



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G02B 5/288 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019117518, 05.06.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.06.2019

Дата регистрации:
05.02.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.06.2019

(45) Опубликовано: 05.02.2020 Бюл. № 4

Адрес для переписки:
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.
38, ИФ СО РАН, отдел патентной и
изобретательской работы

(72) Автор(ы):

Беляев Борис Афанасьевич (RU),
Тюрнев Владимир Вениаминович (RU),
Лексиков Андрей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр "Красноярский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: EP 1967872 A1, 10.09.2008. CN
106019648 A, 12.10.2016. EP 1659445 A1,
24.05.2006.

(54) ОПТИЧЕСКИЙ МНОГОСЛОЙНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР

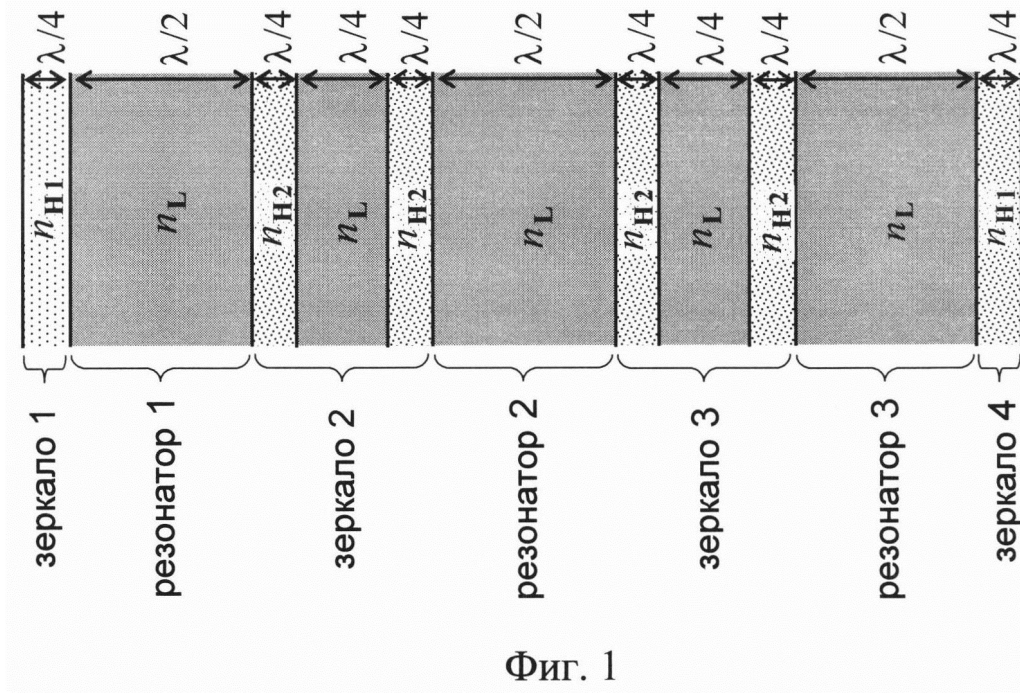
(57) Реферат:

Оптический многослойный полосно-пропускающий фильтр относится к оптической технике терагерцового диапазона и может быть использован в оптических устройствах связи и измерительной аппаратуре. Фильтр содержит чередующиеся диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления, образующие зеркально-симметричную конструкцию. Все диэлектрические слои с низким показателем преломления выполнены из одного материала. Часть диэлектрических слоев имеет полуволновую толщину и является резонаторами фильтра, а остальные диэлектрические слои имеют четвертьволновую толщину и образуют многослойные диэлектрические зеркала, отделяющие резонаторы фильтра друг от друга

и от внешнего пространства. Все диэлектрические слои с высокими показателями преломления выполнены из метаматериалов, представляющих собой диэлектрическую матрицу с металлическими наночастицами, оптимальные значения показателей преломления которых для каждого многослойного зеркала и каждого резонатора обеспечиваются оптимальной относительной объемной концентрацией металлических наночастиц в диэлектрической матрице метаматериала. Техническим результатом является уменьшение числа слоев в многослойных диэлектрических зеркалах полосно-пропускающего фильтра и расширение его нижней и верхней полосы заграждения. 1 табл., 6 ил.

RU 2 713 566 C1

RU 2 713 566 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G02B 5/288 (2019.08)

(21)(22) Application: **2019117518, 05.06.2019**

(24) Effective date for property rights:
05.06.2019

Registration date:
05.02.2020

Priority:

(22) Date of filing: **05.06.2019**

(45) Date of publication: **05.02.2020** Bull. № 4

Mail address:

**660036, g. Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, str.
38, IF SO RAN, otdel patentnoj i izobretatelskoj
raboty**

(72) Inventor(s):

**Belyaev Boris Afanasevich (RU),
Tyurnev Vladimir Veniaminovich (RU),
Leksikov Andrej Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe
nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyj
issledovatel'skij tsentr "Krasnoyarskij nauchnyj
tsentr Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii
nauk" (RU)**

(54) **OPTICAL MULTILAYER BAND-PASS FILTER**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: optical multilayer band-pass filter relates to optical equipment of terahertz range and can be used in optical communication devices and measuring equipment. Filter contains alternating dielectric layers from materials with high and low refraction indices forming a mirror-symmetric structure. All dielectric layers with low refraction index are made from one material. Part of dielectric layers has half-wave thickness and is filter resonators, and other dielectric layers have quarter-wave thickness and form multilayered dielectric mirrors separating filter

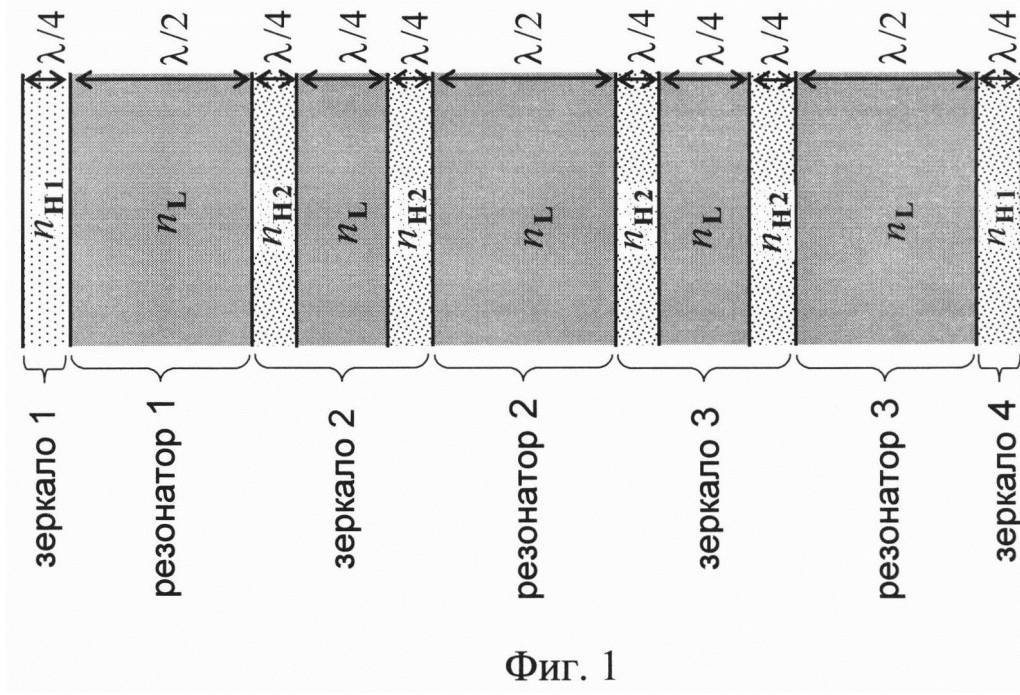
resonators from each other and from external space. All dielectric layers with high refractive indices are made from metamaterials, which are a dielectric matrix with metal nanoparticles, optimum magnitudes of refractive indices of which for each multilayer mirror and each resonator are ensured by optimal relative volume concentration of metal nanoparticles in dielectric matrix of metamaterial.

EFFECT: reduced number of layers in multilayered dielectric mirrors of strip-pass filter and expansion of its lower and upper barrier strip.

1 cl, 1 tbl, 6 dwg

RU 2 713 566 C1

RU 2 713 566 C1



Фиг. 1

Изобретение относится к оптической технике терагерцового диапазона и может быть использовано в устройствах связи и измерительной аппаратуре.

Известен оптический многослойный полосно-пропускающий фильтр пятого порядка [Аналог: Н.А. Macleod. Thin-film optical filters. 4-th ed., Tucson: CRC Press, ©2010 Taylor and Francis Group, p.356-357, Figure 8.22]. Фильтр содержит чередующиеся диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления, образующие зеркально-симметричную конструкцию. В фильтре все диэлектрические слои с высоким показателем преломления (n_H) выполнены из одного материала, а все слои с низким показателем преломления (n_L) выполнены из второго материала. Пять диэлектрических слоев фильтра имеют толщину $\lambda/2$, где λ - длина волны в материале на центральной частоте полосы пропускания. Каждый из этих пяти слоев является резонатором фильтра. Они выполнены из материала с показателем преломления n_H . Остальные диэлектрические слои имеют толщину $\lambda/4$. Они образуют многослойные диэлектрические зеркала, отделяющие резонаторы фильтра друг от друга и от внешнего пространства. Каждое из двух наружных зеркал состоит из 6 слоев, а каждое из трех внутренних зеркал состоит из 13 слоев. Последнее обстоятельство означает, что все внутренние зеркала обеспечивают одинаковую связь для любой пары смежных резонаторов.

Одним из недостатков этого полосно-пропускающего фильтра пятого порядка является большое число слоев в его зеркалах, что не только усложняет его конструкцию, но и ухудшает его частотную характеристику в полосах заграждения, сильно сужая ширину последних. Вторым недостатком фильтра являются его низкие селективные свойства в полосе пропускания, выражающиеся в большой неравномерности затухания, достигающей 3 дБ.

Наиболее близким аналогом заявляемого изобретения является трехрезонаторный полосно-пропускающий фильтр [Прототип: Гончаров Ф.Н., Лапшин Б.А., Петраков В.А., Политыкин Р.В., Шмидт А.А. Оптический многослойный фильтр. Патент РФ №2316029, 27.01.2008, МПК G02B 5/28]. Трехрезонаторный фильтр также содержит чередующиеся диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления. В нем все слои с высоким показателем преломления (n_H) выполнены из одного материала, а все слои с низким показателем преломления (n_L) выполнены из второго материала. Три диэлектрических слоя фильтра имеют толщину $L/2$. Они являются резонаторами фильтра, центральный из которых выполнен из материала с показателем преломления n_H , а два других резонатора выполнены из материала с показателем преломления n_L . Остальные диэлектрические слои имеют толщину $\lambda/4$. Они образуют четыре многослойные диэлектрические зеркала, отделяющие резонаторы друг от друга (два внутренних зеркала) и от внешнего пространства (два наружных зеркала). Количество слоев в наружных и внутренних зеркалах определяется предложенными математическими формулами, описывающими зависимость только от двух величин - от отношения показателей преломления двух используемых материалов и от относительной ширины полосы пропускания фильтра.

Основным недостатком этого трехрезонаторного полосно-пропускающего фильтра, как и предыдущего фильтра, является большое число диэлектрических слоев в зеркалах фильтра, приводящее к уширению паразитных полос пропускания и тем самым к сужению полос заграждения. В приведенном примере фильтра каждое наружное зеркало содержит 17 диэлектрических слоев, а каждое внутреннее зеркало содержит 34 диэлектрических слоя.

Техническим результатом заявляемого изобретения является уменьшение числа слоев

в многослойных диэлектрических зеркалах полосно-пропускающего фильтра и за счет этого расширение его нижней и верхней полосы заграждения.

Технический результат для оптического многослойного полосно-пропускающего фильтра, содержащего чередующиеся диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления, в котором все диэлектрические слои с низким показателем преломления выполнены из одного материала, часть диэлектрических слоев имеют толщину $\lambda/2$ и являются резонаторами фильтра, а остальные диэлектрические слои имеют толщину $\lambda/4$ и образуют многослойные диэлектрические зеркала, отделяющие резонаторы фильтра друг от друга и от внешнего пространства, достигается тем, что все материалы диэлектрических слоев с высокими показателями преломления являются метаматериалами, представляющими собой диэлектрическую матрицу с металлическими наночастицами, оптимальное значение показателя преломления которых для каждого многослойного зеркала и каждого резонатора обеспечивается оптимальной относительной объемной концентрацией металлических наночастиц в диэлектрической матрице метаматериала.

Заявляемый оптический многослойный полосно-пропускающий фильтр отличается от прототипа тем, что все материалы диэлектрических слоев с высокими показателями преломления n_H являются метаматериалами, представляющими собой диэлектрическую матрицу с металлическими наночастицами. Оптимальное значение показателя преломления n_H метаматериала в каждом многослойном зеркале и в каждом резонаторе, отвечающее требуемой амплитудно-частотной характеристике фильтра, обеспечивается оптимальной относительной объемной концентрацией с металлических наночастиц в диэлектрической матрице метаматериала. Оптимальная величина концентрации с возрастает как с уменьшением требуемой ширины полосы пропускания, так и с уменьшением выбранного числа слоев в зеркале. При этом концентрация с ограничена неравенством $0 < c < 1/3$. На верхнем пределе этого неравенства метаматериал теряет диэлектрические свойства и превращается в проводник с большими омическими потерями.

Эти отличия позволяют сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна». Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях при изучении данной и смежных областей техники и, следовательно, обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

Сущность изобретения поясняется чертежами и таблицей.

На фиг. 1 изображена конструкция фильтра 1 с центральной частотой полосы пропускания $f_0=1$ ТГц и относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_0=2\%$.

На фиг. 2 представлена частотная зависимость коэффициента прохождения $|S_{21}|^2$ в широкой полосе частот для фильтра 1 и его прототипа.

На фиг. 3 представлены частотные зависимости коэффициента прохождения $|S_{21}|^2$ и коэффициента отражения $|S_{11}|^2$ в узкой полосе частот для фильтра 1.

На фиг. 4 изображена конструкция фильтра 2 с центральной частотой полосы пропускания $f_0=1$ ТГц и относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_0=20\%$.

На фиг. 5 представлены частотные зависимости коэффициента прохождения $|S_{21}|^2$ и коэффициента отражения $|S_{11}|^2$ для фильтра 2.

На фиг. 6 представлена зависимость показателя преломления n_H для метаматериала, используемого в фильтре 1 и фильтре 2, от величины относительной объемной концентрации $c_{1,2}$ металлических наночастиц. Здесь же показано значение показателя преломления n_L для диэлектрической матрицы метаматериала.

В табл. I приведены показатели преломления n_{HL} для полистирола и n_{H1} и n_{H2} для метаматериалов на его основе вместе с отвечающими им относительными объемными концентрациями c_1 и c_2 наночастиц серебра.

Примеры осуществления изобретения показывают два фильтра, фильтр 1 и фильтр 2, конструкции которых изображены на фиг. 1 и фиг. 4.

Фильтр 1 содержит три резонатора (резонатор 1, резонатор 2 и резонатор 3), каждый из которых выполнен из полистирола полуволновой толщины с показателем преломления $n_{HL}=1.612$. Каждый такой резонатор отделен от соседнего резонатора внутренним трехслойным диэлектрическим зеркалом (зеркало 2 и зеркало 3), все слои которого имеют четвертьволновую толщину. Внутренний слой трехслойных зеркал выполнен из полистирола, а наружные слои этих зеркал выполнены из одного метаматериала с показателем преломления n_{H2} . Этот метаматериал получен внедрением наночастиц серебра в диэлектрическую матрицу из полистирола. При этом относительная объемная концентрация наночастиц c_2 в диэлектрической матрице отвечает определенной оптимальной величине показателя преломления, обеспечивающей требуемую амплитудно-частотную характеристику фильтра. Наружные зеркала (зеркало 1 и зеркало 4) имеют по одному четвертьволновому слою. Они также выполнены из метаматериала, полученного внедрением в полистирол наночастиц серебра, но уже с другой концентрацией c_1 , отвечающей оптимальному показателю преломления n_{H1} . В зависимости от требуемой ширины полосы пропускания, концентрации $c_{1,2}$ и отвечающие им показатели преломления $n_{H1,2}$ могут изменяться в пределах $0 < c_{1,2} < 1/3$, $1.612 < n_{1,2} < 30$, согласно графику на фиг. 6. В частности, для амплитудно-частотной характеристики, изображенной на фиг. 2 и фиг. 3, конкретные оптимальные значения показателей преломления $n_{H1,2}$ и отвечающих им концентраций $c_{1,2}$ приведены в Таблице I.

Фильтр 2 также содержит три резонатора полуволновой толщины (резонатор 1, резонатор 2 и резонатор 3). Однако эти резонаторы выполнены из метаматериалов, полученных внедрением наночастиц серебра в диэлектрическую матрицу из полистирола. Метаматериал резонатора 1 и резонатора 3 имеет показатель преломления n_{H1} , а метаматериал резонатора 2 имеет показатель преломления n_{H2} . Наружные диэлектрические зеркала у фильтра отсутствуют. Два внутренних однослойных четвертьволновых зеркала (зеркало 1 и зеркало 2) располагаются между соседними резонаторами. Оба эти зеркала выполнены из полистирола с показателем преломления n_L . В зависимости от требуемой ширины полосы пропускания, концентрации $c_{1,2}$ и отвечающие им показатели преломления $n_{H1,2}$ могут изменяться в пределах $0 < c_{1,2} < 1/3$, $1.612 < n_{1,2} < 30$. В частности, для амплитудно-частотной характеристики, изображенной на фиг. 5, конкретные оптимальные значения показателей преломления $n_{1,2}$ и отвечающих им концентраций $c_{1,2}$ приведены в Таблице I.

Достижение технического результата, а именно уменьшение числа четвертьволновых диэлектрических слоев в зеркалах оптического многослойного полосно-пропускающего фильтра подтверждают две представленные конструкции фильтров на фиг. 1 и фиг. 4,

а также их расчетные амплитудно-частотные характеристики на фиг. 2, фиг. 3, фиг. 5.

Эффект расширения нижней и верхней полосы заграждения, т.е. эффект сужения паразитных полос пропускания, при уменьшении числа четвертьволновых диэлектрических слоев в зеркалах многослойных полосно-пропускающих фильтрах, объясняется следующим. Совокупности четвертьволновых слоев в зеркалах образуют многослойные резонаторы, резонансные частоты которых находятся ниже полосы пропускания. В результате сужается низкочастотная полоса заграждения. Однако каждый слой многослойного зеркала имеет резонансные частоты полуволновых резонансов выше полосы пропускания, что приводит к сужению уже высокочастотной полосы заграждения. При этом, чем больше четвертьволновых слоев в зеркалах, тем уже становятся полосы заграждения в фильтре. А количество слоев в зеркалах определяется не только шириной полосы пропускания, но и контрастом показателей преломления. Чем контраст больше, тем меньше требуется слоев в зеркалах.

Приведенные примеры осуществления изобретения отличаются от известных конструкций фильтров тем, что в них в качестве материалов диэлектрических слоев с высоким показателем преломления используется метаматериалы, повышенные и регулируемые показатели преломления которых позволяют значительно уменьшить число диэлектрических слоев в зеркалах фильтра и тем самым расширить полосы заграждения фильтра.

Фильтр работает следующим образом. Чередующиеся четвертьволновые диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления, образующие диэлектрические зеркала фильтра, можно рассматривать как фрагмент одномерного фотонного кристалла, который имеет периодические по частоте чередующиеся запрещенные зоны и зоны прозрачности для электромагнитных волн. Зоны прозрачности зеркал являются паразитными полосами пропускания фильтра. Диэлектрические слои полуволновых резонаторов фильтра, взаимодействующие между собой через диэлектрические зеркала, формируют в первой запрещенной зоне зеркал рабочую полосу пропускания фильтра. Полосы заграждения фильтра располагаются в запрещенной зоне зеркал между полосой пропускания и ближайшими паразитными полосами пропускания. Ширина полосы пропускания тем больше, чем больше связь резонаторов друг с другом. Величина же связи соседних резонаторов убывает как с увеличением числа слоев в разделяющем их зеркале, так и с увеличением контраста показателей преломления материалов зеркала. Требуемая величина показателя преломления метаматериала обеспечивается оптимальной величиной относительной объемной концентрации металлических наночастиц в диэлектрической матрице материала. Зависимость показателя преломления метаматериала от относительной объемной концентрации в нем металлических наночастиц может быть рассчитана по формуле, полученной в статье [Беляев Б.А., Тюрнев В.В. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2018, том 154, вып.4 (10), стр. 716]. График этой зависимости для метаматериала, используемого в приведенных примерах, показан на фиг. 6. Равномерность прохождения мощности в полосе пропускания фильтра обеспечивается оптимальными величинами коэффициентов связи соседних резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов с внешним пространством.

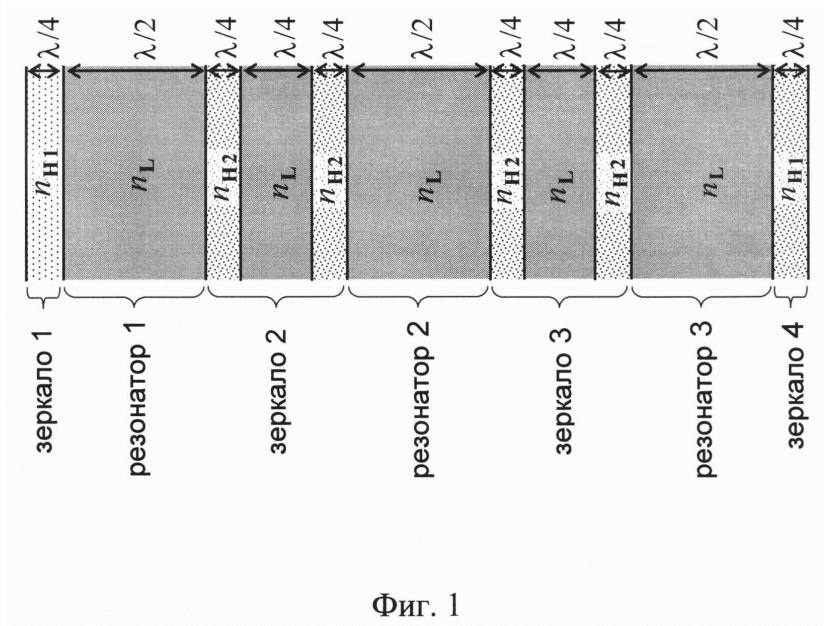
Таким образом, преимуществом заявляемого оптического многослойного фильтра является уменьшение числа диэлектрических слоев в зеркалах фильтра и увеличение ширины его полос заграждения.

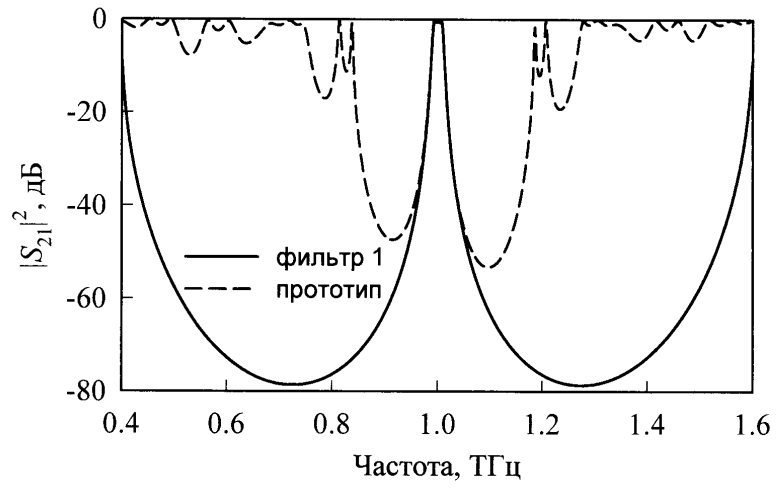
Таблица I

	n_L	n_{H1}	n_{H2}	c_1	c_2
фильтр 1	$1.612+i9.3 \cdot 10^{-5}$	$8.067+i5.5 \cdot 10^{-3}$	$10.21+i1.7 \cdot 10^{-2}$	0.320	0.325
фильтр 2	$1.612+i9.3 \cdot 10^{-5}$	$4.192+i4.2 \cdot 10^{-4}$	$10.54+i2.0 \cdot 10^{-2}$	0.284	0.3255

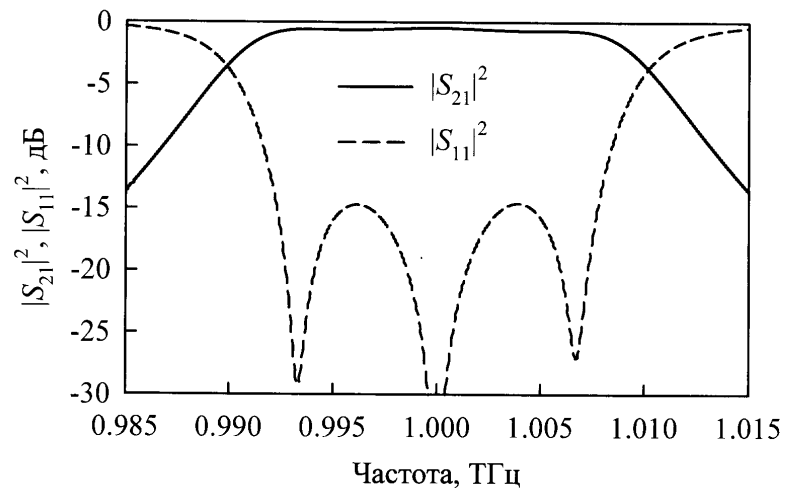
(57) Формула изобретения

Оптический многослойный полосоно-пропускающий фильтр, имеющий зеркально-симметричную конструкцию и содержащий чередующиеся диэлектрические слои из материалов с высоким и низким показателями преломления, в котором все диэлектрические слои с низким показателем преломления выполнены из одного материала, часть диэлектрических слоев имеет полуволновую толщину, и является резонаторами фильтра, а остальные диэлектрические слои имеют четвертьволновую толщину и образуют многослойные диэлектрические зеркала, отделяющие резонаторы фильтра друг от друга и от внешнего пространства, отличающийся тем, что все диэлектрические слои с высокими показателями преломления выполнены из метаматериалов, представляющих собой диэлектрическую матрицу с металлическими наночастицами, оптимальные значения показателей преломления которых для каждого многослойного зеркала и каждого резонатора обеспечиваются оптимальной относительной объемной концентрацией металлических наночастиц в диэлектрической матрице метаматериала.

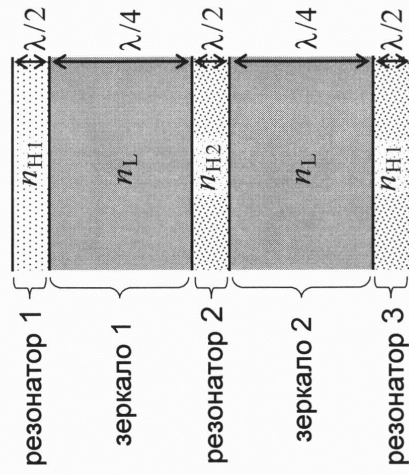




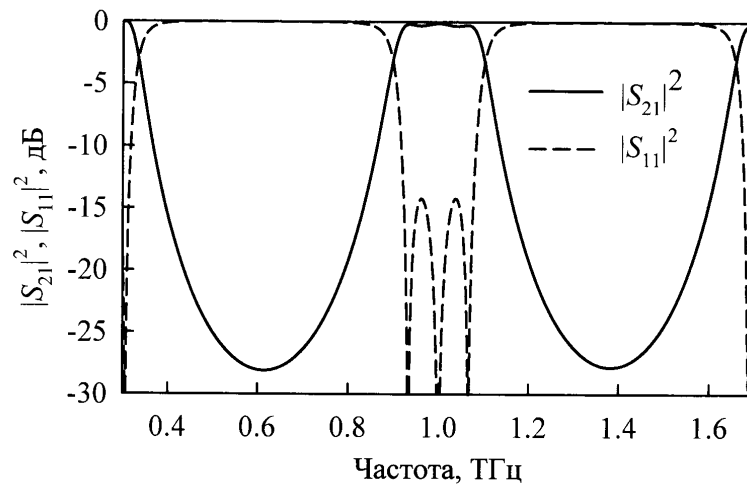
Фиг. 2



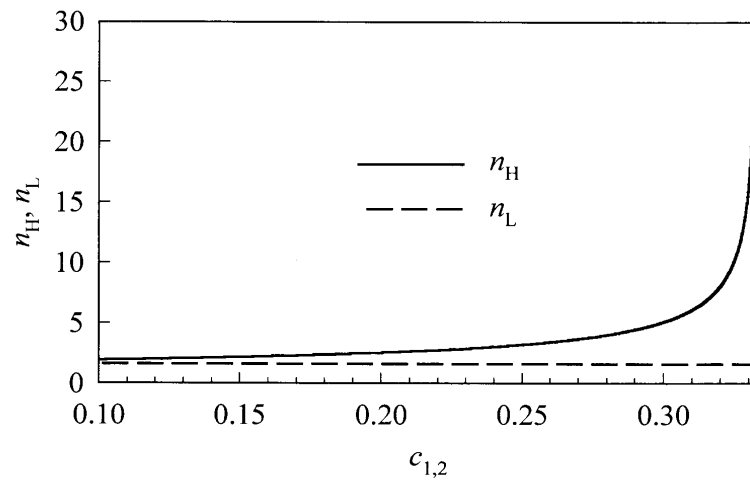
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6