

ИСКЛЮЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ В ИЗМЕРЕНИЯХ СУПЕРПОЗИЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ СПИНА ЯДРА В АЗОТНО-ВАКАНСИОННОМ ЦЕНТРЕ В АЛМАЗЕ

В. В. Сошенко^{1,2}, И. С. Кожокару¹⁻³, А. М. Козодаев⁴,
С. В. Большедворский^{1,2}, О. Р. Рубинас¹⁻³, В. Н. Сорокин^{1,2},
А. Н. Смолянинов², А. В. Акимов^{1-3,5}

Азотно-вакансионные центры окраски в кристаллах алмаза могут быть использованы для измерения вращения. Однако известный на сегодня алгоритм считывания вращения чувствителен к синфазному сдвигу переходов, вызываемому изменением температуры алмаза. В работе предложен алгоритм импульсного детектирования фазы, накопленной суперпозиционным состоянием, в котором подавлен сигнал синфазного сдвига частот переходов и тем самым подавлено влияние температурной зависимости квадрупольного расщепления на измерение скорости вращения.

Ключевые слова: центр окраски азот-вакансия в алмазе, гироскоп.

Отрицательно заряженные азотно-вакансионные центры окраски (NV^- центры) в алмазе используются в качестве сенсора для реализации ряда квантовых датчиков, таких как магнетометры [1–3], термометры [4–6], датчики электрического поля [7]. Наличие ядерного спина у NV^- центра открывает возможности создания компактного прецизионного датчика угловой скорости – гироскопа [8]. Последние работы [9, 10] в

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

² Сенсор Спин Технолоджис, 121205 Россия, Москва, Территория Сколково инновационного центра, ул. Нобеля, д. 7, пом. 54; e-mail: soshenko.v@gmail.com.

³ Международный центр квантовых технологий, 121205 Россия, Москва, Территория Инновационного Центра.

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, институт ЛаПлаз.

⁵ НИТУ “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

данном направлении подтвердили возможность измерения угловой скорости при помощи ядерного спина NV^- центра.

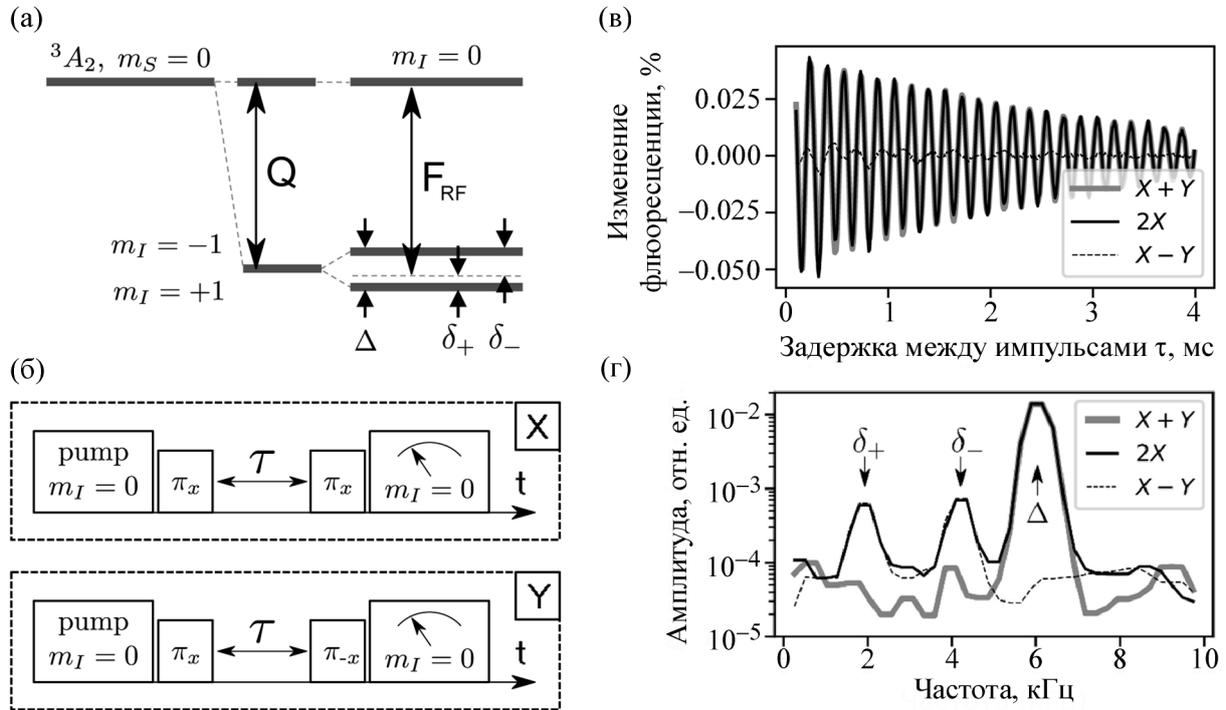


Рис. 1: (а) уровни энергии NV^- центра, задействованные в эксперименте; (б) схема эксперимента импульсного детектирования частоты Δ . Эксперимент “Y” отличается от эксперимента “X” изменением фазы второго π -импульса по отношению к первому; (в) сигналы флюоресценции, зарегистрированные в эксперименте. $2X$ – удвоенный (для сравнения) сигнал, полученный в эксперименте X без изменения фазы второго π -импульса. $X+Y$ – сигнал, в котором паразитные компоненты были исключены изменением фазы второго π -импульса. $X-Y$ – паразитный сигнал на частотах δ_+ , δ_- ; (г) фурье-спектры сигналов, изображенных на (в). Для подавления спектральной диффузии использовалось оконное преобразование Фурье с окном Блэжмана. Стрелками показаны частоты, соответствующие отстройкам частоты F_{RF} от частот переходов между уровнями, обозначенными на схеме (а), и частота запрещённого перехода Δ . Амплитуда гармоник паразитного сигнала (δ_+ , δ_-) в эксперименте с изменением фазы ($X+Y$) подавлена в 9 раз по сравнению с экспериментом без изменения фазы импульса ($2X$).

Измерение скорости вращения с помощью NV^- центра основано на измерении фазы, накопленной суперпозиционным спиновым состоянием при вращении алмаза. Метод

во многом похож на метод измерения частоты перехода в атомных часах [11], однако имеет свою специфику. Используется суперпозиционное состояние уровней $|m_I = -1\rangle$, $|m_I = +1\rangle$ на подуровне $m_S = 0$ основного состояния ${}^3A_2 NV^-$ центра (рис. 1(a)). Метод возбуждения и считывания подобных состояний был предложен в [12], который в задаче гироскопа может быть адаптирован следующим образом. Первым шагом является подготовка NV^- центра в состояние $|m_I = 0\rangle$, затем следует создать суперпозиционное состояние $|B\rangle = (|m_I = -1\rangle + |m_I = +1\rangle)/\sqrt{2}$ при помощи бихроматического π -импульса. Импульс создается переменным магнитным полем, направленным ортогонально оси симметрии NV^- центра, на двух частотах переходов $|m_I = 0\rangle \leftrightarrow |m_I = \pm 1\rangle$. Спустя время ожидания τ , состояние системы будет:

$$\frac{e^{-i\Delta\tau/2}|m_I = -1\rangle + e^{+i\Delta\tau/2}|m_I = +1\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{-i \sin(\Delta\tau/2)|D\rangle + \cos(\Delta\tau/2)|B\rangle}{\sqrt{2}},$$

где $|D\rangle = (|m_I = +1\rangle - |m_I = -1\rangle)/\sqrt{2}$, Δ – частота запрещенного перехода между уровнями $|m_I = -1\rangle \leftrightarrow |m_I = +1\rangle$, $\Delta\tau$ – динамическая фаза, накопленная за время τ . При изменении времени τ населенность состояния $|B\rangle$ осциллирует с частотой Δ . Для регистрации осцилляций после времени τ к ансамблю повторно прикладывается бихроматический π -импульс, переносящий населенность уровня $|B\rangle$ на уровень $|m_I = 0\rangle$. Населенность уровня $|m_I = 0\rangle$ определяется по интенсивности флюоресценции в эксперименте оптически детектируемого магнитного резонанса. При сканировании задержки между импульсами τ и повторении измерения в сигнале флюоресценции (рис. 1(в)) можно зарегистрировать осцилляции на частоте Δ . Частота осцилляций зависит от скорости вращения установки и может быть использована для её измерения.

Как было показано в работе [13], величина квадрупольного расщепления Q , синхронно сдвигающая уровни $|m_I = \pm 1\rangle$, зависит от температуры кристалла. Поскольку в рассмотренном протоколе во время накопления фазы населенность уровня $|m_I = 0\rangle$ равна нулю, изменение величины Q (см. рис. 1(a)) не должно повлиять на результат эксперимента. На практике полная поляризация ядерного спина не достигается и метод оказывается чувствителен к температурному дрейфу квадрупольного расщепления [13]. Состояние $|m_I = 0\rangle$ оказывается населенным, что приводит к появлению паразитного сигнала, появляющегося на частотах, равных разности частот поля и частот разрешенных переходов. Для подавления паразитных сигналов в эксперименте с бихроматическим полем в работе [14] было предложено усреднение сигнала по 4 последовательным измерениям, в которых модулируются фазы компонент бихроматического поля второго π -импульса.

В работе [10] бихроматическое поле было заменено монохроматическим на частоте $F_{RF} \approx Q$ (рис. 1(а)). Данная замена возможна при условии, что частота Раби много больше величины расщепления Δ . Монохроматическое возбуждение проще реализовать на практике, учитывая, что в поле 1 мТл, используемом в эксперименте [10], расщепление Δ составляет всего 6 кГц. Метод измерения с монохроматическим возбуждением не лишен тех же недостатков описанного выше протокола. В частности, возникает паразитный сигнал на частотах отстройки поля от резонансных частот, δ_+ , δ_- (рис. 1(а)).

В настоящей работе для исключения паразитного сигнала предложено использовать модуляцию фазы второго π -импульса путём чередования экспериментов “X” и “Y” (см. рис. 1(б)). В эксперименте “Y” фаза второго импульса изменена на π по отношению к первому импульсу. При этом фаза паразитного сигнала также изменяется на π . Фаза полезного сигнала на частоте Δ при этом не изменяется. В результате суммирования сигналов, полученных в экспериментах “X” и “Y”, паразитный сигнал подавляется.

Для демонстрации превосходства метода было проведено измерение накопленной ядерными спинами фазы двумя методами – без модуляции фазы π -импульса (“XX...”) и с модуляцией π -импульса (“XYXY...”). Экспериментальная установка аналогична описанной в [10]. В рамках данного эксперимента вращение установки не производилось. В силу несовершенства спиновой поляризации ненулевая населённость на уровне $|m_I = 0\rangle$ приводит к возникновению паразитного сигнала вращения даже в отсутствие вращения. Результаты экспериментов представлены на рис. 1((в),(г)). По спектру сигналов видно, что применение модуляции фазы импульса, предложенное в данной работе, позволяет подавить паразитный сигнал как минимум в 9 раз по амплитуде (рис. 1(г)) по сравнению со схемой, не использующей модуляцию.

Таким образом, применение предложенной фазово-модуляционной последовательности решает проблему чувствительности сигнала вращения, основанного на ядерных суперпозиционных состояниях, к ложным эффектам, вызванным изменением температуры. Более того, предложенная последовательность в первом порядке не чувствительна к синфазному сдвигу ядерных уровней независимо от природы сдвига, и может быть использована и в других сенсорах, использующих измерение состояния ядерного спина.

Данное исследование поддержано Российским научным фондом, грант № 21-42-04407.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] T. Wolf, P. Neumann, K. Nakamura, et al., Phys. Rev. X **5**(4), 041001 (2015). DOI: 10.1103/PHYSREVX.5.041001/ FIGURES/3/MEDIUM.

- [2] J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, et al., *Nat. Phys.* **4**(10), 810 (2008). DOI: 10.1038/nphys1075.
- [3] H. Clevenson, M. E. Trusheim, C. Teale, et al., *Nature Phys.* **11**, 393 (2015). DOI: 10.1038/NPHYS3291.
- [4] G. Kucsko, P. C. Maurer, N. Y. Yao, et al., *Nature* **500**(7460), 54 (2013). DOI: 10.1038/nature12373.
- [5] I. V. Fedotov, N. A. Safronov, Yu. G. Ermakova, et al., *Sci. Rep.* **5**(1), 15737 (2015). DOI: 10.1038/srep15737.
- [6] A. A. Lanin, I. V. Fedotov, Yu. G. Ermakova, et al., *Opt. Lett.* **41**(23), 5563 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.005563.
- [7] F. Dolde, H. Fedder, M. W. Doherty, et al., *Nat. Phys.* **7**(6), 459 (2011). DOI: 10.1038/nphys1969.
- [8] A. Ajoy, P. Cappellaro, *Phys. Rev. A* **86**(6), 062104 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevA.86.062104.
- [9] A. Jarmola, S. Lourette, V. M. Acosta, et al., *Sci. Adv.* **7**(43), 3840 (2021). DOI: 10.1126/SCIADV.ABL3840.
- [10] V. V. Soshenko, S. V. Bolshedvorskii, O. Rubinas, et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**(19), 197702 (2021). DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.126.197702.
- [11] G. Santarelli, Ph. Laurent, P. Lemonde, et al., *Phys. Rev. Lett.* **82**(23), 4619 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.4619.
- [12] K. Fang, V. M. Acosta, C. Santori, et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**(13), 130802 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.130802.
- [13] V. V. Soshenko, V. V. Vorobyov, S. V. Bolshedvorskii, et al., *Phys. Rev. B* **102**(12), 125133 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevB.102.125133.
- [14] C. A. Hart, J. M. Schloss, M. J. Turner, et al., *Phys. Rev. Appl.* **15**(4), 044020 (2021). DOI: 10.1103/PHYSREVAPPLIED.15.044020.

Поступила в редакцию 25 ноября 2022 г.

После доработки 30 ноября 2022 г.

Принята к публикации 1 декабря 2022 г.