

Моды системы связанных волноводов, лежащие в ее запрещенной зоне

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

Изучена система волноводов, состоящая из 10 пар слоев $Nb_2O_5-SiO_2$ и поддерживающая поверхностную волну на длине волны 0.63 мкм. Нанесение дополнительного слоя Nb_2O_5 поверх исходной структуры позволяет значительно увеличить интенсивность поля волны на границе структуры. Показано, что эффективность возбуждения поверхностной волны в схеме Кречмана может быть оптимизирована путем правильного выбора числа пар слоев структуры. Исследована трансформация брэгговской моды при изменении толщины слоя, прилегающего к воздуху, и ее переход из второй разрешенной зоны в первую через запрещенную зону системы. При этом обычная мода утечки трансформируется в поверхностную, а затем в направляемую моду.

Ключевые слова: поверхностные волны, периодическая система волноводов, константа распространения.

1. Введение

В настоящее время ограниченная система связанных волноводов широко используется для различных целей. Периодические системы волноводов могут рассматриваться как одномерные фотонные кристаллы [1, 2]; так, эти системы характеризуются разрешенными зонами, где возможно распространение мод, и запрещенными зонами, в которых константы распространения мод отсутствуют. Однако такое строгое разделение зон справедливо только для неограниченной системы волноводов. Для ограниченной системы разделение зон нарушается, и в запрещенной зоне могут появляться моды утечки и даже направляемые моды. Первые могут иметь максимум распределения поля вблизи границы системы и огибающую поля, экспоненциально спадающую в глубь системы. Такие моды обычно называют поверхностными модами (поверхностными волнами), и они могут использоваться для сенсорных приложений в схеме возбуждения Кречмана [3].

Рассмотрим детально систему волноводов, нанесенных на стеклянную подложку с показателем преломления $n_s = 1.52$ и состоящую из 10 пар слоев $Nb_2O_5-SiO_2$ с толщинами $h_{Nb_2O_5} = 110$ нм, $h_{SiO_2} = 180$ нм и показателями преломления $n_{Nb_2O_5} = 2.27$, $n_{SiO_2} = 1.48$. Согласно нашим расчетам, эта система поддерживает поверхностную моду на границе с воздухом на длине волны 0.63 мкм с эффективным показателем преломления $n^* = 1.159$. Это значение находится внутри запрещенной зоны, границы которой для данной структуры составляют 1.13735 и 1.77325. Поверхностная ТЕ-мода может быть возбуждена в структуре волноводов He-Ne-лазером ($\lambda = 0.63$ мкм) посредством ввода света через подложку, что было продемонстрировано в эксперименте [2].

Б.А.Усиевич, Д.Х.Нурлигареев, В.В.Светиков, 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 14 ноября 2008 г., после доработки – 5 марта 2009 г.

При использовании поверхностной волны в сенсорных устройствах возникает ряд задач, которые мы наедемся здесь решить. Это оптимальное возбуждение поверхностной волны в структуре; максимизация поля на границе раздела сред, где волна локализуется; определение механизма появления в системе волноводов поверхностной волны на границе раздела с воздухом. Для решения последней задачи мы будем использовать представление о брэгговских модах системы [4]. Брэгговскими модами мы называем моды с номерами N и $N + 1$ (N – число волноводов, образующих систему), эффективный показатель преломления которых для рассмотренной ранее симметричной системы волноводов лежит в разрешенных зонах вблизи границы запрещенной зоны. Мы назвали их брэгговскими, поскольку они возбуждаются с торца волноводной системы под углом Брэгга.

2. Поле на границе раздела сред

Поскольку наша исходная система, состоящая из 10 пар слоев $Nb_2O_5-SiO_2$, уже поддерживает поверхностную волну, начнем с решения второй задачи. Увеличить поле в поверхностной волне на границе раздела сред можно путем нанесения дополнительного слоя Nb_2O_5 небольшой толщины (до 50 нм) поверх исходных 10 пар слоев. Расчет параметров поверхностной волны мы провели, основываясь на результатах работы [5], в которой изложен метод расчета спектра и излучательных потерь вытекающих мод многослойных оптических волноводов. В основе метода лежат две идеи: замена традиционно используемого метода матрицы передачи (ТММ) точным методом конечных разностей (EFDM) и использование нового приближенного способа вычисления коэффициента затухания вытекающих мод, асимптотически стремящегося к точному при уменьшении затухания. Этот метод расчета мод утечки может быть успешно применен, поскольку поверхностная мода является модой утечки системы связанных волноводов [6].

Примером предложенного в [5] метода расчета является приведенная на рис.1 зависимость коэффициента затухания α вытекающей волны для системы волново-

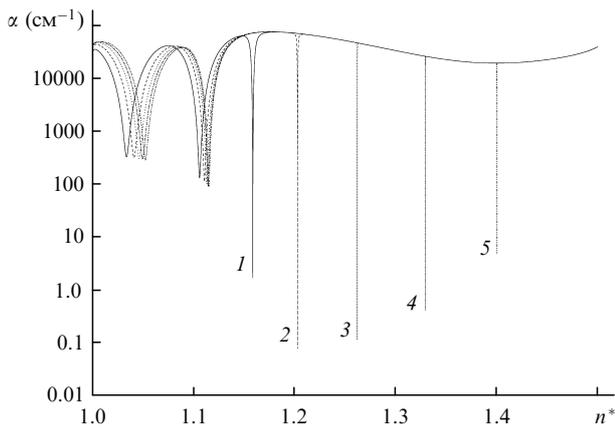


Рис.1. Зависимости коэффициента оптических потерь от эффективного показателя преломления n^* мод системы волноводов $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ с нанесенным слоем Nb_2O_5 толщиной h при $h = 0$ (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4) и 40 нм (5).

дов, состоящей из 10 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 + 1$ слой Nb_2O_5 толщиной $h = 0, 10, 20, 30$ и 40 нм, от эффективного показателя преломления моды n^* . Минимумы на этой зависимости отвечают модам утечки системы. На каждой кривой, соответствующей своей толщине h , видны три провала, каждый из которых соответствует моде утечки, но только одна из них является поверхностной модой. Ширина провала в зависимости $\alpha(n^*)$ для поверхностной моды существенно меньше его ширины для обычных мод утечки. Увеличение толщины дополнительного слоя h приводит к небольшому изменению параметров обычных мод утечки, тогда как эффективный

показатель преломления поверхностной моды значительно растет, а ширина резонанса и, следовательно, излучательные потери сильно уменьшаются.

На рис.2 показаны распределения полей двух брэгговских мод, одна из которых является поверхностной, для исходной системы волноводов (10 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$), и поверхностной волны для той же системы волноводов с дополнительным слоем Nb_2O_5 толщиной 30 нм. Видно, что при нанесении слоя Nb_2O_5 имеет место 50%-ное увеличение амплитуды поля поверхностной волны.

3. Условия оптимального возбуждения поверхностной волны в системе волноводов

Дальнейшая оптимизация толщины пленки Nb_2O_5 в значительной мере зависит от величины диссипативных потерь и потерь на излучение поверхностной волны в структуре волноводов. Соотношение этих потерь определяет также условия оптимального возбуждения поверхностной волны в схеме Кречмана. В соответствии с этой схемой поверхностная волна возбуждается внешней волной, входящей при помощи высокопреломляющей призмы в систему волноводов через стеклянную подложку, на которую нанесена структура диэлектрических слоев. Поскольку поверхностная волна является модой утечки, то при ее распространении по этой структуре происходит утечка света в подложку. Вследствие обратимости данного явления поверхностная волна может также возбуждаться объемной волной, падающей из подложки под соответствующим углом. Скорость вытекания и эффективность возбуждения определяются коэффициентом излучательных потерь моды, зависящим от числа пар N слоев структуры и от положения эффективного показателя преломления в запрещенной зоне структуры.

Как известно, минимальная глубина проникновения поля в периодическую структуру соответствует середине запрещенной зоны структуры волноводов, и поэтому при смещении положения n_{sur}^* к краю запрещенной зоны увеличивается утечка поля поверхностной волны в подложку и растет связь падающей волны возбуждения с поверхностной волной. Также известно, что, изменяя количество пар волноводов структуры, можно достигнуть эффективного возбуждения волны в структуре по схеме Кречмана [7]. Однако авторы этой работы не объясняют, почему использованное конкретное число пар оптимально для возбуждения. Согласно нашим оценкам, оптимальное возбуждение достигается тогда, когда (аналогично случаю поляритонов [8]) потери возбуждаемой моды на утечку в подложку примерно равны ее потерям на поглощение и рассеяние в структуре.

Оценить эффективность возбуждения поверхностной волны в структуре волноводов можно по коэффициенту отражения R падающей волны от основания призмы ввода в зависимости от числа пар N слоев структуры. В условиях оптимального возбуждения глубина провала $R(N)$ максимальна. На рис.3 представлена подобная зависимость $R(N)$ для структуры $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ при значениях мнимой части диэлектрической проницаемости пленок Nb_2O_5 и SiO_2 , равных 7×10^{-4} и 10^{-4} соответственно. Надо отметить, что хотя выбранные значения ϵ'' могут показаться слишком большими, но потери в тонких пленках могут значительно превышать потери в объемных образцах, в том числе и из-за потерь на рассеяние. Из

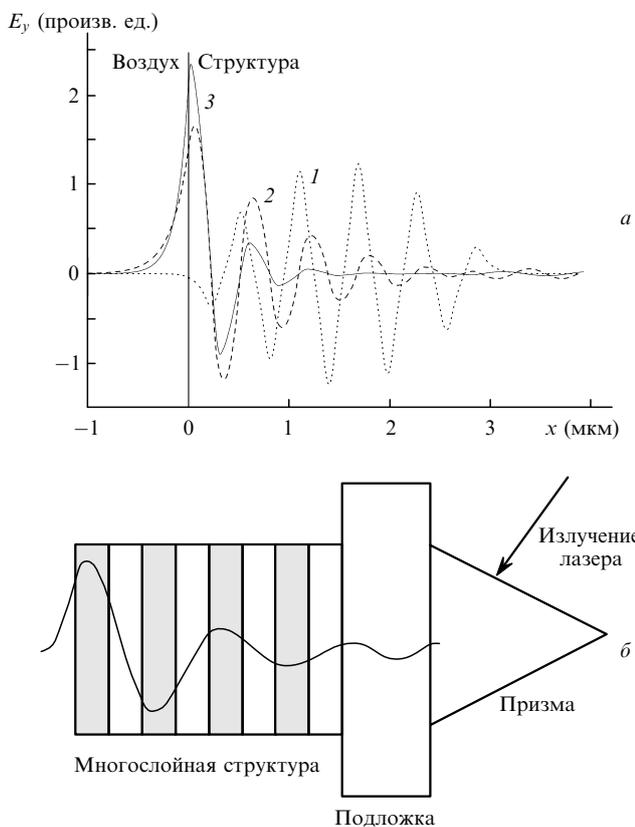


Рис.2. Распределение полей мод в исходной системе (1, 2) и в системе волноводов с напыленным слоем Nb_2O_5 толщиной 30 нм (3) (а) и схема возбуждения поверхностной волны по методу Кречмана (б).

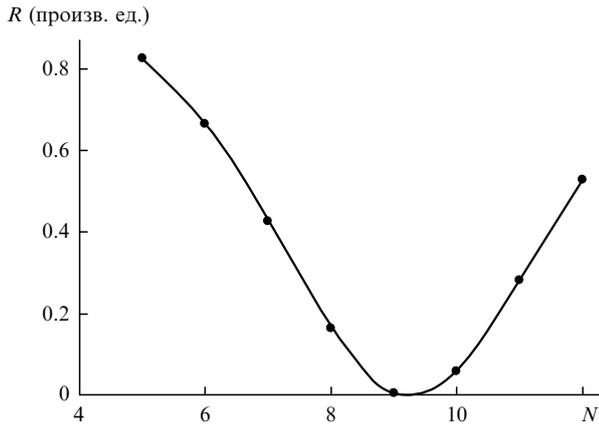


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения падающей волны в схеме Кречмана от числа пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$, составляющих структуру.

рис.3 видно, что структура из 10 пар слоев неоптимальна для заданного уровня потерь и что для достижения максимальной эффективности возбуждения поверхностной волны на границе с воздухом необходимо уменьшить число пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ до 9.

Нанесение дополнительного слоя Nb_2O_5 толщиной 30 нм поверх 9 пар слоев при указанных выше значениях ε'' в пленках не позволяет обеспечить оптимальные условия возбуждения в структуре поверхностной моды, поскольку изменяются излучательные потери поверхностной волны и требуется повторная оптимизация числа пар слоев. Согласно проведенным расчетам оказалось, что оптимальное число пар $N = 4$, и при этом $n_{\text{sur}}^* = 1.33$. При изменении числа пар амплитуда поля на границе структуры с воздухом остается увеличенной, поскольку она зависит только от слоев, прилегающих к поверхности.

4. О брэгговских модах в системе волноводов с поверхностной волной на ее границе с воздухом

Как уже отмечалось ранее [4], ограниченная система волноводов в спектре мод имеет две брэгговские моды. Распределения полей брэгговских мод в исходной структуре показаны на рис.2. Одна из этих мод является направляемой, а другая, с низким эффективным показателем преломления, – модой утечки. Последняя имеет большую амплитуду поля на границе раздела с воздухом и потому называется поверхностной модой системы волноводов. Представленное на рис.2 распределение брэгговских мод системы обусловлено тем, что исходная система волноводов (10 пар слоев) образована одномодовыми волноводами и число направляемых мод системы совпадает с числом волноводов N , образующих эту систему. Таким образом, порядок первой брэгговской моды равен N , и она является последней модой в первой разрешенной зоне, а порядок второй равен $N + 1$, и она является первой модой во второй разрешенной зоне. Как следует из рис.3, поверхностная мода может существовать при различном числе пар слоев, образующих структуру, но эффективность ее возбуждения по схеме Кречмана зависит от этого числа. Для понимания процесса появления поверхностной моды рассмотрим изменение ее эффективного показателя преломления и распределения поля при изменении толщин слоев, образующих приле-

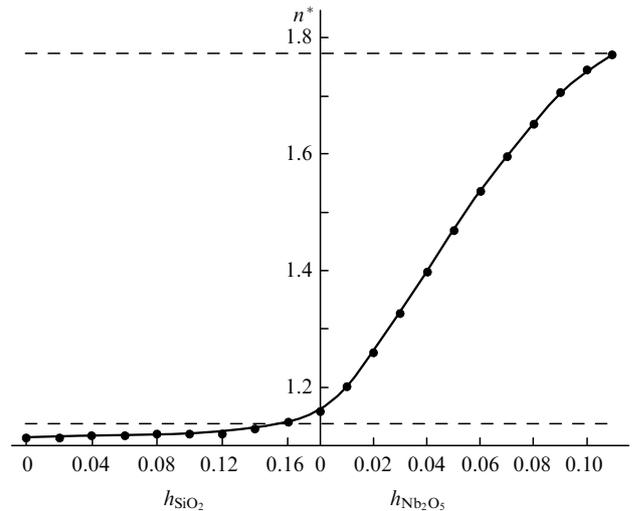


Рис.4. Изменение эффективного показателя преломления n^* моды с $m = 11$ при вариации толщин финишной пары слоев. Штриховыми линиями обозначены границы запрещенной зоны.

гающую к поверхности ячейку системы, в которой, как мы уже знаем, поверхностная волна существует.

При изменении толщины финишного слоя SiO_2 распределение поля этой брэгговской моды значительно меняется. С уменьшением толщины слоя h_{SiO_2} она трансформируется из поверхностной в обычную вытекающую моду системы (у нее пропадает выраженный максимум поля на границе); при этом ее эффективный показатель преломления также уменьшается (рис.4), и при $h_{\text{SiO}_2} = 0$ мы приходим к структуре волноводов, состоящей из 9 пар слоев и одного слоя Nb_2O_5 толщиной $h = 110$ нм, в которой поверхностной волны нет.

На рис.4 показана также зависимость $n^*(h_{\text{Nb}_2\text{O}_5})$ для 11-й моды системы, состоящей из 10 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ и пленки Nb_2O_5 различной толщины. Как уже отмечалось, при нанесении на структуру пленки Nb_2O_5 толщиной 30 нм поле поверхностной волны на границе воздух – система значительно увеличивается. Дальнейший рост толщины пленки Nb_2O_5 приводит к еще большему ослаблению утечки и к трансформации моды при $h_{\text{Nb}_2\text{O}_5} = 110$ нм в направляемую моду системы с $n^* = 1.7723$, что близко к верхнему краю запрещенной зоны (1.7735). Таким образом, с увеличением толщины допол-

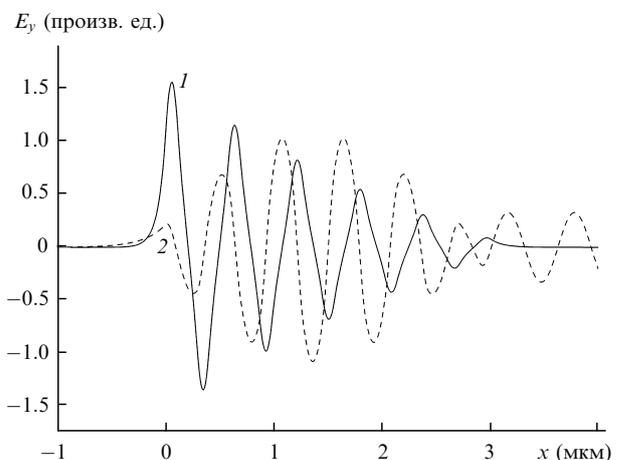


Рис.5. Распределение полей брэгговских мод структуры, состоящей из 10 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ с толщинами 110 и 180 нм и одного слоя Nb_2O_5 толщиной 110 нм, для мод с $m = 11$ (1) и 12 (2).

нительного слоя эта мода становится первой брэгговской модой системы. При этом мода системы с номером $m = 12$ и эффективным показателем преломления $n_{12}^* = 1.119$, находящимся во второй разрешенной зоне системы волноводов, является второй брэгговской модой (рис.5).

Таким образом, при увеличении общей толщины структуры путем добавления слоев SiO_2 и Nb_2O_5 эффективный показатель преломления брэгговской моды из второй разрешенной зоны растет и мода попадает в запрещенную зону, становясь поверхностной модой. Дальнейшее увеличение толщины структуры приводит к превращению этой моды в направляемую моду. Довольно необычно то, что последняя тоже имеет выраженный максимум поля вблизи границы структуры, т. е. фактически является поверхностной, хотя и не может быть при этом возбуждена по схеме Кречмана.

5. Заключение

Анализ структуры связанных волноводов показал, что для создания структуры, на которой реализуется поверхностная волна, необходимо правильно выбрать пару диэлектрических слоев (с большой разностью показателей преломления), определить толщины волновод-

ных слоев, отвечающие однододовости волновода, и толщину промежутка, обеспечивающую число направляемых мод системы, равное числу волноводов. Если необходимо увеличить поле волны на границе раздела сред, к системе волноводов можно добавить финишный слой пленки с высоким показателем преломления. Затем следует провести оптимизацию числа пар слоев структуры, основываясь на конкретных потерях в пленках, составляющих структуру. Реализованная таким образом поверхностная волна на границе раздела одномерного фотонного кристалла будет вполне приемлемым инструментом исследования осаждаемых неизвестных новых слоев, в том числе биослоев. Авторы работы благодарят РФФИ за финансовую поддержку (грант № 02-07-00064).

1. Robertson W.M., May M.S. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1800 (1999).
2. Усиевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Светиков В.В., Сычугов В.А. *Оптика и спектроскопия*, **106**, 641 (2008).
3. Kretchman E.Z. *Physik*, **241**, 313 (1971).
4. Усиевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Голант К.М. *Квантовая электроника*, **35**, 554 (2005).
5. Голант Е.И., Голант К.М. *ЖТФ*, **76**, 99 (2006).
6. Усиевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Голант К.М. *Квантовая электроника*, **37**, 981 (2007).
7. Ramires-Duvarger A.S., Gaspar-Armenta J., Garsia-Llamas R. *Opt. Commun.*, **227**, 302 (2007).
8. Chen W.P., Chen J.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **71**, 189 (1981).