Установка для оптически детектируемого магнитного резонанса спиновых центров в алмазе и карбиде кремния

© М.В. Учаев, К.В. Лихачев, В.В. Яковлева, А.С. Гурин, И.М. Гаджиев, М.В. Музафарова¶, П.Г. Баранов, Р.А. Бабунц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: marina.muzafarova@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 31 августа 2026 г.
В окончательной редакции 15 сентября 2026 г.
Принята к публикации 17 сентября 2026 г.

Описана установка для демонстрации магнитного резонанса спиновых центров в алмазе и карбиде кремния, которая обеспечивает визуализацию спектров в реальном времени. Работа установки показана на примере регистрации спектров оптически детектируемого магнитного резонанса NV^--центров в алмазе и антипересечения спиновых уровней вакансионных центров в карбиде кремния. Модульная конструкция установки позволяет использовать ее как для проведения вузовских лабораторных практикумов, так и в качестве базы для научно-исследовательских работ.

Ключевые слова: NV-центр, V2-центр, алмаз, карбид кремния, ОДМР, антипересечение уровней.

DOI: 10.61011/FTP.2026.09.64171.10583

1. Введение

Метод регистрации спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) широко применяют для изучения парамагнитных центров в твердотельных материалах, так как он позволяет получить информацию об особенностях структуры энергетических уровней дефектов. В отличие от метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), метод ОДМР обладает высоким пространственным разрешением и повышенной чувствительностью, благодаря которым существует возможность регистрировать сигналы от парамагнитных центров даже при крайне низкой их концентрации, вплоть до отдельных спинов. Именно эти свойства делают ОДМР ключевым методом в области квантовой сенсорики и квантовых вычислений.

В алмазе среди парамагнитных центров особое место занимают отрицательно заряженные азотно-вакансионные центры (NV^-), в которых даже при комнатной температуре в условиях магнитного резонанса наблюдается снижение интенсивности их фотолюминесценции (ФЛ) до 30 % [1] из-за резонансного изменения населенности нулевого уровня.

Азотно-вакансионный (NV) центр в алмазе представляет собой точечный дефект, размер которого сравним с размером атома. NV-центр образован атомом азота, замещающим углерод в узле кристаллической решетки, и соседней вакансией [2]. Этот дефект существует в двух зарядовых состояниях — нейтральном (NV^0) и отрицательно заряженном (NV^-) [3]. Научную и прикладную ценность представляют отрицательно заряженные NV^--центры со спином $S = 1$, так как их активно используют в квантовых технологиях [4], а также в роли флуоресцентных биомаркеров для визуализации биологических объектов [5–7]. Структура азотно-вакансионного центра подробно описана в работе [8], схема энергетических уровней и механизм формирования спектра представлены на рис. 1, *a*. В спектре ОДМР на рис. 1, *a* наблюдаются две линии в нулевом магнитном поле при приложении к образцу СВЧ поля с частотой, соответствующей энергии переходов между уровнями $0 \leftrightarrow \pm 1$.

В последние годы значительный интерес вызывают центры окраски в карбиде кремния (SiC), в том числе вакансии кремния в 4*H*-SiC (V2-центры). Карбид кремния (SiC) имеет важное преимущество — он давно освоен в промышленности как полупроводниковый материал. Благодаря этому спин-фотонные устройства на его базе перспективны для интеграции в существующую электронную компонентную базу. Еще одно существенное достоинство V2-центров — их спектр ФЛ расположен в ближнем инфракрасном диапазоне (~ 900 нм) [9]. Эта длина волны попадает в окна прозрачности как кварцевого оптического волокна, так и биологических тканей, что расширяет возможности практического применения таких центров.

V2-центр представляет собой отрицательно заряженную вакансию кремния V_{Si}^- в парамагнитном состоянии [10], нековалентно связанную с нейтральной углеродной вакансией V_{C}^0 в непарамагнитном состоянии [11]. Структура V2-центра описана в работе [8], а схема энергетических уровней приведена на рис. 1, *b*. В точках антипересечения уровней $M_S = \pm 1/2$ и $M_S = -3/2$ по изменению интенсивности ФЛ наблюдаются сигналы, которые при регистрации спектров с модуляцией магнитного поля имеют форму производной.

Энергетические уровни NV-центров в алмазе и V2-центров в карбиде кремния, представленные на рис. 1,

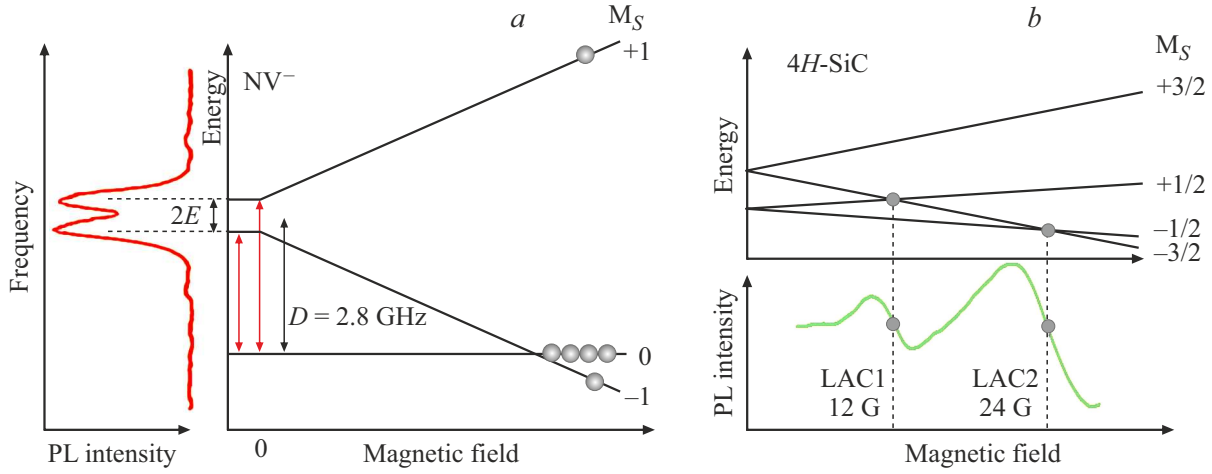

Рис. 1. Схема энергетических уровней NV^--центра в алмазе и зарегистрированные по интенсивности ФЛ сигналы ОДМР в нулевом поле (*a*). Схема энергетических уровней V2-центров в карбиде кремния и зарегистрированные по интенсивности ФЛ сигналы антипересечения уровней (LAC1 и LAC2) (*b*).

описываются спиновым гамильтонианом:

$$\hat{H} = g\mu_B \mathbf{B} \cdot \hat{S} + D\left(\hat{S}_z^2 - \frac{1}{3}S(S+1)\right) + E\left(\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2\right), \quad (1)$$

где g — электронный g-фактор, равный 2.00; μ_B — магнетон Бора; D и E — параметры тонкой структуры, описывающие расщепление уровней в нулевом поле; $\mathbf{B}$ — вектор внешнего магнитного поля. Для NV-центров в алмазе $S = 1$, для V2-центров в 4*H*-SiC $S = 3/2$, $E = 0$.

Для исследования парамагнитных центров окраски также применяют метод регистрации изменения интенсивности ФЛ в области антипересечения энергетических уровней (LAC, level anticrossing). При сближении спиновых энергетических уровней и наличии малых возмущений, понижающих симметрию системы, происходит смешивание уровней, что приводит к резонансному изменению интенсивности ФЛ без приложения СВЧ поля [12]. Регистрация сигналов LAC позволяет извлекать информацию о параметрах спинового гамильтониана. Метод применим для детектирования слабых магнитных полей, а также для оценки локального градиента температуры [13]. Следует отметить, что спектры магнитного резонанса зависят от внешнего магнитного поля и температуры.

Сильная зависимость параметров спинового гамильтониана D и E от температуры является характерной для большинства триплетных центров в алмазе [14] и в карбиде кремния [13,15], что позволяет использовать их в качестве квантовых сенсоров.

В данной статье приведено описание разработанной установки, сочетающей возможности измерения методами ОДМР и LAC при комнатной температуре для различных матриц в единой оптической конфигурации, что существенно расширяет исследовательские возможности и упрощает процедуру экспериментов. Работоспособность установки продемонстрирована на примере измерений спектров ОДМР NV^--центров в алмазе и спектров LAC V2-центров в 4*H*-SiC.

2. Описание установки

Экспериментальная установка обеспечивает проведение двух типов радиоспектроскопических измерений в единой оптической конфигурации. При исследовании NV^--центров в алмазе используется метод ОДМР с применением модуляции мощности СВЧ-поля. При исследовании V2-центров в 4*H*-SiC регистрируется сигнал LAC в основном состоянии с применением модуляции внешнего магнитного поля.

Схематическое изображение установки приведено на рис. 2. Оптическая схема установки состоит из двух каналов возбуждения (на длинах волн 520 и 785 нм) и общего канала регистрации ФЛ. В качестве источников оптического возбуждения используются два полупроводниковых лазера. Для возбуждения ФЛ NV^--центров в алмазе применяется полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 520$ нм; мощность излучения регулируют в диапазоне 0–85 мВт. Для исследования центров окраски в карбиде кремния используется полупроводниковый лазер с $\lambda = 785$ нм и аналогичным диапазоном мощности 0–85 мВт. Управление лазерами осуществляется с помощью контроллера, который обеспечивает регулировку мощности излучения и температуры лазера, а также обеспечивает возможность работы в непрерывном и импульсном режимах.

Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью объектива, характеризующегося фокусным расстоянием 200 мм, увеличением 10× и числовой апертурой 0.26. Диаметр фокального пятна составляет ~ 50–100 мкм, что обеспечивает достаточную плотность мощности лазерного излучения для эффективной оптической накачки центров окраски. Исследуе-

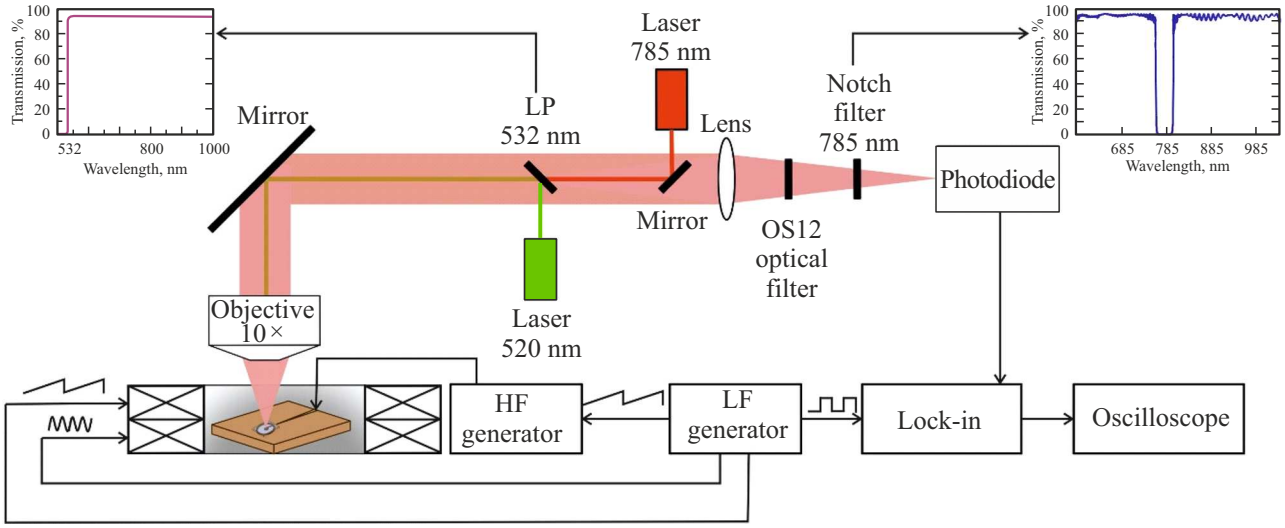

Рис. 2. Схема установки для измерения спектров ОДМР и LAC.

мый образец алмаза размещают на планарной СВЧ-антенне [16], совмещенной с системой из двух соосных катушек индуктивности, которые служат для создания статического магнитного поля и его модуляции. Лазеры, используемые в эксперименте, способны функционировать как в непрерывном, так и в импульсном режимах; это позволяет регистрировать сигналы LAC парамагнитных центров карбида кремния.

2.1. Регистрация фотолюминесценции

Сбор люминесценции осуществляется тем же объективом в геометрии обратного рассеяния. Длинноволновый интерференционный светофильтр отсекает свет с длиной волны короче 520 нм, пропуская ФЛ NV^--центров в диапазоне 630–640 нм на кремниевый фотодиод. Спектральный диапазон чувствительности фотодиода составляет 250–1100 нм, при этом пик чувствительности приходится на 800 нм. При исследовании карбида кремния используют интерференционный узкополосный светофильтр (Notch-фильтр), поглощающий излучение лазера с длиной волны 785 нм.

2.2. СВЧ-тракт

Для регистрации спектров ОДМР NV^--центров в нулевом поле используется режим сканирования частоты твердотельного СВЧ-генератора, управляемого напряжением. Генератор изготовлен совместно с Санкт-Петербургской компанией ООО „ДОК“. Диапазон частот генератора 2–3 ГГц, мощность составляет 500 мВт. СВЧ-мощность подается на планарную антенну [16], на которую устанавливается исследуемый образец. Управление СВЧ-генератором осуществляют посредством пилообразного сигнала, формируемого функциональным генератором с частотой 5 Гц. Сигнал ФЛ, поступающий

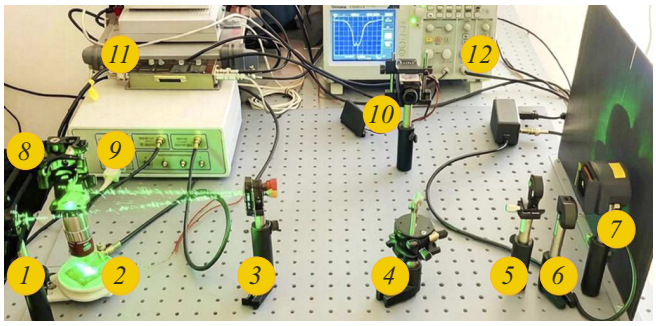

Рис. 3. Фотография установки: *1* — лазер 520 нм, *2* — система соосных катушек и планарная антенна, *3* — длинноволновый фильтр 520 нм, *4* — зеркало, *5* — линза, *6* — notch-фильтр 785 нм, *7* — фотодиод, *8* — объектив, *9* — ВЧ генератор, *10* — лазер 785 нм, *11* — синхронный детектор, *12* — осциллограф.

с выхода фотоприемника, направляют на синхронный детектор и далее регистрируют на цифровом осциллографе. В результате на экране осциллографа в реальном времени наблюдается сигнал ОДМР.

2.3. Магнитная система

Внешнее магнитное поле создается с помощью двух соосных катушек. Одна из них служит для создания статического магнитного поля с разверткой в диапазоне 0–2.5 мТл. Вторая катушка предназначена для низкочастотной модуляции магнитного поля с частотой до 1 кГц и амплитудой 0.1–0.33 мТл для последующего синхронного детектирования сигнала ФЛ.

Основные параметры установки приведены в таблице.

Внешний вид установки с обозначениями всех приборов приведен на рис. 3. Оптическая схема и фокусное расстояние объектива допускают дооснащение уста-

Основные параметры установки

Исследуемые центры	NV^--центры в алмазе	V2-центры в 4*H*-SiC
Демонстрация	Регистрация ОДМР	Регистрация LAC
Период регистрации	5 Гц	10 Гц
Диапазон частот/магнитных полей	2–3 ГГц	0–2.5 мТл
Диапазон температур	300–350 K или 80–350 K при применении проточного азотного криостата	300–350 K или 80–350 K при применении проточного азотного криостата
Частота модуляции магнитного поля	< 1 кГц	< 1 кГц
Период повторения сигнала на экране осциллографа	0.2 с	0.1 с
Постоянная времени синхронного детектора	30 мс	30 мс
Диапазон изменения внешнего магнитного поля	0–6 мТл	0–2.5 мТл

новки проточным азотным криостатом. Это позволяет проводить исследования в расширенном температурном диапазоне — от 80 до 300 K.

Благодаря модульной конструкции, относительной простоте юстировки и возможности визуализации спектров в реальном времени разработанная установка представляет значительный интерес для использования в современных лабораторных практикумах в высших учебных заведениях. В то же время интеграция проточного криостата и возможность проведения импульсных измерений позволит использовать установку как основу для построения исследовательских комплексов в области квантовой сенсорики и квантовых вычислений. Для работы установки в импульсном режиме требуется комплектация формирователем импульсной последовательности (например, производства ООО „ДОК“). Это позволит регистрировать осцилляции Раби, измерять времена релаксации, а также выполнять другие эксперименты, относящиеся к области квантовых измерений и вычислений.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Работоспособность разработанной экспериментальной установки была подтверждена в ходе серии тестовых измерений.

Были зарегистрированы сигналы магнитного резонанса и антипересечения энергетических уровней спиновых центров алмаза и карбида кремния при комнатной температуре.

На рис. 3 виден спектр ОДМР NV^--центров в алмазе, зарегистрированный на экране осциллографа (*12*) в отсутствие внешнего магнитного поля. В спектре наблюдаются две линии, расположенные на частоте ~ 2.87 ГГц. Они обусловлены СВЧ-индуцированными переходами между уровнями с проекциями спина $m_s = 0$ и $m_s = -1$ в основном триплетном состоянии. Расщепление уровней $+1$ и -1 и соответствующие линии магнитного резонанса в нулевом магнитном поле связаны с наличием механических напряжений в кристаллической решетке алмаза [17].

Спектры ОДМР и LAC, представленные на рис. 4 и 5, были получены путем сохранения осциллограммы в виде ASCII файлов. Благодаря применению описанного режима быстрой развертки частоты полное время регистрации спектра на экране цифрового осциллографа составляет ≤ 0.2 с. Такая скорость измерений позволяет осуществлять непрерывный мониторинг состояния спиновой системы, а также регистрацию ее отклика на внешние возмущения в режиме реального времени. На рис. 4 приведены спектры ОДМР NV^--центров в алмазе, зарегистрированные во внешнем магнитном поле в диапазоне от 0 до 60 Гс и при его ориентации вдоль оси NV^--центра (B $\parallel$ [111]).

На рис. 5 приведены спектры LAC V2-центров в карбиде кремния политипа 4*H*-SiC, зарегистрированные по интенсивности люминесценции с применением модуляции магнитного поля при нескольких значениях внешнего магнитного поля.

В магнитных полях регистрируется резонансное изменение интенсивности ФЛ образца, соответствующее

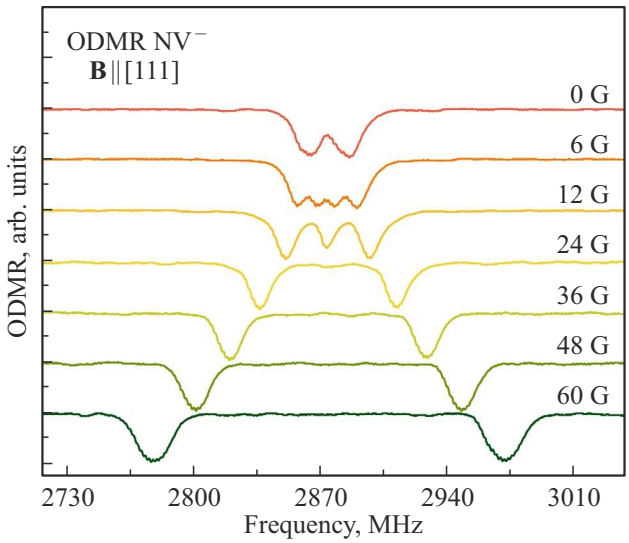

Рис. 4. Спектры ОДМР, зарегистрированные во внешнем магнитном поле в диапазоне от 0 до 60 Гс, при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси NV^--центра (B $\parallel$ [111]).

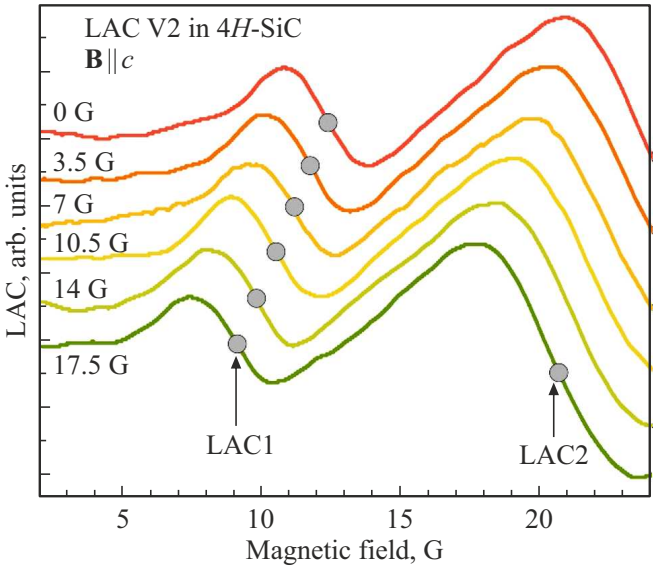

Рис. 5. Спектры LAC V2-центров в 4*H*-SiC, зарегистрированные по интенсивности люминесценции с применением модуляции магнитного поля при нескольких значениях внешнего магнитного поля. LAC1 и LAC2 обозначают точки первого и второго антипересечения.

первому и второму антипересечнию спиновых уровней основного состояния соответственно. При приложении внешнего магнитного поля положение сигналов LAC смещается. Данная зависимость может быть использована для количественного измерения величины магнитного поля.

4. Заключение

В работе описана установка для наблюдения парамагнитных центров окраски в алмазе и карбиде кремния при комнатной температуре, совмещающая возможность регистрации ОДМР и LAC. Применение двух лазеров обеспечивает быстрое переключение между исследуемыми объектами без перестройки оптического тракта при комнатной температуре. Кроме того, особенностью установки является высокая скорость регистрации сигналов магнитного резонанса и быстрый отклик на изменение условий регистрации: внешнего магнитного поля или температуры.

Работоспособность установки подтверждена тестовыми измерениями. В режиме быстрой развертки частоты СВЧ-генератора визуализирован спектр ОДМР NV^--центров в алмазе. В режиме модуляции магнитного поля зарегистрирован спектр LAC V2-центров в карбиде кремния 4*H*-SiC.

Разработанная установка обладает модульной архитектурой и потенциалом для дооснащения проточным азотным криостатом. Установка может быть использована для создания современных лабораторных практикумов в высших учебных заведениях, а также в качестве основы для исследовательских систем в области квантовой сенсорики и квантовых вычислений.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00152-П, https://rscf.ru/project/23-12-00152-П/

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Gruber, A. Drabenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski. Science, **276** (5321), 2012 (1997). https://doi.org/10.1126/science.276.5321.2012
[2] C. Bradac, G. Torsten, J.R. Rabeau. *Optical Engineering of Diamond* (Weinheim, Germany, Wiley-VCH GmbH, 2013) chap. 5, p. 143. https://doi.org/10.1002/9783527648603.ch5
[3] L. Rondin, G. Dantelle, A. Slablab, F. Grosshans, F. Treussart, P. Bergonzo, S. Perruchas, T. Gacoin, M. Chaigneau, H.-C. Chang, V. Jacques, J.-F. Roch. Phys. Rev. B, **82** (11), 115449 (2010). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.115449
[4] F. Kong, Ch. Ju, Y. Liu, Ch. Lei, M. Wang, X. Kong, P. Wang, P. Huang, Zh. Li, F. Shi, L. Jiang, J. Du. Phys. Rev. Lett., **117** (6), 060503 (2016). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.060503
[5] R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz, Ch.L. Degen. Ann. Rev. Phys. Chem., **65** (1), 83 (2014). https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040513-103659
[6] T. Zhang, G. Pramanik, K. Zhang, M. Gulka, L. Wang, J. Jing, F. Xu, Z. Li, Q. Wei, P. Cigler, Zh. Chu. ACS Sensors, **6** (6), 2077 (2021). https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00415
[7] F. Morales-Zavala, N. Casanova-Morales, R.B. Gonzalez, A. Chandía-Cristi, L.D. Estrada, I. Alvizú, V. Waselowski, F. Guzman, S. Guerrero, M. Oyarzún-Olave, C. Rebolledo, E. Rodriguez, Ju. Armijo, H. Bhuyan, M. Favre, A.R. Alvarez, M.J. Kogan, J.R. Maze. J. Nanobiotechnology, **16** (1), 60 (2018). https://doi.org/10.1186/s12951-018-0385-7
[8] P.G. Baranov, H.J. von Bardeleben, F. Jelezko, J. Wrachtrup. *Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures Basic and Advanced Applications* (Vienna, Springer Verlag GmbH Austria, Springer Ser. Math. Sci., 2017) v. 253, chap. 1-6, p. 1. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1157-4
[9] S. Castelletto, A. Boretti. J. Phys.: Photonics, **2** (2), 022001 (2020). https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab77a2
[10] V.S. Vainer, V.A. Il'in. Sov. Phys. Solid State, **23**, 2126. (1981).
[11] V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, D.O. Tolmachev, R.A. Babunts, A.G. Badalyan, V.Yu. Davydov, E.N. Mokhov, I.I. Proskuryakov, S.B. Orlinskii, P.G. Baranov. Phys. Rev. Lett., **115** (24), 247602 (2015). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.247602
[12] S.A. Tarasenko, A.V. Poshakinskiy, D. Simin, V.A. Soltamov, E.N. Mokhov, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. Phys. Status Solidi B: Basic Res., **255** (1), 1700258 (2018). https://doi.org/10.1002/pssb.201700258

[13] K.V. Likhachev, M.V. Uchaev, I.P. Veyshtort, A.V. Batueva, A.S. Gurin, R.A. Babunts, P.G. Baranov. J. Appl. Phys., **137** (1), 015701 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0238078
[14] R.A. Babunts, A.A. Soltamova, D.O. Tolmachev, V.A. Soltamov, A.S. Gurin, A.N. Anisimov, V.L. Preobrazhenskii, P.G. Baranov. JETP Lett., **95** (8), 429 (2012). https://doi.org/10.1134/S0021364012080024
[15] A.N. Anisimov, V.A. Soltamov, I.D. Breev, R.A. Babunts, E.N. Mokhov, G.V. Astakhov, V. Dyakonov, D.R. Yakovlev, D. Suter, P.G. Baranov. AIP Advances, **8** (8), 085304 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5037158
[16] K. Sasaki, Ya. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, Ju. Ishi-Hayase, K.M. Itoh, E. Abe. Rev. Sci. Instrum., **87** (5), 053904 (2016). https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.04627
[17] Р.А. Бабунц, А.С. Гурин, А.П. Бундакова, М.В. Музафарова, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов. Письма ЖТФ, **49** (1), 43 (2023). https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.01.54058.19391 [R.A. Babunts, A.S. Gurin, A.P. Bundakova, M.V. Muzafarova, A.N. Anisimov, P.G. Baranov. Techn. Phys. Lett., **49** (1), 40 (2023). https://doi.org/10.21883/TPL.2023.01.55346.19391]

Редактор Г.А. Оганесян

A setup for demonstrating optically detected magnetic resonance of spin centers in diamond and silicon carbide

M.V. Uchaev, K.V. Likhachev, V.V. Yakovleva, A.S. Gurin, I.M. Gadzhiev, M.V. Muzafarova, P.G. Baranov, R.A. Babunts

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The setup for demonstrating magnetic resonance of spin centers in diamond and silicon carbide is presented; it enables real-time visualization of the spectra. The operation of the setup is demonstrated by recording the optically detected magnetic resonance spectra of NV^- centers in diamond and the spin levels anticrossing of vacancy centers in silicon carbide. The modular design of the setup allows it to be used both for university laboratory workshops and as a platform for research work.