

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

А.Ю. Ветлужский, vay@ipms.bscnet.ru, к.ф.-м.н.,
Институт физического материаловедения
СО РАН, Улан-Удэ

Рассматривается прохождение через двумерный фотонный кристалл гауссова импульса, спектральный состав которого соответствует как разрешенным, так и запрещенным для прохождения излучения в кристалле диапазонам частот. Показана возможность локализации излучения внутри фотонного кристалла конечных размеров, что можно трактовать как уменьшение скорости распространения сигнала.

Фотонные кристаллы (ФК) – активно исследуемый в последние годы класс искусственных объектов, представляющих собой периодические структуры с характерным масштабом изменения электрофизических параметров, сопоставимым с длиной волны излучения. Это обуславливает наличие зонной структуры спектра пропускания ФК, включающей и запрещенные для прохождения излучения диапазоны частот, в пределах которых полностью подавляется распространение излучений в кристалле, что, в частности, делает возможным управление скоростью света в нем [1]. 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 (рис.1), 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,

LOCALIZATION OF PULSED RADIATION IN PHOTONIC CRYSTAL

A.Yu. Vetluzhskiy, Candidate of Physical and
Mathematical Sciences, vay@ipms.bscnet.ru
Institute of Physical Material Science of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude

A single Gaussian pulse propagation through a two-dimensional photonic crystal the spectrum of which corresponds to the same time as the permitted and forbidden frequency ranges for the passage of radiation in the crystal are considered. The possibility of radiation localization within the photonic crystal of finite dimensions is shown and it can be construed as signal propagation velocity decrease.

The photonic crystals (PC) are the class of artificial objects actively researched in recent years and representing periodic structures with the specific scale of electrophysical parameters change comparable to radiation wavelength. It causes the existence of the band structure of a photonic crystal passing spectrum including also the frequencies ranges forbidden for radiation propagation within which radiation propagation in a crystal is completely suppressed that, in particular, makes it possible to light velocity in it [1]. Dispersing

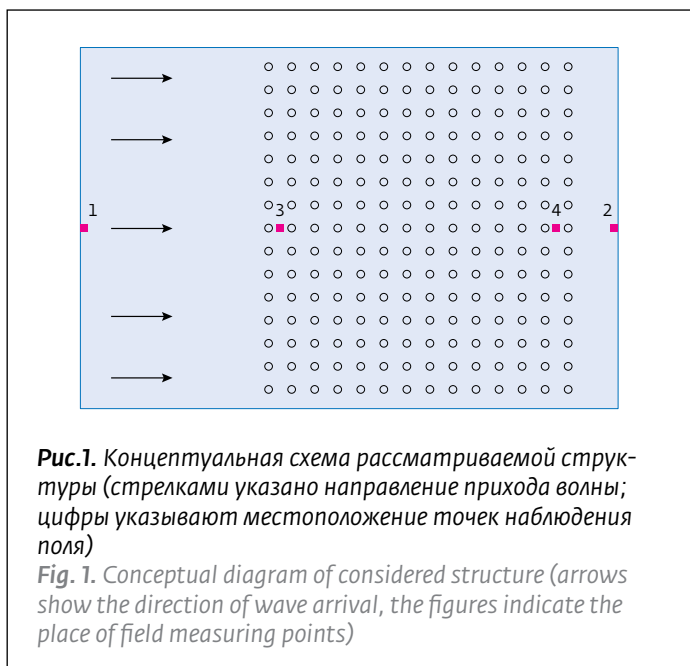


Рис.1. Концептуальная схема рассматриваемой структуры (стрелками указано направление прихода волны; цифры указывают местоположение точек наблюдения поля)

Fig. 1. Conceptual diagram of considered structure (arrows show the direction of wave arrival, the figures indicate the place of field measuring points)

ω – циклическая частота, k – волновое число в межэлементном пространстве, r – координата вдоль направления распространения импульса. Рассматривается E – поляризация излучения.

Положим, что период ФК составляет 1 мм, радиус элементов – 0,15 мм. Для этих параметров FDTD-методом (метод конечных разностей во временной области) выполнен расчет уровня поля за ФК (рис.2), продемонстрировавший наличие одной полной запрещенной зоны (в плоскости, перпендикулярной осям элементов) в спектре собственных состояний ФК, располагающейся в диапазоне 100–140 ГГц.

Выясним особенности прохождения через рассматриваемый ФК импульсного излучения, спектральный состав которого соответствует различным участкам полученной частотной характеристики. Для этого используем гауссов импульс со следующими параметрами: $t_0=25$ пс и $a=10$ пс. При такой длительности сигнала ширина его спектра по уровню $e^{-1/2}$ от максимального составляет 140 ГГц. Частоту колебаний, формирующих импульс, положим равной 110 ГГц, т.е. соответствующей запрещенной зоне.

На рис.3 приведены результаты моделирования, полученные за пределами ФК в точках 1 и 2 (см. рис.1). Данные с облучаемой стороны структуры легко интерпретируемы. Поскольку существенная часть спектра сигнала приходится на запрещенную полосу частот, наблюдается одиночный отраженный сигнал значительной амплитуды и длительности, близкой к длительности падающего на ФК импульса. Это говорит о том, что излучение в ФК проникает незначительно, испытывая отражение практически на его границе. Поведение временной зависимости, полученной с другой стороны кристалла, выглядит не столь очевидным. Прощедший сигнал имеет малую амплитуду и достигает точки наблюдения в момент времени, соответствующий

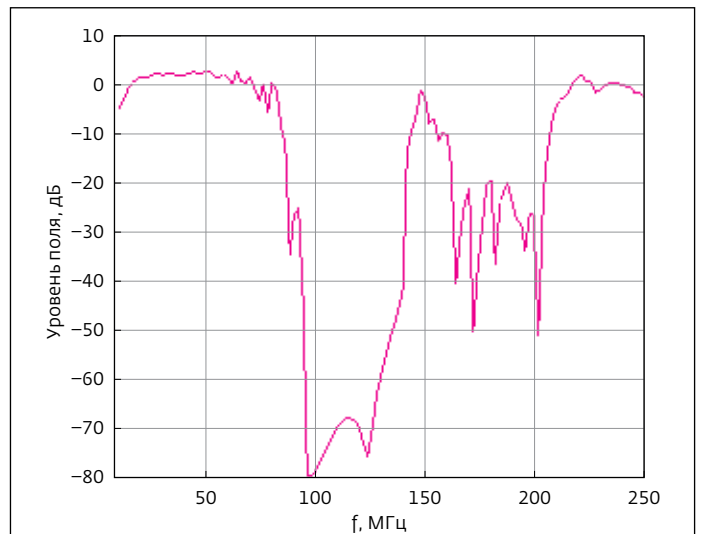


Рис.2. Частотная зависимость уровня поля за ФК, полученная в точке 2 (см. рис.1), указывающая на существование полной запрещенной зоны

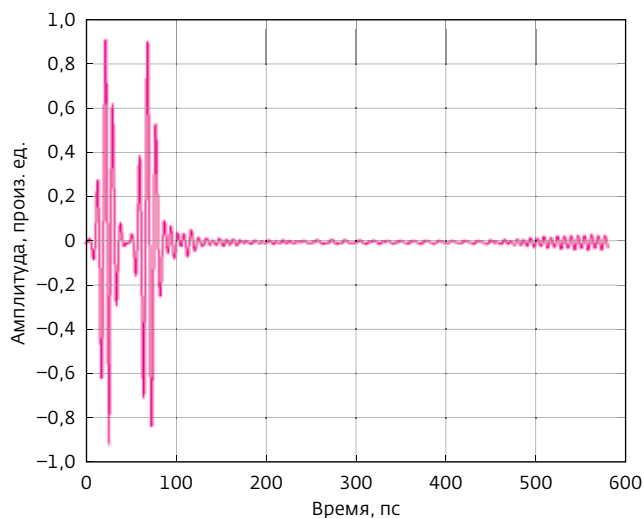
Fig. 2. Frequency relation of field level beyond photonic crystals achieved at point 2 (see Fig.1) indicating occurrence of complete band gap

properties of photonic crystal result in the unusual reflection and refraction pattern on boundaries of such structures even for harmonic electromagnetic oscillations [2,3]. Interaction of pulse radiations with such objects should cause more interesting effects. Let us illustrate the observed information, having considered the following task.

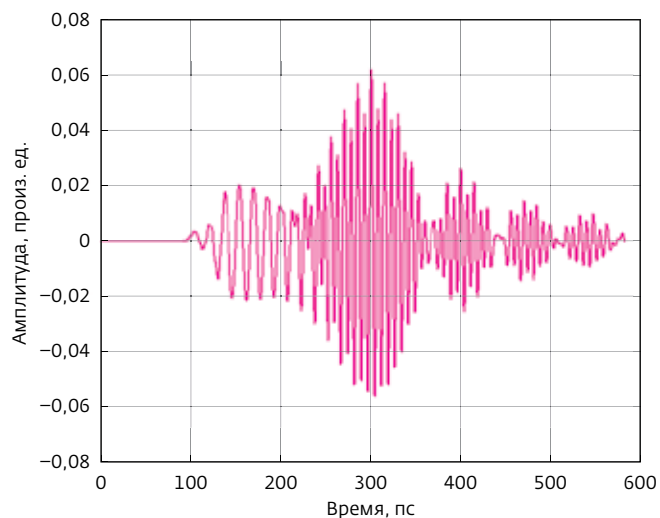
A plane electromagnetic wave formed as a Gaussian pulse is incident on the border of two-dimensional periodical insulating crystal (Fig.1) formed from tubular elements of circular cross-section having dielectric capacity of 13 (gallium-arsenide):

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

where t_0 is temporary pulse movement corresponding to zero reading, a is a pulse width, ω is a circular frequency,



a)



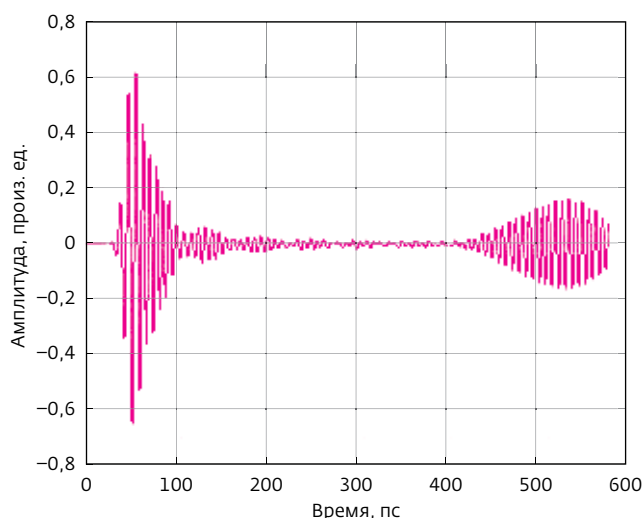
b)

Рис.3. Временные диаграммы, полученные в точках наблюдения, располагающихся вне структуры
Fig. 3. Time charts achieved at measurement points placed outside the structure

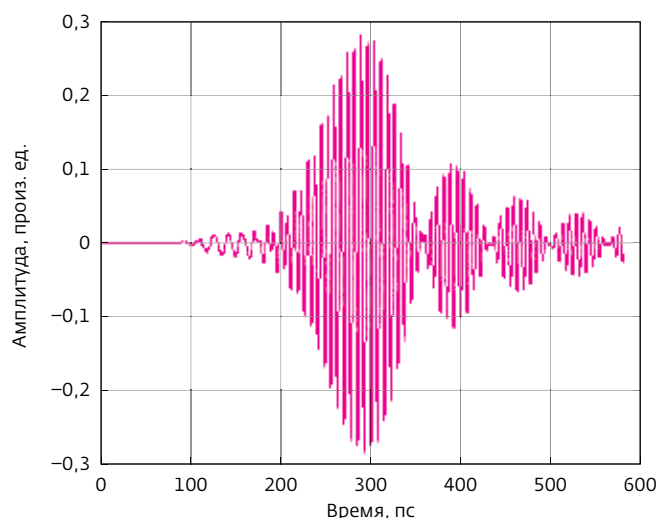
скорости его распространения со скоростью света в свободном пространстве. Однако из временной диаграммы следует, что через 100 пс до точки наблюдения доходят только низкочастотные компоненты исходного излучения, соответствующие разрешенной зоне ФК, а основной прошедший сигнал начинает формироваться только в районе 250 пс. Он представляет собой последовательность "колоколообразных" импульсов, имеющую экспо-

k is a wave number in interelement field, r is a coordinate along the pulse of propagation direction. E polarization of radiation is considered.

Let us suppose that photonic crystal phase is 1 mm, elements radius is 0.15 mm. For these parameters the calculation of field level for photonic crystal is performed by the FDTD method (Fig. 2) which showed the existence of a single complete band gap (in the plane, perpendicular to axes of elements) in a range



a)



b)

Рис.4. Временные диаграммы, полученные в точках наблюдения, располагающихся внутри структуры
Fig. 4. Time charts achieved at measurement points placed inside within the structure

ненциальную огибающую. В целом эта картина напоминает биения близких по частоте гармонических процессов, затухающие во времени.

Для уточнения физической картины взаимодействия импульса с ФК рассмотрим аналогичные временные диаграммы, но полученные уже в точках 3 и 4 (см. рис.1а, б), т.е. в структуре непосредственно вблизи ее границ.

Основное, что следует из этих зависимостей – это совпадение формы колебаний за пределами ФК и внутри него, но существенное различие в амплитудных характеристиках. Так, при выходе из ФК амплитуда поля в максимуме сигнала внутри структуры в 5 раз превышает соответствующий уровень за ее пределами. Это означает, что кристалл сильно рассогласован с окружающим пространством, а следовательно, волна, вошедшая в структуру, эффективно отражается ее границами и локализуется в ней в течение продолжительного времени. При этом пространственно ограниченный ФК представляет собой своеобразный резонатор Фабри-Перо. Кроме того, сопоставляя представленные временные зависимости, видно, что при движении излучения, например, в обратном направлении по ФК его амплитуда изменяется весьма незначительно (отметки 540 пс на рис.4а и 295 пс на рис.4б). Это нехарактерно для поведения волновых процессов, частота которых строго укладывается в границы запрещенной зоны ФК, – как известно, в этом случае наблюдается экспоненциальное убывание поля по мере прохождения через кристалл, 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 границы. Важно отметить, что близкие амплитудные характеристики сигналов будут наблю-

of photonic crystal proper state which is located in the range of 100–140 GHz.

Let us clarify the features of propagation through concerned photonic crystal of a pulse radiation the spectral content of which corresponds to different sections of received frequency response. Let us use Gaussian pulse having following parameters: $t_0=25$ ps and $a=10$ ps. With such signal duration the width of its range on $e^{-1/2}$ level from maximum level is 140 GHz. Oscillation frequency that creates the pulse should be accepted as 110 GHz, i.e. corresponding to band gap.

The simulation result received outside the photonic crystal at points 1 and 2 are given in Fig. 3 (see Fig. 1). Data received from the irradiated side of structure are easily interpreted. As an essential part of a signal range falls within the forbidden frequency band, a single reflected signal of considerable amplitude and duration, close to duration of the pulse falling on photonic crystal is considered. This means that radiation penetrates into photonic crystal slightly, having met the reflection practically close to its border. The action of the temporal relation received on the other side of a crystal is not so obvious. The passed signal has low amplitude and reaches measuring point at the point of time corresponding to its propagation with light velocity in the free space. However time chart concerns that only low frequency components of initial radiation corresponding to the allowed bands of photonic crystal reach the measuring point by 100 ps, and the main last transmitted signal begins to be formed only at approximately 250 ps. It is the subsequence of bell-shaped pulses having exponential envelope. In general this image resembles beating of harmonic process similar in frequency dying out at a time.

Let us consider similar time charts but those received at points 3 and 4 (see Fig. 1), i.e. in structure directly near its borders for specification of a physical pattern of pulse interaction with photonic crystal.

The main aspect caused by these relations is the coincidence of oscillations mode outside the photonic



даться как в менее, так и в более протяженных структурах.

В заключение отметим следующее. Время прохождения импульса через ФК, определяемое по моментам, в которые наблюдался максимальный уровень излучения вблизи границ, либо по появлению сигнала, отраженного одной из граней кристалла и вышедшего через другую грань, на соответствующих временных диаграммах значительно превышает время, которое требуется на прохождение таких же дистанций волне в свободном пространстве. Это позволяет, в принципе, говорить об уменьшении групповой скорости излучения, ранее подробно рассматривавшемся в ФК с линейными дефектами [4]. При этом неверно в данном случае будет говорить о замедлении скорости прохождения сигнала через ФК, рассматривая его как некоторую среду с эффективным показателем преломления, отличающимся от соответствующей характеристики окружающего пространства [5]. Во-первых, выше показано, что отдельные составляющие сигнала движутся со скоростью света в пустоте. Во-вторых, для спектральных составляющих сигнала, соответствующих запрещенной зоне, понятие групповой скорости вообще не имеет смысла (или следует говорить об ее близости к нулю), поскольку как такового распространения излучения в ФК в этом диапазоне частот не происходит. Поэтому некорректно в нашем случае трактовать результаты моделирования и как уменьшение скорости всего волнового пакета, которым является, по существу, гауссов импульс, поскольку рассматривается достаточно широкополосный сигнал, лишь часть спектра которого укладывается в границы запрещенной зоны. На наш взгляд, вернее наблюдаемые результаты охарактеризовать как локализацию гауссова импульса с частотой возбуждения, соответствующей полной запрещенной зоне, в пространственно ограниченном ФК.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sakoda K.** Optical Properties of Photonic Crystals. – Berlin, Springer, 2005.
2. **Simovski C., Belov P., Atrashchenko A., Kivshar Y.** Wire metamaterials: physics and applications. – Advanced materials, 2012, v.24, p.4229.
3. **Vetluzhskij A.Ju.** Jeftektivnye jelektrofizicheskie svojstva metallicheskih jelektromagnitnyh

crystal and within it, but there is the essential distinction in amplitude characteristics. So, at photonic crystal output the field amplitude in a signal maximum within the structure is 5 times more than appropriate level beyond its limits. This means that the crystal is mismatched strongly with external environment, and accordingly, the wave entered into the structure is reflected effectively by its borders and has been concentrated in it for extended periods of time. At the same time spatially constrained photonic crystal represents a peculiar resonator of Fabry-Perot resonator. Besides, comparing the provided temporal relations, it is obvious that at radiation movement, for example, in the opposite direction on photonic crystal its amplitude changes very slightly (points of 540 ps in Fig. 4a and 295ps in Fig. 4b). It is indistinctive for wave processes action the frequency of which is strictly laid down in borders of the band gaps of photonic crystal, and as is well-known, in this case field's exponential decrease is considered in process of passing through a crystal, physically connected to Bragg reflection of waves. In the considered situation such loosening also happens, but only in case of pulse penetration into photonic crystal, and then study level doesn't decrease exponentially any more, but only slowly decreases by means of energy effluence through borders. It is important to note that the similar amplitude signals characteristics should be considered both in less and in more extensive structures.

In conclusion we should mark the following information. Time of pulse propagation through photon crystal determined on moments at which its maximum radiation level was considered near borders or at appearance of a signal, reflected by one of crystal edges and escaped through another one in appropriate time charts considerably exceeds the time which is required for wave to pass the same distances in the free space. This allows basically referring to reduction of group radiation velocity considered earlier in detail in photonic crystal with the linear defects [4]. At the same time it is incorrectly in this case to consider it as some medium with active refraction index differed from the correspondent feature of external environment [5]. First, it is shown above that separate signal components move with light velocity in a vacuum. Secondly, the concept of group velocity generally doesn't make a sense (or it is necessary to consider its proximity to zero) for the spectral components of a signal corresponding to the band gap, as radiation propagation in photonic crystal in this range of frequencies doesn't appear. Therefore it is incorrect in our case to treat results of simulation and as the reduction of speed of a total wavepackage which is, in essence, Gaussian pulse



kristallov. – Zhurnal radioelektroniki, 2015, № 1, (URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/index.html>).

4. Ветлужский А.Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов. – Журнал радиоэлектроники, 2015, № 1.
5. Soljagic M., Joannopoulos J. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals. – Nature materials, 2004, v.3, p.211.

because rather broadband signal is considered, and only a part of a range of which is within borders of the band gap. In our opinion, it is more correctly to describe observed results as localization of Gaussian pulse with driving frequency, appropriate to complete band gaps, in spatially limited photonic crystal.

The work is performed with financial support of the Russian Federal Property Fund within the scientific project No. 15-47-04315.

ЛАЗЕРЫ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ, МЕДИЦИНЕ" ("ЛАЗЕРЫ'2017")



МГТУ им. Н.Э.Баумана, Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова, российский онкологический центр им. Н.Н.Блохина, НИЯУ МИФИ приглашают принять участие в традиционной научной конференции "Лазеры в науке, технике, медицине". Конференция состоится в Объ-

единенном институте ядерных исследований г. Дубны с 27 июня по 1 июля 2017 г.

Основные направления работы конференции:

- лазерное инициирование молний;
- лазерные информационные и технологические комплексы;
- биомедицинские применения лазеров;
- лазерные оптико-электронные системы;
- терагерцевые системы;

- лазерные технологии и диагностика сред;
 - лидарные системы;
 - фемтосекундные лазеры и их применение;
 - высокоомощные технологические лазеры и их применение;
 - функциональные материалы для лазерной техники.
- Электронная почта для заявок и докладов:
mntores@mail.ru

www.mntores.inlife.ru