

УДК 537.862

## МИКРОВОЛНОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ АЗОТ-ВАКАНСИЯ В АЛМАЗЕ

В. В. Сошенко<sup>1</sup>, О. Р. Рубинас<sup>2</sup>, В. В. Воробьев<sup>1</sup>, С. В. Большедворский<sup>1,2</sup>,  
П. В. Капитанова<sup>3</sup>, В. Н. Сорокин<sup>1</sup>, А. В. Акимов<sup>1,4</sup>

*Предложена конструкция микроволновой антенны в виде соосных резонансных катушек для возбуждения магнитно-дипольных переходов основного оптического состояния центра окраски азот-вакансия в алмазе. Промоделировано поле внутри антенны, проведены экспериментальные измерения амплитуды поля.*

**Ключевые слова:** СВЧ резонатор, центр окраски азот-вакансия в алмазе, оптически детектируемый магнитный резонанс, микроволновая антенна.

Центры окраски азот-вакансия (NV центры) в алмазе привлекают большой интерес в области сенсоров магнитного поля [1], температуры [2], электрического поля [3], а также источников одиночных фотонов [4]. Исследование больших ансамблей центров окраски и создание на их базе высокочувствительных магнитометров [5] требуют источника микроволнового поля, обладающего высокой равномерностью поля в объеме до  $10 \text{ мм}^3$  [6], при этом обладающего достаточной амплитудой поля в объеме. Простейшая антенна в виде тонкой проволоки обеспечивает высокую амплитуду поля, но эффективный объем ансамбля, управляемого такой антенной обычно ограничен размером  $\sim \text{мкм}^3$  из-за высокой неоднородности поля. В ряде работ предложены конструкции планарных антенн [7] на печатной плате. Такие антенны имеют равномерное поле на площади, но резко убывающее при отдалении от платы. Объемные резонаторы, описанные в работах [8, 9] обладают и однородностью и высокой амплитудой поля. Однако они имеют

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: soshenko.v@gmail.com.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, 141701 Россия, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> Университет ИТМО, МНИЦ Нанопотоники и Метаматериалов, 197101 Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49.

<sup>4</sup> Texas A&M University, 4242 TAMU, College Station, TX 77843, USA.

некоторые неудобства с точки зрения размещения устройств сбора излучения и эффективных схем оптической накачки [6] и возбуждения магнитных переходов в пластинах с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ .

В настоящей работе идея катушек Гельмгольца была адаптирована для создания резонансной антенны. Антенна представляет собой два соосных витка, соединенных с общим для них конденсатором. Антенна была промоделирована для оптимизации размеров и оценки поля внутри антенны. Из экспериментальных результатов по измерению

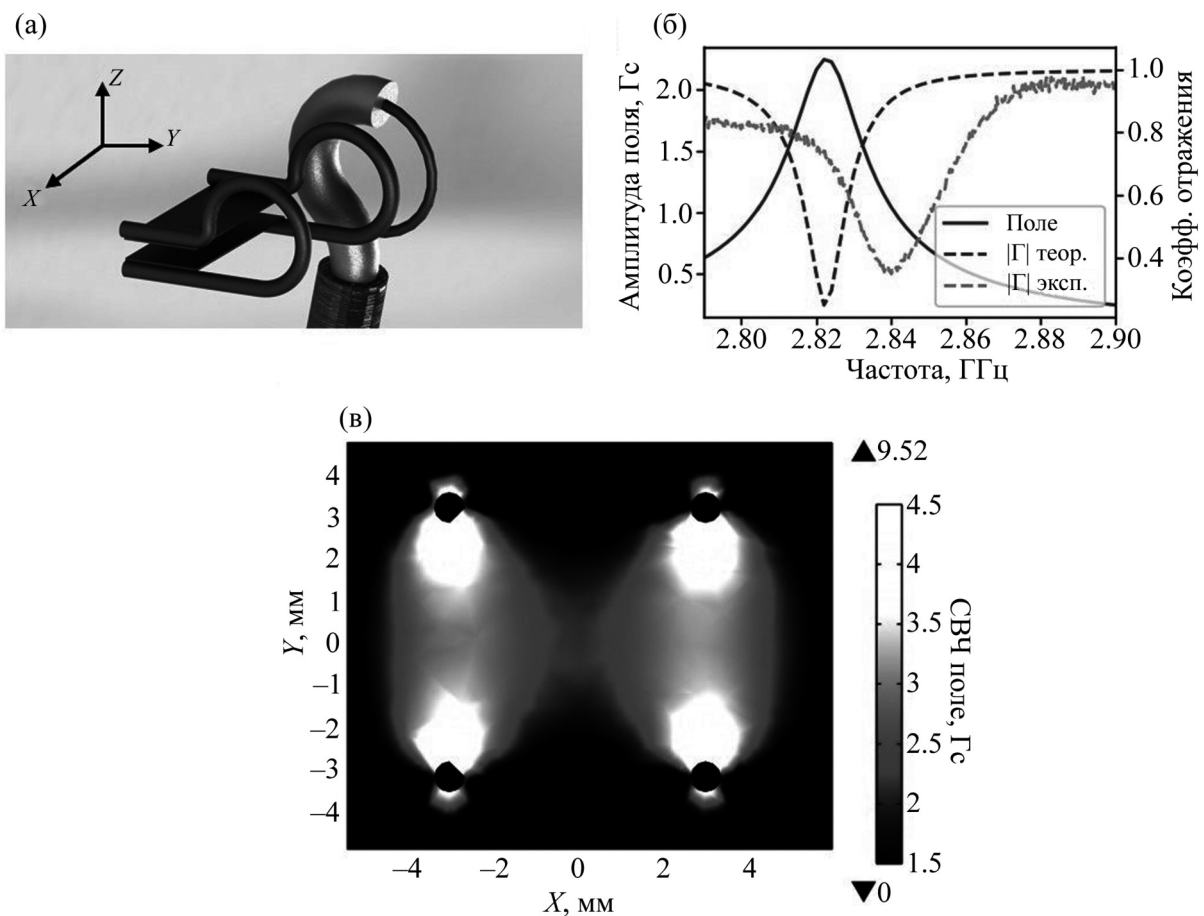


Рис. 1: (а) Конфигурация предложенной микроволновой антенны; на заднем плане симметризованный виток с током, сделанный на конце коаксиального провода; центральная жила соединена с экраном в основании витка; (б) промоделированная зависимость поля  $B_x$  в центре антенны от частоты и коэффициенты отражения, полученные в модели и эксперименте; (в) Промоделированное распределение амплитуды микроволнового поля  $B_x$  внутри антенны.

осцилляций Раби была получена амплитуда переменного магнитного поля в антенне 3.0 Гс при мощности поданного на антенну микроволнового излучения 5 Вт.

Антенна, изображенная на рис. 1(а) была промоделирована в среде Comsol 4.4 для определения размера конденсатора, соответствующего резонансной частоте антенны 2.82 ГГц (частота электронного парамагнитного резонанса NV центра 2.87 ГГц минус зеемановский сдвиг постоянным внешним магнитным полем), распределения магнитного поля антенны (рис. 1(в)) и величины его максимального значения при подаче на антенну мощности 1 Вт (рис. 1(б)). Расстояние между кольцами и размер колец были выбраны исходя из конструктивных особенностей установки. Было получено, что в центре антенны в объеме  $1 \times \emptyset 2$  мм магнитное поле имеет среднее значение 2.2 Гс и находится в пределах 2.0–2.4 Гс, что соответствует максимальному относительному отклонению величины магнитного поля от среднего в 10%. Среднее значение амплитуды поля при ориентации оси NV центра  $\langle 111 \rangle$ , перпендикулярной оси катушек, соответствует частоте Раби 4.4 МГц при мощности 1 Вт и 9.8 МГц при мощности 5 Вт.

По результатам моделирования был изготовлен экспериментальный образец антенны. Кольца антенны были согнуты из медной проволоки диаметром 0.7 мм на оправке диаметром 5 мм. Конденсатор был сделан из двух медных пластин размером  $7 \times 3 \times 0.2$  мм. Расстояние между кольцами – 6 мм. Зазор воздушного конденсатора составлял 0.4 мм и подстраивался малой деформацией при помощи лезвия (на увеличение зазора) или пинцета (на уменьшение зазора) на рабочую частоту 2.82 ГГц. При помещении антенны в установку произошел сдвиг частоты на 20 МГц из-за изменения окружения антенны (металлические оправки для оптики, держатели и т.п.).

Согласование антенны с усилителем (ZHL-16W-43+) осуществляется с помощью симметризованного кольца с током диаметром 7 мм, соосным с витками антенны. Коэффициент связи антенны с возбуждающим контуром может быть отрегулирован зазором между накачивающим витком и антенной. Зазор был выбран по критерию минимизации коэффициента отражения. Отраженный от антенны сигнал наблюдался при помощи векторного анализатора (mini VNA Tiny).

Оценка работоспособности антенны производилась по методике, описанной в статье [8] на установке, изображенной на рис. 2(а). Была использована алмазная пластина с концентрацией NV центров  $14 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , помещенная в геометрический центр антенны. С помощью антенны регистрировался оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР) [10]. Наблюдаемый ОДМР (рис. 2(в)) в постоянном внешнем магнитном поле, перпендикулярном оси, антенны состоит из нескольких пиков, соответствующих раз-

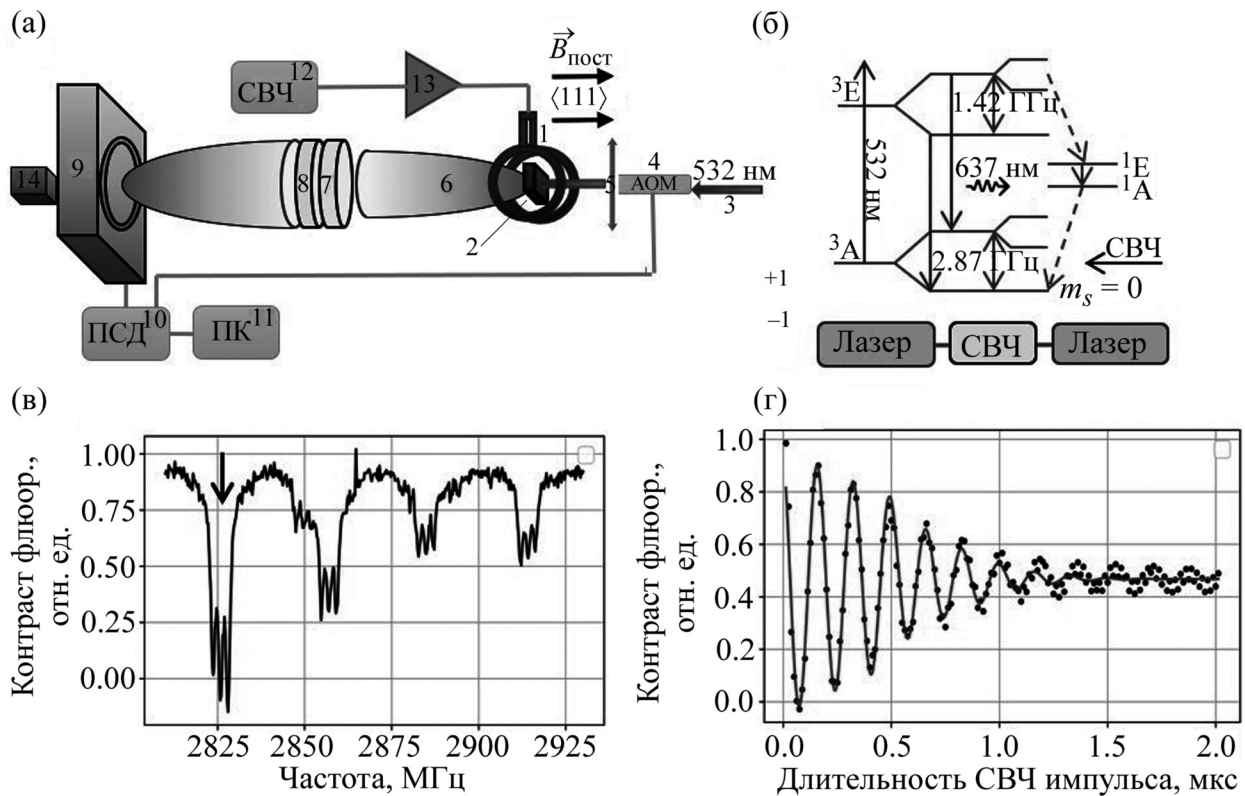


Рис. 2: (а) Экспериментальное оборудование для управления спиновым ансамблем NV центров: 1. Микроволновая антенна, 2. Исследуемый образец алмаза, 3. Возбуждение зеленым лазером, 4. Акусто-оптический модулятор, 5. Объектив, 6. Параболическая линза для сбора красного излучения NV центров, 7. фильтр с отсечкой при 650 нм, 8. Полосно-заграждающий фильтр для пучка накачки 532 нм, 9. Фотодиод, 10. Плата сбора данных, 11. Персональный компьютер, 12. Источник микроволнового излучения, 13. Усилитель микроволн, 14. Источник постоянного магнитного поля, (б) Схема энергетических уровней NV центра и последовательность приложения микроволнового и лазерных импульсов для получения осцилляций Раби. Первый лазерный импульс осуществляет оптическую накачку состояния  $m_s = 0$ , микроволновый импульс (СВЧ) осуществляет инверсию населенности магнитных подуровней, последним лазерным импульсом осуществляется считывание населенности  $m_s = 0$  по уровню флюоресценции, (в) ОДМР в алмазе, стрелкой показан резонанс, выбранный для наблюдения осцилляций Раби, (г) осцилляции Раби населенностей магнитных подуровней основного состояния NV центра, наблюдаемые в ансамбле NV центров.

ным ориентациям NV центров и разным знакам проекции магнитного момента на ось NV центра. В проведенном эксперименте использовались алмазы с ориентацией кристаллической решетки  $\langle 111 \rangle$ , вдоль которой и прикладывалось внешнее магнитное поле (рис. 2(б)). Такое магнитное поле обеспечивало максимальную проекцию вектора магнитного поля на эту ось и меньшую на остальные три оси алмаза, и эта проекция для последних трех осей оказывалась практически одинаковой. В эксперименте выбиралась проекция  $m_s = -1$ .

Путем приложения импульсной последовательности микроволновых и лазерных импульсов, описанной в [8], были измерены осцилляции Раби (рис. 2(г)) между состояниями  $|m_s = 0\rangle$  и  $|m_s = -1\rangle$ . Частота осцилляций Раби составила 5.95 МГц при мощности на входе в антенну в 5 Вт. Расхождение на 40% с расчетом может быть объяснено влиянием окружения антенны.

Таким образом была сконструирована микроволновая антенна на базе соосных колец Гельмгольца для возбуждения магнитно-дипольных переходов центра азот-вакансия в алмазе. Промоделировано распределение микроволнового поля внутри резонатора. Резонатор был использован в экспериментах по наблюдения ОДМР и осцилляций Раби высокой частоты в плотных ансамблях NV центров. Предложенная конфигурация идеально подходит для работы с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  в алмазе.

Работа была поддержана Российским Научным Фондом (грант № 16-19-10367) в части моделирования и изготовления антенны и Фондом содействия инноваций (грант № 13156ГУ/2018) в части подготовки алмазной пластины.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. M. Acosta et al., Phys. Rev. B – Condens. Matter Mater. Phys. **80**(11), 115202 (2009).
- [2] J. Wang et al., Phys. Rev. B – Condens. Matter Mater. Phys. **91**(15), 115405 (2015).
- [3] F. Dolde et al., Nat. Phys. **7**(6), 459 (2011).
- [4] V. V. Vorobyov et al., Eur. Phys. J. D **70**, 269 (2016).
- [5] T. Wolf, P. Neumann, J. Isoya, and J. Wrachtrup, Phys. Rev. X **5**, 041001 (2015).
- [6] H. Clevenson et al., Nature Phys. **11**, 393 (2015).
- [7] K. Sasaki et al., Rev. Sci. Instrum. **87**(5), 053904 (2016).

- [8] P. Kapitanova, V. V Soshenko, V. V Vorobyov, and D. Dobrykh, “Dielectric resonator antenna for 3D uniform manipulation of NV centers in diamond,” <https://arxiv.org/abs/1805.05441> (2018).
- [9] E. Eisenach, J. Barry, R. Rojas, et al., “Broadband loop gap resonator for nitrogen vacancy centers in diamond,” <https://arxiv.org/abs/1804.09763> (2018).
- [10] Y. Matsuzaki et al., *Journal of Physics Condensed Matter* **28**, 275302 (2016).

Поступила в редакцию 10 июля 2018 г.