



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 33/1215 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019111804, 18.04.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.04.2019

Дата регистрации:
14.02.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.04.2019

(45) Опубликовано: 14.02.2020 Бюл. № 5

Адрес для переписки:
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.
38, ИФ СО РАН, отдел патентной и
изобретательской работы

(72) Автор(ы):

Бабицкий Александр Николаевич (RU),
Беляев Борис Афанасьевич (RU),
Клешнина Софья Андреевна (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)

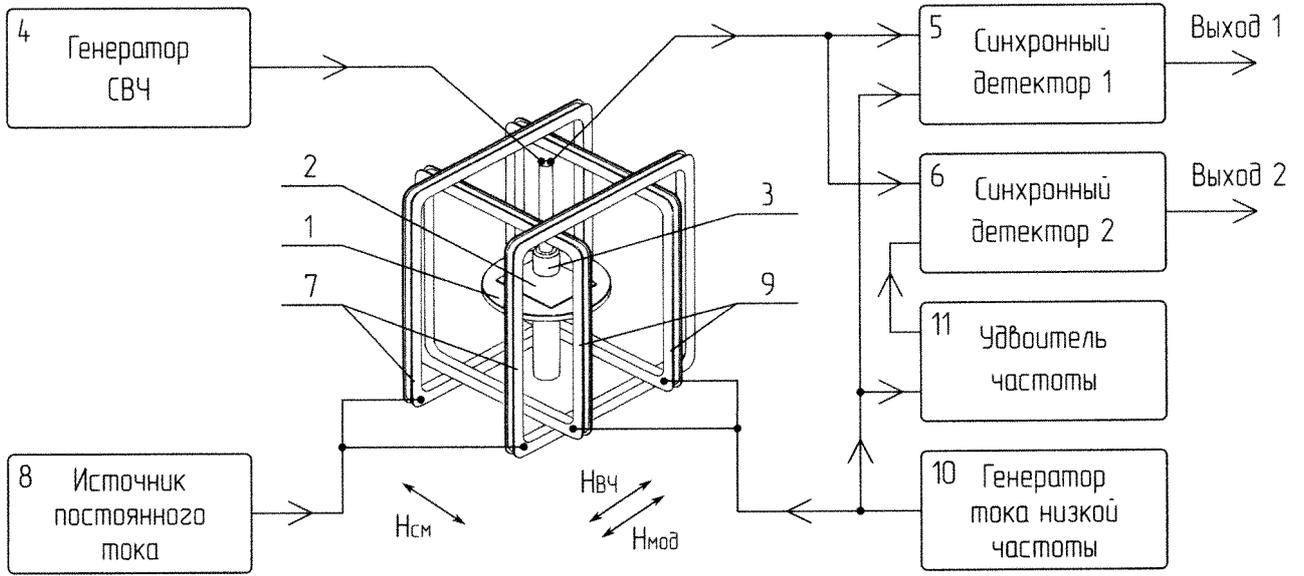
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 3254298 A, 31.05.1966. RU 2682076
C1, 14.03.2019. RU 183446 U1, 24.09.2018. RU
43654 U1, 27.01.2005. US 4112367 A1, 05.09.1978.

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Группа изобретений относится к измерительной технике и предназначена для неразрушающего контроля качества и однородности тонких магнитных пленок. Сущность изобретения заключается в том, что измеряют производную от величины поглощения электромагнитной энергии СВЧ-поля образцом, который помещается в скрещенные высокочастотное магнитное поле и постоянное магнитное поле, причем параллельно высокочастотному магнитному полю формируется модулирующее магнитное поле. Две схемы синхронного детектирования используются для измерения переменной составляющей напряжения на резонаторе с частотой модулирующего поля и с его удвоенной частотой. Измерения проводят путем изменения величины постоянного магнитного поля от нуля до

величины, большей поля анизотропии образца по сигналам с выходов синхронных детекторов, максимум зависимости сигнала со второго синхронного детектора наблюдается при постоянном магнитном поле, равном полю анизотропии. При фиксированном значении постоянного магнитного поля изменяют угол между направлением высокочастотного магнитного поля возбуждения и осью анизотропии образца, измеряют угловую зависимость с выхода первого синхронного детектора. Центральное значение между экстремумами полученной зависимости соответствует направлению поля анизотропии. Технический результат – повышение чувствительности измерений магнитных характеристик тонкопленочных ферромагнитных образцов. 2 н.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг. 2

RU 2714314 C1

RU 2714314 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11)**2 714 314** (13) **C1**(51) Int. Cl.
G01R 33/12 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC
G01R 33/1215 (2019.08)(21)(22) Application: **2019111804, 18.04.2019**(24) Effective date for property rights:
18.04.2019Registration date:
14.02.2020

Priority:

(22) Date of filing: **18.04.2019**(45) Date of publication: **14.02.2020** Bull. № 5

Mail address:

**660036, g. Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, str.
38, IF SO RAN, otdel patentnoj i izobretatelskoj
raboty**

(72) Inventor(s):

**Babitskij Aleksandr Nikolaevich (RU),
Belyaev Boris Afanasevich (RU),
Kleshnina Sofya Andreevna (RU),
Boev Nikita Mikhajlovich (RU),
Izotov Andrej Viktorovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe
nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyj
issledovatel'skij tsentr "Krasnoyarskij nauchnyj
tsentr Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii
nauk" (RU)**(54) **METHOD OF MEASURING MAGNETIC CHARACTERISTICS OF FERROMAGNETIC FILMS AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: group of inventions relates to measurement equipment and is intended for nondestructive testing of quality and homogeneity of thin magnetic films. Essence of the invention consists in the fact that the derivative is measured from the value of absorption of electromagnetic energy of the microwave field by a sample which is placed in a crossed high-frequency magnetic field and a constant magnetic field, wherein a high-frequency magnetic field is parallel to a modulating magnetic field. Two synchronous detection circuits are used to measure variable component of voltage on resonator with frequency of modulating field and with its double frequency. Measurements are carried out by varying the value of the constant magnetic field from zero to a

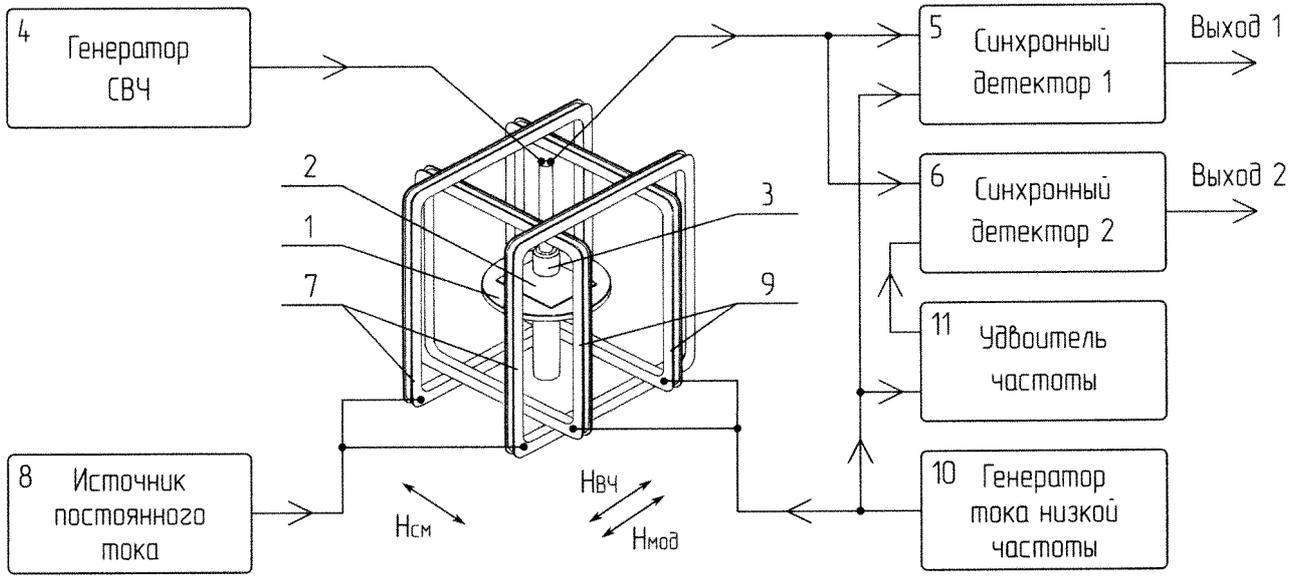
value greater than the field of anisotropy of the sample from signals from the outputs of synchronous detectors, the maximum dependence of the signal from the second synchronous detector is observed at a constant magnetic field equal to the anisotropy field. At fixed constant magnetic field angle between direction of high-frequency excitation magnetic field and sample anisotropy axis is changed, angular dependence is measured from output of first synchronous detector. Central value between the extrema of the obtained dependence corresponds to the direction of the anisotropy field.

EFFECT: high sensitivity of measuring magnetic characteristics of thin-film ferromagnetic samples.

2 cl, 7 dwg

RU 2 714 314 C1

RU 2 714 314 C1



Фиг. 2

RU 2714314 C1

RU 2714314 C1

Заявляемое изобретение относится к измерительной технике и предназначено для неразрушающего контроля качества и однородности тонких магнитных пленок.

Известен способ измерения магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок с помощью осциллографирования петель гистерезиса при перемагничивании пленок [Суху, Р. Магнитные тонкие пленки, М.: Мир, 1967]. Метод осциллографирования петель гистерезиса реализуется с помощью прибора (петлескопа), который дает возможность наблюдать на экране осциллографа зависимости изменения магнитного момента образца от приложенного к нему поля. Исследуемая магнитная пленка размещается в центре намагничивающих колец Гельмгольца, причем образец помещается в регистрирующую сигнал катушку, или вблизи ее. Для компенсации напряжения в съемной катушке, наводимого в отсутствие пленки, дополнительно вводят компенсационную катушку. Обе катушки размещают симметрично относительно центра измерительной системы и соединяют последовательно навстречу друг другу. Выходной сигнал с катушек подают на интегрирующий усилитель. Генератор звуковой частоты через усилитель мощности подключается к намагничивающим катушкам. Для регистрации петли гистерезиса используют осциллограф, напряжение горизонтальной развертки которого снимается с сопротивления, включенного последовательно с намагничивающей катушкой, а напряжение вертикальной развертки снимается с выхода интегрирующего усилителя. Характеристики образца определяются по форме петли гистерезиса. Способ позволяет проводить измерения таких величин, как суммарный магнитный момент, остаточный магнитный момент, коэрцитивную силу и величину поля анизотропии.

Однако известный способ не обеспечивает высокой точности измерений магнитных характеристик тонкопленочных образцов. Кроме этого, метод не позволяет проводить измерения на локальных участках пленок.

Известно устройство для измерения магнитных свойств тонких ферромагнитных образцов [Авт. св-во СССР, №304529, МПК G01R 33/12, опубл. 25.05.1971, бюл. №17], предназначенное для исследований тонких магнитомягких и магнито жестких образцов. Устройство содержит генератор тока высокой частоты, возбуждающую, управляющую и измерительную обмотки, внутри которых размещается исследуемый образец. Возбуждающая обмотка подключается к генератору тока высокой частоты, управляющая обмотка соединена с регулируемым источником постоянного тока, а измерительная обмотка подключена к резонансному усилителю, на выходе которого включен вольтметр. Измеряя напряжение вольтметром при различных значениях постоянного магнитного поля и вычисляя соответствующие им величины дифференциальной проницаемости образца, строят ее зависимость от напряженности постоянного магнитного поля и по максимуму этой зависимости определяют коэрцитивную силу образца. При измерении продольной дифференциальной проницаемости постоянное магнитное поле ориентируют вдоль высокочастотного магнитного поля, а при измерении поперечной дифференциальной проницаемости - перпендикулярно высокочастотному магнитному полю. Напряженность поля анизотропии тонкого образца определяют по максимуму поперечной дифференциальной проницаемости вдоль легкой оси тонкого ферромагнитного образца при действии постоянного поля вдоль оси трудного намагничивания образца.

Недостатком известного устройства является отсутствие возможности проведения измерений магнитных характеристик на локальных участках тонкопленочных образцов.

Известно также устройство для измерения напряженности поля анизотропии тонких магнитных пленок [Авт. св-во СССР, №746362, МПК G01R 33/12, опубл. 07.07.1980,

бюл. №25]. Сверху над исследуемым образцом тонкой магнитной пленки располагается возбуждающий элемент, выполненный в виде проводника, подключенного к генератору тока звуковой частоты, и чувствительный элемент - датчик магнитного поля переключения пленки. В области размещения исследуемого образца создается внешнее перемещающее поле кольцами Гельмгольца, подключенными к выходу генератора прямоугольных импульсов. Полезный сигнал снимается с чувствительного элемента и поступает в блок обработки сигналов, на выходе которого получают величину напряженности поля анизотропии тонкой магнитной пленки. Отличительной особенностью конструкции является возможность сканирования по площади образца путем взаимного перемещения датчика и образца, т.е. устройство позволяет проводить измерения магнитных характеристик на локальных участках тонких магнитных пленок.

Недостатком известного устройства является его низкая чувствительность и ограниченная степень локальности проводимых измерений, что не позволяет измерять распределения магнитных характеристик по площади пленки с высокой детализацией.

Известен прибор для измерения параметров тонких магнитных пленок, выбранный в качестве прототипа [Пат. США, №3254298, опубл. 31.05.1966 (прототип)]. Исследуемый образец тонкой магнитной пленки на подложке располагается на измерительной платформе, закрепленной внутри колец Гельмгольца. Платформа может вращаться на 360° в плоскости пленки относительно поля, создаваемого кольцами Гельмгольца.

Сверху над образцом закреплен датчик, который может вращаться вокруг своей оси и перемещаться в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, что позволяет проводить измерения на образцах с различной толщиной подложек и с разной степенью локальности измерений. Установка обеспечивает вращение датчика и измерительной платформы вокруг одной оси. Исследуемый образец перемещается под датчиком по измерительной платформе в двух направлениях с помощью микрометрических винтов. На оси вращения датчика установлен диск с лимбом, к которому прикреплено перо самописца. Диск приводится в движение оператором или с помощью электромотора. Датчик представляет собой стержень, на котором закреплены два скрещенных на его торце проводника. Проводники отводятся от торца стержня и витой парой проводов подключаются к электронному блоку. Диаметр стержня определяет степень локальности измерений, изготовлены стержни диаметром от 0.254 до 12.7 мм. К первому проводнику датчика подключен выход высокочастотного генератора с частотой ω_1 , а ко второму подключен выход высокочастотного генератора с частотой ω_2 и, одновременно, вход полосового фильтра. Выход полосового фильтра подключен к избирательному усилителю, настроенному на частоту $\omega_1 + \omega_2$. Выходной сигнал усилителя поступает на детектор, а затем на индикатор. Выходной сигнал детектора служит сигналом обратной связи для электромотора, поворачивающего диск с лимбом.

В конструкции-прототипе используется следующий способ измерений. Образец закрепляется на измерительной платформе под датчиком, имеющим два скрещенных проводника. Первый проводник возбуждают от высокочастотного генератора с частотой ω_1 , второй проводник возбуждают от другого высокочастотного генератора с частотой ω_2 . Магнитные поля, формируемые проводниками, вызывают малые угловые колебания вектора намагниченности исследуемого образца и, как следствие, в спектре сигнала, снимаемого со второго проводника, присутствуют в том числе гармонические составляющие с разностной и суммарной частотами сигналов возбуждения.

Составляющая сигнала с частотой $\omega_1 + \omega_2$ выделяется полосовым фильтром, усиливается, после чего детектором измеряется ее амплитуда. При вращении датчика на 360° вокруг

измерительной оси получают угловую зависимость, на ней выделяют нулевые значения, по которым определяют положение магнитного момента. Величина поля анизотропии определяется при развертке постоянного магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания образца, при этом воздействие поперечного магнитного поля величиной H_k приводит к повороту магнитного момента на 90° .

Общим недостатком известных устройств и конструкции-прототипа является низкая чувствительность.

Задача изобретения - создание способа измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок и устройства для его осуществления, обладающих одновременно высокой чувствительностью и возможностью изменения степени локальности проводимых измерений в широких пределах.

Техническим результатом заявляемого изобретения является обеспечение возможности проведения локальных измерений магнитных характеристик тонкопленочных ферромагнитных образцов с высокой чувствительностью за счет проведения измерений на частотах СВЧ-диапазона.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в способе измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, в котором исследуемый образец размещают на измерительном столике с возможностью перемещения в двух координатах в плоскости образца и вращения вокруг оси чувствительного элемента, а чувствительный элемент размещают сверху над образцом с возможностью перемещения в перпендикулярном направлении к плоскости образца и вращения вокруг своей оси, при этом в области размещения образца создают однородное постоянное магнитное поле, направленное параллельно плоскости образца, новым является то, что измеряют производную от величины поглощения электромагнитной энергии СВЧ-поля образцом, находящемся в скрещенных высокочастотном и постоянном магнитных полях, параллельно высокочастотному полю дополнительно формируют модулирующее магнитное поле, высокочастотное магнитное поле создают СВЧ-резонатором, первую схему синхронного детектирования сигнала используют для измерения величины переменной составляющей напряжения на СВЧ-резонаторе с частотой модулирующего поля, а вторую схему синхронного детектирования сигнала - с удвоенной частотой модулирующего поля, при проведении измерений величину постоянного магнитного поля изменяют от нуля до величины большей поля анизотропии исследуемого образца при различных углах между направлением высокочастотного магнитного поля и предполагаемым направлением одной из осей поля анизотропии исследуемого образца, при этом по максимуму сигнала на выходе первой схемы синхронного детектирования определяют примерную величину поля анизотропии исследуемого образца в области измерений, затем при фиксированном значении постоянного магнитного поля, равном или большем поля анизотропии исследуемого образца, образец вращают и измеряют зависимость сигнала на выходе первой схемы синхронного детектирования от величины угла между направлением высокочастотного магнитного поля и предполагаемым направлением оси поля анизотропии исследуемого образца, при этом средняя точка между экстремумами полученной зависимости соответствует искомому направлению поля анизотропии в области измерений, после чего образец устанавливают таким образом, чтобы постоянное магнитное поле было направлено строго вдоль найденной оси трудного намагничивания исследуемого образца, а изменяя величину постоянного поля определяют искомое значение величины поля анизотропии по максимуму сигнала на выходе второй схемы синхронного детектирования, перемещая образец относительно СВЧ-резонатора измеряют распределения магнитных характеристик по площади

исследуемого образца.

Заявляемый технический результат достигается также и тем, что в устройстве для измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, содержащем систему формирования постоянного магнитного поля смещения, включающую управляемый источник постоянного тока и устройство создания однородного магнитного поля в плоскости исследуемого образца, систему перемещения и вращения исследуемого образца, систему перемещения и вращения чувствительного элемента, чувствительный элемент, новым является то, что устройство дополнительно содержит систему формирования модулирующего магнитного поля, включающую генератор тока низкой частоты и устройство создания однородного магнитного поля в плоскости исследуемого образца, чувствительный элемент, состоящий из СВЧ-резонатора, подключаемого к СВЧ-генератору, и амплитудного детектора, при этом индуктивной частью СВЧ-резонатора, выполненной в виде расположенного над локальным участком исследуемого образца отрезка проводника, создается высокочастотное магнитное поле, причем постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно направлениям высокочастотного магнитного поля и модулирующего магнитного поля, первую схему синхронного детектирования сигнала, к входу которой подключены выход амплитудного детектора чувствительного элемента и выход генератора тока низкой частоты, вторую схему синхронного детектирования, к входу которой подключены выход амплитудного детектора чувствительного элемента и, через удвоитель частоты, подключен выход генератора тока низкой частоты, а выходные сигналы первой и второй схем синхронного детектирования являются выходными сигналами устройства.

Заявляемая группа изобретений соответствует требованию единства изобретения, поскольку группа разнообъектных изобретений образует единый изобретательский замысел, причем один из заявляемых объектов - устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, предназначен для осуществления способа измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, при этом оба объекта группы изобретений направлены на решение одной и той же задачи с получением единого технического результата.

Сопоставительный анализ с прототипами позволил выявить совокупность существенных по отношению к техническому результату отличительных признаков для каждого из заявляемых объектов группы, изложенных в формулах. Следовательно, каждый из объектов группы изобретений соответствует критерию «новизна».

Признаки, отличающие заявляемые технические решения от прототипа, не выявлены в других технических решениях при изучении данных и смежных областей техники и, следовательно, обеспечивают заявляемым решениям соответствие критерию «изобретательский уровень».

Осуществление заявляемого способа измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок поясняется с помощью чертежа. На фиг. 1 показаны: а - направления полей в измерительной установке; б, в - результаты измерений сигналов на выходе первой схемы синхронного детектирования.

Пример осуществления способа измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок. Тонкопленочный образец нестрикционного состава пермаллоя $Ni_{80}Fe_{20}$, обладающий одноосной магнитной анизотропией, был помещен в скрещенные магнитные поля (фиг. 1, а): $H_{см}$ - постоянное магнитное поле смещения; $H_{вч}$ - высокочастотное магнитное поле возбуждения; $H_{мод}$ - низкочастотное магнитное поле модуляции. Постоянное магнитное поле $H_{см}$ создавалось катушками Фанселау и

направлено вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) образца. Высокочастотное магнитное поле возбуждения формировалось индуктивной частью СВЧ-резонатора и направлено перпендикулярно полю $H_{см}$, т.е. вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) образца. Низкочастотное магнитное поле модуляции создавалось катушками Фанселау и направлено параллельно высокочастотному магнитному полю возбуждения (вдоль ОЛН тонкопленочного образца). Была предусмотрена возможность вращения образца вокруг точки измерения. Амплитуда колебаний в СВЧ-резонаторе фиксировалась амплитудным детектором. Перед началом измерений установлены следующие параметры: поле $H_{см} = 0$ Э, угол α между $H_{см}$ и ОТН равен 0° ; частота поля $H_{вч}$ соответствовала резонансной частоте СВЧ-резонатора ~ 500 МГц; амплитуда поля $H_{мод} = 0.1$ Э, частота поля $H_{мод}$ - 1 кГц. После этого, путем вращения образца вокруг точки измерений, произведено изменение угла α на небольшую величину - до плюс 10° . Затем амплитуда поля $H_{см}$ изменялась от нуля примерно до значения, равного $2 \cdot H_k$, где H_k - величина поля анизотропии образца. При этом с помощью первой схемы синхронного детектирования регистрировалась величина переменной составляющей сигнала на выходе амплитудного детектора с частотой, равной частоте поля модуляции $H_{мод}$. Полученная зависимость отображена на фиг. 1, б. Максимум этой зависимости наблюдается примерно при поле $H_{см} \approx H_k$ (истинное значение величины поля анизотропии меньше этой величины), для исследуемого образца $H_k \approx 5,2$ Э. Затем величина поля $H_{см}$ была зафиксирована равной $5,2$ Э и измерены зависимости сигнала на выходе первого синхронного детектора от угла α (фиг. 1, в). После чего определены значения угла α для минимума ($\alpha_{мин}$) и максимума ($\alpha_{макс}$) полученной зависимости, а также рассчитано среднее значение угла $\alpha_0 = (\alpha_{мин} + \alpha_{макс})/2$, соответствующее истинному направлению поля анизотропии. Для исследуемого образца $\alpha_{мин} = -10^\circ$, $\alpha_{макс} = 10^\circ$, $\alpha_0 = 0^\circ$, т.е. в области проведения измерений направление оси трудного намагничивания совпало с направлением постоянного магнитного поля смещения. Далее с использованием второго синхронного детектора, настроенного на измерение величины переменной составляющей сигнала на выходе амплитудного детектора с частотой, равной удвоенной частоте поля модуляции $H_{мод}$, проведены измерения сигнала от величины постоянного магнитного поля смещения при $\alpha = 0^\circ$. Максимум полученной зависимости соответствует истинному значению величины поля анизотропии в области проведения измерений, уточненная величина поля анизотропии составила $H_k = 5$ Э. Перемещая индуктивную часть СВЧ-резонатора над образцом и повторяя процесс измерений, получены распределения величин и углов поля анизотропии по площади образца.

Заявляемое устройство измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок поясняется чертежами. На фиг. 2 представлена структурная схема устройства для измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок. На фиг. 3 показана конструкция устройства для измерений магнитных характеристик ферромагнитных пленок. На фиг. 4 отображено пятикоординатное устройство для перемещения и вращения исследуемого образца, а также для перемещения и вращения чувствительного элемента. На фиг. 5 показана конструкция чувствительного элемента. На фиг. 6 приведен печатный узел чувствительного элемента. На фиг. 7 показан пример измерений распределения амплитуды поля анизотропии по площади образца.

Устройство измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок состоит из (фиг. 2) измерительного столика (1), на котором размещается исследуемый образец

(2). Сверху над образцом (2) размещается чувствительный элемент (3), вход которого подключен к СВЧ-генератору (4), а выход - одновременно к первому синхронному детектору (5) и ко второму синхронному детектору (6). При измерении характеристик тонкопленочных образцов толщиной более 500 Å применение схем синхронного детектирования не обязательно - измерение амплитуд переменных составляющих напряжения может быть произведено с помощью осциллографа (при необходимости дополнительно используются полосовые фильтры на частоту модулирующего магнитного поля и на его удвоенную частоту). Постоянное магнитное поле смещения $H_{см}$ в области размещения образца (2) формируется катушками (7) Фанселау, которые подключены к источнику постоянного тока (8). Переменное модулирующее магнитное поле $H_{мод}$ создается вторыми катушками (9) Фанселау, подключенными к генератору (10) тока низкой частоты. Катушки (7) и (9) Фанселау расположены ортогонально друг другу и создают магнитное поле в плоскости образца (2). Выходной сигнал генератора (10) тока низкой частоты также является опорным сигналом для первого синхронного детектора (5) и через удвоитель (11) частоты подается на второй синхронный детектор (6). Таким образом, первый синхронный детектор (5) предназначен для измерения величины переменной составляющей напряжения на выходе чувствительного элемента с частотой модулирующего магнитного поля, а второй синхронный детектор (6) - составляющей с удвоенной частотой. Выходные сигналы первого синхронного детектора (5) и второго синхронного детектора (6) являются выходными сигналами устройства.

Конструктивно катушки (7) и (9) Фанселау закреплены (фиг. 3) на общем основании (12), на котором также закрепляется пятикоординатная система (фиг. 4), предназначенная для перемещения и вращения исследуемого образца (2), а также для перемещения и вращения чувствительного элемента (3). Исследуемый образец (2) размещается на измерительном столике (1), который с помощью микрометрического винта (13) с маховиком перемещается по салазкам (14) в продольном направлении. Салазки (14) в свою очередь с помощью микрометрического винта (15) с маховиком перемещаются по салазкам (16) в поперечном направлении. Салазки (16) установлены на основании (17) с возможностью вращения вокруг оси чувствительного элемента (3). Таким образом, исследуемый образец (2), находясь на измерительном столике (1), может вращаться вокруг оси чувствительного элемента (3) и перемещаться в двух перпендикулярных направлениях. Чувствительный элемент (3) закреплен с помощью штока на пластине (18) и может вращаться вокруг своей оси с помощью маховика (19). Пластина (18) установлена на каретке (20), способной перемещаться с помощью микрометрического винта (21) с маховиком в вертикальном направлении, перпендикулярном плоскости исследуемого образца (2). Таким образом, чувствительный элемент (3) может вращаться вокруг и перемещаться вдоль своей оси.

Чувствительный элемент (фиг. 5) состоит из корпуса (22) и печатной платы (23), на которой установлены элементы СВЧ-резонатора, в частности подстроечный конденсатор (24) и амплитудный детектор (25). В корпусе (22) чувствительного элемента имеется отверстие (26), предназначенное для регулировки подстроечного конденсатора (24). На верхней стороне (фиг. 6) печатной платы (23) установлены электрорадиоизделия, а на нижней стороне расположена индуктивная часть (27) СВЧ-резонатора, которая соединяется с электрорадиоизделиями на верхней стороне печатной платы (23) с помощью переходных отверстий. Длина индуктивной части (27) СВЧ-резонатора определяет размеры исследуемой области исследуемого образца (2) и может изменяться в широких пределах, например, от 0.25 до 25 мм. Для этого изготавливают ряд сменных

чувствительных элементов с разной длиной индуктивной части (27) СВЧ-резонатора, что дает возможность изменения степени локальности проводимых измерений в широких пределах.

Устройство измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок работает следующим образом. Исследуемый образец (2) размещается на измерительном столике (1) таким образом, чтобы предполагаемое направление ОТН образца было направлено вдоль направления продольного перемещения измерительного столика (1) и, одновременно, вдоль оси катушек (7) Фанселау. С помощью микрометрических винтов (13) и (15) с маховиками измерительный столик (1) перемещается по салазкам (14) и (16) в продольном и поперечном направлениях таким образом, чтобы предназначенный для измерений участок образца (2) оказался на оси чувствительного элемента. Микрометрическим винтом (21) с маховиком в вертикальном направлении перемещается каретка (20) и, соответственно, чувствительный элемент (3) до его сближения с образцом (2). Катушками (7) Фанселау, подключенными к источнику постоянного тока (8), создается постоянное поле смещения $H_{см}$. Катушками (9) Фанселау, подключенными к генератору (10) тока низкой частоты, создается модулирующее магнитное поле $H_{мод}$. Чувствительный элемент (3) вращается вокруг своей оси с помощью маховика (19) и устанавливается таким образом, чтобы высокочастотное магнитное поле возбуждения $H_{вч}$ было направлено вдоль направления модулирующего магнитного поля $H_{мод}$. Частота СВЧ-генератора (4) устанавливается равной резонансной частоте СВЧ-резонатора чувствительного элемента (3) по максимуму постоянной составляющей сигнала на выходе амплитудного детектора чувствительного элемента (3). При необходимости, резонансная частота изменяется подстроечным конденсатором (24) через отверстие (26) в корпусе (22) чувствительного элемента (3). С помощью первого синхронного детектора (5) происходит измерение величины переменной составляющей напряжения на выходе чувствительного элемента (3) с частотой модулирующего поля $H_{мод}$, с помощью второго синхронного детектора (6) - с удвоенной частотой поля $H_{мод}$. Изменяя величину постоянного магнитного поля смещения $H_{см}$ и вращая образец (2) путем вращения салазок (16) на основании (17), измеряют первым синхронным детектором (5) амплитудные (фиг. 1, б) и угловые (фиг. 1, в) зависимости. По максимуму амплитудной зависимости определяют примерную величину поля анизотропии образца в области исследуемого участка образца (2). По угловой зависимости определяют направление поля анизотропии исследуемого участка образца (2). Вращая исследуемый образец (2) путем вращения салазок (16) на основании (17) устанавливает его таким образом, чтобы постоянное магнитное поле смещения оказалось строго вдоль оси трудного намагничивания пленки. Изменяя величину постоянного магнитного поля смещения $H_{см}$ регистрируют выходной сигнал второго синхронного детектора (6). По максимуму полученной зависимости определяют точное значение величины поля анизотропии образца в исследуемой области. Перемещая образец в продольном и поперечном направлениях с помощью микрометрических винтов (13) и (15) с маховиками, измеряют распределения магнитных характеристик по площади образца (2). На фиг. 7 показано экспериментально полученное распределение величины поля анизотропии по площади образца размерами 60×40 мм.

Предложенный способ измерения магнитных характеристик тонких пленок и устройство для его осуществления могут быть использованы для оценки качества изготавливаемых тонкопленочных образцов, а также для получения качественной и

количественной информации, необходимой для изучения причин возникновения неоднородностей магнитных характеристик по площади пленок. Экспериментальные исследования с использованием заявленного способа и устройства подтвердили их высокую эффективность при отработке технологии получения тонких магнитных пленок.

(57) Формула изобретения

1. Способ измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, в котором исследуемый образец размещают на измерительном столике с возможностью перемещения в двух координатах в плоскости образца и вращения вокруг оси чувствительного элемента, а чувствительный элемент размещают сверху над образцом с возможностью перемещения в перпендикулярном направлении к плоскости образца и вращения вокруг своей оси, при этом в области размещения образца создают однородное постоянное магнитное поле, направленное параллельно плоскости образца, отличающийся тем, что измеряют производную от величины поглощения электромагнитной энергии СВЧ-поля образцом, находящимся в скрещенных высокочастотном и постоянном магнитных полях, параллельно высокочастотному полю дополнительно формируют модулирующее магнитное поле, высокочастотное магнитное поле создают СВЧ-резонатором, первую схему синхронного детектирования сигнала используют для измерения величины переменной составляющей напряжения на СВЧ-резонаторе с частотой модулирующего поля, а вторую схему синхронного детектирования сигнала - с удвоенной частотой модулирующего поля, при проведении измерений величину постоянного магнитного поля изменяют от нуля до величины, большей поля анизотропии исследуемого образца при различных углах между направлением высокочастотного магнитного поля и предполагаемым направлением одной из осей поля анизотропии исследуемого образца, при этом по максимуму сигнала на выходе первой схемы синхронного детектирования определяют примерную величину поля анизотропии исследуемого образца в области измерений, затем при фиксированном значении постоянного магнитного поля, равном или большем поля анизотропии исследуемого образца, образец вращают и измеряют зависимость сигнала на выходе первой схемы синхронного детектирования от величины угла между направлением высокочастотного магнитного поля и предполагаемым направлением оси поля анизотропии исследуемого образца, при этом средняя точка между экстремумами полученной зависимости соответствует искомому направлению поля анизотропии в области измерений, после чего образец устанавливают таким образом, чтобы постоянное магнитное поле было направлено строго вдоль найденной оси трудного намагничивания исследуемого образца, а изменяя величину постоянного поля, определяют искомое значение величины поля анизотропии по максимуму сигнала на выходе второй схемы синхронного детектирования, перемещая образец относительно СВЧ-резонатора, измеряют распределения магнитных характеристик по площади исследуемого образца.

2. Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок, содержащее систему формирования постоянного магнитного поля смещения, включающую управляемый источник постоянного тока и устройство создания однородного магнитного поля в плоскости исследуемого образца, систему перемещения и вращения исследуемого образца, систему перемещения и вращения чувствительного элемента, чувствительный элемент, отличающееся тем, что дополнительно содержит систему формирования модулирующего магнитного поля, включающую генератор тока низкой частоты и устройство создания однородного магнитного поля в плоскости

исследуемого образца, чувствительный элемент, состоящий из СВЧ-резонатора, подключаемого к СВЧ-генератору, и амплитудного детектора, при этом индуктивной частью СВЧ-резонатора, выполненной в виде расположенного над локальным участком исследуемого образца отрезка проводника, создается высокочастотное магнитное поле, причем постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно направлениям высокочастотного магнитного поля и модулирующего магнитного поля, первую схему синхронного детектирования сигнала, ко входу которой подключены выход амплитудного детектора чувствительного элемента и выход генератора тока низкой частоты, вторую схему синхронного детектирования, к входу которой подключены выход амплитудного детектора чувствительного элемента и, через удвоитель частоты, подключен выход генератора тока низкой частоты, а выходные сигналы первой и второй схем синхронного детектирования являются выходными сигналами устройства.

15

20

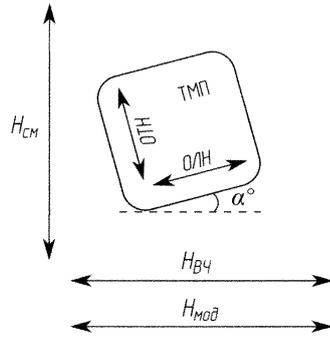
25

30

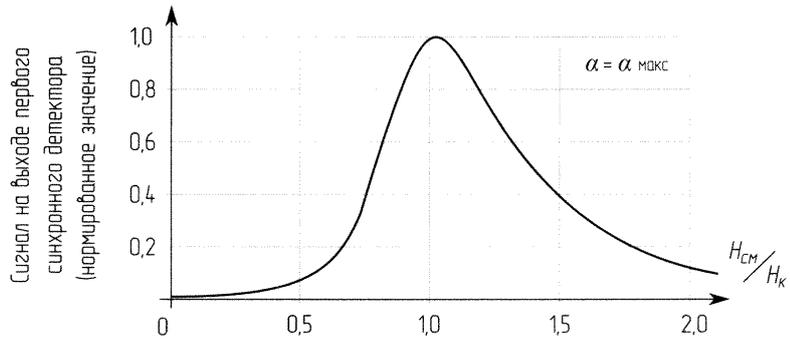
35

40

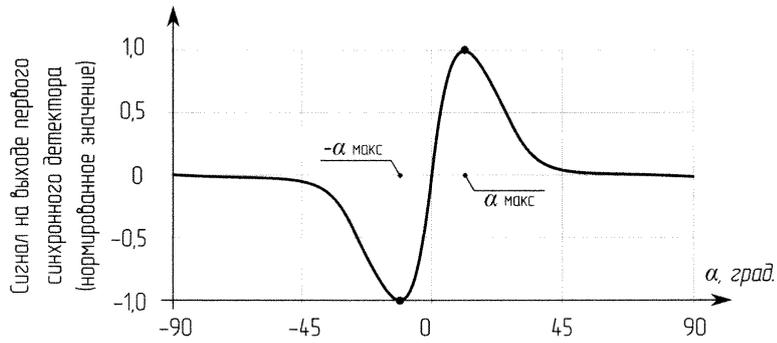
45



(а)

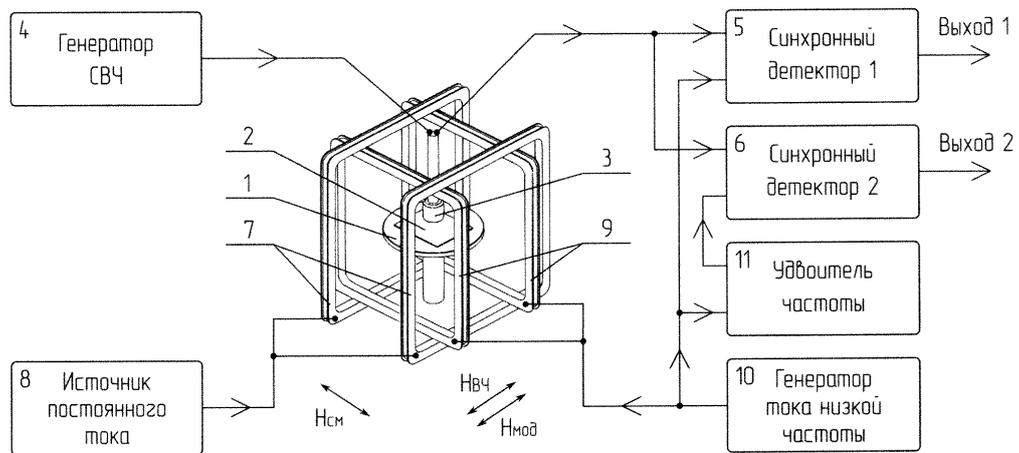


(б)

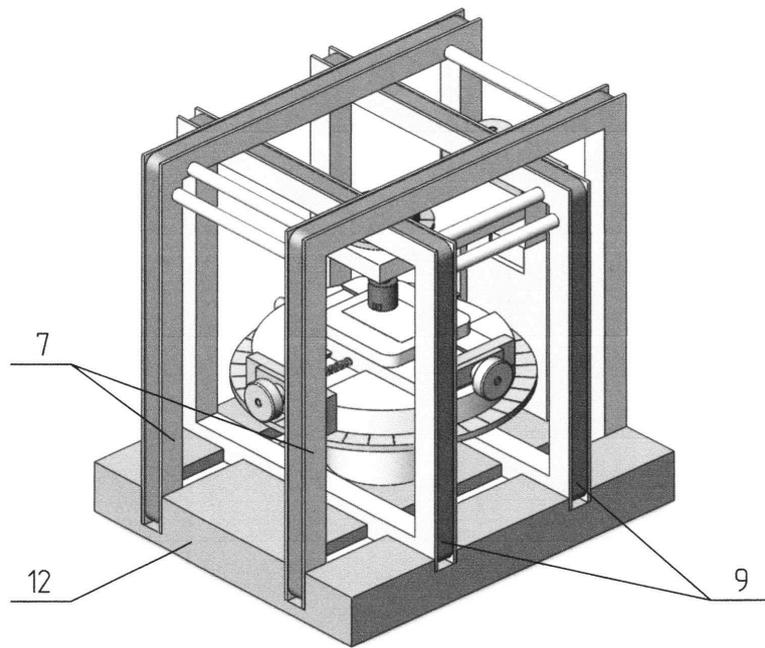


(в)

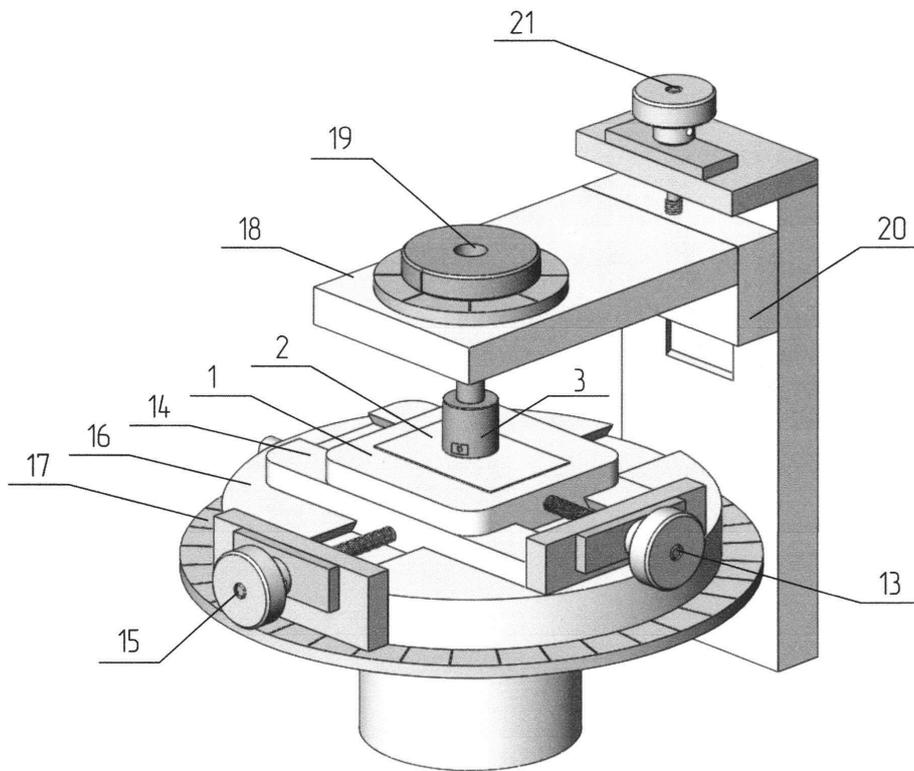
Фиг. 1



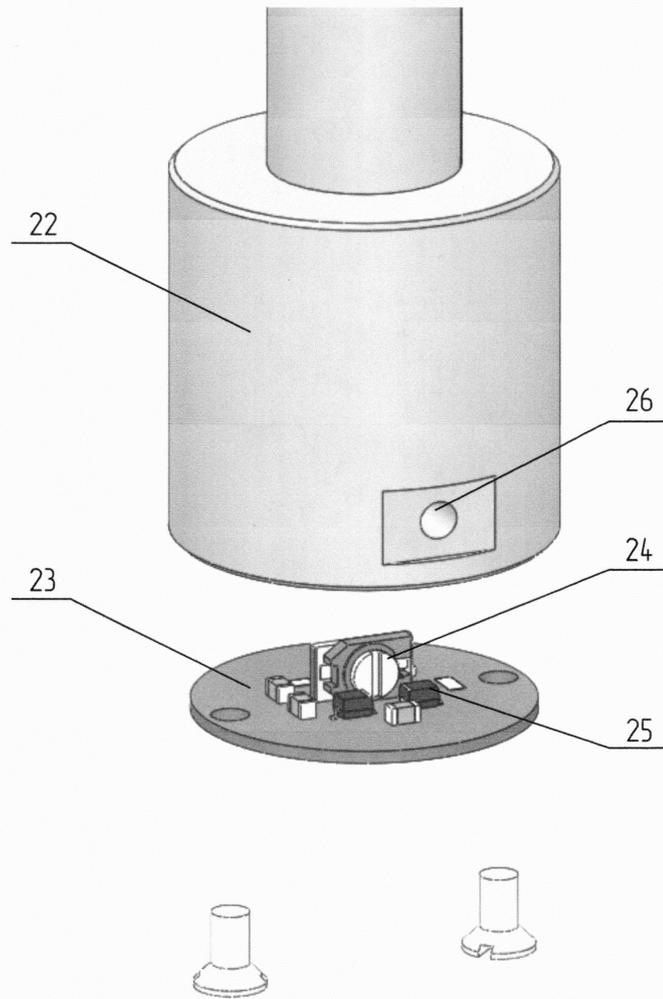
Фиг. 2



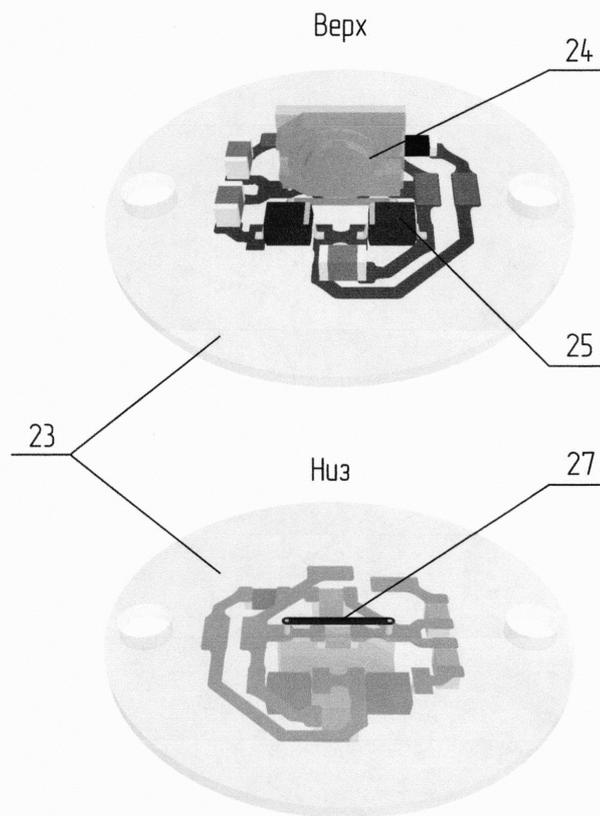
Фиг. 3



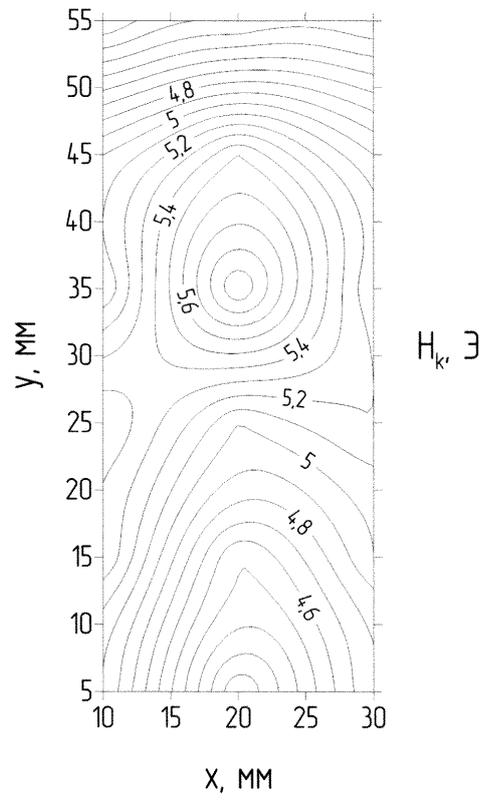
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7