

## Квантовый магнитометр на основе кросс-релаксационных резонансов в ансамбле NV-центров в алмазе

© Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, А.В. Купаев, В.А. Низов, Н.А. Низов, Д.А. Собгайда

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: zelensky@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 18 мая 2022 г.  
В окончательной редакции 12 августа 2022 г.  
Принято к публикации 14 августа 2022 г.

Создан макет нового типа квантового магнитометра на основе кросс-релаксационных резонансов в ансамбле NV-центров в алмазе, не использующий СВЧ излучение. Для сенсора с размером кристалла алмаза 300  $\mu\text{m}$  продемонстрирована чувствительность к магнитному полю 18  $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ .

**Ключевые слова:** кросс-релаксация, NV-центр, квантовый магнитометр.

DOI: 10.21883/JTF.2022.11.53449.138-22

### Введение

В настоящее время NV-центры в алмазе рассматриваются в качестве перспективной квантовой системы для высокочувствительной оптической магнитометрии [1,2]. Прогресс в исследованиях приводит к постепенному переходу от лабораторных экспериментов к созданию действующих макетов квантовых магнитометров (см., например, [3–6]).

Существенным недостатком „традиционной“ схемы магнитометрии с NV-центрами, основанной на наблюдении оптически детектируемого магнитного резонанса [1–6], является необходимость использования СВЧ излучения (частота  $\sim 2.8$  GHz). Использование СВЧ излучения ограничивает область применимости метода, так как в ряде случаев его использование может быть затруднено, например, вблизи проводящих материалов, или может привести к нежелательным воздействиям на объект исследования, например, в биологии и медицине. В связи с этим активно разрабатываются альтернативные подходы к реализации магнитометрии с NV-центрами. Одним из таких вариантов является подход, основанный на снижении флуоресценции в сильных (порядка десятков мТ) магнитных полях [7–9]. Однако такой способ обладает малой чувствительностью. Другой метод реализации магнитометрии основан на эффекте антипересечения спиновых подуровней основного состояния [10,11]. Существенным недостатком этого метода является необходимость приложения к алмазу достаточно сильного (порядка 0.1 Т) и точно ориентированного магнитного поля, что усложняет создание сенсоров и ограничивает область применимости магнитометра. Также существует метод измерения магнитного поля с помощью эффектов, наблюдающихся при воздействии на алмаз с NV-центрами ВЧ излучения (1–10 MHz) [12]. Такой подход, по мнению авторов, за счет отсутствия СВЧ излучения и небольшого размера сенсора мо-

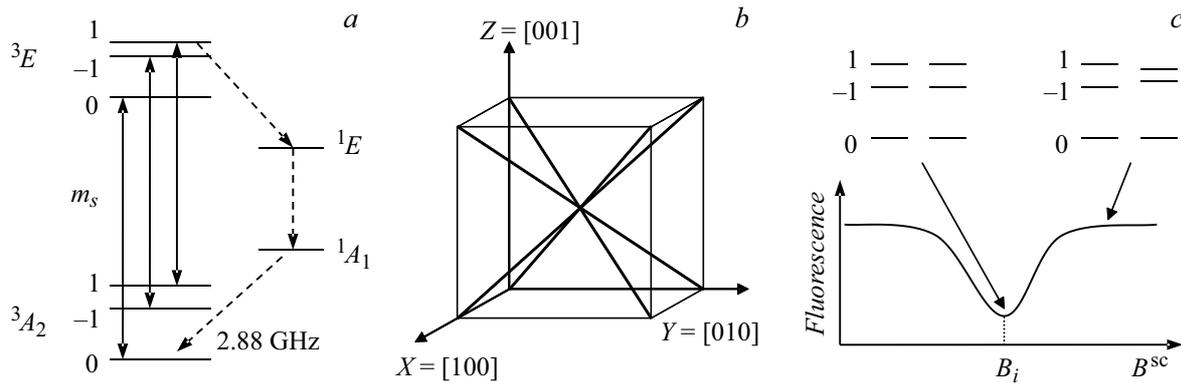
жет стать перспективным для медико-биологических исследований. Еще одним полностью оптическим, хоть и довольно сложным в реализации, является метод, основанный на эффектах когерентного пленения населенности и электромагнитно индуцированной прозрачности [13,14].

Ранее нами был предложен метод измерения магнитного поля на основе кросс-релаксационных резонансов в ансамбле NV-центров в алмазе [15,16]. Метод не требует использования дополнительных факторов, таких как сильное магнитное поле ВЧ или СВЧ излучение. Целью настоящей работы является практическая реализация макета магнитометра, основанного на данном принципе.

### 1. Принцип работы магнитометра

NV-центры в алмазе обладают системой энергетических уровней и переходов (рис. 1, *a*), в которой при оптической накачке происходит преимущественное заселение спинового подуровня  $m_s = 0$  основного состояния. Наблюдаемая при этом флуоресценция также является спин-зависимой (для  $m_s = 0$  ярче). В „традиционной“ схеме магнитометрии с NV-центрами используется измерение частот переходов между подуровнями основного состояния, зависящих от магнитного поля, по снижению флуоресценции при приложении СВЧ излучения (метод оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР)).

В макете использован метод, не требующий СВЧ излучения, основанный на наблюдении кросс-релаксационных резонансов в ансамбле NV-центров [15,16]. Суть метода состоит в следующем. В кристалле алмаза возможно четыре различных направления оси NV-центра: [1,1,1], [−1, 1, 1], [1, −1, 1], [1, 1, −1] (в системе координат, связанной с главными кристаллографическими осями (рис. 1, *b*)). Частоты микроволновых переходов между подуровнями основного состояния зависят от



**Рис. 1.** *a* — схема уровней NV-центра, сплошными стрелками показаны оптические переходы между спиновыми подуровнями основного —  $^3A_2$  и возбужденного —  $^3E$  состояний, идущие с сохранением проекции спина, пунктирными стрелками показан дополнительный путь релаксации подуровней  $m_s = \pm 1$  возбужденного состояния без сохранения проекции спина; *b* — четыре возможные ориентации NV-центра; *c* — кросс-релаксационный резонанс, в центре резонанса частоты переходов между подуровнями основного состояния для двух или нескольких групп различно ориентированных NV-центров совпадают, вне резонанса — не совпадают.

величины магнитного поля и его проекции на ось NV-центра. В случае если магнитное поле имеет равные модули проекций на оси двух групп NV-центров, частоты микроволновых переходов для этих двух групп совпадают. Это приводит к кросс-релаксационному взаимодействию между ними и изменению в сигнале флуоресценции. Пусть магнитное поле представляет собой сумму неизвестного постоянного и сканируемого полей  $\mathbf{B}^\Sigma = \mathbf{B}^{dc} + B^{sc}\mathbf{b}^{sc}$ , где  $\mathbf{B}^{dc}$  — постоянное магнитное поле,  $B^{sc}$  — величина сканируемого поля,  $\mathbf{b}^{sc}$  — единичный вектор в направлении сканирования. При совпадении частот переходов для двух или нескольких групп различно ориентированных NV-центров в зависимости флуоресценции от сканируемого поля наблюдается кросс-релаксационный резонанс (рис. 1, *c*). В общем случае может наблюдаться до девяти резонансов, положения которых описываются выражением:

$$B_i = -(\mathbf{B}^{dc}, \mathbf{v}_i) / (\mathbf{b}^{sc}, \mathbf{v}_i), \tag{1}$$

где  $\mathbf{v}_i$  — вектора  $[1,0,0]$ ,  $[0,1,0]$ ,  $[0,0,1]$ ,  $[0,1,1]$ ,  $[1,0,1]$ ,  $[1,1,0]$ ,  $[0, -1, 1]$ ,  $[-1, 0, 1]$ ,  $[1, -1, 0]$ .

Положения резонансов зависят от постоянного магнитного поля и соответственно могут быть использованы для его измерения. Возможны различные схемы измерений. Мы следовали протоколу, аналогичному изложенному в [16]. В качестве направления сканирования была выбрана ось  $\mathbf{Z} = [0, 0, 1]$  (допустим угол рассогласования до  $5^\circ$ ). Измерялась зависимость сигнала флуоресценции от  $z$ -компоненты сканируемого поля, соответственно положение резонансов на ней  $b_i = b_z^{sc} B_i$ . При таком выборе направления сканирования для четырех векторов  $\mathbf{v}_i$  знаменатели в выражении (1) оказываются малы и соответствующие резонансы не наблюдаются, положения остальных пяти задаются выражениями

$$b_{[001]} = -B_z^{dc}, \tag{2}$$

$$b_{[101]} = -(B_x^{dc} + B_z^{dc}) / (1 + \alpha), \tag{3}$$

$$b_{[-101]} = (B_x^{dc} - B_z^{dc}) / (1 - \alpha), \tag{4}$$

$$b_{[011]} = -(B_y^{dc} + B_z^{dc}) / (1 + \beta), \tag{5}$$

$$b_{[0-11]} = (B_y^{dc} - B_z^{dc}) / (1 - \beta), \tag{6}$$

где  $\alpha = b_x^{sc} / b_z^{sc}$ ,  $\beta = b_y^{sc} / b_z^{sc}$ .

Отметим, что в области малых магнитных полей резонансы не расщеплены, кроме того, не всегда возможно однозначно сопоставить положения резонансов с выражениями системы (2)–(6). Для преодоления данных недостатков можно использовать дополнительное магнитное поле смещения (см. [16]), которое расщепляет резонансы и позволяет определить их порядок. Пусть  $x$ -компонента поля смещения больше  $y$ -компоненты и обе они положительны, в этом случае положения резонансов (пронумерованы по возрастанию):  $b_1 = b_{[101]}$ ,  $b_2 = b_{[011]}$ ,  $b_3 = b_{[001]}$ ,  $b_4 = b_{[0-11]}$ ,  $b_5 = b_{[-101]}$ . Измеряемое магнитное поле  $\mathbf{B}$  приводит к сдвигу резонансов  $\Delta_i$ . Из выражений (2)–(6) можно получить следующие выражения для  $\mathbf{B}$ :

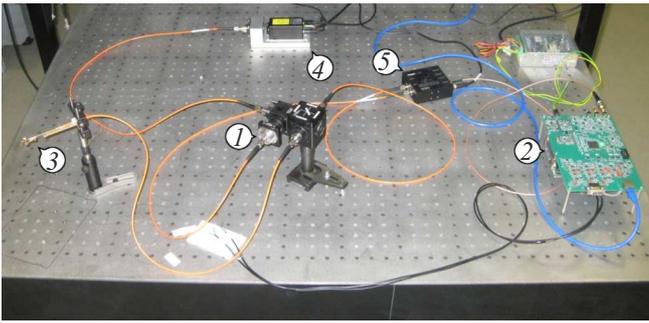
$$B_z = -\Delta_3, \tag{7}$$

$$B_x = [(1 - \alpha)\Delta_5 - (1 + \alpha)\Delta_1] / 2, \tag{8}$$

$$B_y = [(1 - \beta)\Delta_4 - (1 + \beta)\Delta_2] / 2, \tag{9}$$

коэффициенты  $\alpha = (b_5 + b_1 - 2b_3) / (b_5 - b_1)$  и  $\beta = (b_4 + b_2 - 2b_3) / (b_4 - b_2)$  также выражаются через положения резонансов.

Таким образом, для измерения магнитного поля необходимо измерить положения резонансов и их сдвиги относительно положений, соответствующих нулевому измеряемому полю.



**Рис. 2.** Фотография макета: 1 — оптический блок, 2 — электронный блок, 3 — сенсор, 4 — лазер, 5 — балансный фотодетектор.

## 2. Схема макета

Фотография макета представлена на рис. 2. Макет состоит из оптической части 1, электронного блока 2 и сенсора 3, а также лазера 4 и балансного фотодетектора 5. Все части макета соединены между собой гибкими многомодовыми оптическими волокнами и/или проводами и могут при необходимости с минимальной доработкой быть размещены внутри общего корпуса. Управление макетом осуществляется с помощью компьютера (не показан на рисунке).

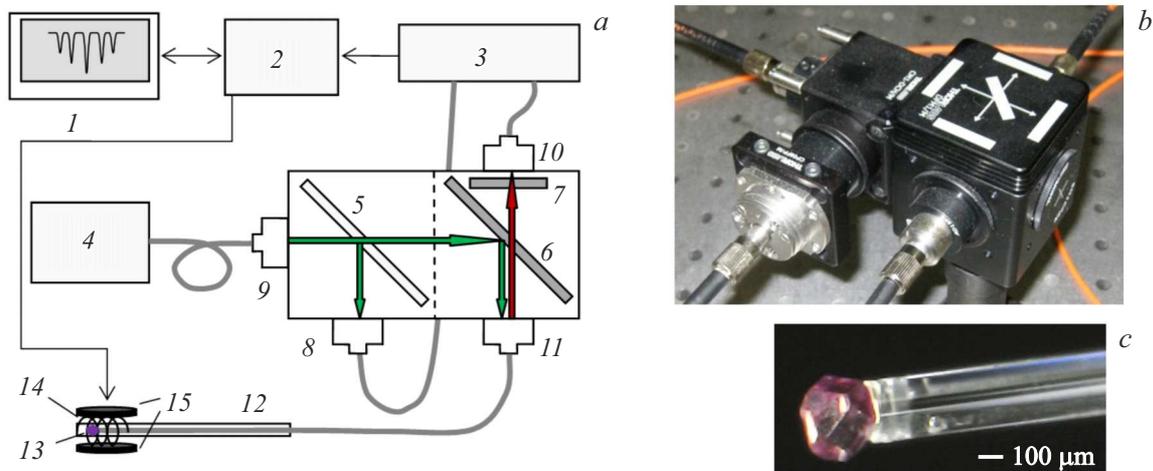
Блок-схема макета представлена на рис. 3, *a*. Оптическая часть макета (рис. 3, *a* и фото на рис. 3, *b*) собрана из элементов производства Thorlabs, которые могут быть соединены друг с другом в различных сочетаниях. Такой подход позволил опробовать различные варианты компоновки макета и выбрать оптимальную конфигурацию.

В приведенном на рис. 3 варианте оптический блок собран на основе двух конструктивных кубов CM1-DCH/M и DFM1/M, в которые монтированы зеркала

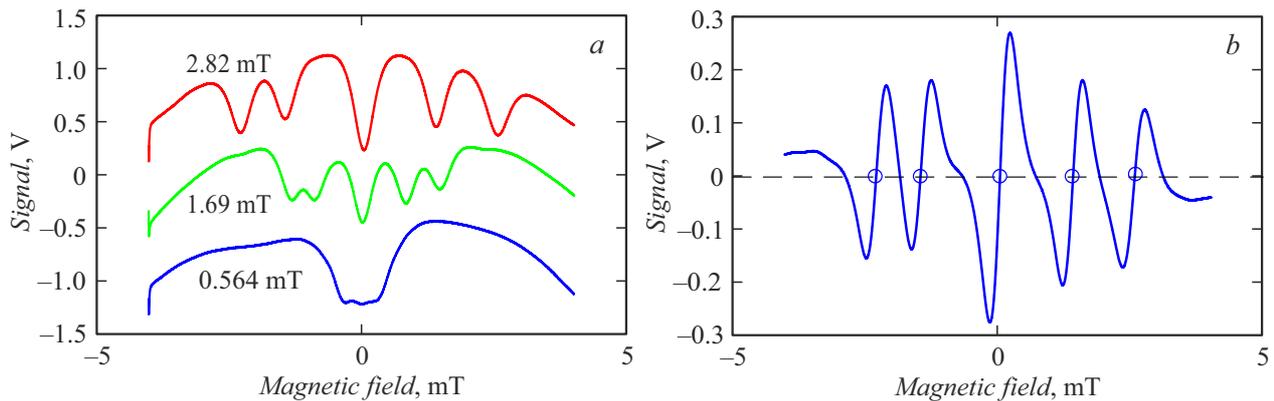
и фильтры. Для ввода и вывода излучения из оптических волокон используются коллиматоры F950FC-A с адаптерами AD15F и волоконный порт PAF2P-A10A. Излучение лазера, отражаясь от дихроичного зеркала DMLP605R, поступает в сенсор, сигнал флуоресценции от сенсора проходит через дихроичное зеркало, дополнительно фильтруется светофильтром FELH0600 и поступает через оптическое волокно на балансный фотодетектор PDB450A. Часть излучения лазера отводится с помощью полупрозрачного зеркала BSN10R и через волоконный порт поступает на второй вход балансного фотодетектора. Для регулировки интенсивности использовались нейтральные светофильтры (не показаны на схеме), настройка порта использовалась для точного выравнивания сигналов на балансном фотодетекторе.

В качестве источника использовались лазерный модуль PLM 520 (520 nm) с выходом на многомодовое волокно или лазер Cobolt 06-91 (532 nm) с системой сопряжения с волокном. Наилучшие результаты получены с лазером Cobolt, использование балансной схемы детектирования позволило существенно подавить остаточные шумы интенсивности лазерного излучения.

Для изготовления сенсора использовался кристалл синтетического HPHT алмаза, облученный электронным пучком интенсивностью  $10^{18}$  электронов на  $\text{cm}^2$  и отожженный при температуре  $800^\circ\text{C}$ , размером порядка  $300\ \mu\text{m}$  (рис. 3, *c*). Кристалл имел четко выраженную естественную форму, в этом случае часть граней соответствует плоскостям, перпендикулярным главным кристаллографическим осям алмаза ( $X = [1, 0, 0]$ ,  $Y = [0, 1, 0]$  и  $Z = [0, 0, 1]$ ), а часть — плоскостям, перпендикулярным осям вида  $[1, 1, 1]$ . Алмаз был приклеен гранью, перпендикулярной оси  $Z = [0, 0, 1]$  к торцу оптического волокна, соответственно ось волокна примерно совпадала с осью  $Z$  алмаза. Использовалось волокно с



**Рис. 3.** *a* — блок-схема макета: 1 — компьютер, 2 — электронный блок, 3 — балансный фотодетектор, 4 — лазер, 5 — полупрозрачное зеркало, 6 — дихроичное зеркало, 7 — светофильтр, 8–11 — коллиматоры, 12 — латунная трубка, 13 — кристалл алмаза, 14 — соленоид, 15 — магнитные катушки, толстыми линиями показаны оптические волокна; *b* — фотография оптической части; *c* — кристалл алмаза, приклеенный к торцу оптического волокна.



**Рис. 4.** *a* — кросс-релаксационные резонансы в сигнале флуоресценции при различном магнитном поле смещения (графики смещены для наглядности); *b* — кросс-релаксационные резонансы после синхронного детектирования, кругами показаны центры резонансов.

диаметром сердцевинки  $200\ \mu\text{m}$  и числовой апертурой 0.5 и оптический клей NOA63. Волокно вместе с алмазом было закреплено внутри латунной трубки с внутренним диаметром  $550\ \mu\text{m}$ , чуть большим диаметра оболочки волокна ( $500\ \mu\text{m}$ ). На трубку монтировалась магнитная система из соленоида, создающего сканируемое магнитное поле, и двух микрокатушек, создающих магнитное поле смещения. Магнитная система могла поворачиваться относительно трубки, что позволяло настраивать направление поля смещения. Отметим, что макет может быть использован для работы с другими сенсорами схожей конструкции. В частности, в случае измерений вблизи небольшого объекта может быть целесообразным использование системы больших катушек, окружающих объект, что позволит максимально приблизиться к исследуемой точке.

Электронный блок макета представляет собой плату на основе программируемой логической интегральной схемы, управляемую микрокомпьютером Raspberry Pi 4 Model B. Электронный блок позволяет задавать необходимый ток через катушки смещения, постоянную и переменную составляющие заданной амплитуды и частоты тока через соленоид, производить синхронное с переменной составляющей считывание сигнала фотодетектора.

Для увеличения точности измерений в макете программно реализована возможность синхронного детектирования сигнала сенсора. Электронный блок связан с компьютером кабелем Ethernet. Клиентское приложение на компьютере используется для выбора режимов работы, задания параметров, обработки и визуализации результатов измерений.

### 3. Результаты измерений

Зависимость флуоресценции от  $z$ -компоненты сканируемого магнитного поля приведена на рис. 4, *a*. Вид кросс-релаксационных резонансов зависит от направле-

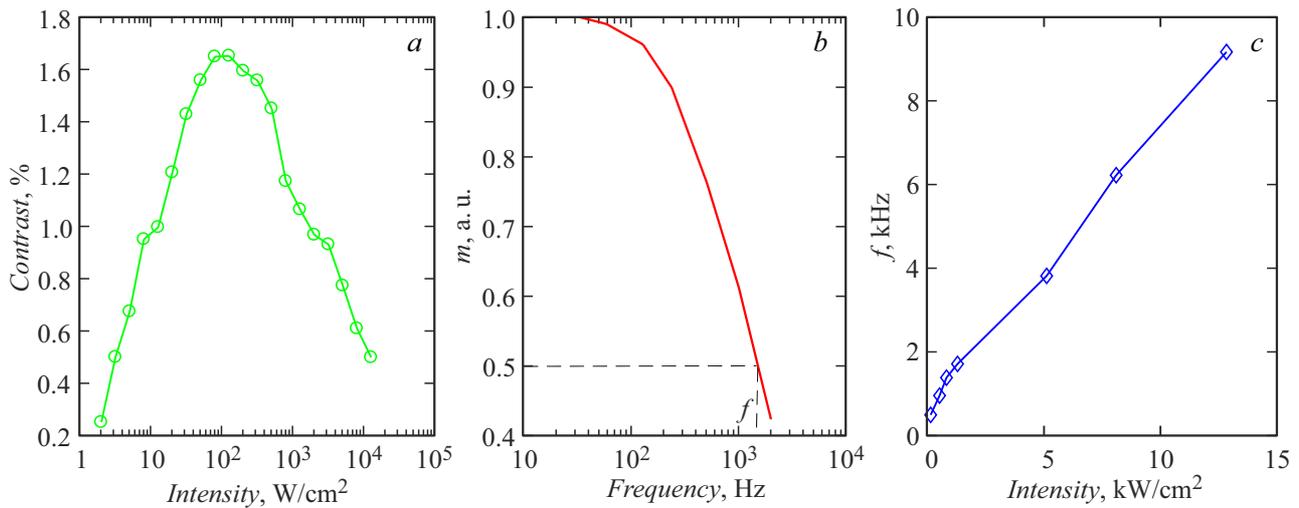
ния и величины магнитного поля смещения, которые регулируются поворотом катушек смещения и током через них. Для проведения измерений необходимо, чтобы все 5 резонансов были хорошо разрешимы. Полностью эквидистантная картина резонансов соответствует полю смещения, ориентированному вдоль  $[2,1,0]$ , однако для проведения измерений это не требуется. Направим поле смещения так, что  $x$ -компонента поля смещения больше  $z$ -компоненты, и обе они положительны, а расстояния между резонансами примерно одинаковы. Для данного сенсора кросс-релаксационные резонансы становятся хорошо разрешимыми при поле смещения порядка 2.5–3 мТ.

Приложение к сенсору измеряемого магнитного поля приводит к сдвигу резонансов.

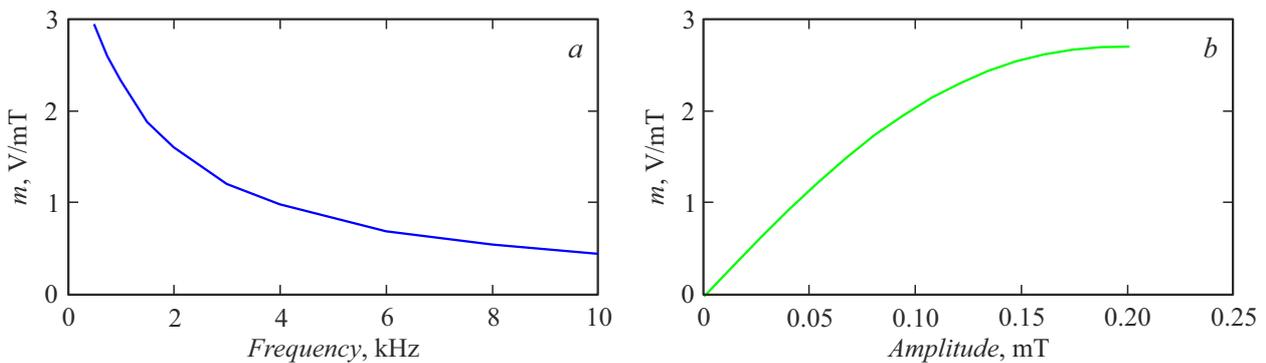
Из выражений (7)–(9) следует, что для определения  $z$ -компоненты измеряемого поля (скалярный режим измерений) достаточно только измерения сдвига центрального резонанса, а используя положения всех резонансов, можно определить все проекции измеряемого поля (векторный режим).

Отметим, что для установления соответствия между током через соленоид и  $z$ -компонентой сканируемого поля необходима калибровка, которую можно провести, помещая сенсор в известное магнитное поле. Поскольку нами не ставилась задача проведения абсолютных измерений, использовалась приближенная калибровка с помощью калиброванной магнитной катушки, запитанной от лабораторного источника тока, в случае необходимости можно провести более точную калибровку.

Для повышения точности измерения положения резонансов и соответственно магнитного поля, использовалось синхронное детектирование. Вид кросс-релаксационных резонансов после синхронного детектирования приведен на рис. 4, *b*. Поскольку сдвиг центрального резонанса позволяет определить  $z$ -компоненту измеряемого поля, чувствительность магнитометра (в скалярном режиме) может быть определена как отношение



**Рис. 5.** *a* — зависимость контраста от интенсивности; *b* — наклон зависимости сигнала синхродетектора от магнитного поля в центре резонанса от частоты переменной составляющей магнитного поля (интенсивность  $0.8 \text{ kW/cm}^2$ ); *c* — частота среза по уровню 0.5, в зависимости от интенсивности накачки.



**Рис. 6.** Наклон зависимости сигнала синхродетектора от магнитного поля в центре резонанса в зависимости от частоты (*a*) и амплитуды (*b*) переменной составляющей магнитного поля.

шума к наклону  $m$  зависимости сигнала синхродетектора от магнитного поля (производной сигнала синхродетектора по магнитному полю) в середине центрального резонанса. Величина  $m$  на низких частотах определяется контрастом кросс-релаксационных резонансов. При повышении частоты переменной составляющей магнитного поля, используемого для работы синхродетектора, может наблюдаться снижение отклика.

При проектировке макета были исследованы зависимость контраста кросс-релаксационных резонансов от интенсивности оптической накачки и частотные характеристики эффекта (рис. 5). Измерения производились в сходной со схемой макета геометрии с тем отличием, что излучение фокусировалось линзой на кристалле алмаза, что позволило расширить диапазон интенсивности.

Максимальному контрасту соответствовала интенсивность порядка  $100 \text{ W/cm}^2$ , при увеличении интенсивности до нескольких  $\text{kW/cm}^2$  наблюдалось пропорциональное увеличение сигнала флуоресценции при умеренном снижении контраста. Величина  $m$  падала в области

высоких частот, частота среза по уровню 0.5 при малых интенсивностях составляла порядка  $0.5 \text{ kHz}$  и росла с увеличением интенсивности. На основании проведенных исследований в макет была заложена возможность работы с частотами переменной составляющей магнитного поля в диапазоне  $0.5\text{--}10 \text{ kHz}$ .

В используемом нами сенсоре мощность лазерного излучения была ограничена перегревом алмаза, приводящим к разрушению клеевого слоя. Стабильная работа обеспечивалась при мощности излучения  $15 \text{ mW}$ , что соответствует интенсивности порядка  $50 \text{ W/cm}^2$ . При такой интенсивности величина  $m$  спадала с ростом частоты переменной составляющей магнитного поля (рис. 6, *a*). Шум практически не зависел от частоты в диапазоне работы макета, имея выделенные пики в районах  $0.5$  и  $1 \text{ kHz}$ , связанные с особенностями работы используемого лазера Cobolt 06-91 (при работе с лазером PLM 520 таких пиков не наблюдалось, но общий уровень шума был больше). Для работы с данным сенсором была выбрана частота  $0.75 \text{ kHz}$ , обеспечивающая наилучшую

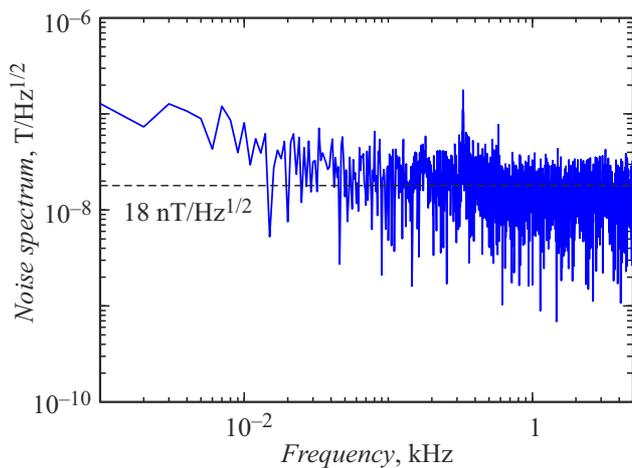


Рис. 7. Спектр шума магнитометра.

чувствительность, и амплитуда 0.16 мТ, близкая к оптимальной (рис. 6, *b*), в данных условиях  $m = 2.6$  В/мТ.

Для измерения шумовых характеристик магнитометра и определения чувствительности (в скалярном режиме) использовалась методика, аналогичная применяемой в работах [10,11]. Задавалось значение сканируемого магнитного поля, соответствующее середине центрального резонанса. Проводилась запись последовательных значений сигнала синхродетектора. Вычислялся корень из спектральной плотности мощности, нормированный на  $m$ . Результаты измерений при постоянной времени синхродетектора (время измерения каждой точки)  $\tau = 0.1$  с и количестве точек 10 000 (общая длина прописи 1000 с) приведены на рис. 7. Средний шум на частотах больше 0.6 Hz составляет  $18 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . Большой шум на малых частотах, соответствующий медленному дрейфу сигнала синхродетектора с характерным временем порядка секунды и более, который наблюдался также во временной форме сигнала, может быть связан с изменением магнитного поля в лаборатории. Для проверки этого предположения были проведены измерения шумов при частичной экранировке сенсора с помощью стального экрана, обеспечивающего примерно десятикратное снижение магнитного поля. При этом наблюдалось существенное уменьшение дрейфа сигнала синхродетектора, а величина и характер шума на частотах больше 0.6 Hz практически не менялись. Таким образом, чувствительность к магнитному полю в скалярном режиме с использованным сенсором может быть оценена как  $18 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ .

Предельная чувствительность, ограниченная дробовым шумом фототока, может быть оценена как  $\sigma = \sqrt{2qIK}/m$ , где  $I$  — фототок,  $q$  — заряд электрона,  $K = 10^7$  В/А — коэффициент усиления усилителя балансного фотодетектора, что в условиях измерения (фототок  $12.3 \mu\text{A}$ , соответствует мощности флуоресценции  $27 \mu\text{W}$ ) составляет  $7.6 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . Для использованной в макете балансной схемы детектирования оптического

сигнала, позволяющей существенно снизить влияние шумов интенсивности лазера, мощность дробового шума увеличивается вдвое и соответственно предельная чувствительность в  $2^{1/2}$  и составляет  $10.7 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . Таким образом, достигнутая чувствительность всего в 1.7 раза уступает предельной.

Для измерения магнитного поля в макете реализована итерационная процедура нахождения положения центров резонансов (соответствуют нулевому сигналу синхродетектора). На каждом шаге итерационной процедуры устанавливается значение постоянной составляющей сканируемого поля  $b_n$ , соответствующее центру резонанса, вычисленного на предыдущем шаге, измеряется сигнал синхродетектора, вычисляется в линейном приближении новое значение положения резонанса:

$$b_{n+1} = b_n - f_n/m,$$

где  $m$  — наклон в центре соответствующего резонанса.

В скалярном режиме измеряется только положение центрального резонанса, в векторном — на каждом шаге измерений поочередно рассчитывается положение каждого из резонансов. В качестве начальных значений можно использовать положения центров резонансов в отсутствии измеряемого поля, диапазон измерений в этом случае определяется шириной кросс-релаксационных резонансов и составляет  $(-200) - (+200) \mu\text{T}$  для каждой проекции. Значения величин  $m$  определяются перед началом итерационной процедуры и не меняются в процессе измерений.

Для проверки итерационной процедуры и определения чувствительности в таком режиме были проведены тестовые измерения. Для скалярных измерений магнитной катушкой, запитанной от генератора Agilent 33250A, создавалось магнитное поле в форме меандра с амплитудой порядка  $12 \mu\text{T}$  и периодом 10 с, в векторном режиме использовался прямоугольный импульс длительностью 25 с, созданный той же катушкой, расположенной под углом к сенсору. Измерения показали (рис. 8), что для установления результата измерений требуется 1–2 итерационных шага, быстрые изменения магнитного поля могут приводить к выбросам в результатах измерений длительностью в одну итерацию. Шумы в скалярном режиме, оцененные по вершинам меандра, соответствуют полученным выше результатам. В векторном режиме требуется определение положения 5 резонансов, что увеличивает время, необходимое для измерения каждой точки в 5 раз.

#### 4. Обсуждение. Возможные пути повышения чувствительности

Достигнутая чувствительность  $18 \text{ nT/Hz}^{1/2}$  не относится к рекордным для магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе, в том числе для методов без СВЧ. В частности, в работе [11] продемонстрирована чувствительность на уровне  $0.3 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . Однако используемый

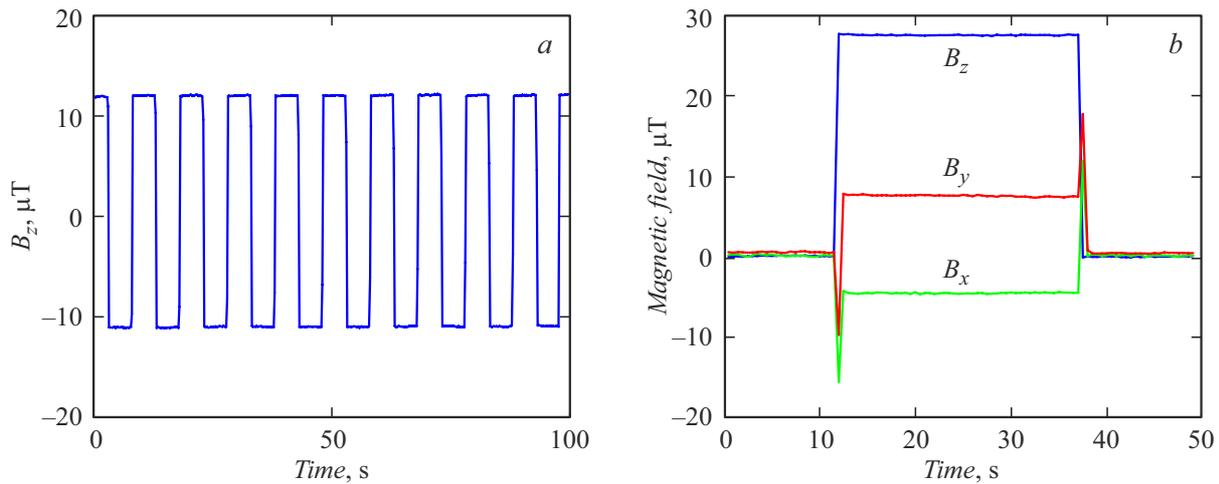


Рис. 8. Измерение магнитного поля: *a* — скалярный режим, меандр, *b* — векторный режим, прямоугольный импульс.

в [11] метод требует приложения к алмазу сильного (порядка 0.1 T) и точно ориентированного магнитного поля, что усложняет создание сенсоров и ограничивает область применимости магнитометра. Кроме того, высокая чувствительность получена при использовании изотопически чистого алмаза с содержанием  $^{12}\text{C}$  99.97%, в исследованиях с алмазом с натуральным содержанием изотопов чувствительность составила  $6 \text{ nT/Hz}^{1/2}$  [10] при большей ( $\sim 200 \text{ mW}$ ) интенсивности накачки. Более реалистичным для создания миниатюрных сенсоров без СВЧ выглядит подход, основанный на воздействии на алмаз с NV-центрами ВЧ излучения (1–10 MHz) [12]. Для сенсора со сходными с нашей конструкцией и параметрами заявлена чувствительность, ограниченная дробовым шумом  $3.6 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ , а определяемая наблюдавшимся шумом — в 4–5 раз хуже. Это соответствует продемонстрированной нами чувствительности без необходимости использования ВЧ излучения.

Отметим, что достигнутая нами чувствительность всего в 1.7 раза ниже предельной, определяемой дробовым шумом, таким образом, возможность повышения чувствительности за счет оптимизации электронной части практически исчерпана.

Естественным путем повышения предельной чувствительности является увеличение интенсивности флуоресценции и соответственно фототока на детекторе, что может быть достигнуто повышением интенсивности накачки или увеличением эффективности сбора флуоресценции. В случае решения проблем с теплоотводом возможно увеличение интенсивности накачки, по крайней мере, на порядок без существенного снижения контраста резонансов. Для повышения сбора флуоресценции применяются различные способы. В работе [12], например, используется волокно большего диаметра и светоотражающее покрытие, полученное значение фототока ( $\sim 40 \mu\text{A}$ ) примерно втрое превышает полученное нами при сходном кристалле алмаза и интенсивности накачки. Еще более перспективным может стать исполь-

зование специальных параболических линз [17]. Также возможно расположение фотодетектора рядом с кристаллом (см., например, [6]) и/или увеличение размера активного элемента, что, однако, приведет к увеличению размеров сенсора.

Другим путем повышения чувствительности может быть увеличение контраста кросс-релаксационных резонансов за счет увеличения концентрации NV-центров. В доступных нам образцах (максимальная доза облучения  $10^{18}$  электронов на  $\text{cm}^2$ ) наблюдалось увеличение контраста с ростом дозы без уширения резонанса. Таким образом, можно надеяться на дальнейшее увеличение чувствительности при повышении концентрации.

Потенциально интерес для обнаружения кросс-релаксационных резонансов и повышения чувствительности может представлять использование изотопически чистого алмаза, однако, насколько нам известно, кросс-релаксационные резонансы в таких образцах не исследовались. Кроме того, сам образец наряду с малым содержанием  $^{13}\text{C}$  должен обладать достаточной для наблюдения кросс-релаксационных резонансов концентрацией NV-центров.

Еще одним способом увеличения чувствительности может быть использование концентратора магнитного потока [18], однако такой способ неизбежно приведет к снижению пространственного разрешения.

## Заключение

Создан макет нового типа оптического квантового магнитометра на основе кросс-релаксационных резонансов в ансамбле NV-центров в алмазе. В качестве сенсора использован кристалл алмаза размером порядка  $300 \mu\text{m}$ , закрепленный на торце оптического волокна. Магнитометр не использует СВЧ излучение, применяемое при традиционной схеме магнитометрии с NV-центрами, и позволяет проводить как скалярное (одна проекция), так

и векторное измерение магнитного поля. В скалярном режиме продемонстрирована чувствительность к магнитному полю  $18 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ .

### Благодарности

Авторы выражают благодарность В.Л. Величанскому и А.О. Левченко за предоставленные кристаллы алмаза.

### Финансирование работы

Исследование поддержано НЦМУ „Центр фотоники“, при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] L. Rondin, J.-P. Tetienne, T. Hingant, J.-F. Roch, P. Maletinsky, V. Jacques. *Rep. Prog. Phys.*, **77** (5), 056503 (2014). DOI: 10.1088/0034-4885/77/5/056503
- [2] J.F. Barry, J.M. Schloss, E. Bauch, M.J. Turner, C.A. Hart, L.M. Pham, R.L. Walsworth. *Rev. Mod. Phys.*, **92**, 015004 (2020). DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015004
- [3] J.L. Webb, J.D. Clement, L. Troise, S. Ahmadi, G.J. Johansen, A. Huck, U.L. Andersen. *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 231103 (2019). DOI: 10.1063/1.5095241
- [4] R.L. Patel, L.Q. Zhou, A.C. Frangeskou, G.A. Stimpson, B.G. Breeze, A. Nikitin, M.W. Dale, E.C. Nichols, W. Thornley, B.L. Green, M.E. Newton, A.M. Edmonds, M.L. Markham, D.J. Twitchen, G.W. Morley. *Phys. Rev. Appl.*, **14**, 044058 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.044058
- [5] K. Huang, Y. Nie, B. Du, J. Jiang, Z. Zhang, Q. Wang, R. Xu. *Appl. Phys. Lett.*, **119**, 114005 (2021). DOI: 10.1063/5.0061156
- [6] F.M. Stürner, A. Brenneis, T. Buck, J. Kassel, R. Rölver, T. Fuchs, A. Savitsky, D. Suter, J. Grimm, S. Hengesbach, M. Förtsch, K. Nakamura, Hi. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, F. Jelezko. *Adv. Quantum Technol.*, **4** (4), 2000111 (2021). DOI: 10.1002/qute.202000111
- [7] L. Rondin, J.-P. Tetienne, P. Spinicelli, C.D. Savio, K. Karrai, G. Dantelle, A. Thiaville, S. Rohart, J.-F. Roch, V. Jacques. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 153118 (2012). DOI: 10.1063/1.3703128
- [8] D.A. Simpson, J.-P. Tetienne, J.M. McCoe, K. Ganesan, L.T. Hall, S. Petrou, R.E. Scholten, L.C.L. Hollenberg. *Sci. Rep.*, **6**, 22797 (2016). DOI: 10.1038/srep22797
- [9] R. Staacke, R. John, R. Wunderlich, L. Horsthemke, W. Knolle, C. Laube, P. Glösekötter, B. Burchard, B. Abel, J. Meijer. *Adv. Quantum Technol.*, **3**, 2000037 (2020). DOI: 10.1002/qute.202000037
- [10] A. Wickenbrock, H. Zheng, L. Bougas, N. Leefers, S. Afach, A. Jarmola, V.M. Acosta, D. Budker. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 053505 (2016). DOI: 10.1063/1.4960171
- [11] H. Zheng, Z. Sun, G. Chatzidrosos, C. Zhang, K. Nakamura, H. Sumiya, T. Ohshima, J. Isoya, J. Wrachtrup, A. Wickenbrock, D. Budker. *Phys. Rev. Appl.*, **13**, 044023 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044023
- [12] A.K. Вершовский, А.К. Дмитриев. *ЖТФ*, **90** (8), 1353 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49547.73-20 [A.K. Vershovskii, A.K. Dmitriev. *Tech. Phys.*, **65** (8), 1301 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220080216]
- [13] Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, В.А. Низов, Н.А. Низов, Д.А. Собгайда. *Опт. и спектр.*, **127** (2), 260 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.08.48038.67-19 [R.A. Akhmedzhanov, L.A. Gushchin, I.V. Zelensky, V.A. Nizov, N.A. Nizov, D.A. Sobgaida. *Opt. Spectr.*, **127** (2), 260 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19080034]
- [14] V.M. Acosta, K. Jensen, C. Santori, D. Budker, R.G. Beausoleil. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 213605 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.213605
- [15] R. Akhmedzhanov, L. Gushchin, N. Nizov, V. Nizov, D. Sobgayda, I. Zelensky, P. Hemmer. *Phys. Rev. A*, **96**, 013806 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevA.96.013806
- [16] R. Akhmedzhanov, L. Gushchin, N. Nizov, V. Nizov, D. Sobgayda, I. Zelensky, P. Hemmer. *Phys. Rev. A*, **100**, 043844 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevA.100.043844
- [17] G. Chatzidrosos, J.S. Rebeirro, H. Zheng, M. Omar, A. Brenneis, F.M. Stürner, T. Fuchs, T. Buck, R. Rölver, T. Schneemann, P. Blümmler, D. Budker, A. Wickenbrock. *Front. Photon.*, **2**, 732748 (2021). DOI: 10.3389/fphot.2021.732748
- [18] I. Fescenko, A. Jarmola, I. Savukov, P. Kehayias, J. Smits, J. Damron, N. Ristoff, N. Mosavian, V.M. Acosta. *Phys. Rev. Res.*, **2**, 023394 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.023394