

УДК 535.345.673

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

© 2014 г. Б. А. Беляев, В. В. Тюрнев, академик В. Ф. Шабанов

Поступило 16.09.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214060097

Одномерными фотонными кристаллами (ФК) называют периодические многослойные структуры, состоящие из диэлектрических слоев, различающихся показателем преломления; толщина слоев соизмерима с длинами электромагнитных волн в определенной области частот. В таких структурах интерференция волн, отраженных от границ раздела слоев, приводит к появлению в спектре частот чередующихся полос пропускания (окон прозрачности) и полос отражения (фотонных запрещенных зон) [1]. Однако внутри каждой из запрещенных зон можно создать одну или несколько дополнительных полос пропускания, если в ФК с конечным числом диэлектрических слоев внедрить дефектный диэлектрический слой, нарушающий периодическую структуру ФК [2]. Внедрение в ФК сразу нескольких дефектных слоев с одинаковыми резонансными частотами позволяет создавать высокоселективные оптические полосно-пропускающие фильтры [3]. Совокупность диэлектрических слоев, отделяющих дефектный слой от внешнего пространства или от соседнего дефектного слоя, в оптике называют диэлектрическим зеркалом. Такое зеркало обеспечивает максимальное отражение света на частоте, для которой толщина его слоев равна четверти длины волны $\lambda/4$ или кратна нечетному числу $\lambda/4$. Отражательная способность зеркала растет как с увеличением контраста показателей преломления смежных слоев, так и с увеличением их числа.

Одним из существенных недостатков оптических фильтров, построенных на основе периодических ФК-структур, является большая неравномерность коэффициента прохождения света в полосе пропускания [4]. Причиной такой неравномерности в [3] считается частотная дисперсия показателя

преломления эффективного четвертьволнового слоя, которым часто для упрощения расчетов заменяют, например, трехслойные зеркала в многослойных структурах. В действительности же причина этой неравномерности совсем иная.

Выравнивание неравномерности коэффициента прохождения света в полосе пропускания ФК-фильтров можно осуществлять, используя те же подходы, что давно применяются в микроволновых полосно-пропускающих фильтрах [5]. Для этого ФК-фильтры по своей конструкции следует рассматривать как систему взаимодействующих электродинамических резонаторов, которыми являются дефектные диэлектрические слои толщиной, кратной половине длины волны на центральной частоте полосы пропускания. Величину связи этих резонаторов, а значит, и ширину полосы пропускания фильтра определяют многослойные диэлектрические зеркала между ними, толщина слоев в которых кратна четверти длины волны на центральной частоте полосы пропускания.

В настоящей работе рассматриваются принципы построения фильтров на одномерных диэлектрических ФК-структурах, обладающих заданным уровнем неравномерности мощности проходящего в полосе пропускания света; они основаны на общей теории резонаторных фильтров.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РЕЗОНАТОРНЫХ ФИЛЬТРОВ

Простейший резонаторный полосно-пропускающий фильтр представляет собой цепочку из m электромагнитно связанных резонаторов, каждый из которых характеризуется своей резонансной частотой f_i и своими коэффициентами связи с двумя соседними резонаторами $k_{i,i-1}$ и $k_{i,i+1}$, где i – порядковый номер резонатора. Связи входного ($i = 1$) и выходного ($i = m$) резонаторов с линиями передачи (в случае ФК-фильтра с окружающим пространством) характеризуют внешней добротностью резонаторов Q_e , которую часто называют нагруженной добротностью. Для получе-

*Институт физики им. Л. В. Киренского
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Красноярск*

*Сибирский государственный университет
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск*

Сибирский федеральный университет, Красноярск

ния фильтра с малой неравномерностью коэффициента прохождения в полосе пропускания необходимо выполнение двух условий. Во-первых, резонансные частоты f_i всех резонаторов фильтра, формирующих его полосу пропускания, должны совпадать с центральной частотой этой полосы f_0 , во-вторых, должен быть обеспечен баланс связей резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов с входом и выходом устройства, соответствующий его полосе пропускания.

Чтобы обеспечить выполнение второго условия, помимо резонаторов в фильтрах используются цепи связи, обеспечивающие требуемое взаимодействие смежных резонаторов друг с другом и крайних резонаторов с входом и выходом. Как правило, нижайшие резонансные частоты цепей связи в реальных устройствах существенно выше частоты f_0 . В таких случаях частотная зависимость коэффициента прохождения падающей мощности $|S_{21}|^2$ выражается формулой [6]

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + P_m^2(\sin \theta)}, \quad (1)$$

где \mathbf{S} – матрица рассеяния фильтра, а θ – электрическая длина резонаторов (толщина слоев), $P_m(x)$ – многочлен степени m . Коэффициенты разложения $P_m(x)$ по степеням $\sin \theta$ являются функциями только коэффициентов связи резонаторов $k_{i, i+1}$ и внешней добротности Q_e [5]. Видно, что на частотах, при которых многочлен $P_m(\sin \theta)$ обращается в нуль, наблюдается полное прохождение падающей мощности без какого-либо отражения, что и является причиной формирования полосы пропускания фильтра.

В случае, когда многочлен $P_m(x) = \sqrt{\varepsilon} T_m(x)$, где $T_m(x)$ – многочлен Чебышева первого рода, а ε – безразмерный нормирующий параметр, все максимумы отражений $|S_{11}|_{\max}^2$ внутри полосы пропускания, согласно (1), будут располагаться на уровне

$$|S_{11}|_{\max}^2 = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (2)$$

Это значит, что фильтр имеет выровненные экстремумы пульсаций коэффициента прохождения внутри полосы пропускания. Таким образом, параметр ε определяет не только величину пульсаций коэффициентов отражения, но и коэффициентов прохождения мощности в полосе пропускания, причем, чем меньше параметр ε , тем меньше величина этих пульсаций. Однако с уменьшением ε , как несложно показать, падает крутизна склонов полосы пропускания и увеличивается уровень прохождения в полосах заграждения, т.е. ухудшаются селективные свойства фильтра. Поэтому оптимальное значение параметра ε всегда является компромиссом требований, предъявляемых к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) проектируемого устройства.

Фильтры, АЧХ которых описываются многочленами Чебышева, называют фильтрами Чебышева. Предельным случаем фильтров Чебышева являются фильтры Баттерворта, получающиеся при $\varepsilon \rightarrow 0$. В фильтре Баттерворта все m нулей отражений расположены в точке f_0 , а функция $\varepsilon T_m^2(\sin \theta)$ пропорциональна $(\sin \theta)^{2m}$.

Для того чтобы система связанных резонаторов имела чебышевскую АЧХ с требуемой относительной шириной полосы пропускания и допустимой величиной пульсаций коэффициента прохождения, необходимо, чтобы каждый из коэффициентов связи резонаторов $k_{i, i+1}$ и внешних добротностей Q_e обоих крайних резонаторов принимал вполне определенные значения. Эти значения могут быть рассчитаны по приближенным обобщенным формулам синтеза фильтров, полученным Коном и Маттеем на основе эквивалентных схем, описывающих фильтры-прототипы нижних частот [5]. Однако точность этих формул сильно падает с увеличением относительной ширины полосы пропускания фильтра. Более того, для широкополосных фильтров эта точность зависит как от конкретной конструкции фильтра, так и от конструкций его резонаторов. Причиной погрешности обобщенных формул синтеза является частотная дисперсия коэффициентов связи $k_{i, i+1}$ [7].

Хотя обобщенные формулы синтеза фильтров являются приближенными, тем не менее, на качественном уровне они правильно описывают все основные закономерности, касающиеся коэффициентов связи $k_{i, i+1}$ и внешних добротностей Q_e . Перечислим некоторые из них. Оптимальные значения коэффициентов связи $k_{i, i+1}$ между смежными резонаторами многозвенного фильтра монотонно убывают от крайних резонаторов к центральному резонаторам. Увеличение ширины полосы пропускания требует пропорционального увеличения всех $k_{i, i+1}$ и Q_e^{-1} . Уменьшение пульсаций коэффициента прохождения мощности в полосе пропускания фильтра, в первую очередь, требует уменьшения Q_e , а также соответствующего изменения соотношений между коэффициентами связей наружных и внутренних пар резонаторов. Для выравнивания пульсаций коэффициента прохождения удобно использовать разработанные правила оптимизации фильтров [8, 9]. Знание перечисленных закономерностей и правил оптимизации позволяет осуществлять синтез любых полосно-пропускающих фильтров, не прибегая к обобщенным формулам для коэффициентов связи.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ФОТОННО- КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

В ФК-фильтрах резонаторами являются дефектные слои. Их толщина должна быть кратна $\lambda_i/2$, где λ_i — длины волны в i -м слое на центральной частоте f_0 полосы пропускания фильтра. При формировании полосы пропускания может использоваться как основная мода колебаний резонатора, так и высшие моды. В последнем случае в запрещенной зоне ФК формируется не одна, а несколько равноотстоящих друг от друга полос пропускания. Такие многополосные фильтры в оптике называют фильтрами с перемежающимися полосами пропускания, или перемежающимися фильтрами (interleave filters) [10].

Функцию цепей связи в ФК-фильтрах выполняют многослойные диэлектрические зеркала. Они ослабляют взаимодействие резонаторов с их окружением. Наибольшей отражательной способностью, как уже отмечалось, зеркала обладают в случае, когда толщина их слоев равна $\lambda_i/4$. Увеличение отражательной способности зеркала между соседними резонаторами или между крайним резонатором и свободными пространством приводит к соответствующему ослаблению коэффициента связи или увеличению внешней добротности Q_e . Величины $k_{i, i+1}$ и Q_e^{-1} убывают как с увеличением числа слоев в зеркале, так и с увеличением контраста показателей преломления для смежных слоев [11]. Так как максимальный контраст показателей преломления в зеркалах ограничен существующими оптическими материалами, то основным параметром грубой настройки связей резонаторов в ФК-фильтре является число диэлектрических слоев в каждом из зеркал. Контраст показателей преломления в четвертьволновых слоях используется для тонкой подстройки связей резонаторов. При этом не требуется вносить асимметрию в структуру зеркал в виде отклонения толщины их слоев от четверти длины волны, как это предлагается в [10], что существенно ухудшает частотно-селективные свойства фильтра в полосах заграждения. Известно, что с увеличением порядка рабочей моды колебаний резонаторов в фильтре величина связи между ними $k_{i, i+1}$ и связи крайних резонаторов со свободным пространством Q_e^{-1} убывают. Этот факт используется в перемежающихся фильтрах для тонкой настройки связей резонаторов, формирующих заданную полосу пропускания, подбором порядка высших мод колебаний для каждого из них [12]. Однако при этом образуется множество близко расположенных полос пропускания, не позволяющих создавать полосно-пропускающие фильтры с широкой полосой заграждения.

Расчет частотной характеристики фильтров на ФК-структурах удобно выполнять с помощью матриц передачи \mathbf{M} . В микроволновой технике их чаще называют ABCD-матрицами. Они связывают напряженности электрического поля E_i и магнитного поля H_i на обеих поверхностях ($i = 1, 2$) многослойной структуры матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ Z_0 H_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} E_2 \\ Z_0 H_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ — характеристическое сопротивление свободного пространства. Матрица m -слойной структуры равна произведению

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \dots \mathbf{M}_k \dots \mathbf{M}_n, \quad (4)$$

где \mathbf{M}_k — матрица передачи k -го слоя, элементы которой в случае нормального падения света выражаются формулой

$$\mathbf{M}_k = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & -in_k^{-1} \sin \theta_k \\ -in_k \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Здесь θ_k — электрическая толщина k -го слоя, а n_k — его показатель преломления. Знак перед мнимой единицей i соответствует случаю, когда электромагнитные компоненты световой волны изменяются во времени по закону $\exp(-i\omega t)$.

В случае, когда ФК-фильтр с обеих сторон окружает свободное пространство, коэффициенты прохождения и отражения света связаны с элементами матрицы передачи формулами

$$S_{21} = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}, \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}. \quad (7)$$

Эти формулы позволяют рассчитать амплитудно-частотные характеристики ФК-структур, в том числе АЧХ полосно-пропускающего фильтра, описываемого ниже.

ПРИМЕР КОНСТРУКЦИИ ТРЕХРЕЗОНАТОРНОГО ФИЛЬТРА

Синтезированный фильтр содержит три полуволновых резонатора и четыре зеркала с четвертьволновыми слоями. Внутренние зеркала имеют по три слоя, а наружные — по одному слою; таким образом, фильтр состоит из 11 слоев. Все резонаторы фильтра являются воздушными, поэтому в них отсутствуют диэлектрические потери, однако для простоты анализа потери не учитывались и в диэлектрических слоях зеркал.

Частотные зависимости коэффициентов прохождения фильтра $|S_{21}|^2$ и отражения $|S_{11}|^2$ представлены на рис. 1. Фильтр имеет относительную ширину полосы пропускания 10%, измеренную по уровню -3 дБ прошедшей мощности, и максимальный уровень отражений в полосе пропуска-

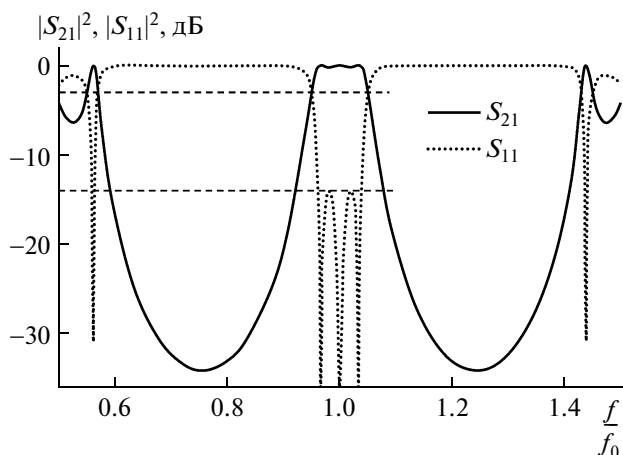


Рис. 1. Частотные зависимости прямых (сплошная линия) и обратных (точки) потерь трехрезонаторного полосно-пропускающего фильтра на 11-слойной фотонно-кристаллической структуре.

ния -14 дБ, отмеченные на рис. 1 штриховыми линиями. В полосе пропускания фильтра наблюдается три нуля коэффициента отражения, т.е. ровно столько сколько резонаторов. Эти нули расположены на частотах $f_1 = 0.967f_0$, $f_2 = f_0$ и $f_3 = 1.033f_0$.

Профиль показателя преломления диэлектрических слоев ФК-структуры фильтра показан в верх-

ней части рис. 2. В этой структуре показатель преломления диэлектрических слоев наружных однослойных зеркал ($n = 2.59$) несколько отличается от показателя преломления диэлектрических слоев остальных трехслойных зеркал ($n = 2.51$). Именно поэтому два максимума отражения, расположенные между частотами f_1 , f_2 и f_3 , имеют уровень $|S_{11}|_{\max}^2 = -14$ дБ. Такому уровню потерь на отражение отвечает неравномерность коэффициента прохождения в полосе пропускания $\Delta|S_{21}|^2 = 0.18$ дБ, или $\pm 2\%$ от среднего уровня прошедшей мощности.

В нижней части рис. 2 построены диаграммы энергий W , запасаемых в каждом из слоев фильтра на трех частотах полного прохождения света f_1 , f_2 и f_3 . Энергия W нормирована на энергию W_0 , поступающую на вход фильтра от падающей мощности за половину периода электромагнитной волны. Видно, что на всех частотах слои полуволновых резонаторов запасают энергии многократно большие, чем четвертьволновые слои зеркал. Это значит, что добротность материала зеркал значительно меньше влияет на потери энергии в полосе пропускания фильтра, чем добротность материала резонаторов. Другими словами, для минимизации потерь в фильтре собственная добротность его резонаторов Q_0 должна быть максимально вы-

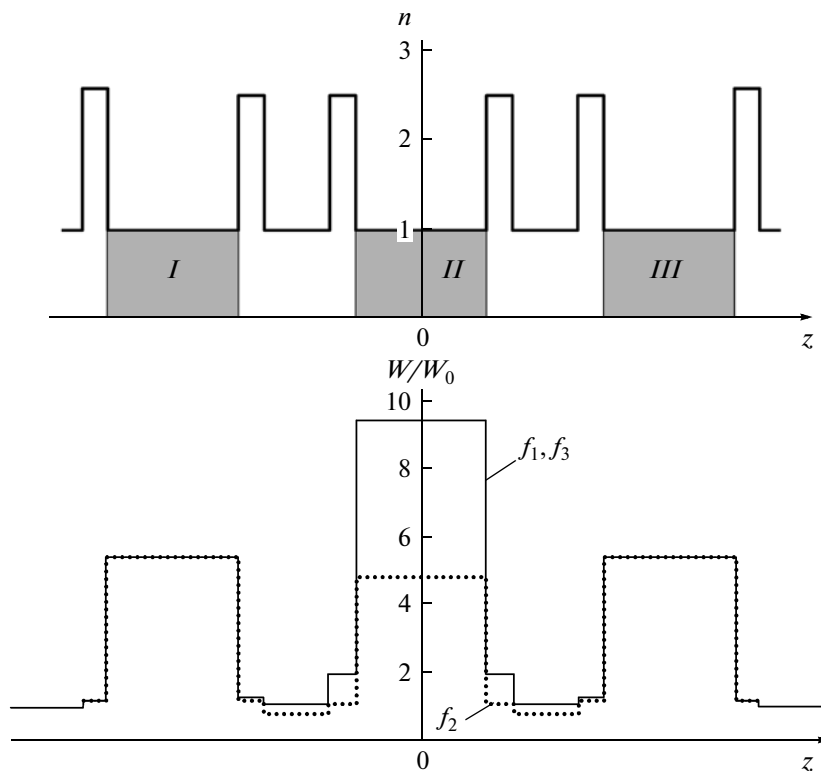


Рис. 2. Профиль показателя преломления слоев фильтра и энергии, запасаемые в каждом из слоев фильтра на частотах полного прохождения света; *I*, *II* и *III* – резонаторы, формирующие полосу пропускания; z – поперечная координата.

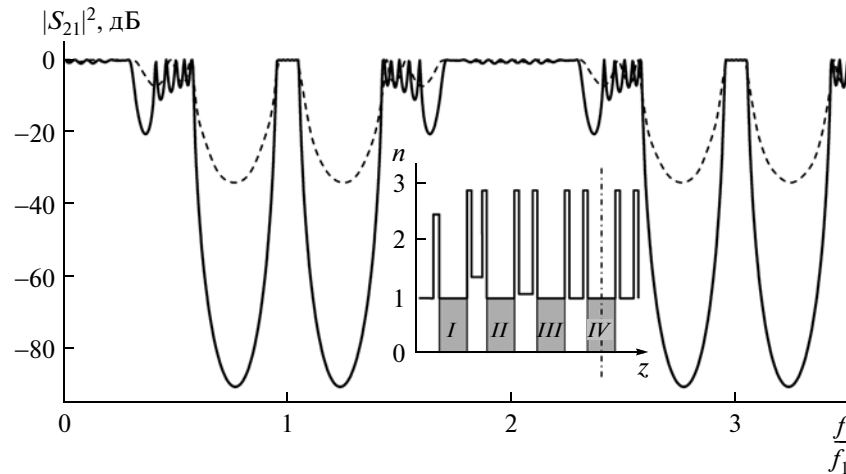


Рис. 3. АЧХ синтезированного фильтра 7-го порядка (сплошная линия) и фильтра третьего порядка (штриховая линия) в широкой полосе частот. На врезке – профиль показателя преломления для левой половины 7-звенного фильтра.

сокой. Именно поэтому в представленной конструкции фильтра использованы воздушные резонаторы, имеющие бесконечную собственную добротность.

В рассмотренном фильтре, состоящем из трех резонаторов, пары смежных резонаторов являются наружными, поэтому все межрезонаторные связи фильтра одинаковы в силу зеркальной симметрии конструкции относительно ее центра. В результате максимумы отражений в полосе пропускания всегда имеют одинаковую величину, а их уровень определяет только внешняя добротность резонаторов, которая, как уже отмечалось, зависит от характеристик зеркал на входе и выходе фильтра.

ПРИМЕР КОНСТРУКЦИИ СЕМИРЕЗОНАТОРНОГО ФИЛЬТРА

Как известно, увеличение количества резонаторов в полосно-пропускающих фильтрах существенно повышает их частотно-селективные свойства. Для сравнения с рассмотренным трехзвенным фильтром (его АЧХ представлена штриховой линией на рис. 3) был синтезирован фильтр на семи воздушных резонаторах (его АЧХ представлена сплошной линией на рис. 3), имеющий также относительную ширину полосы пропускания 10% и максимумы отражений в полосе пропускания на уровне -14 дБ. На врезке к рис. 3 представлен профиль показателей преломления слоев левой половины синтезированной симметричной ФК-структуры, которая содержит уже 27 слоев. Наружные зеркала в семизвенном фильтре имеют также по одному четвертьволновому слою, а внутренние – по три четвертьволновых слоя. Получены оптимальные значения показателей преломления слоев, нумеруемых от края структуры к ее

центру, включая центральный 14-й слой: $n_1 = 2.449$, $n_2 = 1$, $n_3 = 2.864$, $n_4 = 1.353$, $n_5 = 2.864$, $n_6 = 1$, $n_7 = 2.864$, $n_8 = 1.063$, $n_9 = 2.864$, $n_{10} = 1$, $n_{11} = 2.864$, $n_{12} = 1$, $n_{13} = 2.864$, $n_{14} = 1$.

Видно, что семизвенный фильтр по сравнению с фильтром на трех резонаторах имеет не только более высокую крутизну склонов АЧХ, но значительно большее затухание мощности в полосах заграждения. Заметим, что ФК-структура такого оптимизированного фильтра не является строго периодической. Для превращения ее в периодическую структуру достаточно трем из перечисленных выше показателей преломления присвоить

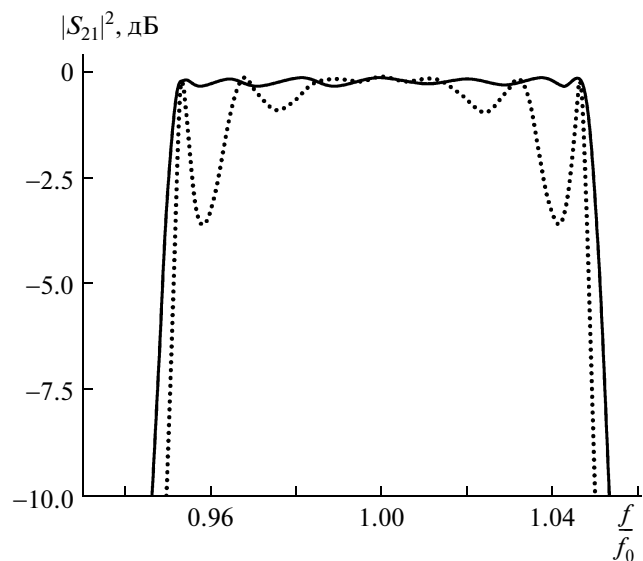


Рис. 4. АЧХ настроенного фильтра 7-го порядка (сплошная линия) и традиционно исследуемой периодической фотонно-кристаллической структуры (точки).

значения $n_1 = 2.864$, $n_4 = 1$ и $n_8 = 1$. В результате, как и следовало ожидать, у фильтра, построенного на строго периодической структуре, наблюдается большая неравномерность коэффициента прохождения в полосе пропускания. Этот факт демонстрирует рис. 4, на котором для семирезонаторного фильтра построены две частотные зависимости коэффициента прохождения. Точками показана АЧХ фильтра с периодической ФК-структурой, а сплошной линией – фильтра с оптимальной структурой. Фильтр с периодической структурой имеет в полосе пропускания неравномерность коэффициента прохождения $\Delta|S_{21}|^2 = 3.5$ дБ, а фильтр с оптимальной структурой – $\Delta|S_{21}|^2 = 0.18$ дБ, т.е. оптимизация ФК-структуры при условии $|S_{11}|_{\max}^2 = -14$ дБ позволяет уменьшить неравномерность коэффициента прохождения почти в 20 раз. Важно отметить, что неравномерность коэффициента прохождения в полосе пропускания фильтра можно уменьшать и сделать сколь угодно малой, если оптимизировать ФК-структуру, уменьшая, соответственно, уровень максимумов отражения в полосе пропускания $|S_{11}|_{\max}^2$.

Таким образом, в соответствии с общими положениями теории резонаторных фильтров в работе показано, что периодическая ФК-структура, используемая для построения оптических фильтров, содержащая более трех дефектных слоев (резонаторов), разделенных многослойными зеркалами, имеет неприемлемо высокую неравномерность коэффициента прохождения в полосе пропускания. Для минимизации этой неравномерности требуется ослаблять отражательную способность зеркал по мере их отдаленности от центра структуры, уменьшая в них контраст показателей преломления слоев. При этом в многорезонаторных фильтрах, отличающихся высокими частотно-селективными свойствами, это требование необходимо выполнять, в первую очередь, для входных зеркал, обеспечивающих требуемую связь крайних резонаторов со свободным пространством, и для зеркал между крайними парами резонаторов в ФК-конструкции.

Показано также, что на частотах полосы пропускания слои полуволновых резонаторов запасают энергии многократно большие, чем четвертьволновые слои зеркал. Поэтому добротность материала зеркал значительно меньше влияет на потери в полосе пропускания фильтра, чем добротность материала резонаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013” и интеграционного проекта СО РАН № 109.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Joannopoulos J.D., Meade R., Winn S.N.* Photonic Crystals. Princeton: Univ. Press, 1995. 137 p.
2. *Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В.* Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 240 с.
3. *Macleod H.A.* Thin-Film Optical Filters. Boca Raton: CRC Press, 2010. 772 p.
4. *Ghoniemy S., Mahmoud S.* IEEE Intern. Conf. on Signal Processing and Communications. Dubai, 2007. P. 1111–1114.
5. *Matthaei G.L., Young L., Jones E.M.T.* Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures. Norwood: Artech House, 1980. 1096 p.
6. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П.* Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967. 651 с.
7. *Тюрнев В.В.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 3. С. 314–317.
8. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* // Изв. вузов. Физика. 2006. № 9. Прил. С. 164–167.
9. *Довбыш И.А., Тюрнев В.В.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 11. С. 1339–1343.
10. *Yu S., Zhang J.* // Proc. SPIE-OSA-IEEE. 2009. V. 7630. 76300L. P. 1–6.
11. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* // Microwave and Opt. Technol. Lett. 2013. V. 55. № 7. P. 1613–1616.
12. *Floriot J., Lemarchand F., Lequime M.* // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 7. P. 1349–1355.