. Two types of pulses are analyzed. The first one is formed by electromagnetic oscillations with a frequency corresponding to the first allowed zone. The second one was excited at a frequency of the forbidden band. The time diagrams received in different points inside and outside the crystal, and patterns of space distribution of a field in it in different time points are analyzed. The considerable reduction of velocity of propagation of the signals formed by oscillations with the forbidden band frequency compared with velocity of

light in the environment is found. As a result of the research the possibility of localization of a pulse radiation in a photon crystal of the finite sizes is proved.

**Keywords:** photonic crystals, Gaussian pulses, band gaps, localization.

Фотонные кристаллы (ФК) – активно исследуемый в последние два десятилетия класс искусственных объектов, представляющих собой периодические диэлектрические или металлические структуры с характерным размером изменения электрофизических параметров, сопоставимым с длиной волны излучения. Периодическое изменение диэлектрической проницаемости обуславливает формирование зонной структуры спектра пропускания ФК, включающей и запрещенные диапазоны частот, в пределах которых полностью подавляется распространение волн в кристалле, что, в частности, делает возможным управление скоростью прохождения в нем электромагнитных сигналов [1]. Это позволяет использовать ФК при решении широкого круга задач, связанных с подавлением спонтанного излучения, разработкой новых волноведущих и резонаторных структур, материалов с перестраиваемыми резонансными свойствами, а также создании эффективных оптических преобразователей.

Дисперсионные свойства ФК приводят к необычному характеру отражений и преломлений на границах таких структур даже для гармонических электромагнитных колебаний [2, 3]. Еще более интересные эффекты следует ожидать от взаимодействия с такими объектами импульсных излучений. Проиллюстрируем сказанное, рассмотрев следующую задачу.

На границу двумерно-периодического диэлектрического кристалла, образованного цилиндрическими элементами кругового поперечного сечения с диэлектрической проницаемостью равной 13 (арсенид галлия), падает плоская электромагнитная волна, сформированная в виде гауссова импульса:

$$u(t) = \exp(-(t - t_0)^2/a^2) \cos(\omega t - kr),$$

где  $t_0$  – временная подвижка импульса относительно нулевого отсчета,  $a$  – ширина импульса,  $\omega$  – циклическая частота,  $k$  – волновое число в

межэлементном пространстве,  $r$  – координата вдоль направления распространения импульса. Рассматривается  $E$  – поляризация излучения. На рис. 1 представлена исследуемая в работе структура. ФК предполагаем неограниченным в поперечном направлении для исключения влияния на результаты моделирования дифракционных эффектов на его краях.

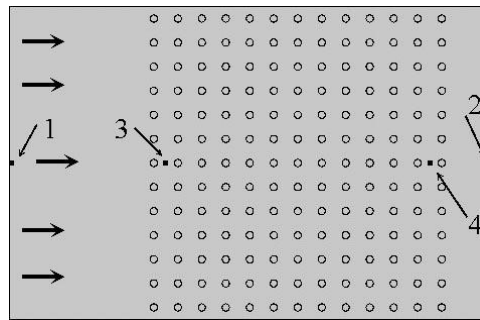


Рис. 1. Концептуальная схема рассматриваемой структуры. Стрелками указано направление прихода волны. Цифры указывают местоположение точек наблюдения поля.

Рис. 2 а демонстрирует зонную структуру (дисперсионные диаграммы) ФК, для чего по оси ординат отложены значения относительной частоты  $\omega d/2\pi c$ , где  $d$  – период структуры,  $c$  – скорость света, а по оси абсцисс – основные симметричные точки первой зоны Бриллюэна двумерной квадратной решетки. На рис. 2 б изображена частотная зависимость коэффициента пропускания кристалла в направлении ГХ или – с использованием индексов Миллера – в направлении  $[10]$  относительно соответствующей кристаллографической плоскости. Расчеты дисперсионных характеристик выполнены методом разложения по плоским волнам, а коэффициент пропускания и последующие результаты получены FDTD (конечной разности во временной области) методом. В последнем случае для описания поперечно неограниченного кристалла использовались граничные условия периодического типа. Период ФК в рассматриваемом случае составлял 1 мм, радиус элементов – 0,15 мм. Представленные данные демонстрируют наличие одной полной запрещенной зоны (в плоскости, перпендикулярной осям элементов) в спектре собственных состояний ФК, располагающейся в диапазоне  $100 \div 140$  ГГц.

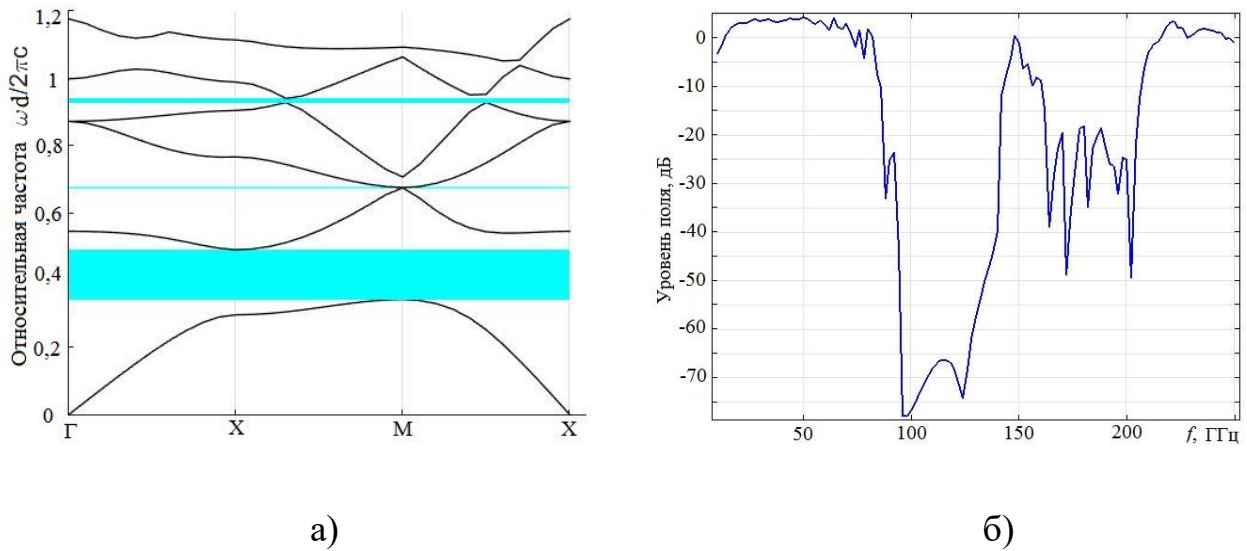


Рис. 2. Дисперсионные диаграммы а) и частотная зависимость б) уровня поля за ФК, полученная в точке 2 на рис. 1, демонстрирующие существование одной явно выраженной полной запрещенной зоны.

Выясним особенности прохождения через рассматриваемый ФК импульсного излучения, спектральный состав которого соответствует различным участкам полученной частотной характеристики. Для этого используем импульс со следующими параметрами:  $t_0 = 25$  пс и  $a = 10$  пс. При такой длительности гауссова импульса ширина его спектра по уровню  $e^{-1/2}$  от максимального составляет приблизительно 140 ГГц. Частоты колебаний положим равными 75 ГГц – разрешенная зона и 110 ГГц – полная запрещенная зона.

На рис. 3 а) и б) представлены результаты, полученные на частоте 75 ГГц соответственно в точках 1 и 2, указанных на рис. 1. Поскольку большая часть спектра импульса приходится на разрешенную зону, приведенные временные зависимости демонстрируют вполне предсказуемое поведение.

Имеется одиночный, отраженный от облучаемой границы ФК импульс, длительностью приблизительно равный падающему, и одиночный прошедший импульс значительной амплитуды, «расплывшийся» вследствие разных скоростей прохождения через ФК гармонических составляющих исходного сигнала и имеющий близкую к экспоненциальной огибающую.

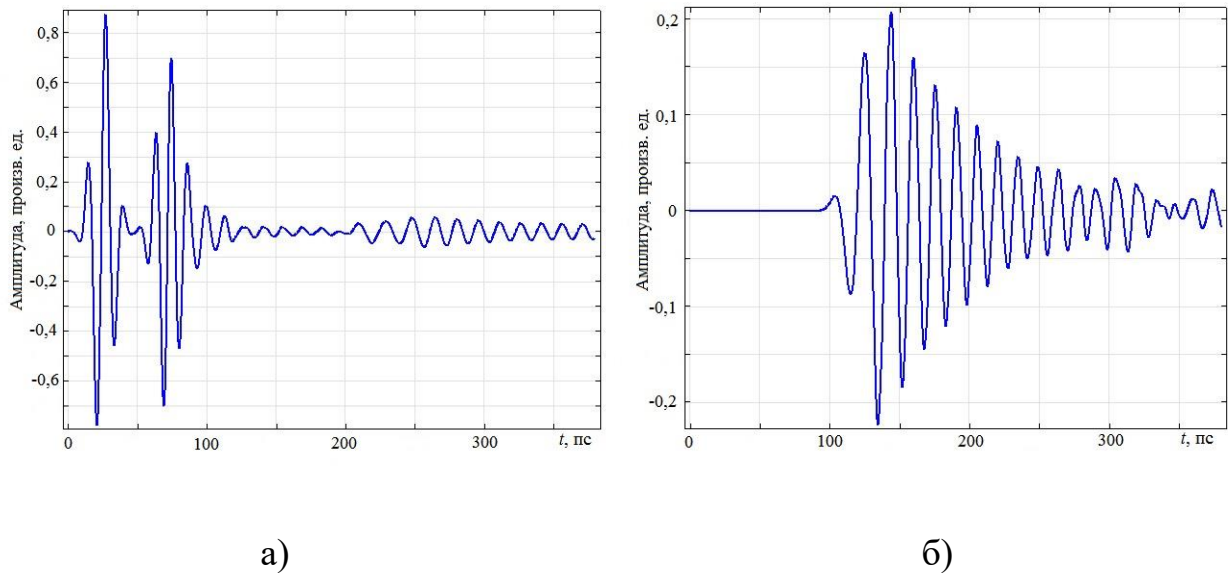


Рис. 3. Временные диаграммы, полученные при частоте возбуждения импульса 75 ГГц.

На рис. 4 приведены результаты, относящиеся к возбуждению структуры колебаниями с частотой 110 ГГц. Поскольку существенная часть спектра сигнала приходится на запрещенную полосу частот, наблюдается одиночный отраженный сигнал значительной амплитуды и длительности, близкой к падающему импульсу. Это говорит о том, что излучение в ФК проникает незначительно, испытывая отражение практически на его границе. Отметим, что в вышеописанном случае колебаний с частотой 75 ГГц отраженный сигнал имел увеличенную длительность, что говорит об участии в его формировании некоторой области ФК. Поведение временной зависимости, полученной с другой стороны кристалла, выглядит не столь очевидным. Прошедший сигнал имеет малую амплитуду и появляется на выходе из структуры примерно в тот же момент, что и в предыдущем случае. Однако из рисунка следует, что через 100 пс точки наблюдения достигают только низкочастотные компоненты исходного излучения, соответствующие разрешенной зоне ФК, а основной прошедший сигнал начинает формироваться только в районе 250 пс. Он представляет собой последовательность «колоколообразных» импульсов, имеющую экспоненциальную огибающую. В целом эта картина напоминает биения близких по частоте гармонических процессов, затухающие во времени.

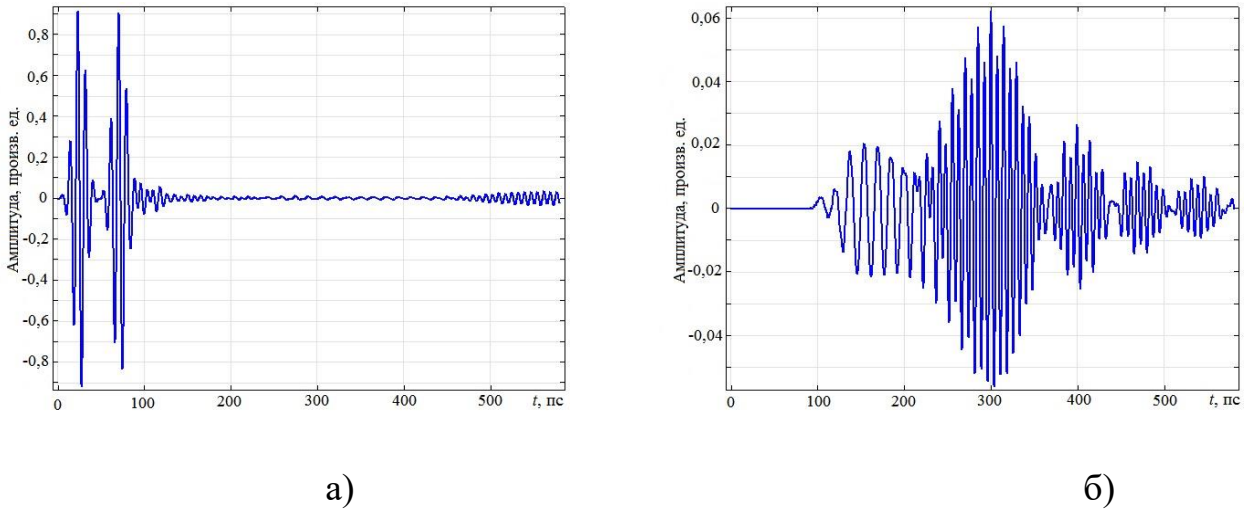


Рис. 4. Временные диаграммы, полученные при частоте возбуждения импульса 110 ГГц.

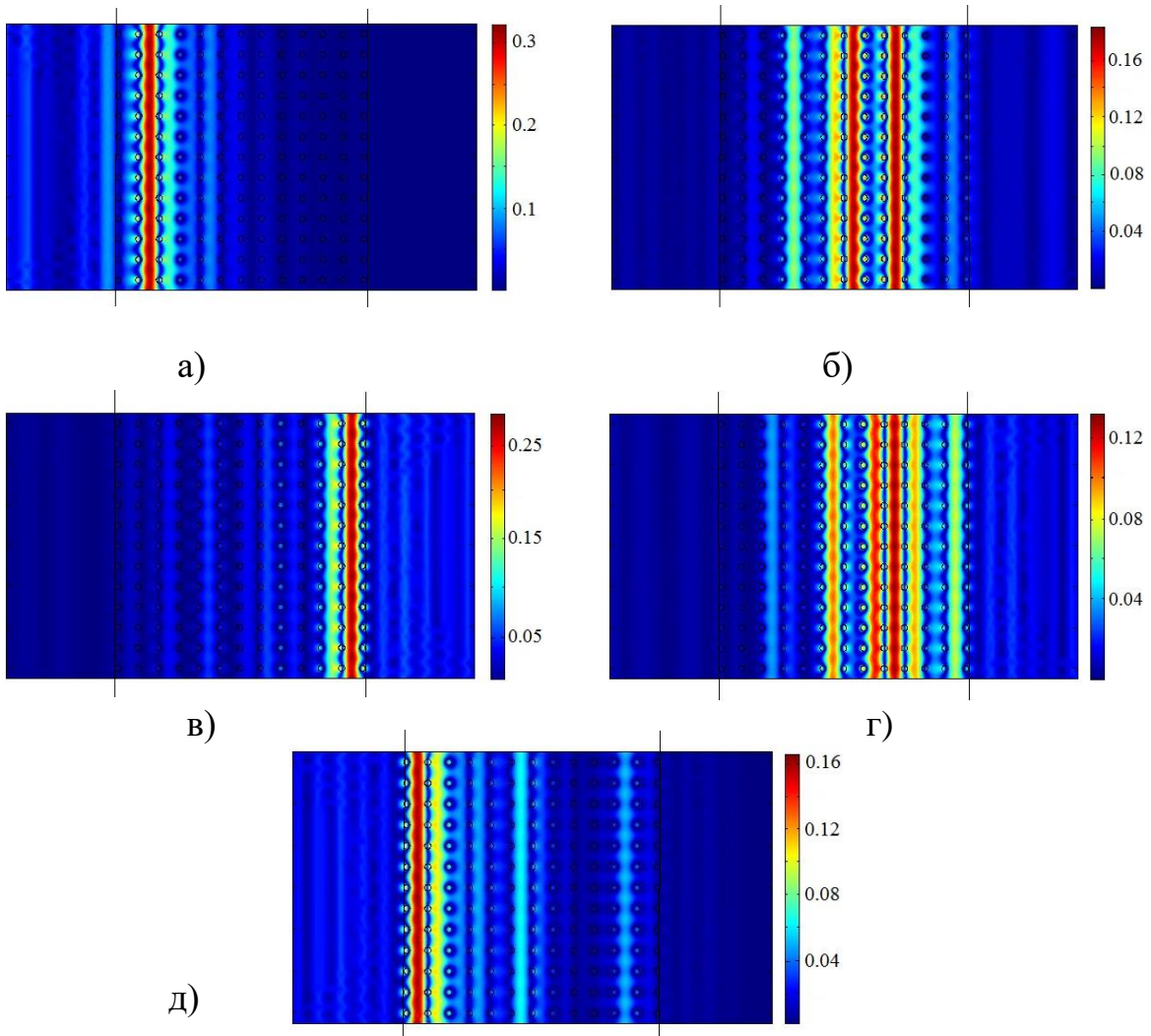


Рис. 5. Пространственное распределение поля, соответствующее:  
 а) 94 пс, б) 200 пс, в) 298 пс, г) 400 пс, д) 520 пс.  
 Вертикальными линиями обозначены границы ФК.

Рассмотрим данную ситуацию с точки зрения пространственного распределения поля в ФК в ключевые моменты времени. На рис. 5 а) – д) представлены соответствующие картины, полученные для временных отсчетов 94, 200, 298, 400 и 520 пс соответственно.

На рисунках видно, что на первой временной отметке волна полностью проникает в структуру, при этом слабые колебания, соответствующие наиболее быстрым гармоникам, уже достигают противоположного конца ФК. Этому моменту соответствует прекращение формирования отраженного от структуры импульса (рис. 4 а). Отметим высокую степень пространственной локализации излучения, практически совпадающую с пространственной протяженностью исходного сигнала в свободном пространстве.

Затем излучение оказывается распределено во внутренней области ФК, при этом наблюдается сложная интерференционная картина поля с характерным расположением амплитудных максимумов между рядами элементов кристалла.

В результате на временной отметке 300 пс излучение локализуется вблизи противоположной относительно прихода волны стороне ФК (этому моменту соответствует максимум прошедшего сигнала на рис. 4 б). Далее начинается движение энергии сигнала в противоположном направлении, вновь сопровождаемое сложными картинами распределения поля вследствие динамического взаимодействия рассеянных элементами волн, которое завершается локализацией поля вблизи облучаемой границы через 518 пс. Этому же времени соответствует всплеск отраженного сигнала на рис. 5 а.

Здесь, на наш взгляд, следует отметить следующее. В данном случае время прохождения импульса через ФК, определяемое по моментам, в которые наблюдалась максимальная пространственная концентрация излучения вблизи границ, либо по появлению отраженного сигнала на соответствующих временных диаграммах двукратно превышает аналогичное время, потребовавшееся на такое же прохождение при частоте заполнения импульса 75 ГГц. Это позволяет, в принципе, говорить об уменьшении групповой

скорости излучения, ранее подробно рассматривавшемся в ФК с линейными дефектами [4]. Подчеркнем, что в данном случае не идет речь об уменьшении скорости всего волнового пакета, которым является, по существу, гауссов импульс, и которое имело бы место, если бы весь спектр сигнала соответствовал запрещенной зоне ФК. Анализируемая в данной работе ситуация предполагает рассмотрение достаточно широкополосного сигнала, лишь часть спектра которого укладывается в границы запрещенной зоны. Поэтому вернее наблюдаемые результаты охарактеризовать как локализацию гауссова импульса с частотой возбуждения, соответствующей полной запрещенной зоне, в пространственно ограниченном ФК.

Для подтверждения такой интерпретации полученных данных, рассмотрим еще две временные диаграммы, представленные на рис. 6 а, б, рассчитанные для местоположения точек наблюдения на отметках 3 и 4 на рис. 1 соответственно, т.е. описывающие поле внутри ФК, но в непосредственной близости от его границ.

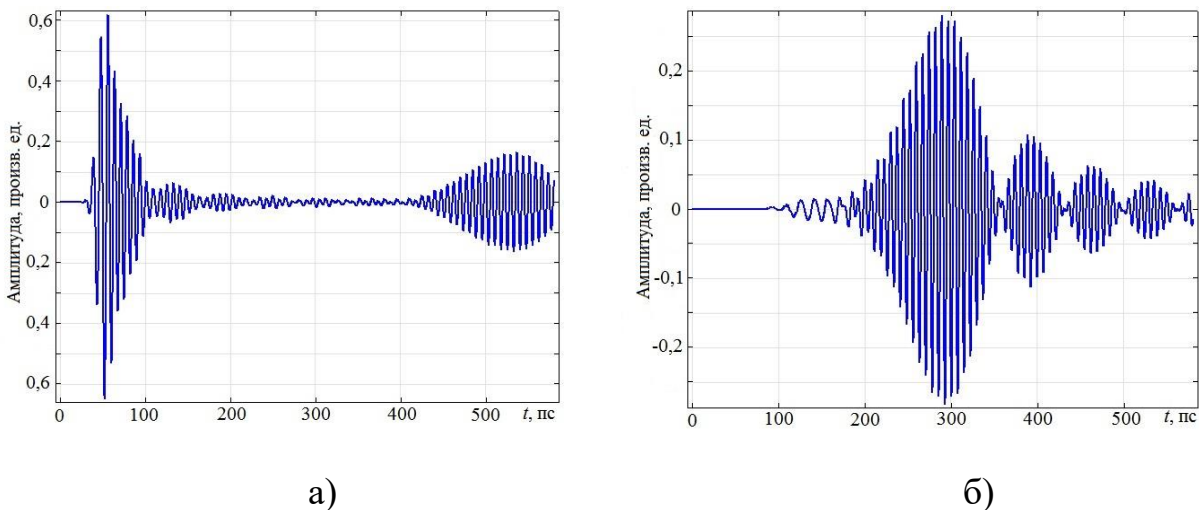


Рис. 6. Временные диаграммы, полученные при частоте возбуждения импульса 110 ГГц в точках наблюдения, располагающихся внутри структуры.

Основное, что следует из этих зависимостей – это совпадение формы колебаний за пределами структуры и внутри нее, но существенное различие в амплитудных характеристиках. Так, на выходе из ФК амплитуда поля в максимуме сигнала внутри структуры в 5 раз превышает соответствующий



уровень за ее пределами. Т.е. кристалл сильно рассогласован с окружающим пространством, а значит, волна, прошедшая в структуру, эффективно отражается ее границами и оказывается локализована в его внутреннем пространстве в течение продолжительного времени. Кроме того, сопоставляя представленные временные зависимости, видно, что при движении излучения в обратном направлении по ФК амплитуда поля изменилась весьма незначительно (отметки 540 пс на рис 6 а и 295 пс на рис. 6 б). Это является нехарактерным для поведения волновых процессов, частота которых строго укладывается в границы запрещенной зоны ФК, – как известно, в этом случае наблюдается экспоненциальное убывание поля по мере погружения вглубь кристалла, физически связанное с брэгговским отражением волн. В рассматриваемой ситуации такое ослабление также происходит, но только при проникновении импульса в ФК, а затем уровень излучения уже не убывает экспоненциально, а лишь медленно уменьшается за счет вытекания энергии через его границы. Важно отметить, что очень близкие амплитудные характеристики сигналов будут наблюдаться как в менее, так и в более протяженных структурах.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность локализации в ФК импульсного излучения, спектр которого лишь частично располагается в пределах запрещенной зоны кристалла. Такую локализацию можно трактовать как замедление прохождения импульса через ФК.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-47-04315.

### **Литература**

1. K. Sakoda. Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin, Springer. 2005. 256 p.
2. А.Ю. Ветлужский, Ю.Л. Ломухин, О.Г. Михайлова. Эффект прозрачности объемных решеток // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 7. С. 797-799.

3. А.Ю. Ветлужский. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/18/text.pdf>.

4. M. Soljacic, J. Joannopoulos. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals // Nature materials. 2004. V. 3. P. 211-219.