



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015100502, 12.01.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.01.2015Дата регистрации:
21.07.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.01.2015

(43) Дата публикации заявки: 27.07.2016 Бюл. № 21

(45) Опубликовано: 21.07.2017 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

630087, г. Новосибирск, ул. Тульская, 90, кв. 247,
Евтушенко Николай Валерьевич

(72) Автор(ы):

Беляев Борис Афанасьевич (RU),
Злыгостев Игорь Николаевич (RU),
Лексиков Александр Александрович (RU),
Лемберг Константин Вячеславович (RU),
Сержантов Алексей Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

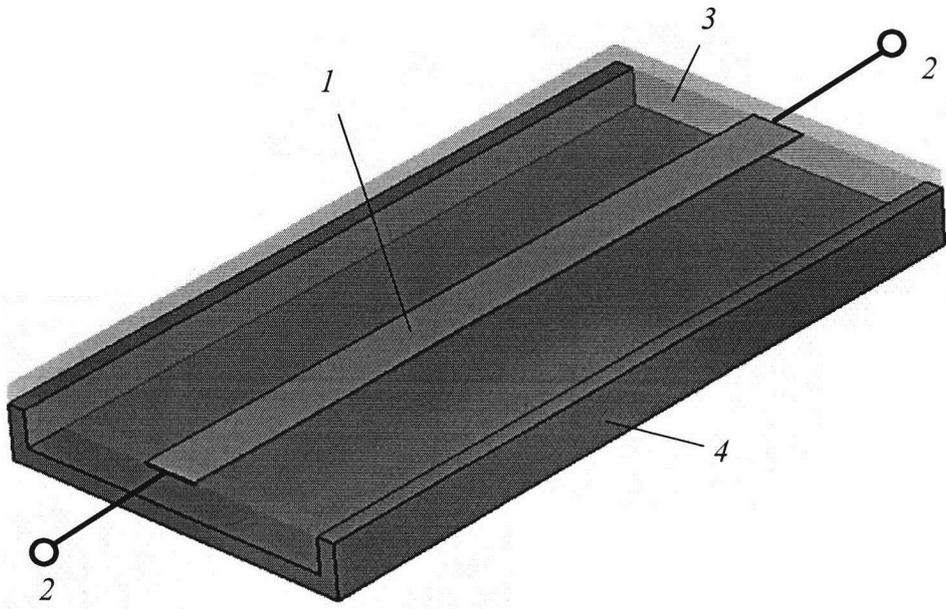
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт нефтегазовой
геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО
РАН) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 5355104 А, 11.10.1994. RU
2339127 С2, 20.11.2008. RU 2257648 С1,
27.07.2005. US 5600325 А, 04.02.1997.

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

(57) Реферат:

Способ измерения напряженности электрического поля относится к измерительной технике и может использоваться для исследования электрических полей земной атмосферы и космического пространства. Способ измерения напряженности электрического поля, основанный на том, что в датчике напряженности электрического поля, содержащем управляемый диэлектрик (с изменяемой под действием электрического поля диэлектрической проницаемостью), регистрация напряженности электрического поля производится посредством измерения сдвига фазы сигнала в полосковой линии передачи, на основе которой выполнен датчик. С целью уменьшения размеров датчика он может быть выполнен на основе резонансного

отрезка линии передачи, т.е. полоскового резонатора. Для расширения динамического диапазона возможна реализация датчика на основе системы взаимодействующих полосковых резонаторов, которая, по сути, представляет собой полосно-пропускающий фильтр, у которого под действием внешнего электрического поля перестраивается центральная частота и смещается фазочастотная характеристика. Благодаря этому на частотах полосы пропускания происходит сдвиг фазы сигнала, по величине которого определяется напряженность электрического поля. Техническим результатом, реализуемым при использовании заявляемого способа, является повышение чувствительности и уменьшение размеров. 3 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 1

RU 2626065 C2

RU 2626065 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015100502, 12.01.2015**(24) Effective date for property rights:
12.01.2015Registration date:
21.07.2017

Priority:

(22) Date of filing: **12.01.2015**(43) Application published: **27.07.2016** Bull. № 21(45) Date of publication: **21.07.2017** Bull. № 21

Mail address:

**630087, g. Novosibirsk, ul. Tul'skaya, 90, kv. 247,
Evtushenko Nikolaj Valerevich**

(72) Inventor(s):

**Belyaev Boris Afanasevich (RU),
Zlygostev Igor Nikolaevich (RU),
Leksikov Aleksandr Aleksandrovich (RU),
Lemberg Konstantin Vyacheslavovich (RU),
Serzhantov Aleksej Mikhajlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe
uchrezhdenie nauki Institut neftegazovoj
geologii i geofiziki im. A.A. Trofimuka
Sibirskogo otdeleniya RAN (INGG SO RAN)
(RU)**(54) **METHOD OF MEASURING INTENSITY OF ELECTRIC FIELD**

(57) Abstract:

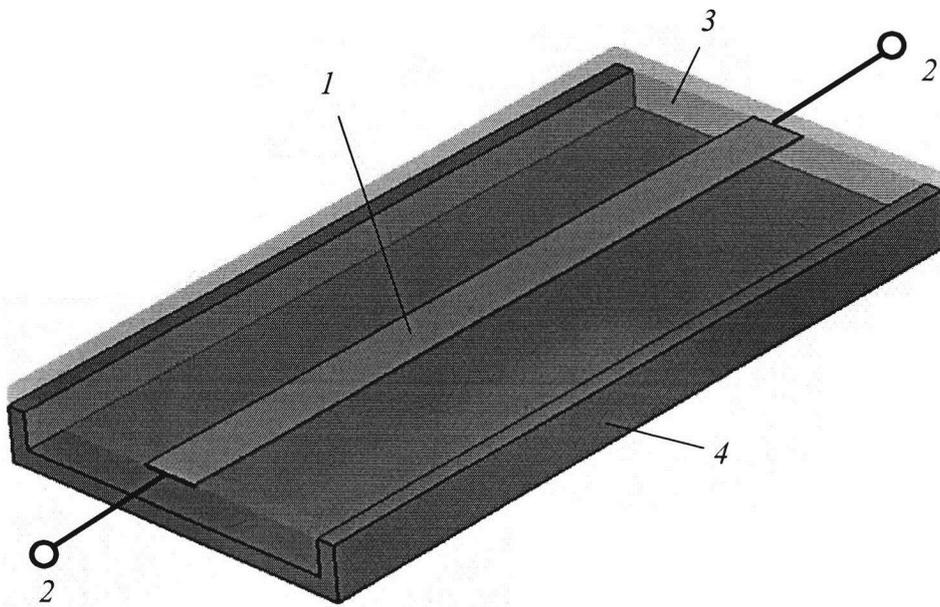
FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: method of measuring electric field intensity relates to measurement equipment and can be used for research of electric fields of the Earth's atmosphere and outer space. Method of measuring electric field intensity based on that electric field intensity sensor with controlled dielectric (with variable dielectric permeability under effect of electric field) performs detection of electric field intensity by measuring phase shift of signal in strip transmission line, on basis of which sensor is made. In order to reduce size of sensor it can be made on basis of resonant

section of transmission line, i.e. stripline resonator. To expand dynamic range of possible implementation of sensor based on system of interacting stripline resonators, which in fact represents bandpass filter with adjusting central frequency shifting phase-frequency characteristic under effect of external electric field. Due to this at frequencies of pass band signal phase shift occurs, value of which is determined by electric field intensity.

EFFECT: increased sensitivity and reduced dimensions.

4 cl, 5 dwg



Фиг. 1

RU 2626065 C2

RU 2626065 C2

Способ измерения напряженности электрического поля относится к измерительной технике и может использоваться для исследования электрических полей земной атмосферы и космического пространства.

Известен способ измерения напряженности электрического поля, основанный на использовании сегнетоэлектрика, помещенного в исследуемое поле [М.И. Иванов. Способ измерения напряженности электрического поля / АС №140495, опубл. 1961 г. бюлл. №16]. Значение электрического поля определяют по изменению степени поглощения в сегнетоэлектрике ультразвуковых колебаний, возбуждаемых с помощью установленного на нем излучателя колебаний и приемника этих колебаний.

Осуществление описываемого способа, согласно изобретению, обеспечивает в ряде случаев повышение точности измерения.

Известен также способ измерения напряженности постоянного электрического поля, состоящий в том, что в исследуемое поле помещают сегнетоконденсатор, диэлектрическую проницаемость материала которого изменяют вспомогательным переменным полем [Ю.П. Здание, А.А. Бальчитис, В.Ю. Лазаускас, И.К. Петрушкявичус. Устройство для измерения напряженности электрического поля / АС №203781, опубл. 9.10.1967 г., бюлл. №21]. В результате этого воздействия в объеме сегнетоконденсатора возникает ток смещения, по которому судят о напряженности внешнего (измеряемого) электрического поля.

Известно, что на основе диэлектрика и пары полосковых проводников можно осуществить «полосковый резонатор», используемый в технике СВЧ. Способ вычисления добротности полоскового резонатора и других характеристик устройства изложен в патенте RU 2352032 "Полосковый резонатор», заявка от 31.10.2007, изобретатели Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М., опубл. 10.04.2009. Полосковый резонатор работает следующим образом. На резонансных частотах конструкции, когда на длине каждого полоскового проводника укладывается, например, половина длины волны электромагнитного колебания, оба проводника в резонаторе имеют одинаковое распределение высокочастотных токов и напряжений по их длине, т.е. ток в резонаторе делится на два проводника. Это уменьшает потери и повышает добротность.

Основным недостатком описанных способов измерения напряженности электрического поля является малая чувствительность и большие размеры датчика, что вносит погрешность в измерение поля.

Техническим результатом, реализуемым при использовании заявляемого способа, является повышение чувствительности и снижение размеров датчика.

Указанный технический результат достигается тем, что в датчике напряженности электрического поля, содержащем диэлектрик с изменяемой под действием электрического поля диэлектрической проницаемостью, далее - управляемый диэлектрик ("voltage-controllable dielectric"), новым является то, что регистрация напряженности электрического поля производится посредством измерения сдвига фазы электромагнитной волны, распространяющейся в полосковой линии передачи, на основе которой выполнен датчик. Здесь под сдвигом фазы сигнала имеется в виду время задержки квазимнохроматического волнового пакета, что связано с методикой измерения сдвига фазы.

Отличия заявляемого способа от наиболее близкого аналога заключаются в том, что регистрация напряженности электрического поля производится посредством измерения сдвига фазы сигнала в полосковой линии передачи, содержащей управляемый диэлектрик. Это отличие позволяет сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна». Признаки, отличающие заявляемое

техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях при изучении данной и смежной областей техники и, следовательно, обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

Изобретение поясняется нижеследующими чертежами:

5 Фиг. 1 - конструкция датчика напряженности электрического поля на основе полосковой линии, содержащей управляемый диэлектрик;

Фиг. 2 - конструкция датчика напряженности электрического поля на основе полоскового резонатора, содержащего управляемый диэлектрик;

10 Фиг. 3 - амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики полосно-пропускающего фильтра при двух значениях диэлектрической проницаемости подложки;

Фиг. 4 - конструкция конкретной реализации датчика на основе связанных полосковых резонаторов;

15 Фиг. 5 - рассчитанная зависимость сдвига фазы сигнала на выходе полоскового полосно-пропускающего фильтра с жидкокристаллическим заполнением от напряженности внешнего электрического поля.

Общеизвестно, что для согласованного с источником и приемником сигнала отрезка полосковой линии (ПЛ) передачи длиной l набег фазы прошедшего сигнала равен его электрической длине

$$20 \quad \varphi = \frac{2\pi l \sqrt{\epsilon}}{\lambda}, \quad (1)$$

25 где λ - длина волны высокочастотного сигнала в вакууме, ϵ - эффективная диэлектрическая проницаемость диэлектрика ПЛ, зависящая от напряженности внешнего электрического поля. В этом случае

$$30 \quad \frac{d\varphi}{d\epsilon} \approx \frac{\pi l}{\lambda \sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что если изолятор ПЛ содержит управляемый диэлектрик, то регистрацию напряженности внешнего электрического поля можно осуществлять, 35 измеряя сдвиг фазы электромагнитной волны в ПЛ.

На Фиг. 1 представлена простейшая конструкция датчика напряженности электрического поля на основе заявляемого способа. Устройство содержит согласованную по волновому сопротивлению с источником (не показан) и приемником 35 сигнала (не показан) полосковую линию передачи, подключенную к входному и выходному портам 2. Полосковая линия (далее также - ПЛ) образована полосковым проводником 1, проводящим основанием 4, и диэлектрической подложки (изолятор) 3, состоящей из материала, диэлектрическая проницаемость которого зависит от приложенного электрического поля. Нижняя сторона подложки металлизирована и 40 вместе с корпусом образует заземляемое основание 4.

Датчик на основе заявляемого способа работает следующим образом. Под действием измеряемого электрического поля меняется эффективная диэлектрическая проницаемость 45 изолятора ПЛ. При этом происходит изменение скорости распространения электромагнитной волны в ней, что приводит к дополнительному сдвигу ее фазы на выходе ПЛ, измеряя который можно определить величину электрического поля. Важным преимуществом такого способа измерения является то, что его чувствительность можно увеличивать, увеличивая длину ПЛ, так как при этом растет величина сдвига фазы сигнала, которая пропорциональна этой длине (2).

Размеры датчика можно существенно уменьшить, если использовать резонансный

на рабочей частоте отрезок линии передачи, т.е. полосковый резонатор.

Методы расчета параметров полоскового резонатора доступны в патенте RU 2352031.

Рассмотрим управляемый сдвиг фазы отрезка полосковой линии передачи длиной l в условиях резонанса. Известно [Г.С. Горелик, Колебания и волны, Государственное
5 Издательство физико-математической литературы, М.: 1959, с. 102], что частотная зависимость фазы в резонансе определяется формулой

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega/\omega_0}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \right), \quad (3)$$

10 где Q - добротность резонанса, ω_0 - резонансная частота. Выразив резонансную частоту через длину отрезка ПЛ - l , скорость света в вакууме - c , и эффективную диэлектрическую ϵ : $\omega_0 = \pi c/l\sqrt{\epsilon}$, несложно найти величину управляемого сдвига фазы, вызванного сдвигом частоты резонатора за счет изменения электрического поля, путем
15 дифференцирования формулы (3)

$$d\varphi = \frac{Q\omega}{2\epsilon\omega_0} \cdot \frac{1 + (\omega/\omega_0)^2}{Q^2 [1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + (\omega/\omega_0)^2} d\epsilon. \quad (4)$$

20 Поскольку вблизи резонанса $\omega \approx \omega_0$, то для резонатора

$$\frac{d\varphi}{d\epsilon} \approx \frac{Q}{\epsilon}. \quad (5)$$

Для согласованной линии передачи при тех же условиях

$$25 \frac{d\varphi}{d\epsilon} \approx \frac{\pi}{2\epsilon}. \quad (6)$$

Таким образом, из формул (5) и (6) видно, что управляемый внешним электрическим полем сдвиг фазы, т.е. чувствительность датчика, в «резонансном» устройстве примерно
30 в Q раз больше, чем в согласованной линии, либо при одинаковой чувствительности «резонансное» устройство может быть выполнено в Q раз миниатюрнее. При этом важно отметить, что в реальном устройстве величина Q - это нагруженная добротность резонатора.

На Фиг. 2 представлена конструкция датчика электрического поля на основе
35 полоскового резонатора. Устройство содержит отрезок полосковой линии передачи (полосковый проводник) 1, резонансной длины на рабочей частоте (в данном случае - полосковый резонатор, образованный полосковым проводником 1, диэлектрической подложкой (изолятором) 3 и проводящим основанием 4), который подключен к входу и выходу через емкости связи 5, величиной которых определяется его нагруженная
40 добротность. Резонатор подключен к входному и выходному портам 2 и выполнен на диэлектрической подложке (изоляторе) 3, состоящей из управляемого диэлектрика.

В качестве управляемого диэлектрика могут быть выбраны сегнетоэлектрики, жидкие кристаллы и другие материалы, известные из уровня техники.

Под действием измеряемого электрического поля происходит изменение
45 диэлектрической проницаемости материала, что сопровождается изменением резонансной частоты резонатора и сдвигом фазочастотной характеристики. Очевидно, что сигнал на частоте f_0 претерпевает при этом некоторый сдвиг фазы, величина которого будет зависеть от напряженности приложенного электрического поля.

Таким образом, при одинаковой чувствительности «резонансный» датчик будет

иметь существенно меньшие размеры. Однако, несмотря на высокую чувствительность и миниатюрность, динамический диапазон такого устройства остается небольшим, что связано с узкой шириной полосы рабочих частот одиночного резонатора, которая определяется его добротностью.

5 Для расширения динамического диапазона можно использовать систему взаимодействующих полосковых резонаторов, которая, по сути, представляет собой полосно-пропускающий фильтр, частота которого перестраивается внешним электрическим полем. Устройство на основе заявляемого способа работает следующим образом. На Фиг. 3 сплошной линией приведены типичные АЧХ (L) и ФЧХ (φ) фильтра, а штрихованной линией - они же при отстройке центральной частоты на некоторую величину, не превышающую ширину полосы пропускания. Видно, что в некоторой полосе частот АЧХ остается равномерной, а ФЧХ в достаточной степени линейной, при этом на каждой частоте из этого интервала происходит фазовый сдвиг Δφ.

10 Определим, как зависит сдвиг фазы Δφ подобного устройства от перестройки его центральной частоты на величину δf. Найдем сдвиг фазы Δφ сигнала, проходящего резонансную цепь на частоте ω, при изменении резонансной частоты последней от ω₀₁=ω-δω до ω₀₂=ω+δω, когда δω≪ω. Введем обозначение Δω/ω=δ, тогда на основании формулы (3)

$$20 \quad \Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{Q} \frac{(1+\delta)}{\delta(\delta+2)} - \operatorname{arctg} \frac{1}{Q} \frac{(1-\delta)}{\delta(\delta-2)}. \quad (7)$$

Преобразовав разность арктангенсов, получим

$$25 \quad \Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q\delta(2\delta^2 - 4)}{1 - \delta^2 + \delta^2 Q^2 (\delta^2 - 4)}. \quad (8)$$

Так как δ≪1, то с высокой степенью точности

$$30 \quad \Delta\varphi = \operatorname{arctg}(-4Q\delta). \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что сдвиг фазы в системе взаимодействующих полосковых резонаторов в устройстве тем больше, чем выше добротность резонанса и чем значительней сдвиг центральной частоты полосы пропускания, при этом, однако, следует иметь в виду, что в реальном устройстве Q - это нагруженная добротность. Очевидно, что сдвиг фазы пропорционален числу резонаторов в устройстве, т.е. для системы, состоящей из N резонаторов

$$35 \quad \Delta\varphi = N \times \operatorname{arctg}(-4Q\delta). \quad (10)$$

Таким образом, очевидно, что, увеличивая ширину полосы пропускания, можно расширять динамический диапазон такого датчика при сохранении высокой чувствительности.

40 Датчик на основе заявляемого способа работает следующим образом. В датчике, выполненном на основе системы взаимодействующих полосковых резонаторов, в которых в качестве диэлектрика выбран управляемый полем диэлектрик, под действием внешнего электрического поля происходит сдвиг центральной частоты полосы пропускания фильтра, а вместе с тем и ФЧХ (Фиг. 3). Измеряя сдвиг фазы на выбранной частоте, например, f₀, можно определить величину напряженности внешнего электрического поля по сдвигу фазы. Очевидно, что чем шире полоса пропускания устройства, тем большим будет динамический диапазон измерения напряженности

электрического поля.

Выбор материала управляемого диэлектрика определяется потерями энергии в диэлектрике, добротностью системы и вариативностью диэлектрической постоянной.

В примере, приведенном далее, выбран жидкий кристалл (ЖК) с анизотропией диэлектрической проницаемости, совпадающей по направлению с вектором электрического поля.

В технологии создания элементов для СВЧ электроники (фазовращатели и фильтры) известно использование ферроэлектрических тонких пленок с сильной зависимостью ϵ от E . В работе [Z. Yuan, Y. Lin, J. Weaver, X. Chen, C.L. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, 152901 (2005)] продемонстрировано 80% изменение диэлектрической константы в интервале приложенного поля от 0 до 8 В/мкм. Материалом выступает Mn:BSTO (BSTO обозначение на керамического ферроэлектрика $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$). В работе [J. Park, J. Lu, S. Stemmer, R.A. York, *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, 084110 (2005)] показана сильная зависимость диэлектрической константы от напряженности электрического поля для ферроэлектрика $(Ba,Sr)TiO_3$ (BST) в широком диапазоне частот.

Как ясно из раскрытого изобретения, пленки ферроэлектрика могут быть применены в качестве управляемого диэлектрика.

На Фиг. 4 приведен пример конкретной реализации датчика электрического поля на основе заявляемого способа. В таком устройстве роль управляемого диэлектрика (диэлектрическая подложка (изолятор) 3) выполняет слой жидкого кристалла (далее также - ЖК). Благодаря наличию анизотропии диэлектрической проницаемости у ЖК, компоненты тензора которой зависят от ориентации директора, в такой конструкции появляется возможность управления диэлектрической проницаемостью внешним электрическим полем.

В основе датчика лежит структура полоскового фильтра, состоящего из пяти взаимодействующих полосковых резонаторов.

Вход и выход устройства подключается через порты 2 к внешним линиям передачи с волновым сопротивлением 50 Ом через полосковые проводники (резонаторы) 6, имеющие распределенную электромагнитную связь с резонаторами, образованными полосковыми проводниками 1. Диэлектрическая подложка (изолятор) 3 находится в зазоре, образованном заземляемым основанием 4 и тонкой кварцевой подложкой 7, на внутренней поверхности которой сформированы регулярные полосковые проводники электромагнитно связанных резонаторов 6.

При правильном выборе длин и связей резонаторов датчика, можно сформировать у датчика равномерную полосу пропускания, центрированную на резонансной частоте. Когда внешнее электрическое поле, ортогональное плоскости подложки, равно нулю, взаимодействие со «стенками» ориентирует директор ЖК в плоскости его слоя. В этом случае диэлектрическая проницаемость ЖК минимальна по отношению к поляризации СВЧ электрического поля в микрополосковом резонаторе. При ненулевом внешнем электрическом поле непосредственно под полосковым проводником 1 индуцируется электрическое поле, поворачивающее директор ЖК к направлению силовых линий СВЧ электрического поля резонаторов, в результате чего величина ϵ увеличивается, достигая максимума, когда директор устанавливается перпендикулярно слою ЖК.

В программе электродинамического моделирования был произведен расчет конструкции датчика на основе заявляемого способа. Датчик имел следующие конструктивные параметры. Число идентичных резонаторов N-S, ширина полосковых проводников резонаторов 1.2 мм, их длина 15.5 мм, диапазон изменения диэлектрической проницаемости ЖК под действием внешнего электрического поля 2.8-3.1 (т.е.

анизотропия ЖК $\Delta\epsilon=0.3$), толщина слоя ЖК-диэлектрика равна 0.5 мм. Рабочая частота датчика составила 6 ГГц при максимальной величине управляемого фазового сдвига на этой частоте $\approx 720^\circ$. Для измерения разности фаз в таком широком диапазоне можно использовать амплитудно-модулированный сигнал, при этом грубое измерение величины сдвига фазы производится на низкой частоте модуляции сигнала, а точное - на рабочей частоте. Это позволяет расширить диапазон измерения фазового сдвига.

На Фиг. 5 представлена рассчитанная зависимость полученного фазового сдвига такого датчика (показан на Фиг. 4) в зависимости от напряженности приложенного электрического поля. В расчете использовались экспериментально измеренная зависимость диэлектрической проницаемости 6 используемого ЖК от напряженности приложенного электрического поля. Оценки показали, что при точности измерения фазы $\pm 0.05^\circ$ чувствительность датчика может достигать ≈ 3 В/м. Такая чувствительность существенно выше, чем у ближайших аналогов, причем ее можно повысить еще более, увеличивая количество резонаторов в датчике и используя жидкий кристалл с большей анизотропией. Используя мостовые измерители сдвига фазы, чувствительность датчика на основе заявляемого способа можно существенно улучшить.

Таким образом, предложенный способ измерения напряженности электрического поля позволяет создавать на его основе датчики, обладающие высокой чувствительностью и малым размерами.

(57) Формула изобретения

1. Способ измерения напряженности электрического поля, заключающийся в том, что в датчике напряженности электрического поля, содержащем управляемый диэлектрик, отличающийся тем, что регистрация напряженности электрического поля производится посредством измерения сдвига фазы электромагнитного сигнала, распространяющегося в полосковой линии передачи.

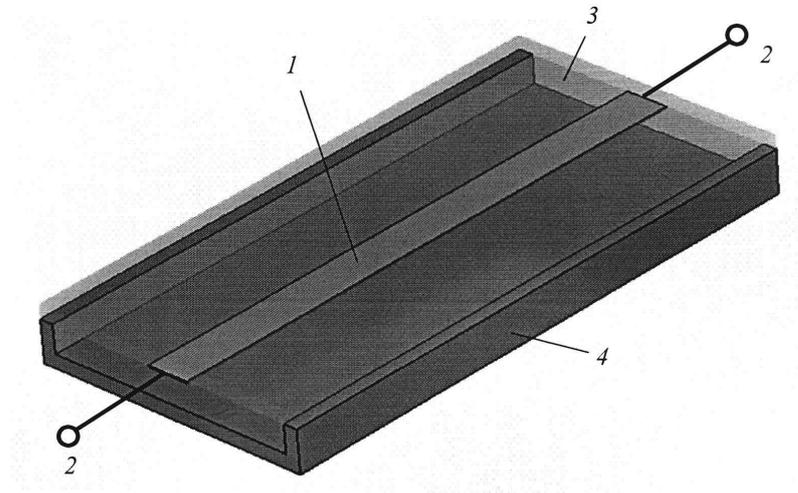
2. Способ измерения напряженности электрического поля по п. 1, отличающийся тем, что датчик выполнен на основе резонансного отрезка полосковой линии передачи.

3. Способ измерения напряженности электрического поля по п. 2, отличающийся тем, что датчик выполнен в виде системы связанных полосковых резонаторов.

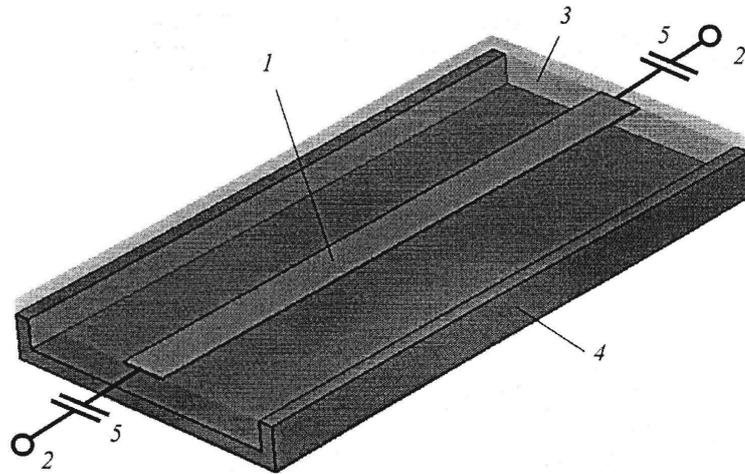
4. Способ измерения напряженности электрического поля по любому из пп. 1-3, отличающийся тем, что в качестве управляемого диэлектрика выбран жидкий кристалл с продольной компонентой диэлектрической проницаемости, зависящей от напряженности электрического поля.

1

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



Фиг. 1

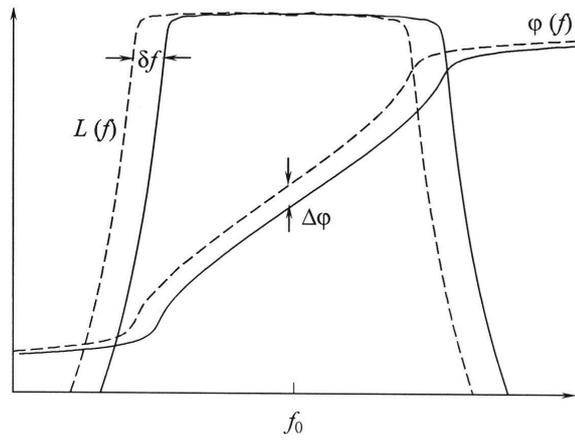


Фиг. 2

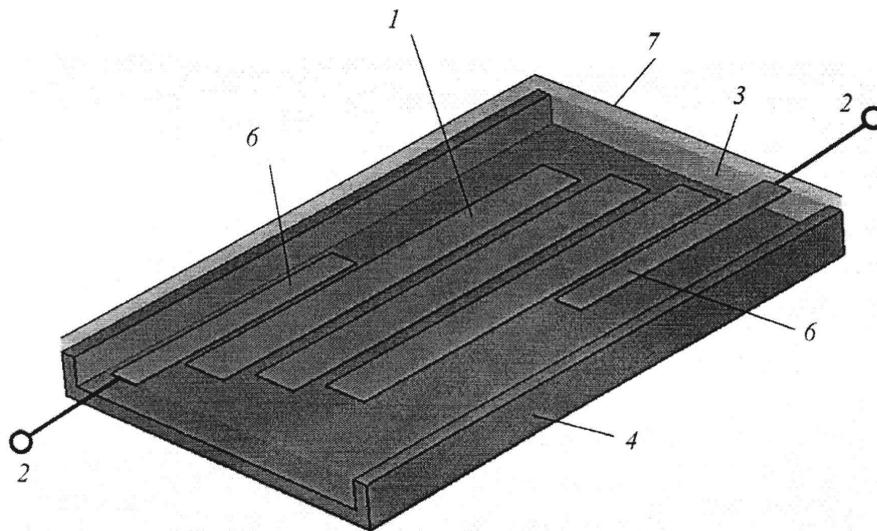
1

2

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

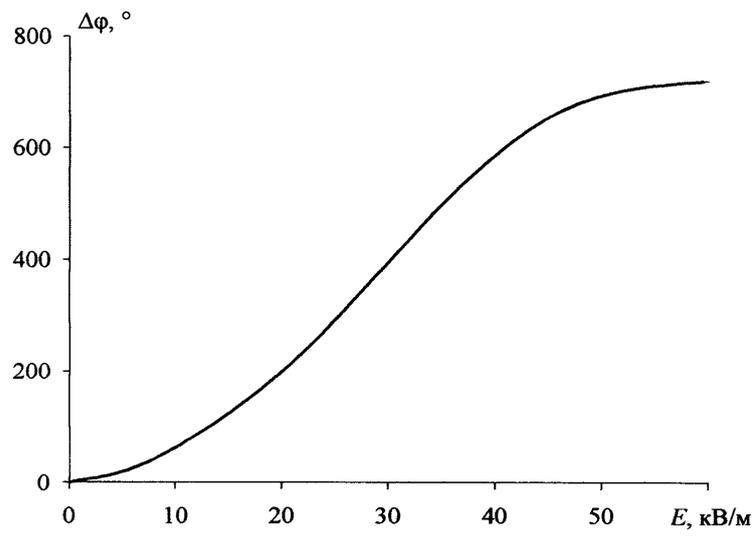


Фиг. 3



Фиг. 4

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



Фиг. 5