



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011146615/08, 17.11.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.11.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.11.2011

(45) Опубликовано: 10.12.2012 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 7826504 B2, 22.10.2009. RU 2259619 C2,
27.08.2005. RU 85772 U1, 10.08.2009. RU 79718
U1, 10.01.2009. RU 2052871 C1, 20.01.1996. WO
2008/121159 A3, 09.10.2006.

Адрес для переписки:

119331, Москва, а/я 88, В.Н. Рослову

(72) Автор(ы):

**Вендик Ирина Борисовна (RU),
Одит Михаил Александрович (RU),
Козлов Дмитрий Сергеевич (RU),
Холодняк Дмитрий Викторович (RU)**

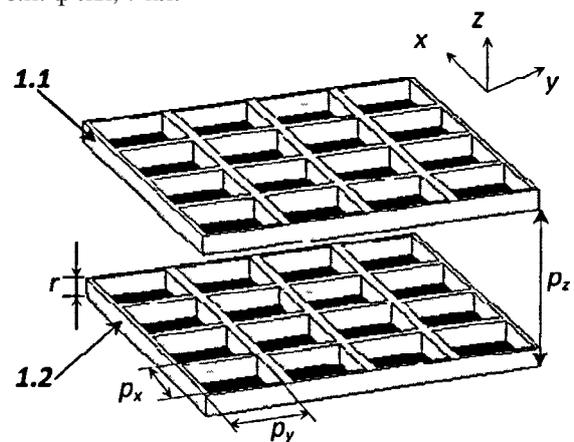
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Санкт-
Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В.И. Ульянова (Ленина) (RU),
Корпорация "САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС
Ко., Лтд." (KR)****(54) ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ МЕТАМАТЕРИАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ТЕРАГЕРЦЕВОГО
ДИАПАЗОНА**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электрорадиотехники, а более конкретно - к устройствам для фильтрации электромагнитного излучения в терагерцевом диапазоне. Технический результат - обеспечение высокой частотной избирательности терагерцевого излучения. Для этого перестраиваемый метаматериальный фильтр терагерцевого диапазона содержит один блок, состоящий из двух слоев, каждый из которых представляет собой пересекающиеся провода; причем между двумя соседними слоями пересекающихся проводов размещен один слой нематического жидкого кристалла с расположенной под ним диэлектрической подложкой, на которой размещены проводящие плоские элементы крестообразной формы; диэлектрической подложки, на который расположен нижний слой

пересекающихся проводов, и управляющих электродов, выполненных с возможностью подачи напряжения на нематический жидкий кристалл и размещенных на противоположных боковых поверхностях указанного фильтра. 7 з.п. ф-лы, 7 ил.

**Фиг. 1**



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01Q 15/22 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2011146615/08, 17.11.2011

(24) Effective date for property rights:
17.11.2011

Priority:

(22) Date of filing: 17.11.2011

(45) Date of publication: 10.12.2012 Bull. 34

Mail address:

119331, Moskva, a/ja 88, V.N. Roslovu

(72) Inventor(s):

Vendik Irina Borisovna (RU),
Odit Mikhail Aleksandrovich (RU),
Kozlov Dmitrij Sergeevich (RU),
Kholodnjak Dmitrij Viktorovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ehlektrotekhnicheskij universitet "LEhTI" im. V.I. Ul'janova (Lenina) (RU),
Korporatsija "SAMSUNG EhLEKTRONIKS Ko., Ltd." (KR)

(54) **TUNABLE METAMATERIAL FILTER OF TERACYCLE RANGE**

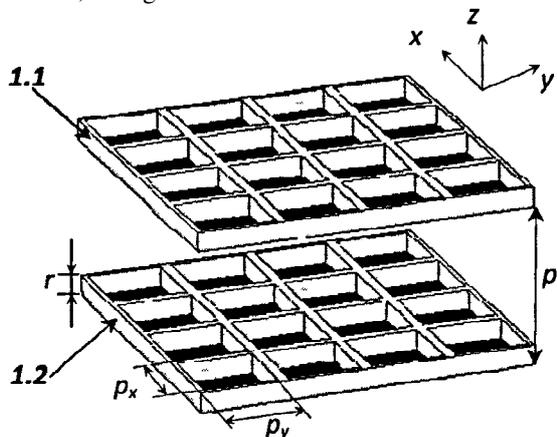
(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: tunable metamaterial filter of a teracycle range comprises one unit, made of two layers, every of which represents crossing wires; besides, between two neighbouring layers of crossing wires there is one layer of a nematic liquid crystal with a dielectric substrate arranged underneath, on which there are flat elements of cross-like shape installed; a dielectric substrate, on which there is a lower layer of crossing wires, and control electrodes made as capable of supplying voltage to a nematic liquid crystal and arranged at opposite side surfaces of the specified filter.

EFFECT: invention provides for high frequency selectivity of teracycle radiation.

8 cl, 9 dwg



Фиг. 1

RU 2 4 6 9 4 4 6 C 1

RU 2 4 6 9 4 4 6 C 1

Изобретение относится к области электрорадиотехники, а более конкретно - к устройствам для фильтрации электромагнитного излучения в терагерцевом диапазоне.

Излучение в терагерцевом (ТГц) диапазоне - относительно новая область исследований, имеющая большое количество потенциальных приложений в системах высокоскоростной связи на близком расстоянии, в системах обеспечения безопасности, медицине, промышленности, исследовании космоса и т.д. (см. Peter de Maagt, Terahertz technology for space and earth applications, Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on, 6-10 Nov. 2006, pp.1-4. [1] и Withayachumnankul, W.; Abbott, D., Metamaterials in the Terahertz Regime, Photonics Journal, IEEE, Volume: 1 Issue: 2, pp.99-118) [2]. В настоящее время достигнут ощутимый прогресс в области изготовления компактных генераторов и приемников ТГц-излучения, однако до сих пор существует дефицит устройств, способных управлять ТГц-излучением (переключателей, модуляторов, фазовращателей). В основном, это вызвано наличием «ТГц щели»: природные материалы являются прозрачными для ТГц излучения и не обладают электрическим или магнитным откликом на излучения диапазона 1-3 ТГц. Для обеспечения функционирования в ТГц диапазоне необходимо создать искусственные материалы с заданными свойствами.

Среди новых типов материалов важная роль принадлежит искусственным электромагнитным материалам - метаматериалам (МТМ). Метаматериалы позволяют получить желаемые электромагнитные свойства в любом частотном диапазоне. Метаматериалы призваны решить проблему феномена «ТГц щели» и стимулировать исследования и разработки в ТГц диапазоне. Отдельные виды электромагнитных МТМ проявляют необычные свойства, такие как: отрицательная или нулевая диэлектрическая и магнитные проницаемости, отрицательный или нулевой коэффициент преломления, эффект сверхразрешения и маскировки. Ожидается, что метаматериалы позволят заполнить нишу управляемых ТГц материалов, что представляется невозможным при использовании естественных природных материалов.

Проектирование метаматериалов с заданными свойствами широко обсуждается в литературе. Наиболее часто для реализации МТМ в микроволновой области, на миллиметровых волнах и ТГц диапазоне используются следующие структуры:

- МТМ на основе кольцевых резонаторов с зазором;
- МТМ на основе резонансных диэлектрических включений;
- МТМ на основе сегнетоэлектриков и ферромагнетиков;
- МТМ на основе материалов с фазовым переходом;
- слоистые металл-диэлектрические МТМ структуры;
- МТМ структуры, заполненные жидким кристаллом.

Вышеперечисленные структуры наиболее часто используют при создании управляемых МТМ.

Из уровня техники известны такие устройства на основе МТМ, которые выполняют роль резонатора нулевого порядка для мобильного терминала беспроводной передачи энергии. Такая структура описана, например, в патентной заявке США №2010/0123530 [3]. Предложенное в [3] устройство обладает свойствами метаматериала (отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями). Для резонатора нулевого порядка волновое число, характеризующее электромагнитную волну, равно нулю.

Пример полосно-пропускающего фильтра ТГц диапазона описан в патенте США №7,483,088 [4], где предложено устройство в виде частотного селектора с

перестройкой частоты, основанного на фазовой задержке, что обеспечивается использованием жидких кристаллов.

Описанный в [4] Lyot-фильтр представляет собой двулучепреломляющий фильтр, широко применяемый в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах излучения.

5 Фильтр функционирует на принципах интерференции поляризованного света на стыке двулучепреломляющих элементов, оптические оси которых наклонены по отношению друг к другу. Lyot-фильтры могут быть управляемыми при использовании в них активных фазозамедляющих двулучепреломляющих элементов, таких как
10 электрооптические кристаллы и нематические жидкие кристаллы.

Основной недостаток описанного изобретения - большие габариты постоянных магнитов, использованных в структуре, и большая величина магнитного поля, необходимого для управления резонансной частотой. Также частотная перестройка
15 фильтра труднореализуема в силу того, что требует механического отклонения положения магнитов, что значительно медленнее оптического или электронного управления.

Кроме того, уровень вносимых потерь фильтра (8 дБ) весьма высок и препятствует применению такого фильтра в некоторых устройствах. Также структура устройства
20 крайне сложна в изготовлении.

Наиболее близким по своим признакам к заявляемому изобретению является решение, описанное в патенте США №7,826,504 [5], где предложено устройство, состоящее из массива металлических (золотых) электрических резонансных элементов
25 (метаматериал), размещенных на полупроводниковой подложке. МТМ элементы представляют собой резонаторы в виде проводящих рамок с изолированными зазорами или же дуальную структуру в виде непроводящих контуров с проводящими зазорами. Обе такие структуры обеспечивают управление коэффициентом передачи структуры. Предлагаются и сравниваются различные формы резонансных элементов.
30 В массив резонансных элементов на полупроводниковой подложке встраивают диоды Шотки, в которых формируется область насыщения или обеднения заряда в области зазора. Модуляция зарядовой плотности обеспечивает 50%-ную модуляцию уровня прозрачности структуры в ТГц диапазоне, что на порядок лучше многих существующих устройств. Описанное устройство позволяет модулировать излучение в
35 ТГц диапазоне, что, например, может использоваться в квантовом каскадном лазере.

В качестве недостатков решения, описанного в [5], следует отметить невысокую эффективность устройства при использовании его в качестве полосно-пропускающего
40 фильтра. Избирательность предложенного устройства (при его использовании в качестве полосно-пропускающего фильтра) крайне мала. Крутизна фронтов коэффициента передачи мала, вследствие чего не обеспечивается эффективная фильтрация волн определенной длины. Кроме того, перестройка по частоте такого устройства пренебрежимо мала. Другим недостатком запатентованного подхода является анизотропия большинства типов резонаторов, используемых в структурах
45 такого типа. Такие структуры могут быть эффективно использованы лишь для одного заданного типа поляризации волн, излучаемых в ТГц диапазоне.

Задача, на решение которой направлено заявляемое изобретение, заключается в разработке полосно-пропускающего фильтра на основе метаматериалов с
50 управляемыми параметрами. Такой фильтр должен иметь относительно простую конструкцию и при этом обеспечивать высокую частотную избирательность ТГц излучения, а также обладать более высокой прозрачностью для излучения ТГц диапазона по сравнению с прототипом [5].

Технический результат достигается за счет разработки перестраиваемого метаматериального фильтра терагерцевого диапазона, причем такой фильтр отличается от прототипа тем, что содержит, по меньшей мере, один блок, состоящий из:

5 по меньшей мере, двух слоев, каждый из которых представляет собой пересекающиеся проводящие слои; при этом между двумя соседними слоями пересекающихся проводящих слоев размещен, по меньшей мере, один слой нематического жидкого кристалла с расположенной под ним диэлектрической подложкой, на которой размещены

10 проводящие плоские элементы крестообразной формы (например, в виде крестообразно пересекающихся полосок);

диэлектрической подложки, на которой расположен нижний слой пересекающихся проводящих слоев, и управляющих электродов, подающих напряжение на нематический жидкий кристалл и размещенных на противоположных боковых поверхностях

15 указанного фильтра.

Следует уточнить, что в предпочтительном варианте реализации заявляемого изобретения полосно-пропускающий фильтр был выполнен на основе метаматериалов с управляемыми параметрами и работал в нижней части ТГц

20 диапазона (0,2-3 ТГц).

Заявляемое изобретение работает по тому же принципу, что и резонатор нулевого порядка, но в изобретении реализована возможность перестройки параметров устройства (рабочей частоты фильтра).

Одним из отличительных признаков заявляемого изобретения является то, что предложенная структура независима по отношению к поляризации внешней электромагнитной волной. Это обеспечивается за счет симметричности предложенной структуры. При этом уровень вносимых потерь ниже, чем у известных авторам аналогов.

30 Также устройство выполнено с возможностью использования в качестве ключа в ТГц диапазоне, обеспечивая функционирование в режиме передачи или отражения на заданной частоте в зависимости от уровня управляющего сигнала.

Заявляемый перестраиваемый метаматериальный фильтр терагерцевого диапазона имеет рабочую частоту в окрестностях плазменной частоты среды из проводящих слоев. При

35 этом, исходя из заданного значения плазменной частоты, определяют требуемые сечение (толщину) проводящих слоев и период массива проводящих слоев, причем проводящие слои в заявляемом фильтре могут иметь сечение любой формы.

40 Рабочая частота полосно-пропускающего фильтра перестраивается за счет изменения напряжения.

В различных вариантах практической реализации диапазоны изменения напряжения выбирались таким образом, чтобы диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла была либо больше 1, либо в пределах 1-3, либо в пределах 2-3.

45 Характерно, что заявляемая структура образована несколькими слоями пересекающихся проводящих слоев, заполненными нематическим жидким кристаллом. Среда из проводящих слоев обладает свойствами искусственной электрической плазмы с плазменной частотой в области ТГц или ближней ИК области (по сравнению с оптическими частотами, характерными для металлов, в которых электронный газ обладает свойствами плазмы). На плазменной частоте для среды из проводящих слоев, на которой эффективная диэлектрическая проницаемость системы близка к нулю, структура проявляет свойства резонатора нулевого порядка. В заявленной структуре передача возможна в узкой полосе вблизи плазменной частоты.

Применение нематического жидкого кристалла с переменной диэлектрической проницаемостью обеспечивает управление плазменной частотой. Диэлектрическая проницаемость нематического жидкого кристалла изменяется под воздействием приложенного напряжения. В альтернативной реализации заявляемого изобретения диэлектрическую проницаемость жидкого кристалла изменяют посредством изменения температуры, а не напряжения.

Структура обладает свойствами полосно-пропускающего фильтра. Геометрия структуры обеспечивает требуемую ширину области пропускания и крутизну кривой частотной зависимости коэффициента передачи.

Для обеспечения частотной избирательности полосно-пропускающего фильтра ТГц диапазона структура дополнена металлическими полосками. Полоски расположены между слоями проводов и обеспечивают больший наклон правой части кривой передаточной характеристики (выше плазменных частот) и более ярко выраженные фильтровые характеристики (частотную избирательность).

Для лучшего понимания заявленного изобретения далее приводится его подробное описание с привлечением графических материалов.

На Фиг.1 изображены два слоя пересекающихся проводов, образующих среду из проводов, при этом виды 1.1 и 1.2 - соответственно верхний и нижний слои пересекающихся проводящих проводов сечением (толщиной) g .

На Фиг.2 изображен модуль коэффициента передачи для среды, состоящей из 2, 3 и 4 слоев пересекающихся проводов.

На Фиг.3 изображены: вид 3.1 - разрез и вид 3.2 - вид сверху метаматериального перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра.

1.1 - верхний слой проводящих проводов;

1.2 - нижний слой проводящих проводов;

2 - подложка самого нижнего слоя пересекающихся проводов;

3 - металлические полоски;

4 - подложка для металлических полосок;

5 - нематический жидкий кристалл;

6 - электроды, предназначенные для изменения электрических свойств жидкого кристалла.

На Фиг.4 изображен модуль коэффициента передачи фильтра при наличии/отсутствии металлических полосок.

Фиг.5 показывает модуль коэффициента передачи для структуры с двумя слоями проводов и одним слоем полосок для трех значений диэлектрической проницаемости ЖК ϵ_{LC} .

Фиг.6 показывает предпочтительную структуру фильтра, состоящую из двух одинаковых блоков, каждый из которых состоит из двух слоев пересекающихся проводов, и одного слоя полосок в виде крестов, расположенных на подложке и находящихся в жидком кристалле.

Фиг.7 показывает модуль коэффициента передачи фильтра, состоящего из четырех слоев: два слоя проводов и два слоя полосок для различных значений проводимости жидкого кристалла для трех значений диэлектрической проницаемости ЖК ϵ_{LC} , где вид 7.1 - линейная шкала, вид 7.2 - шкала в Дб.

Рабочая частота заявляемой структуры соответствует плазменной частоте. Волновое число структуры на плазменной частоте k_p определяется геометрией структуры и рассчитывается по формуле, известной из доклада M.Hudlicka, J.Machac, and I.S.Nefedov, A triple wire medium as an isotropic negative permittivity metamaterial,

Progress In Electromagnetics Research, Vol.65, 233-246, 2006 [6]:

$$k_p^2 = \frac{2\pi}{p^2} \frac{1}{\ln \frac{p^2}{4r(p-r)}}, \quad (1)$$

где p - период структуры (расстояние между соседними проводниками), r - сечение проводов. Соответствующая ей плазменная частота определяется выражением:

$$f_p = \frac{c \cdot k_p}{2\pi \sqrt{\epsilon_h}}, \quad (2)$$

где c - скорость света, ϵ_h - диэлектрическая проницаемость материала диэлектрической матрицы, в которой расположены провода.

Провода в слоях 1.1 и 1.2 могут иметь круглое, квадратное или любой другой формы сечение, что не влияет на свойства структуры. Для частот ТГц диапазона характерный размер сечения проводов составляет единицы микрометров.

Для бесконечно протяженной среды из проводов распространение электромагнитных волн на частотах ниже плазменной невозможно.

Электромагнитные волны распространяются только на частотах выше плазменной.

Для конечного числа слоев из проводов вблизи плазменной частоты наблюдается резонанс, вызванный взаимодействием между соседними слоями. Количество резонансных пиков зависит от числа слоев, использованных в структуре (Фиг.2). Здесь и далее f_0 - центральная (рабочая) частота фильтра, f - переменная частота.

В заявляемой структуре два слоя сформированы пересекающимися медными проводниками. При такой реализации в области плазменных частот среда из проводов имеет только один резонанс на характеристике коэффициента передачи (см. Фиг.2). В этой частотной области электромагнитная волна проходит через структуру без потерь и отражения.

В частном случае расстояние между соседними проводниками равно периоду решетки $r_x=r_y=r_z=P$ и составляет десятки микрометров. Нижние слои 1.2 проводов расположены на диэлектрической подложке 2 (Фиг.3). С целью использования заявляемой структуры в качестве полосно-пропускающего фильтра ТГц диапазона геометрические параметры структуры оптимизированы для реализации изолированной узкой полосы пропускания. Структура фильтра дополнена металлическими полосками 3, расположенными на диэлектрической подложке 4 с малым уровнем потерь, находящейся между металлическими плоскостями. Полоски обеспечивают увеличение крутизны правой части фронта характеристики передачи (Фиг.4), что улучшает избирательность фильтра. Для обеспечения изотропных свойств в двух направлениях металлические полоски выполнены пересекающимися в двух ортогональных направлениях и формируют кресты. Полоски выполнены из проводящего материала.

Перестройка фильтра обеспечивается нематическим жидким кристаллом (ЖК) 5, заполняющим пространство между верхним слоем пересекающихся проводов и слоем, в котором расположены пересекающиеся полоски 4 (см Фиг.3). Слой ЖК обеспечивает перестройку структуры за счет изменения прикладываемого напряжения. Для обеспечения отклонения молекул жидкого кристалла и изменения его проницаемости два управляющих электрода 6 расположены на двух противоположных сторонах структуры. ЖК с коэффициентом преломления, изменяющимся на величину $\Delta n > 0.33$, обеспечивает изменение диэлектрической

проницаемости ЖК в диапазоне $\epsilon_{LC} > 1$, в зависимости от напряжения, приложенного к боковым электродам. В качестве варианта, имеет смысл изменять диэлектрическую проницаемость жидкого кристалла от 2 до 3, обеспечивая диапазон перестройки фильтра не менее 13% (Фиг.5).

5 Форма коэффициента передачи также может быть предварительно сформирована путем изменения геометрических параметров структуры. Центральная частота, амплитуда проходящего сигнала и ширина полосы пропускания зависят от периода структуры и поперечного сечения (толщины) проводов.

10 Кроме того, количество блоков фильтров может быть увеличено, что позволяет сформировать более узкую полосу пропускания фильтра с центральной частотой f_0 . Так, например, для фильтра, состоящего из двух идентичных блоков 7 и 8 (Фиг.6), коэффициент преломления будет выглядеть, как показано на Фиг.7.

Заявляемое изобретение может быть применено для разработки:

15 - перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра в системе ТГц источников и приемников для фильтрации ТГц излучения в диапазоне 0,2-3 ТГц;
- переключающего устройства, обеспечивающего работу системы в режиме полного пропускания или запираания.

20 Список литературы

1. Peter de Maagt, Terahertz technology for space and earth applications, Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on, 6-10 Nov. 2006, pp.1-4.

2. Withayachumnankul, W.; Abbott, D., Metamaterials in the Terahertz Regime, Photonics Journal, IEEE, Volume: 1 Issue: 2, pp.99-118.

25 3. US Patent No.: US 2010/0123530 A1, published May 20, 2010. "Apparatus for wireless power transmission using high Q low frequency near magnetic field".

4. US Patent No.: US 7,483,088 B2, published Jan. 27, 2009. "Tunable terahertz wavelength selector device using magnetically controlled birefringence of liquid crystal".

30 5. US Patent No.: US 7,826,504 B2, published Nov. 2, 2010. "Active terahertz metamaterial devices".

6. M.Hudlicka, J.Machac, and I.S.Nefedov, A triple wire medium as an isotropic negative permittivity metamaterial. Progress In Electromagnetics Research, Vol.65, 233-246, 2006.

35 Формула изобретения

1. Перестраиваемый метаматериальный фильтр терагерцевого диапазона, отличающийся тем, что содержит, по меньшей мере, один блок, состоящий из:

40 - по меньшей мере, двух слоев, каждый из которых представляет собой пересекающиеся провода; причем между двумя соседними слоями пересекающихся проводов размещен, по меньшей мере, один слой нематического жидкого кристалла с расположенной под ним диэлектрической подложкой, на которой размещены проводящие плоские элементы крестообразной формы;

45 - диэлектрической подложки, на который расположен нижний слой пересекающихся проводов, и

- управляющих электродов, выполненных с возможностью подачи напряжения на нематический жидкий кристалл и размещенных на противоположных боковых поверхностях указанного фильтра.

50 2. Фильтр по п.1, отличающийся тем, что массив пересекающихся проводов образует среду с индивидуальной плазменной частотой, которая зависит от сечения используемого провода и от периода массива, причем рабочая частота фильтра лежит в окрестностях плазменной частоты среды из пересекающихся проводов.

3. Фильтр по п.1, отличающийся тем, что выполнен с возможностью управления посредством изменения напряжения, подаваемого на управляющие электроды.

4. Фильтр по п.3, отличающийся тем, что диапазон изменения напряжения выбирают таким образом, чтобы диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла
5 превышала единицу.

5. Фильтр по п.3, отличающийся тем, что диапазон изменения напряжения выбирают таким образом, чтобы диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла изменялась в диапазоне от 1 до 3.

10 6. Фильтр по п.3, отличающийся тем, что диапазон изменения напряжения выбирают таким образом, чтобы диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла изменялась в диапазоне от 2 до 3.

7. Фильтр по п.1, отличающийся тем, что выполнен с возможностью выполнения функции ключа.

15 8. Фильтр по п.1, отличающийся тем, что выполнен преимущественно для функционирования в диапазоне 0,2-3 ТГц.

20

25

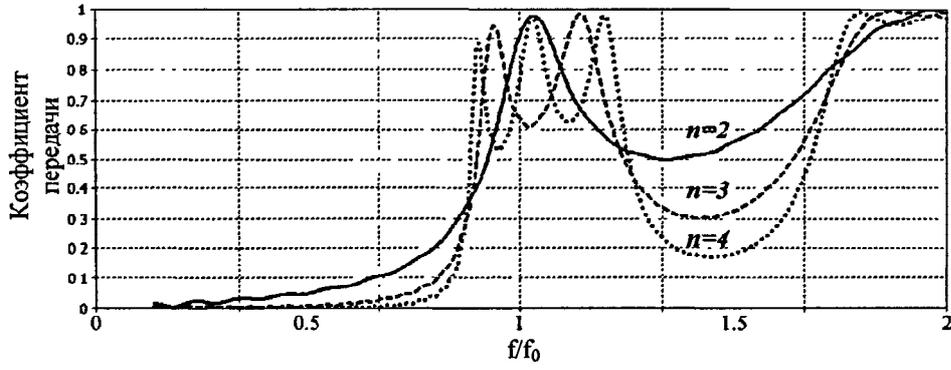
30

35

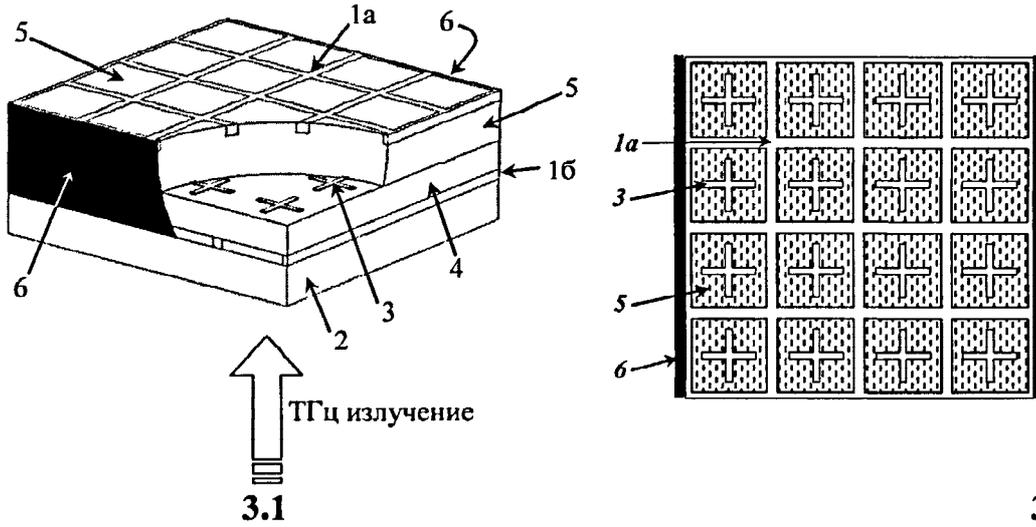
40

45

50

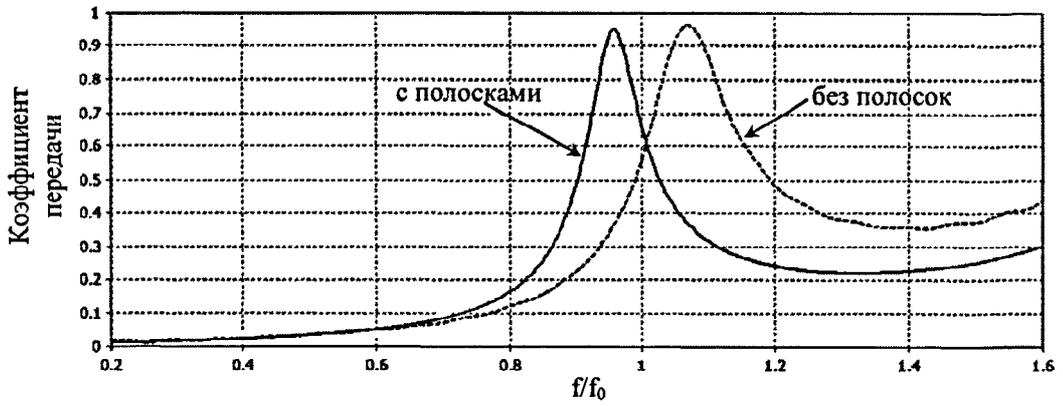


Фиг. 2

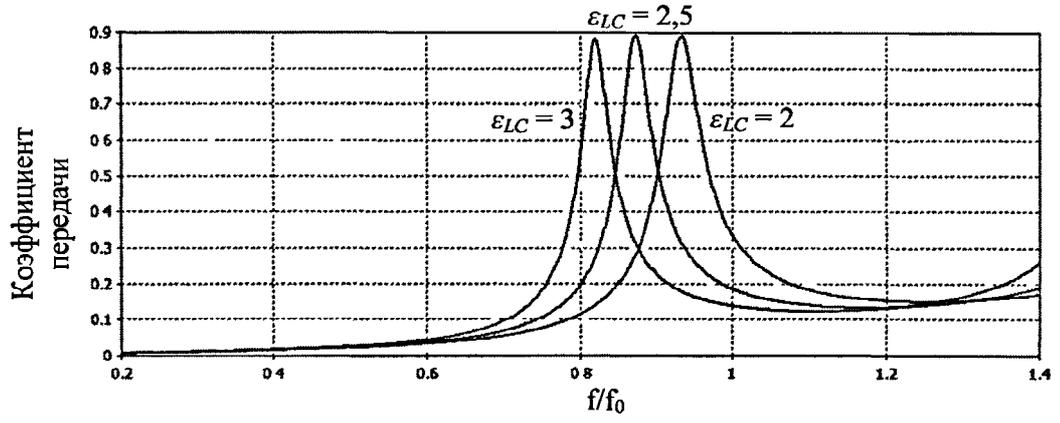


3.2

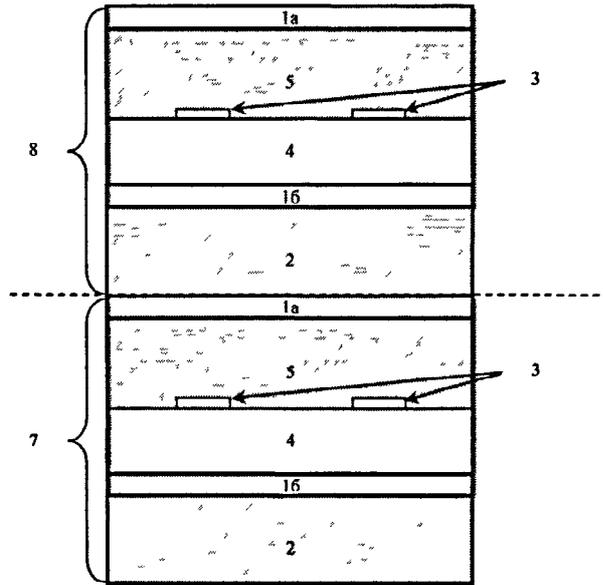
Фиг. 3



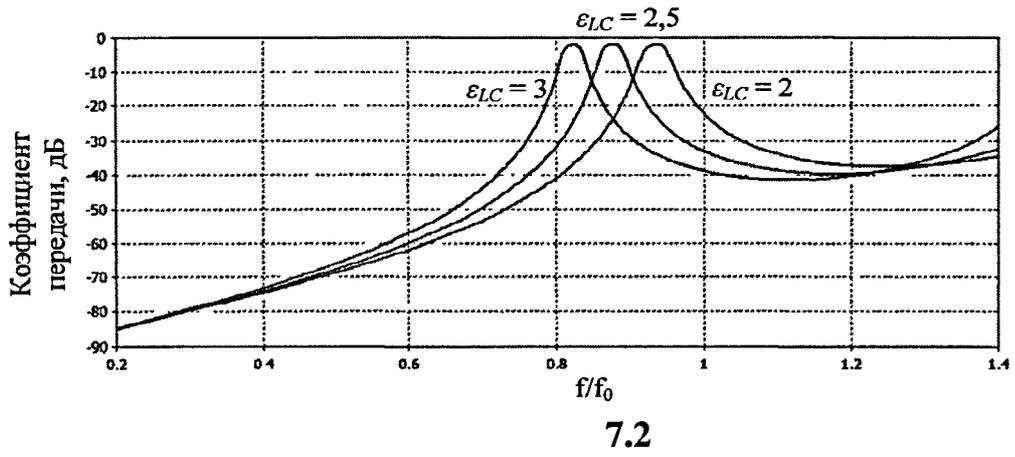
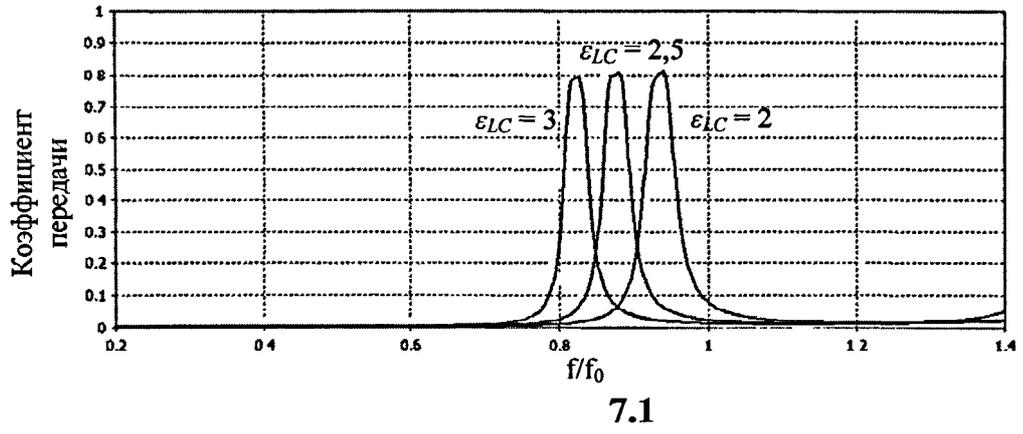
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7