

УДК 535.3

ОПТИЧЕСКИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА НА СТРУКТУРАХ ИЗ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ СЛОЕВ КВАРЦА И СЕРЕБРА

© 2024 г. Б. А. Беляев^{1,2,*}, В. В. Тюрнев³, Г. В. Скоморохов^{2,3},
С. М. Жарков^{2,3}, А. М. Сержантов^{1,2}, Д. А. Шабанов^{2,3}

Представлено академиком РАН В.Ф. Шабановым 31.01.2024 г.

Поступило 31.01.2024 г.

После доработки 31.01.2024 г.

Принято к публикации 18.03.2024 г.

Разработаны конструкции оптических полосно-пропускающих фильтров на планарных структурах, полученных вакуумным напылением на подложки из кварцевого стекла (SiO_2) трех слоев также из кварца, являющихся полуволновыми резонаторами, разделенными друг от друга, свободного пространства и подложки четырьмя слоями из серебра (Ag). Толщины слоев Ag и SiO_2 определялись по заданным параметрам полосы пропускания фильтров параметрическим синтезом одномерных моделей с использованием электродинамического анализа. При этом использовались экспериментальные частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости серебра. Измеренные амплитудно-частотные характеристики изготовленных опытных образцов фильтров красного, зеленого и фиолетового цветов хорошо согласуются с характеристиками, полученными при синтезе.

Ключевые слова: слоистая структура металл-диэлектрик, полосно-пропускающий фильтр, комплексная диэлектрическая проницаемость

DOI: 10.31857/S2686740024030119, **EDN:** JZBHML

Оптические фильтры, как правило, конструируют на слоистых диэлектрических структурах, в которых полуволновые резонаторы разделены многослойными зеркалами из чередующихся четвертьволновых слоев с высоким и низким показателем преломления [1–3]. Зеркала создают оптимальную связь резонаторов друг с другом под заданную ширину полосы пропускания фильтра, а зеркала крайних резонаторов создают связь еще и с портами фильтра на его

входе и выходе, например со свободным пространством, обеспечивая тем самым требуемый уровень неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания. Отражательная способность зеркал растет как с увеличением контраста показателей преломления смежных слоев, так и с увеличением их числа. Известно, что при определенных ширинах полосы пропускания фильтра в его зеркалах на четвертьволновых слоях бывает невозможно использовать необходимые величины показателей преломления из-за отсутствия таковых у реальных материалов. Эта проблема решается, если слои в зеркалах сделать немного отличными от четверти длины волны. В этом случае затухание в высокочастотной полосе загашения немного увеличивается, а в низкочастотной — уменьшается. Методики синтеза таких конструкций, состоящих всего лишь из

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

трех и даже из двух материалов, позволяющих создавать фильтры с равномерными характеристиками в полосе пропускания, описаны в [4] и [5] соответственно.

Отметим, что в [6] показана возможность создания полосно-пропускающих фильтров на слоистых структурах из композитных материалов, в которых наночастицы серебра находятся в диэлектрической матрице из полистирола. Установлено, что с ростом объемной концентрации частиц в композите до ~33% действительная компонента его относительной диэлектрической проницаемости плавно увеличивается с 2.6 до $\sim 10^3$, при этом вплоть до частоты 1 ТГц тангенс угла диэлектрических потерь не превышает 10^{-2} . Настройка таких фильтров осуществляется подбором концентрации частиц в четвертьволновых слоях зеркал. Высокий контраст диэлектрических проницаемостей матрицы и композита позволяет изготавливать зеркала с требуемой отражательной способностью на минимальном количестве слоев.

Одним из существенных недостатков оптических фильтров на мультислойных диэлектрических структурах является большое количество слоев в их конструкциях, например, в фильтре 3-го порядка с относительной шириной полосы пропускания 10% требуется 11 слоев [2], а в фильтре 5-го требуется 49 слоев [1]. Другим недостатком таких фильтров являются узкие полосы заграждения, обусловленные паразитными резонансами мультислойной структуры, существующие как ниже, так и выше полосы пропускания.

Учитывая огромную частотную дисперсию комплексной диэлектрической проницаемости металлов в оптическом диапазоне, в настоящей работе рассматриваются новые конструкции полосно-пропускающих фильтров на планарных структурах. Исследуются конструкции, в которых 3 кварцевых слоя являются полуволновыми резонаторами, а разделяющие их слои из серебра служат полупрозрачными зеркалами. Аналогичные, но однорезонаторные структуры, работающие как полосно-пропускающие фильтры либо на отражение [7], либо на прохождение [8], имеют слишком малые затухания в полосах заграждения. Таким же недостатком обладают фильтры, исследованные в работе [9],

в которых в качестве металла выбрано не серебро, а хром.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ

Электродинамический анализ планарных многослойных структур проводился при условии нормального падения света. В радиотехнике многослойные структуры, как правило, моделируют четырехполюсниками, т.е. устройствами с портами на входе и выходе. Портами в рассматриваемой многослойной структуре являются ее две наружные поверхности, граничащие с окружающим свободным пространством. Для расчета коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн при их падении на слоистые структуры удобно пользоваться безразмерными матрицами передачи $\mathbf{M}$, элементы которых принимают комплексные значения. В микроволновой технике такие матрицы часто называют нормированными ABCD-матрицами [10]. Эти матрицы связывают тангенциальные составляющие напряженности электрического поля E_i и магнитного поля H_i на обеих наружных поверхностях планарной структуры матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ Z_0 H_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} E_2 \\ Z_0 H_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства [2]. Матрица передачи m -слойной структуры равна произведению

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \dots \mathbf{M}_k \dots \mathbf{M}_m, \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_k$ — матрица передачи k -го слоя. Ее элементы выражаются формулой

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & (-iZ_k/Z_0) \sin \theta_k \\ (-iZ_0/Z_k) \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь θ_k — электрическая толщина k -го слоя, $Z_k = Z_0 \sqrt{\mu_k/\epsilon_k}$ — волновое сопротивление материала k -го слоя, а ϵ_k и μ_k — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала. При получении формулы (3) предполагалось, что колебания электромагнитного поля описываются множителем $\exp(-i\omega t)$. В рассматриваемом нами случае все μ_k равны единице, так как слоистая структура состоит только из немагнитных материалов.

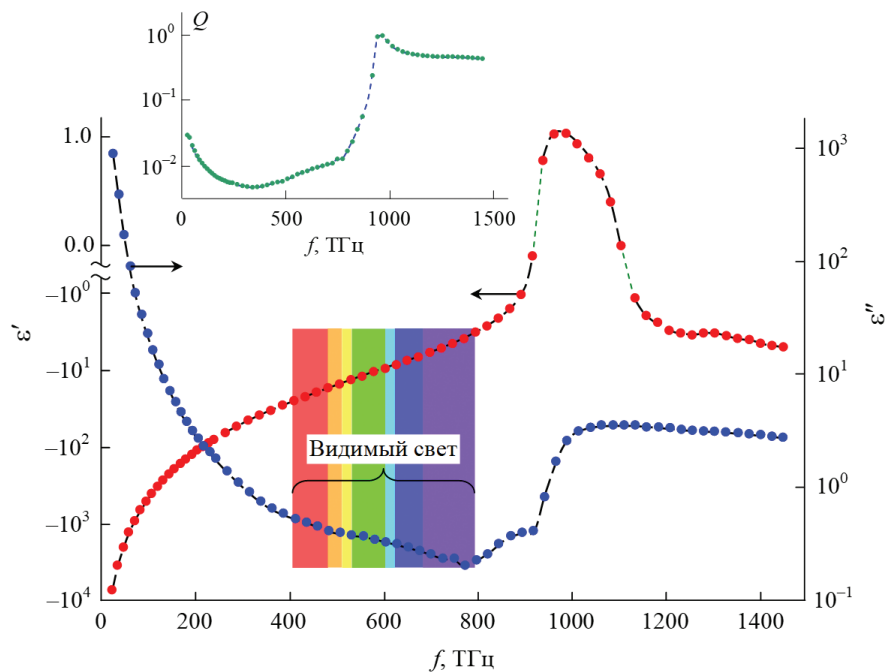


Рис. 1. Частотные зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости серебра. Точки — результаты измерений [11], штриховые линии — интерполяции кубическими сплайнами. На вставке показана частотная зависимость добротности серебра.

Зная матрицу передачи $\mathbf{M}$ многослойной структуры, можно рассчитать матрицу рассеяния $\mathbf{S}$ этой структуры, которая традиционно используется при решении электродинамических задач. Взаимосвязь элементов матрицы $\mathbf{S}$ с элементами матрицы $\mathbf{M}$ выражается простыми формулами

$$S_{11} = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}},$$

$$S_{21} = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}. \quad (4)$$

Через элементы матрицы рассеяния несложно рассчитать коэффициент отражения $K_R = |S_{11}|^2$ и коэффициент прохождения $K_L = |S_{21}|^2$ падающей электромагнитной волны. Однако в задачах электродинамики вместо коэффициентов отражения K_R и коэффициента прохождения K_L чаще используют такие понятия, как потери на отражение $R = 20 \lg |S_{11}|$ и потери на прохождение $L = 20 \lg |S_{21}|$, измеряемые в децибелах. Логарифмическая шкала необходима особенно при рассмотрении фильтров, когда в полосах заграждения у них большие потери.

Для электродинамического анализа модели оптического фильтра на слоистой структуре,

в котором слои из кварца являются полуволновыми резонаторами, а слои из серебра служат зеркалами, необходимо знать частотные зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей относительной диэлектрической проницаемости серебра. Частотной дисперсией комплексной диэлектрической проницаемости кварца можно пренебречь, так она очень мала в оптическом диапазоне $\epsilon' = 2.13$ и $\epsilon'' = 5 \cdot 10^{-5}$. Серебро же, напротив, имеет колоссальную дисперсию в оптическом диапазоне как $\epsilon'(f)$, так и $\epsilon''(f)$, зависимости которых представлены на рис. 1 в диапазоне частот от 24 ТГц до 1471 ТГц [11]. Видно, что как действительная, так и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости изменяются на несколько порядков. В этом диапазоне авторы определили ϵ' и ϵ'' на 69 частотах [11], показанных точками на рис. 1. Однако для расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) полосно-пропускающих фильтров требуется гораздо больше точек в этом диапазоне частот, поэтому по измеренным значениям ϵ' и ϵ'' нами была проведена интерполяция зависимостей кубическими сплайнами, разбив указанный диапазон на 5000 точек, представленных штриховыми линиями на рис. 1.

Важно отметить, что в ультрафиолетовой области частот в диапазоне 930–1112 ТГц

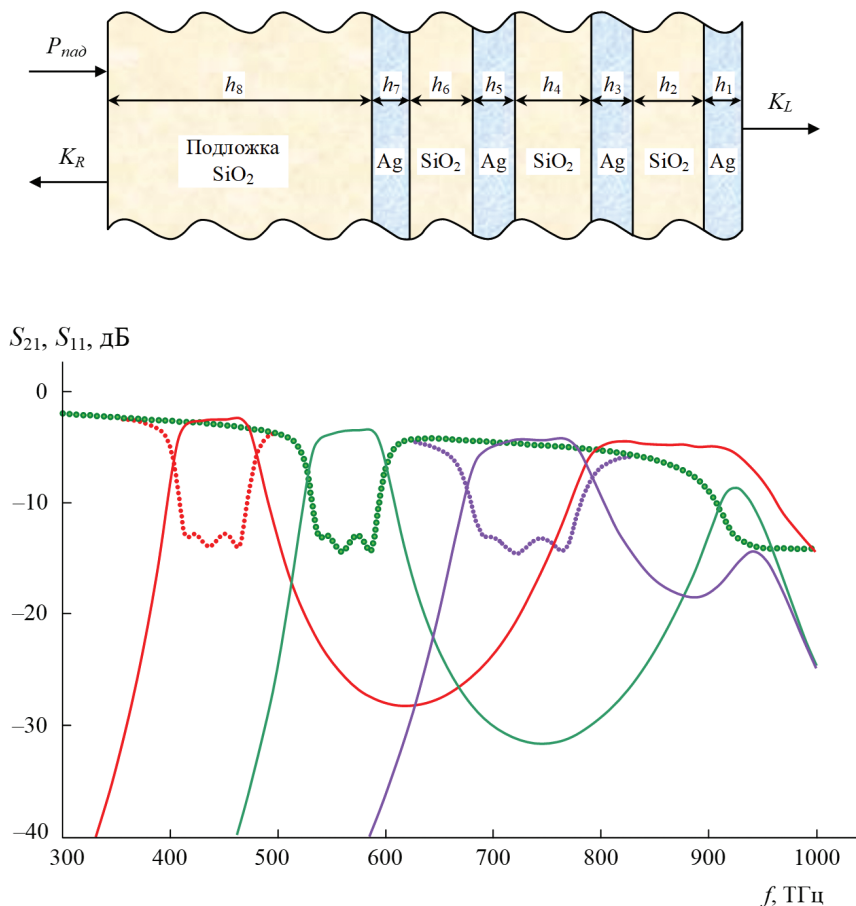


Рис. 2. Конструкция фильтра третьего порядка и АЧХ трех фильтров, настроенных по ширине полосы пропускания на красный, зеленый и фиолетовый цвета видимого спектра частот (прямые потери — линии, потери на отражение — точки).

действительная часть диэлектрической проницаемости серебра принимает положительные значения, достигая максимума $\epsilon' \sim 1.2$ на частоте $f \sim 980$ ТГц. Примерно в этой же области наблюдается “размытый” экстремум мнимой части диэлектрической проницаемости, максимум которой $\epsilon'' \sim 3.5$ попадает на частоту $f \sim 1088$ ТГц.

На рис. 1 показан также спектр частот видимого света, а на вставке рисунка представлена зависимость добротности серебра, вычисленная по формуле [12]

$$Q = \frac{\text{Re} \sqrt{\epsilon}}{2 \text{Im} \sqrt{\epsilon}} = \frac{n'}{2n''}, \quad (5)$$

где n' и n'' — действительная и мнимая части показателя преломления. Эта добротность не превышает значения 0.5 при отрицательных ϵ' , как это было установлено в [12], однако в области положительных ϵ' она имеет максимум $Q \sim 1.0$ на частоте $f \sim 955$ ТГц.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Рассмотрим конструкцию фильтра третьего порядка в свободном пространстве (рис. 2), состоящего из чередующихся слоев серебра и кварца с толщинами $h_1, h_2 \dots h_7$, осажденных на подложку из кварцевого стекла толщиной $h_8 = 0.5$ мм. В этой конструкции три четных слоя из SiO_2 являются полуволновыми резонаторами, формирующими полосу пропускания фильтра, а нечетные слои из Ag служат зеркалами, обеспечивающими оптимальные связи резонаторов друг с другом и со свободным пространством. С использованием описанной выше методики электродинамического анализа многослойных структур была написана программа для расчета АЧХ такой структуры, с помощью которой производился параметрический синтез фильтров.

Таблица 1. Толщины слоев h_i в фильтрах третьего порядка: нечетные i – Ag, четные i – SiO₂

Толщина слоя, нм		h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
Цвет фильтра	Красный	11.3	170.4	28.4	182.4	28.4	170.4	11.3
	Зеленый	18.2	128.1	41.6	134.1	41.6	128.1	18.2
	Фиолетовый	22.0	85.9	45.8	89.0	45.8	85.9	22.0

Для сравнения были синтезированы три фильтра с центральными частотами полос пропускания $f_r = 442.5$ ТГц, $f_g = 565$ ТГц и $f_v = 735$ ТГц, выбранных на краях и в центре видимого диапазона. Ширины полос пропускания Δf задавались по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь прошедшей мощности $K_L(f)$ и составляли для красного цвета $\Delta f = 75$ ТГц ($\Delta f/f_r \approx 17\%$), для зеленого цвета $\Delta f = 70$ ТГц ($\Delta f/f_g \approx 12\%$) и для фиолетового цвета $\Delta f = 110$ ТГц ($\Delta f/f_v \approx 15\%$). Кроме того, задавался максимальный уровень отражений в полосе пропускания $K_R = -14$ дБ. Поставленные условия выполнялись подбором толщин каждого из слоев рассматриваемой структуры в процессе ручного параметрического синтеза фильтров. Полученные толщины слоев представлены в табл. 1, а амплитудно-частотные характеристики синтезированных фильтров показаны на рис. 2. Чтобы не загромождать рисунок, полная частотная зависимость потерь на отражение на рисунке представлена для среднего “зеленого” фильтра, а для “красного” и “фиолетового” фильтров $S_{11}(f)$ показаны только в полосах пропускания. Видно, что с увеличением центральной частоты полосы пропускания минимальные потери в полосе пропускания фильтра монотонно увеличиваются: для “красного” $L_r \approx 2.5$, “зеленого” $L_g \approx 3.5$ и “фиолетового” $L_v \approx 4.3$ дБ. Очевидно, что потери прошедшей мощности в полосе пропускания связаны с затуханием электромагнитных волн в серебряных слоях, обладающих низкой добротностью (см. вставку на рис. 1), толщина которых увеличивается с ростом центральной частоты фильтра (см. табл. 1), что, соответственно, и приводит к росту потерь.

Особенностью рассматриваемых фильтров является наличие на АЧХ дополнительного максимума пропускания в ультрафиолетовой области на частоте ~ 930 ТГц, положение которого почти не изменяется при настройке фильтра на любую центральную частоту первой полосы пропускания. Этот максимум связан

с резонансом плазменных колебаний электронов в серебряных слоях, который наблюдается в ультрафиолетовой области вблизи названной частоты [13]. В этой области действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости становится положительной (см. рис. 1), при этом зеркала, теряя свою отражательную способность, пропускают электромагнитные волны. Важно отметить, что на АЧХ “красного” фильтра в ультрафиолетовой области также наблюдается вторая полоса пропускания, сформированная резонансами второй моды колебаний резонаторов из SiO₂ слоистой структуры. Ширина этой полосы значительно больше ширины первой полосы пропускания не только за счет увеличения взаимодействия резонаторов из-за уменьшения отражательной способности зеркал, но и за счет максимума прохождения, связанного с резонансом плазменных колебаний электронов в серебряных слоях, который располагается вблизи высокочастотного склона второй полосы пропускания.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ФИЛЬТРОВ

Многослойные структуры опытных образцов фильтров размером 10×10 мм осаждались на подложки размерами 12×12 мм из кварцевого стекла марки JGS1 толщиной 0.5 мм, шероховатость поверхности которых менее 1 нм. Послойное напыление структур проводилось на установке “AJA” (США) методом поочередного магнетронного распыления серебряной и кварцевой мишеней без разгерметизации вакуумной камеры. Для распыления серебряной мишени использовался DC-магнетрон, а для распыления кварцевой мишени – HF-магнетрон. Осаждались семислойные структуры с толщинами слоев, представленными в табл. 1, которые определялись временем напыления каждого слоя при известных скоростях напыления. Для определения скоростей напыления

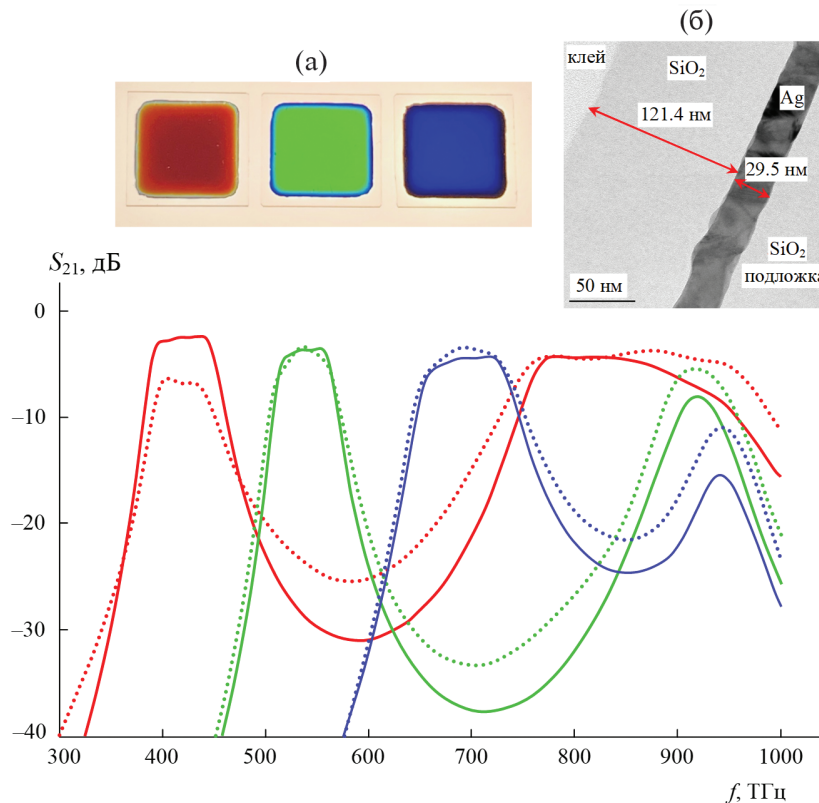


Рис. 3. АЧХ опытных образцов фильтров третьего порядка (точки) и АЧХ их одномерных моделей, настроенных на полосы пропускания опытных образцов по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь (линии). На вставках: а – фотографии опытных образцов, снятые на просвет, б – фотография поперечного среза двухслойной структуры Ag–SiO₂.

предварительно была изготовлена двухслойная структура Ag–SiO₂, в которой слой серебра осаждался в течение 50, а слой кремния – в течение 750 с. Затем был сделан поперечный срез этой структуры, и на электронном микроскопе JEM-2100 (JEOL Ltd.) были измерены толщины этих слоев (рис. 3б). В результате рассчитанная скорость напыления серебра составляла ~ 0.59 нм/с, а кварца ~ 0.16 нм/с.

На рис. 3 точками показаны измеренные на спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 (Япония) АЧХ изготовленных опытных образцов трех фильтров, а на вставке рис. 3а представлены фотографии этих фильтров, полученные на просвет. На фотографиях каждого фильтра виден ореол по периметру многослойной структуры, отличающийся по цвету от цвета фильтра. Это объясняется тем, что края структуры имеют меньшую толщину слоев, так как их во время напыления “затеняет” подложкодержатель, при этом спектр краев, соответственно,

сдвигается в более высокие частоты. Поэтому у “красного” фильтра края оранжево-желтые, “зеленого” – синие, а у “фиолетового” они черные, так как спектр его краев попадает в ультрафиолетовую область частот.

При сравнении рассчитанных АЧХ одномерных моделей исходных фильтров (рис. 2) с измеренными АЧХ реальных образцов, изготовленных по их размерам (рис. 3), видно качественное согласие характеристик. Хотя центральные частоты полос пропускания у всех реальных образцов сдвинуты вниз по частоте примерно на 5%, а также у них уменьшены относительные ширины полос пропускания на 1–5%. Эти факты говорят о том, что у изготовленных опытных образцов все слои имеют несколько большую толщину, чем у теоретически рассчитанных фильтров, приведенных в табл. 1. Что, очевидно, связано с точностью определения скоростей напыления слоев. В подтверждение были подобраны толщины слоев одномерных моделей фильтров так, чтобы

Таблица 2. Толщины слоев h_i в фильтрах третьего порядка: нечетные i – Ag, четные i – SiO₂, обеспечивающие совпадение полос пропускания по уровню –3 дБ теоретических и экспериментальных амплитудно-частотных характеристик

Толщина слоя, нм		h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
Цвет фильтра	Красный	12.7	185.3	31.8	196.0	31.8	185.3	12.7
	Зеленый	19.6	138.1	45.5	143.6	45.5	138.1	19.6
	Фиолетовый	23.5	94.9	48.8	98.4	48.8	94.9	23.5

ширины их полос пропускания, измеренные по уровню –3 дБ от уровня минимальных потерь, совпадали с измеренными ширинами полос пропускания реальных образцов. Толщины слоев представлены в табл. 2, а рассчитанные для них АЧХ показаны сплошными линиями на рис. 3. Видно, что увеличение толщины слоев в одномерных моделях фильтров примерно на 10% приводит к достаточно хорошему совпадению их характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, созданы планарные конструкции оптических полосно-пропускающих фильтров третьего порядка на структурах, полученных вакуумным напылением на подложки из кварцевого стекла слоев также из кварца, разделенных друг от друга, от подложки и от свободного пространства слоями из серебра. Три слоя из кварца являются полуволновыми резонаторами на центральной частоте полосы пропускания, а четыре слоя из серебра служат зеркалами, которые обеспечивают оптимальные связи резонаторов друг с другом и с портами на входе и выходе устройств. Толщины слоев Ag и SiO₂ по заданным параметрам полосы пропускания фильтров определялись параметрическим синтезом одномерных моделей с использованием их электродинамического анализа. При расчете применялись экспериментальные частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости серебра, которые, как известно, имеют огромную дисперсию в оптическом диапазоне.

Измеренные АЧХ изготовленных опытных образцов фильтров третьего порядка красного, зеленого и фиолетового цветов хорошо согласуются с расчетными характеристиками, полученными при синтезе устройств. Особенностью рассматриваемых фильтров является наличие

на АЧХ дополнительного максимума пропускания в ультрафиолетовой области на частоте ~930 ТГц, положение которого почти не изменяется при настройке фильтра на любую центральную частоту первой полосы пропускания. Этот максимум связан с резонансом плазменных колебаний электронов в серебряных слоях, который, как известно, в серебре наблюдается в ультрафиолетовой области вблизи названной частоты. Как показал расчет, при замене в фильтрах слоев из Ag на Cu или Au (частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрических проницаемостей меди и золота также приведены в работе [11]) дополнительный максимум на АЧХ наблюдается на частоте ~540 ТГц для медных зеркал и ~580 ТГц для зеркал из золота. Именно вблизи этих частот, попадающих в зеленую область видимого света, находятся резонансы плазменных колебаний электронов в Cu и Au [13].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание FEFE-2023-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Macleod H.A.* Thin-Film Optical Filters. Boca Raton: CRC Press, 2010. 772 p.
2. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов В.Ф.* Полосно-пропускающие фильтры на одномерных фотонно-кристаллических структурах // ДАН. 2014. Т. 454. № 6. С. 651–656.
<https://doi.org/10.7868/S0869565214060097>
3. *Li J.* // Optics Commun. 2010. V. 283. P. 2647–2650.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2010.02.046>
4. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов В.Ф.* // ДАН. 2014. Т. 456. № 4. С. 413–416.
<https://doi.org/10.7868/S0869565214160105>
5. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V., Shabanov V.F.* // Optics Letters. 2014. V. 39. No 12. P. 3512–3515.
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.003512>

6. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Шабанов Д.А. Исследование композита: металлические наночастицы в диэлектрической матрице и многослойных полосно-пропускающих фильтров на его основе // ДАН. 2021. Т. 497. С. 5–11. <https://doi.org/10.31857/S2686740021020024>
7. Li Z., Butun S., Aydin K. // ACS Photonics. 2015. V. 2. P. 183–189. <http://dx.doi.org/10.1021/ph500410u>
8. Jen Y.J., Lin M.J. Coatings. 2018. No. 8. V. 231. P. 1–8. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings8070231>
9. Shen W., Sun X., Zhang Y., Luo Z., Liu X., Gu P. // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.09.080>
10. Гунта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
11. Babar S., Weaver J.H. // Appl. Opt. 2015. V. 54. No 3. P. 477–481. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.54.000477>
12. Belyaev B.A., Tyurnev V.V. Ural Radio Engineering Journal. 2023. V. 7. No 4. P. 457–469. <https://doi.org/10.15826/urej.2023.7.4.006>
13. Borah R., Ninakanti R., Bals S., Verbruggen S.W. Scientific Reports. 2022. No. 12. V. 15738. P. 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20117-7>

THIRD-ORDER OPTICAL BANDPASS FILTERS BASED ON STRUCTURES OF ALTERNATING LAYERS OF QUARTZ AND SILVER

**B. A. Belyaev^{a, b}, V. V. Tyurnev^c, G. V. Skomorokhov^{b, c}, S. M. Zharkov^{b, c},
A. M. Serzhantov^{a, b}, D. A. Shabanov^{b, c}**

^a*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

^b*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

^c*Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

Presented by Academician of the RAS V.F. Shabanov

Designs of optical bandpass filters have been developed on planar structures, which were obtained by vacuum deposition onto quartz glass (SiO₂) substrates of three layers also of quartz, which are half-wavelength resonators separated from each other, from free space, and from the substrate by four layers of silver (Ag). The thicknesses of the Ag and SiO₂ layers were determined based on the given parameters of the filter passband by parametric synthesis of one-dimensional models using electrodynamic analysis. In this case, experimental frequency dependences of the real and imaginary parts of the permittivity of silver were used. The measured frequency responses of the manufactured prototypes of red, green and purple filters are in good agreement with the responses obtained during synthesis.

Keywords: Layered metal-dielectric structure, bandpass filter, complex permittivity