



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01R 33/00 (2024.08); G01N 21/62 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024113880, 21.05.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.05.2024

Дата регистрации:
23.10.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.05.2024

(45) Опубликовано: 23.10.2024 Бюл. № 30

Адрес для переписки:
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
26, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, патентно-
лицензионная служба, Лавровой Е.А.

(72) Автор(ы):

Бабунц Роман Андреевич (RU),
Баранов Павел Георгиевич (RU),
Лихачев Кирилл Васильевич (RU),
Учаев Максим Викторович (RU),
Батуева Анастасия Владимировна (RU),
Бундакова Анна Павловна (RU),
Музафарова Марина Викторовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2601734 C1, 10.11.2016. RU
2751147 C1, 08.07.2021. RU 92192 U1, 10.03.2010.
US 7250759 B2, 31.07.2007. US 8372659 B2,
12.02.2013. US 8264224 B2, 11.09.2012.

(54) СПОСОБ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

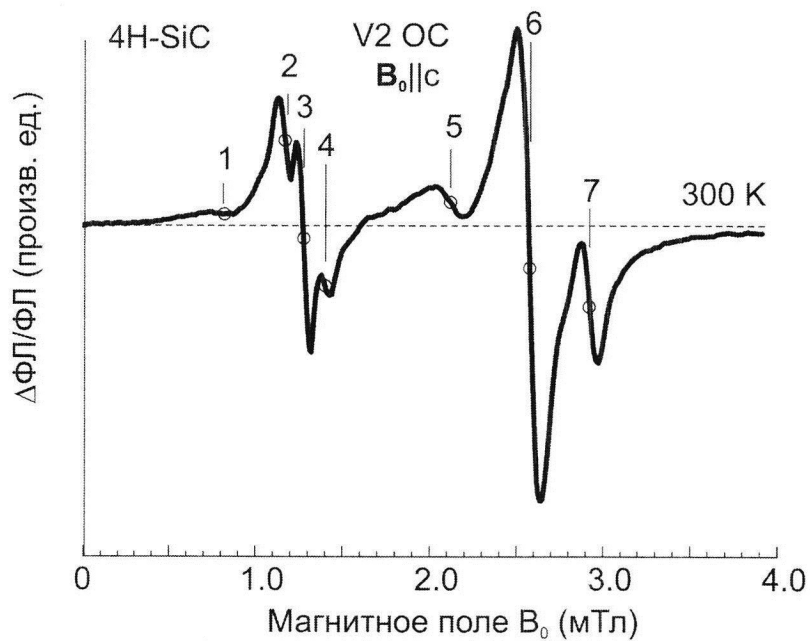
(57) Реферат:

Использование: для оптического измерения векторного магнитного поля. Сущность изобретения заключается в том, что осуществляют воздействие на кристалл карбида кремния гексагонального или ромбического поли типа, содержащий спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием, вдоль его кристаллографической оси с симметрии, сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем. Измеряют интенсивность фотолюминесценции (ФЛ) спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной величине постоянного магнитного поля. В области изменения интенсивности ФЛ снимают первую кривую зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины постоянного магнитного поля и градуируют первую кривую по известному

значению величины магнитного поля в точке перегиба первой кривой. Затем воздействуют внешним векторным магнитным полем, обнуляют компоненты внешнего векторного магнитного поля компенсационными магнитными полями, создаваемыми системой катушек Гельмгольца в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Снимают вторые кривые зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины соответствующей компоненты внешнего векторного магнитного поля, градуируют вторые кривые по известным значениям величин компонентов магнитного поля в точке перегиба соответствующей второй кривой. По измеренным величинам B_x , B_y , B_z компенсационных магнитных полей вычисляют абсолютную величину вектора магнитного поля $|B|$, полярный угол θ и азимутальный угол ϕ , по формулам. Технический результат: обеспечение

возможности исключения нагрева объекта,
магнитное поле в котором измеряют, а также
исключение использования дополнительного

оборудования для создания ВЧ излучения. 4 з.п.
ф-лы, 7 ил.



ФИГ. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

G01R 33/00 (2024.08); G01N 21/62 (2024.08)(21)(22) Application: **2024113880, 21.05.2024**

(24) Effective date for property rights:
21.05.2024

Registration date:
23.10.2024

Priority:

(22) Date of filing: **21.05.2024**(45) Date of publication: **23.10.2024 Bull. № 30**

Mail address:

**194021, Sankt-Peterburg, ul. Politekhnikeskaya,
26, FTI im. A.F. Ioffe, patentno-litsenzionnaya
sluzhba, Lavrovoy E.A.**

(72) Inventor(s):

**Babuncz Roman Andreevich (RU),
Baranov Pavel Georgievich (RU),
Lihachev Kirill Vasilievich (RU),
Uchaev Maksim Viktorovich (RU),
Batueva Anastasia Vladimirovna (RU),
Bundakova Anna Pavlovna (RU),
Muzafarova Marina Viktorovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe
uchrezhdenie nauki Fisiko-tekhnicheskii
institute im. A.F. Ioffe Rossiyskoy akademii
nauk (RU)**

(54) **METHOD FOR OPTICAL MEASUREMENT OF VECTOR MAGNETIC FIELD**

(57) Abstract:

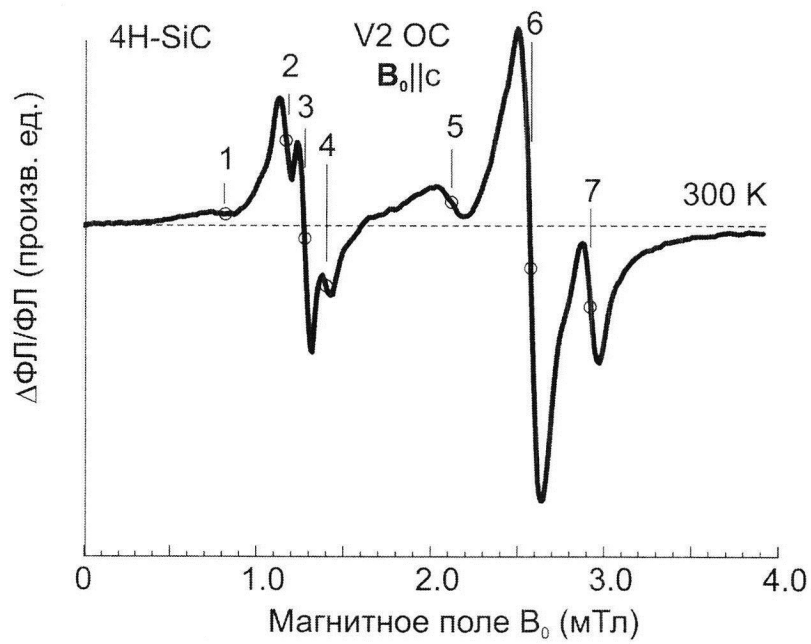
FIELD: measuring.

SUBSTANCE: use for optical measurement of vector magnetic field. Essence of the invention consists in the fact that a silicon carbide crystal of a hexagonal or rhombic polytype containing spin centres with a ground quadruplet spin state, along its crystallographic axis with symmetry, with focused laser radiation, variable magnetic field of low frequency and constant magnetic field. Photoluminescence (PL) intensity of the spin centres with the ground quadruplet spin state is measured at various values of the constant magnetic field. In the area of variation of PL intensity, a first curve of dependence of variation of PL intensity on the value of constant magnetic field is measured and the first curve is graduated from the known value of the magnetic field value at the inflection point of the first curve. Then, external vector magnetic field is applied,

components of external vector magnetic field are zeroed by compensation magnetic fields created by system of Helmholtz coils in three mutually perpendicular directions. Second curves of dependence of change of PL intensity on value of corresponding component of external vector magnetic field are recorded, second curves are graduated by known values of components of magnetic field in point of inflection of corresponding second curve. Absolute value of magnetic field vector $|B|$, polar angle θ and azimuth angle ϕ are calculated by formulas based on the measured values of B_x , B_y , B_z of the compensating magnetic fields.

EFFECT: providing the possibility of excluding heating of an object in which the magnetic field is measured, as well as excluding the use of additional equipment for generating high-frequency radiation.

5 cl, 7 dwg



ФИГ. 1

Изобретение относится к нанотехнологиям и может быть использовано в области измерения локальных магнитных полей в квантовой оптике, биомедицине, а также в информационных технологиях, основанных на квантовых свойствах спинов и одиночных фотонов.

Обнаружение слабых магнитных полей с высоким пространственным разрешением на уровне микро- и нанометров является важнейшей проблемой в различных областях, начиная от фундаментальной физики и материаловедения до хранения данных и биомедицинской науки. Например, на расстоянии 10 нм, спин одного электрона создает магнитное поле около 1 мкТл, и соответствующее поле из одного протона создает несколько нТл. Способ, способный обнаружить такие магнитные поля с нанометровым пространственным разрешением, найдет широкую область применения, начиная от обнаружения сигналов магнитного резонанса от отдельного электронного или ядерного спинов в сложных биологических молекулах до считывания классических или квантовых битов информации, закодированной в электронной или ядерной спиновой памяти. Особую роль в магнитометрии играют оптические способы измерения магнитных полей. При использовании оптического считывания спиновых состояний точечные дефекты позволяют получить оптическое магнитное изображение с высоким пространственным разрешением в условиях окружающей среды.

Известен способ измерения магнитного поля с использованием азотно-вакансионных центров (NV-центров) в алмазе при комнатной температуре (G. Balasubramanian, I.Y. Chan, R. Kolesov, M. Al-Hmoud, J. Tisler, C. Shin, C. Kim, A. Wojcik, P.R. Hemmer, A. Krueger, T. Hanke, A. Leitenstorfer, R. Bratschitsch, F. Jelezko, J. Wrachtrup. - *Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions*, Nature, V. 455 pp. 648-651, 2008). Способ включает следующую последовательность операций: излучение лазера фокусируют на активный материал - кристалл алмаза с NV-центрами, в точке измерения магнитного поля и воздействуют на активный материал внешним постоянным магнитным полем; подают сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение с энергией, близкой к величине расщепления тонкой структуры для NV-центров (2.87 ГГц), которое взаимодействует со спиновой системой NV-центров; регистрируют фотoluminesценцию (ФЛ) NV-центров; изменяют частоту радиочастотного (СВЧ) излучения и измеряют частоты, при которых наблюдается изменение интенсивности люминесценции NV-центров, обусловленное оптически детектированным магнитным резонансом (ОДМР) на спиновых уровнях NV-центров; измеряют частоту магнитного резонанса и определяют величину магнитного поля по частоте магнитного резонанса в соответствии с зеемановским сдвигом спиновых уровней в измеряемом магнитном поле.

Недостатками известного способа является использование алмазов с NV-центрами в качестве активного материала для измерения магнитных полей, технология получения которого дорогостоящая и относительно слабо развита. Кроме того, используется оптический диапазон в видимой области, который плохо совмещается с волоконной оптикой на основе кремния, а также с полосой прозрачности биологических систем. Расщепление тонкой структуры для NV-центров в алмазе существенно зависит от температуры и напряжений в кристалле алмаза, что понижает точность измерений магнитного поля и требует дополнительных усилий для исключения температурных эффектов. Также необходимо использовать СВЧ излучение, которое усложняет конструкцию, создает дополнительные шумы, а также приводит к нагреванию объекта исследования.

Известен способ измерения магнитного поля (см. ЕР 2837930, МПК G01N 21/64, G01N 24/10, G01R 33/24, опубл. 18.02.2015) включающий воздействие оптического

излучения на алмаз, содержащий NV-центры, для выстраивания электронных спинов в определенном спиновом состоянии; воздействие непрерывным СВЧ излучением или импульсами СВЧ излучения на алмаз, содержащий NV-центры, таким образом, чтобы вызвать переходы между электронными спиновыми состояниями NV-центров для
 5 конкретных значений частоты СВЧ излучения, которые зависят от измеряемого магнитного поля, и регистрацию интенсивности выходного оптического излучения, выходящего из алмаза, содержащего NV-центры, таким образом, чтобы определить зеемановский сдвиг и, следовательно, магнитное поле.

Недостатками известного способа измерения магнитного поля является

10 использование алмазов с NV-центрами в качестве активного материала для измерения магнитных полей, технология получения которого, дорогостоящая и относительно слабо развита. Кроме того, в способе используют оптический диапазон в видимой области, который плохо совмещается с волоконной оптикой на основе кремния, а также с полосой прозрачности биологических систем. В известном способе измерения
 15 магнитного поля необходимо использовать сравнительно мощное СВЧ излучение, что усложняет способ, создает дополнительные шумы.

Известен способ измерения локального магнитного поля (см. ЕР 3816645, МПК G01R 33/032, G01R 33/26, G01R 33/00, опубл. 05.05.2021), сконфигурированному для сбора данных векторной магнитометрии, включающий: использование зеленого лазера
 20 накачки для возбуждения NV-центров кристалла алмаза, для выстраивания электронных спинов в определенном спиновом состоянии; изменение частоты СВЧ катушки для модуляции фотолюминесцентного сигнала; измерение фотолюминесцентного сигнала; и через фильтр, установленный между алмазным кристаллом и датчиком изображения, пропускающий красный свет, вызванный возбуждением, на датчик изображения,
 25 измеряющий фотолюминесцентный сигнал.

Известный способ измерения локального магнитного поля применим только к ансамблю NV-центров и не может быть использован в магнитометрии на одиночных центрах. При измерении векторного магнитного поля с использованием ансамбля NV-центров, теоретически наличие четырех различных ориентаций NV-центра в алмазе
 30 позволяет восстановить вектор магнитного поля, но требуется перебрать до 24 возможных ориентаций, с использованием эталонных магнитных полей, поскольку не представляется возможным однозначно идентифицировать резонансные переходы и связать их с фиксированной ориентацией NV-центра.

Известен способ измерения магнитного поля (см. Н. Kraus, V. A. Soltamov, F. Fuchs, D. Simin, A. Sperlich, P. G. Baranov, G. V. Astakhov, V. Dyakonov; Magnetic field and
 35 temperature sensing with atomic-scale spin defects in silicon carbide, Nature Scientific Reports, 2014), включающий воздействие на кристалл карбида кремния гексагонального или ромбического политаипа, содержащего спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$, вдоль его кристаллографической оси с симметрии
 40 высокочастотным (ВЧ) излучением с энергией, близкой к величине расщепления тонкой структуры для спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием (20-150 МГц), магнитным полем исследуемого образца и сфокусированным лазерным излучением (с длиной волны 780-850 нм), при этом измеряют интенсивность ФЛ
 45 спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной частоте ВЧ излучения, измеряют частоты ВЧ излучения в области изменения интенсивности люминесценции, обусловленное магнитным резонансом на спиновых уровнях спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием; измеряют частоту магнитного резонанса и определяют величину магнитного поля исследуемого

образца по частоте магнитного резонанса в соответствии с зеемановским сдвигом спиновых уровней в измеряемом магнитном поле.

Способ основан на измерении частотных отклонений, зависящих от расщепления зеемановских уровней для основного квадруплетного спинового состояния $S=3/2$ спиновых центров в карбиде кремния. Расщепление тонкой структуры для спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием в карбиде кремния, в отличие от NV центров в алмазе, практически не зависит от температуры и напряжений в кристалле карбида кремния, что повышает точность измерений магнитного поля и не требует дополнительных усилий для исключения температурных эффектов. Оси ансамбля спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием в карбиде кремния ориентированы вдоль гексагональной кристаллографической c оси, в отличие от ансамбля NV-центров в алмазе, в котором оси NV-центров ориентированы вдоль одного из четырех кристаллографических направлений $\langle 111 \rangle$ и, поэтому, используя ОДМР, в одном эксперименте может быть проведено измерение только на одном из четырех центров, тогда как в карбиде кремния все центры с основным квадруплетным спиновым состоянием уже самой природой выстроены вдоль одной оси c.

Недостатком известного способа измерения магнитного поля является необходимость использования ВЧ излучения, что усложняет осуществление способа, а также создает дополнительные шумы и нагревает исследуемый объект, который помещается вплотную к кристаллу карбида кремния с спиновыми центрами с основным квадруплетным спиновым состоянием и в котором измеряется магнитное поле. Также необходимо использование дополнительного оборудования для создания ВЧ излучения и необходимость подвода ВЧ излучения в точку измерения магнитного поля с помощью петли или катушки.

Известен способ измерения магнитного поля (см D. Simin, F. Fuchs, H. Kraus, A. Sperlich, P. G. Baranov, G. V. Astakhov, and V. Dyakonov, High-Precision Angle-Resolved Magnetometry with Uniaxial Quantum Centers in Silicon Carbide, Phys. Rev. Applied 4, 014009 (2015)) с получением частичной информации об его векторных свойствах в виде определения полярного угла с использованием аксиальных спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$ в карбиде кремния гексагонального политипа. Способ основан на оптическом детектировании набора магнитных резонансов и определения их относительного положения, зависящего от величины и полярного угла измеряемого магнитного поля. Способ применим, как для ансамблей спиновых центров, так и для одиночных центров со спином $S=3/2$.

Недостатком известного способа измерения магнитного поля является необходимость использования ВЧ излучения, что усложняет осуществление способа, а также создает дополнительные шумы и нагревает исследуемый объект, который помещается вплотную к кристаллу карбида кремния с спиновыми центрами с основным квадруплетным спиновым состоянием и в котором измеряется магнитное поле. Также необходимо использование дополнительного оборудования для создания ВЧ излучения и необходимость подвода ВЧ излучения в точку измерения магнитного поля с помощью петли или катушки. Способ не позволяет получить полную векторную информацию о магнитном поле, так нет возможности определения азимутального угла.

Известен способ измерения магнитного поля (см. RU 2601734, МПК G01R 33/00, В82В 1/00, опубл. 10.11.2016), совпадающий с настоящим решением по наибольшему числу существенных признаков и принятый за прототип. Способ-прототип включает воздействие на кристалл карбида кремния гексагонального или ромбического политипа, содержащего спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием,

вдоль его кристаллографической оси с симметрии сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем. При этом измеряют интенсивность ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной величине постоянного магнитного поля. В области изменения интенсивности ФЛ снимают первую кривую зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины постоянного магнитного поля, градуируют первую кривую по известному значению величины магнитного поля в точке перегиба первой кривой. Затем помещают на поверхность упомянутого кристалла карбида кремния исследуемый образец и измеряют интенсивность ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной величине постоянного магнитного поля. В области изменения интенсивности ФЛ снимают вторую кривую зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины постоянного магнитного поля. Величину магнитного поля, создаваемого исследуемым образцом в точке фокуса лазерного излучения, определяют по величине горизонтального сдвига второй кривой относительно первой кривой.

Недостатком известного способа измерения магнитного поля является возможность определения только одной компоненты измеряемого магнитного поля B_z , ориентированной вдоль направления постоянного магнитного поля B_0 , принятого за ось Z и отсутствие возможности определения компонент измеряемого магнитного поля в перпендикулярной плоскости XY: B_x и B_y , и тем самым, определения полярного и азимутального углов.

Задачей настоящего изобретения являлась разработка способа оптического измерения векторного магнитного поля, который бы позволял определять полярный и азимутальный углы направления измеряемого магнитного поля, в котором исключался бы нагрев объекта, магнитное поле в котором измеряют, а также отсутствовала бы необходимость в использовании дополнительного оборудования для создания ВЧ излучения и подвода ВЧ излучения в точку измерения магнитного поля с помощью петли или катушки.

Поставленная задача решается тем, что способ измерения векторного магнитного поля включает воздействие на кристалл карбида кремния гексагонального или ромбического политаипа, содержащий спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием, вдоль его кристаллографической оси с симметрии, сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем, при этом измеряют интенсивность ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной величине постоянного магнитного поля и в области изменения интенсивности ФЛ снимают первую кривую зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины постоянного магнитного поля и градуируют первую кривую по известному значению величины магнитного поля в точке перегиба первой кривой. Новым является то, что затем воздействуют внешним векторным магнитным полем, обнуляют компоненты внешнего векторного магнитного поля компенсационными магнитными полями, создаваемыми системой катушек Гельмгольца в трех взаимно-перпендикулярных направлениях, снимают вторые кривые зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины соответствующей компоненты внешнего векторного магнитного поля, градуируют вторые кривые по известным значениям величин компонентов магнитного поля в точке перегиба соответствующей второй кривой и по измеренным величинам B_x , B_y , B_z компенсационных магнитных полей вычисляют абсолютную величину вектора

магнитного поля $|B|$, полярный угол θ и азимутальный угол ϕ , по формулам:

$$|B| = \sqrt{(B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2)}, \text{ мТл};$$

$$\theta = \arctg \sqrt{(B_X^2 + B_Y^2) / B_Z}, \text{ градусы};$$

$$\phi = \arctg(B_X / B_Y), \text{ градусы}.$$

Возбуждение ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием сфокусированным лазерным излучением может быть осуществлено через сканирующий конфокальный микроскоп.

Возбуждение ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием сфокусированным лазерным излучением может быть осуществлено через микроскопию на основе подавления спонтанного испускания.

Воздействие сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем может быть осуществлено на кристалл карбида кремния в виде нанокристалла, содержащего, по меньшей мере, один спиновый центр с основным квадруплетным спиновым состоянием, или на кристалл карбида кремния с обедненным содержанием изотопа C-13.

В настоящем способе для получения информации о векторных свойствах измеряемого магнитного поля, используют как расщепления тонкой структуры для электронного спина $S=3/2$, так и сверхтонкое взаимодействие между электронным магнитным моментом электронного спина $S=3/2$ с одним ядерным магнитным моментом изотопа Si-29 с ядерным спином $I=1/2$ в спиновых центрах с квадруплетным основным состоянием, приводящие к двукратному увеличению количества спиновых уровней в магнитном поле. В результате количество точек антипересечения уровней (АПУ), в которых происходит резкое изменение интенсивности ФЛ, увеличивается, при этом вид зависимостей интенсивности ФЛ от постоянного магнитного поля B (будем в дальнейшем называть эти зависимости как «спектры АПУ») изменяется с изменением ориентации измеряемого внешнего магнитного поля, то есть может служить характеристикой векторных свойств упомянутого магнитного поля.

Спиновый гамильтониан H , описывающий спиновые уровни спинового центра с основным квадруплетным спиновым состоянием в магнитном поле B , имеет вид

$$H = g_e B_e B \cdot S_z + D[S_z^2 - 1/3 S(S+1)] + A S \cdot I, \text{ Дж}; \quad (1)$$

где: B - постоянное магнитное поле, Тл;

S - безразмерный оператор электронного спина;

$S=3/2$ - безразмерная величина, характеризующая величину электронного спина;

S_z - безразмерный оператор проекции электронного спина на направление внешнего магнитного поля;

$g_e=2,002$ - безразмерная величина, называемая g-фактором, является характеристикой гиромангнитного отношения для электронного магнитного момента используемого спинового центра с основным квадруплетным спиновым состоянием в карбиде кремния;

$\beta_e=9.2740 \cdot 10^{-24}$ - магнетон Бора, Дж/Тл;

D - расщепление тонкой структуры для спинового центра с основным квадрупольным спиновым состоянием в политипе 4H-SiC, $D=35.0$, МГц.

I - безразмерный оператор ядерного спина изотопа кремния Si-29;

$I=1/2$ - безразмерная величина, характеризующая величину ядерного спина изотопа кремния Si-29;

A - расщепление сверхтонкой структуры для взаимодействия с одним ядром изотопа кремния Si-29 с ядерным спином $I=1/2$ в спиновом центре с $S=3/2$ в 4H-SiC, $A=9.0$, МГц.

Настоящее техническое решение поясняется чертежами, где:

на фиг. 1 изображена реперная зависимость относительного изменения интенсивности ФЛ, $\Delta\text{ФЛ}/\text{ФЛ}$, спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$ в кристалле 4H-SiC , возбуждаемой сфокусированным лазерным излучением, при
 5 приложении постоянного магнитного поля B_0 , а также переменного модуляционного магнитного поля низкой частоты $B_{\text{Мод}}$, на которой производится синхронное детектирование сигнала, направленных вдоль оси с кристалла, от величины постоянного магнитного поля в области антипересечения уровней (АПУ), обозначенных метками 1-7 при нулевом внешнем магнитном поле;

10 на фиг. 2 приведена схема энергетических уровней в магнитном поле спинового центра с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$; кружками обозначены области антипересечения, соответствующие меткам 1-7 на фиг. 1. Энергетические уровни обозначены проекциями M_S спина $S=3/2$ на направление магнитного поля;

15 на фиг. 3 изображена зависимость относительного изменения интенсивности люминесценции, $\Delta\text{ФЛ}/\text{ФЛ}$, спиновых центров в кристалле 4H-SiC от величины постоянного магнитного поля B_0 , ориентированного вдоль оси с кристалла, в области антипересечения уровней, зарегистрированная при повышенной температуре 350 К;

на фиг. 4 демонстрируется принцип калибровки векторного магнитометра для
 20 выполнения измерений внешнего измеряемого магнитного поля в соответствии с настоящим способом с использованием системы магнитных катушек Гельмгольца для создания заданного калибровочного магнитного поля в трех направлениях X, Y, Z;

на фиг. 5 представлены изменения интенсивностей выделенных линий в спектрах АПУ, характеризующих изменения люминесценции спиновых центров в области
 25 антипересечения уровней, служащих критериями для предварительной оценки внешних магнитных полей.

Кривая 8 представляет изменение интенсивности линии, обозначенной меткой 5 на фиг. 4 в зависимости от магнитного поля в перпендикулярной плоскости (B_X);

30 Кривая 9 представляет отношение интенсивности линий, обозначенных метками 6 и 7 на фиг. 4I6/I7;

Кривая 10 представляет отношение интенсивности линий, обозначенных метками 6 и 3 на фиг. 4I6/I3.

на фиг. 6 демонстрируется способ полностью оптической квантовой векторной магнитометрии для измерения вектора внешнего магнитного поля, (см. пример 1,
 35 основанный на компенсации этого поля). Спектр АПУ 11 зарегистрирован в отсутствии внешнего магнитного поля, спектр 12 с приложением внешнего магнитного поля; спектры 13 и 14 зарегистрированы при введении компенсационных полей B_Z 13 и B_X , B_Y 14; спектр 15 дублирует спектр 11 и наложен на спектр 14 для сравнения.

40 На фиг. 7 показан способ полностью оптической квантовой векторной магнитометрии для измерения вектора внешнего магнитного поля, (см. пример 2, основанный на компенсации этого поля).

Спектр АПУ 16 зарегистрирован в отсутствии внешнего магнитного поля, спектр 17 с приложением внешнего магнитного поля; спектры 18 и 19 зарегистрированы при
 45 введении компенсационных полей B_Z 18 и B_X , B_Y 19; спектр 20 дублирует спектр 16 и наложен на спектр 19 для сравнения.

Настоящий способ полностью оптического измерения векторного магнитного поля, то есть измерения амплитуды и трех проекций магнитного поля компенсационным

методом, включает предварительную калибровку магнитного поля, создаваемого тремя катушками Гельмгольца по трем взаимно перпендикулярным направлениям X, Y, Z, и получения коэффициентов пересчета токов, подаваемых в катушки Гельмгольца, в магнитные поля, а также для быстрой оценки компенсационных магнитных полей.

5 Отличительной особенностью рассматриваемой системы антипересечения уровней является возможность калибровки магнитного поля, включая и самокалибровку в случае удаленных измерений, с использованием нескольких параметров, заданных природными взаимодействиями в самой системе, не зависящими от внешних условий, включая температуру.

10 На фиг. 1 изображена реперная зависимость относительного изменения интенсивности фотолюминесценции, $\Delta\text{ФЛ}/\text{ФЛ}$, спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$ в кристалле карбида кремния политипа. 4H-SiC , возбуждаемой сфокусированным лазерным излучением, при приложении квази-стационарного магнитного поля B_0 , а также переменного модуляционного магнитного поля низкой

15 частоты $B_{\text{Мод}}$, направленных вдоль оси с кристалла, от величины квазистационарного магнитного поля в области антипересечения уровней (АПУ), зарегистрированные при комнатной температуре 300 К при нулевом внешнем магнитном поле. Метками от 1 до 7 обозначены линии антипересечения уровней в виде производной, зарегистрированные с использованием синхронного детектора на частоте

20 низкочастотной модуляции магнитного поля, фиксирующие изменения интенсивности ФЛ. Линии 3 и 6 являются двумя точками антипересечения энергетических уровней для системы, у которой отсутствует сверхтонкое взаимодействие с ядром Si-29 , то есть все ядра кремния во второй координационной сфере относительно вакансии кремния, входящей в структуру спинового центра, имеют нулевые ядерные магнитные моменты.

25 На фиг. 2 приведена схема энергетических уровней в магнитном поле спинового центра с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$; расщепление тонкой структуры в нулевом магнитном поле $2D=70$; МГц. Энергетические уровни, обозначенные толстыми черными линиями, относятся к системе, у которой отсутствует сверхтонкое взаимодействие, то есть все ядра кремния во второй координационной

30 сфере относительно вакансии кремния, входящей в структуру спинового центра, имеют нулевые ядерные магнитные моменты; АПУ1 и АПУ2 являются двумя точками антипересечения упомянутых уровней, которые обозначают на фиг. 1 линии 3 и 6. Серыми тонкими линиями показаны зависимости энергетических уровней в спиновом центре, в котором имеется сверхтонкое взаимодействие А с одним ядром Si-29 , $A=9$; МГц. Открытыми кружками серого цвета показан набор точек антипересечения для этих уровней, которые соответствуют линиям, пронумерованным на фиг. 1. Уровни обозначены проекциями M_S спина $S=3/2$ на направление магнитного поля: $M_S=+3/2$; $M_S=-3/2$; $M_S=+1/2$; $M_S=-1/2$.

40 На фиг. 3 изображена зависимость относительного изменения интенсивности фотолюминесценции, $\Delta\text{ФЛ}/\text{ФЛ}$, спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием $S=3/2$ в датчике на основе пластины кристалла карбида кремния политипа 4H-SiC от величины квазистационарного магнитного поля B_0 , зарегистрированная при повышенной температуре 350 К в ориентации квазистационарного магнитного поля

45 B_0 параллельной оси с кристалла датчика. В пределах экспериментальной ошибки не наблюдается изменение параметра D (расщепления уровней в нулевом магнитном поле) с повышением температуры, так как положение АПУ1 при температуре 300 К (фиг. 1) совпадает с положением АПУ1 при температуре 350 К, то есть настоящий способ

оптического измерения магнитного поля может быть использован в широком температурном диапазоне.

На фиг. 4 демонстрируется принцип калибровки векторного магнитометра для оценки величин компенсационных полей для выполнения измерений внешнего магнитного поля в соответствии с настоящим способом с использованием системы магнитных катушек Гельмгольца для создания заданного калибровочного магнитного поля в трех направлениях X, Y, Z. При проведении измерений Z-компонента магнитного поля B_Z обнуляется путем смещения точки АПУ1 к стандартному значению D (1.25 мТл). Далее 5 меняется только перпендикулярная составляющая. Для удобства измерения калиброванное перпендикулярное магнитное поле будет приложено в направлении оси X. Полярный угол θ определяется по найденным значениям B_Z и B_X : $\theta = \arctg(B_X/B_Z)$. Форма спектра АПУ зависит только от полярного угла θ и не зависит от азимутального угла ϕ . Азимутальный угол находится путем компенсации перпендикулярной составляющей внешнего магнитного поля при вращении компенсирующей 10 перпендикулярной составляющей в азимутальной плоскости. Когда ось перпендикулярной составляющей внешнего поля совпадает с осью компенсирующей магнитной составляющей при их противоположных направлениях, но равных абсолютных значениях этих составляющих, внешнее магнитное поле компенсируется и спектр АПУ имеет вид, совпадающий с реперным спектром в отсутствие внешнего 20 магнитного поля (фиг. 1) и ориентации квазистационарного магнитного поля B_0 параллельной аксиальной оси спинового центра, совпадающей с кристаллической осью датчика на основе карбида кремния.

Предлагается использовать для калибровки магнитного поля, включая и само-калибровку в случае удаленных измерений, положение АПУ1 и АПУ2 в фиксированных 25 магнитных полях равных параметрам расщепления тонкой структуры спинового гамильтониана (1), $B(\text{АПУ1}) = D/g_e\beta_e$ и $B(\text{АПУ2}) = 2D/g_e\beta_e$, мТл; то есть положение линий (3) и (6) на фиг. 1; $g_e = 2.0028$ - безразмерная величина; $\beta_e = 9.2740 \cdot 10^{-24}$ - магнетон Бора, Дж/Тл; $D = 35$; МГц, $B(\text{АПУ1}) = 1.25$; мТл, $B(\text{АПУ2}) = 2.50$; мТл.

Вторым возможным параметром для калибровки магнитного поля, является фиксированное расстояние между линиями 2 и 4 на фиг. 1, определяемое расщеплением 30 сверхтонкой структуры, A, с одним ядром Si-29, A=9; МГц, согласно спиновому гамильтониану (1). Коэффициенты пересчета токов, подаваемых в катушки Гельмгольца, определялись исходя из фиксированных параметров спектров АПУ.

Для каждой величины калибровочных полей B_Z , B_X , B_Y снимают калибровочные зависимости изменения интенсивности ФЛ от величины постоянного магнитного поля B_0 для дальнейшего использования калибровочных зависимостей при измерении внешних 35 магнитных полей. Компонента калибровочного магнитного поля B_Z просто сдвигает положение первого антикроссинга АПУ1 относительно соответствующей величины в реперном спектре АПУ (линия 3 на фиг. 1) по оси абсцисс. Так как спиновый центр в датчике магнитного поля на основе кристалла 4H-SiC обладает аксиальной симметрией, не теряя общности измерения, удобно вводить калибровочное перпендикулярное магнитное поле вдоль оси X, B_X . В зависимости от величины вводимого 40 перпендикулярного магнитного поля B_X будет меняться форма спектра АПУ (фиг. 4), при этом считаем, что компонента калибровочного магнитного поля $B_Z = 0$.

Фиксируем характерные изменения в спектрах АПУ в зависимости от величины перпендикулярного магнитного поля B_X и составляем список критериев, по которым

оценивается величина внешнего перпендикулярного магнитного поля, что позволит быстро вводить компенсационные магнитные поля. Обозначения линий в реперном спектре АПУ представлены на фиг. 1 и повторены на фиг. 3 для спектра АПУ с нулевыми калибровочными магнитными полями $B_Z=0$ и $B_X=0$. На основе фиг.4 можно составить

ряд критериев для оценки перпендикулярной составляющей (в данных измерениях компоненты B_X) внешнего магнитного поля.

На фиг. 5 представлены изменения интенсивностей выделенных линий в спектрах АПУ, характеризующих изменения ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием в области антипересечения уровней, служащих критериями для предварительной оценки внешних магнитных полей и выбора величин компенсационных магнитных полей для обнуления измеряемого внешнего магнитного поля.

Интенсивность линии 5 на фиг. 4, обозначенная как 15 на фиг. 5, уменьшается, по мере увеличения величины перпендикулярного магнитного поля и при перпендикулярной компоненте B_X равной 0.15 мТл становится равной нулю, в перпендикулярных полях больших 0.15 мТл эта линия не появляется. Зависимости на фиг. 5 определяются системой энергетических уровней и фиксированы для используемого датчика на основе кристалла 4Н-SiC с природным содержанием изотопов со спиновыми центрами с квадруплетным основным состоянием. На основе этого факта можно сформулировать первый критерий: после внесения внешнего (измеряемого) магнитного поля, если мы наблюдаем линию 5 в спектре АПУ - перпендикулярная составляющая внешнего магнитного поля <0.15 мТл. Таким образом, в области малых полей (до 0.15 мТл) можно осуществлять полностью оптическую векторную магнитометрию на основе интенсивности линии 5. Учитывая, что линия 5 сравнительно слабо изменяется вблизи точки $B_X=0$, удобно проводить более точные измерения путем изменения магнитного поля B_X с переходом через нулевое значение, то есть в пределах $-0.1 < B_X < +0.1$; мТл, то есть в магнитных полях, где интенсивность линии 5 изменяется наиболее резко, с последующим нахождением средней точки, которая и будет соответствовать $B_X=0$.

Интенсивность линии 6 сравнивается с интенсивностью линии 3 по мере увеличения перпендикулярной компоненты калибровочного магнитного поля на фиг. 4. Строим зависимость отношения интенсивностей этих линий, как I_6/I_3 от величины перпендикулярной компоненты внешнего магнитного поля (фиг. 5); при калибровочном магнитном поле $B_X=0.28$ мТл отношение интенсивностей становится равным 1. Это приводит ко второму критерию: после внесения перпендикулярной компоненты внешнего магнитного поля, если интенсивности пиков 6 и 3 совпадают - мы находимся в области перпендикулярной компоненты магнитных полей $B_X=0.28$ мТл, если отношение больше 1, $B_X < 0.28$; мТл, если отношение меньше 1, $B_X > 0.28$ мТл, и далее наблюдается монотонное уменьшение отношения интенсивностей линий 6 и 3 при увеличении перпендикулярной составляющей магнитного поля, что дает возможность судить о величине перпендикулярной составляющей магнитного поля в широком диапазоне магнитных полей.

Линия 7 на фиг. 4 уменьшается по мере увеличения величины перпендикулярного магнитного поля, B_X ; зависимость отношения интенсивностей линий 6 и 7 от величины перпендикулярного магнитного поля в виде отношения I_6/I_7 построена на фиг. 5, видно, что при $B_X=0.4$ мТл линия 7 сливается с линией 6 и при дальнейшем увеличении B_X не разрешается; таким образом, если линия 7 не разрешается - перпендикулярная

составляющая магнитного поля больше или равна 0.4 мТл, то есть при $V_X > 0.4$ мТл полностью пропадает расщепление сверхтонкой структуры для второго АПУ, то есть, исчезает разрешенная структура для линий 6 и 7. Критерий 4. При $V_X = 0.6$ мТл полностью пропадает расщепление сверхтонкой структуры для первого АПУ (фиг. 1), то есть, если исчезает разрешенная структура для линий 2, 3 и 4, то перпендикулярная составляющая внешнего магнитного поля $V_X > 0.6$ мТл.

Следующим этапом измерения внешнего магнитного поля является последовательная компенсация всех трех компонент V_Z , V_X и V_Y , создаваемых магнитным полем

постоянного магнита, расположенного в двух произвольных точках (Примеры 1 и 2). Первый этап компенсации внешнего магнитного поля осуществляется путем приложения компенсационного магнитного поля, обнуляющего параллельную компоненту V_Z внешнего магнитного поля, то есть величина компенсирующего поля вдоль оси Z изменяется до тех пор, пока точки АПУ1 искаженного спектра и реперного спектра не совпадут. Второй этап компенсации внешнего магнитного поля заключается во введении компенсирующего магнитного поля в перпендикулярной плоскости XY , которое изменяет форму спектра АПУ без изменения положения АПУ1 в квазистационарном магнитном поле, которое было установлено компенсирующей компонентой магнитного поля вдоль оси z . Таким образом, изменяя величину тока, подаваемого на катушки Гельмгольца в плоскости XY , можно добиться полной компенсации внешнего (измеряемого) магнитного поля, то есть его обнуления в области, возбуждаемой сфокусированным лазерным излучением. Полная компенсация наступает, когда спектр АПУ, искаженный внешним магнитным полем, в результате введения компенсационных полей полностью совпадает по форме и положению с реперным спектром АПУ, зарегистрированным в нулевом внешнем магнитном поле (фиг. 1).

Пример 1. На фиг. 6 демонстрируется способ полностью оптической квантовой векторной магнитометрии для измерения вектора внешнего магнитного поля, основанный на компенсации этого поля. Сверху показан спектр АПУ 11, записанный в отсутствие внешнего магнитного поля и совпадающий с реперным спектром (фиг. 1).

После введения внешнего магнитного поля с помощью постоянного магнита, помещенного в первое фиксированное положение относительно датчика магнитного поля, спектр АПУ искажается, что представлено на фиг. 6 спектром 12. Видны существенные изменения в спектре АПУ, которые сравниваются с калибровочными спектрами на фиг. 4, и в результате получают предварительные оценочные значения перпендикулярной компоненты внешнего магнитного поля, при этом параллельная компонента внешнего магнитного поля V_Z однозначно определяется по сдвигу первого антикроссинга АПУ1 относительно соответствующей величины в реперном спектре АПУ 11 на фиг. 6 по оси абсцисс вправо. Поскольку в магнитометре используется схема модуляции магнитного поля, чувствительность прибора можно определить по наклону отклика, пересекающего ноль, и шуму, сохраняющемуся в интересующей полосе частот используемой частоты модуляции. В результате по регистрации компоненты V_Z

достигается чувствительность к магнитному полю ~ 0.1 мкТл/ $\sqrt{\text{Hz}}$ в объеме $\sim 10^{-8}$ мм³ при комнатной температуре. Два нижних спектра на фиг. 6 соответствуют последовательному наложению компенсирующих магнитных полей в виде компоненты V_Z 13, смещающих сигнал первого АПУ1 до совпадения с реперным сигналом $D=1.25$ мТл, а затем V_X и V_Y компоненты 14 применяются до появления спектра, совпадающего с реперным спектром 15, показанным пунктирной линией. Принцип компенсации

измеряемого магнитного поля $B_{\text{ИЗМ}}$ (черные стрелки на вставке фиг. 6) путем применения компенсационного поля $B_{\text{КОМП}}$ (серые стрелки на вставке фиг. 6) показан условно.

Эксперименты проводились при комнатной температуре, площадь пятна оптического возбуждения составляла около 1 мкм^2 , частота модуляции магнитного поля $f_{\text{Mod}}=331$ Гц, амплитуда модуляции 0.01 мТл , модуляционное магнитное поле было направлено вдоль квазистационарного магнитного поля B_0 , то есть перпендикулярно плоскости пластины карбида кремния, нормаль к которой совпадает с осью z . Модуль и направление компенсирующего поля в виде полярного, θ , и азимутального, ϕ , углов вычисляются по формулам:

$$|B|=\sqrt{(B_X^2+B_Y^2+B_Z^2)}; \theta=\arctg\{\sqrt{(B_X^2+B_Y^2)}/B_Z\}; \phi=\arctg(B_X/B_Y).$$

$$B_Z=0.131, B_X=0.174, B_Y=0.200, |B|=0.296, \text{ мТл}; \theta=63.7; \phi=49.0, \text{ градусы}.$$

Чувствительность нахождения углов θ и ϕ определяется чувствительностью к определению перпендикулярной компоненты магнитного поля, которая составляет $\sim 0.01 \text{ мТл}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Пример 2. На фиг. 7 демонстрируется способ полностью оптической квантовой векторной магнитометрии для измерения вектора внешнего магнитного поля, основанный на компенсации фиксированного внешнего магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, расположенным во второй произвольной точке вблизи датчика магнитного поля. $B_Z=0.110, B_X=0.174, B_Y=0.207, |B|=0.290, \text{ мТл}; \theta=67.9; \phi=50.0; \text{ градусы}.$

Возбуждение ФЛ спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием сфокусированным лазерным излучением может быть осуществлено с использованием сканирующего конфокального микроскопа или с использованием микроскопии на основе подавления спонтанного испускания. Сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем можно воздействовать на нанокристалл карбида кремния, содержащего, по меньшей мере, один спиновый центр с основным квадруплетным спиновым состоянием. Недавно опубликована работа (M. Garsi, R. Stohr, A. Denisenko, F. Shagieva, N. Trautmann, U. Vogl, B. Sene, F. Kaiser, A. Zappe, R. Reuter, J. Wrachtrup, Three-dimensional imaging of integrated-circuit activity using quantum defects in diamond, Phys. Rev. Applied, Accepted 18 December 2023), где NV-дефекты в алмазе используются для исследования распределения токов в интегральных структурах, выполненных на основе кремния, при этом пластина алмаза с NV-центрами помещается сверху на приборную структуру. Используется ОДМР, то есть необходима система подачи микроволнового излучения на алмаз и интегральную схему. При использовании настоящего способа на основе спиновых центров в карбиде кремния нет необходимости прикладывать микроволновое излучение (генератор, антенна), достаточно поместить датчик на поверхность интегральной схемы или биологического объекта, при этом используется фотовозбуждение и ФЛ в ближней инфракрасной области, совпадающей с окном прозрачности волоконной оптики и биологических объектов. Спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием могут быть созданы непосредственно внутри приборной структуры, изготовленной на основе карбида кремния политипа 4H-SiC, и выполнять функцию локального векторного магнитометра, измеряющего магнитное поле, создаваемого распределением токов в приборной структуре в области, возбуждаемой сфокусированным лазерным лучом, по изменению интенсивности фотолуминесценции в упомянутой области.

Настоящий способ может быть использован также для обнаружения переменных

магнитных полей в выделенной с помощью оптической системы пространственной области объекта исследования, при этом, время изменений магнитного поля может достигать очень малых величин (меньше 10 нс), поскольку эффекты АПУ не требуют приложения больших мощностей радиочастотного поля, как это осуществляется при регистрации сигналов ОДМР.

Один из вариантов реализации настоящего способа измерения магнитного поля является использование приповерхностного слоя кристалла карбида кремния, содержащего высокую концентрацию спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием, для измерения распределения магнитных полей в виде магнитно-резонансной томографии на наноуровне, с возможным применением для получения изображений молекулярной органической или биологической структуры, нанесенной на поверхности карбида кремния.

Для уменьшения ширины линий АПУ и тем самым повышения чувствительности измерений магнитного поля в датчике магнитного поля перспективно использование карбида кремния с обедненным содержанием изотопа C-13, обладающего ядерным магнитным моментом.

(57) Формула изобретения

1. Способ оптического измерения векторного магнитного поля, включающий воздействие на кристалл карбида кремния гексагонального или ромбического политапа, содержащего спиновые центры с основным квадруплетным спиновым состоянием, вдоль его кристаллографической оси с симметрии, сфокусированным лазерным излучением, переменным магнитным полем низкой частоты и постоянным магнитным полем, при этом измеряют интенсивность фотолюминесценции спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием при различной величине постоянного магнитного поля и в области изменения интенсивности фотолюминесценции снимают первую кривую зависимости изменения интенсивности фотолюминесценции от величины постоянного магнитного поля, градуируют первую кривую по известному значению величины магнитного поля в точке перегиба первой кривой, отличающийся тем, что затем воздействуют внешним векторным магнитным полем, обнуляют компоненты внешнего векторного магнитного поля компенсационными магнитными полями, создаваемыми системой катушек Гельмгольца в трех взаимно перпендикулярных направлениях, снимают вторые кривые зависимости изменения интенсивности фотолюминесценции от величины соответствующей компоненты внешнего векторного магнитного поля, градуируют вторые кривые по известным значениям величин компонентов магнитного поля в точке перегиба соответствующей второй кривой и по измеренным величинам B_x , B_y , B_z компенсационных магнитных полей вычисляют абсолютную величину вектора магнитного поля $|B|$, полярный угол θ и азимутальный угол ϕ по формулам:

$$|B| = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}, \text{ мТл};$$

$$\theta = \arctg[(B_x^2 + B_y^2)/B_z], \text{ градусы};$$

$$\phi = \arctg(B_x/B_y), \text{ градусы}.$$

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что возбуждение люминесценции спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием сфокусированным лазерным излучением осуществляют с использованием сканирующего конфокального микроскопа.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что возбуждение люминесценции спиновых центров с основным квадруплетным спиновым состоянием сфокусированным лазерным

излучением осуществляют с использованием микроскопии на основе подавления спонтанного испускания.

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что постоянным магнитным полем, переменным магнитным полем низкой частоты и сфокусированным лазерным излучением
5 воздействуют на нанокристалл карбида кремния, содержащего, по меньшей мере, один спиновый центр с основным квадруплетным спиновым состоянием.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что воздействуют на кристалл карбида кремния с обедненным содержанием изотопа C-13.

10

15

20

25

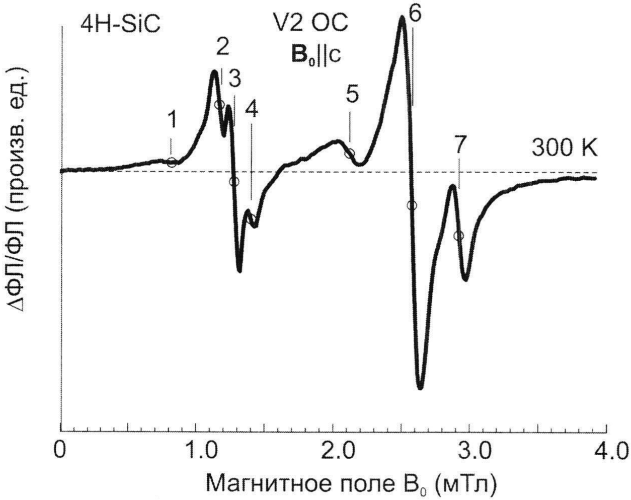
30

35

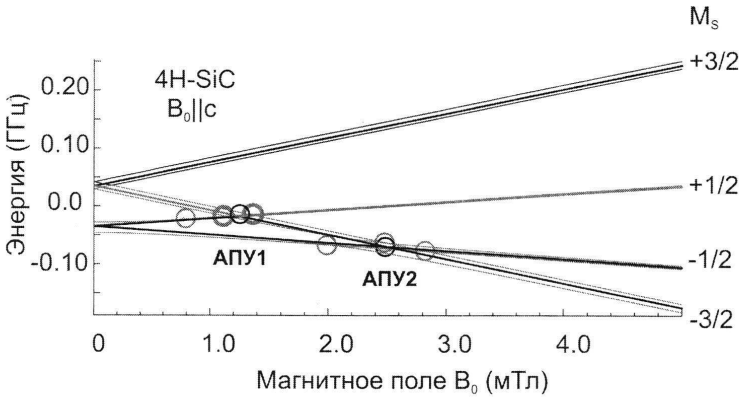
40

45

1

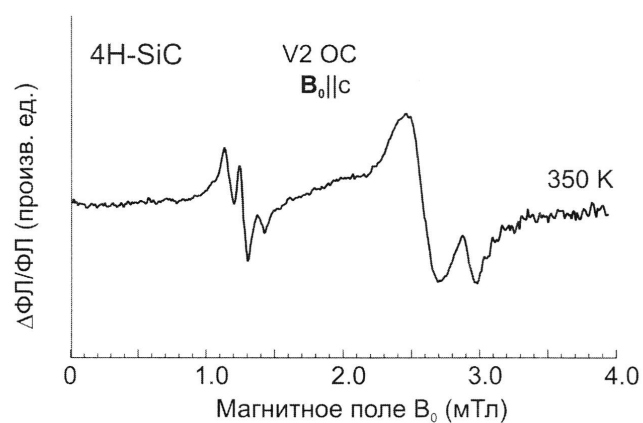


ФИГ. 1

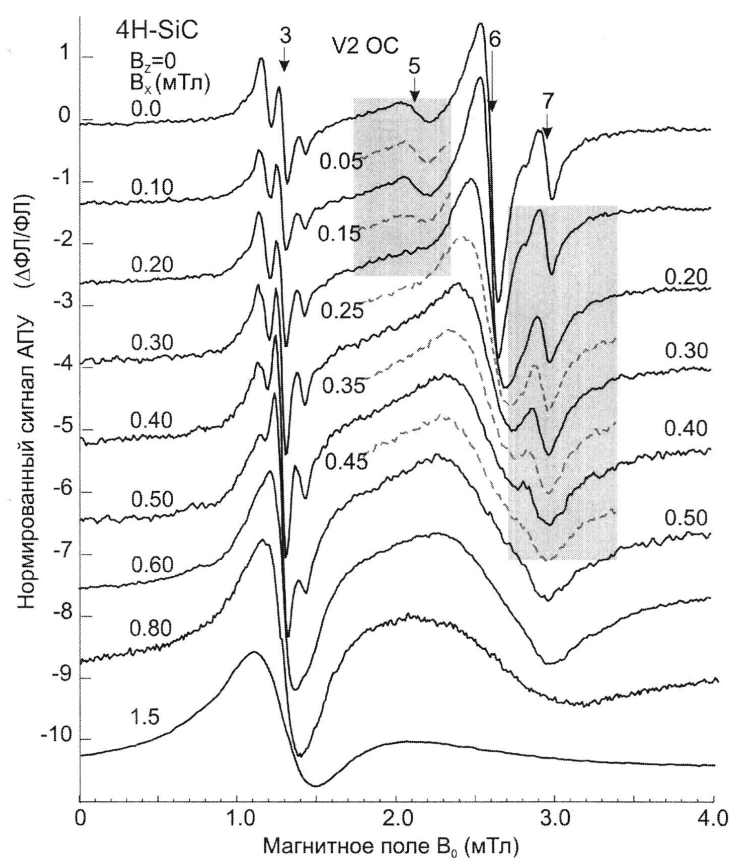


ФИГ. 2

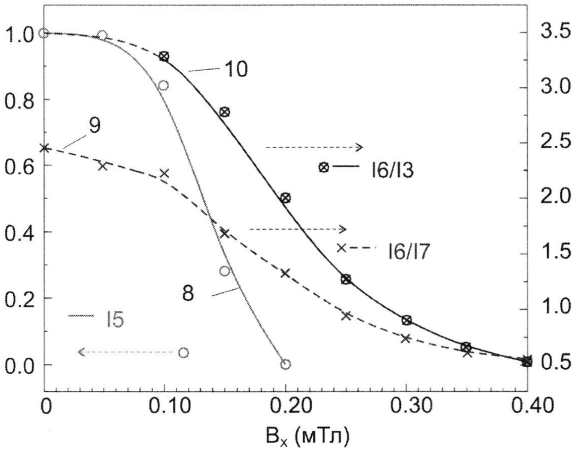
2



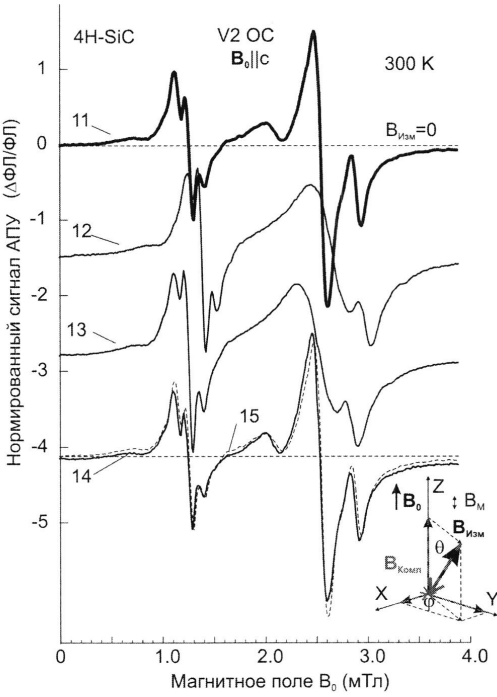
ФИГ. 3



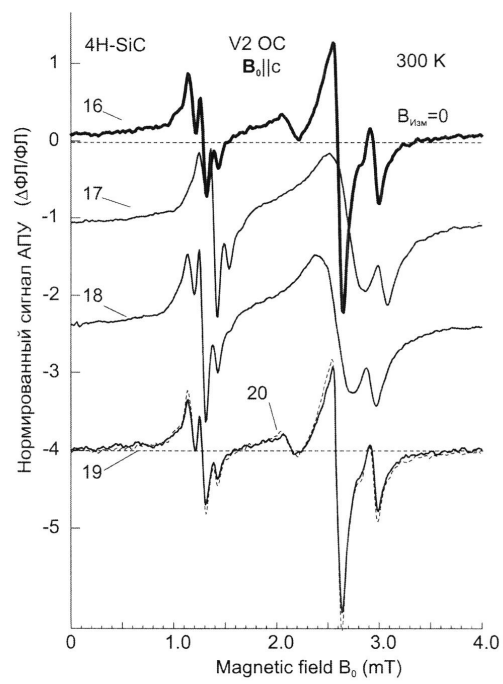
ФИГ. 4



ФИГ. 5



ФИГ. 6



ФИГ. 7