

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 202324

### Устройство беспроводной передачи энергии

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Капитанова Полина Вячеславовна (RU), Глыбовский Станислав Борисович (RU), Смирнов Павел Алексеевич (RU), Минчжао Сун (CN)*

Заявка № 2020133135

Приоритет полезной модели 07 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 11 февраля 2021 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 07 октября 2030 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
H02J 50/00 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020133135, 07.10.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.10.2020

Дата регистрации:  
11.02.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.10.2020

(45) Опубликовано: 11.02.2021 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,  
49, лит. А, Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Капитанова Полина Вячеславовна (RU),  
Глыбовский Станислав Борисович (RU),  
Смирнов Павел Алексеевич (RU),  
Минч Сун (CN)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Национальный  
исследовательский университет ИТМО"  
(Университет ИТМО) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: UA 0076349 C2, 7.07.2006. US  
10079515 B2, 18.09.2018. RU 196766 U1,  
16.03.2020. RU 187264 U1, 27.02.2019.

(54) Устройство беспроводной передачи энергии

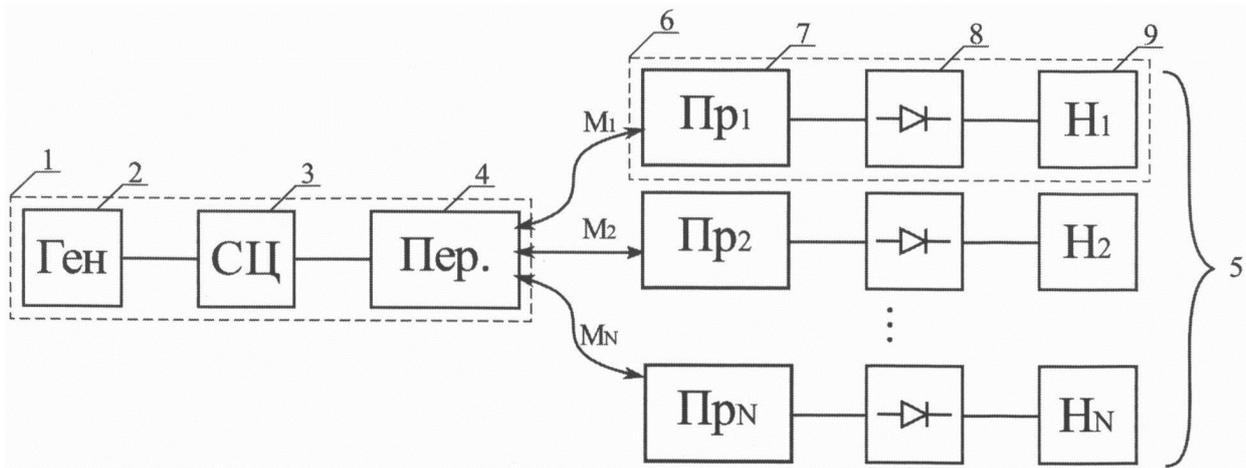
(57) Реферат:

Полезная модель относится к электрорадиотехнике, а более конкретно к устройствам беспроводной передачи энергии, способным заряжать одно или несколько мобильных устройств одновременно.

Устройство беспроводной передачи энергии содержит блок беспроводной передачи энергии и не менее одного блока беспроводного приема энергии. Передатчик электромагнитной энергии, который входит в блок беспроводной передачи энергии, представляет собой резонансную метаматериальную структуру, состоящую из двух слоев печатных проводников, в каждом из которых проводники длиной  $L$ , где  $L$  удовлетворяет условию  $0,005 \cdot \lambda_M < L < 0,05 \cdot \lambda_M$ , расположены в одной плоскости параллельно друг другу на расстояниях  $s_i$ , причем  $s_i$  связано с их длиной следующим соотношением

$$s_i = L \left[ \left( 1 - \frac{(N-i)}{N} \right)^k - \left( 1 - \frac{(N-i+1)}{N} \right)^k \right],$$

где  $i$  - порядковый номер проводника;  $k$  - коэффициент неоднородности;  $N$  - количество проводников в слое. Расстояние между слоями равно  $h$ , где  $h$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < h < 0,1 \cdot \lambda_M$ . Угол между проводниками разных слоев составляет  $90^\circ$ . В углах конструкции между проводниками расположен высокочастотный диэлектрический материал с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , где  $\epsilon$  удовлетворяет условию  $10 < \epsilon < 500$ . Техническим результатом являются увеличение технологичности производства, повышение безопасности для человека устройства беспроводной передачи энергии за счет уменьшения напряженности электрического поля вблизи передатчика и повышение эффективности передачи энергии к нескольким мобильным устройствам, которое достигается за счет формирования равномерного магнитного поля над поверхностью передатчика устройства беспроводной передачи энергии. 7 ил.



Фиг. 1

Полезная модель относится к электрорадиотехнике, а более конкретно к устройствам беспроводной передачи энергии, способным заряжать одно или несколько мобильных устройств одновременно.

Известна «Гибридная метаматериальная панельная структура с высокой эффективностью и система беспроводной передачи энергии с ее использованием» (патент Южной Кореи №0076349 А, МПК H02J 7/02; H02J 50/12, дата приоритета 27.12.2016, дата публикации 05.07.2018), в котором описано применение гибридной метаматериальной структуры в системе беспроводной передачи энергии. Метематериальная плита состоит двух частей. Ее центральная часть имеет магнитную проницаемость близкую к нулю и преломляет падающее на нее магнитное поле в перпендикулярном к метаповерхности направлении. Вторая часть метаматериала расположена на внешнем периферийном участке, охватывающем центральную часть метаматериала, и имеет на рабочей частоте отрицательную магнитную проницаемость, что позволяет отклонять падающее на нее магнитное поле в направлении к центру метаповерхности. Таким образом, применение метаматериальной структуры для управления магнитным полем позволяет повысить эффективность систем беспроводной передачи, путем снижения потерь энергии на излучение. Недостатком такого решения является то, что метаматериальная структура используется в качестве промежуточного звена между передатчиком и приемником электромагнитной энергии, что значительно увеличивает габариты всей системы и усложняет ее практическое применение.

Известна также «Радиочастотная ближнепольная зарядная площадка с многодиапазонным антенным элементом с адаптивной нагрузкой для эффективной зарядки электронного устройства при любом положении на площадке» (патент США № US 10079515 В2, МПК H02J 7/00; H02J 50/20, дата приоритета 12.12.2016, дата публикации 18.09.2018), в котором предложена радиочастотная зарядная площадка с антенным элементом в виде проводящей линии в форме меандра с адаптивной нагрузкой на конце. Зарядная площадка имеет размеры значительно большие, чем приемник, расположенный внутри заряжаемого электронного устройства. При помещении электронного устройства на площадку, происходит определение его местоположения, а затем подстройка передающей антенны для повышения эффективности беспроводной передачи энергии. Таким образом, повышается устойчивость системы к смещению передающей и приемных антенн друг относительно друга. Недостатком этого решения является то, что настройка возможна только на одно приемное устройство, то есть большая часть зарядной площадки не будет задействована при работе системы. Также не предусмотрено экранирование паразитного электрического поля, которое влияет на биологические объекты, расположенные вблизи системы.

Известно также «Устройство беспроводной передачи энергии» (Патент РФ № RU 196766 U1, МПК H02J 50/00, дата приоритета 05.12.2019, опубликовано 16.03.2020), которое пригодно для зарядки одного или нескольких устройств одновременно, содержащее источник энергии, соединенный через первую цепь согласования импедансов с передатчиком электромагнитной энергии, представляющим собой метаматериал, содержащий слой проводников, один из которых имеет разрез, расположенных параллельно друг другу в одной плоскости на расстоянии  $s_i$  друг от друга, где  $s_i$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина электромагнитной волны в метаматериале. Недостатком этого решения является расположение на концах проводников конденсаторов, в области над которыми сконцентрировано электрическое поле высокой напряженности, которое ограничивает максимально допустимую для передачи мощность, а также сильная неоднородность магнитного поля в области над

метаматериалом.

Наиболее близким техническим решением, принятым за прототип является «Устройство беспроводной передачи энергии» (Патент РФ № RU 187264 U1, МПК H02J 50/00; H02J 7/00, дата приоритета 23.05.2018, опубликовано 27.02.2019), способное

5 заряжать одно или несколько устройств одновременно, содержащее блок беспроводной передачи энергии, включающий источник энергии, соединенный с передатчиком электромагнитной энергии через первую цепь согласования импедансов, и не менее одного блока беспроводного приема энергии, который включает приемник электромагнитной энергии, индуктивно связанный с передатчиком электромагнитной

10 энергии и последовательно соединенный через вторую цепь согласования импедансов и выпрямитель переменного электрического тока с нагрузкой, при этом передатчик электромагнитной энергии представляет собой метаматериал, состоящий из двух слоев проводников, которые, по меньшей мере, частично размещены внутри диэлектрика, где в каждом слое проводники расположены в одной плоскости параллельно друг

15 другу на расстояниях  $s_i$  друг от друга, где  $s_i$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина электромагнитной волны в метаматериале, каждый из которых характеризуется длиной  $l_i$ , среднее значение которой равно  $L$ , а  $L$  удовлетворяет условию  $0,2 \cdot \lambda_M < L < 0,5 \cdot \lambda_M$ , при этом расстояние между слоями проводников

20 метаматериала равно  $h$ , где  $h$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < h < 0,1 \cdot \lambda_M$ , а угол поворота слоев относительно друг друга  $\beta$  удовлетворяет условию  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ . Недостатком прототипа является необходимость размещения слоев проводников, из которых состоит метаматериал, использующийся в качестве передатчика, внутри диэлектрика с целью уменьшения рабочей частоты передатчика. Такой подход к уменьшению рабочей

25 частоты является нетехнологичным по нескольким причинам: 1) При использовании твердых диэлектриков необходимо использование сложных технологических процедур для размещения внутри него слоев проводников. 2) При использовании жидких диэлектриков, внутри которых располагаются слои метаматериала, необходимо использование сложных технологических процедур для закрепления проводников

30 внутри диэлектрика и поддержания постоянной высоты  $h$  между слоями. Также при использовании жидких диэлектриков возможно нарушение герметичности конструкции, что приведет к изменению ее характеристик, а именно увеличению потерь внутри диэлектрика, нарушению работы системы. Помимо этого, поскольку диэлектрическая проницаемость диэлектрика, внутри которого располагаются проводники, является

35 основным фактором настройки метаматериала на желаемую рабочую частоту, потому что физическая длина проводников и расстояние между слоями ограничены требованиями к габаритам устройства, то необходимо иметь возможность использовать материалы, диэлектрические проницаемости которых находятся в большом диапазоне значений. Однако одно из максимальных значений диэлектрической проницаемости

40 среди распространенных не композитных жидких диэлектриков имеет вода  $\epsilon=81$ , которая не позволит уменьшить габариты устройства до желаемых пределов и является серьезным ограничением для данной конструкции.

Основной задачей, на решение которой направлена заявленная полезная модель, является разработка резонансного передатчика большого размера для устройства

45 беспроводной передачи энергии, имеющего равномерное распределение ближнего магнитного поля, пригодного для подзарядки на частотах менее 30 МГц нескольких мобильных устройств, расположенных на передатчике одновременно, обеспечивающего коэффициент удельного поглощения электромагнитной энергии менее 15 мВт/кг и

изготавливаемого с использованием технологий массового производства.

Поставленная задача решается за счет использования в устройстве беспроводной передачи энергии в качестве передатчика метаматериальной резонансной структуры, изготовленной с помощью стандартной технологии изготовления печатных плат и применения композитного высокочастотного керамического материала с высоким значением диэлектрической проницаемости для концентрации в нем электрического поля и создания конструктивной распределенной емкости для снижения рабочей частоты.

Сущность полезной модели заключается в том, что в качестве передатчика электромагнитной энергии в устройстве беспроводной передачи энергии используется резонансная структура на основе метаматериала, состоящего из двух слоев печатных проводников, в каждом из которых проводники длиной  $L$ , где  $L$  удовлетворяет условию  $0,005 \cdot \lambda_M < L < 0,05 \cdot \lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина электромагнитной волны в метаматериале и шириной  $w$ , расположены в одной плоскости параллельно друг другу на расстояниях  $s_i$ , где  $s_i$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$  и связано с их длиной следующим

соотношением  $s_i = L \left[ \left( 1 - \frac{(N-i)}{N} \right)^k - \left( 1 - \frac{(N-i+1)}{N} \right)^k \right]$ , где  $i$  - порядковый номер

проводника, считая от края структуры,  $k$  - коэффициент неоднородности, который удовлетворяет условию  $0,2 < k < 1$ ,  $N$  - количество проводников в каждом слое. Расстояние между слоями равно  $h$ , где  $h$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < h < 0,1 \cdot \lambda_M$ . Угол между проводниками разных слоев составляет  $90^\circ$ . Пространство в углах конструкции между проводниками заполнено высокочастотным диэлектрическим материалом с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , где  $\epsilon$  удовлетворяет условию  $10 < \epsilon < 500$ , и обладающим низкими потерями на рабочих частотах, который используется для создания конструктивной емкости для уменьшения частоты основной моды резонатора. При этом значение емкости, возникающей за счет перекрытия проводников в различных слоях и заполнения пространства между ними высокочастотным диэлектриком,

определяется по следующей формуле  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 w^2}{h}$ , где  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума. Для придания механической устойчивости конструкции, оставшаяся часть пространства также заполнена диэлектриком с отличной от диэлектрических вставок по углам диэлектрической проницаемостью.

Множественные численные эксперименты показали, что равномерное распределение амплитуды магнитного поля в ближней зоне резонансной метаматериальной структуры в активной области передачи энергии достигается при неэквидистантном расположении проводников в каждом слое. Был выбран закон распределения проводников, предложенный в [1], в соответствии с которым, проводники в одном слое располагаются на расстояниях  $s_i$  друг от друга, при этом  $s_i$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$  и связано с их длиной следующим соотношением

$s_i = L \left[ \left( 1 - \frac{(N-i)}{N} \right)^k - \left( 1 - \frac{(N-i+1)}{N} \right)^k \right]$ , где  $i$  - порядковый номер проводника, считая

от края структуры,  $k$  - коэффициент неоднородности, который удовлетворяет условию  $0,2 < k < 1$ ,  $N$  - количество проводников в каждом слое. Для заданного числа проводников и их длины было подобрано такое значение коэффициента неоднородности  $k$ , при котором равномерность распределения напряженности магнитного поля достигла требуемого значения. Равномерная напряженность магнитного поля в центре

метаповерхности позволяет добиться одинаковой эффективности передачи энергии к приемникам, независимо от их расположения в рабочей области.

В отсутствие диэлектрика рабочая частота резонатора равна  $f=c/\lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина волны в метаматериале,  $c$  - скорость света в вакууме. Заполнение пространства между слоями проводников диэлектриком позволяет создать конструктивные емкости между проводниками, тем самым увеличив их электрическую длину, а следовательно, снизить рабочую частоту метаматериала обратно пропорционально корню из диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  диэлектрика:  $f \sim 1/\sqrt{\epsilon}$ .

В резонансной структуре угол между проводниками разных слоев составляет  $90^\circ$ , а расстояние между слоями  $h$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < h < 0,1 \cdot \lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина электромагнитной волны в метаматериале, что уменьшает напряженность электрического поля вблизи метаповерхности за счет создания сильной электромагнитной связи между слоями, которая позволяет запастись значительную часть электромагнитной энергии в реактивных полях между слоями проводников. За счет уменьшения напряженности электрического поля в области над структурой, представленная конструкция обеспечивает безопасность использования метаматериальной структуры в присутствии человека в непосредственной близости от нее в режиме работы.

Совокупность вышеприведенных признаков позволяет создать резонансную метематериальную структуру для использования ее в качестве передатчика в устройстве беспроводной передачи энергии, обладающую равномерным распределением магнитного поля в активной области передачи энергии, пригодную для подзарядки нескольких мобильных устройств одновременно, обеспечивающую более безопасный уровень удельного поглощения электромагнитной энергии по сравнению со стандартными передающими катушками в системах беспроводной передачи энергии за счет концентрации электрического поля в высокочастотном диэлектрическом материале, расположенном по углам конструкции между слоями печатных проводников, а также повысить технологичность по сравнению с прототипом за счет использования стандартных технологий изготовления печатных плат, а также использования вставок из высокочастотного диэлектрического материала по углам конструкции, вместо помещения слоев проводников в диэлектрический бокс.

Сущность полезной модели поясняется с помощью соответствующих фигур.

Фиг. 1 - Структурная схема устройства беспроводной передачи энергии.

Фиг. 2. - Чертеж метаматериальной структуры (вид сверху).

Фиг. 3. - Чертеж метаматериальной структуры (вид спереди).

Фиг. 4. - Распределение нормальной составляющей напряженности магнитного поля над резонатором на высоте 30 мм.

Фиг. 5. - График зависимости входной проводимости резонансной метаматериальной структуры от частоты.

Фиг.6. - Распределение поверхностных токов в проводниках на частоте, соответствующей фундаментальной моде.

Фиг. 7. - Результат численной оценки удельного поглощения электромагнитной энергии в присутствии модели руки человека.

Устройство беспроводной передачи энергии состоит из одного блока беспроводной передачи энергии 1, включающего источник энергии 2, который представляет собой высокочастотный генератор сигнала, цепь согласования импедансов 3 и передатчик электромагнитной энергии 4, а также из одного или нескольких заряжаемых устройств 5, каждый из которых оснащен блоком беспроводного приема электромагнитной

энергии 6, включающего приемник электромагнитной энергии 7, цепь преобразования переменного тока в постоянный 8, выполняющей также функцию согласования импедансов, и нагрузку 9.

Резонансная метаматериальная структура, используемая в качестве передатчика электромагнитной энергии 4 для систем беспроводной передачи энергии, показана на 5 фиг. 2 и фиг. 3 и состоит из двух ортогональных слоев печатных проводников 10 длиной  $L$  и шириной  $w$ , расположенных на расстоянии  $h$  друг от друга. В углах структуры расположены вставки из высокочастотного диэлектрического материала 11 с высоким значением диэлектрической проницаемости 8. Оставшееся пространство между 10 проводниками заполнено ABS пластиком 12 для придания механической устойчивости конструкции. Печатные проводники 10 выполнены с помощью технологии изготовления печатных плат на листе FR-4 13. Конструкция представляет собой трехслойную 10 структуру - между двумя печатными платами располагается слой из двух различных диэлектрических материалов. Проводники в каждом из слоев располагаются 15 параллельно друг другу на расстоянии  $s_i$ , которое было подобрано таким образом, чтобы добиться равномерного распределения магнитного поля в ближней зоне резонатора. Подключение источника энергии производится к разрыву 14 14 расположенному на крайнем проводнике одного из слоев метаматериала.

Принцип работы устройства беспроводной передачи энергии заключается в 20 следующем. При подаче питания на блок беспроводной передачи энергии 1, источник энергии 2 начинает генерировать переменный электрический ток частотой  $f$ . При подключении источника энергии 2 через цепь согласования импедансов 3 к разрыву 14 14 расположенному на крайнем проводнике одного из слоев метаматериальной структуры из которой выполнен передатчик электромагнитной энергии 4, в нем начинает протекать 25 переменный электрический ток частотой  $f$ . За счет того что расстояния  $s_i$  между соседними проводниками в каждом слое метаматериала удовлетворяют условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$ , проводники оказываются сильно связанными и из-за этого происходит расщепление резонансной частоты одного проводника на несколько 30 диапазонов, которые соответствуют собственным модам резонатора. Фундаментальной моде соответствует самая низкочастотная собственная мода резонатора. При резонансном возбуждении фундаментальной моды метаматериальной структуры, создается магнитное поле, направленное перпендикулярно к поверхности, причем напряженность магнитного поля оказывается квазиоднородной в центральной области 35 структуры, которую будем считать активной (рабочей) областью беспроводной передачи энергии. Распределение напряженности нормальной составляющей магнитного поля на высоте 30 мм от структуры показано на фиг. 4. Данное распределение магнитного поля обусловлено определенным направлением токов (фиг. 5) в проводниках 10, которые можно интерпретировать как эквивалентные рамки с токами, которые получаются за 40 счет емкостной связи между двумя слоями печатных проводников, которая дополнительно увеличена за счет применения материала с высокой диэлектрической проницаемостью. При помещении в активную область одного или нескольких заряжаемых устройств 5 магнитное поле создаваемое передатчиком электромагнитной энергии 4 наводит индукционный ток частотой  $f$  в приемнике электромагнитной энергии 7 45 каждого из заряжаемых устройств 5. Ток затем преобразуется в постоянный с помощью преобразователя 8, и затем поступает в нагрузку 9. При этом преобразователь 8 также выполняет функцию согласования импедансов приемника электромагнитной энергии и нагрузки.

Настройка частоты резонанса метаматериальной структуры осуществляется за счет подбора размеров диэлектрических вставок 11 и их диэлектрической проницаемости, выбора параметров печатных проводников 10 и их количества, а также за счет расстояния между слоями. При этом изменение параметров диэлектрических вставок наиболее существенно сказывается на резонансной частоте структуры, по сравнению с изменением других параметров. Для представленной на фиг. 2 структуры частота фундаментальной моды была настроена на 27 МГц. График зависимости входной проводимости показан на фиг. 6, на котором можно наблюдать два резонанса: последовательный и параллельный. В качестве рабочего был выбран последовательный резонанс, поскольку при детальном изучении напряженности магнитного поля для обоих резонансов, оказалось, что при последовательном резонансе она существенно выше, чем при параллельном.

Численно рассчитанный коэффициент удельного поглощения при расположении биологических тканей над метаматериальной структурой показан на фиг. 7. Для расчета использовалась модель руки человека (VNP-Female CAD model), содержащая детализированные ткани и органы человека с характерными для них электромагнитными параметрами. Модель руки человека была расположена на краю структуры, поскольку в этой области наблюдается максимум электрического поля. Таким образом, был рассмотрен наименее безопасный сценарий использования устройства. Усреднение коэффициента удельного поглощения производилось по 10 граммам тканей. По представленному распределению видно, что максимальное значение коэффициента удельного поглощения составляет 11 мВт/кг, что является приемлемым значением с точки зрения безопасности для человека.

Таким образом, заявляемое устройство беспроводной передачи энергии, использующее в качестве передатчика электромагнитной энергии резонансную метаматериальную структуру, изготавливаемую с помощью стандартных технологий массового производства, является более безопасным для человека с точки зрения коэффициента удельного поглощения электромагнитной энергии, за счет использования диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости в качестве материала, которым заполнено пространство между слоями печатных проводников и концентрирования электрического поля в области между слоями. Заявляемая структура позволяет повысить эффективность передачи энергии к нескольким мобильным устройствам, оснащенным приемником электромагнитной энергии за счет формирования равномерного магнитного поля высокой интенсивности в активной области над структурой.

Список источников:

1. Casanova J.J. и др. Transmitting coil achieving uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system // RWS 2009 IEEE Radio Wirel. Symp. Proc. 2009. С. 530-533.

#### (57) Формула полезной модели

Устройство беспроводной передачи энергии, включающее источник энергии, соединенный через первую цепь согласования импедансов с передатчиком электромагнитной энергии, выполненным с возможностью индуктивной связи с приемником электромагнитной энергии и представляющим собой метаматериал, состоящий из двух слоев проводников, в каждом из которых проводники длиной  $L$  расположены в одной плоскости параллельно друг другу на расстояниях  $s_i$ , где  $s_i$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < s_i < 0,1 \cdot \lambda_M$ , где  $\lambda_M$  - длина электромагнитной волны в

метаматериале, расстояние между слоями равно  $h$ , где  $h$  удовлетворяет условию  $0,001 \cdot \lambda_M < h < 0,1 \cdot \lambda_M$ , при этом проводники одного слоя ориентированы под углом к проводникам другого, а один из крайних проводников одного из слоев выполнен с разрывом для подключения источника питания, отличающееся тем, что длина проводников  $L$  удовлетворяет условию  $0,005 \cdot \lambda_M < L < 0,05 \cdot \lambda_M$ , расстояние  $s_i$  между проводниками связано с их длиной следующим соотношением

$$s_i = L \left[ \left( 1 - \frac{(N-i)}{N} \right)^k - \left( 1 - \frac{(N-i+1)}{N} \right)^k \right],$$

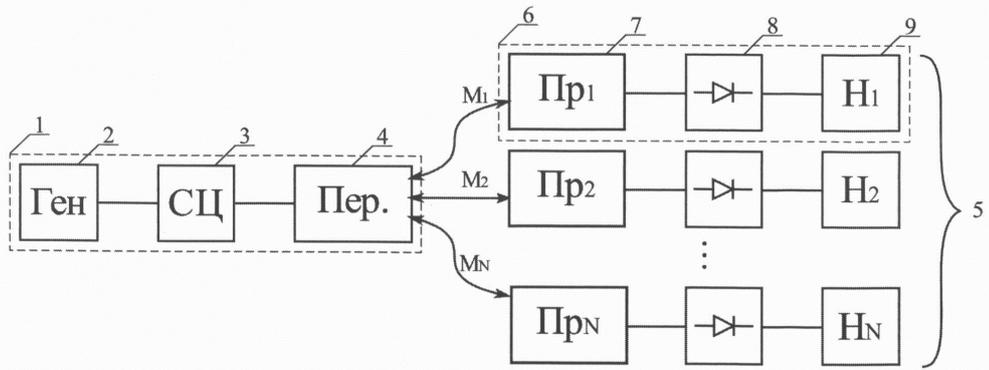
где  $i$  - порядковый номер проводника, считая от края структуры;  $k$  - коэффициент неоднородности, который удовлетворяет условию  $0,2 < k < 1$ ;  $N$  - количество проводников в каждом слое,

между слоями проводников по углам конструкции установлены квадратные вставки из высокочастотного диэлектрика со стороной  $d$ , такой, что выполняется условие

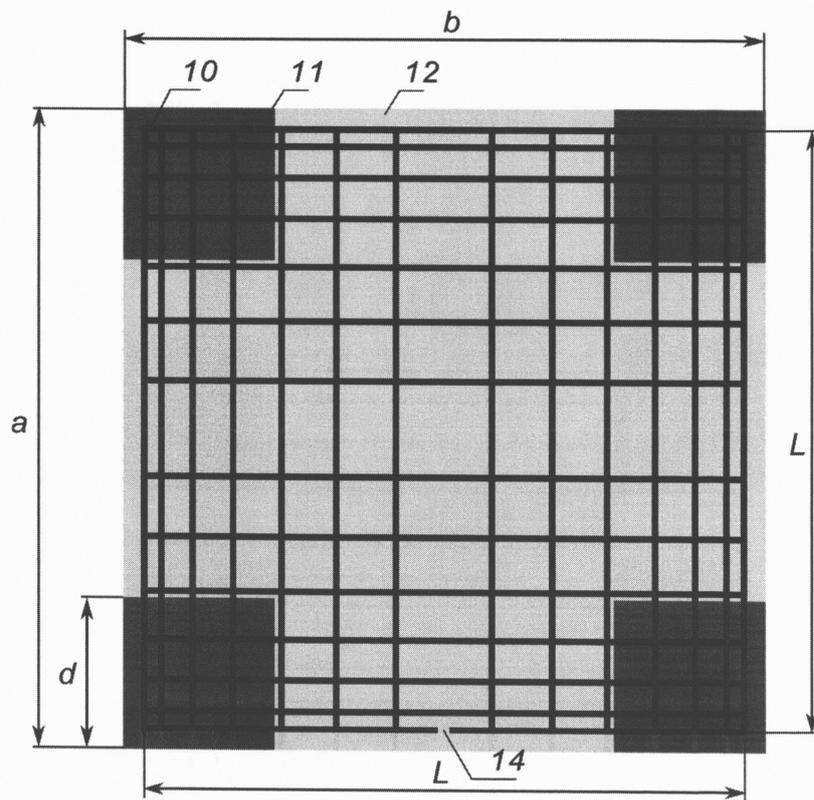
$$0,1 < \frac{d}{L} < 0,5,$$

с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , где  $\epsilon$  удовлетворяет условию  $10 < \epsilon < 500$ , угол между проводниками разных слоев составляет  $90^\circ$ .

1

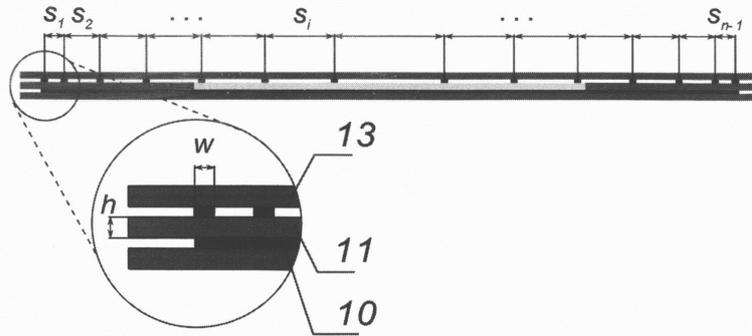


Фиг. 1

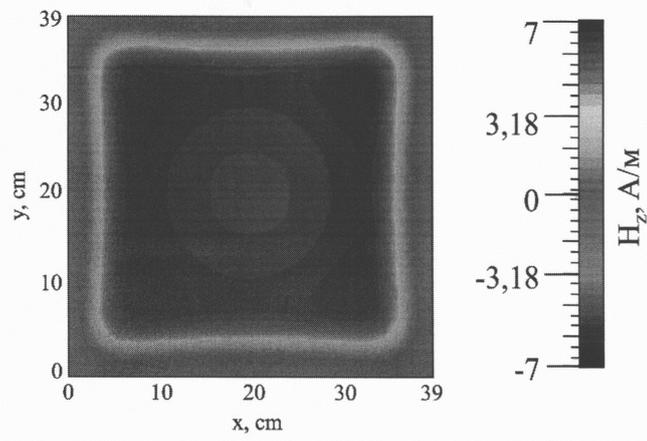


Фиг. 2

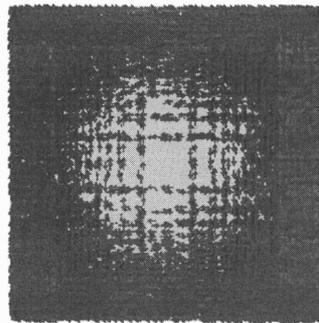
2



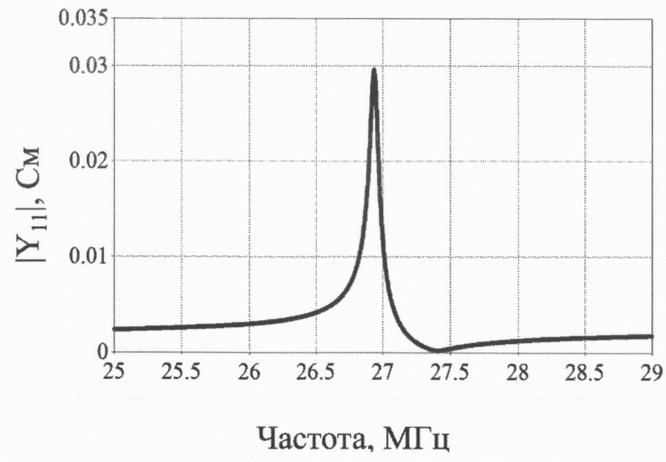
Фиг. 3



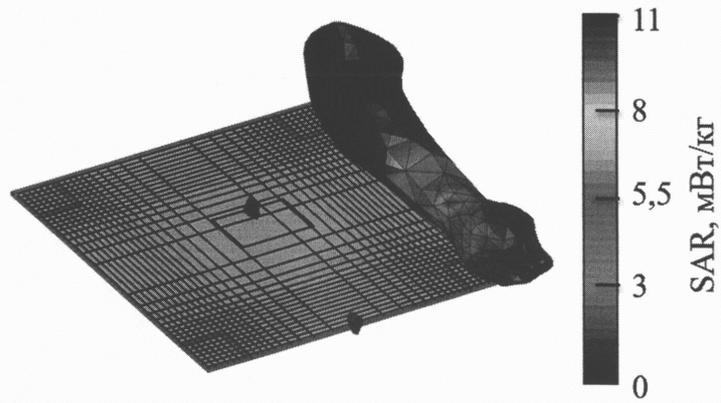
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7