02

# Влияние радиационно-термической обработки на характеристики NV-центров в алмазе

© А.М. Скоморохов[1], Ю.А. Успенская[1], М.В. Учаев[1], А.С. Гурин[1], Д.Д. Крамущенко[1], Г.В. Мамин[2], П.А. Косач[2], В.Г. Винс[3], А.П. Елисеев[4], П.Г. Баранов[1], Р.А. Бабунц[1], С.Я. Килин[5]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия
[3] ООО „ВЕЛМАН“,
Новосибирск, Россия
[4] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия
[5] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
Москва, Россия

e-mail: roman.babunts@mail.ioffe.ru

*Поступила в редакцию 28.08.2026 г.*
*В окончательной редакции 09.09.2026 г.*
*Принята к публикации 16.09.2026 г.*

Проведен анализ влияния дозы облучения электронами серии образцов алмаза, содержащих примерно одинаковую концентрацию азота, на характеристики NV-центров. Исследования проводились оптическими методами, в том числе методом оптически детектируемого магнитного резонанса в нулевом поле, а также методом электронного парамагнитного резонанса в X-диапазоне. В режиме детектирования электронного спинового эха измерены времена спин-спиновой ($T_2$) и спин-решеточной ($T_1$) релаксации. Доза облучения варьировалась от $10^{17}$ до $60 \cdot 10^{17}$ $e^-/cm^2$.

**Ключевые слова:** оптически детектируемый магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс, фотолюминесценция, спиновое эхо, алмаз, NV-центр.

DOI: 10.61011/OS.2026.10.63937.10579-26

## 1. Введение

Спиновые центры окраски в алмазе, в особенности азотно-вакансионные ($NV^-$) центры, являются одними из наиболее исследуемых объектов в современной физике низкоразмерных структур. Важным свойством NV-центров является наличие механизма оптически индуцированного выстраивания населенностей спиновых подуровней, который обеспечивает поляризацию спиновой системы и открывает возможность применения этих дефектов в таких активно развивающихся областях, как высокочувствительная магнитометрия с наномасштабным пространственным разрешением и квантовая оптика, включая генерацию одиночных фотонов [1–9].

Эффективность формирования NV-центров определяется несколькими факторами: концентрацией донорного азота в исходном кристалле, дозой облучения частицами высоких энергий и режимом последующего отжига. Исследование постростовых зависимостей необходимо для синтеза алмазных структур с заданными квантовыми свойствами.

Оптическая накачка NV-центра ($\lambda = 532\,\text{nm}$) инициирует спин-селективную поляризацию основного триплетного состояния $^3A$ с нулевым расщеплением $D = 2.87\,\text{GHz}$. В результате населенность уровня $m_s = 0$ возрастает, тогда как состояния $m_s = \pm 1$ опустошаются с характерным временем порядка микросекунд. Резонансное СВЧ-возбуждение индуцирует переходы между спин-подуровнями основного состояния, что изменяет заселённость возбуждённого триплета $^3E$ и, следовательно, интенсивность флуоресценции. На этом эффекте и основывается регистрация оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) по изменению сигнала фотолюминесценции (ФЛ).

NV-центры в алмазе считаются наиболее перспективными для квантовых вычислений и сенсорики. Но при их применении следует учесть, что в решетке алмаза имеются четыре эквивалентных направления центра. Кроме того, интерес представляет только $NV^-$, в то время как $NV^0$-центр дает вклад в ФЛ, но не в сигнал ОДМР. Уникальные свойства NV-центров позволяют применять их в магнитометрии, термометрии, для развития новых информационных технологий, основанных на квантовых свойствах спинов и одиночных фотонов. Фотолюминесценция NV-центров в алмазе лежит в удобном видимом диапазоне.

Примесные атомы азота (P1-центры) случайным образом распределены в решетке алмаза. При облучении электроны выбивают некоторые атомы углерода, создавая вакансии и междоузельные атомы. Отжиг при вы-

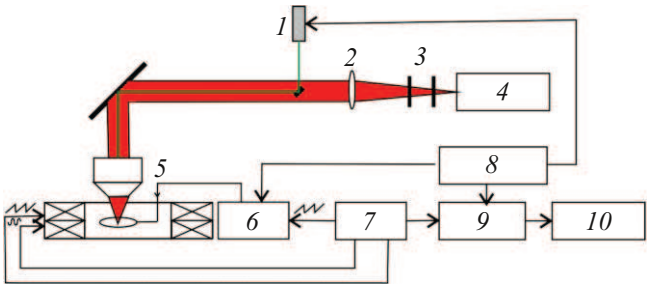



**Рис. 1.** Схема установки для измерения спектров ОДМР: *1* — лазер, *2* — линза, *3* — оптические фильтры ОС12 и НС10, *4* — фотоприемник, *5* — объектив, *6* — ВЧ-генератор, *7* — НЧ-генератор, *8* — формирователь импульсов, *9* — синхронный детектор, *10* — осциллограф.

сокой температуре позволяет вакансиям перемещаться по кристаллической решетке до захвата на P1-центрах с образованием NV-центров [10–13].

Спектры ОДМР NV-центра в основном состоянии $^3A_2$ ($S = 1$) в нулевом магнитном поле описываются стандартным спиновым гамильтонианом в пренебрежении спином ядра:

$$\hat{H} = D[\hat{S}_Z^2 - S(S+1)/3] + E(\hat{S}_X^2 - \hat{S}_Y^2),$$

где $S = 1$, $D$ и $E$ — константы, описывающие расщепление в нулевом поле.

При отсутствии напряжений в образце алмаза параметр $E = 0$, параметр $D = 2870$ MHz (при комнатной температуре [14,15]). Напряжения в кристалле алмаза приводят к образованию суперпозиции уровней $m_s = +1$ и $-1$ в нулевом магнитном поле и соответственно к изменению параметра $E$ [15–19].

## 2. Методика эксперимента

Восемь образцов, изготовленных из монокристаллической пластины алмаза, вырезанной в плоскости (111), синтезированного в системе Fe–Co–C, были исследованы оптическими методами, в том числе методом ОДМР в нулевом поле, а также методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в X-диапазоне. NV-центры формировались облучением на линейном ускорителе электронов с энергией 3 MeV при дозах от $10^{17}$ до $60 \cdot 10^{17}$ $e^-/cm^2$ с последующим отжигом при 1200 °C в вакууме в течение двух часов. Исходная концентрация азота в образцах #1 и #2 была примерно 60 и 80 ppm соответственно, у остальных — 95 ppm. Пластина изготовлена скалыванием грани алмаза, выращенного при высоком давлении и высокой температуре (HPHT). Основные параметры исследуемых образцов алмаза представлены в табл. 1.

Эксперименты по импульсному ОДМР были выполнены на установке (рис. 1), которая позволяет проводить радиоспектроскопические измерения на парамагнитных центрах алмаза. При исследовании NV-центров в алмазе регистрировалась интенсивность люминесценции с модуляцией мощности СВЧ-поля, которая подавалась на образец при помощи планарной антенны [20]. Оптическая схема установки состоит из канала возбуждения (на длине волны 532 nm) и регистрации ФЛ.

Сигналы ФЛ регистрировалась как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота. Концентрация азота (P1-центров) серии образцов была достаточно большой, так что спектры ЭПР и ОДМР всех образцов легко регистрировались. Управление установкой при измерениях в импульсном режиме осуществляется формирователем импульсов [21].

Часть измерений проводилась на спектрометре ЭПР Elexsys 580/680 Bruker, работающем в X- и W-диапазонах частот (9.5 и 95 GHz) в стационарном и импульсном режимах. Времена релаксации измерялись при комнатной температуре в X-диапазоне с использованием импульсных последовательностей Хана [22,23] ($\pi/2 - \tau_0 + \Delta\tau - \pi - \tau_0 + \Delta\tau$ — электронное спиновое эхо (ЭСЭ)) и последовательности инверсии-восстановления ($\pi - T_0 + \Delta T - \pi/2 - \tau - \pi - \tau -$ ЭСЭ), где длительности импульсов $\pi/2$ и $\pi$ равны 16 и 32 ns соответственно, $\tau_0$ — 500 ns, $\Delta\tau$ — 64 ns, $T_0$ — 5 us, $\Delta T$ — 10 us.

## 3. Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены зависимости концентраций P1- и NV-центров от дозы облучения. При увеличении флюенса электронов увеличивается количество вакансий, что при одинаковых условиях отжига приводит к уменьшению числа P1-центров, увеличивая одновременно количество NV-центров. Первые два образца имели отличную концентрацию P1-центров, поэтому

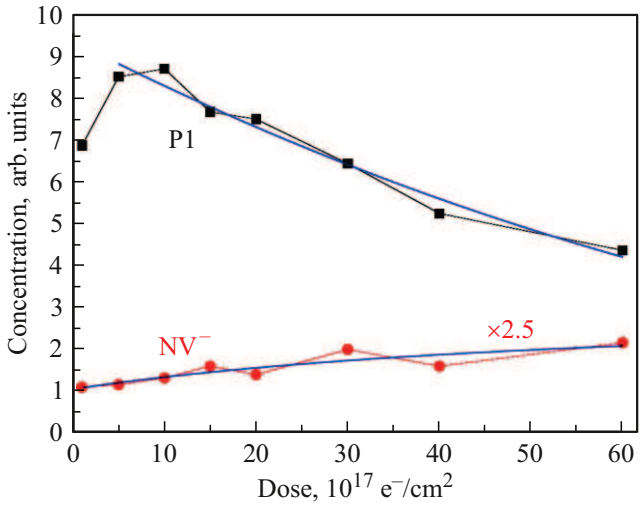



**Рис. 2.** Зависимость концентраций P1- и NV-центров от дозы облучения по интенсивности спектров ЭПР. Аппроксимация (синим цветом) приведена для удобства восприятия.

**Таблица 1.** Параметры исследуемых алмазных образцов

| Образец | Толщина, mm | Доза, V 1 V= $10^{17}$ $e^-/cm^2$ | [Nc], ppm | Край пропускания $\lambda$, nm |
|---|---|---|---|---|
| #1 | 0.42 | 1 | $60 \pm 5$ | 290 |
| #2 | 0.42 | 5 | $80 \pm 6$ | 300 |
| #3 | 0.45 | 10 | $95 \pm 8$ | 325 |
| #4 | 0.44 | 15 | $95 \pm 8$ | 315 |
| #5 | 0.44 | 20 | $95 \pm 8$ | 315 |
| #6 | 0.46 | 30 | $95 \pm 8$ | 315 |
| #7 | 0.42 | 40 | $95 \pm 8$ | 315 |
| #8 | 0.43 | 60 | $95 \pm 8$ | 315 |

**Таблица 2.** Времена спин-решеточной релаксации $T_1$ алмазных образцов серии #1–#8

| Образец | $T_1$, ms |
|---|---|
| #1 | 10.61 |
| #2 | 10.22 |
| #3 | 10.18 |
| #4 | 9.83 |
| #5 | 8.98 |
| #6 | 7.4 |
| #7 | 10.5 |
| #8 | 10.08 |

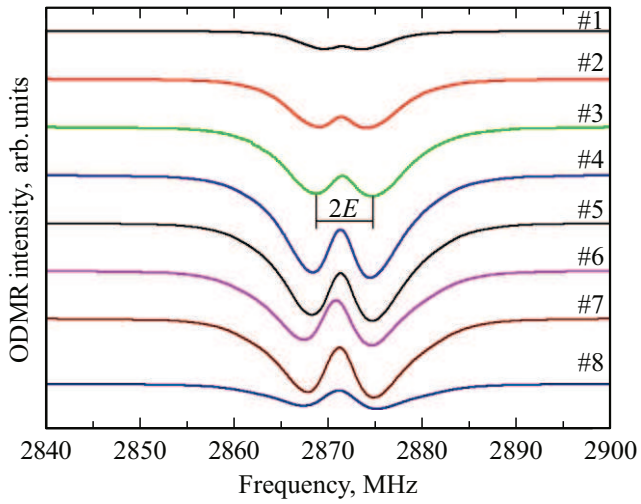



**Рис. 3.** Спектры ОДМР серии образцов #1–#8 при 300 K.

соответствующие им первые две точки не ложатся на монотонную зависимость.

Из спектров ОДМР в нулевом магнитном поле (рис. 3) получены зависимости значений напряжений в кристаллах от дозы облучения по методике, описанной в [24]. При деформации кристалла, нарушающей симметрию центра, вырождение подуровней $m_S = \pm 1$ снимается с дальнейшим расщеплением, равным $2E$, зависящим от напряжения. Параметр $2E$ возрастает с 4 MHz при минимальной дозе до 7.8 MHz при дозе $60 \cdot 10^{17}$ $e^-/cm^2$ (рис. 4), что отражает рост радиационно индуцированных напряжений в кристаллической решётке. Очевидно, поток электронов, выбивающий атомы углерода из узлов, нарушает упорядоченную геометрическую структуру кристаллической решетки алмаза, создавая напряжения.

Измерения времени спин-решеточной релаксации $T_1$ (табл. 2) были выполнены с помощью импульсного ОДМР в магнитном поле $\sim 50$ G на частоте $\sim 2780$ MHz.

Время спин-решеточной релаксации $T_1$ было получено путем аппроксимации кривой восстановления ФЛ экспонентой. Экспериментально установлено, что время спин-решеточной релаксации $T_1$ для всей исследуемой серии образцов составляет порядка 10 ms. Высокие значения $T_1$ свидетельствуют о малом вкладе фононных процессов в потерю фазовой когерентности спинового состояния даже при $T = 300$ K. Динамика спиновой системы целиком определяется внутренними магнитными и электронными взаимодействиями в кристаллической решетке.

Были измерены также времена спин-спиновой релаксации $T_2$ всего ряда образцов. На рис. 5 приведена зависимость времени релаксации $T_2$ (в условиях непрерывной оптической подсветки) от дозы электронного облучения. Обнаружено, что варьирование параметров облучения алмазов оказывает нелинейное влияние на образование точечных дефектов. При минимальной дозе облучения (1 V, образец # 1) время релаксации составляет порядка 6 $\mu$s. С увеличением дозы до 5 V и выше происходит резкое двукратное падение времени релаксации до 3 $\mu$s. В диапазоне доз от 5 до 60 V (образцы #2–#8) наблюдается плато, где время релаксации находится на уровне 3 $\mu$s и перестает зависеть от интегрального флюенса электронов.

Такой характер зависимости наглядно отражает специфику формирования дефектной среды алмаза. При

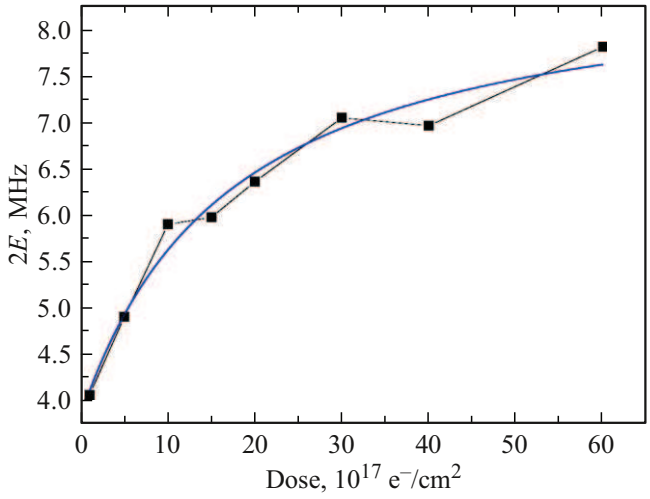



**Рис. 4.** Зависимость расщепления $2E$ линии ОДМР от дозы облучения. Аппроксимация (синим цветом) приведена для удобства восприятия.

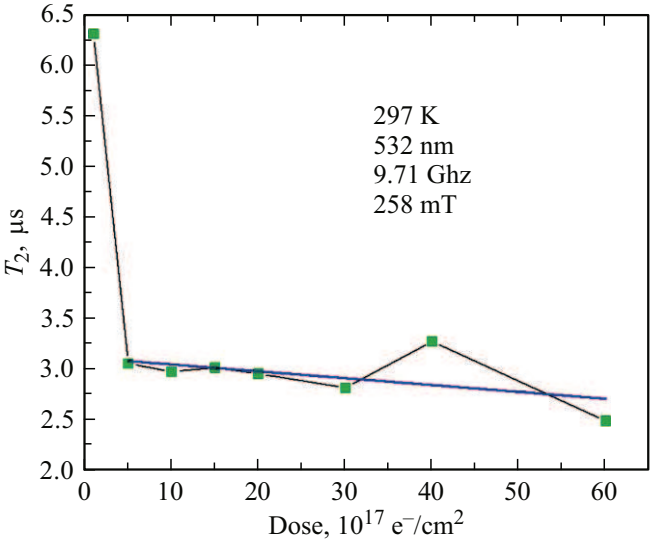



**Рис. 5.** Измерение времени спин-решеточной релаксации $T_2$. Аппроксимация (синим цветом) приведена для удобства восприятия.

начальной дозе (1 V) концентрация генерируемых вакансий, мигрирующих при отжиге к азоту, относительно мала. Это обеспечивает умеренную плотность NV-центров и сохранение времени релаксации на уровне $6\,\mu$s. Насыщение при дозах $\geq 5$ V указывает на достижение критической плотности дефектов, при которой дальнейшее радиационное воздействие уже не изменяет расстояние между дефектами. В этой области доминирующим механизмом дефазировки становится спин-спиновое взаимодействие. Оно протекает между самими NV-центрами и с участием сопутствующих парамагнитных радиационных дефектов. Возможным дополнительным фактором, формирующим плато в $3\,\mu$s, является фотоиндуцированная флуктуация зарядовых состояний ($NV^- \leftrightarrow NV^0$) под действием непрерывной лазерной накачки. Динамическая перезарядка дефектов в условиях высокой плотности радиационных центров фиксирует скорость дефазировки, делая её нечувствительной к последующему росту дозы облучения.

Полученные значения времен релаксации и общий характер их зависимости от флюенса хорошо согласуются с известными литературными данными для аналогичных систем NV-центров в алмазах при комнатной температуре [25]. Это подтверждает стандартную природу спин-спиновых взаимодействий в исследуемых кристаллах без проявления нетипичных каналов деградации спиновой памяти.

Таким образом, показано как постобработка (радиационно-термическая обработка) влияет на напряжения в кристалле алмаза, динамические характеристики образовавшихся спиновых систем оценивались по результатам измерений времен спиновой релаксации при комнатной температуре. Установлено увеличение параметра $2E$, указывающее на рост локальных напряжений.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Юлии Доценко за помощь в проведении экспериментов.

### Финансирование работы

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2024-556).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L.C.L. Hollenberg. Phys. Rep., **528** (1), 1 (2013). DOI: 10.1016/j.physrep.2013.02.001

[2] R.A. Babunts, I.D. Breev, D.D. Kramushchenko, A.P. Bundakova, M.V. Muzafarova, A. N. Anisimov, P.G. Baranov. J. Appl. Phys., **132**, 175705 (2022). DOI: 10.1063/5.0107019

[3] J. Wrachtrup, F. Jelezko. J. Phys. :Condens. Mat., **18** (21), 807 (2006). DOI: 10.48550/arXiv.quant-ph/0510152

[4] L. Childress, M.V. Gurudev Dutt, J.M. Taylor, A.S. Zibrov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P.R. Hemmer, M.D. Lukin. Science, **314**, 281 (2006). DOI: 10.1126/science.1131871

[5] D.D. Awschalom, R. Epstein, R. Hanson. Sci. Am., **297** (4), 84 (2007). DOI: 10.1038/scientificamerican1007-84

[6] M.V. Gurudev Dutt, L. Childress, L. Jiang, E. Togan, J. Maze, F. Jelezko, A.S. Zibrov, P.R. Hemmer, M.D. Lukin. Science, **316**, 1312 (2007). DOI: 10.1126/science.1139831

[7] R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz, C.L. Degen. Ann. Rev. Phys. Chem., **65**, 83 (2014). DOI: 10.1146/annurev-physchem-040513-103659

[8] A. Gruber, A. Drabenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski. Science, **276** (5321), 2012 (1997). DOI: 10.1126/science.276.5321.2012

[9] M.W. Doherty, V.V. Struzhkin, D.A. Simpson, L.P. McGuinness, Y. Meng, A. Stacey, T.J. Karle, R. J. Hemley, N.B. Manson, L.C.K. Hollenberg, S. Prawer. Phys. Rev. Let., **112**, 047601 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.047601

[10] P.G. Baranov, H.J. von Bardeleben, F. Jelezko, J. Wrachtrup. *Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures* (Springer Series in Materials Science, Vienna, 2017) vol. 253. DOI: 10.1007/978-3-7091-1157-4

[11] J.M. Smith, S. Meynell, A.C. Bleszynski Jayich, J. Meijer. Nanophotonics, **8** (11), 1889 (2019). DOI: 10.1515/nanoph-2019-0196

[12] Y. Li, H. Li, T. Yi, C. Li, J. Wei. Functional Diamond, **5** (1), 2567286 (2025). DOI: 10.1080/26941112.2025.2567286

[13] A. Abdelrahman, A. Zkria, T. Yoshitake. Int. Exch. Innov. Conf. Engin. Sci., **9**, 417 (2023). DOI: 10.5109/7158033

[14] V.M. Acosta, E. Bauch, M.P. Ledbetter, A. Waxman, L.S. Bouchard, D. Budker. Phys. Rev. Lett., 104, 070801 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.070801

[15] A. Jarmola, I. Fescenko, V.M. Acosta, M.W. Doherty, F.K. Fatemi, T. Ivanov, D. Budker, V.S. Malinovsky. Phys. Rev. Res., **2**, 023094 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.023094

[16] M.W. Doherty, V.V. Struzhkin, D.A. Simpson, L.P. McGuinness, Y. Meng, A. Stacey, T.J. Karle, R.J Hemley, N.B. Manson. Phys. Rev. Lett., **112** (4), 047601 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.047601
[17] J. Teissier, A. Barfuss, P. Appel, E. Neu-Ruffing, P. Maletinsky. Phys. Rev. Lett., **113** (2), 020503 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.020503
[18] P. Ovartchaiyapong, K.W. Lee, B.A. Myers, A.C. Bleszynski Jayich. Nature Comm., **5** (1), 4429 (2014). DOI: 10.1038/ncomms5429
[19] П.Г. Баранов, А.Я. Вуль, С.В. Кидалов, А.А. Солтамова, Ф.М. Шахов. Способ получения алмазной структуры с азотно-вакансионными дефектами. Патент РФ № 2448900, 27.04.2012.
[20] K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase, K.M. Itoh, E. Abe. Rev. Sci. Instr., **87**, 053904 (2016). DOI: 10.1063/1.4952418
[21] M.W. Doherty, V.M. Acosta, A. Jarmola, M.S.J. Barson, N.B. Manson, D. Budker, L.C.L. Hollenberg. Phys. Rev. B, **90**, 041201 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.041201
[22] E.L. Hahn. Phys. Rev., **80** (4), 580 (1950). DOI: 10.1103/PhysRev.80.580
[23] К.М. Салихов, А.Г. Семёнов, Ю.Д. Цветков. *Электронное спиновое эхо и его применение* (Наука, Новосибирск, 1976).
[24] Р.А. Бабунц, А. С. Гурин, А.П. Бундакова, М.В. Музафарова, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов. Письма в ЖТФ, **49** (1), 43(2023). DOI: 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. Tech. Phys. Lett., **49** (1), 40 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55346.19391].
[25] X. Chen, Ch. Qiu, Ya. Lu, G. Liu, D. Ruan, F. Zhang, G. Long. Phys. Rev. B, **108**, 174111 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevB.108.214514