

07

Исследование волноводных структур на основе двумерных фотонных кристаллов

© Б.В. Басанов, А.Ю. Ветлужский

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра
СО РАН, Улан-Удэ
E-mail: vay@pres.bscnet.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2007 г.

Экспериментально исследована работа волновода на основе двумерного фотонного кристалла, образованного круговыми металлическими цилиндрами. Доказана возможность повышения эффективности работы волновода путем выбора определенной высоты элементов. Проанализированы физические механизмы, приводящие к наблюдаемым эффектам.

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Fx.

Активно исследующиеся в настоящее время фотонные кристаллы — структуры с пространственно изменяющимися диэлектрическими свойствами с периодом, близким к длине волны взаимодействующего с ними электромагнитного поля, — вызывают интерес разработчиков электронной аппаратуры как основа для создания волноводов, резонаторов, фильтров и других устройств, предназначенных для работы в оптическом диапазоне. При этом наиболее перспективными для практического применения в ближайшие годы принято считать [1] двумерные фотонные кристаллы, обладающие пространственной периодичностью в двух ортогональных направлениях.

Исследованию волноводов на основе двумерных фотонных кристаллов посвящен целый ряд работ. Так, например, в [2] были рассмотрены собственные волны волновода, образованного путем удаления ряда элементов из структуры, состоящей из периодически расположенных металлических цилиндров неограниченной длины, выполнен расчет полосы пропускания такого волновода. В работе было отмечено, что при практическом использовании бесконечно протяженные проводники можно заменить эквивалентной системой коротких цилиндрических элементов, размещаемых между двумя параллельными металлическими экранами.

Отметим, что, на наш взгляд, при создании малогабаритных устройств использование дополнительных экранов (помимо подложки) может привести к искажениям поля как из-за краевых дифракционных эффектов на металлической пластине ограниченных размеров, так и из-за нарушений условий согласования волновода с устройством его возбуждения. Целью данной работы явилось экспериментальное исследование возможности создания и эффективности канализирующих устройств на основе двумерных фотонных кристаллов, образованных цилиндрическими элементами конечной длины.

В качестве объекта исследования была выбрана двумерно-периодическая структура, образованная металлическими цилиндрами кругового поперечного сечения диаметром 1 mm. Цилиндры располагались перпендикулярно металлической плоскости, образуя решетку 21 на 9 элементов. Экспериментальная установка позволяла изменять произвольным образом высоту цилиндров, период структуры мог изменяться дискретно с кратностью 7.5 mm. Измерения проводились в диапазоне частот 6.0–8.5 GHz. В качестве излучателя и приемной антенны использовались соответственно открытый конец волновода с апертурой 27×12 mm и несимметричный вибратор с длиной плеча, равной четверти длины волны на средней частоте рабочего диапазона, которые устанавливались непосредственно вблизи границ структуры. Исследовался случай ориентации вектора напряженности электрического поля вдоль осей цилиндров.

Для анализа зонной структуры рассматриваемого кристалла был выполнен расчет величины $B = 10 \lg P/P_0$ (P — уровень поля, прошедшего сквозь структуру, образованную бесконечно длинными цилиндрами, P_0 — поле в отсутствие структуры при том же пространственном разное источника излучения и точки наблюдения) в зависимости от

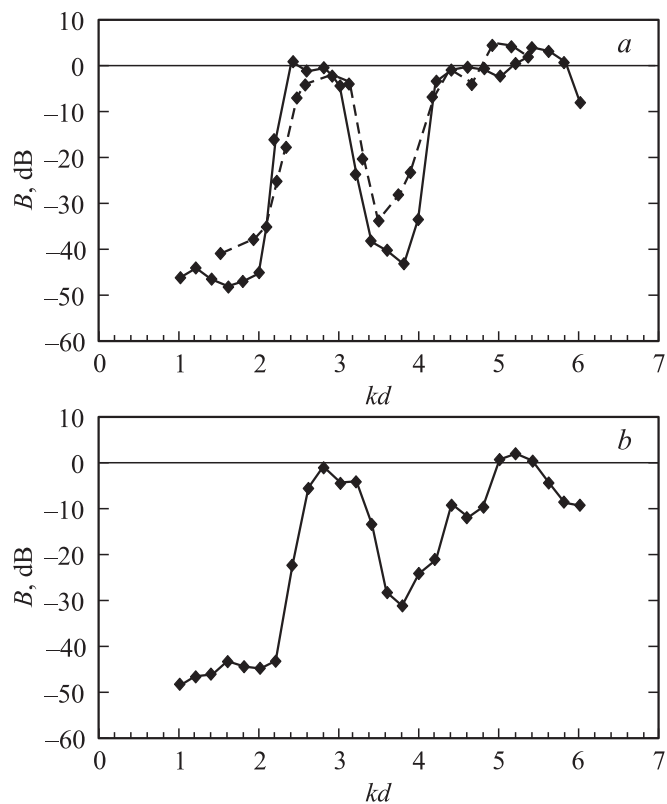


Рис. 1. Относительный уровень поля, прошедшего через кристалл перпендикулярно кристаллографической плоскости: a — (10), b — (21), c — (11).

параметра kd , где k — волновое число, d — период структуры. Методика расчета, базирующаяся на методе разделения переменных, применительно к подобным задачам была изложена в [3]. На рис. 1 представлены результаты расчетов для направлений распространения, ориентированных перпендикулярно кристаллографическим плоскостям, характеризующимся следующими индексами Миллера: a — (10), b — (21), c — (11). Пунктирная линия на рис. 1, a соответствует данным, полученным экспериментально для структуры, высота элемен-

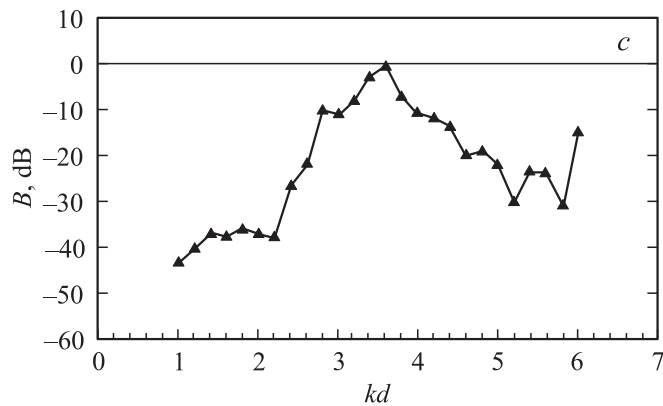


Рис. 1 (продолжение).

тов в которой многократно превышала длину волны. Из сравнения полученных кривых следует, что возникновение полной запрещенной зоны в спектре собственных состояний фотонного кристалла, образованного металлическими цилиндрами, возможно только в области малых значений параметра kd , которая для рассматриваемых поперечных размеров цилиндров ограничивается значением $kd = 2$. Отметим, что к аналогичным выводам на основе оригинальной методики анализа подобных структур приходит и автор работы [2].

Для трансформации рассматриваемого фотонного кристалла в волноведущую структуру из него был удален центральный ряд из 21 элемента в направлении (10). Полученный волновод исследовался экспериментально на предмет изучения влияния параметра kd на каналирующие свойства структуры. Результаты исследования представлены на рис. 2, где по оси ординат вновь отложен относительный уровень прошедшего через фотонный кристалл поля. Как следует из полученной зависимости, в диапазоне значений параметра $kd = 0 \div 1.6$ волновод является запредельным, при этом фотонный кристалл не поддерживает распространение волн ни вдоль волноведущего канала, ни в каком-либо ином направлении. Начиная со значений kd порядка $1.8 \div 1.9$ в волноводе появляются распространяющиеся типы волн, при этом уровень относительного усиления поля существенным образом варьируется в зависимости от соотношения периода расположения элементов

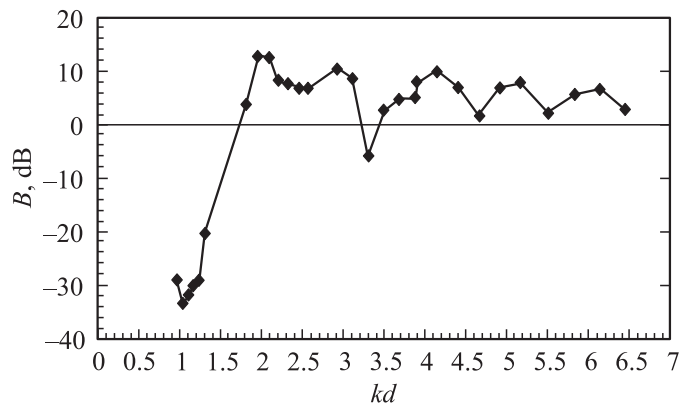


Рис. 2. Относительный уровень поля в волноводе на основе кристалла, образованного цилиндрами бесконечной длины.

в фотонном кристалле и длины волны. Отметим, что оптимальные значения $kd = 1.9 \div 2.0$, соответствующие максимальной концентрации поля в волноводном канале, как и следовало ожидать, отвечают условию возникновения полной запрещенной зоны в кристалле, при выполнении которого становится невозможным отток энергии через стенки волновода.

Указанные измерения так же, как и предыдущие, проводились при высоте цилиндров h , значительно большей максимальной длины волны, используемой в экспериментах ($h \approx 6\lambda_{\max}$), за счет чего исключалось влияние конечности длины цилиндров на получаемые результаты. Однако, как уже отмечалось, при практическом использовании подобных структур, к их габаритам должны предъявляться достаточно жесткие требования. При этом введение дополнительных элементов в конструкцию волновода может быть нежелательным.

Для выяснения влияния конечности высоты цилиндров на канализирующие свойства структуры были выполнены измерения уровня поля в волноводном канале при двух различных положениях антенн. В первом случае и передающая и приемная антенны располагались непосредственно над поверхностью, образованной вершинами цилиндров, у начала и конца волноводного канала. Вторая ситуация соответствовала постановке вышеописанных экспериментов, когда обе

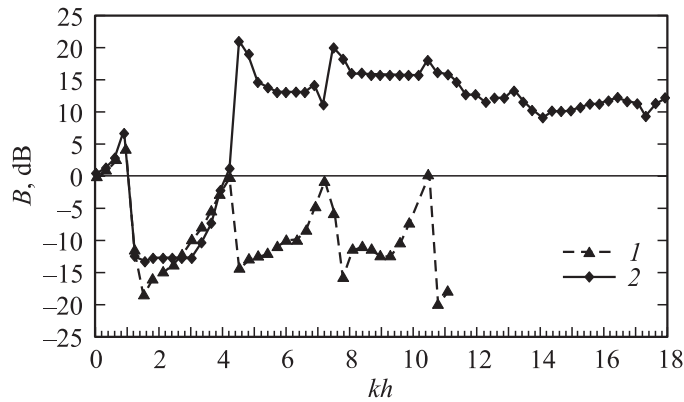


Рис. 3. Относительный уровень поля в волноводе в зависимости от высоты цилиндров.

антенны располагались вблизи металлической плоскости, на которую устанавливались цилиндры. Исследовался фотонный кристалл, период расположения элементов в котором отвечал условию $kd = 1.95$. На рис. 3 представлены полученные зависимости уровня поля в волноводном канале от параметра kh . Кривая 1 описывает случай расположения антенн над фотонным кристаллом, кривая 2 соответствует измерениям поля непосредственно в волноводном канале.

Представленные результаты демонстрируют существенную зависимость уровня поля от высоты цилиндров при обоих способах облучения фотонного кристалла. При этом сходство в поведении кривых указывает на то, что физический механизм, приводящий к появлению указанной зависимости, является одним и тем же и заключается в возбуждении поверхностных волн, возникающих вблизи верхней кромки кристалла при определенной высоте цилиндров. Особенности распространения подобных волн в стержневых структурах ранее были подробно исследованы в [4]. Из рис. 3 следует, что при выполнении условий возбуждения поверхностных волн происходит дополнительное увеличение уровня поля внутри волноводного канала. Причина этого заключается в перераспределении энергии в области пространства над фотонным кристаллом и концентрации поля вблизи его верхней кромки в виде поверхностной волны. Распространение этих волн в рассматриваемом

случае сопровождается дифракционными процессами, приводящими к переходу части их энергии в энергию волн, распространяющихся по волноводному каналу. Данный механизм особенно сильно проявляется для малых высот цилиндров и наблюдается вплоть до значений $kh \approx 10$. При этом превышение уровнем поля в волноводном канале, ограниченном цилиндрами конечной высоты, значений поля в волноводе на основе кристалла из бесконечно протяженных цилиндров может достигать 9–10 дВ.

Таким образом, появляется возможность, не вводя в исходный фотонный кристалл дополнительных конструктивных элементов, в широких пределах регулировать уровень поля в волноводе выбором соответствующей высоты цилиндров. При этом указанная возможность будет сохраняться и для произвольной (не прямолинейной) формы волноводного канала, и для фотонных кристаллов, создаваемых из неметаллических элементов. В последнем случае необходимо, чтобы показатель преломления материала цилиндров значительно превосходил оптическую плотность межэлементной среды, так как только при таких условиях возможно эффективное возбуждение поверхностных волн в стержневых структурах.

Список литературы

- [1] Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В. Оптика реальных фотонных кристаллов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
- [2] Банков С.Е. // РЭ. 2006. Т. 51. № 5. С. 533–542.
- [3] Иванов Е.И. Дифракция электромагнитных волн на двух телах. Минск: Наука и техника, 1968.
- [4] Ветлужский А.Ю., Ломухин Ю.Л. // РЭ. 2004. Т. 49. № 3. С. 282–287.