



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015151513, 01.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.12.2015

Дата регистрации:
23.03.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.12.2015

(45) Опубликовано: 23.03.2017 Бюл. № 9

Адрес для переписки:

346500, Ростовская обл., г. Шахты, ул. Шевченко,
147, научно-инновационный отдел ИСОиП

(72) Автор(ы):

Сапогин Владимир Георгиевич (RU),
Прокопенко Николай Николаевич (RU),
Иванов Юрий Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Донской
государственный технический университет"
(ДГТУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 5396101, 07.03.1995. WO
2011073908 A1, 23.06.2011. US 20060220737
A1, 05.10.2006. US 2008048760 A1, 28.02.2008.
SU 1023410 A1, 15.06.1983.

(54) ПЛАНАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ

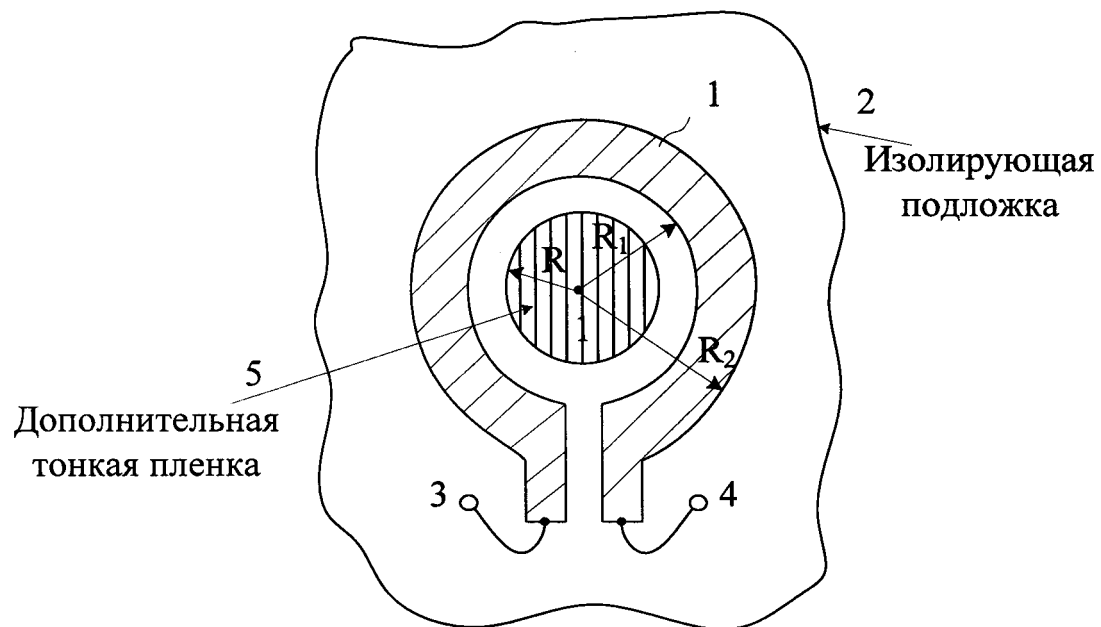
(57) Реферат:

Изобретение относится к пассивной элементной базе устройств радиотехники и связи и может найти широкое применение в различных усилителях, смесителях и RLC-фильтрах ВЧ и СВЧ диапазонов, радиоприемниках и радиопередатчиках и т.п. Технический результат: увеличение численных значений L планарной индуктивности, реализуемой как минимум в виде одного витка, расположенного на изолирующей подложке. Сущность: планарная индуктивность содержит как минимум один виток (1) из

металлической пленки толщиной h_1 , расположенный на изолирующей подложке (2), первый (3) и второй (4) выводы интегральной индуктивности для ее включения в электронную схему. Во внутреннюю область витка (1) из металлической пленки толщиной h_1 введена дополнительная тонкая пленка (5) толщиной $h_2 \ll h_1$ из материала, обладающего заданной электропроводностью и не имеющего электрического контакта с витком (1) планарной индуктивности. 6 з.п. ф-лы, 5 ил., 3 табл.

RU 2 614 188 C1

RU 2 614 188 C1



Фиг. 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015151513, 01.12.2015**(24) Effective date for property rights:
01.12.2015Registration date:
23.03.2017

Priority:

(22) Date of filing: **01.12.2015**(45) Date of publication: **23.03.2017** Bull. № 9

Mail address:

**346500, Rostovskaya obl., g. Shakhty, ul.
Shevchenko, 147, nauchno-innovatsionnyj otdel
ISOiP**

(72) Inventor(s):

**Sapogin Vladimir Georgievich (RU),
Prokopenko Nikolaj Nikolaevich (RU),
Ivanov Yuriy Ivanovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
professionalnogo obrazovaniya "Donskoj
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet"
(DGTU) (RU)**(54) **PLANAR INDUCTANCE**

(57) Abstract:

FIELD: physics, instrumentation.

SUBSTANCE: invention refers to the passive element base of radio and communications devices, and can be widely used in a variety of amplifiers, mixers and RLC-filters of HF and UHF bands, radio receivers and transmitters, etc. Essence: planar inductance comprises at least one coil (1) of a metal film of h1 thickness, located on an insulating substrate (2), the first (3) and the second (4) integrated inductor terminals for inclusion into the electronic circuit. An additional

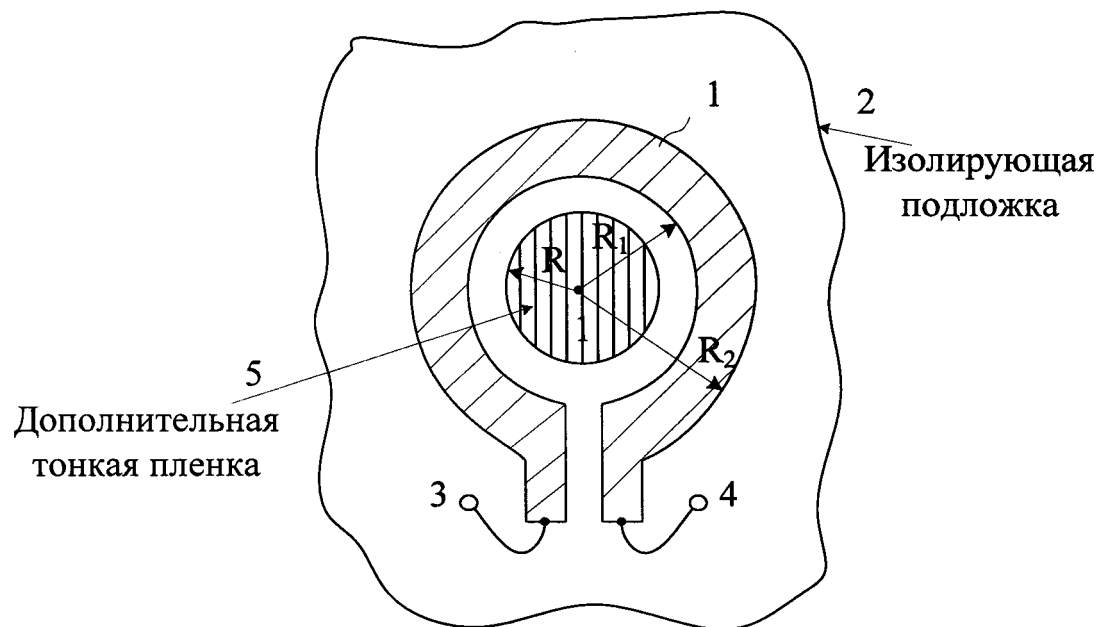
thin film (5) with a thickness $h_2 \ll h_1$ made of a material with specified electrical conductivity, having no electrical contact with the coil (1) of the planar inductor is inserted to the inner region of the coil (1) from the a metal film of h1 thickness.

EFFECT: invention provides an increase in the numerical values of L planar inductance implemented in the form of at least one coil located on the insulating substrate.

7 cl, 5 dwg, 3 tbl

RU 2 614 188 C1

RU 2 614 188 C1



Фиг. 2

Изобретение относится к пассивной элементной базе устройств радиотехники и связи и может найти широкое применение в различных усилителях, смесителях и RLC-фильтрах ВЧ и СВЧ диапазонов, радиоприемниках и радиопередатчиках и т.п.

В современных устройствах связи и телекоммуникаций в структуре «систем на кристалле» или «систем в корпусе» широко используются планарные индуктивности (L), которые (для повышения численных значений L) реализуются на диэлектрической подложке в виде многовитковых круглых, спиральных [1-4], квадратных [5-17] или более сложных геометрических форм, например ортогональных спиралей [18-24]. В ряде случаев интегральная индуктивность, предназначенная для СВЧ диапазона, выполняется в виде одного витка из напыляемой на подложку металлической пленки [25-33], образующей токовое кольцо. Однако такое конструктивно-технологическое решение уменьшает численное значение L до единиц наногенри (0,5-3,5 нГн для микронных геометрических размеров). Для получения в одном слое, например, $L=2$ нГн требуется площадь 100 мкм на 100 мкм, что соответствует поверхностной плотности индуктивности $0,2 \text{ Гн/м}^2$ [34].

Ближайшим прототипом заявляемого устройства является интегральная индуктивность в виде одного витка (фиг. 1), представленная в учебном пособии «Автоматизированное проектирование интегральных катушек индуктивности для аналоговой микроэлектроники СВЧ диапазона: Ч.1 Разработка и анализ топологии индуктивного элемента на основе БиКМОП технологии в среде ADS2005A» / Д.Н. Конев, А.С. Будяков, Н.Н. Прокопенко. - Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007 г., с. 37, рис. 9.4. Кроме этого, данная конструкция одновитковой интегральной индуктивности описана в других публикациях и патентах [25-33].

Существенный недостаток известного устройства фиг. 1 состоит в том, что индуктивность (L) данной конструкции в диапазоне геометрических размеров от 20 до 100 мкм имеет малые значения (0,5-3,5 нГн). Это ограничивает области ее практического использования в «системах на кристалле». Функциональные зависимости L такой конструкции, представленные в упомянутом выше методическом пособии, показывают, что L зависит от диаметра витка и его ширины, но при этом не может быть существенно увеличена за счет изменения ее геометрических размеров в указанном диапазоне (20÷100 мкм).

Основная задача предлагаемого изобретения состоит в увеличении численных значений L планарной индуктивности, реализуемой как минимум в виде одного витка, расположенного на изолирующей подложке.

Поставленная задача достигается тем, что в планарной индуктивности, содержащей как минимум один виток (1) из металлической пленки толщиной h_1 , расположенный на изолирующей подложке 2, первый 3 и второй 4 выводы интегральной индуктивности для ее включения в электронную схему, предусмотрены новые конструктивные элементы - во внутреннюю область витка 1 из металлической пленки толщиной h_1 введена дополнительная тонкая пленка 5 толщиной $h_2 < h_1$ из материала, обладающего заданной электропроводностью и не имеющего электрического контакта с витком 1 планарной индуктивности.

По существу в настоящем изобретении предлагается увеличить в 5-50 раз поверхностную плотность индуктивности путем расположения на той же площади кристалла дополнительной тонкой пленки 5. Причем толщина h_2 этой пленки должна находиться в диапазоне от десятков до сотен нанометров. При других значениях толщины h_2 заявляемый положительный результат не обеспечивается, т.к. он связан с

наноразмерными эффектами.

На фиг. 1 представлен вид сверху типовой конструкции планарной индуктивности-прототипа. Здесь, а также на фиг. 2-5 приняты следующие обозначения: R - радиус дополнительной тонкой пленки 5, h_2 - ее толщина; R_1 - внутренний радиус витка 1 (токового кольца) из металлической пленки толщиной h_1 , R_2 - внешний радиус витка 1 (токового кольца) из металлической пленки толщиной h_1 ; 2 - изолирующая подложка (например, из сапфира); 3 и 4 - первый (3) и второй (4) выводы интегральной индуктивности для ее включения в электронную схему.

На фиг. 2 приведен вид сверху конструкции заявляемого устройства, которое использует известную топологию фиг. 1 одновитковой 1 индуктивности (одиночного токового кольца). Во внутреннюю область витка 1 из металлической пленки толщиной h_1 введена дополнительная тонкая пленка 5 толщиной $h_2 < h_1$ из материала, обладающего заданной электропроводностью и не имеющего электрического контакта с витком 1 планарной индуктивности. При использовании такой индуктивности в мощных выходных каскадах величины R , h_2 , R_1 , R_2 и h_1 должны быть рассчитаны с учетом допустимого теплового энерговыделения.

На фиг. 3 индуктивность фиг. 2 представлена с объемным изображением изолирующей подложки.

На фиг. 4б дан разрез заявляемой конструкции фиг. 4а, соответствующей фиг. 2, по вертикальному сечению АВ. Замкнутыми кривыми со стрелками здесь схематически показаны силовые линии переменного магнитного поля для некоторого момента времени.

На фиг. 5 представлен отдельный чертеж дополнительной тонкой пленки 5 из фиг. 4б, который предназначен для аналитического расчета индуктивности L заявляемого устройства.

Планарная индуктивность фиг. 4 (фиг. 2) содержит как минимум один виток 1 из металлической пленки толщиной h_1 , расположенный на изолирующей подложке 2, первый 3 и второй 4 выводы интегральной индуктивности для ее включения в электронную схему. Во внутреннюю область витка 1 из металлической пленки толщиной h_1 введена дополнительная тонкая пленка 5 толщиной $h_2 < h_1$ из материала, обладающего заданной электропроводностью и не имеющего электрического контакта с витком 1 (токовым кольцом) планарной индуктивности.

В соответствии с п. 2 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности меди. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую планарную индуктивность L в диапазоне частот от 0,3 до 30 МГц.

В соответствии с п. 3 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности алюминия. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую планарную индуктивность в диапазоне частот от 0,5 до 50 МГц.

В соответствии с п. 4 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности вольфрама. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую планарную индуктивность в диапазоне частот от 1 до 100 МГц.

В соответствии с п. 5 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности никеля. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую заявляемую планарную индуктивность

в диапазоне частот от 1,2 до 120 МГц.

В соответствии с п. 6 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности нихрома. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую планарную индуктивность в диапазоне частот от 20 МГц до 2 ГГц.

В соответствии с п. 7 формулы изобретения, заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 на фиг. 4 соответствует электропроводности электронного кремния. Это позволяет обеспечить частотнонезависимую планарную индуктивность в диапазоне частот от 20 ГГц до 2 ТГц.

Рассмотрим факторы, позволяющие получить более высокие значения L в предлагаемой планарной индуктивности (фиг. 4, фиг. 5).

Индуктивность конструкции L (фиг. 4, фиг. 5) относительно первого 3 и второго 4 выводов складывается из двух составляющих

$$L = L_k + L_\phi, \quad (1)$$

где L_k - индуктивность витка 1 (токового кольца), расчет которой можно выполнить на основе графиков, представленных в упомянутом выше учебном пособии;

L_ϕ - потоковая индуктивность дополнительной тонкой пленки 5, расчет которой представлен ниже.

Предположим, что дополнительная тонкая пленка 5 (сплошная, проводящая, немагнитная) находится во внешнем однородном переменном магнитном поле, направленном по оси z , которое имеет только одну компоненту $\vec{B} = (0, 0, B_z)$ (фиг. 5). Это внешнее для дополнительной тонкой пленки 5 магнитное поле создается витком 1 (токовым кольцом), а его зависимость от времени имеет вид

$$B_z = B_0 \cos \omega t. \quad (2)$$

Для простоты предполагаем, что однородное в пространстве магнитное поле $B_0 = \text{const}$ не зависит от цилиндрических координат системы (r, ϕ, z) и ограничено в радиальном направлении внешним радиусом цилиндра R дополнительной тонкой пленки 5, а в аксиальном направлении - толщиной дополнительной тонкой пленки 5, обозначенной через h_2 .

На фиг. 5 показаны направления векторов и силовых линий внешнего переменного магнитного поля относительно оси дополнительной тонкой пленки 5, а также направления азимутальной компоненты вектора плотности тока Фуко, имеющей единственную компоненту j_ϕ , для некоторого момента времени.

При такой ориентации переменное магнитное поле будет порождать в дополнительной тонкой пленке 5 вихревое электрическое поле, напряженность которого

$\vec{E} = (0, E_\phi, 0)$ имеет только одну компоненту.

Впервые экспериментальное доказательство существования такой возможной ориентации вихревого электрического поля было обнаружено при создании бетатронов - индукционных ускорителей электронов [35]. В них ускорение электронов осуществляется вихревым электрическим полем, силовые линии которого представляют собой концентрические окружности. В ускорителе они формируются электромагнитом специальной формы (см., например, [35]), а в заявляемом устройстве - дополнительной тонкой пленкой 5 строго определенной толщины $h_2 \ll h_1$.

Компоненты полей в системе фиг. 4 (фиг. 5) связаны между собой первым уравнением

Максвелла, записанным в проекциях цилиндрической системы координат (r, φ, z)

$$\sigma(\operatorname{rot} \vec{E})_z = -\frac{\partial B_z}{\partial t}, \quad (3)$$

где $\sigma = \pm 1$ - уточняющий знаковый множитель. Он включает в себя две возможные ориентации ротора вихревого электрического поля по отношению к исходному направлению вектора B_0 . Как показывают эксперименты, проведенные американскими технологами [36], значение $\sigma = -1$ возникает в цилиндрических пленках с толщиной десятки и сотни нанометров. В таких сверхтонких пленках токи Фуко формируют частотнонезависимую положительную индуктивность L_ϕ , которая приводится к выводам 3 и 4 интегральной индуктивности, проявляя свои неожиданные парамагнитные свойства.

Значение $\sigma = +1$ реализуется при протекании токов Фуко в проводящих цилиндрах в макроскопических масштабах, которые проявляют свои естественные диамагнитные свойства. Высота проводящего цилиндра h_2 дополнительной тонкой пленки 5 при этом должна быть больше его радиуса R и значительно превышать 1 мкм.

Полагая в (3), что

$$\sigma E_\phi = E_0(r) \sin \omega t, \quad (4)$$

из уравнения (4) получим уравнение, связывающее $E_0(r)$ и B_0

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma E_0) = \omega B_0, \quad (5)$$

где r - радиус текущей точки наблюдения в цилиндрической системе координат, который может изменяться в диапазоне $0 \div R$.

Решение уравнения (5) для $E_0(r)$ имеет вид

$$\sigma E_0(r) = \omega B_0 r / 2 + C_1 / r, \quad (6)$$

где C_1 - постоянная величина.

В решении (6) избавимся от особенности при $r \rightarrow 0$, полагая $C_1 = 0$. Это условие приводит к тому, что при $B_0 = 0$ величина $E_0 = 0$. Из (6) видно, что азимутальная компонента вектора напряженности вихревого электрического поля - линейная функция радиуса r с масштабом

$$E_* = \omega B_0 R / 2 = \pi f B_0 R. \quad (7)$$

В масштабе напряженности учтено соотношение $\omega = 2\pi f$. Тогда (6) с учетом (7) при $0 \leq r \leq R$ имеет вид

$$E_0(r) = \sigma E_* r / R. \quad (8)$$

Электрическое поле в проводящем цилиндре из дополнительной тонкой пленки 5 создает вихревые токи Фуко, плотность тока которых имеет такое же направление в пространстве $\vec{j} = (0, j_\phi, 0)$. Плотность токов Фуко рассчитывается из дифференциального закона Ома

$$j_\phi = E_\phi / \rho, \quad (9)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление дополнительной тонкой пленки 5.

Из (9) видно, что плотность тока Фуко в однородной проводящей среде $\rho = \text{const}$ также является линейной функцией радиуса r и также зависит от времени, как и E_ϕ

$$j_{\varphi} = \sigma j_0(r) \sin \omega t, \quad (10)$$

где $j_0(r)$ связано с масштабом плотности тока

$$j_{\star} = \pi f B_0 R / \rho \quad (11)$$

соотношением

$$j_0(r) = j_{\star} r / R. \quad (12)$$

Из соотношения (11) видно, что при прочих равных условиях масштаб плотности тока может достигать больших значений на высоких частотах для проводящей среды с малым значением удельного сопротивления ρ . Это будет приводить к нагреву проводящей пленки на высокой частоте.

Вихревой ток, индуцированный во всей дополнительной тонкой пленке 5, может быть получен из интегрирования плотности тока в цилиндрических координатах

$$i = \int_S \vec{j} d\vec{s} = \int_0^{h_2} \int_0^R j_{\varphi} dr dz = i_{\star} \sin \omega t, \quad (13)$$

$$\text{где } i_{\star} = j_{\star} h_2 R / 2 = \pi f B_0 h_2 R^2 / (2\rho) \quad (14)$$

- масштаб индукционного тока.

Плотность вихревых токов Фуко (10) создает в пространстве цилиндра дополнительной тонкой пленки 5 собственное магнитное поле \vec{B}_1 . Это магнитное поле отклика вещества на внешнее воздействие для исходной ориентации вихревых токов в цилиндрической системе координат имеет одну проекцию B_{1z} . Направление проекции B_{1z} во всех точках цилиндра противоположно внешнему магнитному полю B_0 . В этом и заключается основная причина диамагнетизма, проявляемого токами Фуко.

Распределение магнитного поля отклика вещества можно рассчитать из второго уравнения Максвелла, записанного в цилиндрической системе координат (r, φ, z):

$$(\text{rot } \vec{B}_1)_{\varphi} = -\frac{\partial B_{1z}}{\partial r} = \mu_0 j_{\varphi}. \quad (15)$$

Интегрируя (15) для начального условия $B_{1z}(0)$ с учетом (10), получим

$$B_{1z} = -\sigma B_{1\star} (r/R)^2 \sin \omega t, \quad (16)$$

где

$$B_{1\star} = \mu_0 j_{\star} R / 2 \quad (17)$$

масштаб индукции магнитного поля отклика вещества. Его можно связать с индукцией внешнего магнитного поля безразмерным параметром β

$$B_{1\star} = \beta B_0, \quad (18)$$

который указывает на влияние магнетизма токов Фуко:

$$\beta = \frac{\mu_0 \pi R^2 f}{2\rho} = \frac{f}{f_{\star}}, \quad (19)$$

где

$$f_* = 2\rho/(\mu_0\pi R^2) \quad (19)$$

- масштаб частоты системы фиг. 4. Из (18) видно, что магнетизм токов Фуко слабо проявляет себя при $B \rightarrow 0$ и его влияние велико на высоких частотах, когда $\beta \gg 1$. При значении $\beta = 1$ масштабы индукций магнитных полей одинаковы. Как видно из (20), масштаб частоты системы фиг. 4 не зависит от толщины дополнительной тонкой пленки 5.

Исследуем индуктивные свойства дополнительной тонкой пленки 5. Найдем ее потоковую индуктивность из соотношения

$$\langle \Phi \rangle = L_\Phi \langle i \rangle, \quad (21)$$

где под $\langle \Phi \rangle$ будем понимать суммарный средний за полупериод поток, пересекающий проводящую дополнительную тонкую пленку 5, который формируется внешним переменным магнитным полем B_0 и магнитным полем отклика вещества B_1 . Под значением $\langle i \rangle$ будем понимать среднее значение переменного тока одного направления за полупериод. Тогда коэффициент пропорциональности между ними (L_Φ) будет играть роль средней потоковой индуктивности дополнительной тонкой пленки 5.

Поток внешнего переменного магнитного поля имеет вид

$$\Phi_0 = B_0 \pi R^2 \cos \omega t, \quad (22)$$

а поток переменного магнитного поля отклика вещества вычисляется из соотношения

$$\Phi_1 = \int_s \vec{B}_1 d\vec{s} = -\sigma \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R B_{1*} \frac{r^2}{R^2} dr = -\frac{\sigma \pi R^2}{2} B_{1*} \sin \omega t. \quad (23)$$

Среднее значение суммарного потока за полупериод имеет вид

$$\langle \Phi \rangle = \langle \Phi_0 \rangle + \langle \Phi_1 \rangle, \quad (24)$$

где

$$\langle \Phi_0 \rangle = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} B_0 \pi R^2 \cos \omega t dt = 0, \quad (25)$$

причем

$$\langle \Phi_1 \rangle = -\frac{2\sigma}{T} \int_0^{T/2} B_{1*} \pi R^2 \sin \omega t dt / 2 = -\sigma R^2 B_{1*}. \quad (26)$$

Подставляя (25) и (26) в (24) с учетом связи (21), получим

$$L_\Phi = \langle \Phi \rangle / \langle i \rangle = -\frac{\sigma \pi R^2 B_{1*}}{2i_*} = \pm \frac{\mu_0 \pi R^2}{2h_2}. \quad (27)$$

Из (27) следует, что средняя за полупериод потоковая индуктивность L_Φ дополнительной тонкой пленки 5 не зависит от частоты и может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Как показывают эксперименты, величины R и h_2 должны соответствовать элементарному токовому вихрю, который возбуждается в дополнительной тонкой пленке 5. При соотношении $h_2 < R$ толщина

дополнительной тонкой пленки 5 h_2 будет совпадать с толщиной элементарного токового вихря в дополнительной тонкой пленке 5 только для случая, когда толщина дополнительной тонкой пленки 5 h_2 меньше одного микрона. При этих условиях реализуется положительная частотно-независимая потоковая индуктивность, а вихревые токи Фуко проявляют свои неожиданные парамагнитные свойства.

Если толщина дополнительной тонкой пленки 5 $h_2 > 1$ мкм и условие $h_2 < R$ не выполнено, то возможны случаи, когда проводящий цилиндр из дополнительной тонкой пленки 5 находится либо в состоянии отрицательной частотно-независимой индуктивности (токи Фуко проявляют свои диамагнитные свойства наиболее сильно в макроскопических масштабах), либо в состоянии частотно-зависимой динамической индуктивности, которая обращается в нуль на двух характеристических частотах [37-40].

В таблице 1 приведены значения потоковой индуктивности L_Φ , рассчитанные из (21), которые можно реализовать в системе на кристалле для дополнительной тонкой пленки 5 радиусом $R=50$ мкм.

Таблица 1. Зависимость потоковой индуктивности L_Φ дополнительной тонкой плёнки 5 от ее толщины h_2

h_2 , нм	50	100	150	200	250	300	350
L_Φ , нГн	100	50	33,3	25	20	16,7	14,3

При этом удельное сопротивление дополнительной тонкой пленки 5 не влияет на величину индуктивности между выводами 3 и 4, а изменяет только частотный диапазон, в котором такая индуктивность будет оставаться постоянной. Данный диапазон частот можно оценить из условия $0,1 f_* < f < 10 f_*$, где f_* - масштаб частоты системы (20) «виток 1 (токовое кольцо) - дополнительная тонкая пленка 5».

Значения масштаба частоты, зависящего от удельного сопротивления дополнительной тонкой пленки 5, рассчитанные из соотношения (20), представлены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость масштаба частоты, приведенной к выводам 3, 4 системы «виток 1 (токовое кольцо) — дополнительная тонкая пленка 5», от свойств материала дополнительной тонкой плёнки 5

N п/п	Материал	Удельное сопротивление, Ом·м	Масштаб частоты, Гц
1	медь	$15,5 \cdot 10^{-9}$	$3,14 \cdot 10^6$
2	алюминий	$25,0 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^6$
3	вольфрам	$48,9 \cdot 10^{-9}$	$10,0 \cdot 10^6$
4	никель	$61,4 \cdot 10^{-9}$	$12,4 \cdot 10^6$
5	нихром	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$203 \cdot 10^6$
6	кремний электронный (KEF)	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$203 \cdot 10^9$

Из таблиц 1 и 2 видно, что использование, например, алюминия при напылении дополнительной тонкой пленки 5 радиусом $R=50$ мкм и толщиной $h_2=100$ нм позволяет

получить вносимую индуктивность дополнительной тонкой пленки 5 $L_{\phi}=50$ нГн, приведенную к выводам 3 и 4 заявляемой интегральной индуктивности. Такая дополнительная тонкая пленка 5 будет обеспечивать частотно-независимую индуктивность в диапазоне частот от 0,5 до 50 МГц.

Применение дополнительной тонкой пленки 5 из нихрома для тех же геометрических размеров позволит обеспечить постоянство индуктивности в диапазоне от 20 МГц до 2 ГГц и так далее (см. табл. 2).

В современных СВЧ микросхемах приемлемой для многих применений величиной интегральной индуктивности является значение в 10 нГн. В таблице 3 приведены толщины h_2 дополнительной тонкой пленки 5 в нанометрах и соответствующий ей радиус R в микрометрах, который дает данное фиксированное значение индуктивности дополнительной тонкой пленки 5 в 10 нГн.

Таблица 3. Геометрические размеры дополнительной тонкой плёнки 5 для получения индуктивности 10 нГн, приведенной к первому 3 и второму 4 выводам L

h_2 , нм	50	100	150	200	250
R , мкм	16	23	28	32	36
h_2 , нм	300	350	400	450	500
R , мкм	39	42	45	48	50

Расчеты для толщины дополнительной тонкой пленки 5 больше 500 нм не приводятся в связи с тем, что элементарный токовый вихрь в дополнительной тонкой пленке 5 в таком случае может оказаться нестабильным и перейти в другое частотно-зависимое состояние динамической индуктивности.

Данные табл. 3 указывают на возможность дальнейшего уменьшения площади, занимаемой интегральной индуктивностью с предлагаемой конструкцией. Такое уменьшение может привести к достижению предельных значений поверхностной плотности индуктивности вплоть до $9,8$ Гн/м².

Результаты компьютерного моделирования, представленные в таблицах 1 и 2, подтверждают решение поставленной в заявке задачи: при изменении толщины дополнительной тонкой пленки 5 от 50 нм до 350 нм заявляемая индуктивность изменяется в диапазоне от 100 до 14 нГн, что значительно лучше (в 5-50 раз) максимальной индуктивности одновитковых известных конструкций, достигаемых в одном слое [34].

Учитывая формулу (1), заметим, что фактическая индуктивность L системы «виток 1 (токовое кольцо) - дополнительная тонкая пленка 5» фиг. 4 будет несколько больше рассчитанного в табл. 1. Это объясняется тем, что к вносимой индуктивности L_{ϕ} дополнительной тонкой пленки 5 (L_{π}) обязательно добавится индуктивность витка 1 (токового кольца) (L_K), которое для геометрических размеров порядка 50 мкм не превышает значения 1 нГн вплоть до значений частоты порядка 1 ГГц.

Таким образом, предлагаемая конструкция интегральной индуктивности имеет существенные преимущества в сравнении с известными техническими решениями. За счет обнаруженных наноэффектов она позволяет реализовать в 5÷50 раз более высокие

значения индуктивности, но только при строго определенных значениях толщин $h_2 < h_1$. С другой стороны, выбор материала, из которого создается дополнительная тонкая пленка 5, позволяет «сдвигать» в заданный частотный диапазон рабочий диапазон частот заявляемой индуктивности.

5 Источники информации

1. Патент CN 101707478 B, fig. 3a, fig. 4a.
2. Mohan, S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductors / S.S. Mohan, M.d.M. Hershensen, S.P. Boyd, T.H. Lee // IEEE J. Solid-State Circuits, Oct. 1999. - Vol.34. - Pp. 1419-1424 DOI: 10.1109/4.792620. fig. Id.
- 10 3. Rejaei, B. A predictive model for Si-based circular spiral inductors / B. Rejaei, J. L. Tauritz, P. Snoeij. // Proc. Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 1998. - Pp.148-154 DOI: 10.U09/SMIC.1998.750210. fig. 1.
4. Патент US 5760456, fig. 1.
5. Kyranas A., Papananos Y. Passive On-Chip Components for Fully Integrated Silicon RF
- 15 VCOs / A. Kyranas, Y. Papananos // Active and Passive Electronic Components. 2002. - Vol.25. - Iss. 1. - Pp.83-95 DOI: 10.1080/08827510211281. fig. 2.
6. Патент US 7512389, fig. 1.
7. Mohan, S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductors / S.S. Mohan, M.d.M. Hershensen, S.P. Boyd, T. H. Lee // IEEE J. Solid-State Circuits, Oct. 1999. - Vol.34. - Pp.1419-
- 20 1424 DOI: 10.1109/4.792620. fig. 1a.
8. Патент US 5892425, fig. 1.
9. Cao, Y. Frequency-independent equivalent circuit model for on-chip spiral inductors / Y. Cao, R. A. Groves, X. Huang, N. D. Zamdmer, J.-O. Plouchart, R. A. Wachnik, T.-J. King, C. Hu // IEEE J. Solid-State Circuits, Mar. 2003. - Vol.38. - Pp.419-426 DOI: 10.1109/JSSC.2002.808285.
- 25 fig. 1a, fig. 2a.
10. Kuhn, W.B. Analysis of Current Crowding Effects in Multiturn / W.B. Kuhn, N.M. Ibrahim, // IEEE Microwave Theory and Techniques, 2001. - Vol.49. Is. 1. - Pp. 31-38, DOI: 10.1109/22.899959. fig. 3.
11. Патент US 6201287 B1, fig. 10.
- 30 12. Патентная заявка US 2001/0045616 A1, fig. 2.
13. Патент US 5559360, fig. 2.
14. Патент US 5635892, fig. 1b.
15. Патентная заявка US 2008/0174398, fig. 1.
16. Патентная заявка US 2009/0261444 A1, fig. 1a.
- 35 17. Патентная заявка US 2008/0048760, fig. 1.
18. Kyranas A., Papananos Y. Passive On-Chip Components for Fully Integrated Silicon RF VCOs / A. Kyranas, Y. Papananos // Active and Passive Electronic Components. 2002. - Vol.25. - Iss. 1. - Pp. 83-95 DOI: 10.1080/08827510211281, fig. 2.
19. Патентная заявка US 2003/0230675 A1, fig. 2.
- 40 20. Delatte, P. A low-power 5 GHz CMOS LC-VCO optimized for high resistivity SOI substrates / P. Delatte, G. Picun, L. Demeus, P. Simon, and D. Flandre. // in Proc. Eur. Solid-State Circuit Conf., Grenoble, France, 2005. - Pp. 395-398. DOI: 10.1109/ESSCIR.2005.1541643, fig. 3b.
21. Mohan, S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductors / S.S. Mohan, M.d.M. Hershensen, S.P. Boyd, T. H. Lee // IEEE J. Solid-State Circuits, Oct. 1999. - Vol.34. - Pp. 1419-
- 45 1424 DOI: 10.1109/4.792620, fig. 1c.
22. Crois, J. An analytical model of planar inductors on lowly doped silicon substrates for analog design up to 3 GHz / J. Crois, P. Kinget, J. Craninckx, and M. Steyeart, // Symp. VLSI Circuits Dig. Tech. Papers, 1996. - Pp.28-29 DOI: 10.1109/VLSIC. 1996.507703, fig. 1b.

23. Патентная заявка US 2010/0117737 A1, fig. 6.

24. Патентная заявка US 2009/0261452 A1, fig. 1.

25. W. Fong, N. H. Design of wide-band CMOS VCO for multiband wireless LAN applications / N. H. W. Fong, J.-O. Plouchart, N. Zamdmer, D. Liu, L. Wagner, C. Plett, and N. G. Tarr. // IEEE J. Solid-State Circuits, Aug. 2003. - Vol.38. - No. 8. - Pp.1333-1342 DOI: 10.1109/JSSC.2003.814440. fig. 1a.

26. Патент US 7310039, fig. 1.

27. Greenhouse, H.M. Design of planar rectangular microelectronic inductors // IEEE Trans. PHP, 1974. - Vol.10. - Pp.101-109 DOI: 10.1109/TPHP. 1974.1134841, fig. 5.

28. Tang, C.-C. Miniature 3D inductors in standard CMOS process / C.-C. Tang, C.-H. Wu, and S.-I. Liu, // IEEE J. Solid-State Circuits, Apr. 2002. - Vol.37. - No. 4. - Pp. 471-4180 DOI: 10.1109/4.991385, fig. 3 (фрагмент M4).

29. Патент US 7259625 B2, fig. 2.

30. Патент US 5313662, fig. 3.

31. Патент US 6310387, fig. 1b.

32. Патентная заявка US 2004/0103522 A1, fig. 1a.

33. Патентная заявка US 2005/0140447 A1, fig. 1.

34. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. Под ред. канд. техн. наук В.И. Эннса. М.: Горячая линия - Телеком. 2005, с. 455.

35. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1978 г.

36. Widjaja A. and Sarangan A. Method for Fabrication Thin Film Structures with Negative Inductance. Case #: UD-488. US-Patent Pending; Publication # 20090261936. Inventor: Agus-Widjaja, et al.

37. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г., Сапунцов Н.Е., Нестюрина Е.Е. Индуктивность сплошного проводящего цилиндра с азимутальной плотностью вихревого тока в низкочастотной области. Фундаментальные исследования. №11 (часть 3), 2013. С. 441-446.

38. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И., Манжула В.Г., Будяков А.С. Индуктивные свойства микроскопического проводящего кольца с плотностью вихревого тока азимутального направления. Нано- и микросистемная техника. 2014, №1. С. 22-26.

39. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Сапунцов Н.Е. Индуктивность цилиндрической пленки с азимутальной плотностью вихревого тока. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т.П. Саратов, Россия, 25-26 сентября 2014 г. С. 358-365.

40. Vladimir G. Sapogin, Nikolay N. Prokopenko and Ludmila K. Sapogina. Solution of Solitary Current Inductor's "Cutoff Frequency Problem" for EHF Applications. The International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS-2015). David Intercontinental Hotel, 2-4 november 2015, Tel Aviv, Israel. 978-1-4799-7473-3/15/\$31.00 ©2015 IEEE. 107774.pdf.

(57) Формула изобретения

1. Планарная индуктивность, содержащая как минимум один виток (1) из металлической пленки толщиной h_1 , расположенный на изолирующей подложке (2), первый (3) и второй (4) выводы интегральной индуктивности для ее включения в электронную схему, отличающаяся тем, что во внутреннюю область витка (1) из

металлической пленки толщиной h_1 введена дополнительная тонкая пленка (5) толщиной $h_2 < h_1$ из материала, обладающего заданной электропроводностью и не имеющего электрического контакта с витком (1) планарной индуктивности.

2. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности меди.

3. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности алюминия.

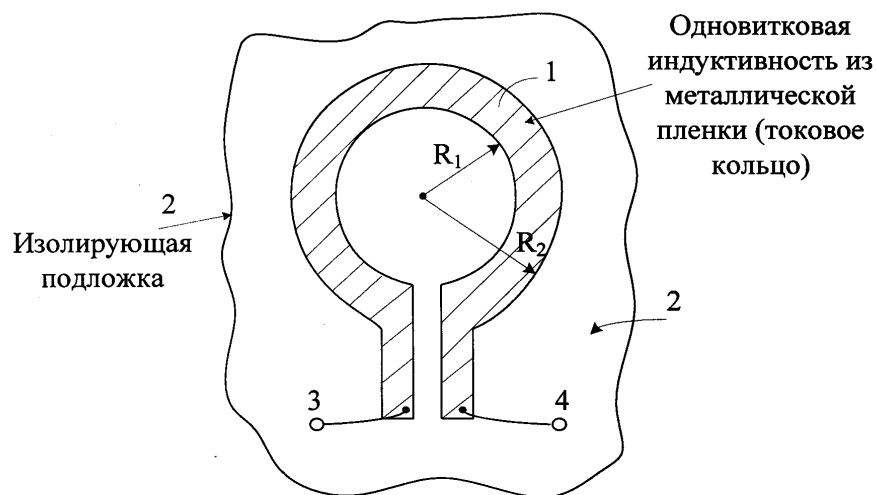
4. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности вольфрама.

5. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности никеля.

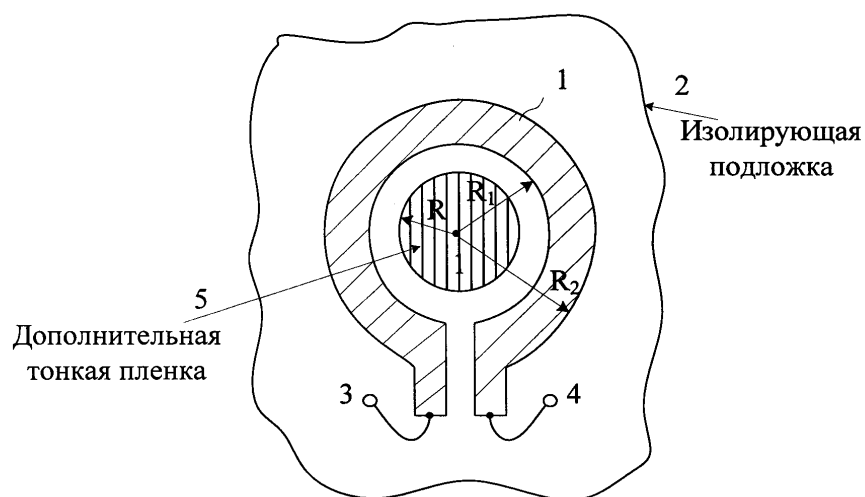
6. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности нихрома.

7. Планарная индуктивность по п. 1, отличающаяся тем, что заданная электропроводность материала дополнительной тонкой пленки 5 соответствует электропроводности электронного кремния.

ПЛАНАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ



Фиг. 1

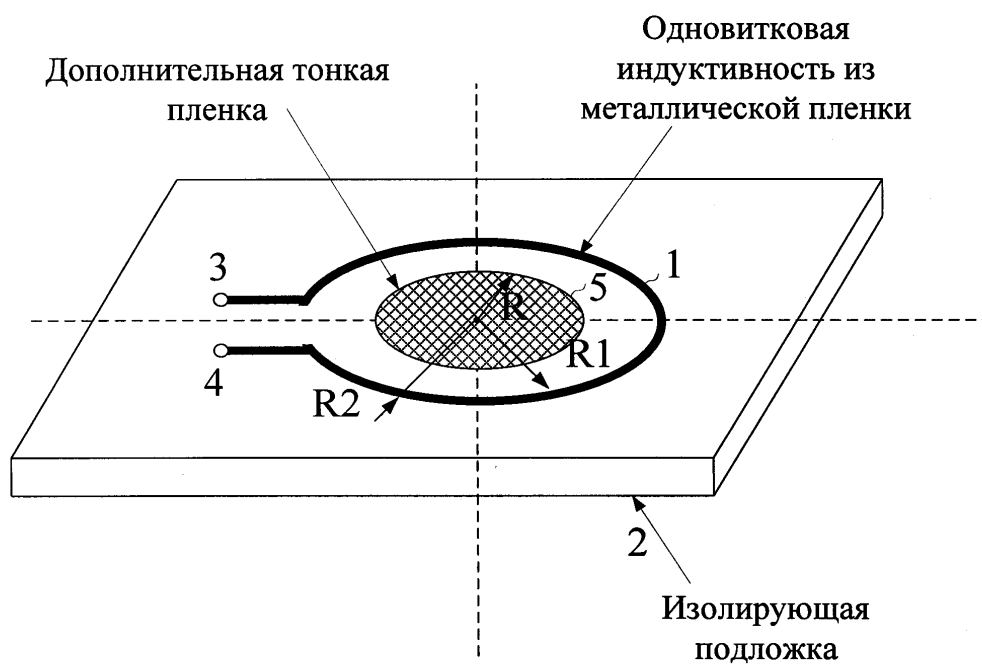


Фиг. 2

Авторы:

Сапогин В.Г.
Прокопенко Н.Н.
Иванов Ю.И.

ПЛАНАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ

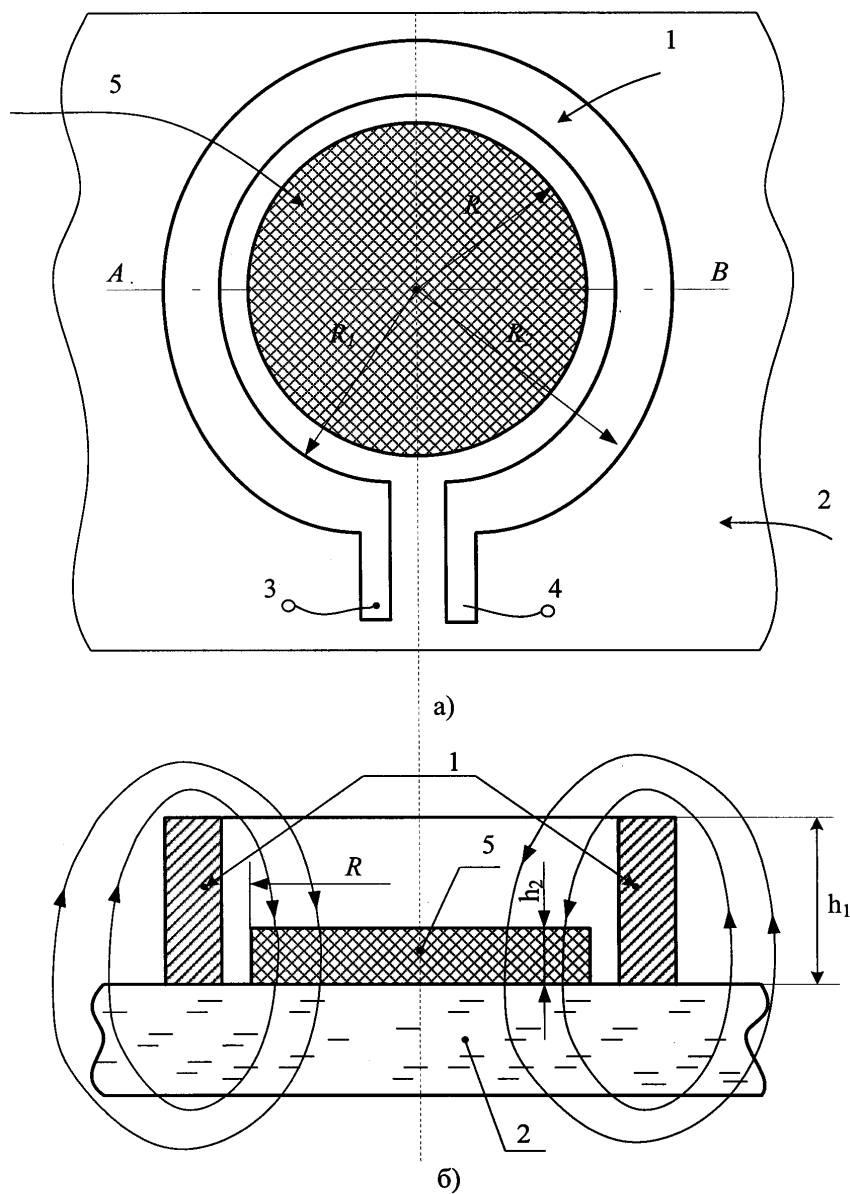


Фиг. 3

Авторы:

Сапогин В.Г.
Прокопенко Н.Н.
Иванов Ю.И.

ПЛАНАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ

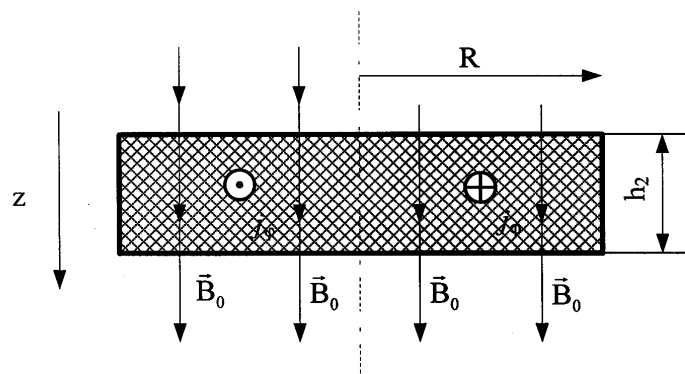


Фиг. 4

Авторы:

Сапогин В.Г.
Прокопенко Н.Н.
Иванов Ю.И.

ПЛАНАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ



Фиг. 5

Авторы:

Сапогин В.Г.
Прокопенко Н.Н.
Иванов Ю.И.