

Поверхностные волны на границе фотонных кристаллов и туннельная связь двух фотонных кристаллов посредством этих волн

Б.А.Усиевич, В.В.Светиков, Д.Х.Нурлигареев, В.А.Сычугов

На базе структуры связанных волноводов $Nb_2O_5-SiO_2$ созданы одномерные фотонные кристаллы, на границе которых с воздухом реализуются поверхностные волны с $\lambda = 0.63$ мкм. Путем контакта через воздушный промежуток двух фотонно-кристаллических структур был реализован планарный волновод брэгговского типа с воздушной сердцевиной. В эксперименте измерены константы распространения симметричной и антисимметричной мод брэгговского волновода и оценена величина воздушного зазора волновода. Показано, что для реализации основных мод брэгговского волновода на базе использованных волноводных структур необходимо сдвинуть рабочую длину волны в красную сторону и повысить толщину воздушного зазора брэгговского волновода.

Ключевые слова: поверхностные волны, фотонные кристаллы, туннельная связь.

1. Введение

Ограниченные системы связанных волноводов привлекают в последние годы особое внимание, поскольку на границах раздела этих систем с однородными средами можно возбуждать поверхностные волны, которые являются удобным инструментом исследования поверхностных явлений и состояний на этих границах [1, 2]. Во многих отношениях такие волны подобны поверхностным волнам, возбуждаемым на границе диэлектрической среды и металла, но отличаются тем, что они могут иметь не только ТМ-, но и ТЕ-поляризацию, поскольку возникают на границе раздела диэлектрических сред. Основным сходством рассматриваемых поверхностных волн с таковыми на металле является спадающее проникновение этих волн в обе граничные среды: в однородную среду – чисто экспоненциальный спад поля волны, а в слоистую – осциллирующий спад с экспоненциально затухающей огибающей этих осцилляций поля. За счёт затухающего проникновения поля поверхностной волны в приграничную с плоскостью распространения волны диэлектрическую среду возможно создание такой геометрии структуры, в которой существовали бы две поверхностные волны, связанные между собой туннельной связью. Экспериментальному исследованию подобных волн, возбуждаемых на металлических поверхностях, посвящена работа [3]. В настоящей работе мы демонстрируем тот же эффект, но для поверхностных волн на границе двух одномерных фотонных кристаллов.

Б.А.Усиевич, В.В.Светиков, Д.Х.Нурлигареев, В.А.Сычугов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: borisu@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 23 апреля 2008 г., после доработки – 10 июля 2008 г.

2. Структура волноводов, образующая одномерный фотонный кристалл, и поверхностная волна на границе этой структуры и воздуха

В качестве структуры, несущей поверхностные волны, рассмотрена ограниченная система туннельно связанных волноводов, состоящая из 10 пар слоев $Nb_2O_5-SiO_2$ и лежащая на стеклянной подложке толщиной 1 мм с показателем преломления $n_s = 1.52$ (на длине волны излучения $\lambda = 0.63$ мкм). Система волноводов $Nb_2O_5-SiO_2$ была изготовлена на высоковакуумной установке ионно-лучевого нанесения диэлектрических слоев «Aspira150» [4]. Измеренный показатель преломления нанесённой пленки Nb_2O_5 на $\lambda = 0.63$ мкм составляет $n_1 = 2.27$, а пленки SiO_2 – $n_2 = 1.48$. Поскольку выбраны толщины слоев Nb_2O_5 и SiO_2 $h_1 = 110$ нм и $h_2 = 180$ нм, то образованные волноводы в пленке Nb_2O_5 на $\lambda = 0.63$ мкм одномодовы. На рис.1 показана зависимость эффектив-

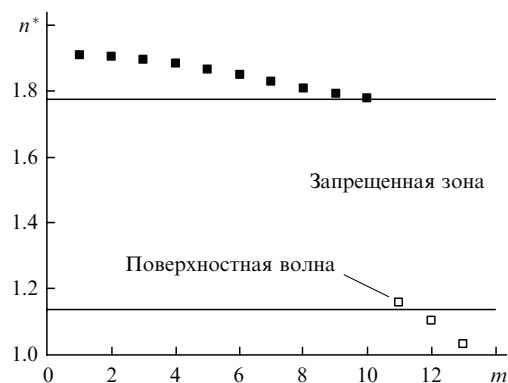


Рис.1. Зависимость эффективного показателя преломления мод структуры n^* связанных волноводов от номера m направляемых мод (■) и мод утечки (□); горизонтальными линиями показаны границы запрещенной зоны структуры.

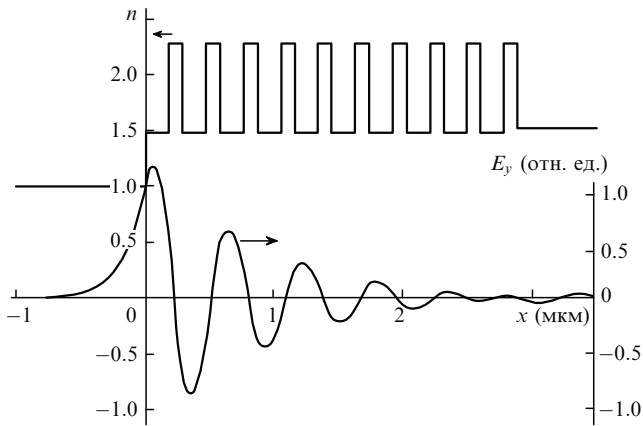


Рис.2. Распределение показателя преломления и электрического поля поверхностной моды структуры, граничащей с воздухом.

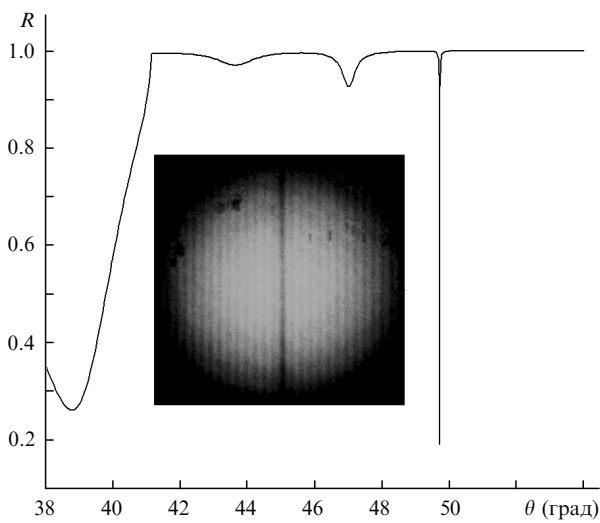


Рис.3. Угловая зависимость коэффициента отражения света R от основания призмы, используемой для возбуждения мод структуры волноводов; θ – угол падения света в подложке.

ных показателей преломления n^* мод ограниченной системы от номера моды в случае, если второй средой, прилегающей к ограниченной системе, является воздух. Представленная дисперсионная зависимость от номера моды характеризуется скачком n^* при переходе от 10-й к 11-й моде, т. е. наличием запрещенной зоны системы волноводов и расположением 11-й моды на краю этой зоны. Эта особенность 11-й моды системы волноводов позволяет говорить нам о ней как о поверхностной моде, возникающей в системе на границе с воздухом, что было подтверждено нами путем расчета пространственного распределения поля этой волны (рис.2) методом [5].

Для возбуждения поверхностной волны в исследуемой структуре нами применялась геометрия Кретчмана, для чего была использована стеклянная прямоугольная призма ($n = 1.52$), контактирующая с подложкой, на противоположной стороне которой нанесена система волноводов. Возбуждение поверхностной волны обусловлено её утечкой в подложку, чего оказалось вполне достаточно для обеспечения связи падающей волны (от He-Ne-лазера с $\lambda = 0.63$ мкм) с истекающим полем поверхностной волны (рис.3). На вставке к рис.3 видна также m-линия на экране, наличие которой свидетельствует о возбуждении поверхностной волны.

3. Туннельная связь двух фотонных кристаллов посредством поверхностных волн, возбужденных в них

В эксперименте по туннельной связи двух структур с поверхностными волнами были использованы две прямоугольные стеклянные призмы, на основаниях которых были расположены стеклянные подложки с нанесенными волноводными структурами. Воздушный зазор между волноводными структурами формировался путем напыления на одной из подложек буферных полосок металла необходимой толщины. Возбуждение поверхностной волны осуществлялось излучением ТЕ-поляризации He-Ne-лазера ($\lambda = 0.63$ мкм), фотодатчики ФД1 и ФД2 предназначались для регистрации отраженного и прошедшего лазерного излучения (рис.4). При большой толщине воздушного зазора ($h \approx 2$ мкм) фотодатчики регистрировали отраженное от основания призмы излучение (см. вставку на рис.3). Резонансный характер зависимости $R(\theta)$ на рис.3 свидетельствует о возбуждении поверхностной волны в структуре волноводов, нанесенной на находящуюся в контакте с возбуждающей призмой подложку. Отсутствие сигнала на фотодатчике ФД2 говорит

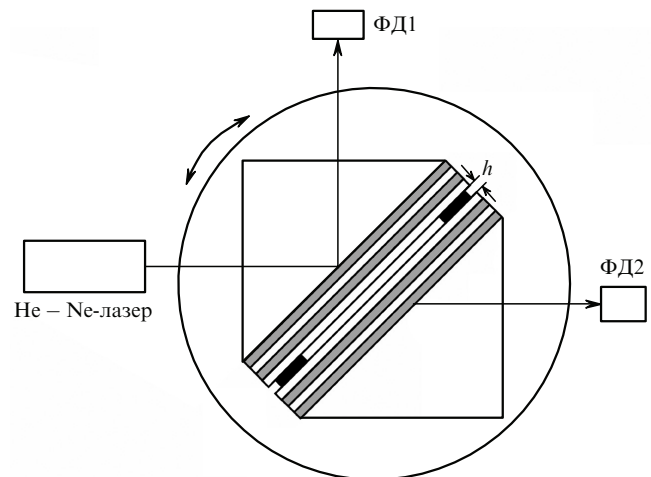


Рис.4. Оптическая схема эксперимента для наблюдения туннельной связи двух одномерных фотонных кристаллов.

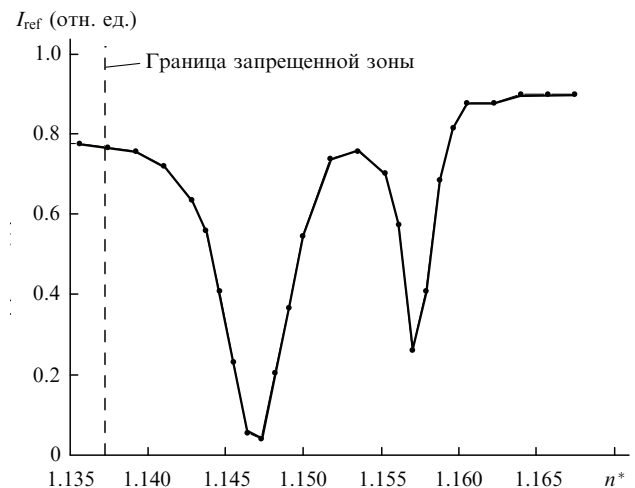


Рис.5. Зависимость интенсивности отраженного света при возбуждении моды в туннельно связанных фотонных кристаллах от эффективного показателя преломления.

о слишком большой толщине воздушного зазора между структурами. При уменьшении толщины воздушного зазора ($h < 1$ мкм) мы смогли зарегистрировать на фотодатчике ФД2 проходящий сквозь обе структуры сигнал. На рис.5 представлена экспериментально измеренная зависимость интенсивности отраженного от основания призмы излучения от эффективного показателя преломления. Последний однозначно связан с углом распространения света в призме ($n^* = n_p \sin \theta_p$, где n_p – показатель преломления призмы, а θ_p – угол между нормалью к поверхности и направлением пучка света в призме). Характерной особенностью этих сигналов является наличие двух пиков при различных углах возбуждающего света.

4. Интерпретация полученных результатов

Как уже упоминалось выше, в работе [3] была показана возможность туннельной связи между поверхностными волнами на близко расположенных тонких металлических плёнках. В рассматриваемом нами случае слоистая планарная структура образована близко расположенными идентичными фотонно-кристаллическими структурами, разделёнными небольшим воздушным зазором. Такая структура является брэгговским волноводом [6], передающим излучение по воздушному зазору или по слою среды, показатель преломления которой может быть ниже, чем у прилегающих к зазору волноводов. Такой брэгговский волновод имеет две поверхностные моды ТЕ-поляризации. Эти моды распространяются внутри воздушного зазора и имеют максимум поля вблизи поверхности раздела фотонного кристалла с воздухом. Распределение поля в них различается: одна мода имеет симметричное распределение электрической составляющей поля, другая – антисимметричное. Следовательно, и постоянные распространения этих мод различные. Рассчитанные нами дисперсионные зависимости этих мод от толщины воздушного зазора представлены на рис.6. Существование указанных двух мод в рассматриваемой сложной структуре приводит к наблюдаемому эффекту прозрачности в области углов полного внутреннего отражения. Поскольку постоянные распространения мод различаются, то различаются и углы, при которых возникает прозрачность структуры. Это «раздвоение» сигнала является свидетельством туннельной связи двух исследованных поверхностных структур. Зна-

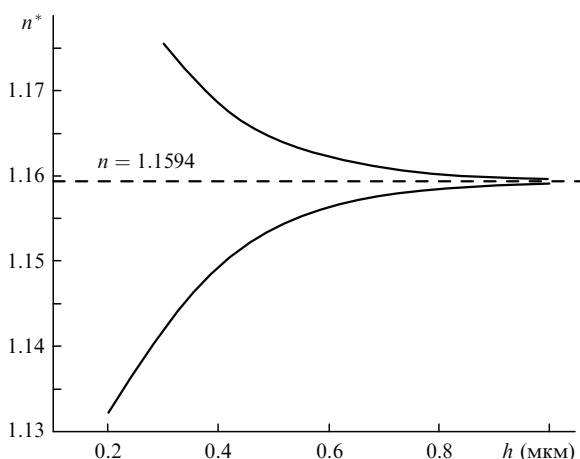


Рис.6. Расчетные дисперсионные зависимости симметричной и антисимметричной мод от толщины воздушного зазора.

чения эффективных показателей преломления, полученные в эксперименте, нельзя непосредственно сопоставить с расчетными, поскольку реальные параметры структуры (показатели преломления, толщины) могут слегка отличаться от проектных. Однако по расстоянию между экспериментальными провалами из расчетных данных можно оценить реальную толщину воздушного зазора. Расстояние в 0.010 по шкале эффективного показателя преломления соответствует зазору 0.51 мкм, что хорошо согласуется с проектной толщиной металлических полосок 0.5 мкм.

Дисперсионные зависимости, представленные на рис.6, свидетельствуют о зависимости параметров мод от толщины зазора. Наибольшая чувствительность постоянных распространения соответствует меньшим зазорам. Рассмотрение планарного волновода, образованного двумя одномерными фотонными кристаллами, на поверхности которых на границе с воздухом локализируются электромагнитные волны и которые разделены воздушным промежутком конечных размеров $h \approx 0.1 - 1$ мкм, обнаруживает возникновение брэгговского волновода с воздушной сердцевиной, поддерживающего две моды этого волновода: симметричного и антисимметричного типов. Эти моды характеризуются значительным проникновением в периодические среды, обрамляющие исследуемый брэгговский волновод. Однако, как известно [7], брэгговскому волноводу с воздушной сердцевиной свойственны фундаментальные моды с низкими потерями и малыми значениями эффективных показателей преломления ($n^* < 1$). Расчеты n^* основной моды волновода с обрамляющими средами, изготовленными для возбуждения поверхностных волн на основе 10 пар волноводов $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ с толщинами $h_1 = 110$ нм (Nb_2O_5) и $h_2 = 180$ нм (SiO_2), выявили, что данный слоистый волновод в окрестности $\lambda = 0.63$ мкм не имеет основной моды, т. е. эта длина волны не лежит в запрещенной зоне рассмотренной структуры. Таким образом, получить с помощью двух структур, имеющих поверхностные моды с $n^* > 1$ и разделенных воздушным промежутком, брэгговский волновод, который поддерживает основную моду с $n^* < 1$ при $\lambda = 0.63$ мкм, оказалось невозможным.

Чтобы проследить взаимосвязь основных мод брэгговского волновода, образованного имеющимися структурами, и воздушного промежутка между ними, мы увеличили длину волны света до $\lambda = 0.73$ мкм. Расчеты, проведенные на базе результатов работы [5], показали, что при $\lambda = 0.73$ мкм возможно образование брэгговского волновода с воздушным промежутком $h = 2$ мкм. На рис.7 представлено распределение электрических полей основных мод и ближайших к ним мод ТЕ-типа. Как и следовало ожидать, наименьшая мода брэгговского волновода с воздушной сердцевиной имеет эффективный показатель преломления $n^* = 0.977$, а мода второго порядка имеет $n^* = 0.92$. Моды, возникшие на основе бывших поверхностных мод планарных структур, имеют $n^* = 1.0544$ и 1.0538 , т. е. $n^* > 1$. Для данной структуры потери мод, возникших на базе поверхностных волн, и потери основной моды брэгговского волновода близки.

В случае волоконных световодов с воздушной сердцевиной в качестве прилегающей к сердцевине среды обычно используют пористые среды – структурированные (ячеистые) среды, порождающие на границе сердцевины поверхностные моды, спектр которых близок к спектру

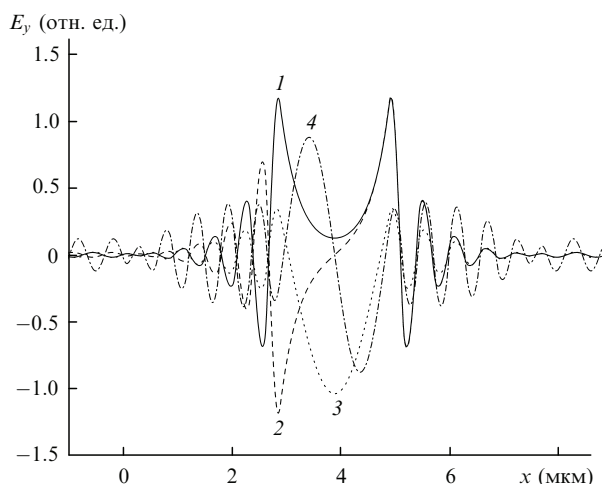


Рис. 7. Распределение электрических полей мод в воздушном зазоре между двумя одномерными кристаллами: симметричная (1) и антисимметричная (2) моды брэгговского волновода, образовавшиеся из поверхностных мод, а также основная мода (3) и мода второго порядка (4) брэгговского волновода.

основной моды волновода. Такая близость приводит к дополнительным потерям света в волокнах на основной моде, достигающим 13 дБ/км [8]. Поэтому решение проблемы проектирования обрамляющей среды фотонно-кристаллического волокна с воздушной сердцевиной имеет практическое значение.

5. Выводы

Изучение туннельной связи двух одномерных фотонных кристаллов, на поверхности которых могут существовать поверхностные электромагнитные моды, показало, что такие волноводные структуры могут образовывать брэгговский волновод с воздушной сердцевиной. Основной модой такой структуры на частоте поверхностных волн является симметричная мода с эффективным показателем преломления $n^* > 1$. Для реализации брэгговского волновода, имеющего основную моду с $n^* < 1$, на базе имеющихся поверхностных структур необходимо сдвинуть диапазон рабочих длин волн в сторону больших значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-02-00064).

1. Усиевич Б.А., Светиков В.В., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А. *Квантовая электроника*, **37** (10), 981 (2007).
2. Koporsky V.N., Alieva E.V. *Anal. Chem.*, **79** (12), 4729 (2007).
3. Лындин Н.М., Светиков В.В., Сычугов В.А., Усиевич Б.А., Яковлев В.А. *Квантовая электроника*, **28** (3), 262 (1999).
4. www.izovac.com
5. Yeh P., Yariv A., Hong C.-S. *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (4), 423 (1977).
6. Pile D.F.P. *Appl. Opt.*, **44** (20), 4398 (2005).
7. DeCorby R.G., Ponnampalam N., Nguyen H.T., Pai M.M., Clement T.J. *Opt. Express*, **15**, 3902 (2007).
8. West J., Smith C., Borrelli N., Allan D., Koch K. *Opt. Express*, **12**, 1485 (2004).