



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 33/05 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022114338, 27.05.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.05.2022

Дата регистрации:
29.11.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.05.2022

(45) Опубликовано: 29.11.2022 Бюл. № 34

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,
ФИЦ КНЦ СО РАН

(72) Автор(ы):

Бурмитских Антон Владимирович (RU),
Беляев Борис Афанасьевич (RU),
Боев Никита Михайлович (RU),
Изотов Андрей Викторович (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 2747912 C1, 17.05.2021. RU
2712926 C1, 03.02.2020. RU 2714314 C1,
14.02.2020. CN 103744039 A, 23.04.2014. WO
2008069423 A1, 12.06.2008.

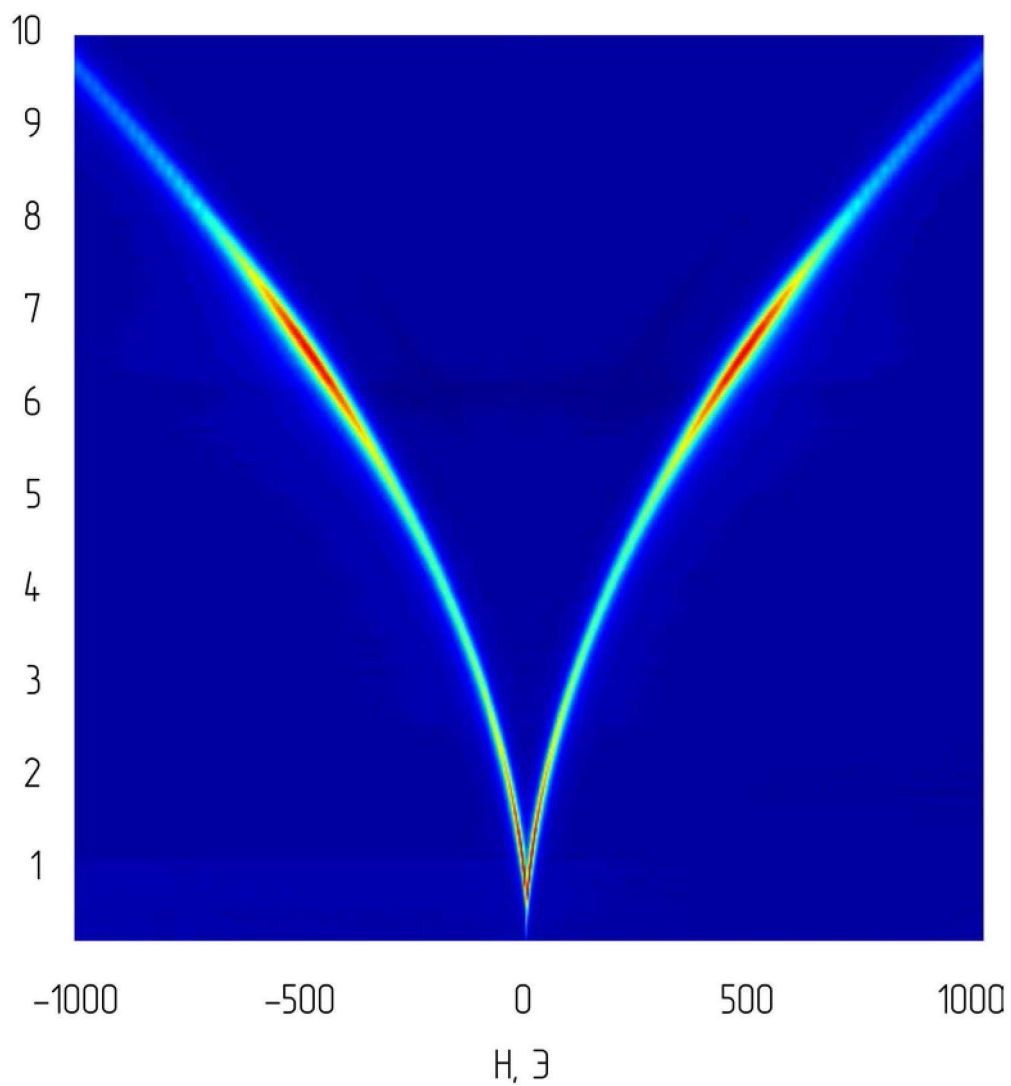
(54) Локальный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса

(57) Реферат:

Использование: для неразрушающего контроля качества магнитных пленок путем регистрации спектров ферромагнитного резонанса в широкой полосе частот от локальных участков тонкопленочных образцов. Сущность изобретения заключается в том, что локальный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса содержит векторный анализатор цепей, размещенную в электромагнитном экране короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, управляемые источники постоянного тока, питающие две пары ортогональных колец Гельмгольца, при этом в экране несимметричной

полосковой линии выполнено отверстие, а образец тонкой магнитной пленки размещается с внешней стороны электромагнитного экрана таким образом, чтобы исследуемый участок образца находился напротив отверстия в экране, при этом устройство дополнительно содержит трехкомпонентную магнитную систему, предназначенную для компенсации лабораторного магнитного поля. Технический результат: обеспечение возможности проведения локальных измерений магнитных характеристик тонкопленочных образцов. 9 ил.

f, ГГц



Фиг. 9

R U 2 7 8 4 8 1 8 C 1

R U 2 7 8 4 8 1 8 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01R 33/05 (2022.08)

(21)(22) Application: **2022114338, 27.05.2022**

(24) Effective date for property rights:
27.05.2022

Registration date:
29.11.2022

Priority:

(22) Date of filing: **27.05.2022**

(45) Date of publication: **29.11.2022 Bull. № 34**

Mail address:

**660036, g. Krasnoyarsk, ul. Akademgorodok, 50,
FITS KNTS SO RAN**

(72) Inventor(s):

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

(73) Proprietor(s):

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

(54) **LOCAL BROADBAND FERROMAGNETIC RESONANCE SPECTROMETER**

(57) Abstract:

FIELD: non-destructive quality control.

SUBSTANCE: invention is intended for non-destructive quality control of magnetic films by recording ferromagnetic resonance spectra in a wide frequency band from local areas of thin-film samples. The substance of the invention lies in the fact that a local broadband ferromagnetic resonance spectrometer contains a vector network analyzer, a short-circuited asymmetric strip line placed in an electromagnetic screen, controlled DC sources that feed two pairs of orthogonal Helmholtz rings, while a hole is made in the

screen of an asymmetric strip line, and the sample thin magnetic film is placed on the outer side of the electromagnetic screen so that the test area of the sample is opposite the hole in the screen, while the device additionally contains a three-component magnetic system designed to compensate for the laboratory magnetic field.

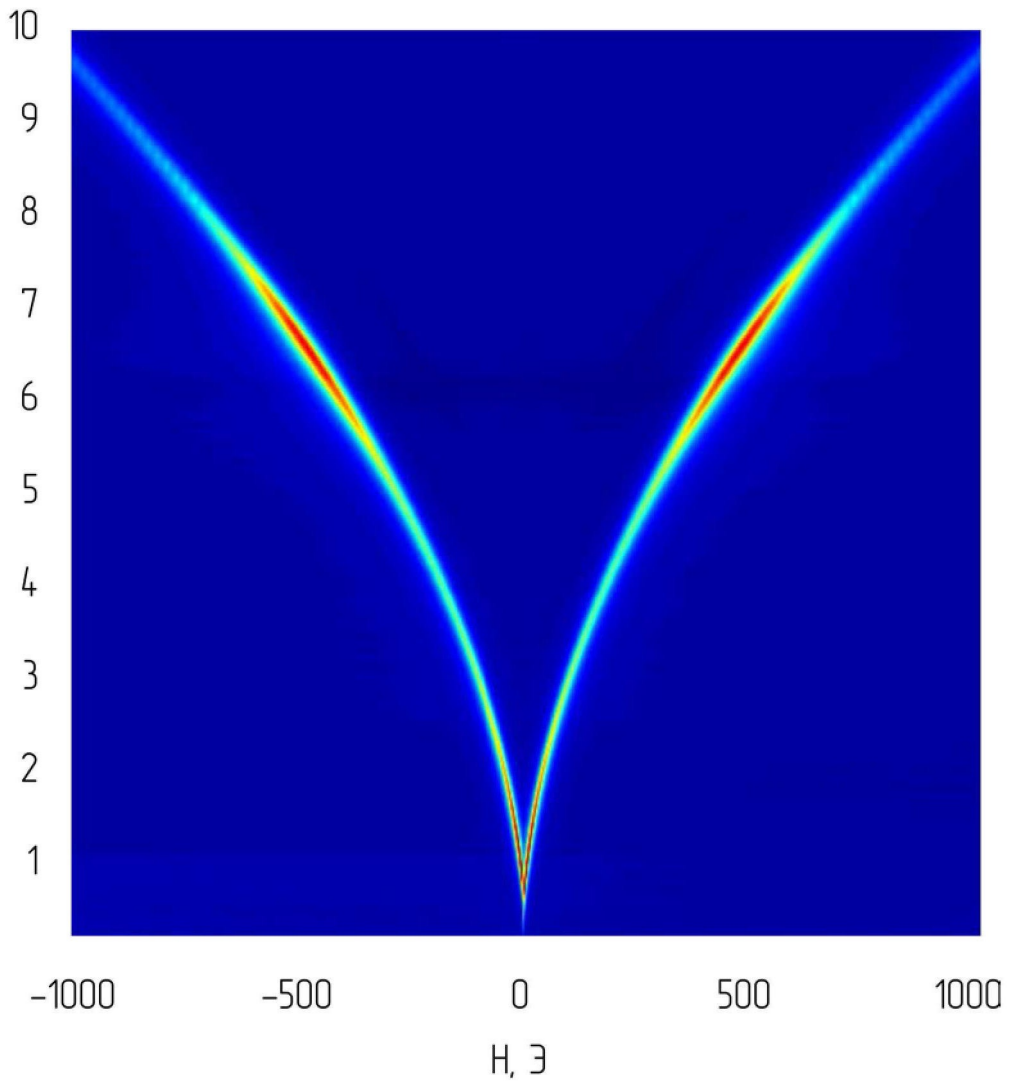
EFFECT: providing the possibility of local measurements of the magnetic characteristics of thin-film samples.

1 cl, 9 dwg

RU 2 784 818 C1

RU 2 784 818 C1

$f, \Gamma\Gamma\zeta$



Фиг. 9

R U 2 7 8 4 8 1 8 C 1

R U 2 7 8 4 8 1 8 C 1

Изобретение относится к измерительной технике и предназначено для неразрушающего контроля качества магнитных пленок и изучения их высокочастотных характеристик путем регистрации спектров ферромагнитного резонанса в широкой полосе частот от локальных участков тонкопленочных образцов.

5 Наиболее близким аналогом по совокупности существенных признаков является широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса [Патент РФ RU 2747912 C1, МПК G01R33/05, опубл. 17.05.2021, Бюл. №14 (прототип)], состоящий из векторного анализатора цепей, короткозамкнутой несимметричной полосковой линии, внутри
10 которой размещается исследуемый тонкопленочный образец, магнитной системы, управляемых источников постоянного тока. Короткозамкнутая несимметричная полосковая линия размещается в электромагнитном экране, причем СВЧ-разъем расположен перпендикулярно ее плоскости таким образом, что магнитная система может свободно вращаться вокруг нормали к плоскости полосковой линии. При этом магнитная система формирует магнитное поле в плоскости исследуемого образца двумя
15 ортогональными парами колец Гельмгольца, питание которых осуществляется от двух независимых управляемых источников постоянного тока.

Существенным недостатком конструкции прототипа является невозможность проведения локальных измерений магнитных характеристик тонкопленочных образцов, т.е. измерений параметров с участка образца площадью значительно меньшей, чем
20 площадь всего образца.

Техническим результатом заявляемого изобретения является обеспечение возможности проведения локальных измерений магнитных характеристик тонкопленочных образцов.

Заявляемый технический результат достигается за счет того, что в локальном
25 широкополосном спектрометре ферромагнитного резонанса, содержащем векторный анализатор цепей, размещенную в электромагнитном экране короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, управляемые источники постоянного тока, питающие две пары ортогональных колец Гельмгольца, новым является то, что в экране несимметричной полосковой линии выполнено отверстие, а образец тонкой магнитной
30 пленки размещается с внешней стороны электромагнитного экрана таким образом, чтобы исследуемый участок образца находился напротив отверстия в экране, при этом устройство дополнительно содержит трехкомпонентную магнитную систему, предназначенную для компенсации лабораторного магнитного поля.

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что заявляемое устройство
35 отличается наличием отверстия в экране несимметричной полосковой линии. Вблизи этого отверстия снаружи электромагнитного экрана несимметричной полосковой линии создается высокочастотное магнитное поле, взаимодействующее с локальным участком измеряемого образца.

Вторым существенным отличием является размещение исследуемого образца –
40 снаружи электромагнитного экрана несимметричной полосковой линии. При этом образец размещается таким образом, чтобы исследуемый участок пленки оказался вблизи отверстия в экране несимметричной полосковой линии.

Третьим существенным отличием является наличие дополнительной
45 трехкомпонентной магнитной системы, позволяющей скомпенсировать паразитное лабораторное магнитное поле (в том числе магнитное поле Земли).

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 техническому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

5 Данное изобретение поясняется чертежами. На фиг. 1 показана общая схема устройства, а на фиг. 2 и фиг. 3 показан конкретный пример реализации локального широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса. На фиг. 4 отдельно показана магнитная система компенсации лабораторного магнитного поля. На фиг. 5 отображен столик с измеряемым образцом и чувствительный элемент устройства, конструкция которого показана на фиг. 6. На фиг. 7 и фиг. 8 показано распределение амплитуды высокочастотного магнитного поля вблизи измерительного отверстия чувствительного элемента устройства. На фиг. 9 приведены в качестве примера результаты работы локального широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса.

15 Локальный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса содержит (фиг. 1) столик (1), на котором размещается измеряемый образец (2). Над образцом (2) закреплен чувствительный элемент (3) устройства, подключенный к векторному анализатору цепей (4). Столик (1) с образцом (2) соединен с системой позиционирования (5), позволяющей перемещать столик (1) и, соответственно, образец (2) в четырех координатах – в плоскости XYZ и вращение R. Столик (1) с образцом (2) и чувствительный элемент (3) находятся внутри двух пар ортогональных колец Гельмгольца – внутренних (6) и внешних (7). Кольца Гельмгольца (6) и (7) закреплены на полой оси (8), которая может вращаться с помощью привода (9). Также кольца Гельмгольца (6) и (7) расположены внутри трехкомпонентной магнитной системы компенсации лабораторного магнитного поля, состоящей из трех пар катушек (20) Фанселау (10), (11) и (12), подключенных к трехканальному источнику тока (13). Кольца Гельмгольца (6) и (7) подключены к двухканальному источнику тока (14). Управление источниками тока (13) и (14), а также векторным анализатором цепей (4), системой позиционирования (5) и приводом (9) осуществляется специализированным программным обеспечением, работающим на персональном компьютере.

30 На фиг. 2 показан пример реализации локального широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса. На алюминиевой стойке (15) с верхней стороны размещается векторный анализатор цепей (16), внутри стойки (15) закреплены алюминиевые пластины (17) и (18), связанные между собой колоннами (19). На пластине (18) закреплен (фиг. 3) опорный подшипник с вращающейся платформой (20), приводимой в движение через ременную передачу (21) шаговым двигателем (22). Таким образом, вращательное движение от двигателя (22) передается к кольцам Гельмгольца (23) и (24). Через внутренне отверстие опорного подшипника на пластине (18) неподвижно закреплен механизм перемещения столика (25), включающий поворотную ось R (26), линейные ось X (27), ось Y (28) и ось Z (29). Приводы осей (40) подключены к драйверам и управляются программным обеспечением на персональном компьютере. На верхней пластине (17) размещен механизм юстировки (30) чувствительного элемента (31), позволяющий перемещать в плоскости XY чувствительный элемент (31) и настраивать его положение относительно оси вращения R (26) столика (25). На фиг. 4 показана трехкомпонентная магнитная система компенсации лабораторного магнитного поля, состоящая из трех пар катушек Фанселау (32), (33) и (34). Магнитная система закреплена неподвижно на верхней пластине (17 на фиг. 3). Внутри магнитной системы вращаются кольца Гельмгольца (23) и (24), с верхней стороны которых размещается держатель (35) чувствительного

элемента (31 на фиг. 5), а с нижней стороны размещается столик (25) с образцом (36). На фиг. 6 показана конструкция чувствительного элемента (31). В закрытом металлическом корпусе (37) с верхней части размещается СВЧ-разъем (38), а с нижней части – металлизированная подложка (39). В металлизации (40) с нижней стороны подложки (39) вытравлено измерительное отверстие (41), над которым с другой стороны подложки (39) расположена полосковая линия (42). С одной стороны линия (42) подключена к разъему (38), а с другой – закорочена на корпус (37). На фиг. 7 показано нормированное распределение амплитуды высокочастотного магнитного поля вблизи измерительного отверстия (41) на расстоянии 0,3 мм от внешней стороны металлизации (40). Полосковая линия (42) на фиг. 7 ориентирована вертикально, частота равна 1 ГГц. На фиг. 7 нанесены вспомогательные ортогональные линии (43) и (44), проходящие через центр отверстия (41). На фиг. 8 показаны нормированные зависимости амплитуды высокочастотного магнитного поля возле измерительного отверстия (41) вдоль линий (43) и (44), отмеченных на фиг. 7. Например, зависимость (45) получена по линии (44), проходящей через центр отверстия (41) перпендикулярно полосковой линии (42), а зависимость (46) – по линии (43), проходящей через центр отверстия (40), но вдоль полосковой линии (42). Зависимости (45) и (46) получены на расстоянии 0,1 мм от внешней стороны металлизации (40), зависимости (47) и (48) на расстоянии 0,3 мм, а зависимости (49) и (50) – на расстоянии 0,5 мм. Все зависимости (45–50) получены для измерительного отверстия (41) диаметром 2 мм. Из зависимостей видно, что диаметр области измерений по уровню $1/\sqrt{2}$ примерно равен диаметру измерительного отверстия (41). Неоднородность поля вдоль линии (44), показанная на зависимостях (45), (47) и (49), вызвана нарушением целостности металлизации (40) измерительным отверстием (41). СВЧ-токи в металлизации (40) вынуждены огибать препятствие в виде отверстия (41) по пути с наименьшим импедансом, т.е. по краям отверстия (41), где образуется область повышенной плотности тока. С изменением расстояния между металлизацией (40) и измеряемым образцом (36) происходит изменение распределения амплитуды СВЧ-поля вблизи измерительного отверстия (41). Измерения должны проводиться на расстоянии более 0,1 мм, так как на меньших расстояниях высокочастотное магнитное поле существенно неоднородно.

Локальный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса работает следующим образом. С помощью механизма юстировки (30) (фиг. 3) добиваются соосности оси вращения R (26) и измерительного отверстия (41) (фиг. 6) чувствительного элемента (31). С помощью компенсационной магнитной системы, состоящей (фиг. 4) из катушек Фанселау (32), (33), (34), компенсируют внешнее лабораторное магнитное поле таким образом, чтобы в области размещения чувствительного элемента наблюдалось минимальное значение постоянного магнитного поля, создаваемого Землей и другими источниками, например, лабораторным оборудованием. На измерительном столике (25) (фиг. 5) размещают измеряемый образец (36) таким образом, чтобы тонкая магнитная пленка была обращена к чувствительному элементу (31). В программном обеспечении на персональном компьютере настраивают величины шагов и диапазон перемещений измеряемого образца (36), а также диапазон и шаг развертки по постоянному магнитному полю и по частоте. По командам от программного обеспечения измерительный столик (25) с измеряемым образцом (36) перемещается, при этом в каждом фиксированном положении векторным анализатором цепей (16) (фиг. 3) измеряется зависимость комплексного параметра S_{11} от частоты при фиксированном поле, создаваемом кольцами Гельмгольца (23). Калибровка векторного анализатора цепей (16) осуществляется с

помощью колец Гельмгольца (23) и (24) при параллельных СВЧ-поле и постоянном магнитном поле. Таким образом, для одного фиксированного положения столика измеряется ряд частотных зависимостей комплексного параметра S_{11} от частоты при различных фиксированных значения постоянного магнитного поля. Комплексные зависимости параметра S_{11} пересчитываются в комплексные зависимости параметра Z_{11} , а затем в значения комплексной магнитной проницаемости μ локального участка измеряемого образца.

Исследовательские испытания заявленного локального широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса показали, что заявленный технический результат достигнут – устройство обеспечивает возможность проведения локальных измерений параметров ферромагнитного резонанса тонких магнитных пленок. Для примера, на фиг. 9 показаны результаты измерений локального участка диаметром 2 мм пленки пермаллоя $Ni_{80}Fe_{20}$ толщиной 100 нм, полученные при развертке по полю в диапазоне от плюс 1000 Э до минус 1000 Э, в частотном диапазоне от 0,1 ГГц до 10 ГГц. На трехмерной зависимости цветом показана амплитуда поглощения СВЧ-энергии локальным участком измеряемого образца.

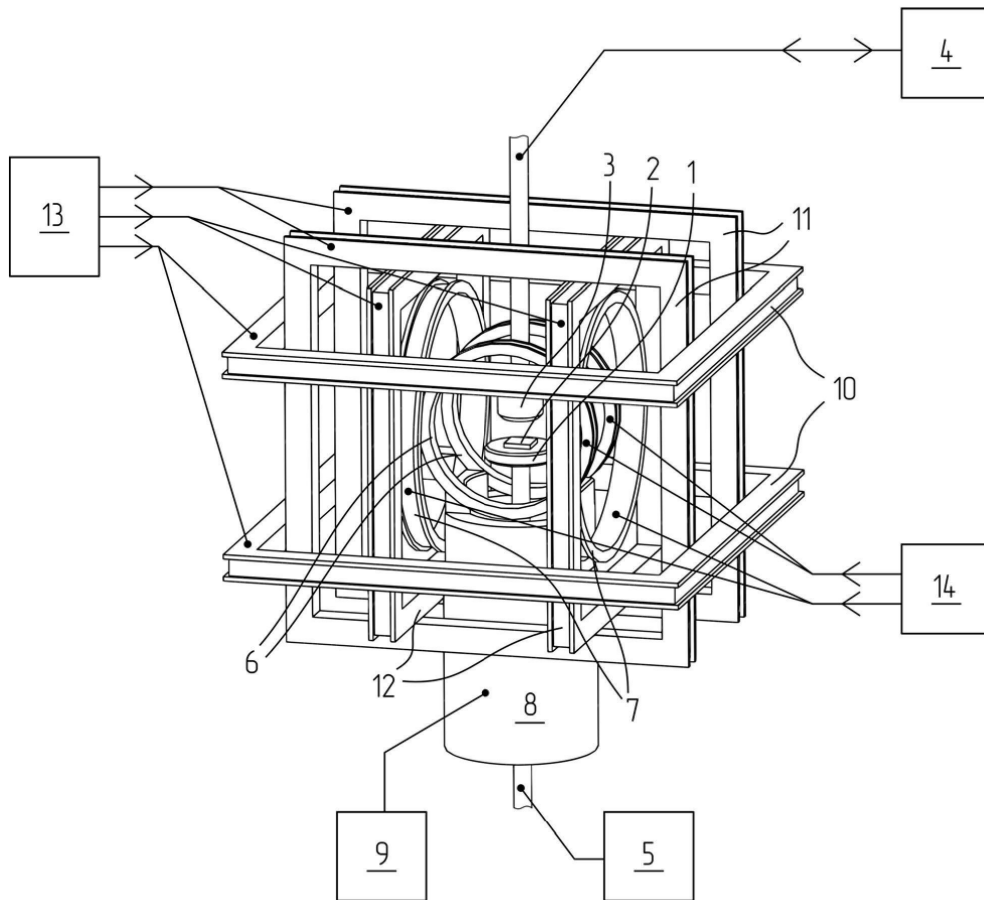
Важно отметить, что проведение локальных измерений дает возможность не только оценить величины дисперсий магнитных параметров тонкопленочных образцов по их площади, но и наблюдать эффекты, которые нивелируются за счет усреднения при классических измерениях образца, полностью находящегося внутри СВЧ-линии.

(57) Формула изобретения

Локальный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса, содержащий векторный анализатор цепей, размещенную в электромагнитном экране короткозамкнутую несимметричную полосковую линию, управляемые источники постоянного тока, питающие две пары ортогональных колец Гельмгольца, отличающийся тем, что в экране несимметричной полосковой линии выполнено отверстие, а образец тонкой магнитной пленки размещается с внешней стороны электромагнитного экрана таким образом, чтобы исследуемый участок образца находился напротив отверстия в экране, при этом устройство дополнительно содержит трехкомпонентную магнитную систему, предназначенную для компенсации лабораторного магнитного поля.

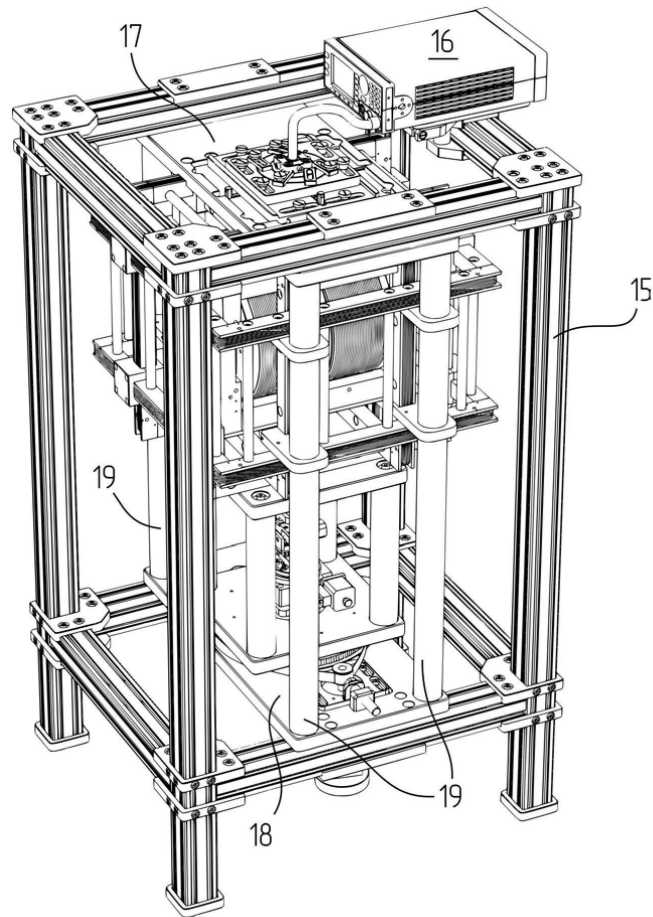
1

1/9

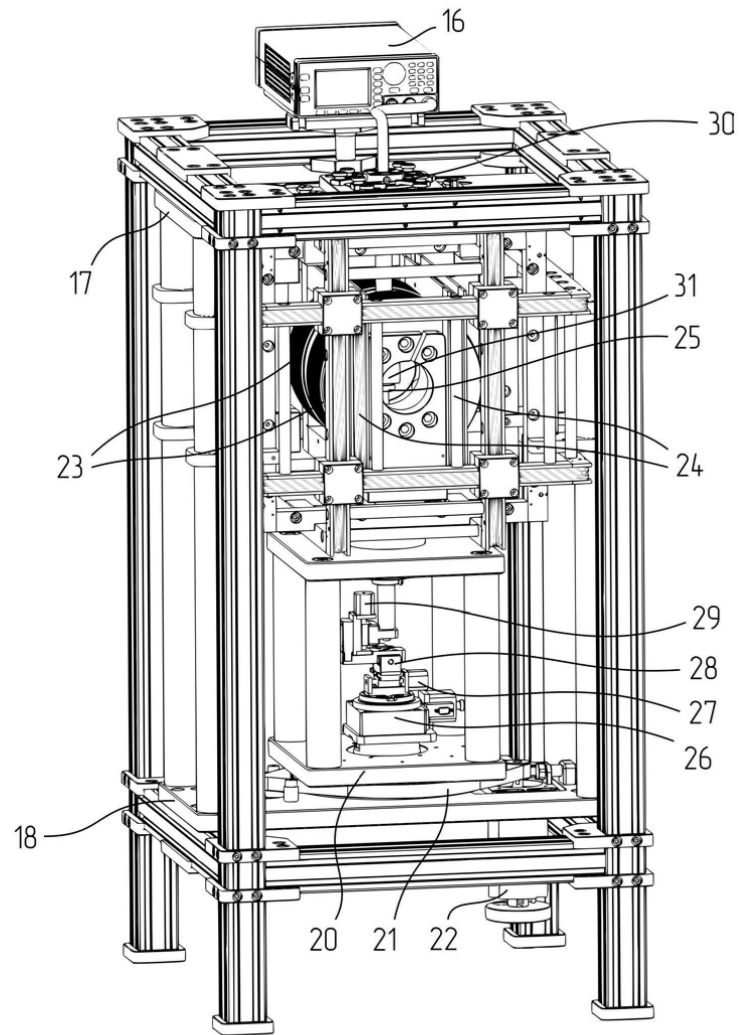


Фиг. 1

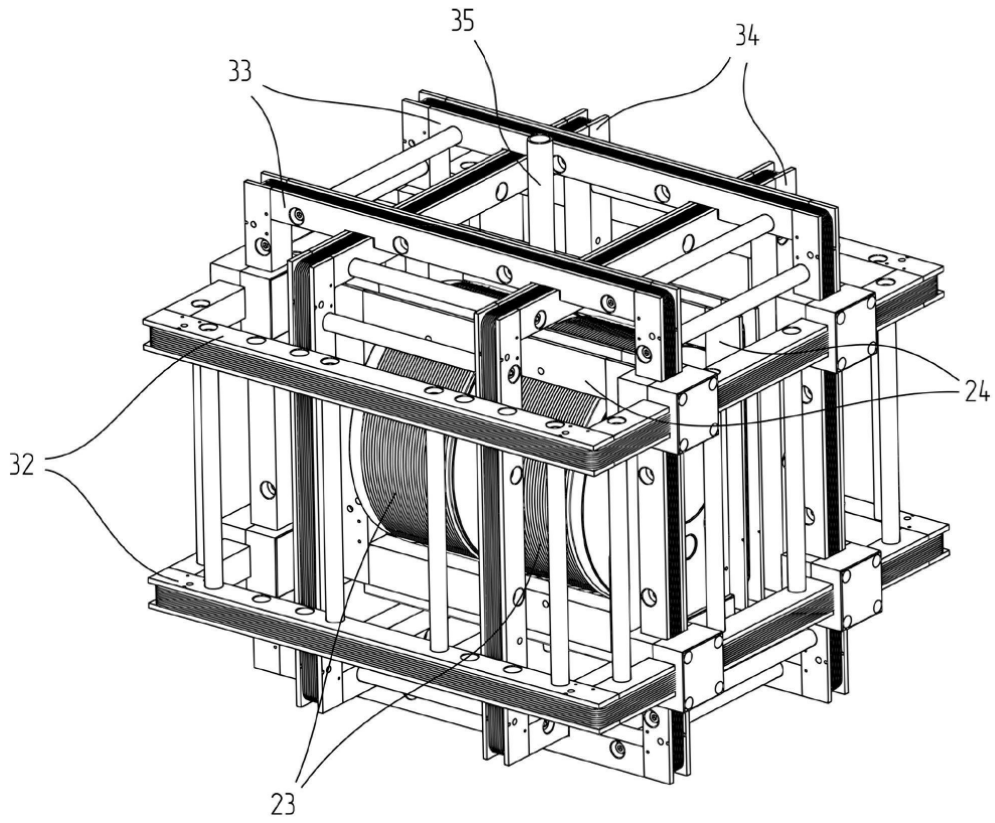
2



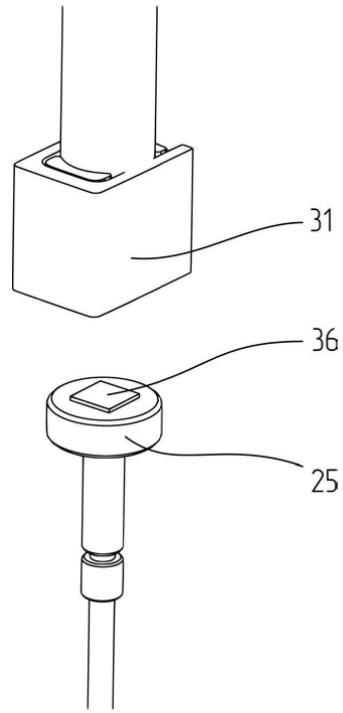
Фиг. 2



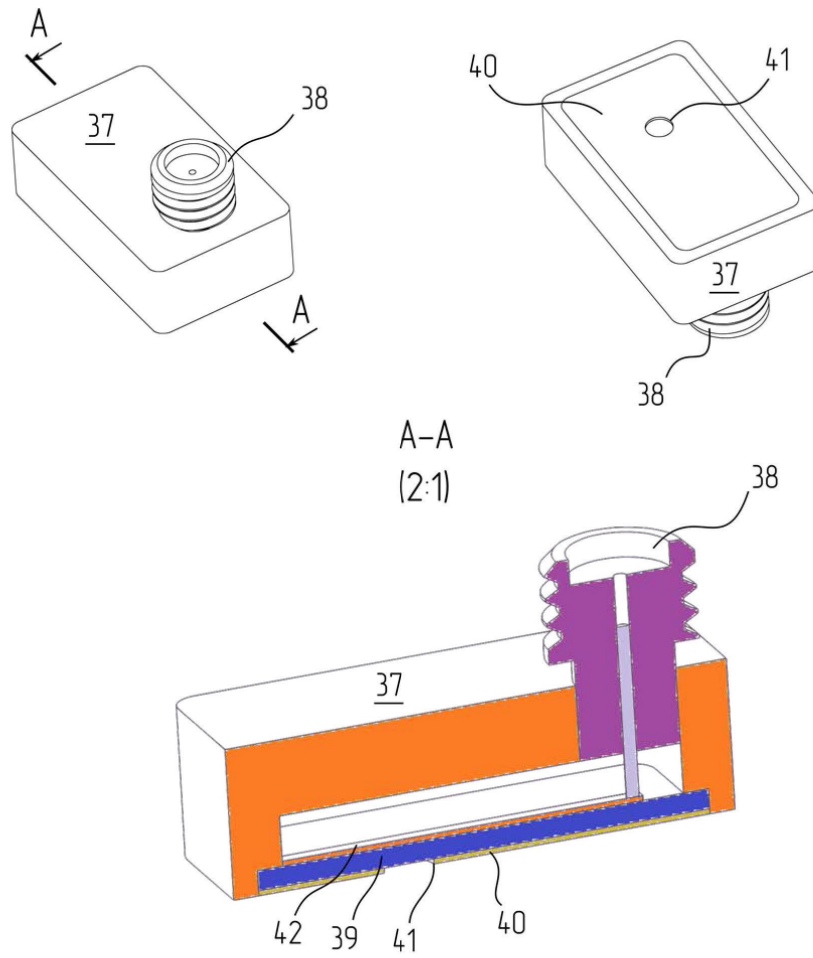
Фиг. 3



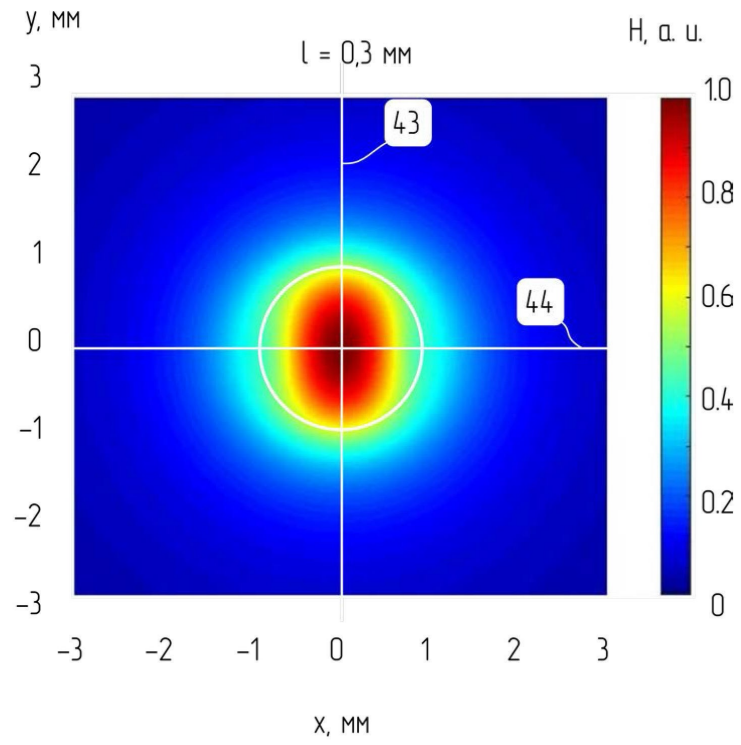
Фиг. 4



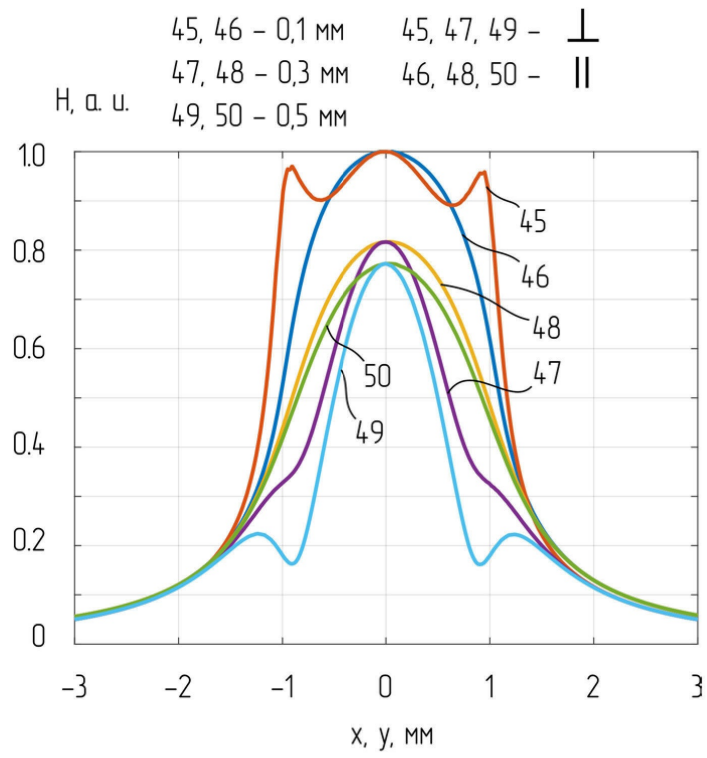
Фиг. 5



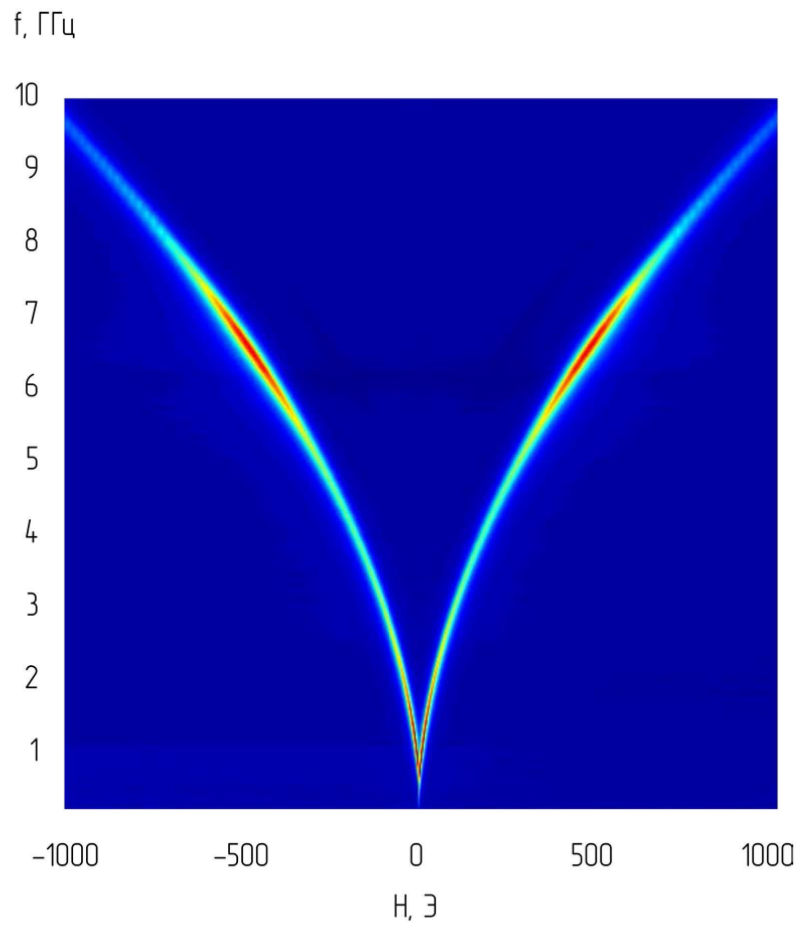
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9