

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И ВОЛНОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Статья посвящена рассмотрению процесса моделирования прохождения волн света через фотонные кристаллы. С целью упрощения процесса моделирование выполнено в двумерном пространстве. Результаты моделирования для наглядности и большей общности представлены в виде графиков, построенных в относительных координатах.

Ключевые слова: детектор, мода, спектр пропускания, фотонная запрещенная зона, фотонный кристалл.

Введение. Для построения широкого класса оптоэлектронных устройств возникла потребность в разработке управляющих элементов (ключей, вентиляей) аналогичных транзисторам в электронике. Такие оптические вентиляи могут быть построены на основе фотонных кристаллов (ФК), являющихся принципиально новыми оптическими приборами, имеющими в своей основе периодические структуры соизмеримые с длиной световой волны. Моделированию процесса прохождения света, через такие устройства и посвящена данная статья.

Основной материал статьи. Для выделения основных закономерностей распространения света в ФК имеет смысл рассмотреть упрощенную двумерную модель. Будем полагать, что в этом случае распространение света происходит только в плоскости периодического рисунка.

Типичный спектр пропускания волновода на основе фотонных кристаллов (ФКВ) в широком частотном диапазоне изображен на рис.1. Коэффициент пропускания нормирован на пропускание входного детектора. Для сравнения на этом же рисунке приводится спектр пропускания в том случае, когда выходной детектор смещен в сторону от канала и находится напротив бездефектной части кристалла. На рис. 1 хорошо заметен провал в пропускании в диапазоне нормированных частот $0,23 \div 0,32$, отвечающий фотонной запрещенной зоне (ФЗЗ).

Ключевой вопрос оптики ФК – это вопрос о возможности формирования и спектральном положении ФЗЗ. В периодической среде не могут распространяться фотоны, энергия которых соответствует области частот в ФЗЗ. Основным вопросом, на который обращалось внимание на начальном этапе исследования ФК, было исследование условий существования и размеров фотонных запрещенных зон в периодических упаковках различного типа и симметрии. Этот вопрос решался на протяжении ряда лет после постановки задачи о создании ФК, как оптического аналога полупроводниковым кристаллам, только в полупроводниковых устройствах осуществляется управление движением электронов и дырок, в то время как фотонные кристаллы регулируют движение фотонов.

Сделаем замечание по поводу превышения коэффициента пропускания T единицы в некоторых точках спектра. Это связано с особенностями возбуждения волн и размерами детекторов. Часть излучения от первичного источника, расположенного прямо напротив канала ФКВ, минует входной детектор, но за счет эффективной локализации при последующем распространении в узкой области вблизи канала, проходит через выходной детектор. Таким образом, на отдельных частотах в ФЗЗ наблюдается превышение энергии выходящей из канала над входящей в него.

Другой механизм для $T > 1$ существует в низкочастотной области спектра. При достаточно большой длине волны излучение как бы перестает чувствовать наличие отверстий, и система отвечает больше модели распространения света в однородной двумерной среде (или однородной пластинке в трехмерном случае). Излучение, падающее наклонно на поглощающие слои частично отражается, внося вклад в прохождение энергии через выходной детектор. Поэтому длинноволновые участки спектра не сильно меняются при смещении детектора от канала волновода.

Чтобы убедиться, что никакого нарушения закона сохранения энергии не имеется, был сделан расчет спектра пропускания для такой же системы, но увеличив размеры детекторов так, что они простираются в поперечном направлении от левого идеально согласующегося слоя (ИСС) до правого. Спектры пропускания и отражения представлены на рис.2. Как видно, они отражают основные черты спектров рис. 1, однако, хорошо заметна их дополнительность. Сумма коэффициентов пропускания и отражения не превышает единицу.

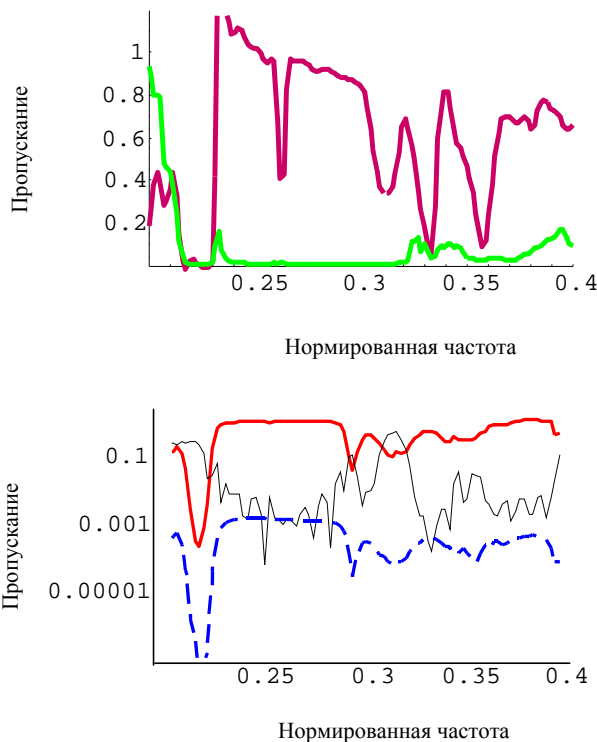


Рис.1 - Спектр пропускания ФКВ при двумерном моделировании: верхний рисунок - детектор находится в канале волновода; нижний рисунок – детектор смещен в сторону от канала.

Рассмотрим зависимость пропускания волновода в ДФК от его длины. Исходя из модели потерь в двумерных структурах, связанных с интенсивным рассеянием на частотах вблизи границ ФЗЗ и отсутствием вытекающих мод внутри ФЗЗ, можно предположить, что величина пропускания волновода на частоте дефектной моды от длины зависеть не должна. Это заключение в полной мере подтверждается расчетами для волноводов длиной 7Λ , 14Λ , 21Λ , 28Λ (Рис.3), где Λ обозначает период пространственной решетки ФК.

Следующий этап исследований ФКВ заключается в дешифровке спектра — сопоставлению пиков и провалов в пропускании определенным модам или их отсутствию. Для этого требуется знать зонную структуру соответствующего типа волновода. Зонная структура обычно просчитывается либо с помощью разложения по плоским волнам (PWE — plane wave expansion), либо методом конечных разностей во временной области (FDTD — finite-difference time-domain) [1]. Типичный пример зонной структуры для двумерного ФКВ в Г-К направлении приведен на рис.4. Частота и волновой вектор здесь и далее даются в нормированных единицах: нормированная частота - $\frac{\omega\Lambda}{2\pi c} = \frac{\Lambda}{\lambda}$, нормированный волновой вектор - $\frac{k\Lambda}{2\pi}$.

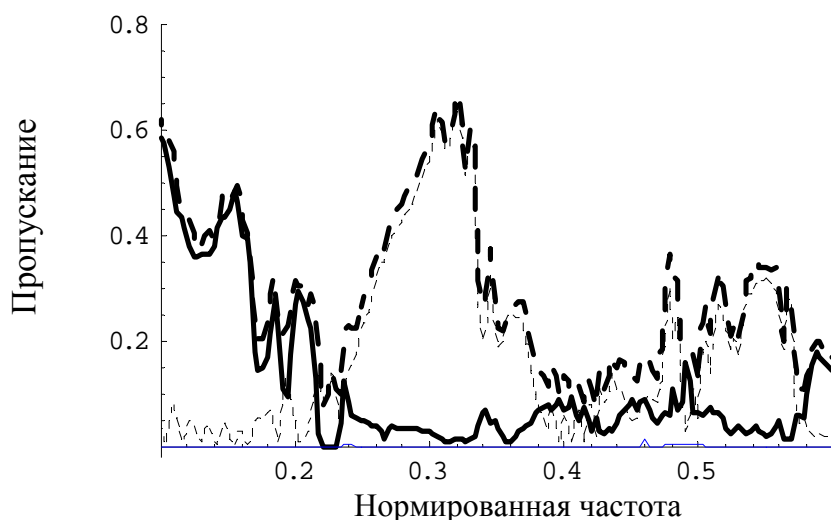


Рис.2 - Спектр пропускания двумерного ФКВ при широких детекторах: жирная линия – отражение; тонкая линия – пропускание; сумма пропускания и отражения дается жирной прерывистой линией.



Рис.3 - Спектр пропускания двумерного ФКВ для нескольких значений его длины.

Кристаллы на при экспериментах отличаются только размером отверстий: в первом случае радиус отверстий $R = 0,3\Lambda$, а во втором - $R = 0,4\Lambda$. При увеличении фактора заполнения атомами пространства кристалла, эффективный показатель преломления уменьшается, положение зоны сдвигается в область более высоких частот, а сама зона расширяется. Положение ФЗЗ для первого случая: $0,22 \div 0,28$, а для второго соответственно $0,25 \div 0,38$.

Вследствие этого увеличивается число дефектных мод в области волноводного канала. На рис.4а в ФЗЗ существуют только две волноводные моды, в то время как на рис.4б их уже 5, хотя две из них представляют два участка одной фундаментальной моды, завернутой на границе по условию периодичности. Моды имеют разную симметрию относительно оси канала. Они могут быть симметричными или антисимметричными (четными и нечетными). Из-за идеальности расчетной структуры, возможно взаимодействие мод только одинаковой четности. Такое взаимодействие приводит к образованию локальных мини стоп-зон внутри ФЗЗ.

Интересно провести сопоставление спектров пропускания ФКВ, рассчитанных по версии FDTD (рис.5 и рис.6) и приводимых в статье [2]. Стоп-зонам соответствуют

явно выраженные провалы в спектрах пропускания, заметные как в графиках работы [2], так и на рис.5 и 6. Так как на остальных участках спектров в области ФЗЗ существует по крайней мере одна дефектная мода (см. рис.4), пропускание ФКВ в этой области весьма велико.

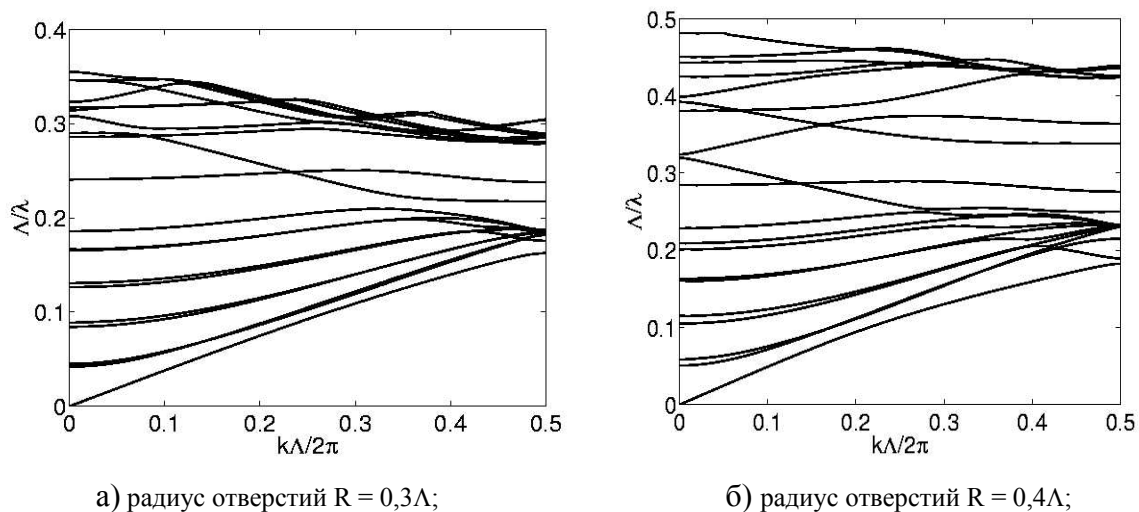


Рис.4 - Зонная структура двумерного ФКВ с тригональной решеткой.

Удобно расположить спектр пропускания волновода в инвертированных координатах (рис.5, б): по оси абсцисс – пропускание, а по оси ординат – частоты рядом с его модовой структурой. Из сопоставления рис.5 и рис.4а хорошо заметно детальное соответствие провалов спектра и мини стоп-зон. На рис.4б и рис.6 подобная композиция выглядит более запутанной из-за многообразия мод и их взаимодействия, однако соответствие положения мод и спектральной плотности пропускания также имеет место.

Наши спектры практически совпадают со спектрами из работы [2] за исключением наличия дополнительных небольших провалов в нашем случае (например, на частоте 0,25 на рис.5 и 0,28 на рис.6). Эти провалы в точности соответствуют частотам пересечения (или антипересечения – если учесть, эффект заворачивания мод вследствие периодичности граничных условий, ограничивающих систему) мод различной четности (см. рис.4а,б). Как уже отмечалось, такое взаимодействие невозможно в идеально симметричной системе. Следовательно, в рассматриваемом численном пространстве снимается симметричное вырождение. Это результат использования, в рассматриваемом случае, несимметричных конечных разностей при аппроксимации пространственных производных. При этом ввиду смещения электрических полей на один шаг вперед по пространственной решетке положение волноведущего канала оказывается несимметричным.

Этот численный артефакт не возникает в схеме с симметричными конечными разностями по пространственным координатам, например, в алгоритме [1]. В нашем случае от него можно избавиться за счет уменьшения шага сетки. Для доказательства на рис.7 приведены спектры пропускания для одной и той же волноведущей структуры (двумерный ФКВ с отверстиями радиусом) при последовательном увеличении пространственного разрешения: $\Lambda/16$, $\Lambda/32$, $\Lambda/48$, т.е. 16, 32 и 48 узлов сетки на один период решетки. Влияние разнородных диэлектриков минимизируется, что проявляется в заметном уменьшении провала на частоте 0,25. Для другого примера двумерного

ФКВ ($R = 0,4\lambda$) пропускание в логарифмическом масштабе при различных пространственных разрешениях дано на рис.8.

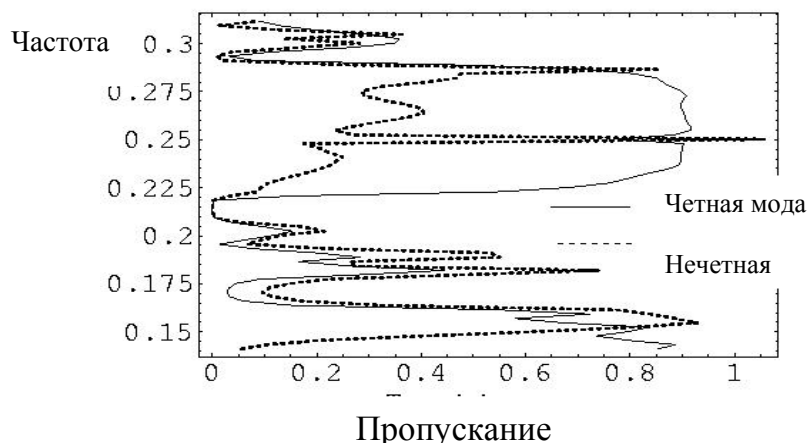


Рис.5 - Спектр пропускания двумерного ФКВ, радиус отверстий $R = 0,3\lambda$.

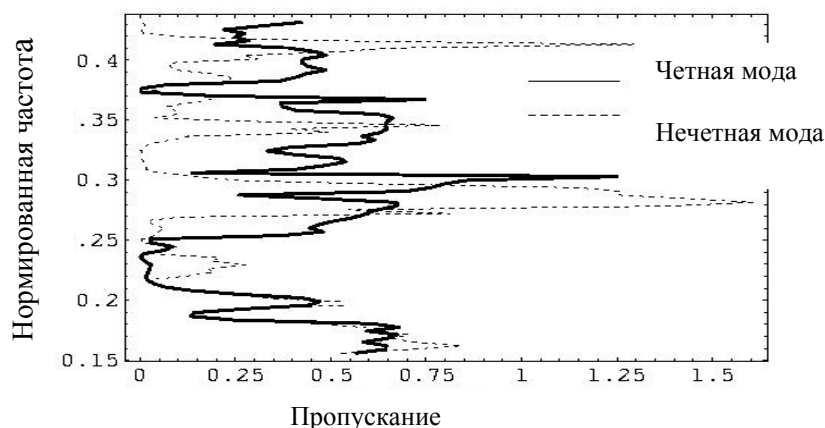


Рис.6 - Спектр пропускания двумерного ФКВ, радиус отверстий $R = 0,4\lambda$.

Если говорить о том, насколько хорошо тот или иной способ описывает реальный эксперимент, то отметим, что, на наш взгляд, технологические погрешности могут снимать вырождение по четности. Сопоставление расчетных результатов с экспериментом будут даны в нашей работе ниже. Отметим, что увеличение пространственного разрешения в 2 раза приводит к росту размеров численного пространства в 8 раз с пропорциональным ростом времени счета и затрат памяти.

Следующий шаг в расшифровке спектров пропускания мы сделали, используя источники возбуждения различной исходной четности. Исходный источник, представлял собой участок фронта плоской волны, имеющей вдоль оси распространения форму гауссова импульса. Таким образом, это был изначально четный источник. Если добавить в выражение для поля исходной волны нечетную функцию типа $\sin(kx)$ то спектр пропускания изменится. Теперь, в первую очередь, возбуждаться будут нечетные моды (см. графики на рис.5 и 6)

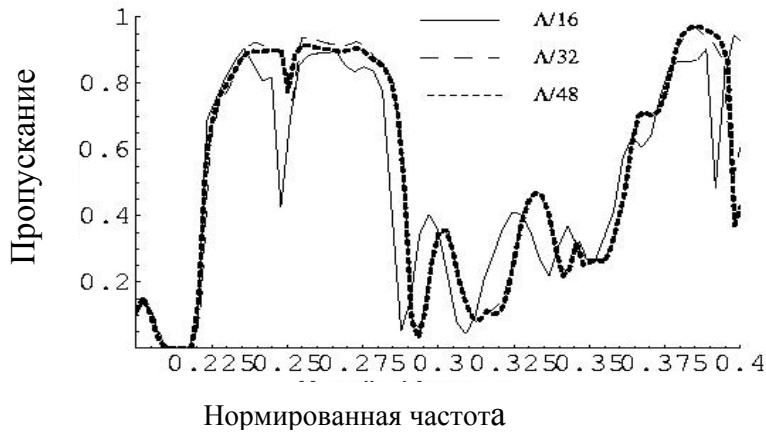


Рис. 7 - Спектр пропускания двумерного ФКВ при различном шаге численной сетки, радиус отверстий $R = 0,3\Lambda$.

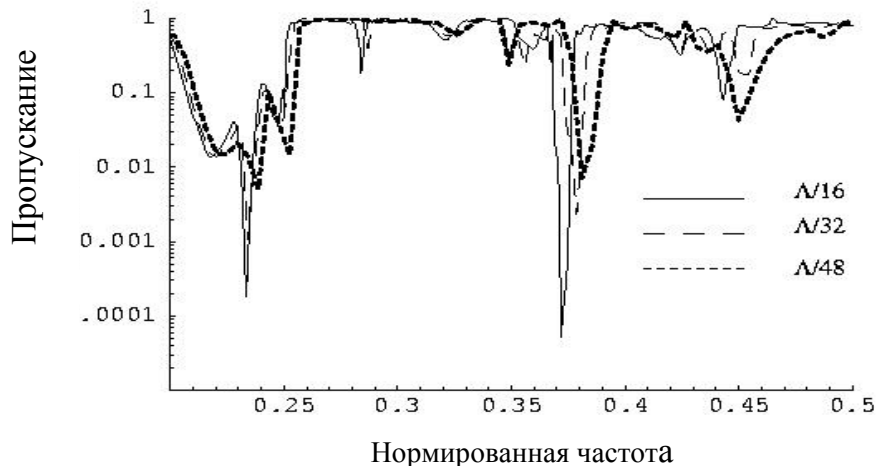


Рис. 8 - Спектр пропускания (в логарифмическом масштабе) двумерного ФКВ при различном шаге численной сетки, радиус отверстий $R = 0,4\Lambda$.

Вывод. Проведенное моделирование, несмотря на его двумерность рассматриваемой модели, наглядно показывает зависимости пропускания от симметрии источника возбуждения в случае высокосимметричной структуры, в нашем случае – прямой волновод в двумерной системе.

Список литературы

1. Lavrinenko A., Borel P.I., Frandsen L.H., Thorhauge M., Harpoth A., Kristensen M., Niemi T., Chong H.M.H. Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components//Optics Express.-2004.-V.12, No2. - P.234-248.
2. Agio M., Soukoulis C.M. Ministop bands in single-defect photonic crystal waveguides//Phys.Rev.E.-2001.-V.64, No5.-P.055603/1-055603/4.

Моделювання оптичних властивостей фотонних кристалів та хвилеводів на їх основі у двовірному просторі. Лавріненко А.В., Лавріненко Ю.В., Черненко Д.С.

Стаття присвячена розгляду процесу моделювання проходження хвиль світла через фотонні кристали. З метою спрощення процесу моделювання виконано у двовірному просторі. Для наочного подання узагальнені результати моделювання зображені у вигляді графіків, побудованих у відносних координатах.

Ключові слова: детектор, мода, спектр пропускання, фотонна заборонена зона, фотонний кристал.

Modeling of optical properties of photonic crystals and waveguides on their basis in two- dimensional space.

Lavrinenko A.V., Lavrinenko Y.V., Chernenko D.S.

The paper is devoted to the modeling of light waves propagation in photonic crystal waveguides. For simplicity the modeling is applied in two- dimensional space. For better visualization and generality the modeling results are presented in normalized units.

Keywords: detector, mode, transmission spectrum, photonic band gap, photonic crystal.