



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013133056/28, 16.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
16.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.07.2013

(45) Опубликовано: 20.12.2014 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2091808 C1, 27.09.1997. SU 905890 A1, 15.02.1982. Зажорин В. Г., Изотов А. В. Микрополосковый датчик магнитных полей, 05.01.2007 <http://malmon.ru/radioelektronika/svch/mikropoloskovyj-datchik-magnitnykh-polejj.html>. US 7560927 B2, 14.07.2009

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38, ИФ СО РАН, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Беляев Борис Афанасьевич (RU),  
Бабицкий Александр Николаевич (RU),  
Лексиков Александр Александрович (RU),  
Сержантов Алексей Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии  
наук (RU)

## (54) ДАТЧИК СЛАБЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

(57) Реферат:

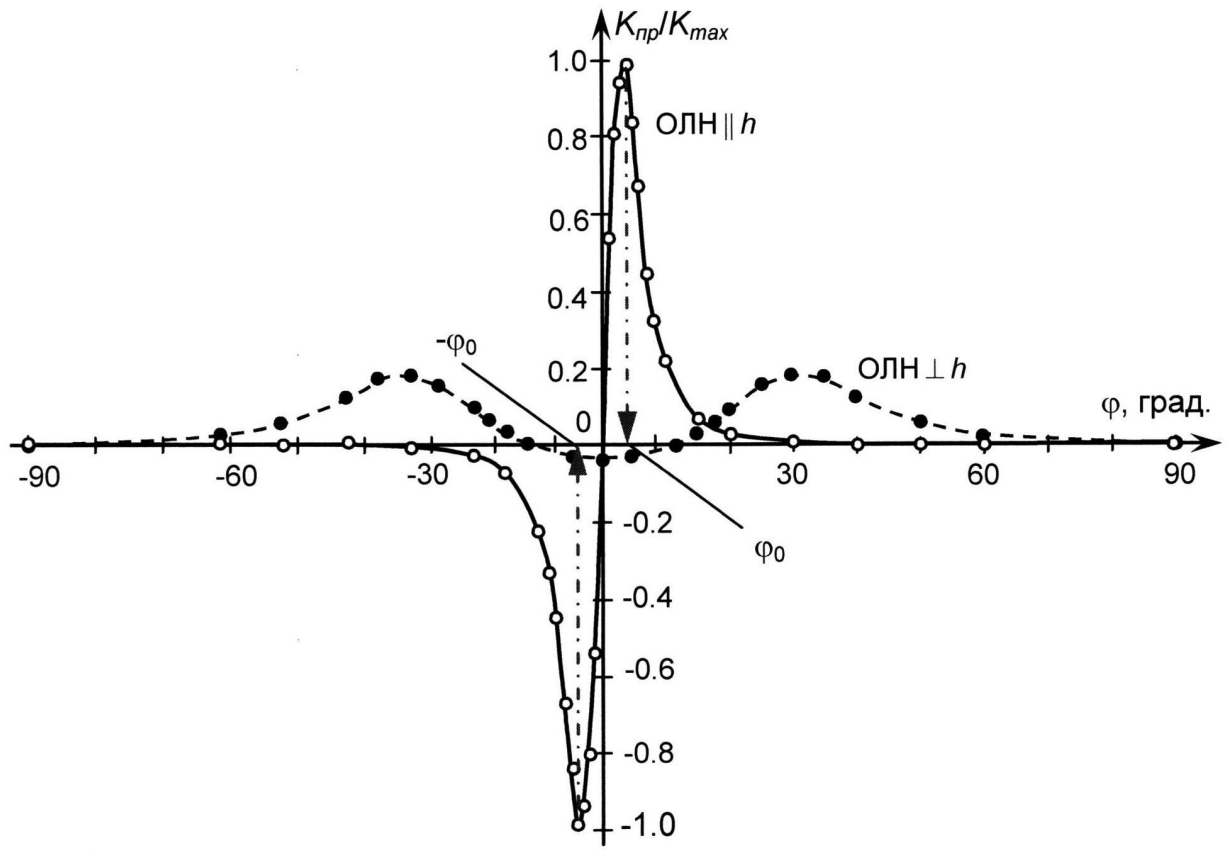
Изобретение относится к измерительной технике, представляет собой датчик слабых высокочастотных магнитных полей и может применяться в первую очередь в магнитометрии. Датчик содержит диэлектрическую подложку, на верхней стороне которой нанесены полосковые проводники двух микрополосковых резонаторов, а на нижней стороне осаждена магнитная пленка, покрытая металлическим слоем, выполняющим роль экрана. Проводники резонаторов расположены под оптимальным углом друг к другу, обеспечивающим максимальный коэффициент преобразования датчика и

определяемым по формуле  $\Phi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s}$ , где

$H_k$  - поле одноосной магнитной анизотропии тонкой магнитной пленки, а  $M_s$  - намагниченность насыщения пленки. Мощность СВЧ-генератора подается на оба резонатора одновременно, а выходной сигнал датчика формируется двумя сигналами, снимаемыми одновременно с этих двух резонаторов, при этом сигналы резонаторов суммируются, а шумы генератора компенсируются. Техническим результатом изобретения является повышение чувствительности датчика высокочастотных магнитных полей. 3 ил.

RU 2 536 083 C1

RU 2 536 083 C1



Фиг. 2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01R 33/05* (2006.01)  
*G01R 33/24* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013133056/28, 16.07.2013

(24) Effective date for property rights:  
16.07.2013

Priority:

(22) Date of filing: 16.07.2013

(45) Date of publication: 20.12.2014 Bull. № 35

Mail address:

660036, g.Krasnojarsk, Akademgorodok, 50, str. 38,  
IF SO RAN, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):

Beljaev Boris Afanas'evich (RU),  
Babitskij Aleksandr Nikolaevich (RU),  
Leksikov Aleksandr Aleksandrovich (RU),  
Serzhantov Aleksej Mikhajlovich (RU)

(73) Proprietor(s):

FEDERAL'NOE GOSUDARSTVENNOE  
BJuDZhETNOE UChREZhDENIE NAUKI  
INSTITUT FIZIKI im. L.V. Kirenskogo  
Sibirskogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk  
(RU)(54) **SENSOR OF WEAK HIGH-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS**

(57) Abstract:

FIELD: measurement equipment.

SUBSTANCE: invention relates to measurement equipment, represents a sensor of weak high-frequency magnetic fields and can be used mainly in magnetometry. A sensor includes a dielectric substrate, on the upper side of which strip conductors of microstrip resonators are applied, and on the lower side of which a magnetic strip is deposited, which is coated with a metal layer performing the role of a screen. Conductors of resonators are located at an optimum angle to each other, which provides maximum conversion factor of the sensor and is determined by the formula:

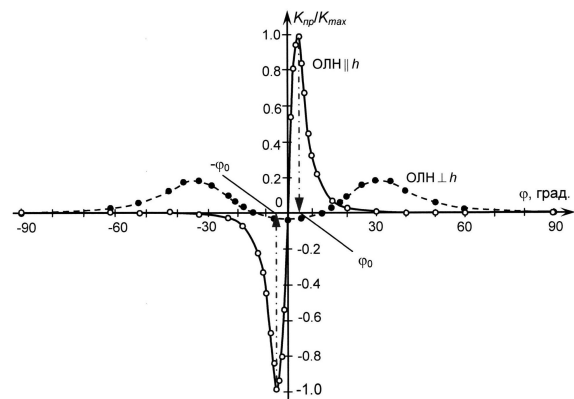
$$\varphi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s}, \text{ where } H_k - \text{field of single-axis}$$

magnetic anisotropy of a thin magnetic film, and  $M_s$  - film saturation magnetisation. Microwave generator power is supplied simultaneously to both resonators, and an output sensor signal is shaped with two signals

picked up simultaneously from those two resonators; besides, signals of resonators are added, and generator noises are compensated.

EFFECT: improving sensitivity of a sensor of high-frequency magnetic fields.

3 dwg



Фиг. 2

Изобретение относится к измерительной технике и, в первую очередь, к магнитометрии.

Известна конструкция магнитометра, содержащего генератор, к выходу которого подключены последовательно соединенные возбуждающие обмотки двух тонкопленочных датчиков с противоположно ориентированными осями легкого намагничивания [В.П. Короткий, А.М. Семенов, Ю.С. Капран. Магнитометр / АС №905890, опубл. 15.02.82 г., бюлл. №6]. В таком магнитометре подключение генератора и съем сигнала осуществляется с помощью катушек, намотанных непосредственно на подложку, несущую тонкую магнитную пленку (ТМП). Такой датчик миниатюрен, но не технологичен в производстве из-за наличия в нем катушек индуктивностей. Главным же его недостатком является невозможность измерения магнитных полей сравнительно высоких частот (выше 10 кГц) в связи с тем, что обмотки катушек экранируют внешние высокочастотные магнитные поля.

Наиболее близким по совокупности существенных признаков аналогом является микрополосковый датчик магнитного поля [Б.А. Беляев, С.В. Бутаков, А.А. Лексиков. Микрополосковые датчики магнитных полей / Наука производству, №5, 2003 г. С.11-16]. Датчик содержит параллельные полосковые проводники резонаторов на верхней стороне диэлектрической подложки, на нижней стороне которой методом термического испарения осаждена тонкая магнитная пленка, покрытая медным слоем, выполняющим роль экрана. Работа датчика основана на сильной зависимости уровня проходящей через микрополосковую структуру СВЧ-мощности от напряженности внешнего магнитного поля в условиях, близких к ферромагнитному резонансу (ФМР) для тонкой магнитной пленки (ТМП). При этом мощность от СВЧ-генератора подается на проводник одного резонатора, а сигнал снимается с проводника второго резонатора. Такой датчик технологичен в изготовлении и позволяет проводить измерения магнитного поля на значительно более высоких частотах по сравнению с первым аналогом. Недостатком датчика является низкая чувствительность, обусловленная шумами как самой ТМП, так и амплитудными шумами СВЧ-генератора.

Техническим результатом изобретения является повышение чувствительности датчика высокочастотных магнитных полей.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в датчике слабых высокочастотных магнитных полей, содержащем диэлектрическую подложку, на верхней стороне которой нанесены проводники двух микрополосковых резонаторов, а на нижней стороне осаждена магнитная пленка, покрытая металлическим слоем, выполняющим роль заземляемого основания, новым является то, что проводники резонаторов расположены под оптимальным углом  $2\varphi_0$  друг к другу, обеспечивающим максимальный коэффициент преобразования датчика и определяемым по формуле

$$\varphi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s}, \text{ где } H_k - \text{ поле одноосной магнитной анизотропии тонкой магнитной}$$

пленки, а  $M_s$  - намагниченность насыщения пленки, причем мощность СВЧ-генератора подается на оба резонатора одновременно, а выходной сигнал датчика формируется двумя продетектированными сигналами, снимаемыми одновременно с этих двух резонаторов.

Отличия заявляемого датчика от наиболее близкого аналога заключаются в том, что проводники резонаторов расположены под оптимальным углом друг к другу, обеспечивающим максимальный коэффициент преобразования датчика и определяемым

по формуле  $\varphi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s}$ , где  $H_k$  - поле одноосной магнитной анизотропии тонкой

магнитной пленки, а  $M_s$  - намагниченность насыщения пленки, причем мощность СВЧ-генератора подается на оба резонатора одновременно, а выходной сигнал датчика формируется двумя протектированными сигналами, снимаемыми одновременно с этих двух резонаторов. 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 чертежами: Фиг.1а, б - структурная схема датчика слабых высокочастотных магнитных полей и топология полосковых проводников его чувствительного элемента; Фиг.2 - угловые зависимости нормированного коэффициента преобразования датчика с чувствительным элементом на основе одиночного микрополоскового резонатора; Фиг.3 - зависимость коэффициента преобразования заявляемого датчика от напряжения на СВЧ-генераторе.

Как известно, существуют большие проблемы приема и передачи электромагнитных волн при расположении традиционных электрических антенн в непосредственной близости к проводящим поверхностям, например обшивке летательных аппаратов, стен и крыш зданий, водного и почвогрунтового покрова Земли. Это связано с тем, что при отражении электромагнитных волн от границы раздела на проводящей поверхности располагаются узлы электрического поля и, соответственно, пучности высокочастотного магнитного поля. Одним из путей решения данной проблемы является использование датчиков слабых высокочастотных магнитных полей, которые часто называют также «магнитными антеннами». Важно отметить, что амплитуда низкочастотных магнитных шумов Земли порядка  $10^{-9}$  Тл, и она убывает обратно пропорционально частоте [Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. // М.: Наука. - 1986. - 199 с.]. Поэтому магнитные высокочастотные датчики (магнитные антенны), в отличие от датчиков слабых постоянных и низкочастотных магнитных полей, могут иметь пороговую чувствительность на несколько порядков выше.

На Фиг.1 показана структурная схема (а) и топология полосковых проводников чувствительного элемента (б) заявляемого датчика. Основой чувствительного элемента 1 датчика являются микрополосковые резонаторы (МПР), образованные полосковыми проводниками 2, которые нанесены на диэлектрическую подложку 3, с нанесенной на ней ТМП. На резонаторы датчика одновременно подается мощность СВЧ-генератора ( $G_{свч}$ ). Выходной сигнал датчика формируется двумя протектированными сигналами, снятыми одновременно с двух резонаторов, которые затем подаются на дифференциальный усилитель ДУ.

Проведенные исследования показали, что для датчика, чувствительный элемент которого содержит только один резонатор, коэффициент преобразования  $K_{пр}$ , определяемый как отношение изменения сигнала на детекторе к величине пробного (измеряемого) магнитного поля, сильно зависит не только от напряженности, но и от направления постоянного смещающего магнитного поля  $H_0$ , с помощью которого датчик настраивается на максимальную чувствительность с коэффициентом

преобразования  $K_{\max}$ . На Фиг.2 представлены экспериментальные угловые зависимости нормированного коэффициента преобразования датчика на основе одного резонатора, построенные для двух случаев. В первом случае ось легкого намагничивания (ОЛН) анизотропной магнитной пленки ориентирована параллельно поляризации высокочастотного магнитного поля  $h$  в МПР (сплошная линия), а во втором - перпендикулярно ей (штриховая линия). При этом вектор поляризации  $h$  лежит в плоскости МПР и направлен ортогонально оси полоскового проводника, а для каждого выбранного угла  $\varphi$  ориентации оси МПР относительно внешнего магнитного поля  $H_0$  подбиралась оптимальная величина этого смещающего поля, при котором сигнал был наибольшим.

Из Фиг.2 видно, во-первых, что при параллельной ориентации (ОЛН  $\parallel h$ ) коэффициент преобразования по модулю почти в 5 раз больше, чем при ортогональной ориентации. Во-вторых, значения этого коэффициента не только достигают максимумов при оптимальных углах  $\pm\varphi_0$ , но и имеют разные знаки. Именно поэтому в заявляемом датчике используются сигналы от двух оптимально расположенных и оптимально ориентированных резонаторов (см. Фиг.1). Эти сигналы суммируются на дифференциальном усилителе, в то время как амплитудные шумы генератора взаимно компенсируются вследствие того, что они имеют одинаковую фазу и после детектирования вычитаются в дифференциальном усилителе. Очевидно, что в такой схеме магнитные шумы ТМП также уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз.

Значения оптимального угла  $2\varphi_0$  ориентации резонаторов для различных образцов тонких магнитных пленок могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\varphi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s},$$

где  $H_k$  - поле одноосной магнитной анизотропии тонкой магнитной пленки, а  $M_s$  - намагниченность насыщения пленки.

Для случая конкретной реализации датчика, характеристика которого представлена на Фиг.2, параметры тонкой магнитной пленки были следующими:  $H_k=5$  Э,  $M_s=800$  Гс. Подставляя эти значения в формулу для оптимального угла получаем  $\varphi_0=4.5^\circ$ .

Заявляемый датчик слабых высокочастотных магнитных полей работает следующим образом. Мощность СВЧ-генератора одновременно подается на оба микрополосковых резонатора. Измеряемое магнитное поле воздействует на тонкую магнитную пленку, находящуюся в области пучности СВЧ-магнитного поля резонаторов. Это приводит к разнонаправленному изменению высокочастотной магнитной восприимчивости ТМП (в разных резонаторах) и, как следствие, к разнонаправленному перераспределению амплитуд высокочастотного напряжения на полосковых проводниках резонаторов на частоте СВЧ-генератора. Поэтому в точках на полосковых проводниках резонаторов, с которых снимаются сигналы, при изменении измеряемого магнитного поля амплитуда одного сигнала возрастает, а другого убывает, и, наоборот, в зависимости от знака изменения поля. Так как сигналы с микрополосковых резонаторов после детектирования поступают на входы дифференциального усилителя, то коэффициент преобразования возрастает в два раза по сравнению с датчиком на одном резонаторе.

Активным материалом чувствительных элементов заявляемого датчика является тонкая магнитная пленка, обладающая высокой магнитной проницаемостью на СВЧ. Так как для работы датчика требуется СВЧ-генератор и специальная схема съема

сигнала, именно поэтому антенна на основе такого датчика называется «активной». Такая антенна способна работать только на прием электромагнитных волн и, как уже отмечалось, она чувствительна к магнитной составляющей высокочастотного поля.

Экспериментально установлено, что для заявляемого датчика коэффициент преобразования  $K_{пр}$  сначала линейно растет с увеличением амплитуды высокочастотного поля  $h$  в МПР, которая очевидно определяется мощностью накачки или напряжением  $U_r$ , измеряемом на генераторе, а затем выходит на насыщение (Фиг.3) по мере приближения амплитуды  $h$  к величине поля одноосной магнитной анизотропии  $H_k=0.4$  мТл. На изготовленном макете датчика удалось получить коэффициент преобразования  $K_{пр} \approx 60$  В/мТл, который остается постоянным в диапазоне частот  $10^3 \div 10^7$  Гц, при этом динамический диапазон измеряемых магнитных полей составил  $10^{-5}$ - $10^{-12}$  Тл.

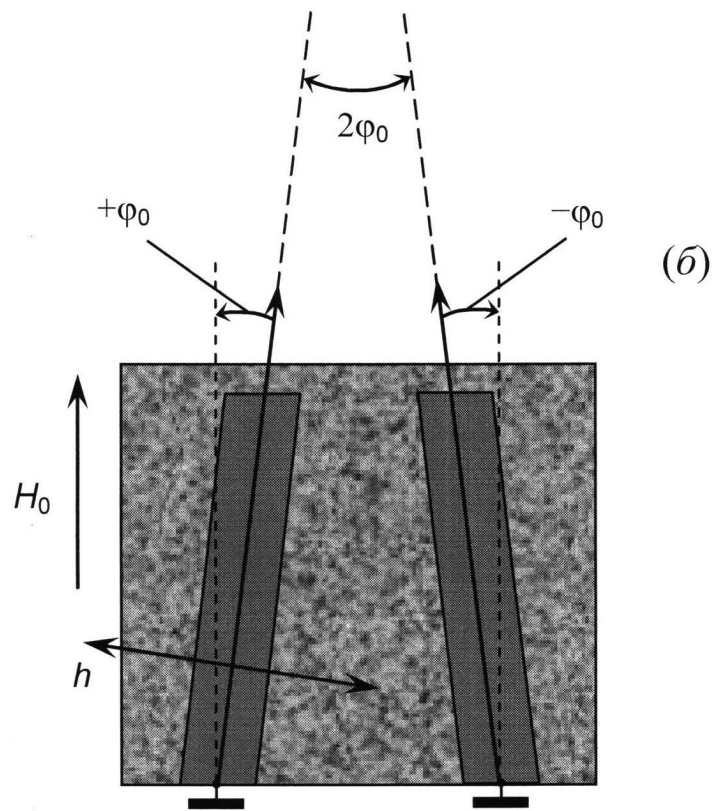
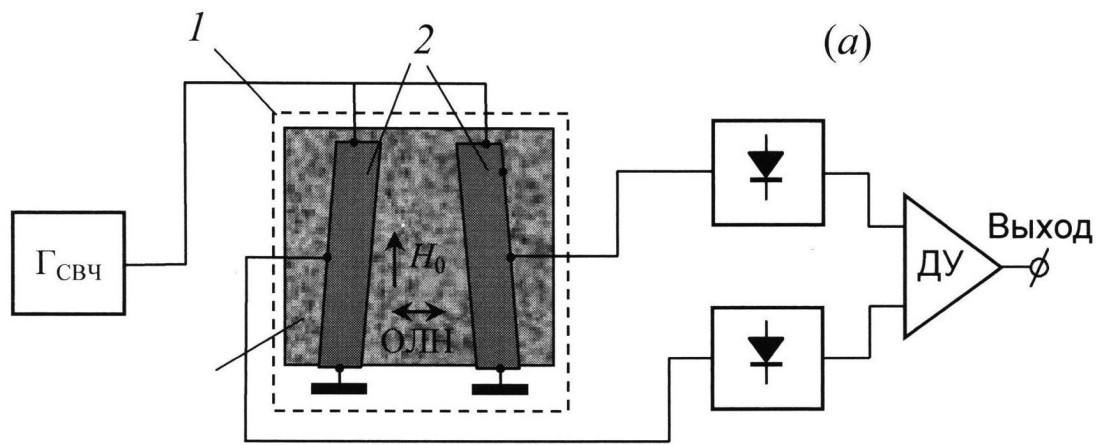
Таким образом, предложена конструкция датчика слабых высокочастотных магнитных полей. Она может использоваться в качестве магнитной антенны, которая обладает рядом преимуществ, по сравнению с традиционными пассивными электрическими и магнитными антеннами. Во-первых, имеет постоянную чувствительность во всем рабочем диапазоне частот от нижней частоты  $f_n$ , которая может быть несколько кГц, до верхней частоты  $f_v$ , которая определяется частотой СВЧ-генератора накачки  $f_r$ , при этом  $f_v$  примерно на порядок меньше  $f_r$ . Во-вторых, имеет планарную конструкцию и может располагаться непосредственно на проводящих поверхностях, являющихся экранами для традиционных антенн. В-третьих, имеет малый размер чувствительной зоны, определяемый размерами ТМП, который на много порядков меньше длины принимаемой электромагнитной волны (в изготовленном макете датчика этот размер всего  $6 \times 10$  мм<sup>2</sup>). И, наконец, в-четвертых, может одновременно принимать и обрабатывать сразу несколько разнесенных по частоте сигналов во всем рабочем диапазоне, но для этого необходимо использовать дополнительные частотно-селективные устройства.

#### Формула изобретения

Датчик слабых высокочастотных магнитных полей, содержащий диэлектрическую подложку, на верхней стороне которой нанесены полосковые проводники двух микрополосковых резонаторов, а на нижней стороне осаждена магнитная пленка, покрытая металлическим слоем, выполняющим роль заземляемого основания, отличающийся тем, что проводники резонаторов расположены под оптимальным углом  $2\varphi_0$  друг к другу, обеспечивающим максимальный коэффициент преобразования

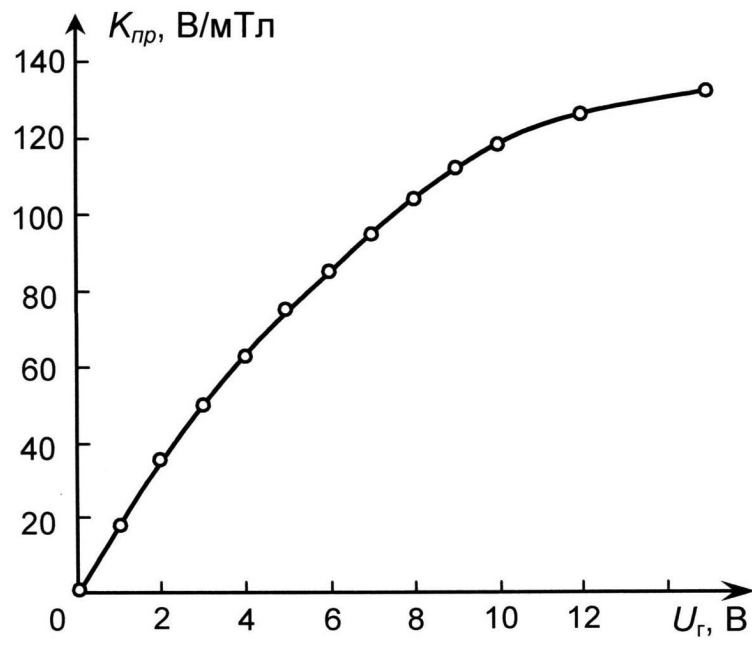
датчика и определяемым по формуле  $\varphi_0 \approx 4\pi \frac{H_k}{M_s}$ , где  $H_k$  - поле одноосной магнитной

анизотропии тонкой магнитной пленки, а  $M_s$  - намагниченность насыщения пленки, причем мощность СВЧ-генератора подается на оба резонатора одновременно, а выходной сигнал датчика формируется двумя продетектированными сигналами, снимаемыми одновременно с этих двух резонаторов.



Фиг. 1





Фиг. 3