

Лавриненко А.В., д.ф.-м.н., Лавриненко Ю.В. к.т.н.
Одесский государственный экологический университет

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Статья посвящена процессу распространения поляризуемых световых волн в регулярных фотонных кристаллических структурах и, отдельно, в пространственно - периодических. Рассмотрены поляризационные характеристики кристаллов, управляющих мировым потоком и подтвержденные экспериментом. Результаты, полученные в этой работе, способствуют последующему изучению взаимодействия волн с двухмерными фотонными кристаллами, которые используются для разработки волноводных трактов с повышенным уровнем оптической интеграции.

Ключевые слова: волновод, периодическая структура, фотонный кристалл.

Введение. Нанотехнологии, бурное развитие которых во всех областях науки и техники характеризует начало XXI столетия, породили принципиально новые возможности построения различных классов устройств радио и оптоэлектроники. В частности, появилась возможность создания диэлектрических волноводов на основе фотонных кристаллов, обладающих рядом преимуществ перед существующими.

Основной материал статьи. Фотонные кристаллы (ФК) являются принципиально новыми оптическими устройствами, имеющими структурную периодическую решетку различной размерности с характерным расстоянием между «атомами» порядка длины волны оптического излучения, т.е. $0.1 \div 10$ мкм [3]. Наиболее полно физические проявления периодичности в строении ФК отражаются на свойствах двух и трехмерных систем (рис.1). Такие структуры размерности больше одного принято считать многомерными. Это название призвано отразить тот факт, что для таких сред практически единственным способом их теоретического исследования являются численные методы решения непосредственно уравнений Максвелла либо волновых уравнений оптики и электродинамики.

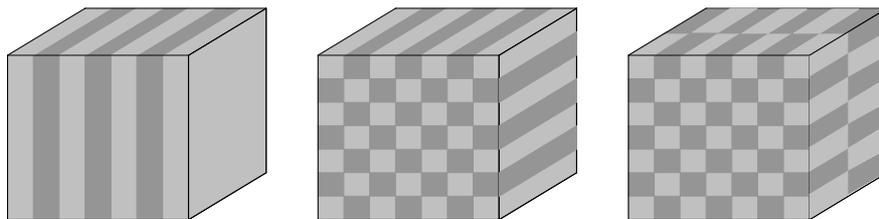


Рис.1- Схематическое изображение одномерных, двумерных и трехмерных периодических структур.

Способность периодических сред образовывать зонально-щелевой спектр для оптического (электромагнитного) излучения является их важнейшим свойством, которое и послужило основанием для введения термина «фотонный (электромагнитный) кристалл». Ключевой вопрос оптики ФК – это вопрос о возможности формирования и спектральном положении фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) [1]. В периодической среде не могут распространяться фотоны, энергия которых соответствует области частот в ФЗЗ. Трехмерные фотонные кристаллы (ТФК) известны своими примерами существования полных и абсолютных ФЗЗ. Определения полные и абсолютные используются, чтобы подчеркнуть факт существования ФЗЗ для излучения любой поляризации, распространяющегося в любом направлении в трехмерной

безграничной среде. В двумерном фотонном кристалле (ДФК) существуют так называемые фотонные запрещенные псевдозоны, представляющие проекции трехмерных ФЗЗ на плоскость периодичности кристалла. В псевдозонах ДФК запрещено существование фотонов соответствующих частот, волновые векторы которых лежат в плоскости кристалла. В одномерной периодической среде существование абсолютных и полных ФЗЗ теоретически невозможно [2].

Основным вопросом теории, на который обращалось внимание на начальном этапе исследования ФК, было исследование условий существования и размеров ФЗЗ в периодических упаковках различного типа и симметрии. Этот вопрос решался на протяжении ряда лет после постановки задачи о создании ФК, как оптического аналога полупроводниковых кристаллов. Только в полупроводниковых устройствах осуществляется управление движением электронов и дырок, в то время как фотонные кристаллы регулируют движение фотонов.

Исторически первые структуры, обладающие полными запрещенными зонами для микроволнового диапазона, были изготовлены на базе инвертированных опалов в ближнем инфракрасном диапазоне. В видимом оптическом диапазоне успешная демонстрация ТФК еще не состоялась. В связи с этим в последнее время внимание исследователей, работающих с ТФК в оптическом диапазоне, привлечено к новым технологическим решениям: полимерным средам, коллоидальным фотонным сверхрешеткам, самоупаковывающимся средам типа искусственных опалов и к макропористому кремнию с модулируемой толщиной пор, в том числе и с полимерным заполнением.

Важно отметить, что первоначально исследования проводились с помощью скалярного приближения для электромагнитного поля при решении волновых уравнений. С одной стороны, это традиционный способ упрощенного анализа в оптоэлектронике. С другой стороны, сказывалось заметное влияние аналогии со скалярной волновой функцией в квантовой механике, используемой в теории полупроводников. Однако, результаты оказались неточны.

Это подтверждает положение, согласно которому расчет ФЗЗ для многомерных периодических сред должен основываться только на векторных уравнениях, избегая любой скаляризации [1].

Несмотря на определенные успехи, производство ТФК с характерным субмикронным размером рельефа по-прежнему остается весьма сложной теоретической и технической задачей. К тому же, если для подавления или усиления спонтанного излучения излучающих центров, наличие полной трехмерной ФЗЗ необходимо, то для волноведущих целей можно использовать ФЗЗ, сформированные только для движения света вдоль плоскостей слоев. Поэтому в последнее время как основная принята концепция использования в пассивных и активных компонентах оптоэлектронных устройств ограниченных двумерных фотонных кристаллов.

Основным исследуемым модулем является отрезок прямого волновода в ДФК. Локализация изучалась на двумерной квадратной решетке из диэлектрических стержней в воздухе. Конфайнмент света в вертикальном измерении достигался использованием двух металлических плоскостей, ограничивающих систему сверху и снизу и отсекающих ТЕ-поляризацию. Наличие дефектных мод в области ФЗЗ указывало на возможность формирования канала, эффективно направляющего электромагнитные волны, в том числе и на крутых поворотах с радиусом порядка длины волны, поскольку поля данных частот экспоненциально затухали в периодическом окружении.

Современное состояние проблемы направления мод ФК таково. Микроструктурирование волноведущего слоя осуществляется нанесением

периодического двухмерного рельефа вместе с дефектами в границах слоя или пластины. Данный рельеф служит для образования ФЗЗ в двумерном подпространстве. Наличие линейного дефекта приводит к возникновению дефектных мод, локализованных в области дефекта в плоскости пластины. Конфайнмент света в третьем измерении, перпендикулярном плоскости волноведущего слоя, происходит за счет обычного волноводного эффекта при полном отражении света на верхней и нижней границах. Таким образом, задача остается трехмерной, хотя периодичность создается только в двумерном подпространстве. В литературе для такой структуры используются названия: пластина из фотонного кристалла (ПФК) или фотонная мембрана, если пластина находится в воздухе [3].

Задача о прохождении света через волновод, созданный за счет внедрения линейного дефекта в изначально совершенную периодическую среду в двумерном пространстве заметно проще. Однородность среды в одном из направлений приводит к тому, что поля не имеют зависимости от соответствующей координаты, и частные производные от полей по данной координате пропадают. При этом моды расщепляются на два независимых поляризационных состояния – ТЕ и ТМ-волны (H- и E-волны) и появляется теоретическая возможность направления света по волноводам, изгибы которых могут делаться с радиусом кривизны порядка длины волны. Подобный результат недостижим с помощью обычных металлических волноводов и световодов, радиус кривизны изгибов которых не может быть сделан менее 1 мм ввиду резкого роста доли излучающих мод в волноводном спектре.

Остановимся непосредственно на симметрии периодических решеток, используемых при создании волноводов на фотонных кристаллах (ФКВ). Обычно рассматриваются двумерные решетки с квадратной или тригональной симметрией (рис. 2) [2].

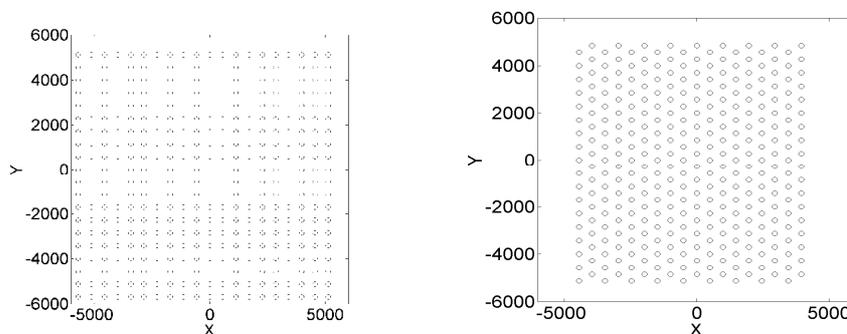


Рис.2 - Квадратная и тригональная решетки ДФК.

Квадратная решетка ДФК, имеющего ФЗЗ, образуется с помощью либо упорядоченного расположения диэлектрических стержней (открываются ФЗЗ для волн ТМ-поляризации), либо пересечения параллельных наборов диэлектрических полосок (отрываются ФЗЗ для волн ТЕ-поляризации).

Тригональные решетки образуются при расположении «атомов» кристалла в узлах и в центре гексагональной ячейки типа пчелиных сот. Под атомами обычно понимают дефекты (отверстия, поры), упорядоченно вносимые в объем идеально-однородного диэлектрика. Такая схема получила сейчас широкое распространение ввиду того, что ее реализация технологически возможна на оборудовании, используемом при производстве современных интегральных схем. Для оптического диапазона именно такая схема расположения атомов – воздушных отверстий в толще диэлектрика - сейчас считается приоритетной.

Отметим отличительные черты тригональной решетки по сравнению с квадратной. Ее зона Бриллюэна ближе к идеальной круговой зоне. А упаковка отверстий позволяет разместить большее число областей с отличными материальными свойствами, т.е. заметнее изменить эффективный тензор диэлектрических проницаемостей по сравнению с квадратной упаковкой. Как следствие, ФЗЗ может быть сделана шире, о чем мы упоминали выше. В настоящее время диэлектрические плоскостойные среды с нанесенным на них двумерным рисунком из отверстий представляют основной объект изучения в оптике ФК.

В качестве материала фотоннокристаллических волноводных устройств используются следующие комбинации диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями: кремний и окись кремния Si-SiO₂; арсенид галлия и алюминат арсенида галлия с различным содержанием алюминия GaAs-Al_xGa_{1-x}As; фосфид индия InP в воздушном окружении или GaInAsP на подложке из фосфида индия или SiO₂ [3].

Системы Si-SiO₂, так называемые кремний-на-изоляторе (silicon-on-insulator), обладают очень большим контрастом показателей преломления ($n_{Si} = 3,4 \div 3,5$, $n_{SiO_2} = 1,4 \div 1,5$), что весьма существенно для вертикального конфинмента света в слое кремния. Более того, это основные материалы для производства световодов, обладающие в своих окнах прозрачности ($\lambda = 1300$ и 1500 нм) самым низким коэффициентом поглощения. К недостаткам SOI-систем можно отнести их хрупкость, создающую определенные проблемы при вырезке отдельных устройств с кремниевой матрицы.

Системы GaAs-Al_xGa_{1-x}As достаточно пластичны и лишены технологических недостатков, свойственных кремний - стеклянным блокам. Тем не менее, такие сэндвичи обладают отношением показателей преломления весьма близким единице, что позволяет их отнести к слабонаправляющим системам.

Решение задачи высоконадежного технологичного производства компонентов интегральной оптики на ФК представляет весьма заманчивую цель ввиду огромной емкости мирового рынка коммуникаций. Отметим только, что периодическая структура создается за счет обычной процедуры травления после нанесения шаблона рисунка либо электронным пучком, либо ультрафиолетовым лучом. Основная задача – создание атомов (воздушных цилиндров) как можно более правильной формы.

В общем случае задача сводится к анализу многослойных диэлектрических структур, представляющих собой в вертикальном направлении (ось Y) композицию нескольких слоев типа: подложка — волноведущий слой толщиной d с показателем преломления n_{core} (возможно в оболочке из нескольких слоев с меньшим показателем преломления n_{clad}) — защитное покрытие — воздух (рис.3). Волноведущий слой обладает наибольшей диэлектрической проницаемостью ($n_{core} > n_{clad}$), обеспечивая направление мод в горизонтальном направлении в плоскости слоев [1].

На многослойник нанесен двумерный периодический рисунок тригональной симметрии из отверстий, заполненных воздухом. Период решетки a (часто встречается обозначение Λ) называется в литературе постоянной решетки. Отверстия начинаются с верхнего диэлектрического слоя, пересекают волноведущий слой и заканчиваются на некоторой глубине в подложке. Их глубина может изменяться. С помощью периодической структуры формируется зонально-щелевой спектр. При горизонтальном распространении света моды могут находиться только в области фотонных разрешенных зон. Волны с частотами, попадающими в ФЗЗ, не могут поддерживаться данной структурой.

В структуру вносится линейный дефект, представляющий собой не что иное, как один или более рядов S , в которых дырки отсутствуют. Такой волновод обозначается

BS (например, B1 обозначает волновод с каналом шириной в один удаленный ряд структурных элементов).

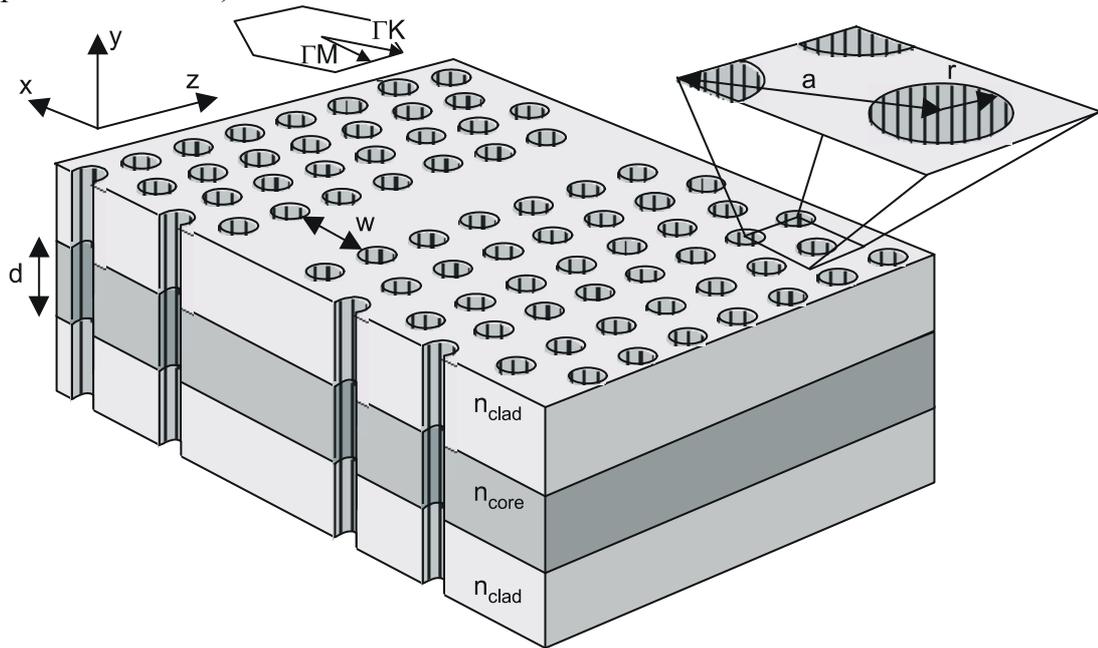


Рис. 3 - Волноведущая структура на ДФК.

Его ориентация не может соответствовать направлениям Г-К или Г-М неприводимой зоны Бриллюэна (см. рис.3). Такой линейный дефект порождает в ПФК дефектные моды. Подбором ширины зоны дефекта $w = \sqrt{3}S\Lambda - 2r$, постоянной решетки Λ и диаметра $D = 2r$ отверстий (см. рис.3) можно регулировать частоты дефектных мод. Таким образом, если добиться, чтобы частота дефектной моды соответствовала диапазону ФЗЗ, получается фотоннокристаллический волновод (ФКВ), работающий на дефектной моде. Особенность такого волновода – возбужденная в его канале мода не может покинуть дефектную зону ввиду отсутствия поддерживаемых мод той же частоты в окружающем пространстве волноведущего слоя.

Определенные потери в таком волноводе неизбежно существуют и связаны, в первую очередь, с рассеянием из плоскости волновода. В роли препятствий, рассеивающих свет, выступает система отверстий, среда в которых заметно отличается по своим оптическим свойствам от материала волноводного канала. Потери существенно возрастают при любом изменении конфигурации дефекта по направлению, толщине и количеству каналов.

Спектры пропускания и отражения рассчитываются с помощью FDTD метода (finite-difference time-domain), относящегося к сеточным методам во временной области [4]. Показано, что в случае решения двумерной задачи распространения, когда система отверстий («атомов» – как элементов фотонно-кристаллической решетки) изготовлена в однородной бесконечной среде, пропускание ФКВ на частотах, лежащих внутри фотонной запрещенной зоны, примерно равно 100%, причем не зависит от длины волновода. Этот результат свидетельствует, что наличие одной или нескольких дефектных мод в запрещенной зоне позволяет передавать световое излучение соответствующих частот без рассеяния в плоскости, ортогональной осям отверстий. Замена четности начального поля относительно оси волновода приводит к трансформации спектра пропускания. При сопоставлении спектров пропускания с дисперсионными диаграммами можно провести идентификацию волноведущих мод на спектре пропускания. Отметим, что использование несимметричных конечных

разностей первого порядка при аппроксимации производных приводит к численному эффекту – взаимодействию мод различной четности и как следствие – появлению мини стоп-зоны. Указанный нежелательный численный эффект может быть устранен за счет увеличения пространственного разрешения сетки: числа узлов приходящихся на один период решетки Λ .

Рассмотрим зависимость пропускания прямых трехмерно-неоднородных ФКВ на основе трехслойника $\text{SiO}_2 - \text{Si} - \text{SiO}_2$ от длины волновода. Пять рядов отверстий по обеим сторонам волноводного канала можно считать минимальной толщины запирающего слоя, не влияющая на конечный результат пропускания всей системы. Волновод ориентировался в Γ -К направлении тригональной решетки с фактором заполнения примерно 50% (радиус отверстий $r = 0,375\Lambda$). Он представлял собой слой кремния 250 нм толщины в оболочке из симметричных слоев окиси кремния толщиной по 100 нм. Используя данные по пропусканию волноводов различной длины можно определить постоянные потери (коэффициенты затухания) волновода для различных длин волн λ . Для ФКВ в случае ТЕ поляризации наименьшие потери равны 107дБ/мм на частоте 0,33 (частота измеряется в безразмерных единицах Λ/λ). Достаточное высокие потери свидетельствуют о существенном вкладе резонансных вытекающих мод в суммарное пропускание. Это подтверждается расчетами потерь, вычисленных в системе $\text{SiO}_2 - \text{Si}$, окруженной воздухом с одной стороны и утолщенной подложкой из SiO_2 с другой, а также результатами экспериментов. Потери снижаются до 35 дБ/мм, что свидетельствует о неполной локализации полей в волноведущем слое (рис. 4). Дополнительным аргументом в пользу наличия вклада вытекающих мод в пропускание является тот факт, что учет только направляемых мод приводил бы к очень узким пикам в спектре пропускания, в то время как спектр занимает почти всю стоп-зону.

В случае волны ТМ-поляризации, коэффициенты потерь еще меньше, хотя для таких волн на данных частотах фотонной запрещенной зоны не существует. Эффект подтвержден экспериментальными данными. ТМ-моды, ответственные за пропускание лежат ниже валентной зоны - первого континуума мод, относящегося к мембране из фотонного кристалла в отсутствии дефектов. Небольшой систематический частотный сдвиг между теорией и экспериментом может быть объяснен недостаточным разрешением численной сетки (25 нм) для точного задания толщины оксидного слоя кремния после термооксидизации (экспериментальные данные дают около 40 нм).

Рассмотрим распространение света в так называемом Y-делителе излучения с малой областью ветвления каналов. Система включает в себя подводный диэлектрический волновод, прямой входной канал в ФК, область разделения, два отводящих канала с двумя 60° поворотами. Пропускание системы незначительно и не превышает 23 % (рис. 5). Оптимизация системы может идти с помощью привлечения резонансного или заворачивающего механизма направления.

Для проведения оптимизации был использован метод определения глобального максимума в многопараметрическом пространстве. Определялся набор параметров, влияющих на пропускание всей системы, например, радиус и положение дополнительного отверстия в области разделения пучков. Пропускание рассчитывалось методом разложения по собственным модам, что позволяет существенно уменьшить время счета при многократном повторении процедуры с измененными параметрами в ограниченной области. Были определены два варианта оптимизации, дающие наилучшие результаты для пропускания Y-делителя: первый, использующий резонансный механизм распространения, и второй с заворачивающим.

При двумерном анализе невозможно сделать выбор в пользу одного либо другого механизма, поскольку не учитывает один из основных источников потерь — рассеяния из плоскости слоев. При тестирования обеих конфигураций с помощью трехмерного FDTD метода, данные о пропускании позволяют принять однозначное решение в пользу направляющего механизма. При такой оптимизации общее пропускание на частотах вокруг искомого значения 0,39 возрастает с 23 % до 73 %, причем полоса пропускания значительно расширяется (рис.5).

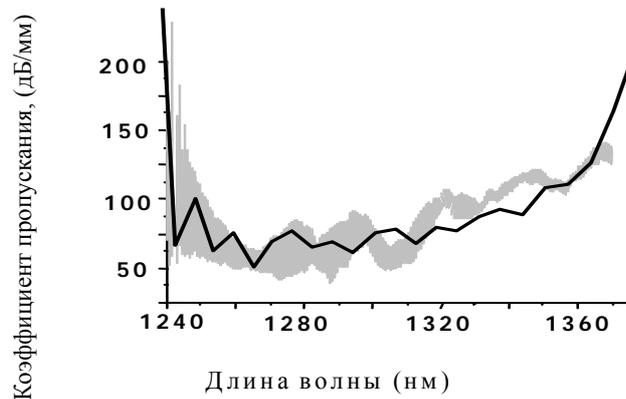


Рис. 4 - Коэффициент потерь прямого ФКВ для ТЕ поляризации (измеренные данные – серая линия, рассчитанные – черная), определенный по экспериментальным и расчетным данным.

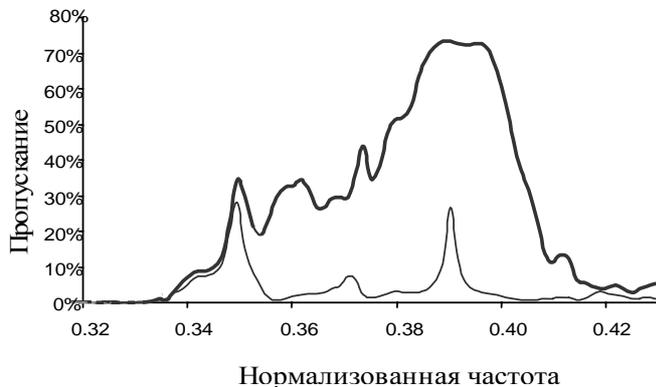


Рис.5 - Спектр пропускания Y-делителя с 60° поворотом в каждом из выходящих каналов. Тонкая линия – базовая система, толстая линия – система с направляющей оптимизацией.

В отличие от SOI (silicon-on-insulator) платформы, в которой имеется достаточный контраст показателей преломления, чтобы обеспечить локализацию света по вертикальной оси, GaAs-AlGaAs платформа относится к так называемым слабонаправляющим системам. Показатели преломления отдельных слоев многослойной структуры меняются в пределах 3,1–3,5. Поэтому потери на рассеяние из плоскости слоев могут быть большими. При FDTD моделировании таких ФКВ было показано, что волноводный режим возможен, однако пропускание системы оказывается весьма низким. Пропускание имеет весьма сильную зависимость от глубины травления отверстий. Для получения приемлемого пропускания в случае слабонаправляющих слоистых систем на GaAs-AlGaAs платформе, отверстия должны заглубляться в буферный слой примерно на 50% своей длины, обеспечивая достаточную глубину для сцепления полей направляемых мод с периодической решеткой атомов. Вместе с тем в системах на платформе на основе кремния заметной зависимости пропускания от глубины травления отверстий не наблюдается.

FDTD метод был использован для установления закономерностей пространственного разделения волн в ответвителе на связанных ФКВ. Каналы волноводов разделены одним рядом отверстий- атомов, через которые осуществляется связывание волн. В один из каналов инжектируется световая волна, второй канал заблокирован рядом отверстий. Интенсивность поля на выходе рассчитана, как для ТЕ-, так и для ТМ-поляризованных мод. Сравнение с экспериментом показывает качественное, а в случае прямого канала и достаточно хорошее количественное совпадение результатов (рис.6). Известно, что дисперсионные характеристики мод, направляемых за счет многократного рассеяния на периодической структуре плоские. Вместе с тем, пологость дисперсионных кривых свидетельствует о малой групповой скорости дефектных мод.

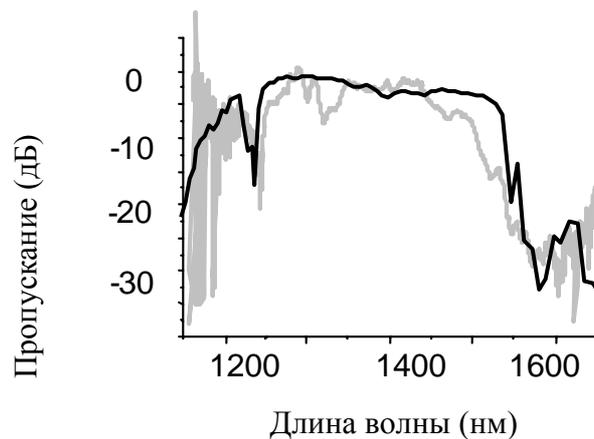


Рис. 6 - Спектр пропускания ТЕ-излучения системой из связанных ФКВ. Пропускание в прямом канале. Экспериментальные данные обозначены серой линией, теоретические – черной.

Вывод. В статье показано, что важнейшее свойство периодических сред образовывать зонально-щелевой спектр для электромагнитного излучения оптического диапазона позволяет создавать диэлектрические волноводы с высоким техническими характеристиками и, в частности, с весьма малыми радиусами поворота.

Список литературы

1. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика, - М.: Наука, 1981. – 432 с.
2. Лейбфрид Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. - М.: Физматиз. - 312 с.
3. Ярич А., Юх П. Оптические волны в кристаллах, - М. Мир, 1987. – 616 с.
4. A. Lavrinenko, et.al. Opt. Express, v.12, p. 234, 2004.

Діелектричні хвилеводи на основі фотонних кристалів. Лавріненко А.В., Лавріненко Ю.В.

Стаття присвячена процесу розповсюдження поляризованих світлових хвиль в регулярних фотонних кристалічних структурах та, окремо, в просторово - періодичних. Розглянуті поляризаційні характеристики кристалів, керуючих світловим потоком та підтверджені експериментом. Результати, отримані в цій роботі сприяють подальшому вивченню взаємодії хвиль з двоохмірними фотонними кристалами, котрі використовуються для розробки хвилеводних трактів з підвищеним рівнем оптичної інтеграції. **Ключові слова:** хвилевод, періодична структура, фотонний кристал.

Dielectric waveguides on the base of photonic crystal. Lavrinenko A.V, Lavrinenko Y.V.

The object of the paper is the processes of polarized light waves propagation in photonic crystal structures with regularly arranged elements, in particular in those with space periodicity. The polarization characteristics of photonic-crystal-based waveguides to control the light flow have been studied, and an agreement with an experiment has been obtained. The results obtained in this work can be implemented to study the interaction of waves with two-dimensional photonic crystals, which in turn will serve for developing waveguide contours with enhanced level of optical integration. **Keywords:** waveguide, periodical structures, photonic crystal.