

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.3.001

УДК 621.3.029.6

Исследование полосно-пропускающих фильтров на слоистых диэлектрических структурах

А. С. Волошин^{1, 2, 3} ✉, А. Ю. Ефимов³, С. А. Ходенков¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Россия, 660037, г. Красноярск, ул. им. Газеты «Красноярский рабочий»

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, Проспект Свободный, 79

³ Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38

✉ voloshin@iph.krasn.ru

Аннотация

Исследованы конструкции полосно-пропускающих фильтров на мультислойных диэлектрических структурах, состоящих исключительно из полуволновых резонаторов, а также с четвертьволновыми резонаторами по краям рассмотренных конструкций. Описаны принципы построения устройств с заданными характеристиками и объяснены основные закономерности поведения частотно-селективных свойств мультислойных структур от их конструктивных параметров. Впервые показано, что в многослойных полосно-пропускающих фильтрах на одномерных диэлектрических структурах амплитудно-частотные характеристики остаются неизменными при инверсии скачков волнового сопротивления между соседними слоями конструкции. Определены границы реализуемых характеристик фильтров с использованием имеющегося набора современных широко распространенных в радиотехнике материалов ($1 \leq \varepsilon \leq 1000$). Обнаружено, что достижимые значения относительных полос пропускания в конструкциях, состоящих исключительно из полуволновых слоев, составили от 21 до 93 %, при этом самые узкополосные фильтры можно реализовать с интерфейсными средами, обладающими характеристиками $Z_0 \approx 85$ Ом ($\varepsilon \approx 19,7$) в случае прямого скачка и $Z_0 \approx 53$ Ом ($\varepsilon \approx 50,4$) – в случае обратного. Показано, что для конструкций с крайними четвертьволновыми слоями (все внутренние слои – полуволновые) при прочих равных условиях селективные свойства становятся лучше, однако относительная ширина полосы пропускания может изменяться лишь от 45 до 115 %, при этом нижняя граница достижима только в случае с интерфейсными средами из воздуха ($Z_0 \approx 377$ Ом, $\varepsilon = 1$).

Ключевые слова

полосно-пропускающий фильтр, резонатор, относительная диэлектрическая проницаемость, волновое сопротивление

Для цитирования

Волошин А. С., Ефимов А. Ю., Ходенков С. А. Исследование полосно-пропускающих фильтров на слоистых диэлектрических структурах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):231–258. DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.001.

Investigation of bandpass filters based on layered dielectric structures

A. S. Voloshin^{1, 2, 3} ✉, A. Yu. Efimov³, S. A. Khodenkov¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russia

² Siberian Federal University, 79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

³ Kirensky Institute of Physics SB RAS, Akademgorodok 50, stroenie 38, Krasnoyarsk, 660036, Russia

✉ voloshin@iph.krasn.ru

Abstract

The designs of band-pass filters on multilayer dielectric structures consisting of half-wave resonators exclusively, as well as with quarter-wave resonators at the edges of the considered structures are investigated. The principles of constructing devices with specified characteristics are described and the basic laws of the behavior of frequency-selective properties of multilayer structures on their design parameters are explained. It is shown for the first time that in multilayer bandpass filters on one-dimensional dielectric structures, the frequency responses remain unchanged when the steps of the characteristic impedance between adjacent layers of the structure are inverted. The boundaries of the realized characteristics of filters are determined using the existing set of modern materials widely used in radio engineering ($1 \leq \varepsilon \leq 1000$). It was found that the achievable values of relative passband in constructions consisting exclusively of half-wave layers ranged from 21% to 93%, while the most narrow-band filters can be realized with interface media having characteristics of $Z_0 \approx 85 \text{ Ohm}$ ($\varepsilon \approx 19.7$) in the case of a forward step of the characteristic impedance at the edge interfaces of the structure and $Z_0 \approx 53 \text{ Ohm}$ ($\varepsilon \approx 50.4$) – in the case of the reverse step (inversely proportional to the original). It is demonstrated that for the structures with the edge quarter-wave layers (all the inner layers are half-wave), other things being equal, the selective properties become better, but the relative passband can vary from only 45% to 115%, while the lower limit is achievable only in the case of air interface media ($Z_0 \approx 377 \text{ Ohm}$, $\varepsilon = 1$).

Keywords

bandpass filter, resonator, dielectric constant, characteristic impedance

For citation

Voloshin A. S., Efimov A. Yu., Khodenkov S. A. Investigation of bandpass filters based on layered dielectric structures. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):231–258. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.001.

Введение

Хорошо известно, что диэлектрические структуры, состоящие из чередующихся слоев различных материалов, получившие название одномерных фотонных кристаллов (ОФК), обладают окнами прозрачности для электромагнитных волн в определенной области частот, между которыми располагаются полосы заграждения – фотонные запрещенные зоны. На основе таких многослойных диэлектрических структур изготавливают поляризаторы в переключающих устройствах оптоволоконной связи [1], интерференционные фильтры и зеркала для лазерной техники и оптики [2–7], которые имеют меньшие потери и больший коэффициент отражения по сравнению с аналогичными конструкциями, содержащими металлические слои и резонансные металлодиэлектрические структуры [8; 9], а также разрабатываются конструкции полосно-пропускающих фильтров, отражающих и фильтрующих покрытий, управляемых фазовращателей и высокочастотных резонаторов [10–16]. Особого внимания здесь заслуживают конструкции с четвертьволновыми слоями по краям, которые, как было показано в [17; 18], обладают более высокими частотно-селективными свойствами, при этом увеличение уровня потерь на отражение в полосе пропускания таких фильтров приводит к существенному возрастанию крутизны склонов амплитудно-частотной характеристики и к увеличению подавления СВЧ-мощности в полосах заграждения. Тем не менее следует отметить, что, например, в [17], где говорится про бездисперсионные диэлектрические среды, опубликованы значения показателя преломления $n < 1$ для них, причем в несколько раз, что характерно исключительно для металлов в оптическом диапазоне частот. В связи с этим металлические слои активно используют в составе современных интерференционных фильтров для датчиков изображения с целью достижения соответствующего контраста по показателю преломления между соседними слоями [19; 20]. Также в [17] рассмотрен лишь случай, когда электромагнитная волна падает из свободного пространства (вакуума), что не дает полного представления о возможностях рассмотренных конструкций. В связи с этим проведенные исследования носят скорее концептуальный характер – показана стратегия формирования структуры путем вариации скачков волнового сопротивления от слоя к слою. В работе [21] предложена конструкция на одномерных диэлектрических структурах, построенная на двух материалах, а высокие амплитудно-частотные характеристики в ней достигаются синтезом электрических длин диэлектрических слоев и использованием четвертьволновых слоев (зеркал)

между ними. В связи с использованием таких зеркал фильтры получают узкополосными (относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_0$ порядка нескольких процентов), которые действительно востребованы в оптике, например в технологиях лазерной очистки поверхностей, а также в приложениях машинного зрения и технологиях распознавания изображений. Помимо узкополосных фильтров в оптике, например в технологиях флуоресцентной микроскопии, востребованы также и широкополосные фильтры ($\Delta f/f_0 > 10\%$), которые по методике, предложенной в [21], реализовать очень сложно. В настоящей работе нами исследуются потенциальные возможности одномерных диэлектрических фотонно-кристаллических конструкций, состоящие исключительно из полуволновых слоев, а также из конструкций с четвертьволновыми слоями по краям, и представлены модели оптических структур, которые можно реализовать, используя распространенные в современной оптике и оптоэлектронике материалы.

Полосно-пропускающие фильтры на слоистых диэлектрических структурах

На рис. 1 представлены частотные зависимости прямых и обратных потерь (потерь на отражение), рассчитанные для двух слоистых структур, моделируемых Т-линиями без потерь [18]. Для амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), представленных на рисунке, предполагается, что электромагнитная волна падает на структуру по нормали из однородной немагнитной среды с волновым сопротивлением $Z_0 = 200$ Ом и выходит из нее также в эту среду. Такая среда может быть реализована, например, из плексигласа (оргстекла), у которого $\varepsilon = 3,5$. Волновые сопротивления слоев моделировались по формуле $Z_i = Z_0/(\varepsilon_i)^{1/2}$, где ε_i – относительные диэлектрические проницаемости каждого из слоев. Стоит отметить, что в связи с тем, что внешние (интерфейсные) среды являются одинаковыми, то и сами исследуемые конструкции будут симметричными относительно центрального слоя и, следовательно, будут иметь нечетное число слоев. Для определенности каждая конструкция состояла из пяти слоев, а центральная частота полосы пропускания была выбрана равной $f_0 = 1$ ТГц, при этом представленные одномерные слоистые конструкции были настроены как полосно-пропускающие фильтры и имели относительную ширину полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 46\%$.

Первая структура (рис. 1а) образована тремя слоями с низкими волновыми сопротивлениями (наружными и центральным), между которыми находятся слои с высоким волновым сопротив-

лением, причем все пять слоев имеют одинаковые электрические длины на центральной частоте и равны $\theta_i = 180^\circ$, т. е. являются полуволновыми резонаторами. Вторая структура (рис. 1b) отличается от первой тем, что наружные слои на центральной частоте являются четвертьволновыми ($\theta_i = 90^\circ$) или, как говорят в оптике, просветляющими.

Если вычислить коэффициенты крутизны низкочастотного k_l и высокочастотного k_h склонов полосы пропускания по формулам, приведенным в [22], то для АЧХ, показанных на рис. 1, крутизна склонов у второй конструкции окажется несколько выше ($k_{l1} = k_{h1} = 2,20$, $k_{l2} = k_{h2} = 2,55$). Сравнивая суммарную толщину структуры, следует сказать, что вторая конструкция получилась существенно тоньше. Для определенности, на указанной частоте $f_0 = 1$ ТГц суммарная толщина конструкции из полуволновых слоев составила $l_{\Sigma 1} = 0,399$ мм, в то время как для конструкции с четвертьволновыми слоями по краям – всего $l_{\Sigma 2} = 0,043$ мм, т. е. почти на порядок меньше.

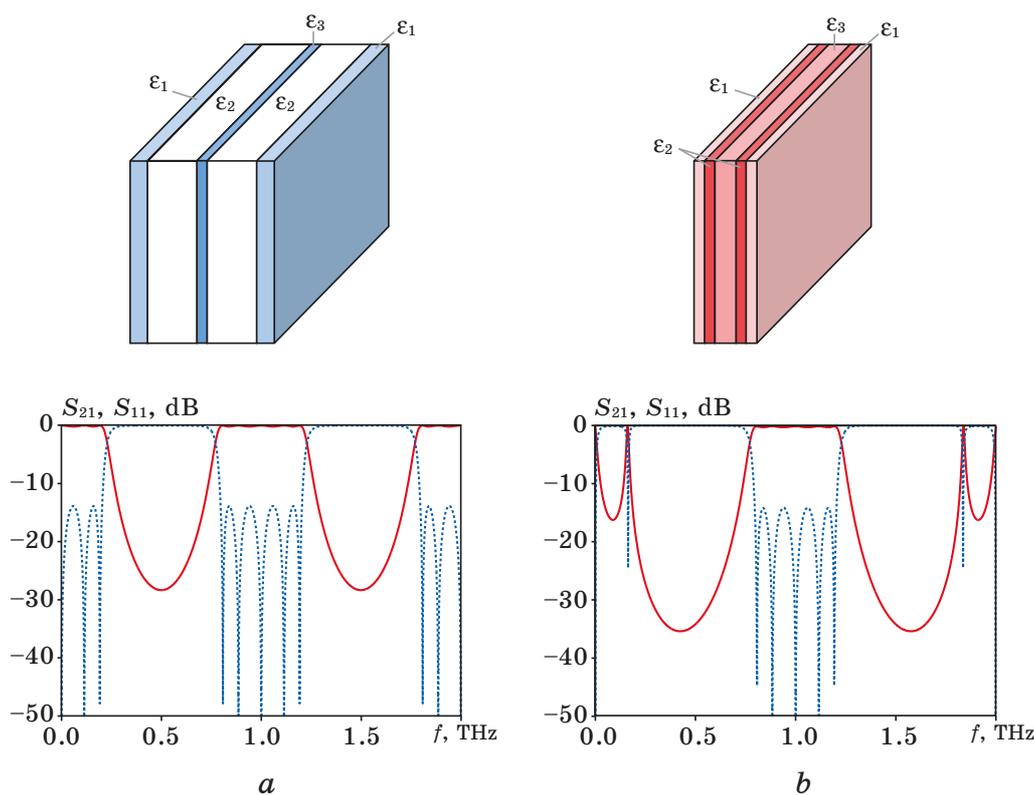


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики для двух конструкций частотно-селективных слоистых структур:
a – состоящих исключительно из полуволновых слоев;
b – крайние слои – четвертьволновые

Fig. 1. Frequency responses for two designs of frequency-selective layered structures:
a – all the layers are half-wave, *b* – edge layers are quarter-wave

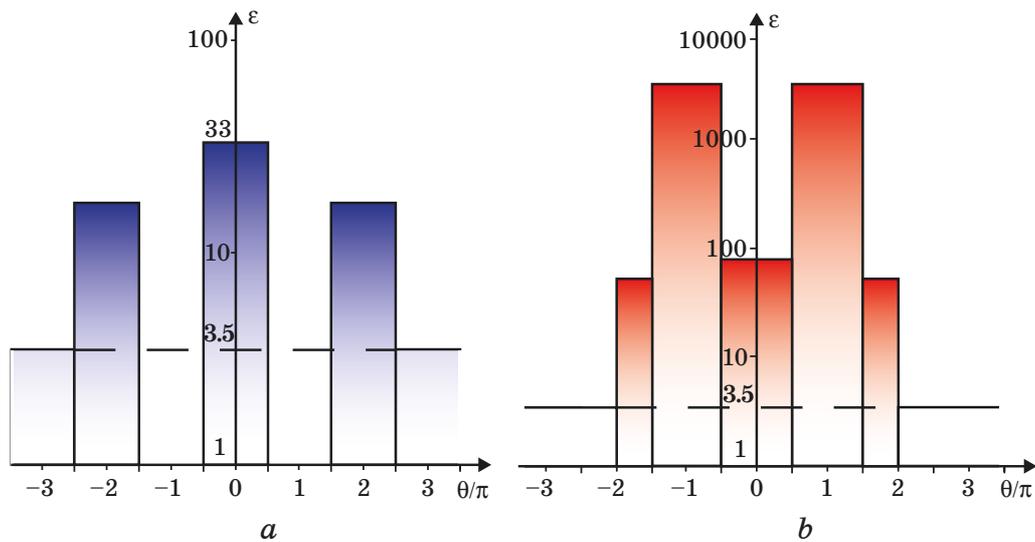


Рис. 2. Профили относительной диэлектрической проницаемости конструкций слоистых структур: *a* – все резонаторы в структуре полуволновые, *b* – крайние резонаторы – четвертьволновые

Fig. 2. Dielectric constant profiles of layered structures: *a* – all the resonators are half-wave, *b* – edge resonators are quarter-wave

Более того, обращает на себя внимание тот факт, что порядок скачков волнового сопротивления от слоя к слою у обеих конструкций за исключением границ интерфейсных сред с крайними слоями прямо противоположный. Это наглядно показано на рис. 2, где показаны профили относительных диэлектрических проницаемостей каждого из слоев двух представленных выше конструкций. По горизонтальной оси отложена оптическая толщина, которая соответствует набегу фазы по мере распространения электромагнитной волны сквозь структуру, отнесенная к π – базовой оптической толщине, соответствующей полуволновому слою на центральной частоте полосы пропускания. Шкала значений ϵ на рисунке дополнена градиентной закраской соответствующих колонок, где более темный цвет соответствует большему значению относительной диэлектрической проницаемости. Также эта шкала представлена в логарифмическом масштабе и несколько отличается на рисунках: по основанию 10 на рис. 2*a* и по основанию 100 на рис. 2*b*. Это позволяет говорить о том, что при одинаковой ширине полосы пропускания во втором случае диэлектрические проницаемости оказываются на порядок выше. Анализируя профили структур на рис. 2, также можно сделать еще один важный вывод о том, что в структурах обязательно будут слои, диэлектрическая проницаемость которых меньше, чем в интерфейсных средах. Иначе говоря, в случае, если интерфейсной средой будет воздух ($\epsilon = 1$), то как мини-

мум конструкцию, состоящую исключительно из полуволновых слоев, реализовать не удастся. На рис. 2а как раз представлен профиль конструкции из полуволновых слоев с максимально узкой полосой пропускания, реализуемой для интерфейсной среды с $\varepsilon = 3,5$. Это обусловлено использованием диэлектрической среды с минимально возможной диэлектрической проницаемостью (воздух), характеризующей предел по скачку волновых сопротивлений по отношению к соседним слоям. Как видно, на рис. 2а, это четные слои, для которых $0,5 < |\theta/\pi| < 1,5$.

С точки зрения параметров АЧХ (коэффициенты крутизны склонов полосы пропускания, ширина полос заграждения), конструкция с четвертьволновыми резонаторами по краям является несколько более выигрышной по отношению к аналогичной, состоящей исключительно из полуволновых слоев, однако с точки зрения реализации первая конструкция более легко реализуема. Для наглядности, в соответствии со структурами обеих конструкций, представленных на рис. 2, в табл. 1 представлены значения относительных диэлектрических проницаемостей всех пяти слоев. Видно, что во второй конструкции есть слои из материала со значениями $\varepsilon_i > 1000$, которые трудно достижимы в оптическом диапазоне с технологической точки зрения. На сегодняшний день максимально возможными значениями ε в инфракрасном диапазоне обладают оксиды перовскитов ($\varepsilon \approx 80$), в то время как в радиодиапазоне (до 10^5 Гц) они могут иметь рекордные значения – до $\varepsilon \approx 10^5$ [23].

Таблица 1. Значения диэлектрических проницаемостей слоев для двух 5-слойных конструкций с $\Delta f/f_0 = 46\%$

Table 1. Values of dielectric constants of the layers for two 5-layer structures with $\Delta f/f_0 = 46\%$

Номер конструкции	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5
1 – все слои $\lambda/2$ ($\theta_i = \pi$)	17	1	33	1	17
2 – с $\lambda/4$ слоями по краям	52	3113	80	3113	52

Скачок волнового сопротивления на границе раздела двух диэлектрических сред

Известно, что при нормальном падении электромагнитной волны на границу раздела двух изотропных сред баланс мощностей отраженной и прошедшей волн определяется исключительно значением волновых сопротивлений этих сред [24]. Отсюда следует, что абсолютно одинаковые селективные свойства у одномерных фотонных структур (при полной свободе выбора волновых сопротивлений слоев и интерфейсных сред)

можно получить двумя способами. В качестве подтверждения этого факта рассмотрим две идентичные однослойные структуры, которые являются, например, полуволновыми на рабочей частоте f_0 . При этом в первой, структура которой показана на рис. 3а, волновое сопротивление интерфейсных сред равно Z_0 , а полуволнового слоя – Z . Во второй структуре, представленной на рис. 3б, наоборот, сопротивление интерфейсных сред равно Z , а полуволнового слоя – Z_0 . Пусть для определенности $Z_0 > Z$. Несложно убедиться и показать, что обе конструкции имеют абсолютно одинаковые амплитудно-частотные характеристики, которые в качестве примера показаны на рис. 3с. Для определенности, здесь $Z_0 = 4Z$. По горизонтальной оси на рисунке отложена относительная частота f/f_0 , где f_0 – частота первой моды (на этой частоте по толщине центрального слоя укладывается ровно половина длины волны), которая, очевидно, может быть выбрана в данном случае произвольно.

A. S. Voloshin, A. Yu. Efimov, S. A. Khodenkov | Investigation of bandpass filters based on layered dielectric structures

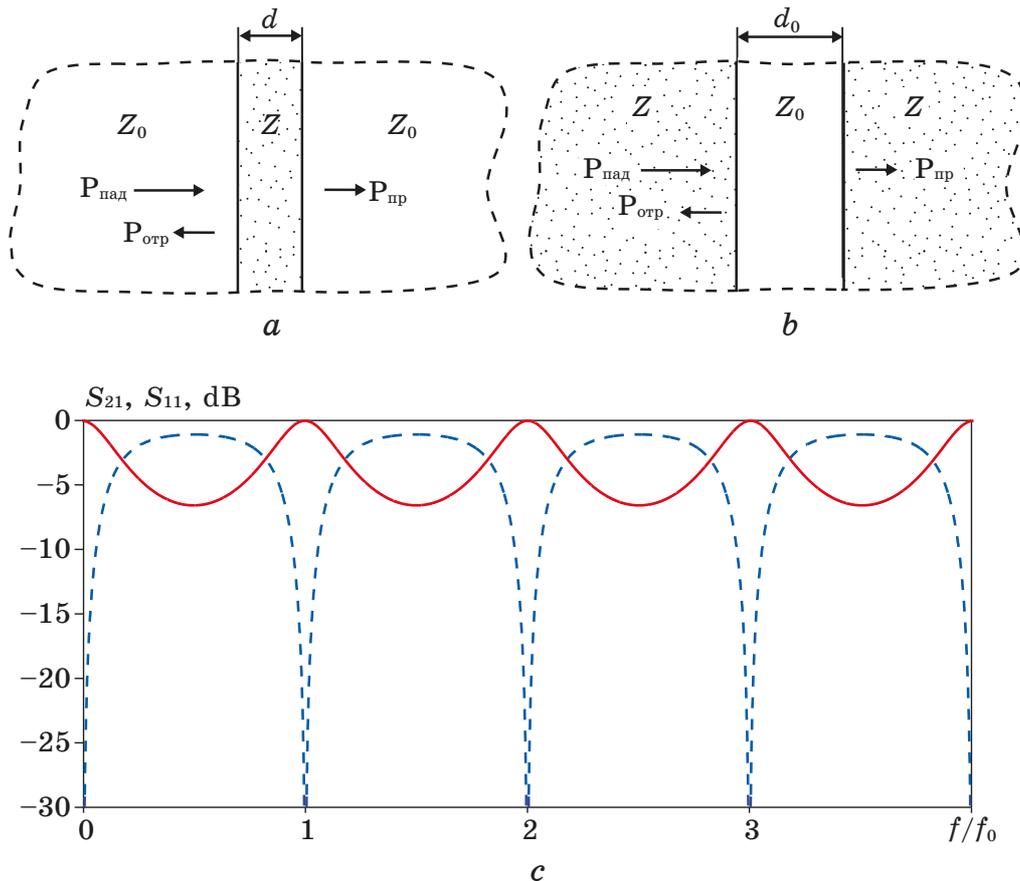


Рис. 3. Схемы однослойных структур с одинаковой АЧХ (а, б) и их АЧХ для случая $Z_0 = 4Z$ (с)

Fig. 3. Schemes of single-layer structures with the same frequency responses (a, b) and their frequency responses for $Z_0 = 4Z$ (c)

Как показывает анализ подобных конструкций, величина отраженной и прошедшей мощностей будут определяться исключительно отношением волновых сопротивлений граничащих сред, в данном случае – это величины Z/Z_0 или Z_0/Z [25]. В подтверждение этого факта ниже приведены коэффициенты выражения для комплексных коэффициентов отражения и прохождения для однослойной конструкции (рис. 3а):

$$\begin{aligned}\dot{S}_{11} &= \frac{j \cdot (Z/Z_0 - Z_0/Z) \cdot \sin(\beta d)}{2 \cos(\beta d) + j \cdot (Z/Z_0 + Z_0/Z) \cdot \sin(\beta d)}, \\ \dot{S}_{21} &= \frac{2}{2 \cos(\beta d) + j \cdot (Z/Z_0 + Z_0/Z) \cdot \sin(\beta d)},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ – коэффициент фазы, λ – длина волны в центральном слое, d – толщина этого слоя, как показано на рис. 3а.

Очевидно, что для обратного противоположного случая, когда среды с волновыми сопротивлениями Z_0 и Z поменяны местами, представленного на рис. 3б, выражения для S -параметров будут похожими:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{11} &= \frac{j \cdot (Z_0/Z - Z/Z_0) \cdot \sin(\beta_0 d_0)}{2 \cos(\beta_0 d_0) + j \cdot (Z_0/Z + Z/Z_0) \cdot \sin(\beta_0 d_0)}, \\ \dot{S}_{21} &= \frac{2}{2 \cos(\beta_0 d_0) + j \cdot (Z_0/Z + Z/Z_0) \cdot \sin(\beta_0 d_0)},\end{aligned}\quad (2)$$

где аналогично $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ – коэффициент фазы, λ_0 – длина волны в центральном слое, d_0 – толщина этого слоя (рис. 3б).

Равенство АЧХ для обоих случаев обусловлено тем, что, несмотря на разницу волновых сопротивлений полуволновых слоев, их толщина выбирается так, чтобы оптические толщины этих слоев на любой частоте были одинаковыми, т. е. $\beta_0 d_0 = \beta d$. Несложно показать, что при большем количестве слоев поведение амплитудно-частотных характеристик конструкций будет описываться формулами, подобными (1) и (2), где коэффициенты перед тригонометрическими функциями являются безразмерными и определяются преимущественно скачками волновых сопротивлений. Таким образом, показано, что амплитудно-частотные характеристики одномерных многослойных диэлектрических структур всецело определяются соотношением волновых сопротивлений соседних слоев.

Известно, что на границе раздела двух сред с волновыми сопротивлениями Z_0 и Z комплексный коэффициент отражения при нормальном падении электромагнитной волны определяется выражением:

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}.$$

Далее введем для удобства безразмерный коэффициент – скачок волнового сопротивления на границе раздела двух сред $x = Z/Z_0$. Тогда модуль коэффициента отражения будет определяться выражением:

$$|\dot{\Gamma}| = \left| \frac{x-1}{x+1} \right|.$$

На рис. 4, где показан график функции $|\dot{\Gamma}| = f(x)$ для пассивных сред ($|\dot{\Gamma}| \leq 1$), видно, что одних и тех же значений величина $|\dot{\Gamma}|$ достигает при двух значениях: x_1 и x_2 , причем $x_1 = 1/x_2$. При этом величина этих скачков, при которых, например, $|\dot{\Gamma}| = |\Gamma_0|$, как показано на рис. 4, будет определяться выражением:

$$x_1 = \frac{1}{x_2} = \frac{|\Gamma_0| - 1}{|\Gamma_0| + 1}.$$

Как видно из этого выражения, получившиеся величины x скачков волнового сопротивления на границе раздела соответствуют неравенствам: $x_1 < 1$; $x_2 > 1$. Наглядно этот факт продемонстрирован на рис. 4.

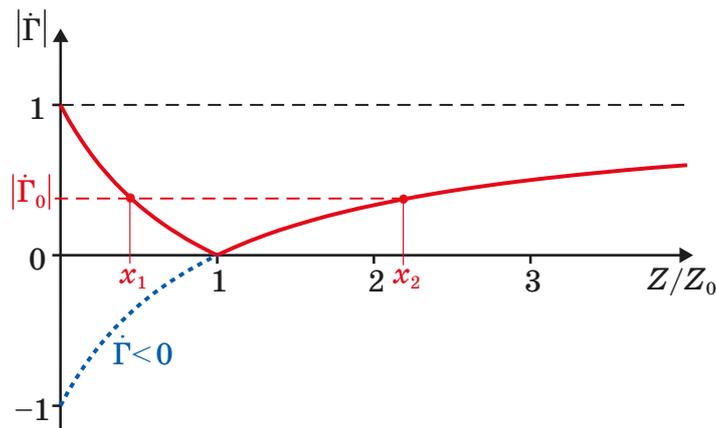


Рис. 4. График зависимости модуля коэффициента отражения от скачка волнового сопротивления $x = Z/Z_0$

Fig. 4. Dependence of the reflection coefficient modulus on the step of the characteristic impedance $x = Z/Z_0$

Если рассматривать самую первую границу раздела (по ходу распространения электромагнитных волн) – падение на крайние слои многослойной структуры из интерфейсной среды с сопротивлением Z_0 , то более часто встречающимся случаем в практике является ситуация, когда $Z_0 > Z$, т. е. для $x = x_2 > 1$. Случай $x = x_1 < 1$ на самых крайних границах раздела в оптических многослойных конструкциях практически не встречается. В связи с этим скачок, соответствующий $x_2 > 1$, назовем прямым, а идентичный и обратно пропорциональный ему по ве-

личине $x_1 < 1$ – обратным. Частный случай, когда $x_1 = 1/x_2 = 1$, соответствующий полному согласованию волновых сопротивлений на границе раздела двух сред ($Z = Z_0$), в рамках данной работы не представляет научного интереса и в дальнейшем не рассматривается.

Результаты исследований

Согласно соображениям, представленным в предыдущем разделе, можно сделать главный вывод о том, что независимо от количества слоев абсолютно одинаковыми АЧХ могут обладать одновременно две конструкции с одинаковым количеством слоев, в которых величина скачков волновых сопротивлений всех соседних слоев взаимно обратна по величине соответственно. Таким образом, возможности конструирования слоистых селективных структур (одномерных фотонных кристаллов, а также частотно-селективных поверхностей) с учетом возможностей современных технологий расширяются.

В связи с этим представляет интерес исследование частотно-селективных свойств многозвенных полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах двух конструкций: с полуволновыми резонаторами в слоистой структуре и с четвертьволновыми по ее краям. Как уже было сказано, эти конструкции являются известными, однако оценка их конструктивных возможностей (на предмет использования сред с различными диэлектрическими проницаемостями) ранее не проводилась. С этой целью были рассмотрены диэлектрические структуры также без потерь, содержащие 3, 5, 7 и 9 слоев.

В качестве критерия оценки возможности реализации таких конструкций был взят диапазон значений относительной диэлектрической проницаемости слоев $1 \leq \varepsilon_i \leq 1000$. Иначе говоря, ни один из слоев конструкций не может иметь ε меньше 1 и больше 1000. Указанный диапазон значений соответствует диэлектрическим средам, которые могут быть созданы с помощью современных технологий. Именно граничные значения $\varepsilon_i = 1$ и $\varepsilon_i = 1000$ характеризовали конструкции с наименьшей возможной шириной полосы пропускания. Верхнюю границу по $\Delta f/f_0$ характеризовал случай, когда минимумы характеристики S_{21} в соседних полосах заграждения достигали критического значения -3 дБ, характеризующего ситуацию, в которой основная рабочая полоса пропускания как бы «сливается» с соседними (паразитными). Также следует отметить, что все слои в конструкциях фильтров моделировались как идеальные диэлектрики, т. е. как среды, не имеющие диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = 0$).

В рамках этих значений был настроен ряд конструкций одномерных фильтрующих покрытий обоих вышеописанных типов (в первом случае все слои полуволновые, во втором – все слои полуволновые за исключением крайних, которые взяты четвертьволновыми) для разных значений интерфейсных сред Z_0 . Все конструкции настраивались путем параметрического синтеза на моделях из T -линий, реализованных в схемотехническом модуле программы «Microwave Office». Главными критериями настройки выступали значения центральной частоты полосы пропускания $f_0 = 1$ ТГц, а также максимумов обратных потерь в полосе пропускания $S_{11\max} = -14$ дБ, которые настраивались с точностью $\Delta S_{11\max} = \pm 0,02$ дБ. Далее оценивалась относительная ширина полосы пропускания фильтров $\Delta f/f_0$ и соответствие получившимся в ходе синтеза конфигурациям параметров слоев.

Известно, что на ширину полосы пропускания фильтров влияет именно скачок волнового сопротивления на границах раздела интерфейсных сред с крайними слоями. При этом чем величина этого скачка будет больше, тем эже будет ширина полосы пропускания, и, соответственно, тем больше будет диапазон реализуемых значений $\Delta f/f_0$ для заданного волнового сопротивления интерфейсной среды Z_0 . В связи с этим предварительно для 5-слойных конструкций была сделана оценка нижнего предела диапазона значений $\Delta f/f_0$ от величины волнового сопротивления Z_0 . На рис. 5а и 5б представлены графики кривых $\Delta f/f_0(Z_0)$ для случаев прямого ($Z_0 > Z_1$) и обратного ($Z_0 < Z_1$) скачков соответственно в конструкциях, состоящих исключительно из полуволновых слоев. Здесь Z_1 – это волновое сопротивление крайних слоев. Как показали исследования, в связи с разным характером скачка волнового сопротивления от слоя к слою в полуволновых конструкциях в случае прямого скачка на величину нижнего предела ширины полосы пропускания влияет как нижняя граница по относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\min} = 1$, так и верхняя – $\varepsilon_{\max} = 1000$. На рис. 5а этим случаям соответствуют монотонно возрастающая кривая, показанная круглыми маркерами синего цвета и, напротив, монотонно спадающий график, показанный маркерами зеленого цвета, соответственно. Пересечение этих зависимостей ($\varepsilon_{\min} = 1$, $\varepsilon_{\max} = 1000$) характеризует минимум, равный $\Delta f/f_0 = 20,8\%$, который наблюдается при $Z_0 \approx 85$ Ом, что соответствует среде с $\varepsilon = 19,7$. Именно при этих значениях волнового сопротивления и соответствующей относительной диэлектрической проницаемости интерфейсной среды можно реализовать самую узкую полосу пропускания в рамках значений $1 \leq \varepsilon_i \leq 1000$ слоев для полуволновых конструкций.

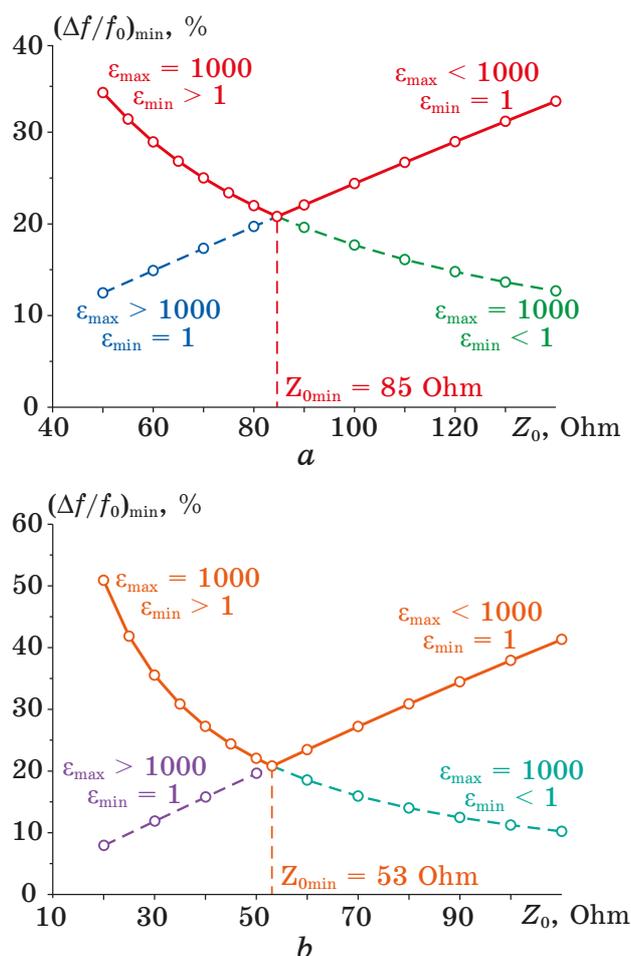


Рис. 5. Зависимости нижнего предела относительной ширины полосы пропускания от величины волнового сопротивления интерфейсной среды для случаев прямого (а) и обратного скачков (b) волнового сопротивления на крайних границах раздела сред для полуволновых 5-слойных фильтрующих структур

Fig. 5. Dependences of the lower limit of the relative bandwidth on the value of the characteristic impedance of the interface medium for cases of forward (a) and reverse steps (b) of the characteristic impedance at the edge media interface boundaries for half-wave 5-layer filter structures

Как видно на рис. 5b, в случае обратного скачка зависимости $\Delta f/f_0(Z_0)$ имеют аналогичный характер с ростом Z_0 , при этом, как показала оценка, достижимый минимум по относительной ширине полосы пропускания (в рамках значений $1 \leq \epsilon_i \leq 1000$) здесь также равен $\Delta f/f_0 = 20,8$ %, однако достигается он при $Z_0 \approx 53$ Ом, что соответствует значению $\epsilon = 50,4$.

Аналогично на рис. 6 представлены результаты оценки нижнего предела ширины полосы пропускания для конструкций с четвертьволновыми слоями по краям для обоих случаев скачков волнового сопротивления на границах раздела крайних сло-

ев с интерфейсными средами. Видно, что характер зависимостей монотонный, при этом самые узкие полосы можно реализовать в этом случае, если четные слои будут иметь $\varepsilon_{\max} = 1000$ в случае прямого скачка ($Z_0 > Z_1$) с минимально возможным значением $(\Delta f/f_0)_{\min} = 45\%$, соответствующим значению $Z_0 \approx 377$ Ом (воздух), или $\varepsilon_{\min} = 1$ – в случае обратного скачка ($Z_0 < Z_1$), для которого минимально возможное значение $(\Delta f/f_0)_{\min}$ определяется исключительно значением волнового сопротивления Z_0 . Следует отметить, что, как показали исследования, обнаруженные закономерности практически не зависят от количества слоев в структурах обоих типов.

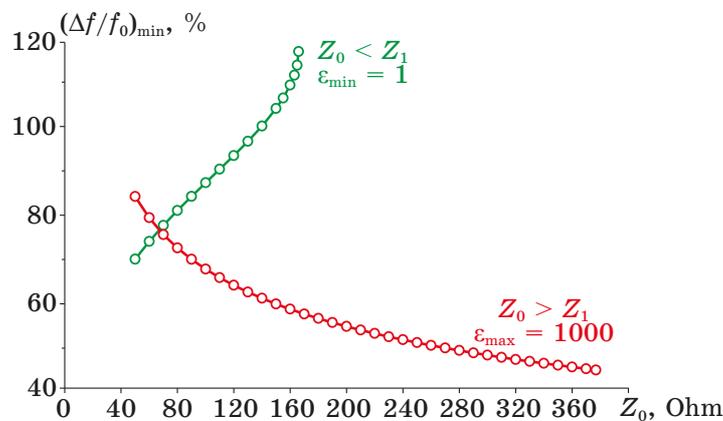


Рис. 6. Зависимости нижнего предела относительной ширины полосы пропускания от величины волнового сопротивления интерфейсной среды для полуволновых 5-слойных фильтрующих структур с четвертьволновыми слоями по краям

Fig. 6. Dependences of the lower limit of the relative bandwidth on the value of the characteristic impedance of the interface medium for half-wave 5-layer filter structures with quarter-wave edge layers

Очевидно, в рамках оценки потенциальных возможностей представляет интерес соотношение величин диэлектрических проницаемостей слоев в каждой из конструкций рассматриваемых полосно-пропускающих фильтров. На рис. 7 представлены графики зависимостей относительной ширины полосы пропускания 7-слойных фильтров $\Delta f/f_0$ от величины ε каждого из слоев при $Z_0 = 100$ Ом ($\varepsilon = 14,2$). При этом на рис. 7а маркерами показаны точки, соответствующие синтезированным конструкциям фильтров для случая прямого скачка ($Z_0 > Z_1$), а на рис. 7б – для обратного ($Z_0 < Z_1$). Слои в структуре пронумерованы так же, как и на рис. 1, т. е. от внешнего к внутреннему, при этом сама структура также является симметричной по отношению к центральному слою. В данном случае это будет 4-й слой. Маркерами теплых тонов на рисунке показаны точки для конструкций фильтров, состоящих исключительно из полуволновых слоев, марке-

рами холодных тонов – для конструкций с четвертьволновыми слоями по краям. Линиями на рисунке показаны аппроксимационные графики для зависимостей $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$, соответствующих максимальным и минимальным значениям ε_i в конструкции, состоящей исключительно из полуволновых слоев. Уравнения аппроксимационных кривых также показаны на рисунке. Для удобства шкала для ε_i приведена на рис. 7 в логарифмическом масштабе. Видно, что для реализации конструкций фильтров обоих типов с одними и теми же значениями ширины полос пропускания $\Delta f/f_0$ в случае обратного скачка диапазон значений по ε получается на порядок уже, чем для прямого.

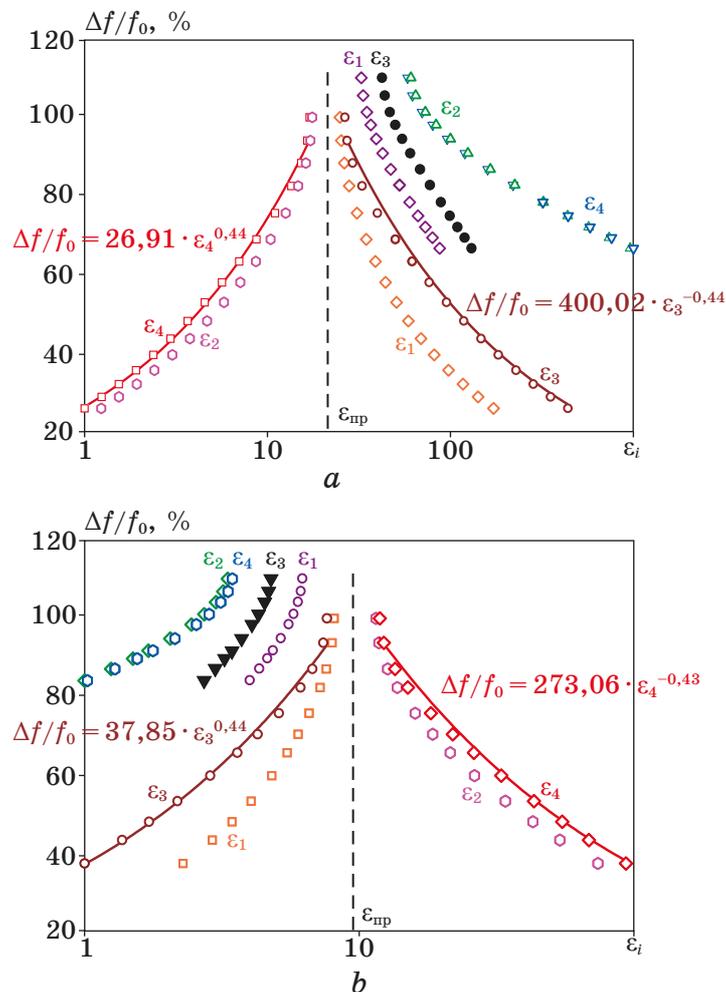


Рис. 7. Зависимости относительной ширины полосы пропускания от величины относительной диэлектрической проницаемости всех слоев 7-слойной структуры при $Z_0 = 100$ Ом для случая прямого (а) и обратного скачков (б) волнового сопротивления на крайних границах раздела сред

Fig. 7. Dependences of the relative bandwidth on the relative permittivity of all the layers of the 7-layer structure at $Z_0 = 100$ Ohm for the case of forward (a) and reverse steps (b) of the characteristic impedance at the edge media interface boundaries

Вертикальными штриховыми линиями на обоих графиках рис. 7 представлены значения $\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}}$, к которым стремятся значения по ε для всех слоев при стремлении относительной ширины полосы пропускания $\Delta f/f_0$ к 100 % при заданном уровне согласования по величине обратных потерь $S_{11} \leq S_{11\text{max}} = -14$ дБ. Согласно (1) и (2) величину $\varepsilon_{\text{пр}}$ легко найти из соответствующих значению $S_{11\text{max}} = -14$ дБ скачков волнового сопротивления Z/Z_0 для однослойных конструкций, которые будут иметь вид:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^2 = \frac{1 - \left|\dot{S}_{11}\right|_{\text{max}}}{1 + \left|\dot{S}_{11}\right|_{\text{max}}}, \text{ для } Z < Z_0, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^2 = \frac{1 + \left|\dot{S}_{11}\right|_{\text{max}}}{1 - \left|\dot{S}_{11}\right|_{\text{max}}}, \text{ для } Z > Z_0. \quad (4)$$

Согласно этим формулам для $S_{11\text{max}} = -14$ дБ и $Z_0 = 100$ Ом в случае прямого скачка $\varepsilon_{\text{пр}} = 21,30$, а обратного – $\varepsilon_{\text{пр}} = 9,48$. Как видно на рис. 7, все представленные зависимости $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$ как бы «стремятся» к этим значениям независимо от характера скачка волновых сопротивлений. На самом деле, в пределе все зависимости $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$ пересекутся в точке $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{пр}}$, при этом АЧХ структур будет подобна той, что представлена на рис. 3с, с той разницей, что максимумы обратных потерь (кривой, показанной точками) будут равны значениям $S_{11\text{max}} = -14$ дБ. Также следует отметить, что для конструкций фильтров, состоящих исключительно из полуволновых слоев, стремление значений ε к предельному значению $\varepsilon_{\text{пр}}$ наблюдается с обеих сторон, в то время как для конструкций фильтров с четвертьволновыми слоями это приближение с ростом ширины полосы пропускания абсолютно для всех слоев проявляется только с одной из сторон: со стороны больших значений в случае прямого скачка и со стороны меньших значений – в случае обратного. Иначе говоря, в конструкциях фильтрующих покрытий 2-го типа все слои имеют ε , либо превосходящие величину относительной диэлектрической проницаемости интерфейсных сред $\varepsilon_{\text{ис}}$, как и показано на рис. 3б, что соответствует случаю прямого скачка, либо все слои по ε меньше, чем $\varepsilon_{\text{ис}}$ – в случае обратного скачка. Также следует отметить, что асимптотическое стремление зависимостей $\Delta f/f_0(\varepsilon)$ к прямой $\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}}$ в конструкциях 1-го типа носит симметричный характер в логарифмической шкале. Об этом говорят показатели степенных функций, которыми относительно точно эти зависимости аппроксимируются. Как видно на рис. 7, показатели функций, описывающих зависимости $\Delta f/f_0(\varepsilon_3)$ (максимальные значения) и $\Delta f/f_0(\varepsilon_4)$ (минимальные

значения), имеют прямо противоположные знаки, а их модули совпадают с точностью до 0,01. Уравнения представленных аппроксимационных кривых имеют вид:

$$\Delta f/f_0 = 400,02 \cdot \varepsilon_3^{-0,44}, \quad (5)$$

$$\Delta f/f_0 = 26,91 \cdot \varepsilon_4^{0,44}. \quad (6)$$

Хорошее совпадение модулей показателей степенных функций в (5) и (6) также говорит о высоком уровне синтеза конструкций, которым соответствуют все точки на графиках, представленных на рис. 7.

Аналогично в случае обратного скачка уравнения аппроксимационных кривых будут иметь вид:

$$\Delta f/f_0 = 37,85 \cdot \varepsilon_3^{0,44}, \quad (7)$$

$$\Delta f/f_0 = 273,06 \cdot \varepsilon_4^{-0,43}. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) также наблюдается относительно точное совпадение модулей показателей степенных функций, причем не только друг с другом, но и с аналогичными показателями в выражениях для случая прямого скачка, как видно из (5) и (6). Последнее подтверждает утверждение о том, что на ширину полосы пропускания одномерных полосно-пропускающих фильтров, состоящих из диэлектрических слоев, влияет главным образом скачок волнового сопротивления между соседними слоями, который для достижения заданной полосы пропускания можно сделать как больше, так и меньше единицы.

В конструкциях 2-го типа особенностью является тот факт, что именно четные слои имеют максимальные значения по ε в случае прямого скачка и минимальные значения в случае обратного, как показано на рис. 7. При этом, как видно, значения диэлектрических проницаемостей 2-го и 4-го слоев мало отличаются друг от друга во всем диапазоне значений $\Delta f/f_0$ для обоих типов скачков волнового сопротивления на границе интерфейсных сред с крайними слоями. Учитывая этот факт, можно сделать важный вывод о том, что четные слои в конструкциях фильтров этого типа можно делать из одного и того же материала. В принципе, подобный факт уже отмечался ранее, в литературе, но для конструкций с большим числом слоев, больше 20 [18]. Более того, сравнивая графики зависимостей $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$ на рис. 7a и 7b, следует отметить, что для достижения одних и тех же полос пропускания верхняя граница диапазона по ε_i в случае обратного скачка волнового сопротивления на границах раздела крайних резонаторов с интерфейсными средами практически на порядок меньше, чем для прямого.

Для демонстрации предельных случаев, характеризуемого асимптотами $\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}}$ на рис. 7, в качестве примера на рис. 8 показаны АЧХ и структуры конструкций из полуволновых слоев (а, b) и конструкций с четвертьволновыми слоями по краям (с, d) в случаях для ширин полос пропускания $\Delta f/f_0 = 60\%$ (а, с) и в предельном случае, характеризуемым значением $S_{11\text{max}} = -14$ дБ (b, d). Как уже было сказано ранее, полуволновые конструкции при прочих равных условиях всегда получают толще. Это же наблюдается и в пределе, при $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{пр}}$, где их суммарная толщина будет равна $\theta_{\Sigma} = N \cdot \pi$, в то время как у конструкций с четвертьволновыми слоями по краям $\theta_{\Sigma} = (N - 1) \cdot \pi$, где N – порядок фильтра, соответствующий количеству слоев в структурах обоих типов. На рисунке представлены АЧХ для случая $N = 5$. На вставках показаны схемы структур, где $\varepsilon_{\text{ис}}$ обозначены интерфейсные среды. Не сложно показать, что при аналогичной настройке представленных конструкций, но при другом значении $S_{11\text{max}}$ в рабочей полосе частот, поведение зависимостей $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$ на рис. 7 будет аналогичным, только значение $\varepsilon_{\text{пр}}$ согласно (3) и (4) будет другим.

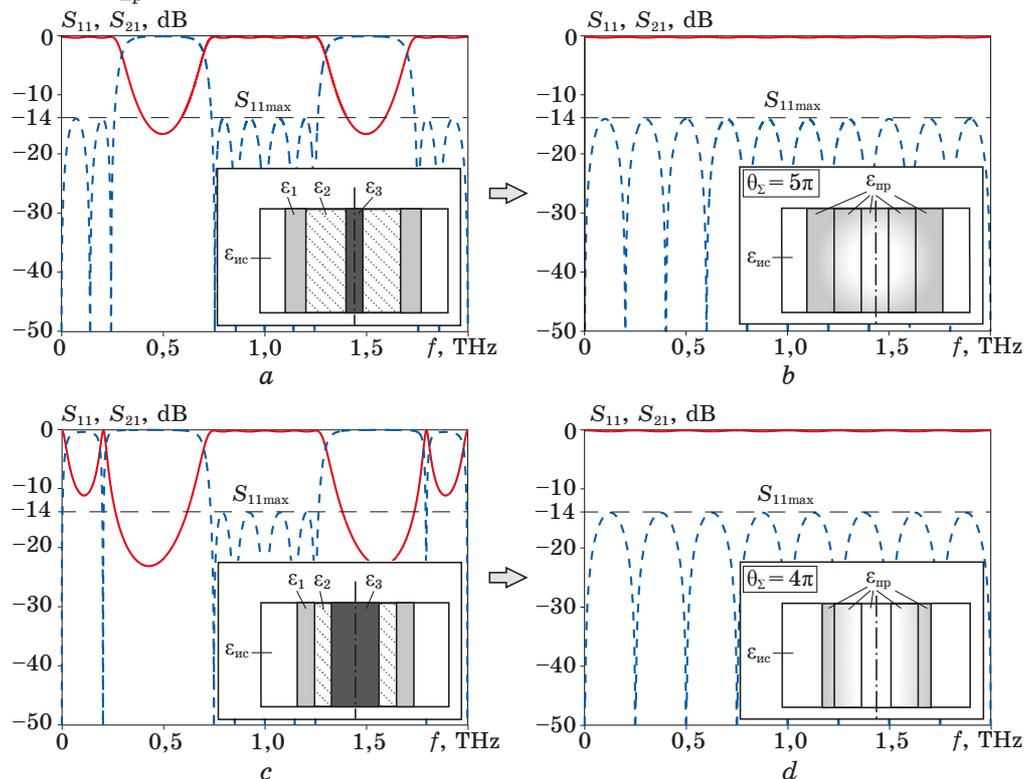


Рис. 8. АЧХ 5-слойных полосно-пропускающих фильтров с полосой $\Delta f/f_0 = 60\%$ (а, с) и в предельном случае для $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{пр}}$ (b, d), а также структуры конструкций

Fig. 8. Frequency responses of 5-layer bandpass filters with a passband of 60% (а, с) and in the extreme case for $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{lim}}$ (b, d), as well as the design structures

Очевидно, что с ростом числа слоев селективные свойства конструкций одномерных полосно-пропускающих фильтров улучшаются, что было не раз показано в научных работах последних лет [10; 11; 16; 17]. Представляет интерес, насколько сильно изменятся обнаруженные закономерности поведения параметров АЧХ от ε_i в зависимости от числа слоев. На рис. 9 представлены зависимости относительной ширины полосы пропускания от величины относительной диэлектрической проницаемости для 5- и 9-слойных диэлектрических структур для интерфейсной среды с $Z_0 = 100$ Ом, также в случае прямого и обратного скачков волнового сопротивления на границах раздела крайних слоев с интерфейсными средами. Сравнивая представленные на рис. 9 зависимости $\Delta f/f_0(\varepsilon)$ с аналогичными на рис. 7, следует отметить похожий характер всех графиков, при этом в 9-слойной конструкции графики для четных и нечетных слоев (за исключением крайних, с ε_1) практически сливаются друг с другом, что особо характерно для конструкций 2-го типа, с четвертьволновыми слоями по краям. Здесь можно также сделать вывод о том, что указанные слои можно делать из одного и того же материала. Что касается конструкций 1-го типа, в них границы графиков $\Delta f/f_0(\varepsilon_i)$ хорошо описываются зависимостями $\Delta f/f_0 \sim \varepsilon^{0,5}$ со стороны наименьших значений и $\Delta f/f_0 \sim \varepsilon^{-0,5}$ – со стороны наибольших значений по ε , причем независимо от количества слоев. Об этом отчетливо говорит хорошее сходство показателей степеней при ε_i в выражениях аппроксимационных функций, представленных также на графиках.

Представляет интерес случай, если интерфейсной средой будет выступать воздух ($\varepsilon = 1$, $Z_0 \approx 377$ Ом). Как показали исследования, в этом случае также в рамках допустимых значений $1 \leq \varepsilon_i \leq 1000$ можно реализовать только конструкции с четвертьволновыми слоями по краям и, очевидно, прямым скачком по ε на границах интерфейсных сред и крайних слоев (рис. 6). В качестве подтверждения на рис. 10 представлен ряд зависимостей $\Delta f/f_0(\varepsilon)$, построенных для 5-слойных конструкций с интерфейсной средой из воздуха ($\varepsilon_{ис} = 1$). Видно, что в этом случае можно реализовать фильтры с относительной шириной полосы пропускания в диапазоне $45\% < \Delta f/f_0 < 115\%$, при этом относительные диэлектрические проницаемости слоев для этого ряда конструкций будут лежать в диапазоне $2,47 \leq \varepsilon_i \leq 1000$. Вертикальная пунктирная кривая здесь так же, как и на рис. 7 и 9, соответствует предельному значению $\varepsilon = \varepsilon_{пр}$ (при $S_{11max} = -14$ дБ), которое в данном случае равно $\varepsilon_{пр} = 1,5$.

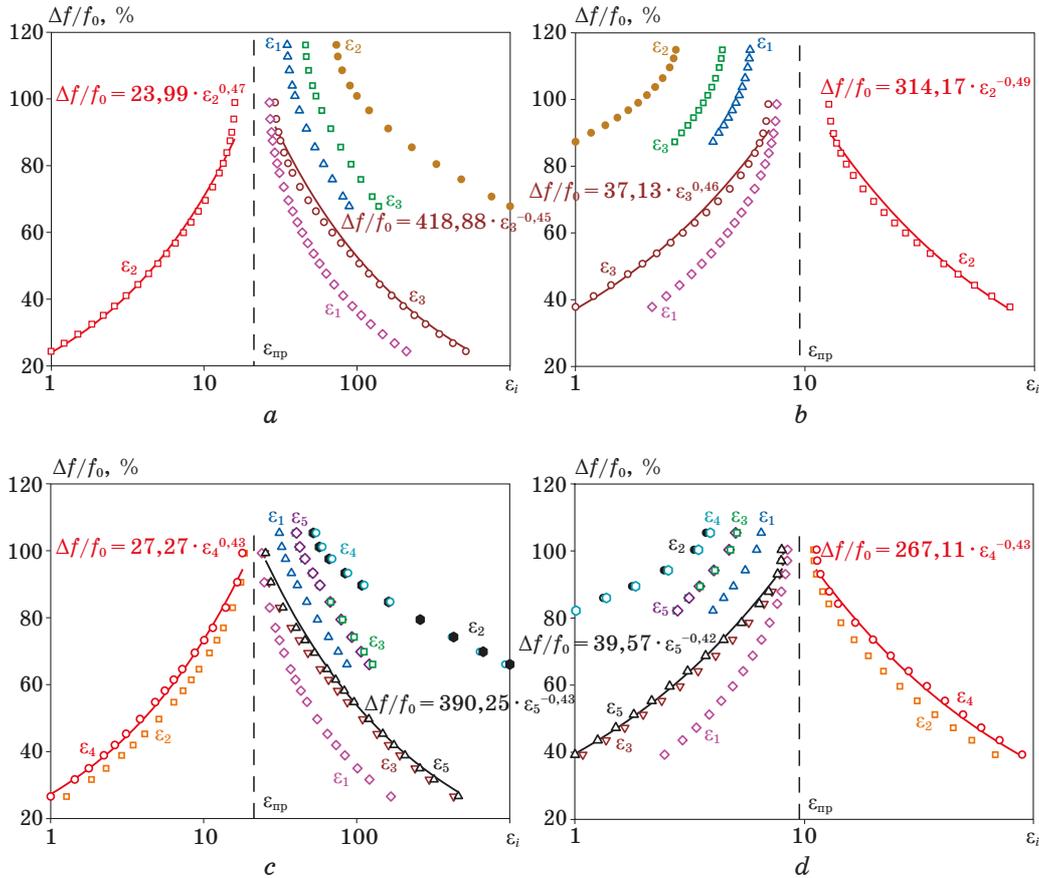


Рис. 9. Зависимости относительной ширины полосы пропускания от величин относительной диэлектрической проницаемости слоев в 5- (a, b) и 9-слойной (c, d) структурах с интерфейсной средой $Z_0 = 100$ Ом для случаев прямого (a, c) и обратного (b, d) скачков волнового сопротивления на крайних границах раздела

Fig. 9. Dependences of the relative passband on the value of the relative permittivity of all the layers in 5-layer (a, b) and 9-layer (c, d) structure at $Z_0 = 100$ Ohm for the case of forward (a, c) and reverse steps (b, d) of the characteristic impedance at the edge media interface boundaries

Интересной особенностью представленных конструкций полосо-пропускающих фильтров на слоистых диэлектрических структурах обоих типов является форма их полос заграждения. На рис. 11 представлены АЧХ слоистых селективных структур с количеством слоев $N = 3 \div 9$ и относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 45$ %. Линиями показаны характеристики S_{21} , точками – S_{11} для $N = 9$. Крупными черными точками на графиках отмечены минимумы характеристик S_{21} в полосах заграждения. Видно, что в конструкциях, где все слои являются полуволновыми (рис. 11a), характеристики в области полос заграждения являются симметричными,

в то время как в конструкциях с четвертьволновыми слоями по краям эта симметрия нарушается – склоны полос заграждения со сторон полосы пропускания являются более пологими (рис. 11b). Очевидно, это связано с меньшей нагруженной добротностью четвертьволновых слоев по отношению к полуволновым в структурах обоих типов, а также тем, что в формировании четных полос пропускания четвертьволновые слои, в отличие от полуволновых, участия не принимают. Именно эти факты объясняют возможность создания фильтров с полосами пропускания $\Delta f/f_0 > 100\%$ с помощью конструкций 2-го типа. Что интересно, даже несмотря на этот факт, при прочих равных условиях коэффициенты крутизны склонов полосы пропускания в конструкциях 2-го типа будут несколько больше чем в конструкциях, состоящих исключительно из полуволновых слоев. Отметим, что по горизонтальной оси здесь отложена относительная частота f/f_0 , где f_0 – центральная частота первой (основной) полосы пропускания. Иначе говоря, выявленная закономерность будет наблюдаться в любом диапазоне частот вплоть до верхней границы оптического диапазона.

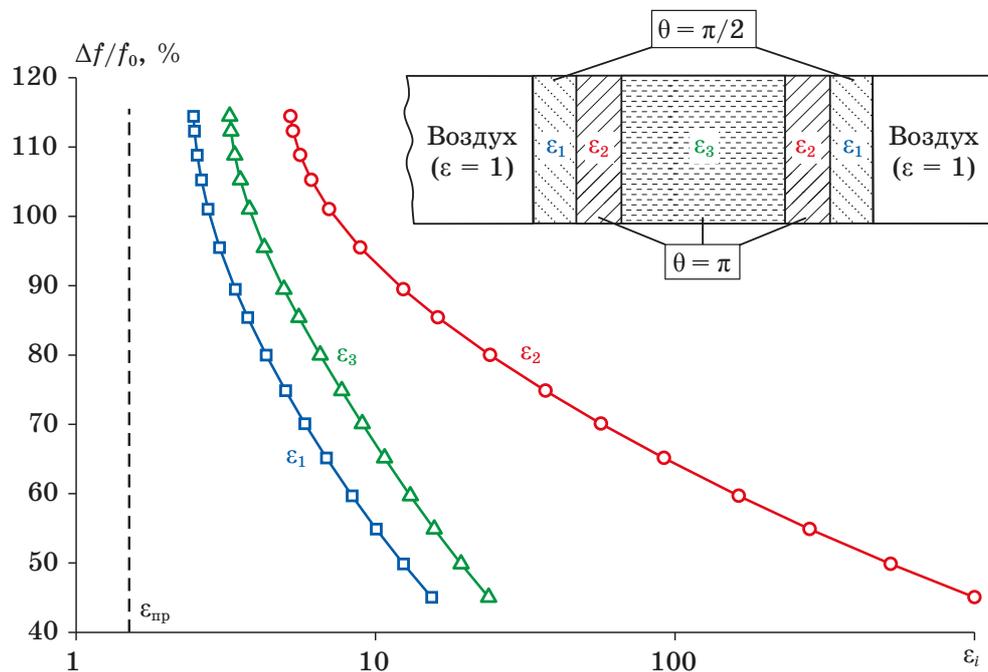


Рис. 10. Зависимости относительной ширины полосы пропускания от величин относительной диэлектрической проницаемости слоев для конструкции 5-слойного фильтра с интерфейсной средой из воздуха ($Z_0 \approx 377$ Ом)

Fig. 10. Dependences of the relative passband on the relative permittivity of all the layers for the 5-layer filter construction with air interface media ($Z_0 \approx 377$ Ohm)

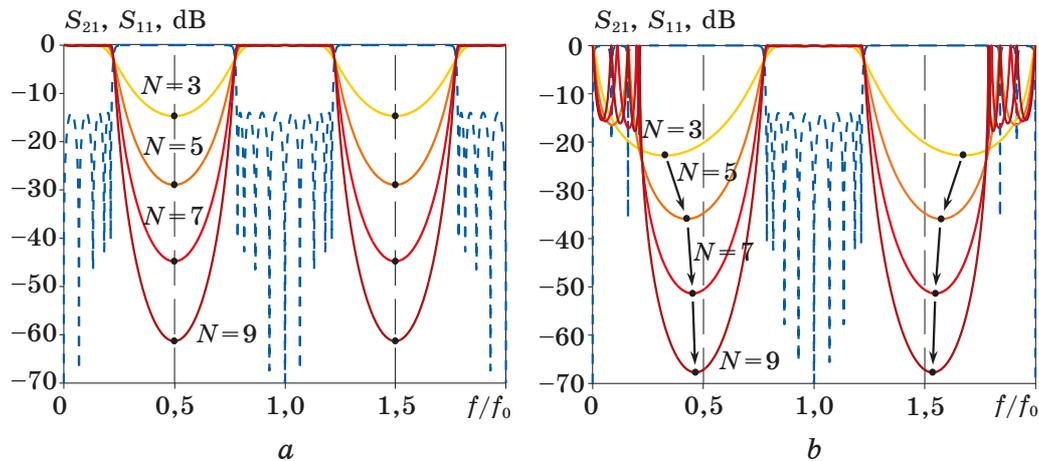


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики для двух конструкций частотно-селективных слоистых структур с числом слоев $N = 3 \div 9$: a – состоящих исключительно из полуволновых слоев, b – крайние слои – четвертьволновые

Fig. 1. Frequency responses for two designs of frequency-selective layered structures with the number of layers $N = 3 \div 9$: a – all the layers are half-wave, b – edge layers are quarter-wave

Заключение

Таким образом, в работе проведены исследования конструкций полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических структурах, состоящих из полуволновых и четвертьволновых слоев на центральной частоте рабочей полосе с одинаковыми интерфейсными средами на входе и выходе. Показано, что в них независимо от величины волновых сопротивлений интерфейсных сред и количества слоев абсолютно одинаковые селективные свойства достигаются двумя путями: в случае, когда волновые сопротивления крайних слоев меньше, чем волновое сопротивление интерфейсной среды, что соответствует случаю прямого скачка (традиционный, общепринятый подход), и в случае, когда крайние слои структур в то же число раз, что и в первом случае, наоборот, являются менее оптически плотными, чем интерфейсные среды – это случай обратного скачка. Как показали исследования, при абсолютно одинаковых амплитудно-частотных характеристиках разброс по значениям относительной диэлектрической проницаемости от слоя с минимальным значением до слоя с максимальным в последнем случае получается на порядок меньше.

Показано, что в конструкциях, состоящих исключительно из полуволновых слоев, величины ширины полос пропускания

в зависимости от ε_i для слоев с минимальной и максимальной диэлектрической проницаемостью в составе структур этого типа относительно точно аппроксимируются функцией квадратного корня из ε_i и функцией, обратной ей, соответственно. При этом указанные зависимости будут тем ближе к описанным функциям, чем меньше слоев в структуре. Обнаружено, что достижимые значения относительных полос пропускания в конструкциях из полуволновых слоев, нижние пределы которых ограничивались диапазоном реализуемых значений относительной диэлектрической проницаемости слоев структур ($1 \leq \varepsilon_i \leq 1000$) для случаев обоих типов скачков волнового сопротивления на крайних границах раздела сред, а верхние пределы – «слиянием» основной полосы пропускания с соседними (паразитными) составили от 21 до 93%. Самые узкополосные фильтры в этом случае можно реализовать с интерфейсными средами, обладающими характеристиками $Z_0 \approx 85$ Ом ($\varepsilon \approx 19,7$) в случае прямого скачка и $Z_0 \approx 53$ Ом ($\varepsilon \approx 50,4$) – в случае обратного.

Несмотря на асимметрию характеристик в области полос заграждения, конструкции с четвертьволновыми слоями по краям обладают более высокими селективными свойствами, чем конструкции, состоящие исключительно из полуволновых слоев. При этом, независимо от характера скачка волнового сопротивления на границах раздела крайних слоев с интерфейсными средами, четные слои в них можно делать практически из одного и того же материала. Недостатком в них является малый «разбег» по ширине полосы пропускания, которая в рамках указанных выше значений для ε_i слоев, составила от 45 до 115%. Относительно широкие полосы пропускания по отношению к полуволновым диэлектрическим слоистым структурам здесь обусловлены тем, что абсолютно все слои в селективных структурах этого типа имеют волновое сопротивление либо ниже, чем волновое сопротивление интерфейсных сред, что соответствует случаю прямого скачка, либо выше – в случае обратного скачка. Показано, что именно конструкции этого типа и только в случае прямого скачка на крайних границах крайних раздела могут быть реализуемы для воздушных интерфейсных сред.

Следует отметить, что проведенные исследования актуальны для всех диапазонов частот, в границах которых используемые диэлектрические среды обладают стабильными (бездисперсионными) характеристиками. Проведенные исследования представляют интерес для проектирования селективных устройств для оптики и оптоэлектроники.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России по госзаданию № FEFE-2020-0013 «Развитие теории самоконфигурирующихся алгоритмов машинного обучения для моделирования и прогнозирования характеристик компонентов сложных систем».

Acknowledgments

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. FEFE-2020-0013 «Development of the Theory of Self-Configurable Machine-Learning Algorithms for Simulating and Predicting Characteristics of Complex Systems».

Список литературы

1. Shirasaki M., Nakajima H., Obokata T., Asama K. Nonmechanical Optical Switch for Single-Mode Fibers. *Applied Optics*. 1982;21(23):4229–4234. DOI: 10.1364/AO.21.004229.
2. Withayachumnankul W., Fischer B., Micken S., Abbott D. Transmission Characteristics of T-ray Multilayer Interference Filters. *SPIE Proceedings Photonics: Design, Technology and Packaging III*. 2007;6801:68011G-1–68011G-15. DOI: 10.1117/12.758811.
3. Markov Yu. Broadband Interference Filters. *Optics and Spectroscopy*. 2005;98(6):871–875. DOI: 10.1134/1.1953980.
4. Koyama S., Inaba Y., Kasano M., Murata T. A Day and Night Vision MOS Imager With Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2008;55(3):754–759. DOI: 10.1109/TED.2007.914828.
5. Horie Y., Han S., Lee J.-Y., Kim J., Kim Y., Arbabi A., Shin C., Shi L., Arbabi E., Kamali S.M., Lee H.-S., Hwang S., Faraon A. Visible Wavelength Color Filters Using Dielectric Subwavelength Gratings for Backside-Illuminated CMOS Image Sensor Technologies. *Nano Letters*. 2017;17(5):3159–3164. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b00636.
6. Ji C., Yang C., Shen W., Lee K.-T., Zhang Y., Liu X., Guo L.J. Decorative near-infrared transmission filters featuring high-efficiency and angular-insensitivity employing 1D photonic crystals. *Nano Research*. 2019;12(3):543–548. DOI: 10.1007/s12274-018-2249-8.
7. Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Vas'kovskaya M.I., Chuchelov D.S., Tsygankov E.A., Kuzmich S.V., Velichansky V.L. Vibration-proof ECDL with an Intracavity Interference Filter. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2019;46(10):309–313. DOI: 10.3103/S1068335619100038.
8. Yoon Y.-T., Park C.-H., Lee S.-S. Highly Efficient Color Filter Incorporating a Thin Metal-Dielectric Resonant Structure. *Applied Physics Express*. 2012;5(2):022501. DOI: 10.1143/APEX.5.022501.
9. Lee S.U., Ju B.-K. Wide-gamut plasmonic color filters using a complementary design method. *Scientific Reports*. 2017;7(1):40649. DOI: 10.1038/srep40649.

10. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах. *Доклады академии наук*. 2005;400(2):181–185.
11. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах. *Радиотехника и электроника*. 2006;51(6):694–701.
12. Беляев Б. А., Волошин А. С., Лексиков А. А., Шабанов В. Ф. *Отражающее покрытие. Патент России № 2256942*. БИ № 20, 2005. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002256942_20050720_C1_RU/?ysclid=l7rs80yymf180788001
13. Беляев Б. А., Волошин А. С., Лексиков А. А., Шабанов В. Ф. *Узкополосное фильтрующее покрытие. Патент России № 2308062*. БИ № 28, 2007. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002308062_20071010_C1_RU/?ysclid=l7rshidb2104451468
14. Беляев Б. А., Волошин А. С., Лексиков А. А., Шабанов В. Ф. *Управляемый фазовращатель. Патент России № 2257648*. БИ № 21, 2005. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002257648_20050727_C1_RU/?ysclid=l7rsn6nlih94815669
15. Беляев Б. А., Лексиков А. А., Сержантов А. М., Шабанов В. Ф. Управляемый сверхвысокочастотный жидкокристаллический фазовращатель. *Письма в Журнал технической физики*. 2008;34(11):19–28. Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/articles/12075>
16. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла. *Доклады академии наук*. 2005;403(3):319–324.
17. Беляев Б. А., Ходенков С. А., Шабанов В. Ф. Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2008;51(9-2):150–153.
18. Khodenkov S. A., Yushkov I. A. Band-pass filters based on photonic crystal. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;917(6):062043. DOI: 10.1088/1742-6596/917/6/062043.
19. Burgos S. P., Yokogawa S., Atwater H. A. Color Imaging via Nearest Neighbor Hole Coupling in Plasmonic Color Filters Integrated onto a Complementary Metal-Oxide Semiconductor Image Sensor. *ACS Nano*. 2013;7(11):10038–10047. DOI: 10.1021/nn403991d.
20. Frey L., Masarotto L., El Melhaoui L., Verrun S., Minoret S., Rodriguez G., André A., Ritton F., Parrein P. High-performance silver-dielectric interference filters for RGBIR imaging. *Optics Letters*. 2018;43(6):1355–1358. DOI: 10.1364/ol.43.001355.
21. Belyaev B. A., Tyurnev V. V., Shabanov V. F. Design of optical bandpass filters based on a two-material multilayer structure. *Optic Letters*. 2008;39(12):3512–3515. DOI: 10.1364/ol.39.003512.

22. Беляев Б. А., Ларьков А. А., Бальва Я. Ф., Шабанов Д. А., Шумилов Т. Ю. Миниатюрный высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на двухпроводниковых шпильковых резонаторах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(2):129–139. DOI: 10.15826/urej.2022.6.2.001.

23. Homes C. C., Vogt T., Shapiro S. M., Wakimoto S., Ramirez A. P. Optical Response of High-Dielectric Constant Perovskite-Related Oxide. *Science*. 2001;293(5530):673–676. DOI: 10.1126/science.1061655.

24. Баскаков С. И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Либроком; 2017. 416 с.

25. Сазонов Д. М. *Антенны и устройства СВЧ*. М.: Высшая школа; 1988. 432 с.

References

1. Shirasaki M., Nakajima H., Obokata T., Asama K. Nonmechanical Optical Switch for Single-Mode Fibers. *Applied Optics*. 1982;21(23):4229–4234. DOI: 10.1364/AO.21.004229.

2. Withayachumnankul W., Fischer B., Micken S., Abbott D. Transmission Characteristics of T-ray Multilayer Interference Filters. *SPIE Proceedings Photonics: Design, Technology and Packaging III*. 2007;6801:68011G-1–68011G-15. DOI: 10.1117/12.758811.

3. Markov Yu. Broadband Interference Filters. *Optics and Spectroscopy*. 2005;98(6):871–875. DOI: 10.1134/1.1953980.

4. Koyama S., Inaba Y., Kasano M., Murata T. A Day and Night Vision MOS Imager With Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2008;55(3):754–759. DOI: 10.1109/TED.2007.914828.

5. Horie Y., Han S., Lee J.-Y., Kim J., Kim Y., Arbabi A., Shin C., Shi L., Arbabi E., Kamali S. M., Lee H.-S., Hwang S., Faraon A. Visible Wavelength Color Filters Using Dielectric Subwavelength Gratings for Backside-Illuminated CMOS Image Sensor Technologies. *Nano Letters*. 2017;17(5):3159–3164. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b00636.

6. Ji C., Yang C., Shen W., Lee K.-T., Zhang Y., Liu X., Guo L. J. Decorative near-infrared transmission filters featuring high-efficiency and angular-insensitivity employing 1D photonic crystals. *Nano Research*. 2019;12(3):543–548. DOI: 10.1007/s12274-018-2249-8.

7. Vassiliev V. V., Zibrov S. A., Vas'kovskaya M. I., Chuchelov D. S., Tsygankov E. A., Kuzmich S. V., Velichansky V. L. Vibration-proof ECDL with an Intracavity Interference Filter. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2019;46(10):309–313. DOI: 10.3103/S1068335619100038.

8. Yoon Y.-T., Park C.-H., Lee S.-S. Highly Efficient Color Filter Incorporating a Thin Metal-Dielectric Resonant Structure. *Applied Physics Express*. 2012;5(2):022501. DOI: 10.1143/APEX.5.022501.

9. Lee S. U., Ju B.-K. Wide-gamut plasmonic color filters using a complementary design method. *Scientific Reports*. 2017;7(1):40649. DOI: 10.1038/srep40649.

10. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Shabanov V. F. Research of microstrip models of band-pass filters on the base of 1d-photonic crystals. *Doklady Akademii Nauk*. 2005;400(2):181–185. (In Russ.)

11. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Shabanov V. F. Analysis of microstrip analogues of bandpass filters on one-dimensional photonic crystals. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2006;51(6):653–659. DOI: 10.1134/S1064226906060052.

12. Beljaev B. A., Voloshin A. S., Leksikov A. A., Shabanov V. F. *Reflecting surface*. RU Patent No. 2256942. Bulletin of inventions No. 20, 2005. (In Russ.) Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002256942_20050720_C1_RU/?ysclid=l7rs80yymf180788001

13. Beljaev B. A., Voloshin A. S., Leksikov A. A., Shabanov V. F. *Narrowband filtration cover*. RU Patent No. 2308062. Bulletin of inventions No. 28, 2007. (In Russ.) Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002308062_20071010_C1_RU/?ysclid=l7rshidb2104451468

14. Beljaev B. A., Voloshin A. S., Leksikov A. A., Shabanov V. F. *Controlled phase shifter*. RU Patent No. 2257648. Bulletin of inventions No. 21, 2005. (In Russ.) Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002257648_20050727_C1_RU/?ysclid=l7rsn6nlih94815669

15. Belyaev B. A., Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Shabanov V. F. Controllable liquid-crystal microwave phase shifter. *Technical Physics Letters*. 2008;34(6):463–466. DOI: 10.1134/S1063785008060047.

16. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Shabanov V. F. Study of Q-factor of impurity mode resonance in microstrip model of 1D-photonic crystal. *Doklady Akademii Nauk*. 2005;403(3):319–324. (In Russ.)

17. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Shabanov V. F. Study of the bandpass filters on one-dimensional dielectric photonic crystals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 2008;51(9-2):150–153. (In Russ.)

18. Khodenkov S. A., Yushkov I. A. Band-pass filters based on photonic crystal. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;917(6):062043. DOI: 10.1088/1742-6596/917/6/062043.

19. Burgos S. P., Yokogawa S., Atwater H. A. Color Imaging via Nearest Neighbor Hole Coupling in Plasmonic Color Filters Integrated onto a Complementary Metal-Oxide Semiconductor Image Sensor. *ACS Nano*. 2013;7(11):10038–10047. DOI: 10.1021/nn403991d.

20. Frey L., Masarotto L., El Melhaoui L., Verrun S., Minoret S., Rodriguez G., André A., Ritton F., Parrein P. High-performance silver-dielectric interference filters for RGBIR imaging. *Optics Letters*. 2018;43(6):1355–1358. DOI: 10.1364/ol.43.001355.

21. Belyaev B. A., Tyurnev V. V., Shabanov V. F. Design of optical bandpass filters based on a two-material multilayer structure. *Optic Letters*. 2008;39(12):3512–3515. DOI: 10.1364/o1.39.003512.

22. Belyaev B. A., Larkov A. A., Bal'va Ya. F., Shabanov D. A., Shumilov T. Y. Miniaturized high selectivity bandpass filter based on hairpin two-conductor stripline resonators. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(2):129–139. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.2.001.

23. Homes C. C., Vogt T., Shapiro S. M., Wakimoto S., Ramirez A. P. Optical Response of High-Dielectric Constant Perovskite-Related Oxide. *Science*. 2001;293(5530):673–676. DOI: 10.1126/science.1061655.

24. Baskakov S. I. *Electrodynamics and propagation of radio waves*. Moscow: Librokom; 2017. 416 p. (In Russ.)

25. Sazonov D. M. *Antennas and ultrahigh frequency devices*. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 432 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Волошин Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН; Сибирский федеральный университет; Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия.

Ефимов Артем Юрьевич, инженер, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия.

Ходенков Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия.

Information about the authors

Aleksandr S. Voloshin, Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Siberian Federal University; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia.

Artem Yu. Efimov, Engineer, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

Sergey A. Khodenkov, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the department «Electronic Engineering and Telecommunications» of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia.

Поступила / Received: 08.07.2022

Принята в печать / Accepted: 26.07.2022