

Поверхностные волны на границе системы связанных волноводов

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

Проведен анализ экспериментальных исследований поверхностных волн, существующих на границе раздела однородной среды с периодически стратифицированной средой, представляющей собой ограниченную систему связанных волноводов. Установлено, что во всех случаях наблюдения поверхностных волн ограниченная система волноводов обладает своим, присущим ей спектром направляемых мод, а также спектром мод утечки, которые становятся поверхностными волнами системы. Показано, что при использовании двух поверхностных волн в схеме биосенсора они должны быть реализованы в виде мод утечки брэгговского волновода, в котором периодическая система волноводов использовалась как распределенное брэгговское зеркало этого волновода. Отмечена возможность применения призматического способа возбуждения поверхностных волн в сенсорах, где эти волны используются в качестве детектирующего средства.

Ключевые слова: поверхностные волны, связанные оптические волноводы, биосенсоры.

1. Введение

Система связанных волноводов называется однородной, если она образована эквидистантно расположенными одинаковыми волноводами, постоянная распространения в которых не зависит от продольных и поперечных координат. Простейшим примером такой системы волноводов служит решетка канальных волноводов, сформированных в планарной пленке, лежащей на подложке с меньшим показателем преломления. В последнее время системы канально-волноводного типа приобретают особый интерес в лазерной оптике в связи с возможностями увеличения с их помощью выходной мощности [1]. Процесс распространения света в однородных системах связанных волноводов изучался ранее в работах [2, 3].

В работе [2] отмечалось, что в ограниченной системе волноводов наряду с зонами распространения света возникают и запрещенные зоны, где свет не распространяется. В случае одномодовых волноводов зоны распространения света в них подразделяются на зоны распространения направляемых мод и зоны распространения волн утечки. Кроме того, было показано, что каждая ограниченная система волноводов имеет две брэгговских моды, которые возникают на границах запрещенной зоны, причем распределение поля в этих модах различно и зависит от того края зоны, к которому они примыкают. В частности, отмечалось, что брэгговские моды в ограниченной системе волноводов могут представлять особый интерес для улучшения направленности лазерного излучения [2].

В работе [4] по сути дела было показано, что появление брэгговских мод системы волноводов является следствием нарушения ее однородности, которая возникает в результате краевых эффектов. В [5, 6] было продемонстри-

ровано, что нарушение однородности системы связанных волноводов порождает поверхностные волны на границах этой системы, которые могут иметь большое практическое значение. В связи с этим в настоящей работе мы предприняли попытку обсудить свойства этих «новых» поверхностных волн и условия их возникновения. Новизна таких структур для сенсорных применений состоит в том, что возможна их работа с ТЕ-поляризованными волнами в среде с малыми потерями, в то время как ранее использовавшиеся плазмоны могут существовать только в условиях ТМ-поляризации и влияние на них потерь в металле было неизбежным.

2. Модовый состав системы связанных волноводов, поддерживающей поверхностные волны

Первые наблюдения поверхностных волн в системе связанных волноводов были проведены в 1978 г. в работе [7]. Периодическая структура в [7] была получена методом молекулярной эпитаксии на подложке из GaAs путем роста 12 пар чередующихся слоев GaAs (толщиной $h = 0.5$ мкм) и слоев $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ ($h = 0.5$ мкм). Поверхностная волна с длиной $\lambda = 1.15$ мкм регистрировалась на поверхности образца с периодом слоев $L = 1$ мкм при торцевом возбуждении его с помощью микробъектива. При длине образца 15 мм из четырех рассчитанных мод поверхностной волны наблюдалась только основная мода. Отметим, что нарушение однородности системы волноводов проявлялось в резком обрыве ее со стороны воздуха, тогда как со стороны GaAs-подложки имело место слабое отличие усредненного показателя преломления среды от показателя преломления подложки.

В 1983 г. в работе [8] в многослойной периодической структуре волноводов, сделанных из слоев сульфида цинка (с показателем преломления $n = 2.37$) и криолита ($n = 1.34$) толщиной $h = 0.4 - 0.6$ мкм, наблюдались поверхностные волны оптического диапазона ($\lambda = 0.63$ мкм).

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

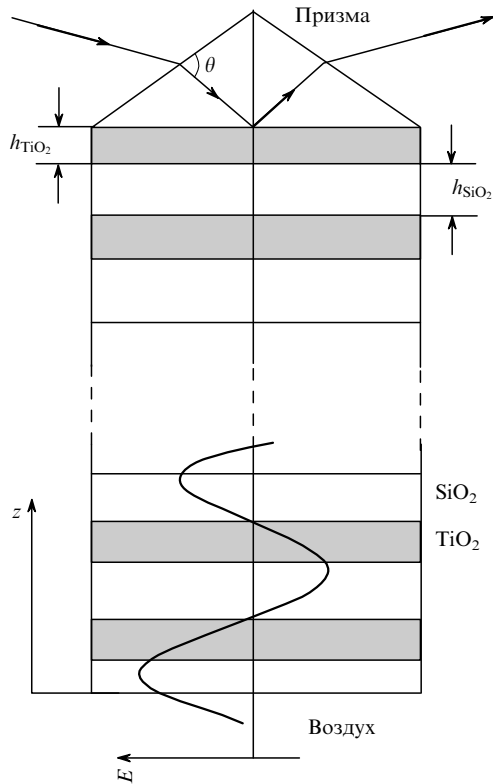


Рис.1. Схема образца с волноводной структурой при возбуждении поверхностной волны на границе этой структуры с воздухом (E – напряженность электрического поля).

В недавней работе [6] был продемонстрирован макет сенсорного устройства на основе поверхностных волн, сделанного на базе волноводной структуры TiO_2-SiO_2 , нанесенной на стеклянную призму и состоящей из 13 пар чередующихся слоев двуокиси титана ($h = 117.3$ нм) и двуокиси кремния ($h = 182.4$ нм), а также из финишной пары слоев TiO_2 толщиной 117.3 нм и SiO_2 толщиной 156.5 нм. В этой работе нарушение однородности системы волноводов проявлялось не только в резком обрыве слоистой структуры со стороны воздуха, но и в изменении толщины финишной пары слоев. Поскольку нарушение однородности этой системы волноводов имеет наиболее общий характер, рассмотрим более детально ее модовый состав.

На рис.1 показана схема сенсорного устройства, исследованного в [6]. Возбуждение поверхностной волны на границе раздела воздуха с финишным слоем SiO_2 осуществлялось по известной схеме Кретчмана через призму, на которую наносилась волноводная структура. Предварительно методом, аналогичным изложенному в работе [9], нами была рассчитана зависимость эффективных показателей преломления n^* от номера моды m в этой системе волноводов для $\lambda = 0.63$ мкм. В силу одномодовости волноводов число M направляемых мод оказалось равным числу волноводов N : $M = N = 14$.

На рис.2 представлена зависимость $n^*(m)$ для всех мод системы. Направляемые моды системы располагаются на рис.2 до скачка, т.е. до первой запрещенной зоны. Вслед за ней на дисперсионной зависимости $n^*(m)$ располагаются моды утечки системы, среди которых только четыре имеют эффективные показатели преломления больше единицы. Моды утечки с $n^* < 1$ вытекают в воздух, и поэтому нами не рассматриваются. Эффектив-

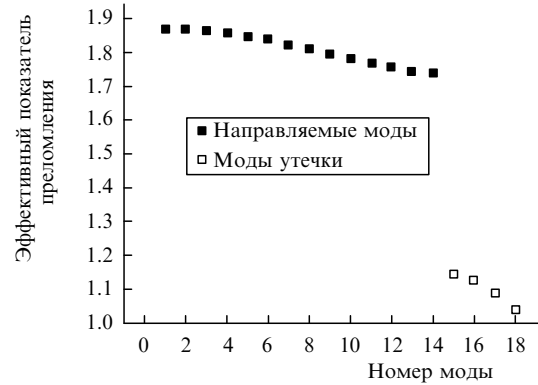


Рис.2. Дисперсионная зависимость эффективного показателя преломления n^* от номера моды m волноводной структуры [6].

ный показатель преломления поверхностной волны определялся путем расчета [10] зависимости от угла падения θ коэффициента отражения света от основания призмы (см. рис.1), используемой для возбуждения волноводных мод в системе волноводов ($n_{pr} = 1.518$), и поиска провалов в этой зависимости. Оказалось, что $n^* = 1.1436$, т.е. оно располагается во второй разрешенной зоне системы волноводов, и по сути возбуждаемая мода является обычной модой утечки, а не поверхностной модой. Расчитанное распределение поля этой моды показано на рис.3, из которого видно, что максимум поля достигается в финишном слое SiO_2 . Поле волны в воздухе, т.е. в прилегающей к слою SiO_2 среде, тоже достаточно велико, и эта волна может быть использована для обнаружения тонких покрытий на поверхности финишного слоя SiO_2 , как это и было сделано в работе [6].

Следует, однако, отметить, что использование волноводной структуры, состоящей из 14 пар слоев TiO_2-SiO_2 с указанными ранее толщинами, позволяет сенсору работать на реальной поверхностной волне с $n^* = 1.15906$. Однако поперечный резонанс становится существенно уже из-за экспоненциального затухания поверхностной волны при удалении ее от поверхности и обусловленной этим слабой связи ее с волной, падающей из призмы.

В работе [11], доложенной на конференции ICONO/LAT-2007 (Минск, июнь 2007 г.), описан биосенсор, работающий на поверхностных волнах, распространяющихся по одномерному фотонному кристаллу. Поверхностные волны в структуре волноводов возбуждались излучением с $\lambda = 532$ нм по схеме Кретчмана с использованием призмы из стекла К8. Волноводная система наносилась на стеклянную подложку, сделанную также из стекла К8. В качестве начального слоя на подложку наносился слой SiO_2 толщиной 154 нм, а в качестве первого

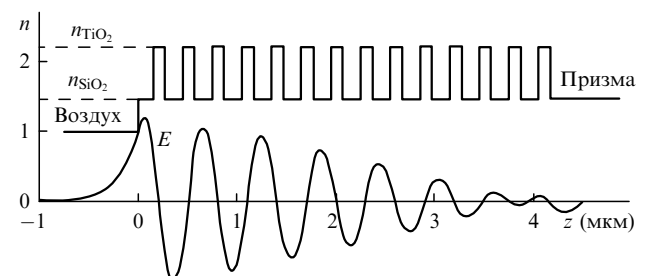


Рис.3. Распределение поля моды E с $m = 15$ в структуре, приведенной в [6].

волноводного слоя использовался слой Ta₂O₅ толщиной 89.4 нм с показателем преломления $n = 2.12$ ($\lambda = 532$ нм). Структура волноводов состояла из трех пар слоев SiO₂–Ta₂O₅ и финишного слоя SiO₂ толщиной 638.5 нм, на поверхности которого возбуждались поверхностные моды. Поверхность финишного слоя SiO₂ контактировала с водной средой, заполнявшейся биомолекулами. Анализ модового состава слоистой структуры показал, что на длине волны 532 нм в структуре поддерживаются три направляемые моды и три моды утечки, две из которых характеризуются показателями преломления, попадающими в первую запрещенную зону.

3. Распределение поля в поверхностной волне

Поверхностные моды первого и второго порядков имели $n^* = 1.448$ и 1.341 соответственно. На рис.4 представлены распределения полей этих мод, рассчитанные нами методом, изложенным в работе [12]. Авторы [11] называют эти моды поверхностными модами фотонного кристалла, однако, по нашему мнению, которое совпадает с классификацией, приведенной в [12], такие моды скорее можно назвать модами брэгговского волновода, в котором многослойная структура (фотонный кристалл) работает как распределенное зеркало.

В работе [12] приведена теория такого волновода, в котором с одной его стороны моды возникают за счет полного внутреннего отражения на границе с прилегающей средой, а с другой его стороны – за счет брэгговского отражения на границе с периодической слоистой средой. Дисперсионное соотношение для брэгговского волновода имеет вид [12]

$$k_g \left(\frac{q_a \cos k_g t - k_g \sin k_g t}{q_a \sin k_g t + k_g \cos k_g t} \right) = -ik_{1x} \frac{\exp(-iKA) - A - B}{\exp(-iKA) - A + B}, \quad (1)$$

где k_{1x} – поперечная составляющая волнового вектора в слое решетки с низким показателем преломления; K – модуль вектора Блоха; A – период слоев структуры; A, B – коэффициенты характеристической матрицы элементарной ячейки. Левая часть уравнения (1) содержит только параметры финишного слоя SiO₂ (индекс g) и прилегающей среды (индекс a), в то время как его правая часть зависит от параметров периодической среды. При действительных значениях параметров поверхностной волны, локализованной вблизи границы волновода (постоянной распространения β , постоянной затухания q_a в прилегающем слое и поперечной составляющей k_g волнового век-

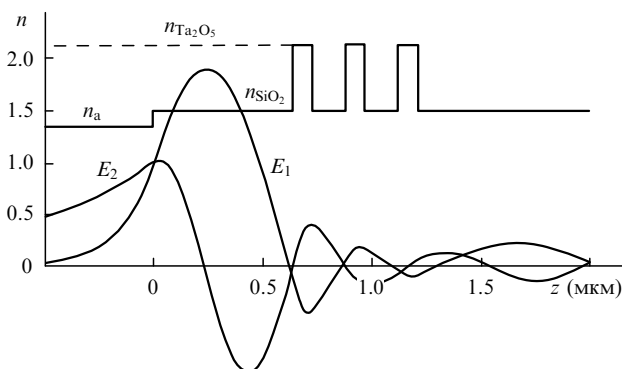


Рис.4. Распределение полей E_1 и E_2 поверхностных мод, используемых в работе [11]; n_a – показатель преломления прилегающей среды.

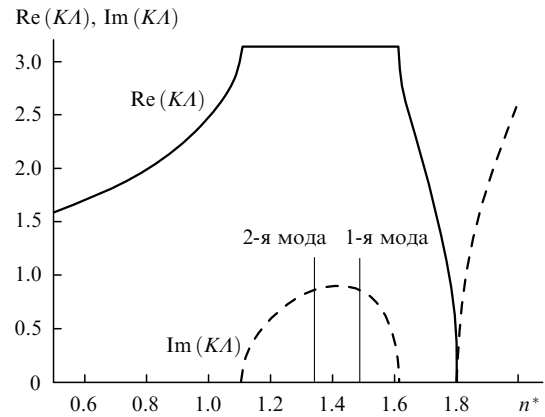


Рис.5. Зависимость модуля блоховского вектора K от эффективного показателя преломления n^* для структуры, взятой из работы [11].

тора в финишном слое толщиной t), левая часть уравнения (1) действительна. Правая часть уравнения (1) становится действительной только при комплексных значениях модуля блоховского волнового вектора K , которые реализуются лишь при значениях n^* , расположенных в запрещенной зоне системы. Мнимая часть K определяет глубину проникновения экспоненциально затухающей поверхностной волны в периодическую часть брэгговского волновода.

Итак, для существования направляемых мод брэгговского волновода должны выполняться одновременно два условия: стандартное условие поперечного резонанса в финишном слое структуры и условие брэгговского отражения на границе раздела периодической среды с финишным слоем. Большая разность показателей преломления слоев позволила получить широкую запрещенную зону ($1.10573 < n^* < 1.61558$), а увеличенная толщина финишного слоя SiO₂ обеспечила получение двух мод структуры. Зависимость модуля блоховского вектора K от n^* представлена на рис.5.

Отметим, что глубина проникновения l мощности волны в прилегающую однородную среду определяется выражением

$$l = \frac{\lambda}{4\pi(n^{*2} - n_a^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $n_a = 1.335$ – показатель преломления прилегающей среды (вода). Из соотношения (2) видно, что глубина проникновения в водную среду поверхностной моды второго порядка значительно больше, чем моды первого порядка.

В работе [11] с помощью описанного сенсора на $\lambda = 532$ нм была измерена концентрация молекул биотина, связанных с монослоем стрептавидина, и тем самым показано реальное преимущество использования поверхностных волн, возбуждаемых на поверхности фотонного кристалла.

4. Заключение

Анализ экспериментальных исследований поверхностных волн, существующих на границе раздела однородной среды с периодически стратифицированной средой, показывает, что эти волны с успехом могут быть использованы в спектроскопических исследованиях тонких сло-

ев, помещенных на этой границе раздела, и, в частности, в исследовании биослоев.

Возможность призмного возбуждения поверхностных волн на поверхности фотонного кристалла является серьезным достоинством этих волн при использовании их в спектроскопических исследованиях неизвестных поверхностей.

В работе [11] была предложена методика одновременного измерения показателя преломления жидкой (водной) среды и толщины приграничного слоя исследуемых биомолекул. Данная методика основана на одновременном возбуждении двух поверхностных волн с различной глубиной их проникновения в жидкую среду, что позволяет учесть температурные изменения жидкости и повысить точность измерения концентрации биомолекул.

Существенным достоинством «новых» поверхностных волн является расширение спектрального диапазона используемого для исследования излучения, что определяется возможностью создания поверхностных структур желаемого типа. Еще одно преимущество использования поверхностных волн нового типа – возможность создания химически нейтральной поверхности, на которой эти волны могут быть получены. И наконец, последним преимуществом «новых» поверхностных волн является возможность реализации большой длины их пробе-

га на поверхности фотонного кристалла, однако практическая реализация данного свойства все еще впереди.

Авторы выражают благодарность К.М.Голанту, Ю.В.Ларионову и В.А.Данилову за помощь в проведении работы.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-07-00064).

1. Beach R.J., Feit M.D., Page R.H., Brasure L.F., Wilcox R., Payne S.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 1521 (2002).
2. Усиевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Голант К.М. *Оптика и спектроскопия*, **101**, 999 (2006).
3. Гончаров А.А., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Квантовая электроника*, **33**, 342 (2003).
4. Goncharov A.A., Svidzinsky K.K., Sychugov V.A., Usievich B.A. *Laser Phys.*, **13**, 1017 (2003).
5. Robertson W.M. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 2013 (1999).
6. Shinn M., Robertson W.M. *Sensor. Actuator. B*, **105**, 360 (2005).
7. Yeh P., Yariv A. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 104 (1978).
8. Булгаков А.А., Ковтун В.Р. *Оптика и спектроскопия*, **56**, 769 (1983).
9. Anemogiannis E., Glytsis E.N., Gaylord T.K. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 929 (1999).
10. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1978, с. 66–81).
11. Konopsky V.N., Alieva E.V. *Anal. Chem.*, **79**, 4729 (2007).
12. Yeh P., Yariv A., Hong C.-S. *J. Opt. Soc. Am.*, **67**, 423 (1977).