



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01R 33/05 (2021.02)*

(21)(22) Заявка: 2020133282, 09.10.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
09.10.2020

Дата регистрации:  
17.05.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.10.2020

(45) Опубликовано: 17.05.2021 Бюл. № 14

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50,  
Мастепако Е.Г.

(72) Автор(ы):

Беляев Борис Афанасьевич (RU),  
Бурмитских Антон Владимирович (RU),  
Изотов Андрей Викторович (RU),  
Боев Никита Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
научное учреждение "Федеральный  
исследовательский центр "Красноярский  
научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2712926 C1, 03.02.2020. RU  
2714314 C1, 14.02.2020. CN 103744039 A,  
23.04.2014. WO 2008069423 A1, 12.06.2008.

(54) Широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса

(57) Реферат:

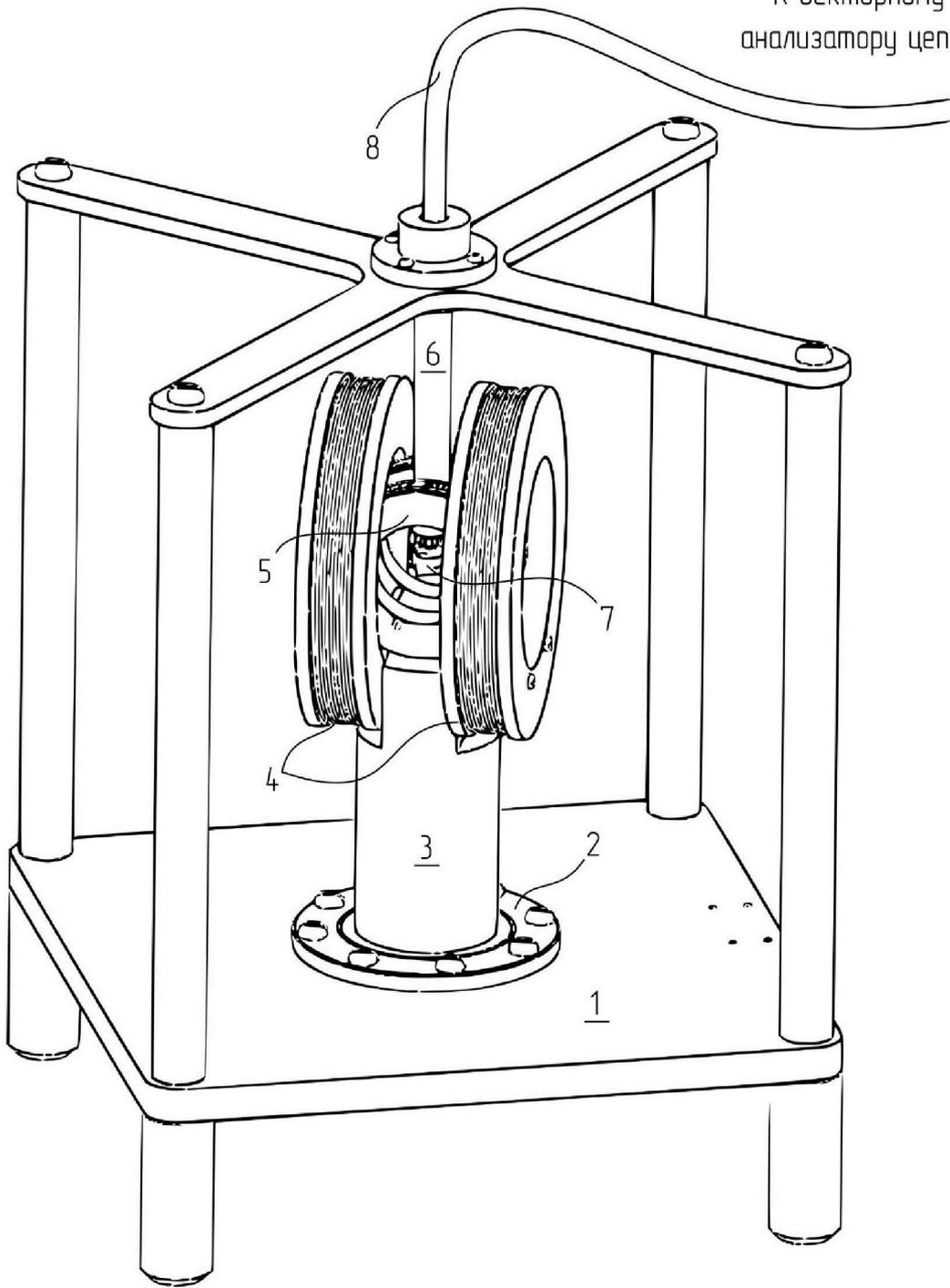
Изобретение относится к измерительной технике. Широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса дополнительно содержит короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, размещенную в электромагнитном экране, причем СВЧ-разъем полосковой линии расположен перпендикулярно ее плоскости таким образом, что магнитная система может свободно поворачиваться вокруг нормали к плоскости полосковой линии, при этом магнитная система формирует магнитное поле в

плоскости исследуемого образца двумя ортогональными парами колец Гельмгольца, питание которых осуществляется от двух независимых управляемых источников постоянного тока. Технический результат – снижение уровня собственных шумов, обеспечение возможности проведения измерений спектров ферромагнитного резонанса в широком диапазоне углов направления внешнего постоянного магнитного поля в плоскости образца. 9 ил.

RU  
2 747 912  
C1

RU  
2 747 912  
C1

К векторному  
анализатору цепей



Фиг. 1

RU 2747912 C1

RU 2747912 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01R 33/05 (2021.02)*

(21)(22) Application: **2020133282, 09.10.2020**

(24) Effective date for property rights:  
**09.10.2020**

Registration date:  
**17.05.2021**

Priority:

(22) Date of filing: **09.10.2020**

(45) Date of publication: **17.05.2021** Bull. № 14

Mail address:

**660036, g. Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50,  
Mastepako E.G.**

(72) Inventor(s):

**Beliaev Boris Afanasevich (RU),  
Burmitskikh Anton Vladimirovich (RU),  
Izotov Andrei Viktorovich (RU),  
Boev Nikita Mikhailovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe  
nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyi  
issledovatel'skii tsentr "Krasnoiarskii nauchnyi  
tsentr Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii  
nauk" (RU)**

(54) **BROADBAND FERROMAGNETIC RESONANCE SPECTROMETER**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to measuring equipment. The broadband ferromagnetic resonance spectrometer additionally contains a short-circuited asymmetric strip line located in an electromagnetic screen, and the microwave connector of the strip line is located perpendicular to its plane in such a way that the magnetic system can freely rotate around the normal to the plane of the strip line, while the magnetic system forms a magnetic field in plane of the sample under

study by two orthogonal pairs of Helmholtz rings, which are powered from two independent controlled direct current sources.

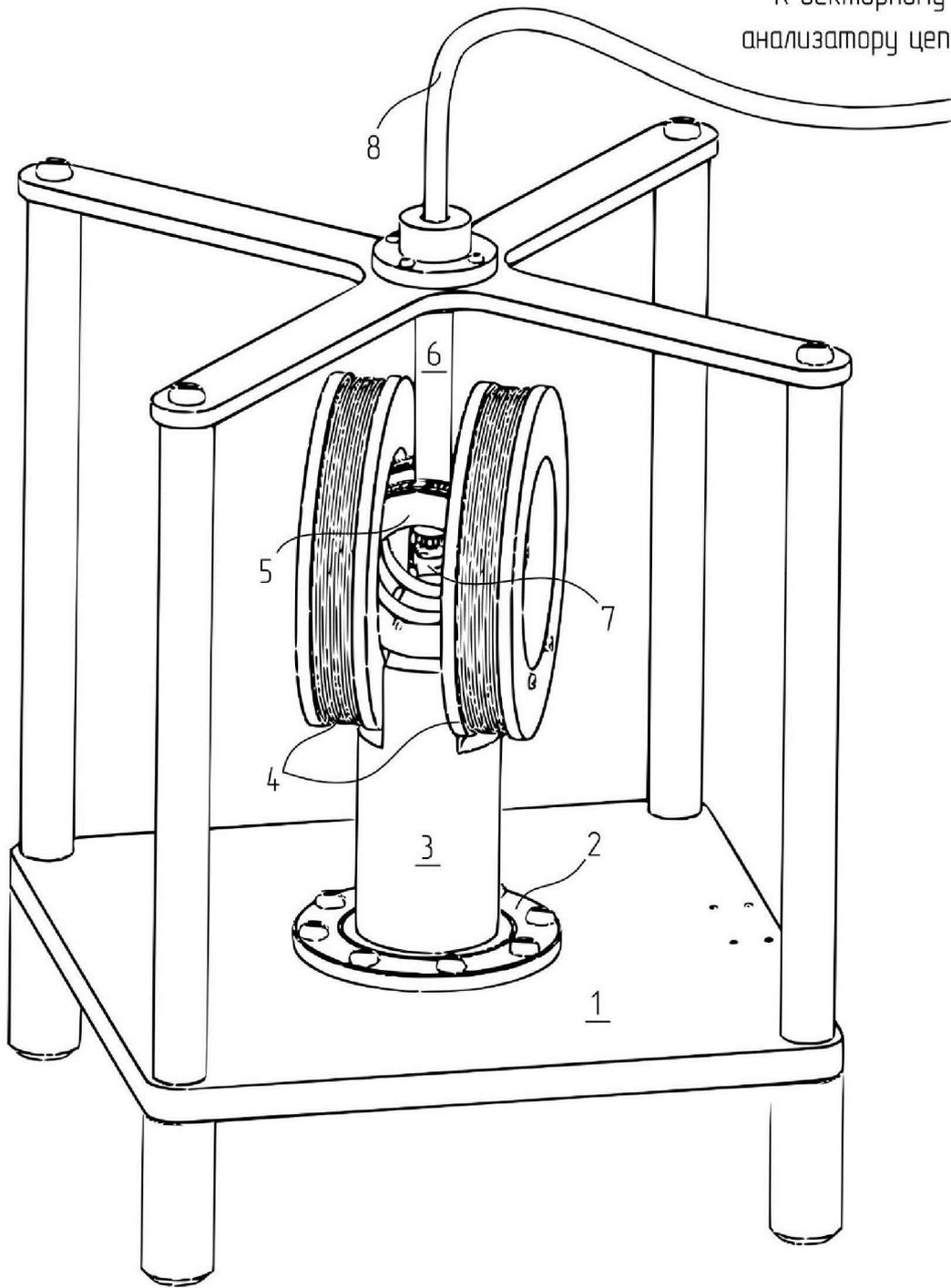
EFFECT: reducing the level of intrinsic noise, ensuring possibility of measuring the ferromagnetic resonance spectra in a wide range of angles of the direction of the external constant magnetic field in the plane of the sample.

1 cl, 9 dwg

RU 2 747 912 C1

RU 2 747 912 C1

К векторному  
анализатору цепей



Фиг. 1

RU 2747912 C1

RU 2747912 C1

Изобретение относится к измерительной технике и предназначено для неразрушающего контроля качества магнитных пленок и изучения их высокочастотных свойств путем регистрации спектров ферромагнитного резонанса (ФМР).

Известно устройство, предназначенное для проведения широкополосных измерений параметров магнитных пленок и магнитных тонкопленочных наноструктур с использованием векторного анализатора цепей (VNA-FMR) [Maksymov I., Kostylev M. Broadband stripline ferromagnetic resonance spectroscopy of ferromagnetic films, multilayers and nanostructures // Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures. 2015. Vol. 69. P. 253–293]. Устройство содержит несимметричную полосковую линию, на которой размещается исследуемый образец магнитной пленки; вход и выход полосковой линии подключены к векторному анализатору цепей, а сама линия размещена внутри магнитной системы. Магнитная система подключена к выходу управляемого источника тока. Для управления векторным анализатором цепей и источником тока используется персональный компьютер.

Известно также устройство для измерения компонент комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок в широкой полосе частот [Bekker V., Seemann K., Leiste H. A new strip line broad-band measurement evaluation for determining the complex permeability of thin ferromagnetic films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. Vol. 270. No. 3, P. 327–332]. Устройство содержит короткозамкнутый отрезок несимметричной полосковой линии, внутри которого размещается исследуемый образец тонкой магнитной пленки. Полосковая линия размещается в магнитной системе и подключается к векторному анализатору цепей. Магнитная система подключается к выходу управляемого источника тока. Персональный компьютер используется для управления источником тока и векторным анализатором цепей.

Наиболее близким аналогом по совокупности существенных признаков является устройство для измерения комплексной магнитной проницаемости тонкопленочных материалов [патент CN103744039A, МПК G01R 33/12, опубл. 23.04.2014 (прототип)], состоящее из векторного анализатора цепей, короткозамкнутой несимметричной полосковой линии, магнитной системы и управляемого источника постоянного тока. Векторный анализатор цепей подключен к полосковой линии, внутри которой размещается исследуемый образец тонкой магнитной пленки. Полосковая линия размещается внутри магнитной системы, формирующей постоянное магнитное поле в одном направлении.

Существенными недостатками известных конструкций и устройства-прототипа является высокий уровень собственных шумов, а также отсутствие возможности проведения измерений при произвольном направлении внешнего постоянного магнитного поля в плоскости тонкопленочного образца. Высокий уровень собственных шумов известных устройств объясняется использованием открытой волноведущей структуры, на которую сильное влияние оказывают окружающие предметы, а также на которую влияют помехи, связанные с механическим перемещением или вращением образца и магнитной системы. Отсутствие возможности проведения измерений в широком диапазоне изменения углов ориентации внешнего поля объясняется конструкцией измерительной и магнитной систем: подвод СВЧ-кабелей к измерительной системе осуществляется через магнитную систему, что ограничивает диапазон возможных угловых перемещений.

Техническим результатом заявляемого изобретения является снижение уровня собственных шумов, обеспечение возможности проведения измерений спектров ферромагнитного резонанса в широком диапазоне углов направления внешнего

постоянного магнитного поля в плоскости образца.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в широкополосном спектрометре ферромагнитного резонанса, содержащем векторный анализатор цепей, короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, внутри которой размещается исследуемый тонкопленочный образец, магнитную систему, управляемые источники постоянного тока, *НОВЫМ* является то, что короткозамкнутая несимметричная полосковая линия размещается в электромагнитном экране, причем СВЧ-разъем полосковой линии расположен перпендикулярно ее плоскости таким образом, что магнитная система может свободно поворачиваться вокруг нормали к плоскости полосковой линии, при этом магнитная система формирует магнитное поле в плоскости исследуемого образца двумя ортогональными парами колец Гельмгольца, питание которых осуществляется от двух независимых управляемых источников постоянного тока.

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается наличием электромагнитного экрана, внутри которого размещается короткозамкнутая несимметричная полосковая линия. Наличие электромагнитного экрана позволяет значительно уменьшить уровень собственных шумов устройства, а также существенно снизить влияние на результаты измерений электромагнитных помех, возникающих при проведении угловых измерений, когда происходит взаимное перемещение измерительной и магнитной систем.

Вторым существенным отличием является расположение СВЧ-разъема короткозамкнутой полосковой линии перпендикулярно ее плоскости. В этом случае СВЧ-кабель от векторного анализатора цепей подключается с верхней стороны измерительной системы, что дает возможность свободного вращения магнитной системы вокруг ее оси.

Третьим существенным отличием является применение магнитной системы, формирующей магнитное поле в двух перпендикулярных направлениях в плоскости образца. Это позволяет проводить калибровку векторного анализатора цепей в параллельных полях (магнитное СВЧ-поле параллельно постоянному магнитному полю) и измерения в перпендикулярных полях (магнитное СВЧ-поле перпендикулярно постоянному магнитному полю) без механического вращения магнитной системы, что значительно снижает уровень собственных шумов устройства.

Таким образом, перечисленные выше отличительные от прототипа признаки позволяют сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна».

Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях и, следовательно, обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

Данное изобретение поясняется чертежами. На фиг. 1 показан внешний вид широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса; на фиг. 2 показан вид установки снизу. На фиг. 3 отображен отдельно вид измерительной системы в кольцах Гельмгольца. На фиг. 4 представлена измерительная система в сборе; на фиг. 5 измерительная система без верхней крышки; на фиг. 6 - измерительная система с разнесенными частями. На фиг. 7–9 показаны результаты экспериментальных измерений параметров тонкой магнитной пленки пермаллоя, полученные с использованием широкополосного векторного спектрометра ферромагнитного резонанса.

Элементы широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса (фиг. 1) закреплены на основании (1), на котором установлен керамический радиально-упорный

шариковый подшипник (2). К подшипнику (2) сверху прикреплен цилиндрический держатель (3) колец Гельмгольца (4) и (5), формирующих постоянное магнитное поле в горизонтальной плоскости ортогонально друг другу. Сверху вдоль оси вращения держателя (3) в центр колец Гельмгольца (4) и (5) опускается держатель (6) измерительной системы (7). Держатель (6) измерительной системы (7) закреплен неподвижно, внутри него проложен кабель (8) от измерительной системы (7) к векторному анализатору цепей. Таким образом, обеспечивается возможность вращения держателя (3) на подшипнике (2), вследствие чего происходит поворот колец Гельмгольца (4) и (5), внутри которых остается неподвижной измерительная система (7). Кольца Гельмгольца (4) и (5) подключаются к источникам постоянного тока, управляемым персональным компьютером.

С нижней стороны широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса (фиг. 2) размещен шаговый двигатель (9), который через ременную передачу вращает держатель (3) колец Гельмгольца (4) и (5). На валу шагового двигателя (9) размещена ведущая шестерня (на фиг. не указана), соединенная через зубчатый ремень (10) с ведомой шестерней (11), связанной с держателем (3) с нижней стороны подшипника (2). Передаточное отношение ременного редуктора равно 9, что при шаге двигателя (9) 0,9 град. позволяет получить дискретность вращения колец Гельмгольца (4) и (5) 0,1 град. без использования микрошагового режима работы шагового двигателя. При работе драйвера шагового двигателя в микрошаговом режиме, ток в обмотках двигателя стабилизируется, как правило, с использованием широтно-импульсной модуляции, что приводит к возникновению импульсных помех. Управление шаговым двигателем осуществляется через драйвер по командам программного обеспечения на персональном компьютере.

Кабель (8) от векторного анализатора цепей проходит сквозь держатель (6) к измерительной системе (7) и соединяется (фиг. 3) с СВЧ-разъемом (13) измерительной системы (7). Для доступа к измерительной системе (7) держатель (6) вытаскивается из колец Гельмгольца (4) и (5), измерительная система (7) открепляется от держателя (6), разъединяется кабель (8) и СВЧ-разъем (13).

На фиг. 4 показана измерительная система (7), которая состоит из корпуса (11), верхней крышки (12), СВЧ-разъема (13). Корпус (11) и верхняя крышка (12) образуют электромагнитный экран. Внутри измерительной системы (7) размещается несимметричная полосковая линия (14), под которой располагают исследуемый образец тонкой магнитной пленки (15) на подложке (фиг. 5). Подложку с пленкой (15) размещают таким образом, чтобы пленка была обращена вниз, к основанию корпуса (11). С правой стороны исследуемый образец пленки (15) упирается в пластинчатый упор (16), с левой стороны в регулируемый винтовой упор (17). На фиг. 6 показан вид измерительной системы (7) без верхней крышки (12) и с разнесенными частями. Для работы с образцами пленок (15) различного размера изготавливается набор подходящих пластинчатых упоров (16). Винтовой упор (17) изготавливается из мягкого материала, например, полиамида марки ПА6. Элементы измерительной системы изготавливаются из медно-цинковых сплавов (латуни) с низким содержанием ферромагнитных материалов (железо, никель). Конец полосковой линии (14) пропаивается через отверстие (18).

Устройство работает следующим образом. Внутри измерительной системы (7) размещают (фиг. 5) исследуемый образец тонкой магнитной пленки (15). С помощью пластинчатого упора (16) и винтового упора (17) пленку (15) фиксируют. При необходимости, образец пленки (15) может быть закреплен прижатием к основанию корпуса (11) измерительной системы (7) с помощью вставки из вспененного диэлектрика

между образцом и верхней крышкой (12). СВЧ-разъем (13) измерительной системы (7) подключают к кабелю (8), фиксируют измерительную систему (7) на держателе (6), после чего держатель (6) закрепляют в установке (фиг. 1). Кабель (8) подключается к векторному анализатору цепей.

5 По командам от программного обеспечения на персональном компьютере шаговый двигатель (9) вращается и устанавливает внутренние кольца Гельмгольца (5) таким образом, чтобы формируемое ими поле было направлено перпендикулярно СВЧ-полю, создаваемому полосковой линией (14). В этом случае поле, формируемое внешними  
10 кольцами Гельмгольца (4), параллельно магнитному СВЧ-полю полосковой линии (14). По команде от программного обеспечения источник постоянного тока, выход которого подключен к внешним кольцам Гельмгольца (4), формирует в них ток заданной величины. Таким образом, внешними кольцами Гельмгольца (4) формируется магнитное поле, направленное параллельно магнитному СВЧ-полю полосковой линии  
15 (14). Величина поля выбирается такой, чтобы исследуемый образец находился в насыщении. Поскольку направление магнитного СВЧ-поля параллельно направлению магнитного момента в исследуемом образце, потери, связанные с ферромагнитным резонансом, на векторном анализаторе не наблюдаются. В этом режиме по команде от программного обеспечения калибруется векторный анализатор.

Далее могут проводиться угловые или полевые измерения. Угловые измерения  
20 проводятся при фиксированном постоянном магнитном поле, формируемом внутренними кольцами Гельмгольца (5), и изменяемом угле между направлением постоянного магнитного поля и магнитного СВЧ-поля. Полевые измерения проводятся при развертке постоянного магнитного поля для фиксированного угла между направлением постоянного магнитного поля и направлением магнитного СВЧ-поля  
25 (как правило, наиболее интересны зависимости при взаимно перпендикулярном направлении полей).

На фиг. 7 показан пример измерения угловых зависимостей частоты ферромагнитного резонанса (на фигуре – ФМР) для образца тонкой магнитной пленки  $Ni_{60}Fe_{40}$  при постоянном магнитном поле  $H = 150$  Гс. Образец пленки (15) размещен  
30 в измерительной системе (7) таким образом, что направление оси легкого намагничивания совпадает с направлением магнитного СВЧ-поля, создаваемого полосковой линией (14). Угол 0 град. на фиг. 7 соответствует случаю, когда постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно магнитному СВЧ-полю. Угловые зависимости позволяют уточнить направление магнитного СВЧ-поля и направление  
35 оси легкого намагничивания тонкой пленки, так как всегда присутствует некоторая погрешность установки как исследуемого образца тонкой магнитной пленки (15) внутри измерительной системы (7), так и самой измерительной системы (7) относительно нуля координат вращения колец Гельмгольца (4) и (5).

После уточнения направления СВЧ-поля проводят повторную калибровку векторного  
40 анализатора цепей, а затем снимают полевые зависимости при фиксированном угле, когда магнитное СВЧ-поле и постоянное поле взаимно перпендикулярны. Для каждого значения постоянного магнитного поля записывается частотная зависимость реальной и мнимой частей магнитной проницаемости, из которых рассчитываются нужные  
45 параметры. В качестве примера на фиг. 8 показана зависимость частоты ферромагнитного резонанса от величины постоянного магнитного поля; на фиг. 9 показана зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса от резонансной частоты.

Экспериментальные исследования заявленного широкополосного спектрометра

ферромагнитного резонанса показали, что устройство обеспечивает высокую чувствительность одновременно с возможностью проведения измерений в широком диапазоне углов. Например, проведены измерения образца тонкой магнитной пленки пермаллоя состава  $Ni_{60}Fe_{40}$  толщиной 500 Å. Образец размещался внутри измерительной системы таким образом, что направление оси легкого намагничивания совпадало с направлением магнитного СВЧ-поля. Угловые зависимости частоты ферромагнитного резонанса показаны на фиг. 7. Точками показаны результаты измерений, сплошной линией – результаты расчетов теоретической модели. По результатам угловых измерений было получено точное угловое значение для постоянного магнитного поля, при котором обеспечивается минимальное значение частоты ферромагнитного резонанса. Для этого угла получены полевые зависимости. Например, на фиг. 8 показана зависимость частоты ферромагнитного резонанса от величины постоянного магнитного поля. На фиг. 9 показана зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса от частоты магнитного СВЧ-поля. Результаты измерений хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов.

#### (57) Формула изобретения

Широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса, содержащий векторный анализатор цепей, короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, внутри которой размещается исследуемый тонкопленочный образец, магнитную систему, управляемые источники постоянного тока, отличающийся тем, что короткозамкнутая несимметричная полосковая линия размещается в электромагнитном экране, причем СВЧ-разъем полосковой линии расположен перпендикулярно ее плоскости таким образом, что магнитная система может свободно поворачиваться вокруг нормали к плоскости полосковой линии, при этом магнитная система формирует магнитное поле в плоскости исследуемого образца двумя ортогональными парами колец Гельмгольца, питание которых осуществляется от двух независимых управляемых источников постоянного тока.

30

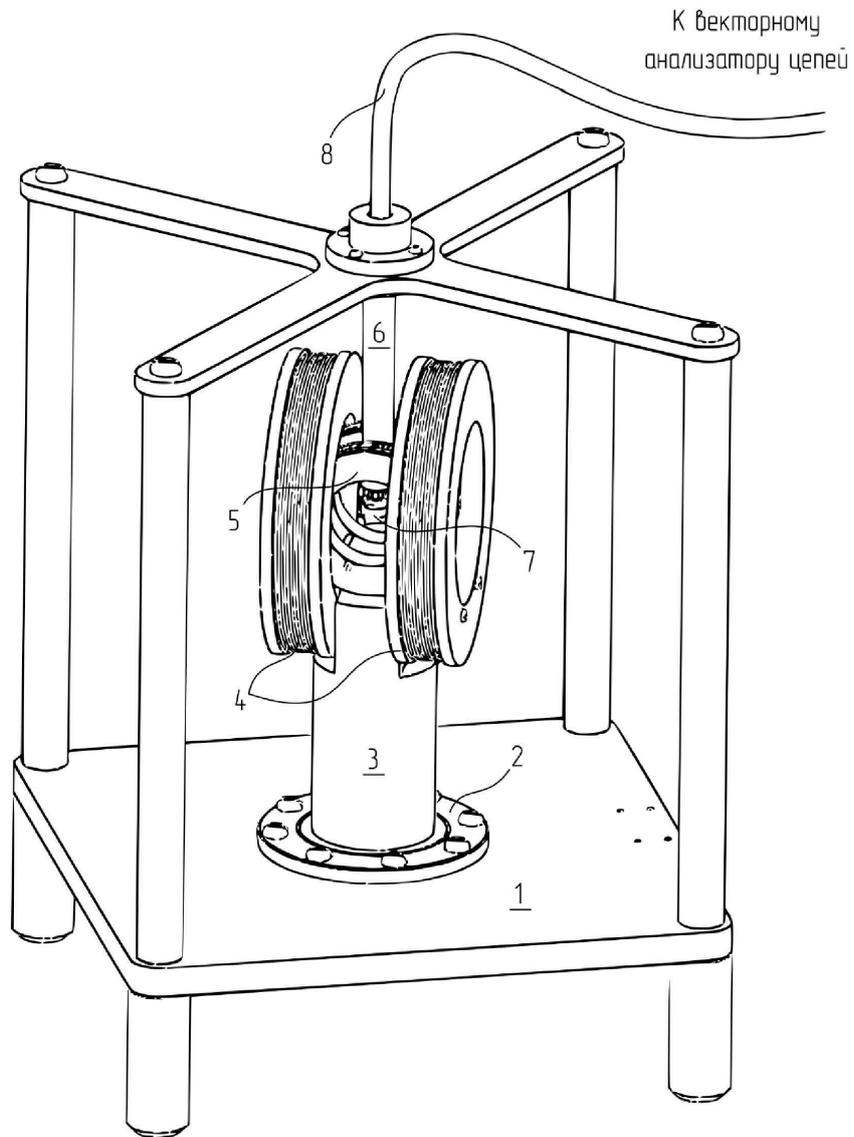
35

40

45

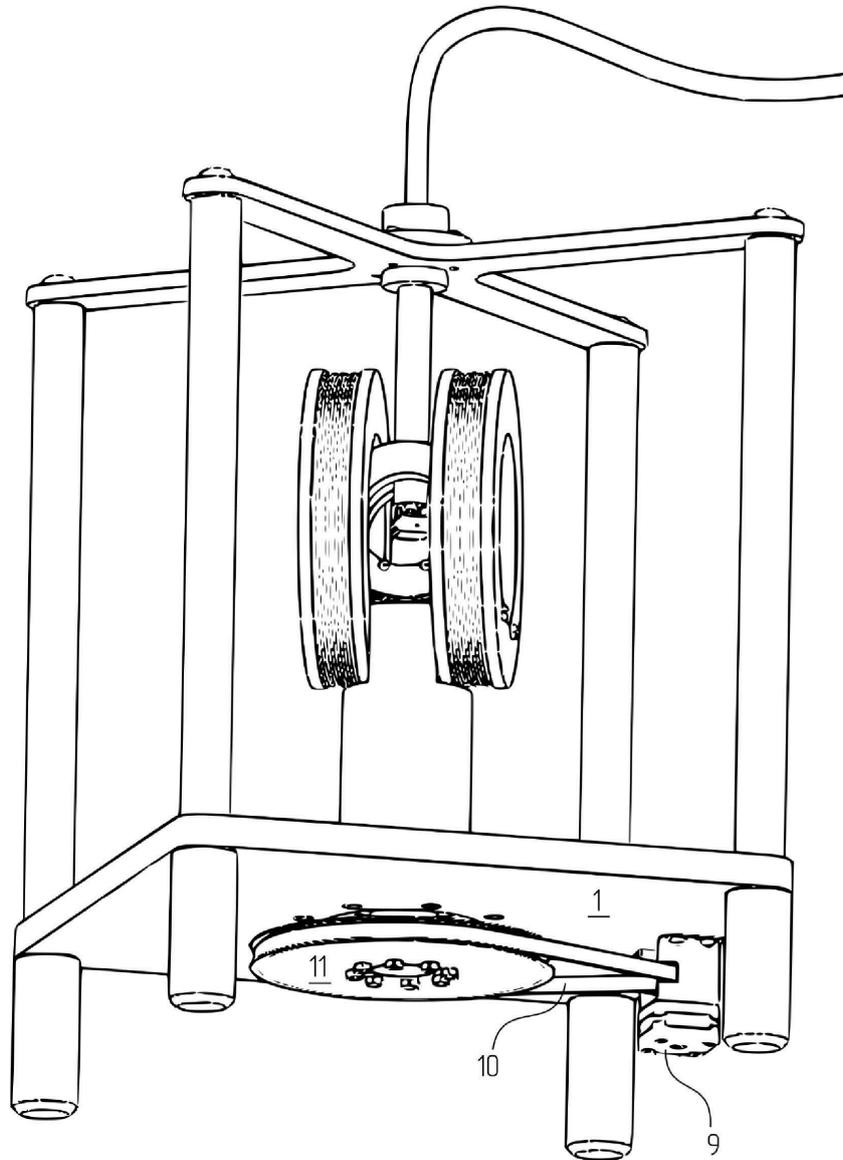
1

1/9

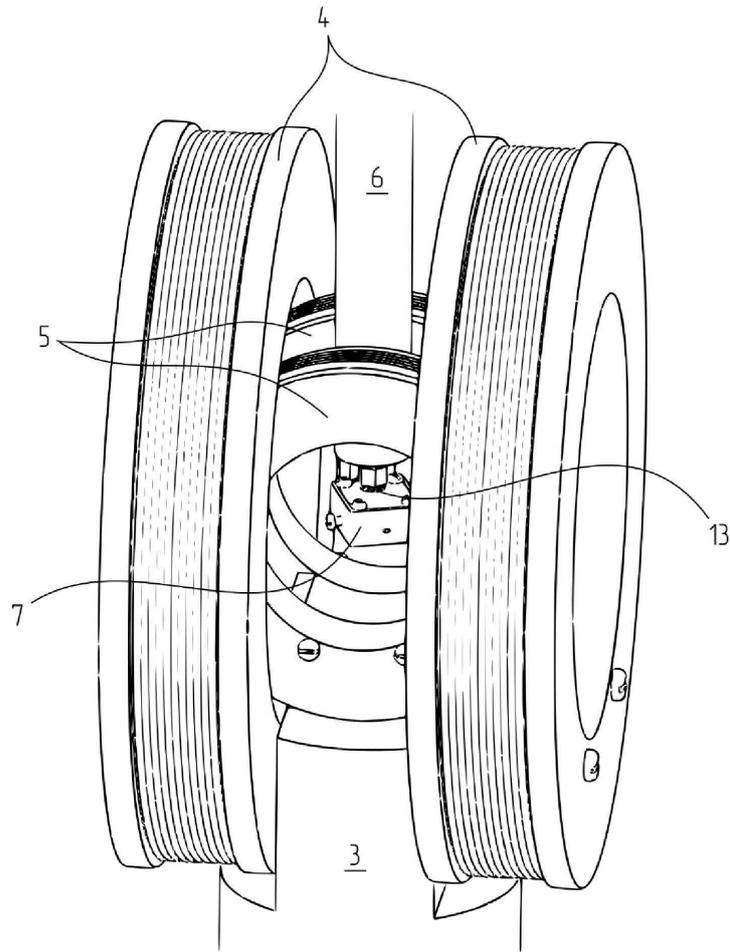


Фиг. 1

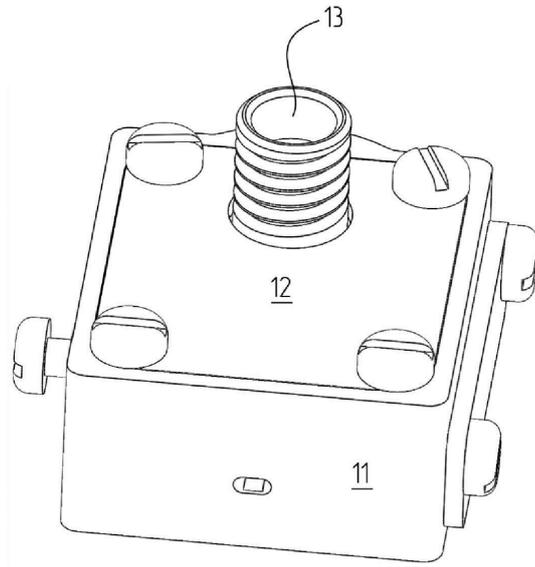
2



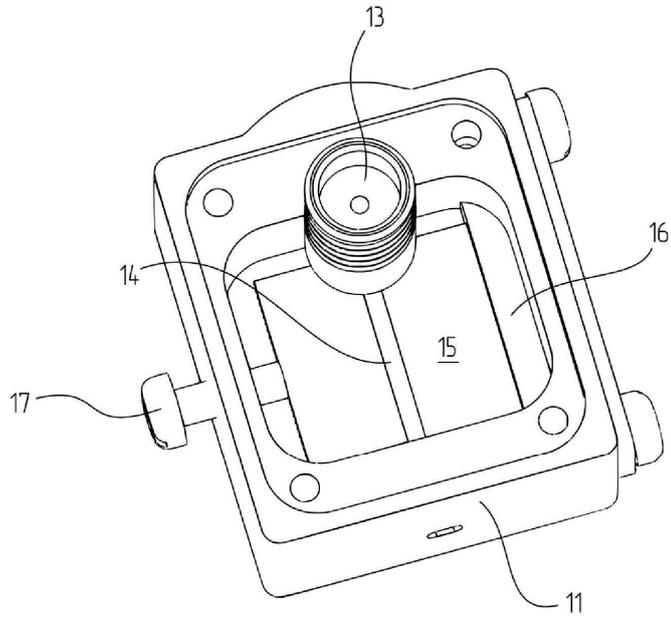
Фиг. 2



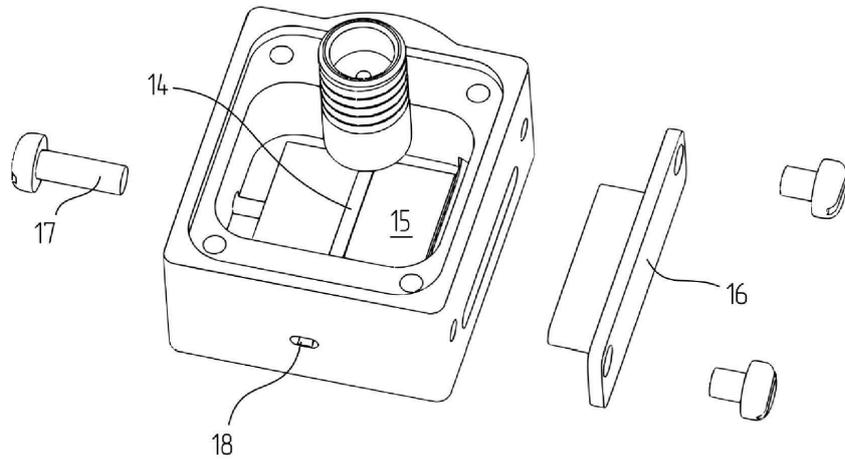
Фиг. 3



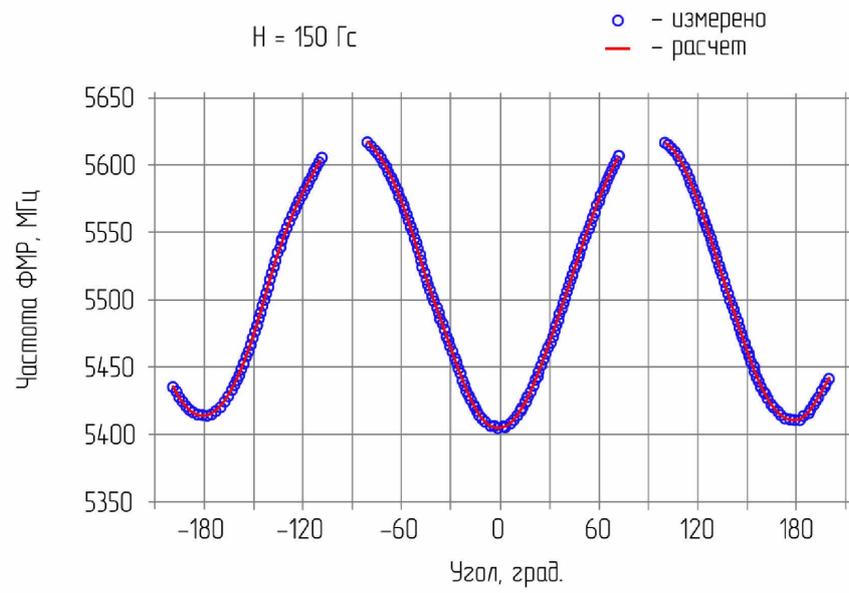
Фиг. 4



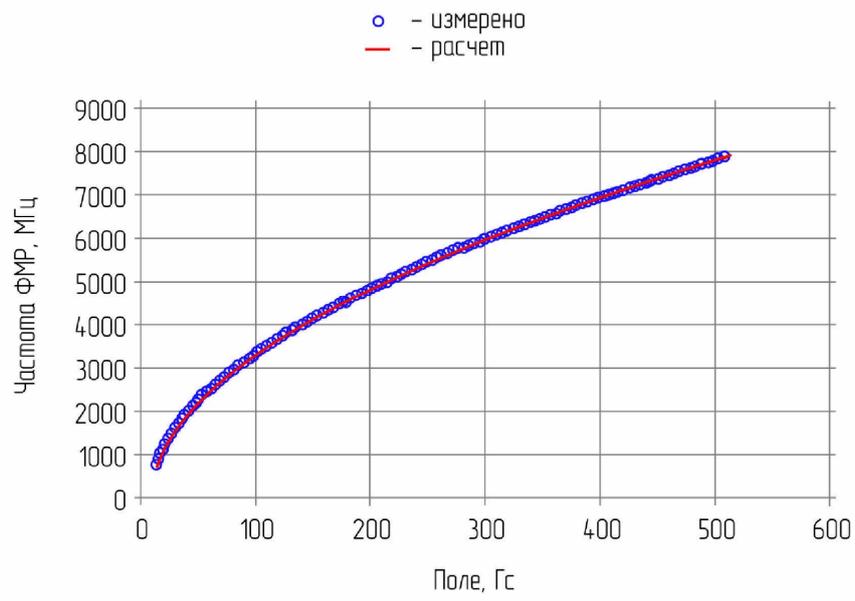
Фиг. 5



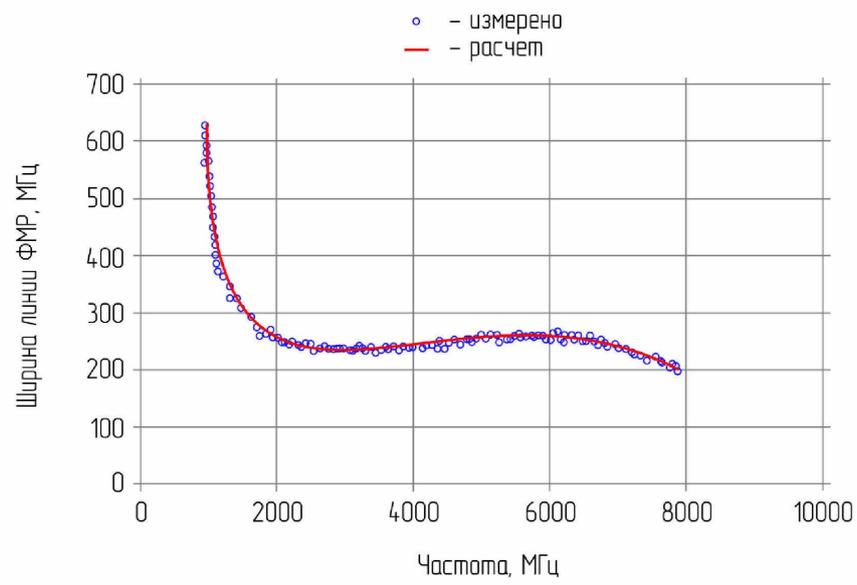
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9