



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01V 3/14 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2019145469, 27.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.12.2019

Дата регистрации:  
16.03.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.12.2019

(45) Опубликовано: 16.03.2021 Бюл. № 8

Адрес для переписки:  
199034, Санкт-Петербург, Университетская  
наб., 7/9, Университет, Главное Управление  
защиты и использования интеллектуальной  
собственности, Матвееву А.А., Матвеевой Т.И.

(72) Автор(ы):

Рыжов Иван Игоревич (RU),  
Запасский Валерий Сергеевич (RU),  
Козлов Глеб Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский  
государственный университет" (СПбГУ)  
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 6472869 B1, 29.10.2002. RU  
2691775 C1, 18.06.2019. US 2016116553 A1,  
28.04.2016. RU 183351 U1, 18.09.2018.

(54) Флуктуационный оптический магнитометр

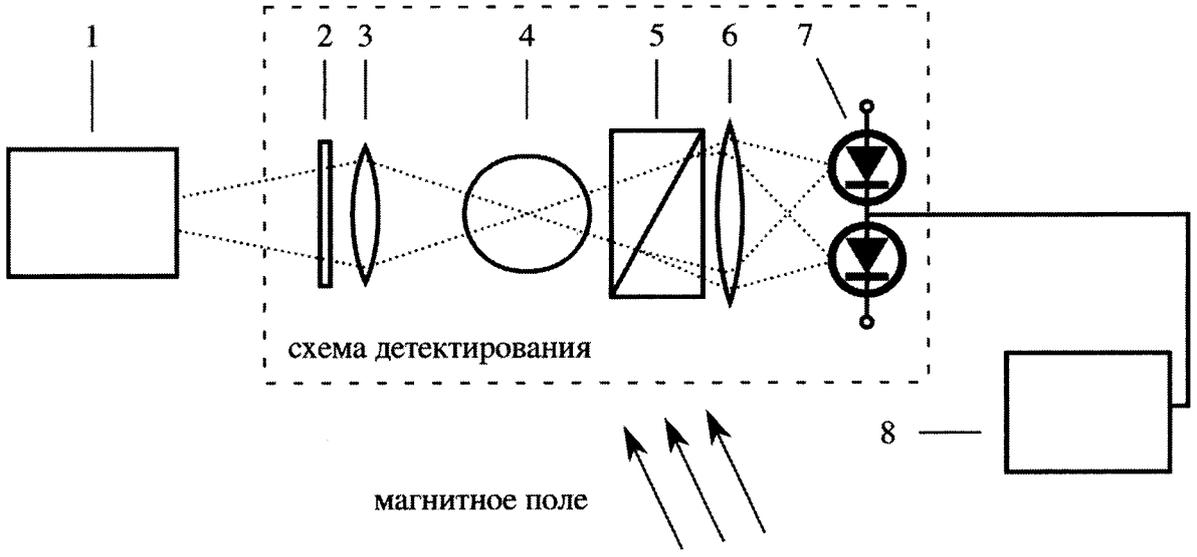
(57) Реферат:

Изобретение относится к области магнитометрии. Сущность изобретения заключается в том, что устройство для регистрации магнитного поля содержит поляризационный элемент, выполненный линейным, между поляризационным элементом и ячейкой с атомарными магнитными диполями на одной оптической оси расположена фокусирующая линза, между ячейкой и фотодетектором, выполненным в виде

балансного фотодиода, расположен поляризационный делитель и перефокусирующая линза, а в качестве измерительного прибора использован радиочастотный анализатор спектра с цифровой математической обработкой. Технический результат – повышение точности и информативности измерения магнитного поля, уменьшение размеров устройства. 1 з.п. ф-лы, 3 пр., 6 ил.

RU  
2 744 814  
C1

RU  
2 744 814  
C1



Фиг. 1

RU 2744814 C1

RU 2744814 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01V 3/14 (2020.08)*

(21)(22) Application: **2019145469, 27.12.2019**

(24) Effective date for property rights:  
**27.12.2019**

Registration date:  
**16.03.2021**

Priority:

(22) Date of filing: **27.12.2019**

(45) Date of publication: **16.03.2021** Bull. № 8

Mail address:

**199034, Sankt-Peterburg, Universitetskaya nab., 7/  
9, Universitet, Glavnoe Upravlenie zashchity i  
ispolzovaniya intellektualnoj sobstvennosti,  
Matveevu A.A., Matveevoj T.I.**

(72) Inventor(s):

**Ryzhov Ivan Igorevich (RU),  
Zapasskij Valerij Sergeevich (RU),  
Kozlov Gleb Gennadevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij  
gosudarstvennyj universitet" (SPbGU)" (RU)**

(54) **FLUCTUATION OPTICAL MAGNETOMETER**

(57) Abstract:

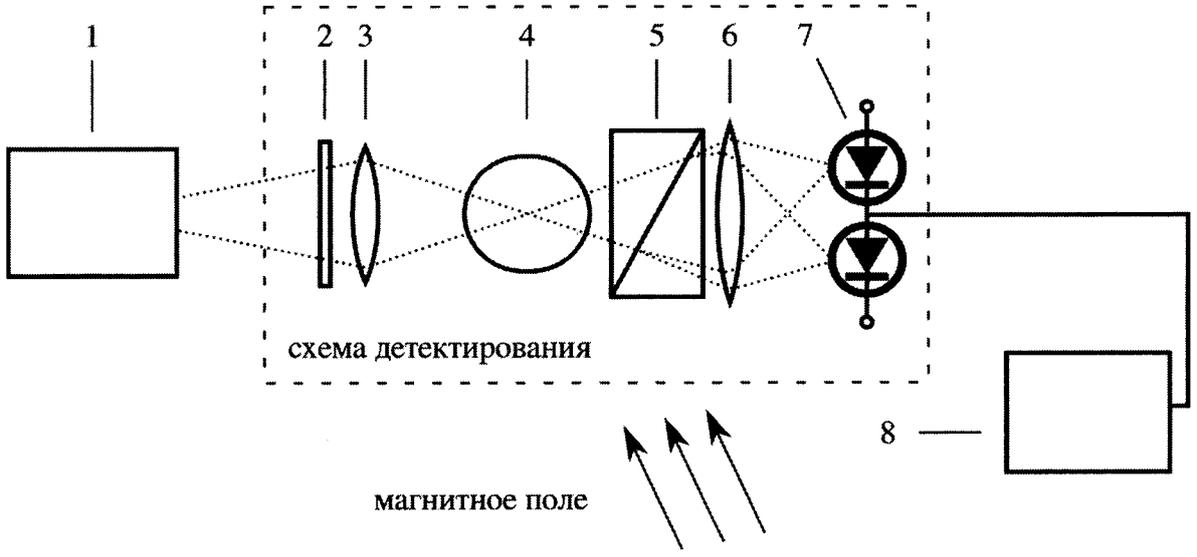
FIELD: magnetometry.

SUBSTANCE: essence of the invention lies in the fact that the device for recording a magnetic field contains a polarizing element made linear, between the polarizing element and the cell with atomic magnetic dipoles on one optical axis is a focusing lens, between the cell and the photodetector made in the form of a balanced photodiode, there is a polarization divider and

a refocusing lens, and a radio frequency spectrum analyzer with digital mathematical processing is used as a measuring device.

EFFECT: technical result is increase in accuracy and information content of measuring the magnetic field, and decrease in the size of the device.

1 cl, 3 ex, 6 dwg



Фиг. 1

RU 2744814 C1

RU 2744814 C1

Изобретение относится к области магнитометрии, в частности к датчикам магнитного поля, а именно к оптическим магнитометрам на основе ячеек с атомарными парами, предназначенным для измерения постоянных или медленно меняющихся магнитных полей, и может быть использовано для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач геофизики, геологии, археологии, военного дела, магнитооптики, сейсмологической службы, в системах дистанционного обнаружения магнитных объектов.

Известны квантовые магнитометры [1], в которых использован принцип оптической накачки и регистрации резонанса в переходах из основного состояния паров цезия. В данных магнитометрах применяют циркулярно поляризованный свет для оптической накачки паров цезия, регистрация сигнала осуществляется посредством измерения частоты модуляции резонансного поглощения света. Для магнитометров такого типа характерна зависимость результатов измерения от мощности накачки, погрешность при определении частоты вследствие срыва фазы прецессии, снижение точности в неоднородных магнитных полях за счет большого объема области, порождающей сигнал, которой является вся область светового пучка в пределах ячейки. Устройство является технически сложными, так как в конструкции необходимо применение спектрального фильтра накачивающего излучения и электротехническая схема с радиочастотной катушкой и петель обратной связи.

Известен квантовый магнитометр с оптической накачкой [2], имеющий в петле обратной связи ячейку фазовой памяти для устранения погрешностей подстройки фазы. Измерение частоты выполняется при чередовании периодов спонтанной и индуцированной прецессии, что вносит неустранимую погрешность при определении частоты.

Известен квантовый магнитометр [3], в котором оптическая накачка осуществляется с использованием монохроматического твердотельного лазера. Однако лазерные источники в магнитометрах такого типа требуют точной настройки в длину волны перехода из основного в возбужденное состояние ячейки. Применение для этой цели твердотельного лазера существенно удорожает конструкцию магнитометра.

Известен квантовый магнитометр с оптической накачкой [4], который является наиболее близким по техническому решению задачи к предлагаемому изобретению и выбранный в качестве прототипа.

Известное устройство включает в себя диодный лазер, который излучает лазерный луч накачки с резонансным оптическим излучением, ячейку с атомарными парами, которая размещена во внешнем магнитном поле, и средство регистрации магнитного поля, состоящее из фотодиода, который преобразует вторичное излучение атомов ячейки в фототок, и измерительного прибора, регистрирующего величину магнитного поля по частоте модуляции фототока.

Недостатками прототипа являются недостаточная информативность при измерении поля вследствие измерения одной частоты прецессии, снижение точности в неоднородных магнитных полях за счет большого объема области, порождающей сигнал (вся область светового пучка в пределах ячейки) и сопутствующего увеличения неопределенности частоты прецессии атомов в пучке, высокая стоимость конструкции за счет использования источника монохроматического излучения, требующего точной спектральной настройки для попадания в оптический резонанс ячейки, радиочастотной катушки с петлей обратной связи и генератора частоты, погрешность измерений магнитного поля вследствие зависимости положения центральной частоты прецессии атомов от мощности накачки и неточности измерения фазы индуцированного сигнала.

Заявленное изобретение свободно от указанных выше недостатков прототипа и его технический результат состоит в повышении информативности и точности измерений благодаря регистрации полного радиочастотного спектра сигнала, осуществлению единовременного измерения угла между магнитным полем и осью распространения света, острой фокусировке света в ячейке и слежением за однородностью магнитного поля по форме получаемых спектров, упрощении и удешевлении конструкции, снижении погрешности измерений благодаря регистрации частоты спонтанной прецессии атомов.

Сущность заявленного изобретения иллюстрируется Фиг. 1 - Фиг. 6.

На Фиг. 1 представлена схема заявленного устройства.

На Фиг. 2 представлен результат измерения нескольких по преимуществу поперечных к оптической оси магнитных полей, полученных при реализации устройства по пункту 1 (Пример 1).

На Фиг. 3 представлен результат измерения нескольких по преимуществу поперечных к оптической оси магнитных полей с малым шагом изменения, полученных при реализации устройства по пункту 1 (Пример 1).

На Фиг. 4 представлен результат измерения наклонного по отношению к оптической оси магнитного поля, полученный при реализации устройства по пункту 1 (Пример 1).

На Фиг. 5 представлен результат измерения нескольких по преимуществу поперечных к оптической оси магнитных полей, полученных при реализации устройства по пункту 2 (Пример 2).

На Фиг. 6 представлен результат измерения нескольких по преимуществу поперечных к оптической оси магнитных полей, полученных при реализации устройства по пункту 1 (Пример 3).

Схема заявленного изобретения поясняется Фиг. 1, на которой источник монохроматического света 1 испускает пучок света, который проходит в размещенную во внешнем произвольном магнитном поле схему детектирования и через линзу 2 и линейный поляризатор 3 фокусируется на кювете 4 с парами щелочного металла, затем расщепляется поляризационным светоделителем 5 на две ортогональные линейно поляризованные компоненты и через перефокусирующую линзу 6 поступает на вход балансного фотодетектора 7, который преобразует световой поток в разностный фототок. Фототок поступает на вход измерительного устройства 8, которое осуществляет анализ радиочастотного спектра и цифровую обработку данных.

Схема заявленного изобретения по пункту 2 отличается тем, что при использовании диодного лазера с внутренним резонатором не требуется установка линейного поляризационного элемента.

Работа заявленного изобретения основана на принципе спектроскопии спиновых шумов, впервые представленном В.С. Запасским и Е.Б. Александровым в 1981 г. [5] и осуществляется следующим образом. Как показано на Фиг. 1, монохроматический лазерный луч из источника 1 приобретает линейную поляризацию на линейном поляризационном элементе 2 и фокусируется линзой 3 на ячейке с атомарными парами 4. Луч имеет длину волны, близкую к резонансной частоте перехода из основного в возбужденное состояние используемых в ячейке 4 атомарных паров, однако имеющую некоторую положительную либо отрицательную отстройку. Величина допустимой отстройки определяется спектральной областью, в которой достаточно велико фарадеевское вращение системы атомарных паров и достаточно мало их поглощение. Конкретные величины отстройки зависят тем самым от используемого атомарного газа и конфигурации ячейки, однако в подавляющем большинстве случаев величина допустимой отстройки на порядок превосходит ширину оптического перехода. При

помещении ячейки в магнитное поле случайные флуктуации магнитного поля атомов испытывают постоянную прецессию вокруг направления внешнего магнитного поля на частоте Лармора, определяемой гиромангнитным отношением для данного вещества. В известных квантовых магнитометрах с оптической накачкой [1-4] данная флуктуация является затравкой для начала автоколебаний системы, амплитуда которых достаточно велика для регистрации. В предлагаемом устройстве лазерный луч проходит в области прозрачности среды и испытывает неупругое рассеяние на свободно прецессирующих в магнитном поле атомах. Разница в частотах рассеянной и исходной волн равна частоте Лармора. Их интерференция ведет к слабой модуляции азимута плоскости поляризации прошедшего через кювету света. Промодулированный таким образом свет проходит через поляризационный делитель 5, оси которого ориентированы под  $45^\circ$  к азимуту плоскости поляризации света источника. Ортогонально поляризованные потоки через перефокусирующую линзу 6 направляются в два плеча балансного фотодиода 7, на выход которого поступает сигнал вычитания фототоков фотодиодов. В результате вычитания фототоков избыточные (интенсивностные) флуктуации светового потока оказываются подавлены, а поляризационные вдвое усилены. Разностный фототок с выхода фотодетектора поступает на вход измерительного прибора 8, представляющего собой анализатор радиочастотного спектра сигнала и цифровую систему обработки данных. Системы такого типа известны и могут быть выполнены, например, как цифровой прибор, оснащенный быстрым АЦП и аппаратно выполняющий быстрое преобразование Фурье, и ПК для обработки данных. Сигнал спонтанной прецессии спинов таким образом обнаруживается в радиочастотном спектре плотности мощности фототока. Спектральный пик на частоте Лармора определяет полную величину приложенного к ячейке магнитного поля. Угол  $\alpha$  между направлением приложенного к ячейке магнитного поля и оптической осью определяется из соотношения

$$\alpha = \arctg \left( \sqrt{\frac{A}{B}} \right), \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  - площади пиков на частоте Лармора и нулевой частоте соответственно в спектре плотности мощности сигнала.

Указанный технический результат заявленного изобретения достигается следующим образом. В качестве объекта регистрации, в отличие от прототипа и аналогов, выступает не индуцированная радиочастотной катушкой, а свободная и спонтанная прецессия атомов во внешнем магнитном поле, вследствие чего повышение стабильности частоты проистекает из свободного (а не вынужденного, как в известных аналогах) характера спиновых колебаний, а повышение точности измерения достигается за счет анализа полного радиочастотного спектра накапливаемого сигнала вместо регистрации на выделенной частоте. Усиление сигнала происходит за счет острой фокусировки на ячейке, так как относительный шумовой сигнал в отличие от регулярного обратно пропорционален площади сечения пучка, и создается областью, ограниченной длиной Рэлея и сечением перетяжки светового пучка; а также за счет применения балансной схемы, подавляющей избыточные шумы и удваивающей поляризационный сигнал. Уменьшение области пространства, порождающей сигнал, приводит также к повышению точности в неоднородных полях. Повышение информативности измерений заключается в возможности измерения угла между оптической осью и направлением магнитного поля и достигается в результате определения соотношения между амплитудами сигналов на нулевой и ларморовской частотах, указанным образом зависящих от величины проекций магнитного поля на оптическую ось и перпендикулярную ей плоскость. Кроме

того, повышение информативности заключается в возможности слежения за неоднородностью поля, которое приводит к уширению и искажению формы пиков в спектрах сигнала. Упрощение конструкции достигается в результате использования в качестве прибора регистрации спектроанализатора вместо автогенерационной схемы с петлей обратной связи, фазовращателем и частотомером, а также использованием лазерного диода с внутренним резонатором.

Технический результат апробирован в реальных условиях Санкт-Петербургского государственного университета и ниже приведены результаты апробации.

#### Пример 1.

Апробация Примера 1 иллюстрирована Фиг. 1-4. На схеме Фиг. 1 в качестве источника лазерного излучения 1 использован лазер Sacher Lasertechnik Lynx, спектрально настроенный вблизи линии поглощения D2 цезия (длина волны излучения составляла  $852.1 \pm 0.05$  нм), излучение которого через линзу 2 и поляризатор фокусируется на кювете 4. Поляризатор 3 в данном случае не требуется, так как излучение лазера является линейно поляризованным. Шарообразная кювета 4, содержащая цезий и заполненная буферным газом ксеноном при давлении 3 торр, нагревается до рабочей температуры  $100 \pm 2^\circ\text{C}$ . Свет проходит через поляризационный делитель 5, разделяясь на две ортогонально поляризованные компоненты, которые направляются через линзу 6 на балансный фотоприемник 7 Thorlabs PDB460A, разностный фототок с которого поступает в измерительный прибор 8, состоящий из спектроанализатора Tektronix RSA5103A и персонального компьютера. Изменение магнитного поля в кювете создавалось постоянным магнитом. На Фиг. 2 представлены результаты измерений нескольких преимущественно поперечных полей, создаваемых постоянным неодимовым магнитом. На Фиг. 3 представлено несколько измерений поперечного магнитного поля и указана достигнутая точность измерений. На Фиг. 4 представлено измерение некоторого произвольного ориентированного постоянного магнитного поля, определена величина и угол между магнитным полем и осью распространения света.

#### Пример 2.

Апробация Примера 2 иллюстрирована Фиг. 1 и 5. Установка, соответствующая схеме Фиг. 1, отличается тем, что в качестве измерительного прибора был использован сконструированный лично авторами аналоговый спектроанализатор с полосой частот 2.7-8.3 МГц с ЦАП, подключенный к ПК для обработки данных. На Фиг. 5 представлены результаты измерений нескольких преимущественно поперечных полей, создаваемых постоянным неодимовым магнитом.

#### Пример 3.

Апробация Примера 3 иллюстрирована Фиг. 1 и 6. Установка, соответствующая схеме Фиг. 1, отличается тем, что в качестве источника лазерного излучения 1 использован лазерный диод с внутренним резонатором, настроенный вблизи линии поглощения цезия Thorlabs L852P50. Подстройка диода к рабочей области осуществлялась изменением величины тока питания диода. Результаты измерений нескольких произвольных поперечных полей представлены на Фиг. 6.

Технико-экономическая эффективность заявленного изобретения, как показали вышеприведенные примеры апробации, состоит в том, что предлагается оптический магнитометр с точностью и информативностью, повышенной по сравнению с прототипом. Предложенная конструкция упрощена по сравнению с прототипом, снижены требования к спектральному положению источника излучения, что приведет к снижению стоимости изготовления приборов для измерения лабораторных и земных магнитных полей. Устройство позволяет проводить более информативные измерения

магнитного поля, а именно измерять угол между оптической осью и направлением внешнего магнитного поля, а также следить за неоднородностью измеряемого поля по ширине и форме пиков в спектрах сигнала.

Список использованной литературы

- 5 1. William E. Bell, Arnold L. Bloom // Optical Magnetometers // Патент США US 3,257,608 02.02.1961.
2. Е.Н. Пестов // Квантовый магнитометр // Патент СССР 404035 G 01v 3/14 26.10.1973.
3. Jean-Michel Leger // Resonance Magnetometer With Optical Pumping Using A Monolithic Laser // Патент США US 5,493,223 20.02.1996.
- 10 4. Bernard L. Upschulte, Steven J. Davis, Ludwig C. Balling, John J. Wright // Diode Laser-Pumped Magnetometer // Патент США US 6,472,869 B1, 29.10.2002 (прототип).
5. Александров Е.Б., Запаский В.С. Магнитный резонанс в спектре шумов фарадеевского вращения // ЖЭТФ, т. 81, вып. 1, с. 132-138, 1981.

15 (57) Формула изобретения

1. Устройство для регистрации магнитного поля, содержащее источник оптического излучения, расположенную на одной с ним оптической оси схему детектирования, которая состоит из поляризационного элемента, ячейки с атомарными магнитными диполями, фотодетектора, к выходу которого подсоединен для регистрации магнитного  
20 поля измерительный прибор, отличающееся тем, что поляризационный элемент выполнен линейным, между поляризационным элементом и ячейкой с атомарными магнитными диполями на одной оптической оси расположена фокусирующая линза, между ячейкой и фотодетектором, выполненным в виде балансного фотодиода, расположен поляризационный делитель и перефокусирующая линза, а в качестве  
25 измерительного прибора использован радиочастотный анализатор спектра с цифровой математической обработкой.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что в качестве источника резонансного излучения и поляризационного элемента использован лазерный диод с внутренним резонатором.

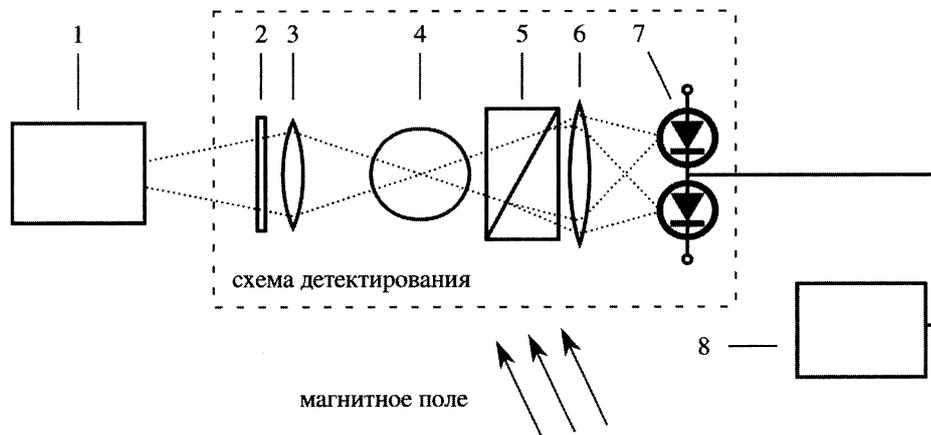
30

35

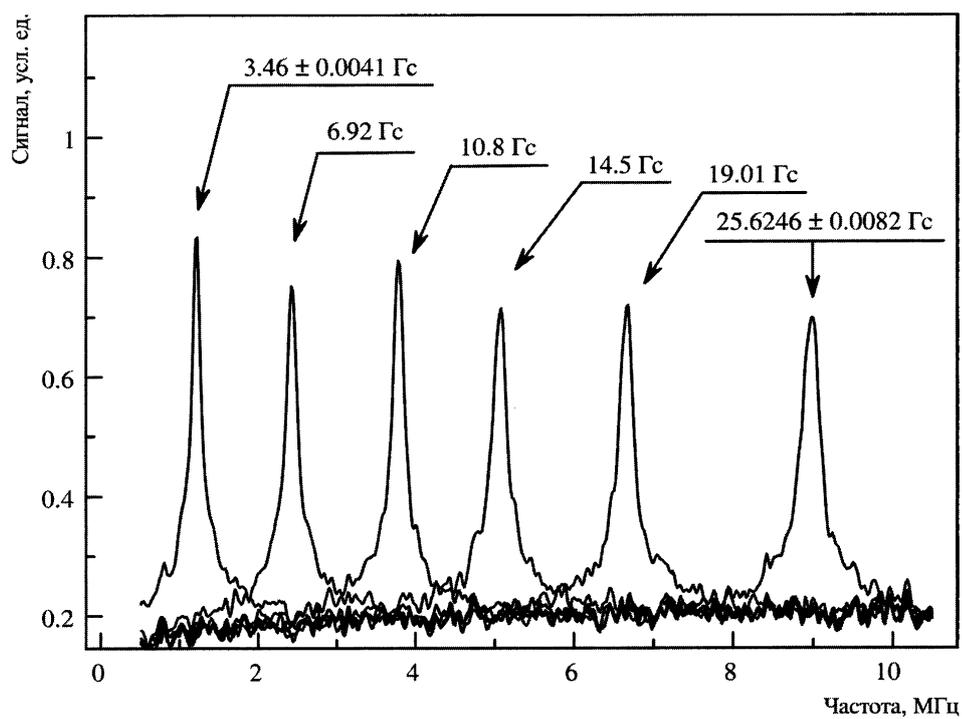
40

45

1

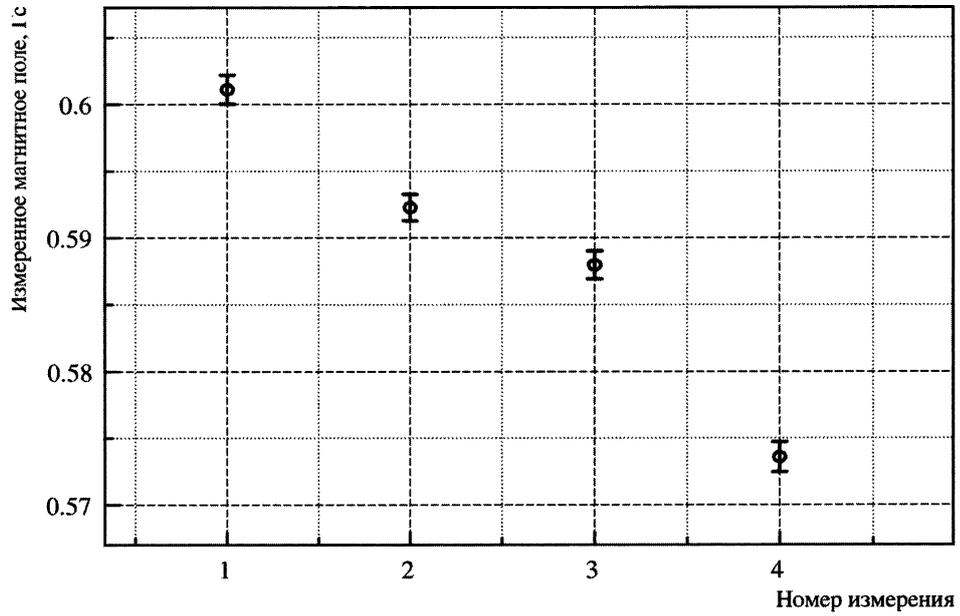


Фиг. 1

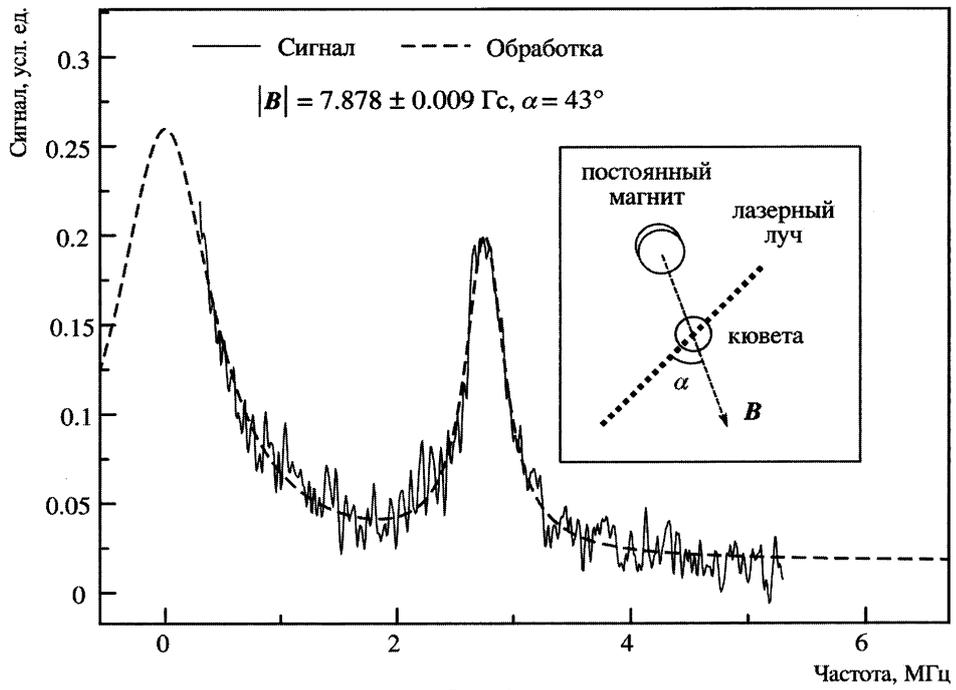


Фиг. 2

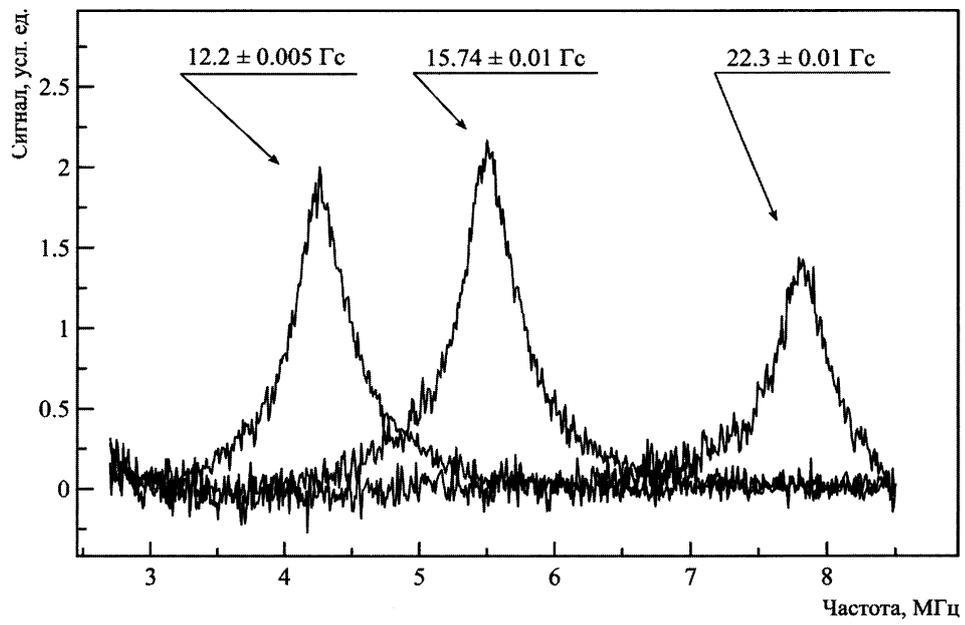
2



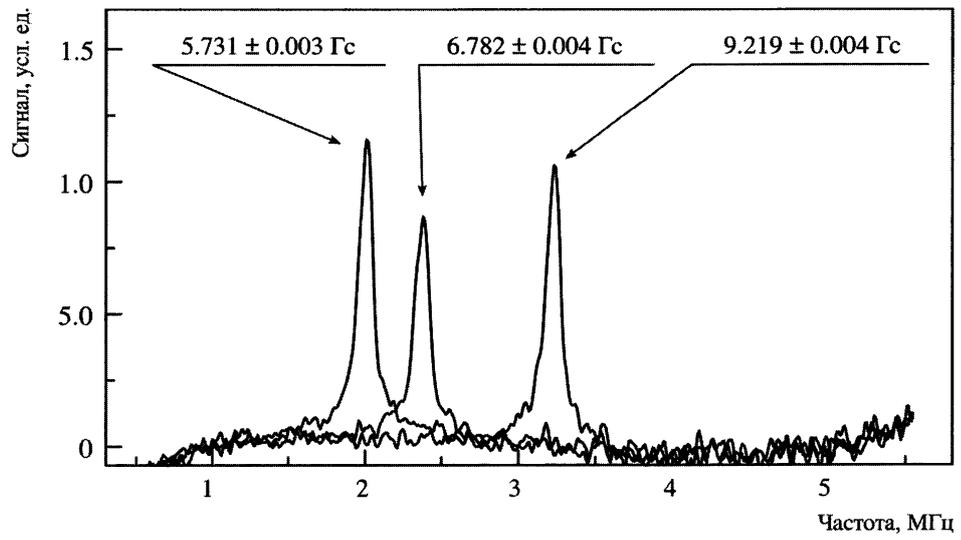
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6