

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01Q 15/00 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023108001, 31.03.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.03.2023Дата регистрации:
21.05.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.03.2023

(45) Опубликовано: 21.05.2024 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, ИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН, Патентный отдел

(72) Автор(ы):

фон Гратовски Светлана Вячеславовна (RU),
Коледов Виктор Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

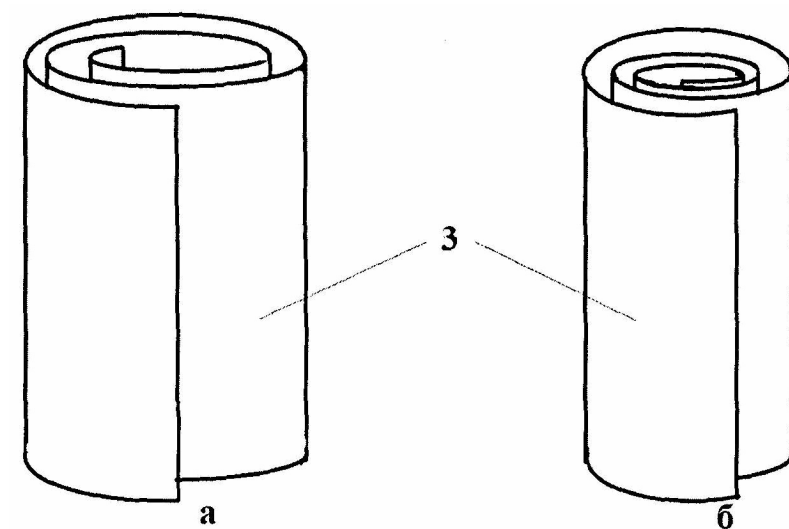
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий,
Маскирующее покрытие на основе
спиральных резонаторов, Научно-технический
вестник информационных технологий,
механики и оптики, 2012, N 4 (80), с. 28-33. RU
2548543 C2, 20.04.2015. RU 170145 U1, 14.04.2017.
CN 102480014 A, 30.05.2012. CN 114872338 A,
09.08.2022.

(54) Метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения

(57) Реферат:

Использование: для использования в области радиотехники и фотоники. Сущность изобретения заключается в том, что особенностью заявленного метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, состоящего из элементарных структурных единиц, расположенных друг от друга на расстоянии меньше длины волны электромагнитного излучения, является то, что в состав каждой его элементарной структурной единицы, содержащей проводящие элементы из колец, дуг или спиралей и стержней, обеспечивающих отрицательную магнитную и электрическую восприимчивость в рабочем диапазоне электромагнитных волн, включен предварительно напряженный композитный

элемент из сплава с эффектом памяти формы (ЭПФ), механически прочно соединенный с другими элементами структурной единицы. Композитный элемент с ЭПФ дает возможность многократного, обратимого, управляемого температурным воздействием изменения пространственной конфигурации элементов структурной единицы в виде колец, дуг или спиралей для обеспечения изменения отклика на воздействие электромагнитной волны и управления рабочим диапазоном всего устройства в целом. Технический результат: расширение спектрального диапазона работы метаматериала и возможность управления его параметрами. 3 з.п. ф-лы, 6 ил.



ФИГ. 6



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H01Q 15/00 (2023.08)

(21)(22) Application: **2023108001, 31.03.2023**

(24) Effective date for property rights:
31.03.2023

Registration date:
21.05.2024

Priority:

(22) Date of filing: **31.03.2023**

(45) Date of publication: **21.05.2024** Bull. № 15

Mail address:

**125009, Moskva, ul. Mokhovaya, 11, korp. 7, IRE
im. V.A. Kotelnikova RAN, Patentnyj otдел**

(72) Inventor(s):

**fon Gratovski Svetlana Vyacheslavovna (RU),
Koledov Viktor Viktorovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe
uchrezhdenie nauki Institut radiotekhniki i
elektroniki im. V.A. Kotelnikova Rossijskoj
akademii nauk (RU)**

(54) **METAMATERIAL FOR CONTROLLING REFRACTION AND REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION**

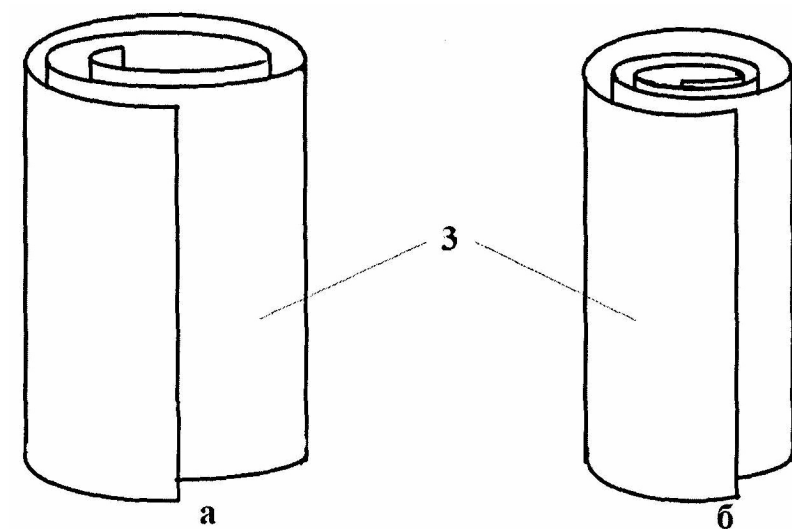
(57) Abstract:

FIELD: radio engineering; photonics.

SUBSTANCE: essence of the invention consists in the fact that a feature of the disclosed metamaterial for controlling the refraction and reflection of electromagnetic radiation, consisting of elementary structural units located from each other at distance less than wavelength of electromagnetic radiation, is that each of its elementary structural units, containing conductive elements from rings, arcs or spirals and rods, providing negative magnetic and electrical susceptibility in the operating range of electromagnetic waves, included is a pre-stressed composite element from an

alloy with a shape memory effect (SME), which is mechanically tightly connected to other elements of the structural unit. Composite element with SME enables multiplex, reversible change of spatial configuration of structural unit elements in form of rings, arcs or spirals, controlled by temperature effect, to provide a change in response to the effect of an electromagnetic wave and to control the operating range of the entire device as a whole.

EFFECT: wider spectral range of metamaterial operation and possibility of controlling its parameters.
4 cl, 6 dwg



ФИГ. 6

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к радиотехнике и фотонике и может быть использовано в качестве частотно-селективной поверхностной или объемной структуры, для создания специальных экранов отсежки отраженных сигналов, радиомаскирующих покрытий, а также для обеспечения развязки между элементами в антенных решетках.

Уровень техники

В последние годы доказано, что из метаматериалов, в радиочастотном, а, возможно, и в оптическом диапазонах ЭМВ, привлекая методы трансформационной оптики, становится возможным создание неоднородных материальных оптических сред, обладающих заданными, порой весьма экзотическими, функциональными свойствами, которые превосходят возможности естественных материалов и традиционных элементов оптических приборов и систем. В частности, предложены различные конструкции инновационных оптических устройств: устройства оптической маскировки, получение изображений со сверхразрешением, концентраторы-коллекторы световой энергии, и датчики, использующие свет на масштабах менее длины волны [1].

Известен аналог предлагаемого технического решения - метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, включающий множество элементарных структурных единиц (ячеек), расположенных периодически на прямой, на плоскости или в пространстве. Каждая ячейка состоит из диэлектрической подложки, имеющей первую и вторую параллельные поверхности, и первый и второй проводник в форме спирали. Первый проводник находится на первой поверхности подложки, а второй - на второй поверхности подложки таким образом, что второй проводник находится строго под (или над) первым и имеет с ним электромагнитную связь.

Метаматериал из множества элементарных ячеек обладает отрицательной магнитной и электрической восприимчивостью в рабочем диапазоне электромагнитных волн [2].

К недостаткам аналога можно отнести: узкий частотный рабочий диапазон и невозможность управления электромагнитными параметрами в процессе работы.

Известен также аналог предлагаемого технического решения - метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения [3]. В этом источнике также предложен метаматериал, включающий множество элементарных структурных единиц (ячеек), расположенных периодически на прямой, на плоскости или в пространстве. Каждая ячейка включает проводящие элементы в форме цилиндров или спиралей. Метаматериал из множества элементарных ячеек обладает отрицательной магнитной и электрической восприимчивостью в рабочем диапазоне электромагнитных волн.

К недостаткам этого аналога также можно отнести: узкий частотный рабочий диапазон и невозможность управления электромагнитными параметрами в процессе работы.

Известен также аналог предлагаемого технического устройства [4, 5]. В данном источнике описан актюатор или набор из множества актюаторов, в форме пластин или лент, обеспечивающих управляемое, многократно обратимое изменение их формы от прямолинейной до цилиндрической под действием теплового воздействия. Обратимое изменение формы достигается выполнением актюатора в виде биметаллической пластины, включающей слой сплава с эффектом памяти формы (ЭПФ) и слой упругого металла. До соединения с упругим слоем в слой с ЭПФ предварительно растягивают при охлаждении через точку перехода аустенит (высокотемпературная фаза сплава с памятью формы) в мартенсит (низкотемпературная фаза сплава с памятью формы). Соединение слоев производят при температуре ниже температуры завершения перехода

аустенит-мартенсит (для сплава Ti_2NiCu - при комнатной температуре). При повышении температуры, выше точки обратного мартенситного перехода мартенсит-аустенит, слой с памятью формы сжимается, и в результате, биметаллический композитный материал обратимо изгибается. Таким образом, форма поверхности актюатора

многократно контролируемо изменяется от плоской до цилиндрической.

К недостатку прототипа можно отнести невозможность применения в качестве оптического или радиочастотного метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения.

Наиболее близким техническим решением к предложенному является метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения [6]. Прототип представляет собой набор упорядоченных в пространстве, расположенных на расстоянии много больше длины волны элементарных структурных единиц, в качестве которых применены левосторонняя и правосторонняя канонические спирали (фиг. 1). Каноническая спираль представляет собой разорванное металлическое кольцо с двумя отрезками металлической проволоки на краях зазора, которые перпендикулярны плоскости кольца. При облучении электромагнитной волной спиралей (габаритные размеры которых также во много раз меньше длины волны) в них индуцируются токи, которые генерируют электрический диполь (проволочки) и магнитный диполь (кольцо). Путем подбора параметров спирали (радиус кольца, радиус проволоки, длина электрического диполя) можно добиться отрицательной восприимчивости электрического и магнитного откликов от спиральных частиц на одной частоте.

Известный метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения имеет по крайней мере один существенный недостаток: узкую рабочую полосу запираения (несколько процентов от центральной частоты).

Раскрытие изобретения

Задачей, решаемой изобретением, является создание метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, обеспечивающего расширение спектрального диапазона и возможности управления электромагнитными параметрами под контролем внешнего теплового воздействия.

Указанный результат достигается тем, что в метаматериале для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, представляющем собой множество одинаковых структурных элементов упорядоченно расположенных в пространстве или на поверхности, размеры которых и расстояние между которыми, много меньше длины волны ЭМВ, причем каждая структурная единица включает в себя металлические элементы, имеющие форму стержней, колец или спиралей, в составе каждой элементарной структурной единицы имеется, по крайней мере, один элемент из предварительно напряженного биморфного композита с эффектом памяти формы, в виде кольца или спирали, обеспечивающий многократное контролируемое изменение его радиуса кривизны в результате теплового воздействия.

Техническим результатом предложенного метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения является обеспечение управления рабочей полосой ЭМВ при создании среды с отрицательными значениями электрической и магнитной проницаемостей, т. е. метаматериальной среды. Границы рабочей полосы определяются параметрами структурного элемента метаматериала, а также параметрами и периодом их расположения.

Согласно современным представлениям, свойства метаматериала определяются свойствами его отдельной элементарной структурной единицы и их плотностью [1-3]. Известные метаматериалы включают, чаще всего элементарную структурную единицу,

выполненную из металлических элементов. На фиг. 1 показан общий вид элементарной структурной единицы метаматериала, согласно прототипу [6], в качестве которых применены левосторонняя и правосторонняя канонические спирали. Каноническая спираль представляет собой разорванное металлическое кольцо с двумя отрезками металлической проволоки на краях зазора, которые перпендикулярны плоскости кольца. При облучении электромагнитной волной спиралей (габаритные размеры которых также во много раз меньше длины волны) в них индуцируются токи, которые генерируют электрический диполь (проволочки) и магнитный диполь (кольцо). Путем подбора параметров спирали (радиус кольца, радиус проволоки, длина электрического диполя) можно добиться отрицательной восприимчивости электрического и магнитного откликов от спиральных частиц на одной частоте. Рабочий диапазон частот метаматериала можно определить по графикам зависимости поляризуемости элементарной структурной единицы от частоты (см. фиг. 2 из [6]). На графиках видно, что зависимости магнитной и диэлектрической поляризуемостей имеют резонансный вид. Видно также, что в области выше резонанса имеется диапазон, в котором и магнитная и электрическая поляризуемости - отрицательные. Таким образом, рабочий диапазон метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения ограничен этой областью.

Расчет зависимостей, аналогичных представленным на фиг. 2, приводится в ряде работ, например в виде формулы (4) из работы [6]. Эта и аналогичные формулы связывают геометрические параметры структурных единиц с магнитной и электрической поляризуемостью. Для пояснения принципа работы заявляемого управляемого метаматериала, удобно воспользоваться приближенной формулой (45) из ссылки [3] для резонансной частоты элементарной ячейки в форме концентрических колец или спирали. Из этой формулы следует, что, приближенно, резонансная частота магнитной восприимчивости обратно пропорциональна $r^{3/2}$ и, следовательно, быстро возрастает с уменьшением радиуса r .

Принцип управления геометрическими размерами элементов ячейки в форме спирали или кольца основан на свойствах предварительно напряженных биметаллических композитов с эффектом памяти формы (ЭПФ) обратимо изменять кривизну при нагреве/охлаждении [4]. Пример такого композитного функционального материала на основе композита Ti_2NiCu/Ni с ЭПФ, который обладает способностью управляемым образом изменять кривизну от прямолинейной до цилиндрической и спиральной, дан в работе [5]. Этот композит выполнен из двух слоев (см. фиг. 3), причем слой 1 - выполнен из сплава с ЭПФ, а слой 2 - из прочного упругого металла. До соединения слоев, слой 1, предварительно растягивают псевдопластически при охлаждении через температуру термоупругого мартенситного перехода. При температуре ниже точки мартенситного перехода, для быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu - ниже 40° , значительная деформация 1-3% сохраняется (она именуется псевдопластической, так как не смотря на значительную величину, полностью восстанавливается при нагреве выше точки мартенситного термоупругого перехода). После этого на слой с ЭПФ наносят или приклеивают слой упругого металла, например гальванического никеля, не повышая температуру заготовки выше температуры перехода мартенсит-аустенит сплава с ЭПФ. Последующий нагрев сплава приводит к сжатию сплава с ЭПФ, механическому напряжению упругого слоя и изменению формы - изгибу композита, как показано на фиг. 3. Процесс деформации композита 3 - контролируемый, многократной повторяемый.

На основе указанного принципа можно реализовать различные виды элементарных

структурных единиц метаматериалов, например, представленные на фиг. 5 и 6. На фиг. 5 показан вариант, описанной в прототипе [6], ячейки в виде канонической спирали, в которой разорванное кольцо изменяет обратимо свой радиус при нагреве/охлаждении, $r_2 < r_1$ (фиг. 5а и б). На фиг. 6 показан вариант спиральной многовитковой структуры,

описанной в [3, стр. 2079], выполненной из композита с ЭПФ 3 в охлажденном (мартенситном) и нагретом (аустенитном) состояниях (фиг. 6 а и б).

Достижимая величина обратимого изменения радиуса цилиндрической или кольцевой структуры определяется конструкцией используемого композита с ЭПФ [4]. Например, в [5] делается оценка для радиуса кривизны композита R:

$$R = h/2\varepsilon, \quad (1)$$

где h - толщина, а ε - относительная обратимая деформация сплава с ЭПФ при мартенситном переходе. Для сплава Ti_2NiCu с ЭПФ типичное значение $\varepsilon = 1-3\%$. Если выполнить сплав в виде быстрозакаленной ленты толщиной 30 мкм, то минимальный радиус R можно оценить как 1-0,5 мм. Согласно расчетам по формулам [3, 6] это дает рабочий диапазон в диапазоне нескольких ГГц с возможностью подстройки по крайней мере в 2 раза.

Отметим, что с помощью создания композита можно добиться не только перехода прямолинейный-изогнутый композит, но и перехода от композита с кривизной r_1 к кривизне r_2 , используя термомеханическую обработку. Пример такой технологии описан в работе [7].

Недавние работы по созданию нанокompозитов с ЭПФ доказали возможность изготовить надежно управляемые композиты с толщиной активного слоя с ЭПФ 100 нм и менее [8]. По формуле (1) можно заключить, что радиус нанокompозита может оказаться в диапазоне десятков микрон, а управляемая рабочая частота - в терагерцовом диапазоне. При изготовлении управляемого метаматериала для заданного диапазона ЭМВ может потребоваться согласование поверхностной проводимости элементов структурной единицы в рабочем диапазоне. Для этого возможно применение пленочных покрытий из металлов с высокой проводимостью, например, золота.

Описание фигур

На фиг. 1 показаны фотографии элементов метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения в виде канонических спиралей, согласно прототипу [6].

На фиг. 2 показаны частотные зависимости магнитной и диэлектрической поляризуемости элементарных ячеек метаматериала, согласно прототипу [6]. Рабочий диапазон частот метаматериала определяется пересечением множеств частот, при которых действительные части магнитной и диэлектрической поляризуемости являются отрицательными.

На фиг. 3 показана принципиальная схема биметаллического предварительно напряженного композита, согласно [4].

На фиг. 4 представлен общий вид биметаллического композита с эффектом памяти формы, выполненного из сплава Ti_2NiCu (активный слой с ЭПФ) и слоя никеля (упругий слой) в охлажденном состоянии (снимок вверху) и нагретом состоянии (снимок внизу) [5].

На фиг. 5 представлен эскизный чертеж примера элементарной структурной единицы (ячейки) метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, согласно предложенному техническому решению, в виде канонической

спирали, представляющей разорванное металлическое кольцо с двумя металлическими цилиндрами, причем кольцо выполнено из композита с ЭПФ. (а) - композит в охлажденном мартенситном состоянии, (б) композит с ЭПФ - в нагретом, аустенитном состоянии.

На фиг. 6 представлен эскизный чертеж примера элементарной структурной единицы (ячейки) метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, согласно предложенному техническому решению, в форме цилиндрической многovitковой спирали, на основе биметаллического предварительно напряженного композита с ЭПФ. (а) - охлажденное, мартенситное состояние композита с ЭПФ.

(б) - нагретое, аустенитное состояние композита с ЭПФ.

Осуществление изобретения

Целью заявляемого технического решения является расширение рабочего диапазона частот метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения и обеспечение возможности управления его параметрами путем теплового воздействия на элементы метаматериала. Прототип предложенного технического решения [6] исключает возможность регулировки геометрических параметров элементарных ячеек метаматериала. Поэтому для создания элементарной ячейки предлагается использовать быстрозакаленную ленту Ti_2NiCu , толщиной 30-40 мкм, шириной 1-2 мм, изготовленную методом быстрой закалки из расплава на медном барабане и обработанную отжигом, согласно работе [5]. Затем ленту механически растягивают силой 3-10 Н, при охлаждении от 50°C (аустенит) до комнатной температуры (мартенситная фаза сплава). В результате псевдопластическая (возвратимая при нагреве) деформация составит 1-3%. Затем не повышая температуру выше 30°C, на нее гальваническим методом наносят слой никеля с одной стороны. Практический результат показан на фиг. 4а, где прямолинейный отрезок композита из ленты Ti_2NiCu/Ni сфотографирован в охлажденном (мартенситном) состоянии. На фиг. 4б показан образец композита в нагретом состоянии, принявший форму кольца. Из такого отрезка выполняется ячейка метаматериала в конфигурации управляемого канонической спирали с отрезками медных проволочек толщиной 0,1 мм (см. фиг. 5а и б). Из ленты шириной 5 мм изготавливается элемент метаматериала в виде свернутой управляемой спирали (фиг. 6а и б).

При изготовлении образца метаматериала для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения необходимо сформировать из множества элементарных ячеек линейку, плоскость или объем, в котором элементарные структурные единицы закреплены прочно, с учетом поляризации рабочей ЭМВ. Для успешного контроля частотного диапазона необходима термостабилизация всего метаматериала при температуре несколько выше комнатной с применением термостата. Точность поддержания температуры по объему метаматериала должна отвечать необходимой однородности показателя преломления метаматериальной среды для ЭМВ в рабочем диапазоне частот. Для практического примера изготовления метаматериала из композитов с ЭПФ Ti_2NiCu/Ni рабочий диапазон температур может составлять 35-56°C, а точность поддержания по всему объему метаматериала и во времени не хуже 1°C.

Список литературы

1. Кильдишев А.В. Шалаев В.М. Трансформационная оптика и метаматериалы. УФН. 2011, Т. 181, №1, стр. 60.
2. Патент US 8780010, кл. H01Q 15/10, опубл. 15.07.2014 г.

3. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 47, NO. 11, NOVEMBER 1999, p. 2075.

4. Р.М. Гречишкин и др. Актюатор, система актюаторов и способ его изготовления. Патент РФ №23058754. МПК НОШ 61/04. Оpubл. 10.09.2007. БИ №25.

5. Иржак А.В., Калашников В.С., Колецов В.В., Кучин Д.С., Лебедев Г.А., Лега П.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С., Шавров В.Г., Шеляков А.В. Гигантские обратимые деформации композитного материала с эффектом памяти формы. Письма в журнал технической физики. 2010, вып.7, стр. 75.

10 6. А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий. МАСКИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2012, №4 (80). С.28-33.

7. Grechishkin, R. M., Il'yashenko, S. V., Istomin, V. V., Kalashnikov, V. S., Koledov, V. V., Kuchin, D. S., ... & Shavrov, V. G. (2009). Two-way shape memory in a nanoscale sample of Ti 49.5 Ni 25.5 Cu 25.0 alloy with a partially ordered structure. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 73(8), 1076-1078.

15 8. Irzhak, A. V., Lega, P. V., Zhikharev, A. M., Koledov, V. V., Orlov, A. P., Kuchin, D. S., ... & Pushin, V. G. (2017, January). Shape memory effect in nanosized Ti₂NiCu alloy-based composites. In Doklady Physics (Vol.62, No. 1, pp. 5-9).

20 (57) Формула изобретения

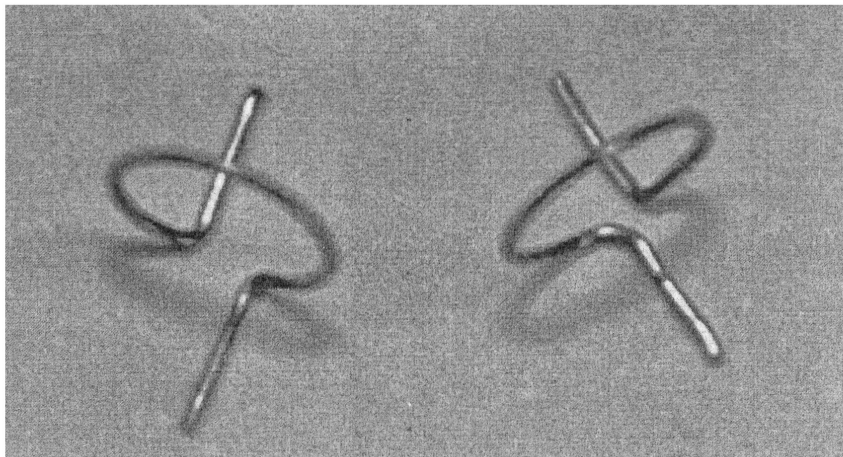
1. Метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения, представляющий собой множество элементарных структурных единиц, упорядоченно расположенных в пространстве или на поверхности, размеры которых и расстояние между которыми много меньше длины электромагнитной волны, причем
25 каждая структурная единица включает металлические элементы в виде стержней, колец или спиралей, а их магнитная и электрическая восприимчивость к электромагнитному полю имеет отрицательный знак, отличающийся тем, что в составе каждой элементарной структурной единицы имеется по крайней мере один элемент из предварительно
30 напряженного биморфного композита из сплава с эффектом памяти формы, обеспечивающий многократное контролируемое изменение его радиуса кривизны в результате теплового воздействия.

2. Метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения по п. 1, отличающийся тем, что элементарная структурная единица выполнена
35 в виде разомкнутого кольца с цилиндрическими металлическими элементами на концах кольца из композита с эффектом памяти формы, с возможностью управляемого изменения радиуса кольца при помощи теплового воздействия.

3. Метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения по п. 1, отличающийся тем, что элементарная структурная единица выполнена
40 в виде цилиндрического спирального элемента из композита с эффектом памяти формы, с возможностью управляемого изменения радиуса и количества витков спирали при помощи теплового воздействия.

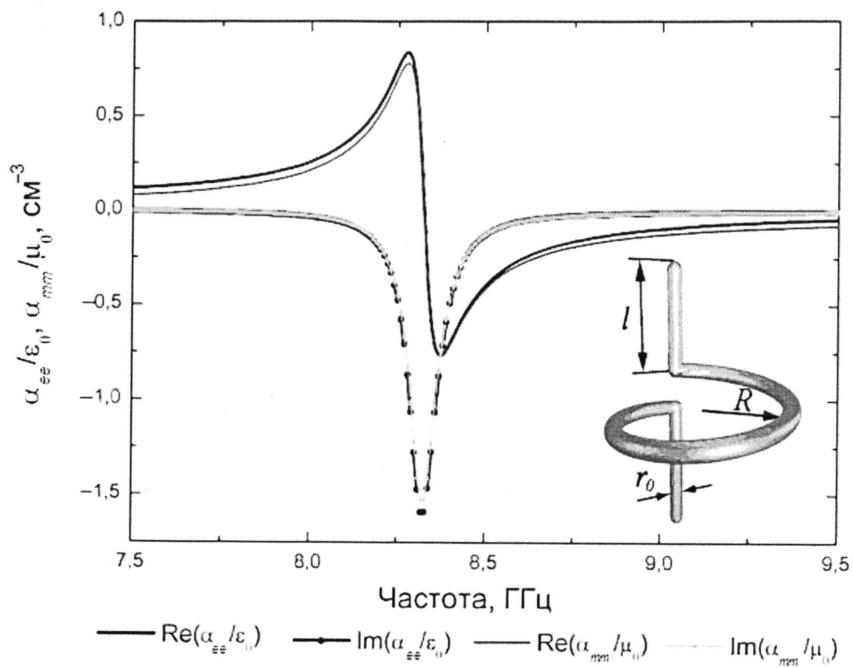
4. Метаматериал для управления преломлением и отражением электромагнитного излучения по пп. 1-3, отличающийся тем, что элемент из предварительно напряженного
45 биморфного композита из сплава с эффектом памяти формы, обеспечивающий многократное контролируемое изменение его радиуса кривизны в результате теплового воздействия, выполнен из сплава Ti₂NiCu, полученного в виде лент методом быстрой закалки из расплава на вращающемся медном барабане.

1

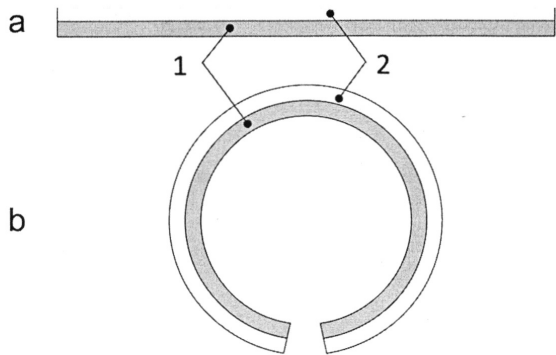


ФИГ. 1

2



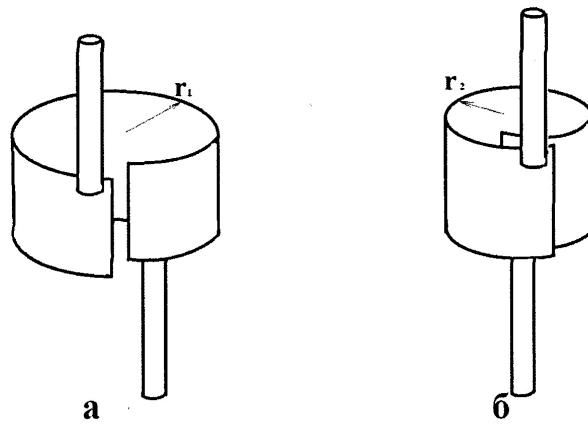
ФИГ. 2



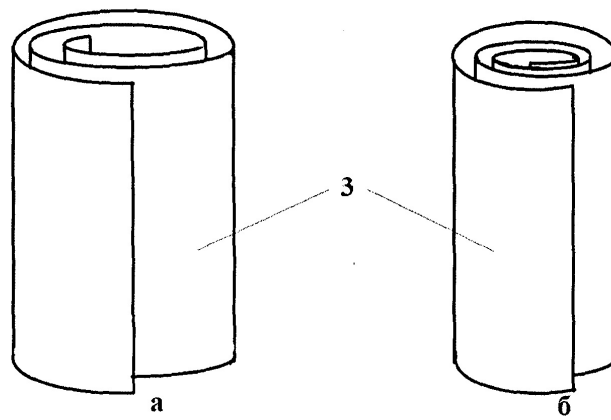
ФИГ. 3



ФИГ. 4



ФИГ. 5



ФИГ. 6