

О СВЯЗИ КОНСТАНТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЛОХОВСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ С ТОЛЩИНОЙ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Е.А. Безус^{1,2}, Д.А. Быков^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация

Рассмотрен вывод дисперсионного уравнения блоховской поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы раздела полубесконечного одномерного фотонного кристалла и однородной среды. На основе полученного дисперсионного уравнения записано явное аналитическое соотношение, определяющее связь константы распространения и толщины верхнего слоя фотонного кристалла.

Ключевые слова: блоховская поверхностная волна, фотонный кристалл, дисперсионное соотношение.

Цитирование: Безус, Е.А. О связи константы распространения блоховской поверхностной волны с толщиной верхнего слоя фотонного кристалла / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 22-27. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-22-27.

Введение

Изучение свойств поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), распространяющихся в различных диэлектрических и металлодиэлектрических структурах, привлекает в последнее время большое внимание, связано как с фундаментальным интересом, так и с перспективами их применения в различных областях [1]. Наибольшее число работ посвящено поверхностным плазмон-поляритонам (ППП), распространяющимся вдоль границ раздела металла и диэлектрика, и плазмонным модам, распространяющимся в более сложных металлодиэлектрических структурах различной конфигурации. Несмотря на локализацию энергии плазмонной моды в субволновой области, достижимую в некоторых плазмонных волноводах, существенным недостатком таких структур являются высокие потери на поглощение в металле, прямо пропорциональные степени локализации энергии моды. При этом существует тип ПЭВ, которые могут распространяться в полностью диэлектрических структурах. Такие волны называются блоховскими поверхностными волнами (БПВ) [2–6] и распространяются вдоль границ раздела между однородной средой и фотонным кристаллом или между двумя различными фотонными кристаллами. В случае, когда все материалы структуры – диэлектрики, потери на поглощение при распространении такой поверхностной волны могут быть практически полностью устранены. Отсутствие потерь на поглощение делает БПВ перспективными в различных приложениях, в частности, в химических и биологических датчиках [7–12], а также в интегрированных на кристалле элементах интегральной оптики [13–18], предназначенных для передачи и обработки информации.

Несмотря на то, что дисперсионные соотношения для БПВ, распространяющихся вдоль границы раздела одномерного диэлектрического фотонного кристалла (ФК) и однородной среды, были исследованы в различных работах [2–6], в известных работах не приведено явного аналитического выражения, опре-

деляющего связь константы распространения (эффективного показателя преломления) БПВ с толщиной верхнего слоя ФК. Данное соотношение представляет большой интерес при расчёте элементов «двумерной оптики» для управления распространением БПВ (линз, призм, делителей пучка, брэгговских отражателей, спектральных и пространственных фильтров и т.д.). Как правило, расчёт таких элементов основан на методе эффективного показателя преломления [19]. Изменение толщины верхнего слоя ФК изменяет эффективный показатель преломления (нормированную на волновое число константу распространения) БПВ и, таким образом, позволяет «кодировать» профиль эффективного показателя преломления аналогично «обычному» оптическому элементу, предназначенному для заданного преобразования плоской волны, распространяющейся в свободном пространстве [16–18]. В настоящей работе рассмотрен вывод дисперсионного уравнения БПВ в случае, когда толщина верхнего слоя ФК является произвольной. На основе полученного дисперсионного уравнения записано явное аналитическое соотношение, определяющее связь константы распространения БПВ с толщиной верхнего слоя ФК.

1. Дисперсионное уравнение БПВ

Приведём вывод дисперсионного соотношения БПВ, распространяющейся вдоль границы раздела полубесконечного одномерного ФК и однородной среды. Поле такой ПЭВ является затухающим при удалении от границы раздела. В однородной среде, находящейся над ФК, поле соответствует затухающей плоской волне. В области фотонного кристалла поле соответствует затухающей «объёмной» моде одномерного ФК.

Для получения дисперсионного соотношения ПЭВ необходимо записать общее представление поля в области ФК и в однородной среде над ФК. Рассмотрим случай ТЕ-поляризации, при котором $\mathbf{E} = (0, E_y, 0)$, $\mathbf{H} = (H_x, 0, H_z)$. Пусть период ФК состоит из двух однородных слоёв с толщинами h_1 и h_2 ($d = h_1 + h_2$) и ди-

электрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 , $\epsilon_1 > \epsilon_2$. Электрическое поле в слоях кристалла при $-d \leq z < 0$ может быть представлено в виде суперпозиции двух плоских волн противоположных направлений:

$$E_{y,1}(x, z) = \exp(ik_{x,0}x) \{ C_1^+ \exp(ik_{z,1}z) + C_1^- \exp(-ik_{z,1}z) \}, -h_1 \leq z < 0, \quad (1)$$

$$E_{y,2}(x, z) = \exp(ik_{x,0}x) \{ C_2^+ \exp(ik_{z,2}[z+h_1]) + C_2^- \exp(-ik_{z,2}[z+h_1]) \}, -d \leq z < -h_1,$$

где C_i^\pm ($i=1, 2$) – неизвестные коэффициенты, $k_{z,i} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_i - k_{x,0}^2}$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны. Будем теперь считать, что верхний слой ФК «продолжен» или «обрезан» до прямой $z = h_0$, $h_0 > -h_1$, соответствующей границе распространения ПЭВ (рис. 1).

Поле над границей раздела $z = h_0$ соответствует заходящей плоской волне:

$$E_{y,0}(x, z) = \exp(ik_{x,0}x) \exp(ik_{z,0}[z-h_0]), z > h_0, \quad (2)$$

где $k_{z,0} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_0 - k_{x,0}^2}$. Для существования электромагнитного поля, имеющего вид плоской волны (2) при $z > h_0$ и вид «объемной» моды ФК при $z < h_0$, необходимо выполнение условий непрерывности тангенциальных компонент поля $E_{y,0}$, $H_{x,0} \propto \partial E_{y,0} / \partial z$ и $E_{y,1}$, $H_{x,1} \propto \partial E_{y,1} / \partial z$ на границе $z = h_0$, условий непрерывности тангенциальных компонент поля $E_{y,i}$, $H_{x,i} \propto \partial E_{y,i} / \partial z$ ($i=1, 2$) при $z = -h_1$ и условий квазипериодичности $E_{y,2}(x, -d) = E_{y,1}(x, 0)\xi$, $H_{x,2}(x, -d) = H_{x,1}(x, 0)\xi$, где $\xi = \exp(-i\tilde{k}d)$, \tilde{k} – волновое число «объемной» моды ФК. Применяя вышеприведенные граничные условия, получим следующую систему из шести уравнений относительно шести неизвестных: коэффициентов (амплитуд волн) C_1^+ , C_1^- , C_2^+ , C_2^- , величины ξ и константы распространения БПВ $k_{x,0}$ (входящей в систему неявно через величины $k_{z,0}$, $k_{z,1}$, $k_{z,2}$):

$$\begin{cases} C_1^+ \exp(ik_{z,1}h_0) + C_1^- \exp(-ik_{z,1}h_0) = 1, \\ C_1^+ k_{z,1} \exp(ik_{z,1}h_0) - C_1^- k_{z,1} \exp(-ik_{z,1}h_0) = k_{z,0}, \\ C_1^+ \exp(-ik_{z,1}h_1) + C_1^- \exp(ik_{z,1}h_1) - C_2^+ - C_2^- = 0, \\ C_1^+ k_{z,1} \exp(-ik_{z,1}h_1) - C_1^- k_{z,1} \exp(ik_{z,1}h_1) - \\ - C_2^+ k_{z,2} + C_2^- k_{z,2} = 0, \\ C_1^+ \xi + C_1^- \xi - \\ - C_2^+ \exp(-ik_{z,2}h_2) - C_2^- \exp(ik_{z,2}h_2) = 0, \\ C_1^+ k_{z,1} \xi - C_1^- k_{z,1} \xi - \\ - C_2^+ k_{z,2} \exp(-ik_{z,2}h_2) + C_2^- k_{z,2} \exp(ik_{z,2}h_2) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Последовательно выражая неизвестные C_1^+ , C_1^- , C_2^+ , C_2^- , ξ из первых пяти уравнений в (3) и под-

ставляя получаемые выражения в шестое уравнение, получим:

$$2k_{z,1}k_{z,2} \sin(k_{z,1}h_1) \cos(k_{z,2}h_2) + (k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2) \cos(k_{z,1}h_1) \sin(k_{z,2}h_2) - \frac{k_{z,1}^2 - k_{z,2}^2}{k_{z,1}^2 - k_{z,0}^2} \sin(k_{z,1}h_1) \times \times \{ (k_{z,1}^2 + k_{z,0}^2) \cos(k_{z,1}[2h_0 + h_1]) - 2ik_{z,1}k_{z,0} \sin(k_{z,1}[2h_0 + h_1]) \} = 0. \quad (4)$$

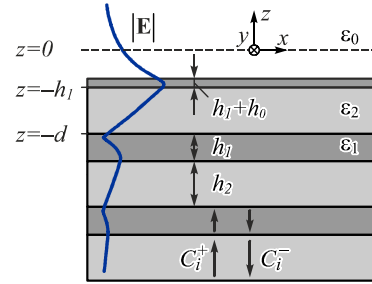


Рис. 1. Геометрия структуры

Уравнение (4) является дисперсионным уравнением БПВ. При заданных длине волны λ и параметрах ФК из него может быть найдена константа распространения $k_{x,0}$ БПВ.

Система уравнений (3) соответствует граничным условиям для случая ТЕ-поляризации. Для ТМ-поляризации граничные условия также можно описать системой уравнений вида (3), однако в этом случае нужно выполнить две следующие замены. Во-первых, величины $k_{z,i}$, $i=0, 1, 2$ в (3) нужно заменить на $k_{z,i}/\epsilon_i$. Во-вторых, величины h_i , $i=0, 1, 2$ нужно заменить на $\epsilon_i h_i$. Поскольку при данных заменах вид системы (3) не изменяется, то дисперсионное уравнение (4) будет описывать случай ТМ-поляризации, если в уравнении (4) выполнить вышеуказанные замены:

$$k_{z,i} \rightarrow k_{z,i}/\epsilon_i, \quad i = 0, 1, 2, \quad (5)$$

$$h_0 \rightarrow \epsilon_1 h_0, \quad h_i \rightarrow \epsilon_i h_i, \quad i = 1, 2.$$

2. Анализ связи константы распространения БПВ с толщиной верхнего слоя фотонного кристалла

Из уравнения (4) можно в явном виде определить связь константы распространения $k_{x,0}$ с величиной h_0 , определяющей толщину верхнего слоя ФК. Действительно, представим последнее выражение в скобках в левой части (4) как косинус суммы:

$$2k_{z,1}k_{z,2} \sin(k_{z,1}h_1) \cos(k_{z,2}h_2) + (k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2) \cos(k_{z,1}h_1) \sin(k_{z,2}h_2) = (k_{z,1}^2 - k_{z,2}^2) \sin(k_{z,2}h_2) \cdot \cos(k_{z,1}[2h_0 + h_1] + \varphi), \quad (6)$$

где $k_{z,i} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_i - k_{x,0}^2}$, $i = 0, 1, 2$,

$\varphi = -\arccos[(k_{z,1}^2 + k_{z,0}^2)/(k_{z,1}^2 - k_{z,0}^2)]$. Отметим, что поле БПВ в однородной среде над ФК соответствует за-

тухающей плоской волне, т. е. величина $k_{z,0}$ является чисто мнимой. При этом $k_{z,1}^2 + k_{z,0}^2 < k_{z,1}^2 - k_{z,0}^2$ и $|\cos \varphi| < 1$.

Из (6) несложно получить искомое выражение для h_0 в виде

$$h_0 = \pm \frac{1}{2k_{z,1}} \arccos \left[\frac{2k_{z,1}k_{z,2}}{k_{z,1}^2 - k_{z,2}^2} \sin(k_{z,1}h_1) \operatorname{ctg}(k_{z,2}h_2) + \frac{k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2}{k_{z,1}^2 - k_{z,2}^2} \cos(k_{z,1}h_1) \right] + \frac{1}{2k_{z,1}} \arccos \left(\frac{k_{z,1}^2 + k_{z,0}^2}{k_{z,1}^2 - k_{z,0}^2} \right) - \frac{h_1}{2} + \frac{\pi m}{k_{z,1}}, m \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

Для ТМ-поляризации в уравнении (7) нужно выполнить замены (5). Согласно (7), величина h_0 определена с точностью до $\pi/k_{z,1}$. Это условие определяет существование БПВ с одинаковыми константами распространения $k_{x,0}$ при различных значениях h_0 . Аналогично модам плоскопараллельного волновода будем называть такие БПВ модами различных порядков. Кроме того, при некоторых значениях h_0 может существовать несколько БПВ с различными эффективными показателями преломления [17].

Напомним, что дисперсионное уравнение (4) определяет поле, имеющее вид плоской волны (2) при $z > h_0$ и вид моды ФК при $z < h_0$. В ФК всегда существуют две моды противоположных направлений с константами распространения $\pm \tilde{k}$. Знаки « \pm » у первого слагаемого в правой части уравнения (7) как раз описывают случай этих двух мод. В фотонной запрещённой зоне одна из мод является затухающей в направлении от границы раздела ($|\xi| < 1$), а вторая – возрастающей ($|\xi| > 1$). Следовательно, решения уравнений (4) и (7) будут соответствовать ПЭВ только при выполнении следующих условий: $k_{x,0} > k_0 \epsilon_0$ (условие затухания плоской волны (2) в области над ФК) и $|\xi| < 1$ (условие затухания моды ФК в направлении от границы). Таким образом, при расчёте h_0 по заданному $k_{x,0}$ необходимо в уравнении (7) выбирать знак первого слагаемого в соответствии с условием $|\xi| < 1$. Выражение для ξ может быть получено последовательным выражением коэффициентов C_1^+ , C_1^- , C_2^+ , C_2^- из первых четырёх уравнений в (3) и их подстановкой в пятое уравнение в следующем виде:

$$\xi = \cos(k_{z,1}[h_0 + h_1]) \times \frac{ik_{z,0} \cos(k_{z,2}h_2) + k_{z,2} \sin(k_{z,2}h_2)}{ik_{z,0} \cos(k_{z,1}h_0) + k_{z,1} \sin(k_{z,1}h_0)} + \sin(k_{z,1}[h_0 + h_1]) \times \frac{k_{z,1}^2 \cos(k_{z,2}h_2) - ik_{z,0}k_{z,2} \sin(k_{z,2}h_2)}{ik_{z,0}k_{z,1} \cos(k_{z,1}h_0) + k_{z,1}^2 \sin(k_{z,1}h_0)}, \quad (8)$$

где $h_0 = h_0(k_{x,0})$ имеет вид (7). Таким образом, расчёт величины ξ по формуле (8) позволяет выбрать правильный знак перед первым слагаемым в правой части формулы (7).

3. Численный пример

Расчёт зависимости константы распространения ПЭВ $k_{x,0}$ (или эффективного показателя преломления $n_{eff} = k_{x,0}/k_0$) от какого-либо параметра γ ФК может быть произведён «графически», то есть на основе анализа нулей графика функции $|D(n_{eff}, \gamma)|$, являющейся левой частью дисперсионного уравнения (4). Для понимания вида дисперсионных зависимостей $h_0 = h_0(n_{eff})$ на рис. 2 показано полутоновое изображение функции $\ln(|D(n_{eff}, h_0)|)$, рассчитанной при следующих параметрах: $\lambda = 800$ нм, $\epsilon_0 = 1$, $\epsilon_1 = 7$, $\epsilon_2 = 2,25$, $h_1 = 120$ нм, $h_2 = 200$ нм (рис. 2). Такие параметры использовались в работе авторов настоящей статьи [17] и были выбраны для последующего сравнения результатов расчёта. Линии минимумов на рис. 2 описывают решения дисперсионного уравнения (4).

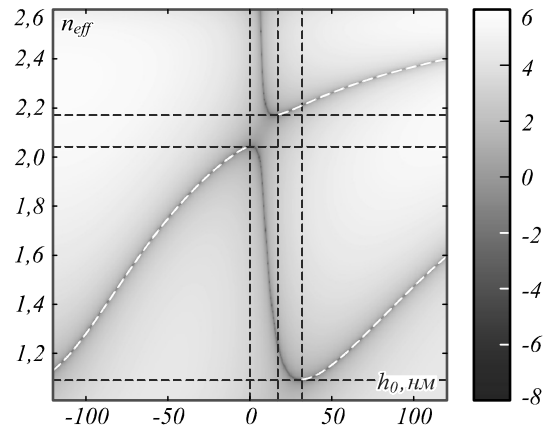


Рис. 2. Полутоновое изображение функции $\ln(|D(n_{eff}, h_0)|)$, где $D(n_{eff}, h_0)$ – левая часть дисперсионного уравнения (4). Пунктирными линиями показаны дисперсионные кривые, рассчитанные по формулам (7), (8)

Графики зависимостей эффективного показателя преломления ПЭВ n_{eff} от величины $h_0 \in [-120, 120]$ нм, рассчитанные по формулам (7), (8) для двух мод соседних порядков ($m=0$ и $m=1$ в (7)), показаны пунктиром на рис. 2 и совпадают с линиями минимумов функции $\ln(|D(n_{eff}, h_0)|)$. На основе приведённого в пункте 2 анализа можно заключить, что линии минимумов на рис. 2, которые не отмечены пунктиром, описывают решения дисперсионного уравнения, для которых мода фотонного кристалла является возрастающей при удалении от границы раздела. Горизонтальными точечными линиями на рис. 2 показаны границы фотонных запрещённых зон. Согласно рис. 2, вне запрещённых зон не существует волн с действительным значением n_{eff} , имеющих вид плоской волны (2) при $z > h_0$ и вид моды ФК при $z < h_0$. Отметим, что вне запрещённых зон значения h_0 , рассчитываемые по формуле (7), получают комплексными. Вертикальными точечными линиями на рис. 2 показаны соответствующие границам запрещённых зон значения $h_0 = 0$ и $h_0 = 17$ нм, а также значение $h_0 = 32$ нм, соответствующее началу «двухмодового» режима, в котором для одного значения h_0 существуют две ПЭВ с различными константами распространения.

Результаты расчётов по формулам (7), (8) (пунктирные линии на рис. 2) полностью совпали с графиками, представленными в работе [17]. Профиль поля ПЭВ при $n_{eff}=1,44$ и $h_0=-83$ нм приведён на рис. 1 и также совпадает с профилем поля, представленным в указанной работе. Это подтверждает правильность полученных формул (4), (7), (8). Отметим, что в работе [17] и других известных работах не приведено законченных аналитических выражений для расчёта зависимостей $h_0=h_0(n_{eff})$. В частности, в [17] значение $h_0=h_0(n_{eff})$ определялось через параметр $\mu=C_1^-/C_1^+$, который определялся численным расчётом.

Заключение

Рассмотрен вывод дисперсионного уравнения БПВ, распространяющейся вдоль границы раздела полубесконечного одномерного фотонного кристалла и однородной среды. Дисперсионное уравнение решено относительно толщины верхнего слоя фотонного кристалла. Полученное аналитическое соотношение позволяет рассчитать зависимость константы распространения БПВ (эффективного показателя преломления) от толщины верхнего слоя фотонного кристалла. Указанное соотношение может быть использовано для расчёта интегрированных «на чипе» оптических элементов для БПВ с использованием метода эффективного показателя преломления.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-47-630323 (получение дисперсионного уравнения БПВ); гранта РНФ 14-19-00796 (получение и анализ выражения, описывающего зависимость константы распространения (эффективного показателя преломления) БПВ от толщины верхнего слоя фотонного кристалла) и Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) (расчет численного примера и его анализ).

Литература

1. **Polo, J.A.J.** Surface electromagnetic waves: a review / J.A.J. Polo, A. Lakhtakia // *Laser & Photonics Reviews*. – 2011. – Vol. 5(2). – P. 234-246. – DOI: 10.1002/lpor.200900050.
2. **Yeh, P.** Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory / P. Yeh, A. Yariv, C.S. Hong // *Journal of the Optical Society of America*. – 1977. – Vol. 67(4). – P. 423-438. – DOI: 10.1364/JOSA.67.000423.
3. **Yeh, P.** Optical surface waves in periodic layered media / P. Yeh, A. Yariv, A.Y. Cho // *Applied Physics Letters*. – 1978. – Vol. 32(2). – P. 104-105. – DOI: 10.1063/1.89953.
4. **Виноградов, А.П.** Поверхностные состояния в фотонных кристаллах / А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.М. Мерзлякин, А.А. Лисянский // *Успехи физических наук*. – 2010. – Т. 180, № 3. – С. 249-263.
5. **Vandenbem, C.** Electromagnetic surface waves of multilayer stacks: coupling between guided modes and Bloch modes / C. Vandenbem // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33, Issue 19. – P. 2260-2262. – DOI: 10.1364/OL.33.002260.
6. **Ramos-Mendieta, F.** Electromagnetic surface modes of a dielectric superlattice: the supercell method / F. Ramos-Mendieta, P. Halevi // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1997. – Vol. 14, Issue 2. – P. 370-381. – DOI: 10.1364/JOSAB.14.000370.
7. **Anopchenko, A.** Effect of thickness disorder on the performance of photonic crystal surface wave sensors / A. Anopchenko, A. Occhicone, R. Rizzo, A. Sinibaldi, G. Figliozzi, N. Danz, P. Munzert, F. Michelotti // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, Issue 7. – P. 7728-7742. – DOI: 10.1364/OE.24.007728.
8. **Villa, F.** Photonic crystal sensor based on surface waves for thin-film characterization / F. Villa, L.E. Regalado, F. Ramos-Mendieta, J. Gaspar-Armenta, T. Lopez-Ríos // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, Issue 8. – P. 646-648. – DOI: 10.1364/OL.27.000646.
9. **Liscidini, M.** Analysis of Bloch-surface-wave assisted diffraction-based biosensors / M. Liscidini, J.E. Sipe // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2009. – Vol. 26, Issue 2. – P. 279-289. – DOI: 10.1364/JOSAB.26.000279.
10. **Sinibaldi, A.** Combining label-free and fluorescence operation of Bloch surface wave optical sensors / A. Sinibaldi, A. Fieramosca, R. Rizzo, A. Anopchenko, N. Danz, P. Munzert, C. Magistris, C. Barolo, F. Michelotti // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 10. – P. 2947-2950. – DOI: 10.1364/OL.39.002947.
11. **Michelotti, F.** Design rules for combined label-free and fluorescence Bloch surface wave biosensors / F. Michelotti, R. Rizzo, A. Sinibaldi, P. Munzert, C. Wächter, N. Danz // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42, Issue 14. – P. 2798-2801. – DOI: 10.1364/OL.42.002798.
12. **Sinibaldi, A.** A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals / A. Sinibaldi, R. Rizzo, G. Figliozzi, E. Descrovi, N. Danz, P. Munzert, A. Anopchenko, F. Michelotti // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 20. – P. 23331-23344. – DOI: 10.1364/OE.21.023331.
13. **Yu, L.** Manipulating Bloch surface waves in 2D: a platform concept-based flat lens / L. Yu, E. Barakat, T. Sfez, L. Hvozdar, J. Di Francesco, H.P. Herzig // *Light: Science & Applications*. – 2014. – Vol. 3. – e124. – DOI: 10.1038/lsa.2014.5.
14. **Yu, L.** Two-dimensional polymer grating and prism on Bloch surface waves platform / L. Yu, E. Barakat, J. Di Francesco, H.P. Herzig // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 25. – P. 31640-31647. – DOI: 10.1364/OE.23.031640.
15. **Dubey, R.** Ultra-thin Bloch-surface-wave-based reflector at telecommunication wavelength / R. Dubey, B.V. Lahijani, M. Häyrynen, M. Roussey, M. Kuittinen, H.P. Herzig // *Photonics Research*. – 2017. – Vol. 5, Issue 5. – P. 494-499. – DOI: 10.1364/PRJ.5.000494.
16. **Безус, Е.А.** Фазовая модуляция поверхностных электромагнитных волн с помощью дифракционного микрорельефа на границе одномерного фотонного кристалла / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, В.А. Сойфер // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2014. – Т. 99, № 2. – С. 67-71. – DOI: 10.7868/S0370274X14020027.
17. **Doskolovich, L.L.** Phase-shifted Bragg gratings for Bloch surface waves / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 21. – P. 27034-27045. – DOI: 10.1364/OE.23.027034.
18. **Doskolovich, L.L.** Spatial differentiation of Bloch surface wave beams using an on-chip phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 11. – 115006. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/11/115006.
19. **Chiang, K.S.** Effective-index method for the analysis of optical waveguide couplers and arrays: an asymptotic theory / K.S. Chiang // *Journal of Lightwave Technology*. – 1991. – Vol. 9, Issue 1. – P. 62-72. – DOI: 10.1109/50.64924.

Сведения об авторах

Безус Евгений Анатольевич в 2009 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика и информатика». Кандидат физико-математических наук (2012 г.), научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Области научных интересов: нанофотоника, плазмоника, электромагнитная теория дифракции. E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Быков Дмитрий Александрович в 2009 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика и информатика». Доктор физико-математических наук (2017 г.), и. о. старшего научного сотрудника лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Области научных интересов: нанофотоника, магнитооптика, плазмоника, электромагнитная теория дифракции. E-mail: bykovd@gmail.com.

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 г.), профессор РАН, заведующий лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. Области научных интересов: дифракционная оптика, лазерные информационные технологии, нанофотоника. E-mail: leonid@smr.ru.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 22 января 2018 г. Окончательный вариант – 9 февраля 2018 г.

ON THE RELATION BETWEEN THE PROPAGATION CONSTANT OF BLOCH SURFACE WAVES AND THE THICKNESS OF THE UPPER LAYER OF A PHOTONIC CRYSTALE.A. Bezus^{1,2}, D.A. Bykov^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}¹ Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,² Samara National Research University, Samara, Russia**Abstract**

We consider the derivation of a dispersion relation of Bloch surface waves supported by interfaces between a semi-infinite one-dimensional photonic crystal and a homogeneous medium. From the derived dispersion relation, we obtain an explicit analytical expression that defines the relationship between the propagation constant and the thickness of the upper layer of the photonic crystal.

Keywords: Bloch surface wave, photonic crystal, dispersion relation.

Citation: Bezus EA, Bykov DA, Doskolovich LL. On the relation between the propagation constant of Bloch surface waves and the thickness of the upper layer of a photonic crystal. *Computer Optics* 2018; 42(1): 22-27. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-22-27.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-47-630323) (derivation of the BSW dispersion relation); by the Russian Science Foundation (project 14-19-00796) (derivation and analysis of the expression describing the relationship between the propagation constant (or effective refractive index) of the BSW and the thickness of the upper layer of a photonic crystal) and by the Federal Agency of Scientific Organizations (Agreement No 007-Г3/Ч3363/26) (calculation and analysis of the numerical example).

References

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Polo JAJ, Lakhtakia A. Surface electromagnetic waves: a review. <i>Laser Photon Rev</i> 2011; 5(2): 234-246. DOI: 10.1002/lpor.200900050.</p> <p>[2] Yeh P, Yariv A, Hong CS. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory. <i>JOSA</i> 1977; 67(4): 423-438. DOI: 10.1364/JOSA.67.000423.</p> | <p>[3] Yeh P, Yariv A, Cho AY. Optical surface waves in periodic layered media. <i>Appl Phys Lett</i> 1978; 32(2): 104-105. DOI: 10.1063/1.89953.</p> <p>[4] Vinogradov AP, Dorofeenko AV, Merzlikin AM, Lisyansky AA. Surface states in photonic crystals. <i>Phys Usp</i> 2010; 53(3): 243-256. DOI: 10.3367/UFNe.0180.201003b.0249.</p> <p>[5] Vandenberg, C. Electromagnetic surface waves of multilayer stacks: coupling between guided modes and Bloch</p> |
|--|--|

- modes. *Opt Lett* 2008; 33(19): 2260-2262. DOI: 10.1364/OL.33.002260.
- [6] Ramos-Mendieta F, Halevi P. Electromagnetic surface modes of a dielectric superlattice: the supercell method. *JOSA B* 1997; 14(2): 370-381. DOI: 10.1364/JOSAB.14.000370.
- [7] Anopchenko A, Occhicone A, Rizzo R, Sinibaldi A, Figliozzi G, Danz N, Munzert P, Michelotti F. Effect of thickness disorder on the performance of photonic crystal surface wave sensors. *Opt Express* 2016; 24(7): 7728-7742. DOI: 10.1364/OE.24.007728.
- [8] Villa F, Regalado LE, Ramos-Mendieta F, Gaspar-Armenta J, Lopez-Ríos T. Photonic crystal sensor based on surface waves for thin-film characterization. *Opt Lett* 2002; 27(8): 646-648. DOI: 10.1364/OL.27.000646.
- [9] Liscidini M, Sipe JE. Analysis of Bloch-surface-wave assisted diffraction-based biosensors. *JOSA B* 2009; 26(2): 279-289. DOI: 10.1364/JOSAB.26.000279.
- [10] Sinibaldi A, Fieramosca A, Rizzo R, Anopchenko A, Danz N, Munzert P, Magistris C, Barolo C, Michelotti F. Combining label-free and fluorescence operation of Bloch surface wave optical sensors. *Opt Lett* 2014; 39(10): 2947-2950. DOI: 10.1364/OL.39.002947.
- [11] Michelotti F, Rizzo R, Sinibaldi A, Munzert P, Wächter C, Danz N. Design rules for combined label-free and fluorescence Bloch surface wave biosensors. *Opt Lett* 2017; 42(14): 2798-2801. DOI: 10.1364/OL.42.002798.
- [12] Sinibaldi A, Rizzo R, Figliozzi G, Descrovi E, Danz N, Munzert P, Anopchenko A, Michelotti F. A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals. *Opt Express* 2013; 21(20): 23331-23344. DOI: 10.1364/OE.21.023331.
- [13] Yu L, Barakat E, Sfez T, Hvozدارa L, Di Francesco J, Herzig HP. Manipulating Bloch surface waves in 2D: a platform concept-based flat lens. *Light Sci Appl* 2014; 3: e124. DOI: 10.1038/lsa.2014.5.
- [14] Yu L, Barakat E, Di Francesco J, Herzig HP. Two-dimensional polymer grating and prism on Bloch surface waves platform. *Opt Express* 2015; 23(25): 31640-31647. DOI: 10.1364/OE.23.031640.
- [15] Dubey R, Lahijani BV, Häyrynen M, Roussey M, Kuittinen M, Herzig HP. Ultra-thin Bloch-surface-wave-based reflector at telecommunication wavelength. *Photon Res* 2017; 5(5): 494-499. DOI: 10.1364/PRJ.5.000494.
- [16] Bezus EA, Doskolovich LL, Bykov DA, Soifer VA. Phase modulation of Bloch surface waves with the use of a diffraction microrelief at the boundary of a one-dimensional photonic crystal. *JETP Letters* 2014; 99(2): 63-66. DOI: 10.1134/S0021364014020040.
- [17] Doskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA. Phase-shifted Bragg gratings for Bloch surface waves. *Opt Express* 2015; 23(21): 27034-27045. DOI: 10.1364/OE.23.027034.
- [18] Doskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA, Soifer VA. Spatial differentiation of Bloch surface wave beams using an on-chip phase-shifted Bragg grating. *J Opt* 2016; 18(11): 115006. DOI: 10.1088/2040-8978/18/11/115006.
- [19] Chiang KS. Effective-index method for the analysis of optical waveguide couplers and arrays: an asymptotic theory. *J Lightw Technol* 1991; 9(1): 62-72. DOI: 10.1109/50.64924.

Author's information

Evgeni Anatolievich Bezus graduated with honors (2009) from Samara State Aerospace University (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Candidate in Physics and Mathematics (2012). Researcher at the Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute (IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”) and an associate professor at Technical Cybernetics department of Samara University. His current research interests include nanophotonics, plasmonics, and electromagnetic diffraction theory. E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Dmitry Alexandrovich Bykov graduated with honors (2009) from Samara State Aerospace University (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Doctor in Physics and Mathematics (2017). Senior researcher in Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and an associate professor at Technical Cybernetics department of Samara University. His current research interests include nanophotonics, magneto-optics of nanostructured materials, plasmonics, and electromagnetic diffraction theory. E-mail: bykovd@gmail.com.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. Doctor in Physics and Mathematics (2001). Head of Diffractive Optics laboratory at the Image Processing Systems Institute (IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”), professor at Technical Cybernetics department of Samara University. His current research interests include diffractive optics, laser information technologies, and nanophotonics. E-mail: leonid@smr.ru.

Received January 22, 2018. The final version – February 9, 2018.