



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01R 33/032 (2019.08); G01R 33/26 (2019.08)*

(21)(22) Заявка: 2019109899, 03.04.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
03.04.2019

Дата регистрации:  
23.04.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.04.2019

(45) Опубликовано: 23.04.2020 Бюл. № 12

Адрес для переписки:

107045, Москва, Сретенский б-р, 5, а/я 97, для  
Мазур Н.З.

(72) Автор(ы):

Осадчий Алексей Евгеньевич (RU),  
Вершовский Антон Константинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью  
"Лазерлаб" (ООО "Лазерлаб") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: DE 102013004385 A1, 19.09.2019. US  
8587304 B2, 19.11.2013. US 20080106261 A1,  
08.05.2008. US 20160116553 A1, 28.04.2016. RU  
2438140 C1, 27.12.2011.

## (54) МНОГОКАНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

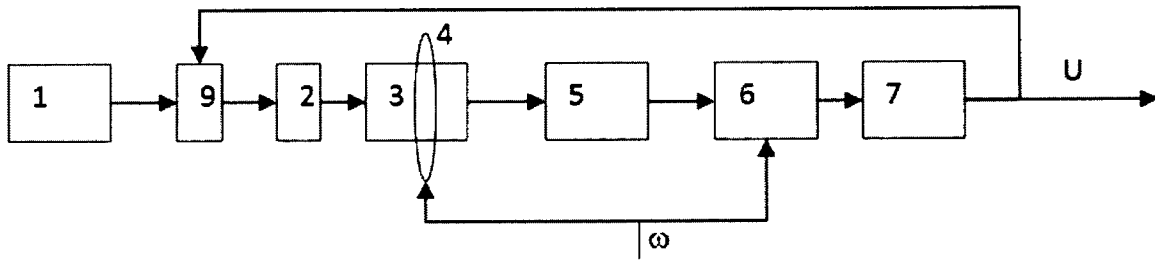
(57) Реферат:

Изобретение относится к области регистрации электромагнитных полей. Многоканальная диагностическая система включает лазерный источник линейно поляризованного излучения оптической накачки с оптическим многоканальным разветвителем излучения накачки; генератор радиочастотного поля; катушку радиочастотного поля; по меньшей мере два атомарных магнитометрических датчика, каждый из которых включает в себя поддерживающее поляризацию оптоволокно для передачи излучения накачки; чувствительный элемент, включающий циркулярный поляризатор излучения накачки; рабочую ячейку, немагнитный нагреватель, фотоприемник, усилитель фототока; синхронный детектор; и интегратор, управляющий низкочастотным модулятором излучения накачки, и многоканальную схему обработки и записи сигналов. Атомарные магнитометрические датчики установлены таким

образом, что угол между любыми двумя упомянутыми датчиками не превышает 20°, а их ориентация по отношению к направлению вектора магнитного поля обеспечивает максимальную для данного типа датчиков чувствительность, причем все датчики находятся в общем радиочастотном поле. Схема оптической накачки каждого упомянутого датчика включает управляющий мощностью накачки и световым сдвигом частоты магнитного резонанса низкочастотный модулятор, установленный либо непосредственно после оптического многоканального разветвителя перед передающим излучением оптоволокном, либо на входе чувствительного элемента после передающего излучения оптоволокна. Технический результат заключается в повышении эффективности диагностической системы за счет увеличения точности детектирования. 3 з.п. ф-лы, 3 ил.

RU 2 7 2 0 0 5 5 C 1

RU 2 7 2 0 0 5 5 C 1



фиг. 3

RU 2720272 C1 550055 C1

RU 2720055 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01R 33/032* (2006.01)  
*G01R 33/26* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01R 33/032 (2019.08); G01R 33/26 (2019.08)*

(21)(22) Application: **2019109899, 03.04.2019**

(24) Effective date for property rights:  
**03.04.2019**

Registration date:  
**23.04.2020**

Priority:

(22) Date of filing: **03.04.2019**

(45) Date of publication: **23.04.2020** Bull. № 12

Mail address:

**107045, Moskva, Sretenskij b-r, 5, a/ya 97, dlya Mazur N.Z.**

(72) Inventor(s):

**Osadchij Aleksej Evgenevich (RU),  
Vershovskij Anton Konstantinovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu  
"Lazerlab" (OOO "Lazerlab") (RU)**

(54) **MULTICHANNEL DIAGNOSTIC SYSTEM**

(57) Abstract:

FIELD: registration of electromagnetic fields.

SUBSTANCE: multichannel diagnostic system includes a laser source of linearly polarized radiation of optical pumping with an optical multichannel splitter of pumping radiation; radiofrequency field generator; radio-frequency field coil; at least two atomic magnetometric sensors, each of which includes a polarization-supporting optical fibre for transmitting pumping radiation; a sensitive element comprising a circular polarization of pumping radiation; a working cell, a non-magnetic heater, a photodetector, a photocurrent amplifier; synchronous detector; and an integrator controlling the low-frequency pumping radiation modulator, and a multichannel signal processing and recording circuit. Atomic magnetometric sensors are installed so that angle between any two said

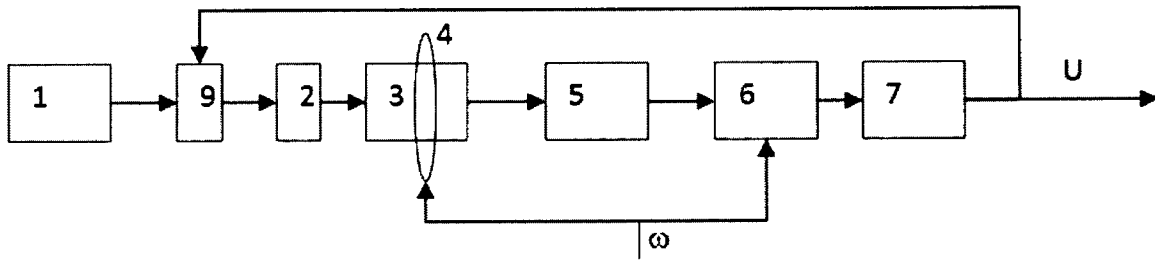
sensors does not exceed 20°, and their orientation relative to direction of magnetic field vector provides maximum sensitivity for given type of sensors, wherein all sensors are in common radio-frequency field. Optical pumping circuit of each of said sensors includes pumping power control and light shift of magnetic resonance frequency low-frequency modulator, installed either directly after optical multichannel splitter before transmitting radiation optical fibre, or at the input of sensitive element after radiation transmitting optical fibre.

EFFECT: technical result consists in improvement of efficiency of diagnostic system due to increased accuracy of detection.

4 cl, 3 dwg

RU 2 720 055 C 1

RU 2 720 055 C 1



фиг. 3

RU 2720272 C1 550055 C1

RU 2720055 C1

Изобретение относится к области медицины и нейронауке и предназначено для неинвазивной регистрации электромагнитных полей, порождаемых активностью головного мозга человека, с последующей локализацией активных областей на коре головного мозга для диагностики широкого спектра неврологических расстройств и исследования принципов функционирования головного мозга человека.

В настоящее время актуальной задачей является исследование, интерпретация и моделирование принципов работы головного мозга с последующим использованием в целях диагностики и выработки методов лечения и превентивной терапии нейродегенеративных заболеваний. Решение перечисленных задач невозможно без методик функциональной нейровизуализации, уникальным представителем которых является магнитоэнцефалография (МЭГ). МЭГ позволяет неинвазивно, т.е. без нарушения целостности тканей, регистрировать электрическую активность головного мозга с временным разрешением порядка единиц миллисекунд и субсантиметровым пространственным разрешением. В настоящее время МЭГ как единственная методика, позволяющая неинвазивно и с приемлемой точностью выполнить локализацию нестационарных нейрональных источников, является де-факто золотым стандартом неинвазивной диагностики эпилепсии в клиниках, располагающих доступом к этому оборудованию. Кроме того, МЭГ активно применяется в фармакологической индустрии для оценки влияния препаратов на функциональное состояние центральной нервной системы, и позволяет в отличие от функциональной МРТ (фМРТ) исследовать тонкую пространственно-временную структуру вызванных препаратами изменений электрической активности головного мозга, как желаемых, так и побочных

В настоящее время, в целом, существует две тенденции развития методики неинвазивного нейромартирования, основанного на биомагнитометрической информации. В основе первой - построение многоканальных систем на основе атомарных магнитометров, работающих в режиме, свободном от спинобменного уширения (SERF (Spin Exchange Relaxation Free)). Второе и более традиционное направление - использование сверхпроводящих квантовых интерферометров (SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)). Также, были выявлены ближайшие технологии, но не относящиеся к датчикам SERF или SQUID.

Однако, существенным недостатком используемых в современных многоканальных магнитоэнцефалографах СКВИДов (от Сверхпроводящий КВантовый Интерференционный Датчик), работающих в условиях сверхнизких (гелиевых) температур, является отсутствие возможности их приближения к объекту исследования на расстояние, меньшее толщины стенки сосуда Дьюара (~3 см). Невозможность адаптации геометрии сосуда Дьюара к форме и размеру головы испытуемого ведет к еще большему росту и неравномерности распределения расстояния датчик-мозг и существенным потерям в соотношении сигнал-шум при регистрации активности нейрональных источников. Кроме того, СКВИД-системы могут эксплуатироваться лишь в дорогостоящих магнитоэкранированных помещениях, стоимость которых составляет начинается от 400 тысяч долларов США, и требуют еженедельной дозаправки дорогостоящим жидкий гелием, что делает эксплуатацию таких систем неприемлемо затратной для абсолютного большинства клинических учреждений.

Применение технологий квантовой оптики к магнитометрии привело к созданию новых перспективных схем, сравнимых по чувствительности со СКВИД системами и даже превосходящих последние. Высокая чувствительность (~3-10 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ), малые размеры, способность работать в широком диапазоне внешних магнитных полей, вплоть до земного, отсутствие необходимости глубокого охлаждения (для их работы

достаточно обеспечить относительно небольшой нагрев) открывают возможности применения этих устройств для неинвазивной (без нарушения целостности тканей) регистрации электрической активности биологических объектов, в том числе и головного мозга.

5 Построение интегрированных многоканальных магнитоэнцефалографических систем с адаптирующейся геометрией массива атомарных магнитометрических датчиков (АМД) позволит достичь нового качественного уровня неинвазивной функциональной нейровизуализации. Полученная технология повысит точность предоперационного  
10 картирования и позволит перейти на качественно новый уровень при решении задач выявления очагов эпилептической активности, обеспечив возможность более детальной дифференциальной диагностики и планирования оперативного вмешательства при лечении фармако-резистентной эпилепсии.

Атомные магнитометры с максимальной чувствительностью работают в так называемом SERF режиме (Spin Exchange Relaxation Free) и, следовательно, требуют  
15 сверхслабых по модулю внешних магнитных полей, с высочайшей степенью пространственной равномерности, что в настоящее время достигается за счет использования магнитоизолирующих камер в сочетании с дополнительными компенсирующими катушками, расположенными в непосредственной близости от испытуемого. С целью преодоления этого препятствия нами было проведено  
20 исследование, в результате которого был разработан лабораторный макет АМ, способный работать в ненулевых полях (10-100 мкТл) и обеспечивающий сравнимую со СКВИД предельную чувствительность.

Наиболее близким к заявляемому изобретению является известное решение по патенту Германии магнитометра с оптической накачкой, который позволяет использовать его  
25 в массивах датчиков, в которых не происходит взаимного влияния отдельного магнитометра, и способа работы устройства, включающего массив магнитометров с оптической накачкой. (Заявка Германии №102013004385, МПК G01R 33/032; G01R 33/26, опубл. 19.09.2013).

Недостатками известного решения являются его сложность и дороговизна, поскольку  
30 его реализация требует использования в каждом канале дорогостоящего и требующего тонкой юстировки акустооптического (АОМ) или электрооптического (ЕОМ) модулятора (обозначенного в патенте IM), обеспечивающего 100% модуляцию на ларморовской частоте, составляющей десятки или сотни килогерц.

Задачей заявленного изобретения является устранение недостатков известных  
35 устройств и систем и создание многоканальной диагностической системы для магнитоэнцефалографа (МЭГ) нового поколения, позволяющего неинвазивно регистрировать электрическую активность головного мозга человека с недоступной ранее пространственной и временной точностью. Новая технология измерения сверхслабых магнитных полей, не требующая применения криогенного оборудования,  
40 существенно удешевит прибор, сделает его доступным широкому кругу клинических и исследовательских учреждений и обеспечит превосходство в задачах диагностики неврологических расстройств и в когнитивных исследованиях.

Таким образом, техническим результатом является повышение эффективности диагностической системы за счет увеличения точности детектирования и обеспечение  
45 возможности работы атомарного магнитометрического датчика в составе многоканальной диагностической системы без создания помех в работе близкорасположенных аналогичных датчиков.

Технический результат достигается за счет того, что в многоканальной

диагностической системе, включающей лазерный источник линейно поляризованного излучения оптической накачки с оптическим многоканальным разветвителем излучения накачки; генератор радиочастотного поля; катушку радиочастотного поля; по меньшей мере два атомарных магнитометрических датчика, каждый из которых включает в себя  
5 поддерживающее поляризацию оптоволокно для передачи излучения накачки; чувствительный элемент, включающий циркулярный поляризатор излучения накачки; рабочую ячейку, немагнитный нагреватель, фотоприемник, усилитель фототока; синхронные детекторы; и интеграторы, управляющие низкочастотными модуляторами излучения накачки (по числу датчиков), и многоканальную схему обработки и записи  
10 сигналов, атомарные магнитометрические датчики установлены таким образом, что угол между любыми двумя упомянутыми датчиками не превышает  $20^\circ$ , а их ориентация по отношению к направлению вектора магнитного поля обеспечивает максимальную для данного типа датчиков чувствительность, причем все датчики находятся в общем радиочастотном поле, а схема оптической накачки каждого упомянутого датчика  
15 включает управляющий мощностью накачки и световым сдвигом частоты магнитного резонанса низкочастотный модулятор, установленный либо непосредственно после оптического многоканального разветвителя перед передающим излучение оптоволокном, либо на входе чувствительного элемента после передающего излучение оптоволокна.

20 Кроме того, низкочастотный модулятор может быть, в частности, жидкокристаллическим.

Также, система включает лазерный источник линейно поляризованного излучения детектирования с оптическим многоканальным разветвителем излучения детектирования, атомарный магнитометрический датчик включает в себя  
25 поддерживающее поляризацию оптоволокно для передачи излучения детектирования, а чувствительный элемент включает балансный детектор изменения угла поляризации излучения детектирования;

Кроме того, чувствительный элемент включает катушку радиочастотного поля.

30 Технический результат, достижение которого обеспечивается реализацией всей совокупности существенных признаков заявляемого изобретения, состоит в исключении помех в работе близкорасположенных аналогичных датчиков, что достигается за счет следующих решений:

1) использование общего для всех датчиков резонансного радиочастотного (РЧ) поля, имеющего постоянную частоту, либо привязанного по частоте к магнитному  
35 полю, измеряемому одним или несколькими датчиками многоканальной диагностической системы;

2) динамическая компенсация сдвига центра линии магнитного резонанса (возникающего в каждом датчике вследствие вариаций локального поля, и пропорционального этим вариациям), осуществляемая посредством замыкания обратной  
40 связи для управления интенсивностью света накачки, и как следствие - величиной светового сдвига линии магнитного резонанса.

3) измерение величины вариаций магнитного поля производится посредством измерения вариаций мощности накачки; в случае использования низкочастотного (0-  
100 Гц) модулятора интенсивности (ЖКМ жидкокристаллического модулятора)  
45 измерение величины вариаций магнитного поля производится посредством измерения вариаций сигнала управления ЖКМ.

Сущность заявляемого изобретения поясняется рисунками, где на фиг. 1 представлена упрощенная блок-схема классического атомарного

магнитометра (АМ);

на фиг. 2 схема известного атомарного магнитометрического датчика (АМД), работающего в составе МЭГ;

на фиг. 3 представлен пример схемы атомарного магнитометрического датчика (АМД), работающего в составе МЭГ, для заявленной диагностической системы.

Рисунки на фиг. 1-3 включают следующие позиции:

- 1 - источник накачки (лазер),
- 2 - циркулярный поляризатор,
- 3 - рабочая ячейка,
- 4 - катушка РЧ поля,
- 5 - фотоприемник с усилителем,
- 6 - синхронный детектор,
- 7 - интегратор,
- 8 - генератор, управляемый напряжением,
- 9 - жидкокристаллический (ЖК) модулятор.

В описании авторы используют следующие понятия.

Магнитометрический датчик (МД) представляет собой устройство, предназначенное для измерения параметров магнитного поля или вариаций этих параметров.

Магнитометрический датчик, предназначенный для работы в составе магнитоэнцефалографических систем (МЭГ), должен быть способен измерять вариации модуля или компонент магнитного поля в полосе  $2 \div 100$  Гц и вариационной чувствительностью на уровне  $10 \div 20$  фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ; требования по чувствительности для магнитокардиографических систем (МКГ) на порядок ниже.

Магнитометр представляет собой устройство, включающее в себя один или несколько МД, схемы управления и регистрации показаний.

Многоканальная диагностическая система (МДС) представляет собой совокупность нескольких МД, сенсоры которых расположены максимально близко к поверхности (в общем случае - криволинейной) исследуемого объекта. Назначение МДС - измерение локальных временных вариаций магнитного поля, генерируемых исследуемым объектом в местах расположения сенсоров, в определенной полосе частот с пространственным разрешением  $< 1$  см.

При использовании атомарных магнитометрических датчиков (АМД) в многоканальных диагностических системах, а именно в магнитоэнцефалографах (МЭГ) и магнитокардиографах (МКГ), важным условием является их способность работать в массиве из нескольких (в случае МЭГ - до двухсот) близкорасположенных датчиков, не создавая помех соседним датчикам. Именно такое расположение датчиков позволяет регистрировать пространственно высокочастотные гармоники магнитного поля, порождаемого нейрональными источниками, и обеспечивает таким образом высокое пространственное разрешение картирования функции головного мозга.

Классическая схема атомарного магнитометра (АМ) непригодна для использования в многоканальных системах. Вследствие неоднородности магнитного поля в исследуемой области частоты РЧ поля разных атомарных магнитометрических датчиков (АМД) будут различаться. Поскольку радиочастотное (РЧ) поле, создаваемое вокруг ячейки АМД, невозможно локализовать в пространстве этой ячейки, оно будет воздействовать на соседние датчики, что неизбежно приведет к их взаимовлиянию.

Принцип работы атомарного (или квантового) магнитометрического датчика (АМД) с оптической накачкой основан на способности магнитного момента атома прецессировать в магнитном поле, подобно волчку в гравитационном поле Земли.



Частота  $\omega_0$  прецессии магнитного момента (так называемая частота Лармора, или ларморовская частота) в первом приближении пропорциональна индукции магнитного поля  $B$ :

$$\omega_0 = \gamma \cdot B \quad (1)$$

5 где  $\gamma$  - гиромагнитное отношение, для атомов цезия (Cs) составляющее  $2\pi \cdot (3.5 \text{ Гц/нТл})$ .

Эта величина является константой, что определяет абсолютность показаний АМД. Впрочем, частота резонанса может дополнительно смещаться внешними факторами, такими, как взаимодействующее с атомами излучение накачки.

10 На фиг. 3 представлен пример схемы атомарного магнитометрического датчика (АМД), работающего в составе МЭГ, для которого реализуется заявленное изобретение. Атомарный магнитометрический датчик включает источник накачки (лазер) 1, циркулярный поляризатор 2, рабочую ячейку 3, катушку радиочастотного (РЧ) поля 4, фотоприемник 5 с усилителем, синхронный детектор 6, интегратор 7, генератор 8, управляемый напряжением, жидкокристаллический (ЖК) модулятор 9.

Чувствительным элементом АМД является прозрачная (стеклянная) ячейка 3, заполненная парамагнитными (как правило, щелочными) атомами в газовой фазе. Для предотвращения столкновения атомов со стенками ячейки в нее добавляется инертный газ, либо стенки ячейки изнутри покрываются специальным покрытием.

20 Работа АМД включает следующие этапы:

1. Оптическая накачка продольным по отношению к измеряемому магнитному полю циркулярно поляризованным резонансным светом накачки - процесс, который выстраивает оси прецессии всех атомных магнитных моментов вдоль магнитного поля. В результате накачки все атомные моменты прецессируют вокруг одной оси, но со случайными фазами.

2. Фазирующие прецессии атомных магнитных моментов, то есть согласование фаз их прецессии с помощью резонансного (т.е. осциллирующего с частотой  $\omega \approx \omega_0$ ) радиочастотного (РЧ) поля. В результате фазирующего все атомные моменты прецессируют вокруг одной оси с частотой  $\omega \approx \omega_0$  и одной и той же фазой, определяемой фазой радиополя; появляется ненулевая суммарная вращающаяся поперечная намагниченность среды.

3. Оптическое детектирование вращающейся поперечной намагниченности среды поперечным светом детектирования. В зависимости от поляризации детектирующего луча и степени его отстройки от центра оптической линии поглощения, взаимодействие со вращающимися моментами будет приводить либо к модуляции интенсивности детектирующего луча на частоте  $\omega \approx \omega_0$ , либо к качанию его плоскости поляризации на той же частоте. Существуют упрощенные (однолучевые) схемы, в которых лучи накачки и детектирования объединены в один луч, направленный под  $45^\circ$  к магнитному полю. Алгоритм их работы не отличается от описанного выше. Также существуют вариации описанной выше схемы, в частности, магнитометры нулевого поля SERF, также использующие однолучевую схему, но регистрирующие сигнал не на ларморовской частоте, а на частоте внешнего модулирующего поля.

45 Для измерения магнитного поля необходимо точно привязать частоту радиочастотного (РЧ) поля  $\omega$  к ларморовской частоте  $\omega_0$ . После этого, зная  $\omega_0$ , вычисляют индукцию магнитного поля по формуле (1).

Привязка осуществляется следующим образом: сигнал модуляции детектирующего луча (также называемый сигналом магнитного резонанса) на частоте  $\omega$  детектируют

синхронным детектором; в качестве опорного сигнала при детектировании используют РЧ поле.

При правильном выборе фазы детектирования сигнал ошибки, возникающий при отстройке частоты РЧ поля со от  $\omega$  от  $\omega_0$ , имеет форму дисперсионной кривой:

$$\text{где } S(\Delta\omega) = k \frac{\Delta\omega \cdot \Omega T_2^2}{1 + (\Delta\omega T_2)^2 + \Omega^2 T_1 T_2} \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0$$

$\Omega$  - частота Раби резонансного РЧ поля, пропорциональная его амплитуде,  
 $T_1, T_2$  - времена продольной и поперечной релаксации атомных моментов;

$k$  - коэффициент, зависящий от параметров системы - интенсивности излучения накачки и детектирования, температуры и т.д.

Формула (2) описывает одну проекцию линии магнитного резонанса. В классической схеме АМ обратная связь (ОС) замыкается по сигналу ошибки  $S(\Delta\omega)$ . Сигнал ошибки используется для управления частотой РЧ поля (фиг. 1); ОС постоянно поддерживает равенство  $S(\Delta\omega)=0$ , обеспечивая тем самым выполнение условия  $\Delta\omega=0$ . Таким образом, в этой схеме частота РЧ поля  $\omega$  всегда равна ларморовской частоте  $\omega_0$ , и

пропорциональна модулю магнитного поля.

Для решения поставленной задачи авторами предлагается использовать свойство излучения накачки смещать частоту магнитного резонанса  $\omega_0$  (так называемый световой сдвиг магнитного резонанса). Величина этого сдвига пропорциональна интенсивности излучения накачки. Величина светового сдвига особенно сильна в компактных схемах, использующих эффекты подавления спин-обменного уширения в нулевых полях (SERF), и в ненулевых полях в «вытянутых» состояниях (stretched state). В частности, в наиболее эффективных схемах оптической накачки с уровня (F-1/2) основного состояния и при опросе уровней (F+1/2) основного состояния типичные величины светового сдвига излучением накачки (приведенные к значениям магнитного поля) составляют десятки и сотни нТл. Это приводит к необходимости стабилизации интенсивности накачки на уровне  $10^{-6} \div 10^{-7}$ , что само по себе является нетривиальной технической задачей. Включив световой сдвиг в (2), переопределяют  $\Delta\omega$ :

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 - k_{sh} I_p \quad (3)$$

где

$\Delta\omega$  - отстройка частоты, определена выше, под формулой (2)

$I_p$  - интенсивность излучения накачки,

$k_{sh}$  - коэффициент светового сдвига, величина которого практически постоянна при данной ширине резонансной линии и частоте излучения накачки.

Из (2) и (3) следует, что до тех пор, пока изменение интенсивности накачки не начнет деструктивно влиять на чувствительность АМД, можно использовать управление величиной светового сдвига  $I_p \cdot k_{sh}$  для обнуления сигнала ошибки  $S(\Delta\omega)$ . При этом обратная связь вместо частоты РЧ поля со будет управлять интенсивностью света накачки  $I_p$  (фиг. 3). Поскольку зависимость чувствительности АМД от  $I_p$  имеет оптимум, в котором производная чувствительности по  $I_p$  равна нулю, небольшие (в пределах  $\pm 10\%$ ) вариации интенсивности относительно оптимального значения не приведут к

сколь-либо заметному снижению чувствительности АМД.

Поскольку пространственные и временные вариации магнитного поля в области многоканальной системы в магнитоэкранированном помещении не превышают  $\pm 10$  нТл, а типичные световые сдвиги линии магнитного резонанса составляют  $\sim 10$  нТл/мВт, данный способ особенно хорошо применим к высокочувствительным АМД с компактными (менее  $1 \text{ см}^3$ ) ячейками. Такие АМД используют интенсивности оптической накачки порядка 10 мВт на датчик, и изменение интенсивности света накачки в них на 10% (т.е. на 1 мВт) позволит уверенно компенсировать временные и пространственные вариации магнитного поля в области многоканальной системы, и при этом приведет к ухудшению чувствительности, не превышающему 2%.

Таким образом, при работе системы МЭГ все АМД работают в общем РЧ поле, частота которого одинакова для всех датчиков, и привязана к средней величине поля в исследуемом объеме (либо напротив - средняя величина поля привязана к частоте РЧ поля).

В отличие от известных решений обнуление сигнала ошибки  $S(\Delta\omega)$  в каждом датчике и удержание его на центре резонансной линии осуществляется посредством управления интенсивностью света накачки  $I_p$ . Величина вариаций магнитного поля определяется по величине вариаций мощности накачки.

Заявленная система работает следующим образом.

В многоканальной диагностической системе атомарные магнитометрические датчики устанавливаются сколь угодно близко друг к другу таким образом, что угол между любыми двумя датчиками не превышает  $20^\circ$ , а их ориентация по отношению к направлению вектора магнитного поля обеспечивает максимальную для данного типа датчиков чувствительность. В частности, для атомарных магнитометров, работающих в двухлучевой схеме (двухлучевых датчиков) это означает, что направление луча накачки ориентировано параллельно магнитному полю, а для атомарных магнитометров, работающих в однолучевой схеме (однолучевых датчиков) направление луча накачки ориентировано под  $45^\circ$  к магнитному полю. Выбор угла между оптическими осями соседних датчиков меньше  $20^\circ$  обусловлен геометрией массива сенсоров, основания которых должны равномерно покрывать поверхность скальпа испытуемого и располагаться как можно ближе. Учитывая естественную кривизну поверхности скальпа и расстояние между сенсорами не превышающее 2 см, угол между осями сенсоров не превысит  $20^\circ$ .

Резонансное лазерное излучение генерируют и, пропуская его последовательно через жидкокристаллический модулятор 9, циркулярный поляризатор 2, и параллельно направлению магнитного поля сквозь рабочую ячейку 3, осуществляют оптическую накачку атомных моментов светом с интенсивностью, обеспечивающей максимальную чувствительность датчика. Резонансное излучение и подстройка при помощи интенсивности оптического излучения обеспечивают максимальную чувствительность в соответствии с формулами (2) и (3) (Е.Б. Александров, А.К. Вершовский. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии. - УФН, 2009, том 179, вып. 6, стр. 605-637).

Во всех датчиках согласовывают фазы прецессии магнитных моментов с помощью общего для всех датчиков направленного перпендикулярно магнитному полю резонансного радиочастотного поля, таким образом, что все атомные моменты прецессируют вокруг направления локального поля с частотой  $\omega$ , близкой к ларморовской частоте прецессии в данном локальном магнитном поле  $\omega_0$  и одной и

той же фазой, определяемой фазой радиочастотного поля. Генерируют второе лазерное излучение и осуществляют оптическое детектирование сигнала магнитного резонанса, пропуская это излучение через ячейку в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля.

5 На фотоприемнике детектируют интенсивность прошедшего сквозь ячейку каждого датчика детектирующего излучения и выделяют из результирующего сигнала составляющую, осциллирующую на частоте ларморовской прецессии. Детектируют выделенный сигнал на синхронном детекторе, используя в качестве опорного сигнал РЧ поля, и подбирая фазу синхронного детектирования таким образом, чтобы  
10 полученная в результате зависимость напряжения  $U$  от частотной отстройки  $\omega - \omega_0$  имела антисимметричную форму, такую, что в центре линии магнитного резонанса  $U \sim (\omega - \omega_0)$ ; полоса частот синхронного детектирования при этом должна быть не меньше полосы частот многоканальной диагностической системы.

15 Выделенный сигнал  $U \sim (\omega - \omega_0)$  используют для управления жидкокристаллическим модулятором таким образом, чтобы полный диапазон изменения интенсивности накачки составил  $\pm 10\%$ . Измеряют напряжение на входе жидкокристаллического модулятора  $U_M$ . Подают на датчики калиброванные локальные магнитные поля  $B$ , измеряют зависимость напряжения  $U_M(B)$  и вычисляют линейный коэффициент зависимости при  
20 помощи подгонки линейной регрессионной модели методом наименьших квадратов. Пересчитывают измеренную величину  $U_M$  в величину индукции локального поля в соответствии с полученной на предыдущем шаге линейной регрессионной зависимостью.

25 Реализация заявляемого способа дает возможность использования общего для всех датчиков резонансного радиочастотного (РЧ) поля, имеющего постоянную частоту, либо привязанного по частоте к магнитному полю, измеряемому одним или несколькими датчиками многоканальной диагностической системы, обеспечивается динамическая компенсация сдвига центра линии магнитного резонанса (возникающего в каждом датчике вследствие вариаций локального поля, и пропорционального этим вариациям), осуществляемой посредством замыкания обратной связи для управления интенсивностью  
30 света накачки, и как следствие - величиной светового сдвига линии магнитного резонанса. Измерение величины вариаций магнитного поля производится посредством измерения вариаций мощности накачки; в случае использования низкочастотного (0-100 Гц) модулятора интенсивности (ЖКМ - жидкокристаллического модулятора) измерение величины вариаций магнитного поля производится посредством измерения  
35 вариаций сигнала управления ЖКМ. Кроме того, таким образом естественным образом обеспечивается недостижимая ранее возможность работы атомарного магнитометрического датчика (АДМ) в составе многоканальной диагностической системы без создания помех в работе сколь угодно близкорасположенных аналогичных датчиков. Дополнительным преимуществом является возможность использования в  
40 каждом АДМ не дорогого высокочастотного акустооптического модулятора (АОМ), а относительно дешевого жидкокристаллического (ЖК) модулятора, работающего в полосе частот  $0 \div 100$  Гц.

#### (57) Формула изобретения

45 1. Многоканальная диагностическая система, включающая в себя лазерный источник линейно поляризованного излучения оптической накачки с оптическим многоканальным разветвителем излучения накачки; генератор радиочастотного поля;

катушку радиочастотного поля;

по меньшей мере два атомарных магнитометрических датчика, каждый из которых включает в себя поддерживающее поляризацию оптоволокно для передачи излучения накачки;

5 многоканальную схему обработки и записи сигналов, и чувствительный элемент, включающий циркулярный поляризатор излучения накачки; рабочую ячейку; немагнитный нагреватель; фотоприемник; усилитель фототока; синхронный детектор и интегратор, управляющий низкочастотным модулятором излучения накачки,

10 отличающаяся тем, что

атомарные магнитометрические датчики установлены таким образом, что угол между любыми двумя упомянутыми датчиками не превышает  $20^\circ$ , а их ориентация по отношению к направлению вектора магнитного поля обеспечивает максимальную для данного типа датчиков чувствительность, причем все датчики находятся в общем радиочастотном поле, а схема оптической накачки каждого упомянутого датчика включает управляющий мощностью накачки и световым сдвигом частоты магнитного резонанса низкочастотный модулятор, установленный либо непосредственно после оптического многоканального разветвителя перед передающим излучением оптоволокном, либо на входе чувствительного элемента после передающего излучения оптоволокна.

2. Многоканальная диагностическая система по п. 1, отличающаяся тем, что низкочастотный модулятор является жидкокристаллическим.

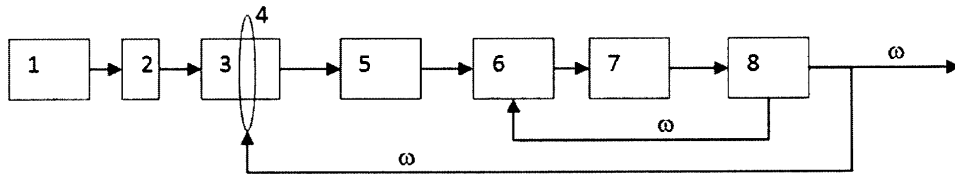
3. Многоканальная диагностическая система по п. 1, отличающаяся тем, что включает лазерный источник линейно поляризованного излучения детектирования с оптическим многоканальным разветвителем излучения детектирования, атомарный магнитометрический датчик включает в себя поддерживающее поляризацию оптоволокно для передачи излучения детектирования, а чувствительный элемент включает балансный детектор изменения угла поляризации излучения детектирования.

4. Многоканальная диагностическая система по п. 1, отличающаяся тем, что чувствительный элемент включает катушку радиочастотного поля.

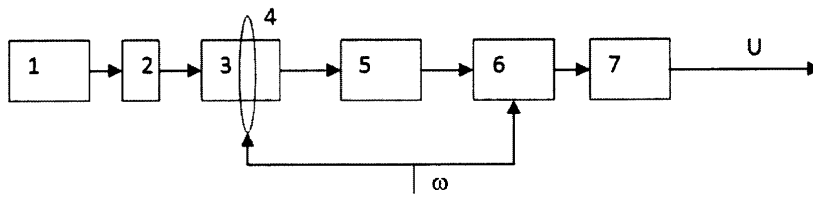
35

40

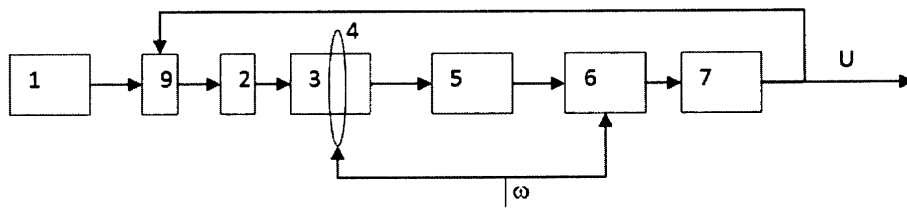
45



фиг. 1



фиг. 2



фиг. 3