

09

## Электронно-ядерное взаимодействие вакансий бора в гексагональном нитриде бора

© Е.В. Дмитриева<sup>1</sup>, Г.В. Мамин<sup>1</sup>, Ф.Ф. Мурзаханов<sup>1</sup>, И.Н. Грачева<sup>1</sup>, М.Р. Гафуров<sup>1</sup>, В.А. Солтамов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский Федеральный университет,  
Казань, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dev600@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2025 г.

Принята к публикации 11 ноября 2025 г.

Проведено исследование взаимодействий спинового дефекта и ближайших ядер азота в гексагональном нитриде бора методами электронного парамагнитного резонанса и двойного электронно-ядерного резонанса. Определены константы сверхтонкого ( $A_{iso} = 59.5$  МГц,  $A_{dd} = 13.8$  МГц) и квадрупольного ( $C_q = 1.96$  МГц) взаимодействий для ядер азота  $^{14}\text{N}$  первой координационной сферы. Полученные результаты важны для понимания механизмов электронно-ядерных взаимодействий в hBN и разработки квантовых устройств на основе спиновых дефектов в двумерных материалах.

**Ключевые слова:** электронный парамагнитный резонанс, ДЭЯР спектроскопия, вакансия бора, hBN, спиновый дефект.

DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62448.8056k-25

### 1. Введение

Особенностью исследуемых спиновых дефектов для квантовых приложений является их возможность сохранять квантовую когерентность при комнатной температуре ( $T = 297$  К), что было экспериментально подтверждено методами оптически детектируемого магнитного резонанса. Вышеупомянутое преимущество кардинально отличает изучаемую систему от традиционных сверхпроводящих кубитов, требующих низких температур ( $\sim 10$  мК), что представляет собой дополнительные трудности при масштабировании и реализации квантовых алгоритмов. Время электронной спин-спиновой релаксации  $T_2$  вакансии бора оценивается величиной порядка нескольких микросекунд [1–4].

Отрицательно заряженная вакансия бора  $V_B^-$  в кристалле гексагонального нитрида бора (hBN) представляет собой точечный дефект по Френкелю с локальной симметрией  $D_{6h}$  в окружении трех эквивалентных атомов азота в плоскости слоя BN, возникающий при удалении атома бора во время облучения высокоэнергетическими частицами с последующим захватом электрона из кристаллической решетки [5]. Спиновый дефект  $V_B^-$  представляет особую ценность для квантовых вычислений благодаря уникальным спиновым и оптическим свойствам. Важное условие применимости кубита — возможность осуществления инициализации, считывания и манипулирования спиновыми состояниями. Указанные операции могут быть реализованы посредством комбинированного оптического, микроволнового и радиочастотного воздействий для состояний вакансии бора в hBN [6–8].

Однако к временам когерентности предъявляются более строгие требования, так как этот параметр определя-

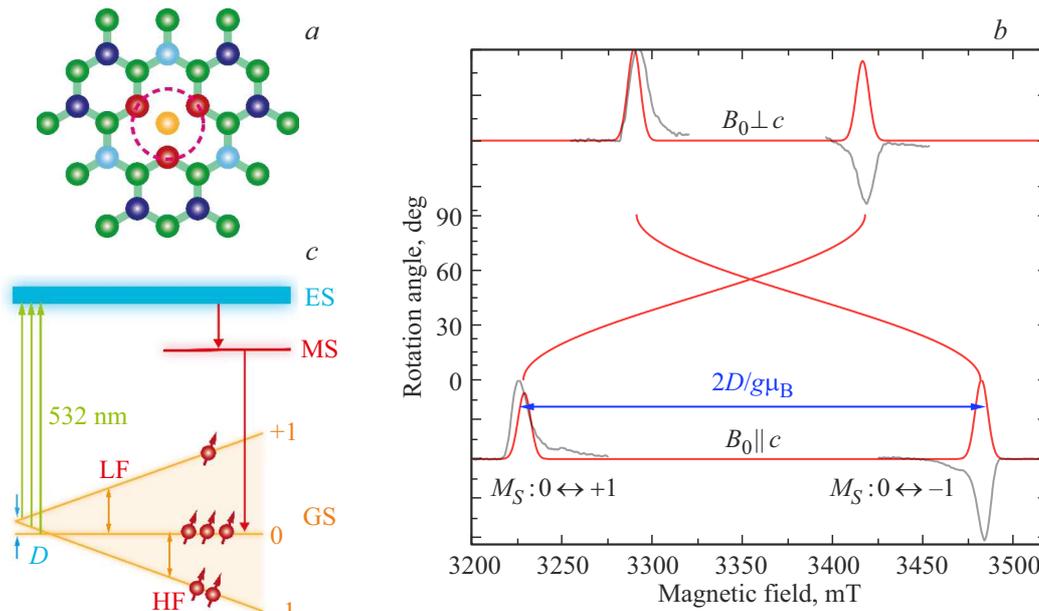
ет временной интервал для выполнения квантовых операций и хранения квантовой информации [9]. Длительное время когерентности ядерных спинов порядка миллисекунд [10] критически важно для реализации квантовой памяти и электронно-ядерных регистров [11,12], где ядерные спины выступают долгоживущими элементами памяти, а электронные спины обеспечивают канал управления. Таким образом, возникает необходимость в получении величин, характеризующих ядра и их взаимодействия с вакансией бора.

### 2. Детали эксперимента

В данной работе исследовался монокристалл гексагонального нитрида бора размером  $0.90 \times 0.54 \times 0.05$  мм, подвергнутый воздействию пучком электронов с энергией 2 МэВ. Эксперименты методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) проводились на спектрометре Bruker Elexsys E680 в W-диапазоне (94 GHz) при оптическом возбуждении с использованием диодного лазера ( $\lambda 532$  nm,  $P = 100$  mW). С целью получения констант сверхтонкого и квадрупольного взаимодействий между спиновым дефектом и ядрами азота первой координационной сферы (рис. 1, *a*) использовалась спектроскопия двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР).

### 3. Результаты и их обсуждение

В спектре электронного парамагнитного резонанса наблюдаются два перехода (рис. 1, *b*), соответствующие



**Рис. 1.** *a* — кристаллическая решетка hBN, вакансия бора изображена в центре. Зеленым цветом показаны атомы бора, красным — атомы азота первой координационной сферы; *b* — спектр ЭПР (черная линия) и моделирование (красная линия) для двух ориентаций: ось кристалла с параллельна и перпендикулярна вектору магнитного поля  $B_0$  (W-диапазон,  $T = 25$  K). Приведено моделирование угловой зависимости (сплошные красные линии); *c* — упрощенная схема энергетических уровней спинового дефекта при оптическом накачке на длине волны 532 nm. ES — возбужденное состояние, MS — метастабильное состояние, GS — основное состояние.

тонкой структуре вакансии бора со спином  $S = 1$ . Проведенное моделирование угловой зависимости спектров позволило определить параметры спинового гамильтониана. Значение  $g$ -фактора составило 2.004. Расщепление в нулевом магнитном поле описывается выражением  $2D/g\mu_B$  с величиной  $D = 3.55$  GHz [6].

Особый интерес представляет изменение фазы сигнала высокополевого перехода в спектре ЭПР на  $180^\circ$ , что свидетельствует об отклонении населенностей спиновых подуровней от распределения Больцмана. Данный эффект обусловлен лазерной накачкой и может быть интерпретирован в рамках приведенной модели энергетических уровней (рис. 1, *c*) и соответствующих оптических переходов.

Спектроскопические особенности исследуемой системы обусловлены совокупностью пяти вкладов: электронное Зеемановское, расщепление в нулевом магнитном поле, ядерное Зеемановское, сверхтонкое и квадрупольное взаимодействия. Спиновый гамильтониан в случае параллельной ориентации может быть записан в следующем виде:

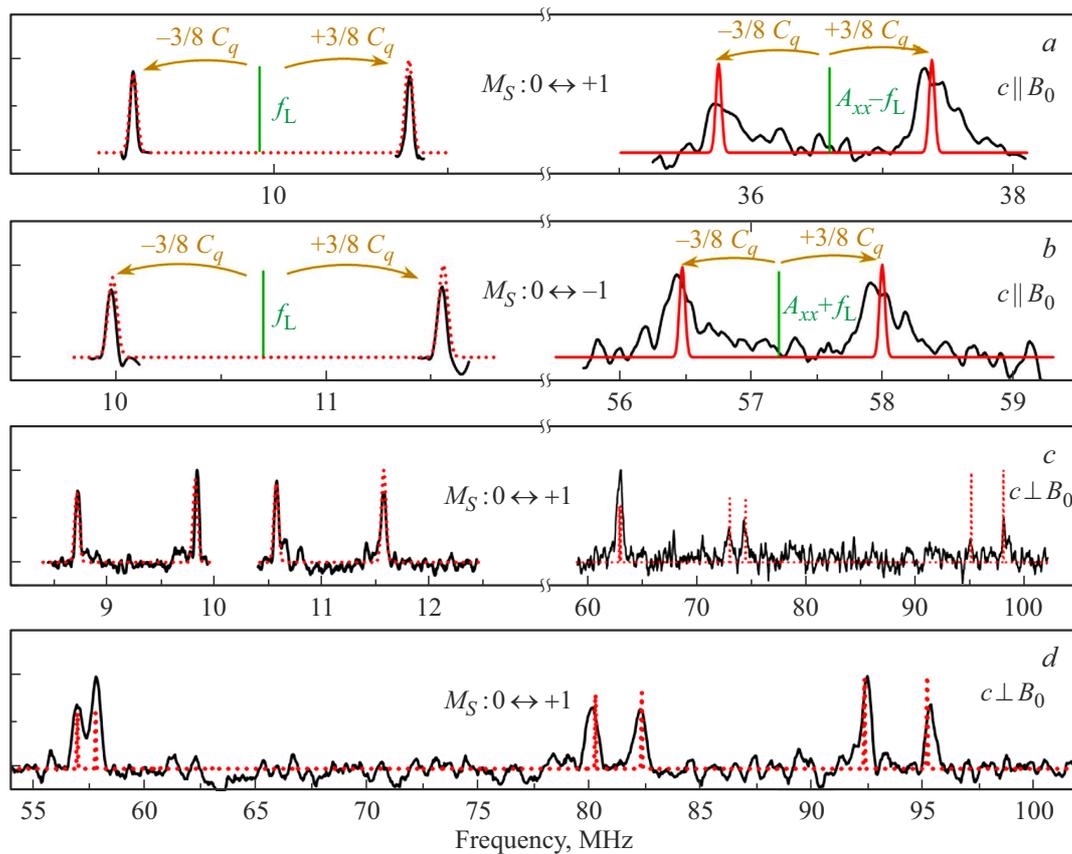
$$\hat{H} = g\mu_B B_0 S_z + D \left( S_z^2 - \frac{S(S+1)}{3} \right) - \gamma \hbar B_0 I_z + \sum_{i=1}^3 \left( A_{xx} S_x I_{x(i)} + A_{yy} S_y I_{y(i)} + A_{zz} S_z I_{z(i)} \right) + \frac{C_q}{4I(2I-1)} \left( 3I_{z(i)}^2 - I(I+1) + \eta(I_{x(i)}^2 - I_{y(i)}^2) \right),$$

где суммирование ведется по ядрам азота.

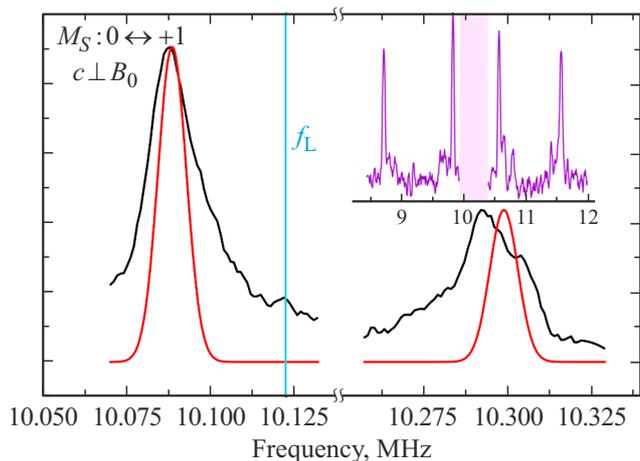
Для переходов  $0 \leftrightarrow +1$  и  $0 \leftrightarrow -1$  были получены спектры ДЭЯР от ядер  $^{14}\text{N}$  ( $I = 1$ , 99.6%) первой координационной сферы (рис. 2). В результате моделирования были установлены главные значения тензора сверхтонкого взаимодействия:  $A_{xx} = 46.5$  MHz,  $A_{yy} = 45.0$  MHz,  $A_{zz} = 87.0$  MHz, что соответствует изотропной составляющей  $A_{iso} = 59.5$  MHz и анизотропному вкладу  $A_{dd} = 13.8$  MHz. Константа квадрупольной связи составила  $C_q = 1.96$  MHz, параметр асимметрии  $\eta = -0.07$ . Анализ спектральных особенностей потребовал применения теории возмущений второго порядка, что позволило объяснить наблюдаемые сдвиги сигналов ДЭЯР относительно ядерной частоты Лармора.

В перпендикулярной ориентации для низкополевого перехода вблизи ларморовской частоты были обнаружены резонансные пики (рис. 3). Проведенное моделирование позволило идентифицировать происхождение сигналов, соответствующих переходам, связанным со взаимодействиями ядер первой координационной сферы и вакансии бора.

Проведенный анализ многокомпонентных спектров ДЭЯР позволил детально охарактеризовать радиочастотные переходы, связанные с ядрами  $^{14}\text{N}$  в первой координационной сфере вакансии бора в hBN. Установлена зависимость положения резонансных линий от пространственной ориентации ( $\theta, \varphi$ ) между вакансией бора и ближайшими ядрами азота. Применение возбуждающих импульсов открывает возможность селективного управления спинами для конкретных ядер



**Рис. 2.** Спектр ДЭЯР азота  $^{14}\text{N}$  для двух электронных переходов:  $M_S = 0 \leftrightarrow +1$  в магнитном поле  $B_0 = 3223.1$  мТл и  $M_S = 0 \leftrightarrow -1$  в магнитном поле  $B_0 = 3480.5$  мТл: *a* — параллельная ориентация, низкополевой переход; *b* — параллельная ориентация, высокополевой переход; *c* — перпендикулярная ориентация,  $\varphi = 7.5^\circ$ ,  $T = 50$  К; *d* —  $\varphi = 18^\circ$ ,  $T = 25$  К, где  $\varphi$  — угол отклонения в плоскости оборванной связи.  $f_L$  — Ларморовская частота азота  $^{14}\text{N}$ ,  $C_q$  — константа квадрупольной связи.



**Рис. 3.** Спектр ДЭЯР азота  $^{14}\text{N}$  вблизи ларморовской частоты для перехода  $M_S = 0 \leftrightarrow +1$  ( $\varphi = 7.5^\circ$ ,  $T = 25$  К).

$^{14}\text{N}$ , в частности, подавления в случае необходимости нежелательных ядерных взаимодействий в системе через селективное насыщение конкретных переходов [4]. Анализ констант сверхтонкого взаимодействия показал,

что изотропная составляющая значительно превышает анизотропный вклад, что свидетельствует о высокой степени локализации спиновой плотности на атомах азота. Особый интерес представляет возможность создания гибридных квантовых систем, где электронный спин выступает в качестве управляющего кубита, а ядерные спины  $^{14}\text{N}$  выполняют функцию квантовой памяти. Такой подход, реализуемый в двумерном материале, открывает новые возможности для разработки масштабируемых квантовых устройств [13].

#### 4. Заключение

Проведенные исследования методом ДЭЯР-спектроскопии позволили детально изучить взаимодействие спинового дефекта и ядерной подсистемы. Полученные результаты открывают перспективы для создания масштабируемых квантовых устройств на основе гибридных электронно-ядерных систем, спиновый дефект и ядра в hBN могут служить платформой для реализации многокубитных логических операций и квантовой памяти с увеличенным временем когерентности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию ме-

тодов управления спиновыми состояниями и интеграцию данных систем в практические квантовые приложения.

### Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 24-12-00151.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Gottscholl, M. Diez, V. Soltamov, C. Kasper, A. Sperlich, M. Kianinia, C. Bradac, I. Aharonovich, V. Dyakonov. *Sci. Adv.* **7**, *14*, eabf3630 (2021). DOI: 10.1126/sciadv.abf3630
- [2] F.F. Murzakhanov, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, U. Gerstmann, W.G. Schmidt, T. Biktagirov, I. Aharonovich, A. Gottscholl, A. Sperlich, V. Dyakonov, V.A. Soltamov. *Nano Lett.* **22**, *7*, 2718 (2022). DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04610
- [3] P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T.P. Orlando, S. Gustavsson, W.D. Oliver. *Appl. Phys. Rev.* **6**, *2*, 021318 (2019). DOI: 10.1063/1.5089550
- [4] J. Lee, H. Park, H. Seo. *npj 2D Mater. Appl.*, **6**, *1*, 60 (2022). DOI: 10.1038/s41699-022-00336-2
- [5] G. Barcza, V. Ivády, T. Szilvási, M. Vörös, L. Veis, Á. Gali, Ö. Legeza. *J. Chem. Theory Comput.* **17**, *2*, 1143 (2021). DOI: 10.1021/acs.jctc.0c00809
- [6] A. Gottscholl, M. Kianinia, V. Soltamov, S. Orlinskii, G. Mamin, C. Bradac, C. Kasper, K. Krambrock, A. Sperlich, M. Toth, I. Aharonovich, V. Dyakonov. *Nat. Mater.* **19**, *5*, 540 (2020). DOI: 10.1038/s41563-020-0619-6
- [7] W. Lee, V.S. Liu, Z. Zhang, S. Kim, R. Gong, X. Du, K. Pham, T. Poirier, Z. Hao, J.H. Edgar, P. Kim, C. Zu, E.J. Davis, N.Y. Yao. *Phys. Rev. Lett.* **134**, *9*, 096202 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.096202
- [8] F.F. Murzakhanov, B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, I.E. Mumdzhi, I.N. Gracheva, B.F. Gabbasov, A.N. Smirnov, V.Y. Davydov, V.A. Soltamov. *Nanomaterials* **11**, *6*, 1373 (2021). DOI: 10.3390/nano11061373
- [9] G. Wolfowicz, F.J. Heremans, C.P. Anderson, S. Kanai, H. Seo, A. Gali, G. Galli, D.D. Awschalom. *Nat. Rev. Mater.* **6**, *10*, 906 (2021). DOI: 10.1038/s41578-021-00306-y
- [10] G.D. Fuchs, G. Burkard, P.V. Klimov, D.D. Awschalom. *Nature Phys.* **7**, *10*, 789 (2011). DOI: 10.1038/nphys2026
- [11] M.A. Perlin, Z. Wang, J. Casanova, M.B. Plenio. *Quantum Sci. Technol.* **4**, *1*, 015007 (2019). DOI: 10.1088/2058-9565/aade5c
- [12] A. Bourassa, C.P. Anderson, K.C. Miao, M. Onizhuk, H. Ma, A.L. Crook, H. Abe, J. Ul-Hassan, T. Ohshima, N.T. Son, G. Galli, D.D. Awschalom. *Nat. Mater.* **19**, *12*, 1319 (2020). DOI: 10.1038/s41563-020-00802-6
- [13] C.E. Bradley, J. Randall, M.H. Abobeih, R.C. Berrevoets, M.J. Degen, M.A. Bakker, M. Markham, D.J. Twitchen, T.H. Taminiau. *Phys. Rev. X* **9**, *3*, 031045 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevX.9.031045

Редактор А.Н. Смирнов