

УДК 535.42

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТУПЕНЬКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

© 2022 г. Е. А. Безус*

*Институт систем обработки изображений РАН – филиал федерального государственного учреждения
“Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника”
Российской академии наук, Самара, Россия*

*E-mail: evgeni.bezus@gmail.com

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 21.07.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Исследованы оптические свойства диэлектрической ступеньки, расположенной на поверхности одномерного фотонного кристалла. Показано, что при наклонном падении блоховской поверхностной волны в ступеньке могут возникать высокодобротные резонансы, проявляющиеся в появлении резких минимумов в спектре пропускания и пиков в спектре отражения. При этом в ступеньке также существует специальный тип невытекающих собственных мод, а именно, связанные состояния в континууме.

DOI: 10.31857/S0367676522010069

ВВЕДЕНИЕ

В течение последнего десятилетия исследование связанных состояний в континууме (ССК, англ. bound states in the continuum) привлекает большое внимание исследователей [1, 2]. ССК представляют собой специальный тип невытекающих собственных мод (мод с бесконечным временем жизни и бесконечной добротностью), существующих в структурах с открытыми каналами рассеяния. Вытекание энергии ССК в открытые каналы рассеяния при этом устраняется по соображениям симметрии или за счет интерференционных эффектов. ССК представляют не только фундаментальный, но и большой практический интерес, поскольку небольшое отклонение от условий ССК позволяет получить крайне высокодобротные резонансы, перспективные для применения в задачах оптической фильтрации, химических и биологических фотонных сенсорах, а также в лазерах [1].

В подавляющем большинстве работ, посвященных исследованию ССК в фотонике, данные состояния рассматриваются в периодических структурах (дифракционных решетках и фотонно-кристаллических слоях) [1, 2]. Вместе с тем, в связи с актуальностью повышения степени интеграции современных оптических устройств, большой интерес также представляет исследование ССК в структурах интегральной нанофотоники. В ряде недавних работ, в том числе в работах автора настоящей статьи, исследовались ССК в простых

структурах, состоящих из одной или нескольких диэлектрических ступенек на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода [3–6]. В настоящей работе исследуется аналогичная структура на платформе блоховских поверхностных волн (БПВ) – поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границ раздела фотонных кристаллов (в простейшем случае, рассматриваемом в настоящей работе – вдоль границы раздела одномерного фотонного кристалла и однородной диэлектрической среды). Платформа БПВ в настоящее время рассматривается как перспективная платформа интегральной оптики и потенциальная альтернатива платформе поверхностных плазмон-поляритонов [7, 8]. В отличие от поверхностных плазмон-поляритонов, БПВ могут существовать в полностью диэлектрических структурах, что на практике существенно увеличивает длину их распространения и делает их перспективными для большого числа приложений.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТУПЕНЬКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Геометрия исследуемой структуры показана на рис. 1. Структура, предполагаемая инвариантной к переносу в направлении оси y , состоит

из диэлектрической ступеньки с шириной l и высотой h на поверхности одномерного фотонного кристалла, период которого состоит из двух плоскопараллельных диэлектрических слоев с показателями преломления n_1 и n_2 и толщинами h_1 и h_2 . Для простоты будем считать, что материал ступеньки совпадает с материалом верхнего слоя фотонного кристалла. Над фотонным кристаллом находится однородная диэлектрическая среда с показателем преломления n_0 . При этом для управления свойствами (константой распространения) блоховской поверхностной волны, распространяющейся по поверхности фотонного кристалла, толщина его верхнего слоя, имеющего показатель преломления n_1 , отличается от “обычного” значения h_1 и составляет $h_1' = h_1 + h_c$, где h_c – некоторое положительное или отрицательное значение ($h_c > -h_1$).

В настоящей работе будем рассматривать случай, когда на ступеньку наклонно падает ТЕ-поляризованная БПВ (характерный профиль электрического поля такой волны показан на рис. 1). Угол падения при этом измеряется в плоскости xOy от отрицательного направления оси x . Такая БПВ удовлетворяет дисперсионному соотношению [9]

$$2k_{z,1}k_{z,2} \sin(k_{z,1}h_1) \cos(k_{z,2}h_2) + (k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2) \times \times \cos(k_{z,1}h_1) \sin(k_{z,2}h_2) - \frac{k_{z,1}^2 - k_{z,2}^2}{k_{z,1}^2 - k_{z,0}^2} \sin(k_{z,2}h_2) \times \times \left\{ (k_{z,1}^2 + k_{z,0}^2) \cos(k_{z,1}[2h_c + h_1]) - - 2ik_{z,1}k_{z,0} \sin(k_{z,1}[2h_c + h_1]) \right\} = 0, \quad (1)$$

где $k_{z,i} = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - k_{\parallel}^2}$, $i = 0, 1, 2$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны в свободном пространстве, k_{\parallel} – искомая константа распространения БПВ (компонента волнового вектора в плоскости xOy). Часто удобно характеризовать БПВ эффективным показателем преломления $n_{eff} = k_{\parallel}/k_0$. В области ступеньки справедливо то же дисперсионное соотношение, однако вместо значения h_c следует использовать значение $h_c + h$. Отметим также, что дисперсионное уравнение (1) будет описывать ТМ-поляризованные БПВ, если в нем выполнить следующие замены:

$$k_{z,i} \rightarrow k_{z,i}/n_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \quad h_c \rightarrow n_1^2 h_c, \quad (2) \\ h_i \rightarrow n_i^2 h_i, \quad i = 1, 2.$$

Рассмотрим для длины волны в свободном пространстве $\lambda = 630$ нм фотонный кристалл со следующими параметрами: $n_1 = 2.3227$ (Nb_2O_5), $n_2 = 1.4762$ (SiO_2), $h_1 = 0.031\lambda \approx 20$ нм, $h_2 = 0.3\lambda \approx 189$ нм. При указанных материалах выбранные

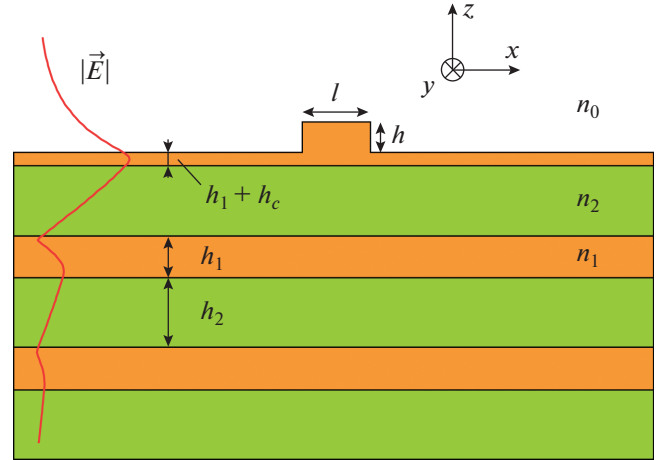


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры, представляющей собой диэлектрическую ступеньку на поверхности одномерного фотонного кристалла.

толщины слоев фотонного кристалла обеспечивают наличие фотонной запрещенной зоны для обеих поляризаций (ТЕ- и ТМ-) при всех значениях k_{\parallel}/k_0 , превышающих величину $n_{eff,cr} = 1.584$.

Выберем следующие значения толщины “обрезки” верхнего слоя фотонного кристалла и высоты ступеньки на его поверхности: $h_c = 76$ нм (т.е. толщина верхнего слоя фотонного кристалла составляет $h_1' = h_1 + h_c \approx 96$ нм), $h = 60$ нм. Согласно формулам (1) и (2) в случае, когда над фотонным кристаллом находится среда с показателем преломления $n_0 = 1$, вне ступеньки поверхность фотонного кристалла поддерживает ТЕ-поляризованную БПВ с эффективным показателем преломления $n_{eff,TE} = 1.8$ (которая будет рассматриваться в качестве поверхностной волны, падающей на ступеньку) и ТМ-поляризованную БПВ с эффективным показателем преломления $n_{eff,TM} = 1.53$. В области ступеньки существуют ТЕ- и ТМ-поляризованные БПВ с эффективными показателями преломления $n_{eff,TE,r} = 2.0$ и $n_{eff,TM,r} = 1.75$ соответственно.

В общем случае при дифракции, падающей ТЕ-поляризованной БПВ на ступеньку, будут формироваться не только отраженные и прошедшие ТЕ- и ТМ-поляризованные БПВ, но и излучение, рассеянное в область над фотонным кристаллом и “вглубь” фотонного кристалла. Наличие данного “паразитного” рассеяния существенно снижает эффективность элементов интегральной нанофоники [10]. Однако в рассматриваемой структуре потери на “паразитное” рассеяние, а также “преобразование поляризации” (т.е. возбуждение отраженной и прошед-

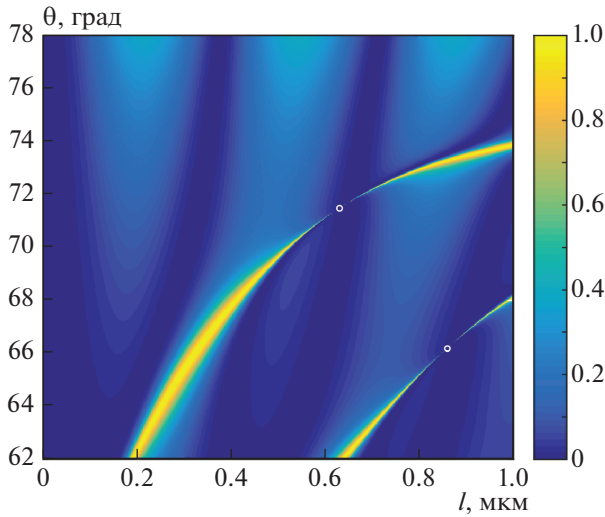


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения диэлектрической ступеньки на поверхности фотонного кристалла от угла падения и ширины ступеньки при падении ТЕ-поляризованной БПВ. Белые кружки показывают положения ССК, предсказанные построенной моделью связанных волн.

шей ТМ-поляризованных БПВ) можно полностью устранить за счет выбора угла падения. Действительно, при углах падения $\theta > \theta_{cr,0} = \arcsin(n_0/n_{eff,TE}) = 33.75^\circ$ у-компонента волнового вектора падающей БПВ превышает величину волнового вектора плоских волн в области над структурой. Поскольку в силу инвариантности структуры к переносу в направлении оси y эта компонента сохраняется для всех волн, составляющих решение задачи дифракции, это означает, что волны, рассеянные в область над структурой, становятся затухающими, т.е. при $\theta > \theta_{cr,0}$ не происходит потерь энергии падающей БПВ на “паразитное” рассеяние в эту область. Выбранная конфигурация запрещенных зон фотонного кристалла обеспечивает устранение “паразитного” рассеяния в “объемные” моды фотонного кристалла при “умеренных” углах падения $\theta > \theta_{cr,PC} = \arcsin(n_{eff,cr}/n_{eff,TE}) = 61.64^\circ$. При этом при углах падения $\theta > \theta_{cr,TM} = \arcsin(n_{eff,TM}/n_{eff,TE}) = 58.21^\circ$ перестают возбуждаться (т.е. становятся затухающими) отраженные и прошедшие ТМ-поляризованные БПВ. Наконец, при $\theta > \theta_{cr,TM,r} = \arcsin(n_{eff,TM,r}/n_{eff,TE}) = 76.46^\circ$ ТМ-поляризованные БПВ в области ступеньки также становятся затухающими.

Покажем, что в диапазоне углов падения $\max\{\theta_{cr,0}, \theta_{cr,PC}, \theta_{cr,TM}\} < \theta < \theta_{cr,TM,r}$, т.е. в случае, когда в области ступеньки существуют ТЕ- и ТМ-поляризованные БПВ, а в области вне ступеньки —

только ТЕ-поляризованные БПВ, рассматриваемая структура проявляет резонансные оптические свойства. На рис. 2 показана зависимость коэффициента отражения R ступеньки при наклонном падении ТЕ-поляризованной БПВ от угла падения и ширины ступеньки. В рассматриваемом диапазоне углов падения описанные выше “паразитное” рассеяние и преобразование поляризации отсутствуют, и энергия падающей БПВ делится между отраженной и прошедшей ТЕ-поляризованными БПВ. Поэтому аналогичный график для коэффициента пропускания $T = 1 - R$ не приведен. Показанная на рис. 2 зависимость была рассчитана с помощью собственного моделирующего программного обеспечения, реализующего модификацию метода фурье-мод численного решения уравнений Максвелла (англ. Fourier modal method и rigorous coupled-wave analysis), ориентированную на решение задач интегральной оптики [11, 12]. При этом моделировался фотонный кристалл, состоящий из конечного числа периодов, равного 6, и расположенный на подложке с показателем преломления, равным показателю преломления менее оптически плотного слоя кристалла. Число периодов было выбрано из условия хорошего совпадения значений эффективных показателей преломления БПВ, существующих в такой структуре, с эффективными показателями преломления, рассчитанными с помощью формул (1) и (2) для случая полубесконечного фотонного кристалла (для всех четырех значений $n_{eff,TE}$, $n_{eff,TM}$, $n_{eff,TE,r}$ и $n_{eff,TM,r}$ отличие не превышает $5 \cdot 10^{-4}$).

Из рис. 2 видно, что в рассматриваемом угловом диапазоне присутствуют высокодобротные резонансы, при этом ширина резонанса (и, следовательно, его добротность) существенно варьируется вдоль дисперсионных кривых. В нескольких точках ширина резонанса обращается в нуль, что свидетельствует о наличии в структуре связанных состояний в континууме. Вид резонансных особенностей и связанных состояний аналогичен рассмотренной в предыдущей работе автора структуре, состоящей из диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода [4] (при этом основное отличие заключается в механизме “выключения” потерь на паразитное рассеяние в области под ступенькой). Для теоретического описания возникающих резонансов была разработана модель связанных волн, также полностью аналогичная модели, представленной в [4] и основанная на формализме матрицы рассеяния. Построенная модель учитывает возбуждение падающей ТЕ-поляризованной поверхностной волной ТЕ- и ТМ-поляризованных БПВ в области ступеньки и связь БПВ двух поляризаций, существующих в ступеньке, на ее границах. При этом не учитывается лишь “ближне-

польное” взаимодействие между левой и правой границами ступеньки, которым, как показывает сравнение с результатами строгого численного моделирования, можно пренебречь уже при ширине ступеньки в несколько десятков нанометров. “Модельный” спектр отражения визуально практически неотличим от строго рассчитанного спектра, показанного на рис. 2, и поэтому не приведен здесь для краткости. Кроме того, модель связанных волн позволяет с высокой точностью предсказать положение ССК (предсказанные моделью положения ССК показаны белыми кружками на рис. 2 и хорошо согласуются с результатами численного моделирования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследованы резонансные оптические свойства диэлектрической ступеньки, расположенной на поверхности одномерного диэлектрического фотонного кристалла. Показано, что при наклонном падении блоховской поверхностной волны на ступеньку возникают высокодобротные резонансы, проявляющиеся в резких пиках отражения и минимумах пропускания. При этом в ряде точек на дисперсионных кривых резонансов добротность обращается в бесконечность, что свидетельствует о наличии связанных состояний в континууме. Предложенная структура может найти применение при создании “двумер-

ных” оптических устройств для управления распространением блоховских поверхностных волн.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00514).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hsu C.W., Zhen B., Stone A.D. *et al.* // Nat. Rev. Mater. 2016. V. 1. Art. No. 16048.
2. Sadreev A.F. // Rep. Prog. Phys. 2021. V. 84. Art. No. 055901.
3. Zou C.L., Cui J.M., Sun F.W. *et al.* // Laser Photon. Rev. 2015. V. 9. P. 114.
4. Bezus E.A., Bykov D.A., Doskolovich L.L. // Photon. Res. 2018. V. 6. P. 1084.
5. Nguyen T.G., Ren G., Schoenhardt S. // Laser Photon. Rev. 2019. V. 13. Art. No. 1900035.
6. Doskolovich L.L., Bezus E.A., Bykov D.A. // Photon. Res. 2019. V. 7. P. 1314.
7. Yu L., Barakat E., Sfez T. *et al.* // Light Sci. Appl. 2014. V. 3. Art. No. e124.
8. Kim M.S., Vosoughi Lahijani B., Deschermes N. *et al.* // ACS Photon. 2017. V. 4. P. 1477.
9. Bezus E.A., Bykov D.A., Doskolovich L.L. // Comp. Opt. 2018. V. 42. P. 22.
10. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Soifer V.A. // Opt. Lett. 2015. V. 40. P. 4935.
11. Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. // J. Opt. Soc. Amer. A. 1995. V. 12. P. 1068.
12. Silberstein E., Lalanne P., Hugonin J.-P., Cao Q. // J. Opt. Soc. Amer. A. 2001. V. 18. P. 2865.

Bound states in the continuum in a dielectric ridge on the surface of a one-dimensional photonic crystal

E. A. Bezus*

Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, 443001 Russia

**e-mail: evgeni.bezus@gmail.com*

Optical properties of a dielectric ridge located on the surface of a one-dimensional photonic crystal are investigated. It is shown that, at oblique incidence of a Bloch surface wave, high-Q resonances can arise, which are manifested in the appearance of sharp minima in the transmittance spectrum and peaks in the reflectance spectrum. The ridge also supports a special type of non-leaky eigenmodes, namely, bound states in the continuum.