09

Кросс-релаксация центров, связанных с азотом, в алмазе

© Д.Д. Крамущенко, А.С. Гурин, А.М. Скоморохов, В.В. Яковлева, М.В. Музафарова ¶, А.П. Бундакова, П.Г. Баранов, Р.А. Бабунц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в Редакция 4 сентября 2025 г.
В окончательной редакции 10 ноября 2025 г.
Принята к публикации 18 ноября 2025 г.

Исследованы кросс-релаксационные процессы между центрами замещающего азота (P1-центр), парами азота и отрицательно заряженными азотно-вакансионными (NV) центрами в синтетическом алмазе, выращенном при высоком давлении и высокой температуре (методом HPHT), а также их угловые зависимости от магнитного поля. По подробным экспериментальным угловым зависимостям и их расчетам впервые идентифицирована кросс-релаксация между парами азота и NV-центрами.

Ключевые слова: алмаз, NV-центр, антипересечение уровней, оптически детектируемый магнитный резонанс.

DOI: 10.61011/FTT.2025.11.62143.247-25

1. Введение

Алмаз, благодаря своим уникальным свойствам (высокая теплопроводность, большие показатель преломления и дисперсия, химическая стабильность, прозрачность в широком спектральном диапазоне, низкая диэлектрическая проницаемость и т.д.), перспективен для применения в качестве теплоотводящих пластин в СВЧ-транзисторах, мощных мультичиповых модулях и линейках полупроводниковых лазеров. Также он широко применяется для изготовления микроэлектромеханических систем, акустоэлектронных устройств (фильтров на поверхностных акустических волнах гигагерцового диапазона) и детекторов ионизирующего излучения. Но главным применением, которое привлекает многих исследователей, является использование алмазов в квантовой спинтронике [1].

Примеси в алмазе в значительной степени определяют физические (электрические и оптические) свойства кристаллов. Основной примесью в алмазах является азот, который может присутствовать в них как отдельная примесь замещения или в виде группы атомов.

Наибольший интерес представляет отрицательно заряженный азотно-вакансионный (NV) центр в алмазе, благодаря своим уникальным физическим свойствам. NV-центр является одним из многочисленных точечных дефектов в алмазе, который представляет собой нарушение строения кристаллической решётки, возникающий при удалении атома углерода из узла решётки и связывания образовавшейся вакансии с атомом азота [2]. Спиновые состояния одиночного локализованного электрона легко манипулируются светом, магнитным, электрическим и микроволновыми полями. Такие манипуляции возможны даже при комнатной температуре [3–6]. NV-центр имеет продолжительное время когерентности, достигающее нескольких миллисекунд. В настоящее время NV-центр может рассматриваться как базовый элемент будущего квантового компьютера [7–9]. Также, алмаз, содержащий NV-центры, является перспективным материалом для использования его в качестве источника одиночных фотонов и нового поколения магнитометров с наноразмерным разрешением [10–14].

2. Образцы и методика эксперимента

Были исследованы коммерческие монокристаллы синтетических алмазов, выращенные методом HPHT (high-pressure high-temperature growth) и имеющие размеры $\sim 3 \times 3 \times 1$ mm. В исследуемых образцах начальная концентрация азота составляла примерно 10 ppm. Затем монокристаллы были подвергнуты облучению электронами в реакторе с дозой $\sim 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-2}$ и последующему отжигу (~ 2 h) в вакууме при температуре 900 °C.

Эксперименты проводились с использованием электромагнита стандартного серийного спектрометра электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) JEOL JES-PE. Спектры зависимости интегральной фотолюминесценции (ФЛ) от магнитного поля регистрировались при комнатной температуре. Магнитное поле модулировалось с низкой частотой 80 Hz и амплитудой 2 G. В эксперименте использовался лазер с длиной волны 532 nm и мощностью 50 mW, который обеспечивал постоянное оптическое возбуждение. Для фокусировки лазерного излучения на образец использовался объектив с десятикратным увеличением, фокусным расстоянием $f = 40$ mm и числовой апертурой 0.55. ФЛ собиралась в диапазоне 650–800 nm, проходя через светофильтр OC13 и дихроичное зеркало, отсекающие лазерное излучение, и фокусировалась линзой на кремниевый полу-

проводниковый фотодетектор. Измерения проводились с использованием синхронного детектирования сигнала ФЛ с модуляций магнитного поля. При исследовании ориентационных зависимостей спектров образцы вращали в кристаллографической плоскости (110) для обеспечения возможности изучения свойств кристалла во всех главных высокосимметричных направлениях. Точность выставления ориентации образцов в приложенном магнитном поле вдоль оси $\langle 111 \rangle$ определялась по хорошо разрешенному спектру антипересечения уровней основного состояния NV-центра (GSLAC — ground state level anti-crossing).

3. Результаты и обсуждения

Исследуемые синтетические алмазы имели высокую концентрацию азота, который может присутствовать в алмазах в виде одиночных атомов, замещающих углерод (P1-центр), пар атомов или комплексов, состоящих из атома замещающего азота и рядом расположенной углеродной вакансии (NV-центр, W15) и т.п.

Спиновый гамильтониан, описывающий спектры P1-центра, имеет следующий вид [15]:

$$H = g\mu_{\mathrm{B}}\mathbf{B}\cdot\mathbf{S} + \mathbf{S}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{I},$$

где первое слагаемое описывает зеемановское взаимодействие в магнитном поле $\mathbf{B}$, μ_{B} — магнетон Бора, $S = 1/2$ — электронный спин центра $S = 1/2$, g — электронный g-фактор, равный 2.0024; второе слагаемое отражает сверхтонкое (СТ) взаимодействие в виде тензора $\mathbf{A}$ между неспаренным электроном и одним ядром азота ^{14}N (ядерный момент $I = 1$). Параметры СТ-структуры для P1-центра: $\mathbf{A}_{\parallel} = 114\,\mathrm{MHz}$, $\mathbf{A}_{\perp} = 82\,\mathrm{MHz}$.

Высокая концентрация азота в синтетических алмазах приводит к образованию центров, состоящих из пар атомов азота. В работе [16] наблюдался ряд сигналов ЭПР в синтетических алмазах, обогащенных азотом и выращенных в системе растворитель/катализатор Fe–Ni–C при температуре 1750 K и давлении 5.5 GPa методом температурного градиента. Наблюдаемые сигналы были приписаны трем центрам, связанным с парами атомов азота. Один из них — центр NOC4, расшифровывающийся как сотрудничество Новосибирска и Оксфорда (Novosibirsk Oxford Collaboration) — соответствовал суперпозиции всевозможно ориентированных пар атомов азота с расстоянием между ними больше, чем 0.7 nm. Этот центр описывается спиновым гамильтонианом следующего вида:

$$H = g\mu_{\mathrm{B}}\mathbf{B}\cdot\mathbf{S} + \mathbf{S}\cdot(\mathbf{A}_1\cdot\mathbf{I}_1 + \mathbf{A}_2\cdot\mathbf{I}_2),$$

где второе слагаемое отражает СТ взаимодействие в виде тензоров $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$, которые являются аксиально симметричными с главными значениями $\mathbf{A}_{\parallel} = 114\,\mathrm{MHz}$, $\mathbf{A}_{\perp} = 82\,\mathrm{MHz}$, $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = 1$, $S = 1/2$ и $g = 4.0085$.

Образованию NV-центров в синтетических алмазах способствует облучение электронами и последующий высокотемпературный отжиг. Схематическая структура NV-центра представлена на рис. 1, где магнитное поле $\mathbf{B} \parallel \langle 111 \rangle$. NV-центр в алмазе состоит из рядом расположенной пары атома азота (обозначен синим цветом), замещающего атом углерода (фиолетового цвета), и вакансии в решетке (оранжевого цвета). Нижний индекс в обозначении $\mathrm{NV_{on}}$ означает, что направление связи азот–вакансия коллинеарно магнитному полю, а все остальные возможные направления — $\mathrm{NV_{off}}$.

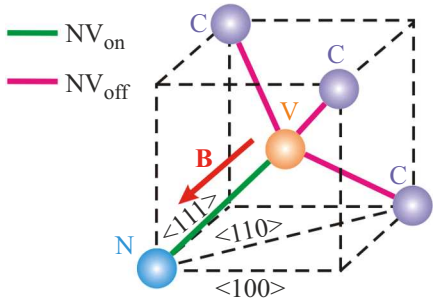

Рис. 1. Структура NV-центра в решетке алмаза.

NV-центр описывается следующим спиновым гамильтонианом:

$$H = g\mu_{\mathbf{B}}\mathbf{B}\cdot\mathbf{S} + D[\mathbf{S}_z^2 - \mathbf{S}(\mathbf{S}+1))/3] + E[\mathbf{S}_x^2 - \mathbf{S}_y^2],$$

где второй и третий члены описывают взаимодействие тонкой структуры, приводящее к расщеплению энергетических уровней в нулевом магнитном поле. Параметр тонкой структуры D учитывает z-осевой вклад кристаллического поля, а параметр E — неосевой части. Основным состоянием ($^3\mathrm{A}_2$) NV-центра является триплет ($S = 1$), и g-фактор азотно-вакансионного центра равен 2.0028.

В отсутствие внешнего магнитного поля уровни $m_{\mathrm{S}} = 0$ и $m_{\mathrm{S}} = \pm 1$ расщеплены на $D = 2874\,\mathrm{MHz}$. Центр имеет аксиальную локальную симметрию $\mathrm{C_{3v}}$, что приводит к тому, что поперечный параметр $E = 0\,\mathrm{MHz}$ и уровни $m_{\mathrm{S}} = \pm 1$ остаются вырожденными [2,17].

На рис. 2 показан цикл оптического возбуждения и излучения NV-центра, где ^{3}A и ^{3}E — основное и возбужденное триплетные состояния, а ^{1}A и ^{1}E — метастабильные состояния, межсистемные переходы в которые обозначены ISC (inter-system crossing). Разрешенные оптические переходы между основным и возбужденным состояниями показаны сплошными линиями, а безызлучательные переходы — пунктирными. Толщина стрелок условно показывает скорости перехода между различными состояниями. В зависимости от скорости перехода, система релаксирует или с излучением света, или безызлучательно с помощью перехода ISC в метастабильное состояние. Из-за различных скоростей перехода, сразу (менее чем через $1\,\mu\mathrm{s}$) после оптического возбуждения, распределение спиновой населенности приводит к тому, что уровень $m_{\mathrm{S}} = 0$ заселяется, а

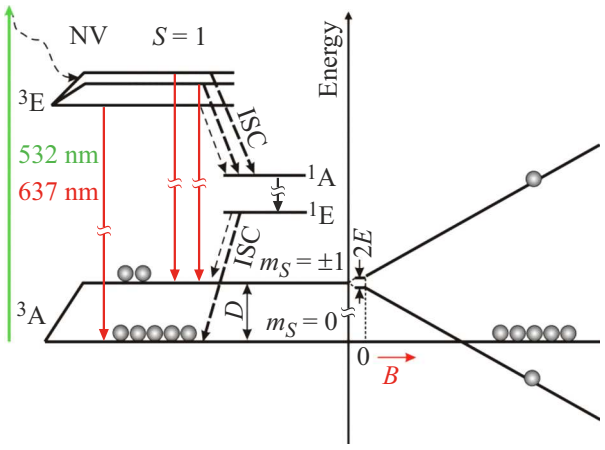

Рис. 2. Схема уровней NV-центра.

уровни $m_S = \pm 1$ остаются пустыми. Равновесное распределение условно показано на рис. 2 количеством шаров [18].

Оптическая инициализация и считывание позволяют использовать NV-центры в качестве эффективного инструмента для исследования соседних парамагнитных центров и их взаимодействий.

Под воздействием непрерывного оптического возбуждения NV-центров в алмазе происходит выстраивание спинов основного триплетного состояния NV-центра. Если вдоль одного из кристаллографических направлений $\langle 111 \rangle$ приложить определенное внешнее магнитное поле, то эти спины будут взаимодействовать с центрами с отличающейся спиновой температурой, и будет происходить резонансное изменение интенсивности ФЛ NV-центров. Это позволяет зарегистрировать линии кросс-релаксации (КР), которые вызваны резонансным обменом энергии между NV- и другими центрами [19].

На рис. 3, *a, c* и *e* представлены энергетические диаграммы для NV_{on}-, NV_{off}- и P1-центров при $\mathbf{B} \parallel \langle 111 \rangle$, рассчитанные с помощью компьютерной программы Грачева [20], которая основана на диагонализации матрицы спинового гамильтониана. Красными линиями обозначены энергетические уровни для NV-центров с $|m_S = +1\rangle$, голубыми — $|m_S = -1\rangle$, и черными — $|m_S = 0\rangle$. Сплошные линии соответствуют NV-центрам с осью симметрии, совпадающей с направлением магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \langle 111 \rangle$ (NV_{on}), пунктирные линии — трем другим NV-центрам, отклоненным на угол 109° (NV_{off}). На рис. 3, *e* серыми линиями обозначены энергетические уровни P1-центра. Следует отметить, что каждая из линий с $|m_S = 1/2\rangle$ расщепляется на несколько линий из-за СТ взаимодействия атома азота с ядрами ^{14}N.

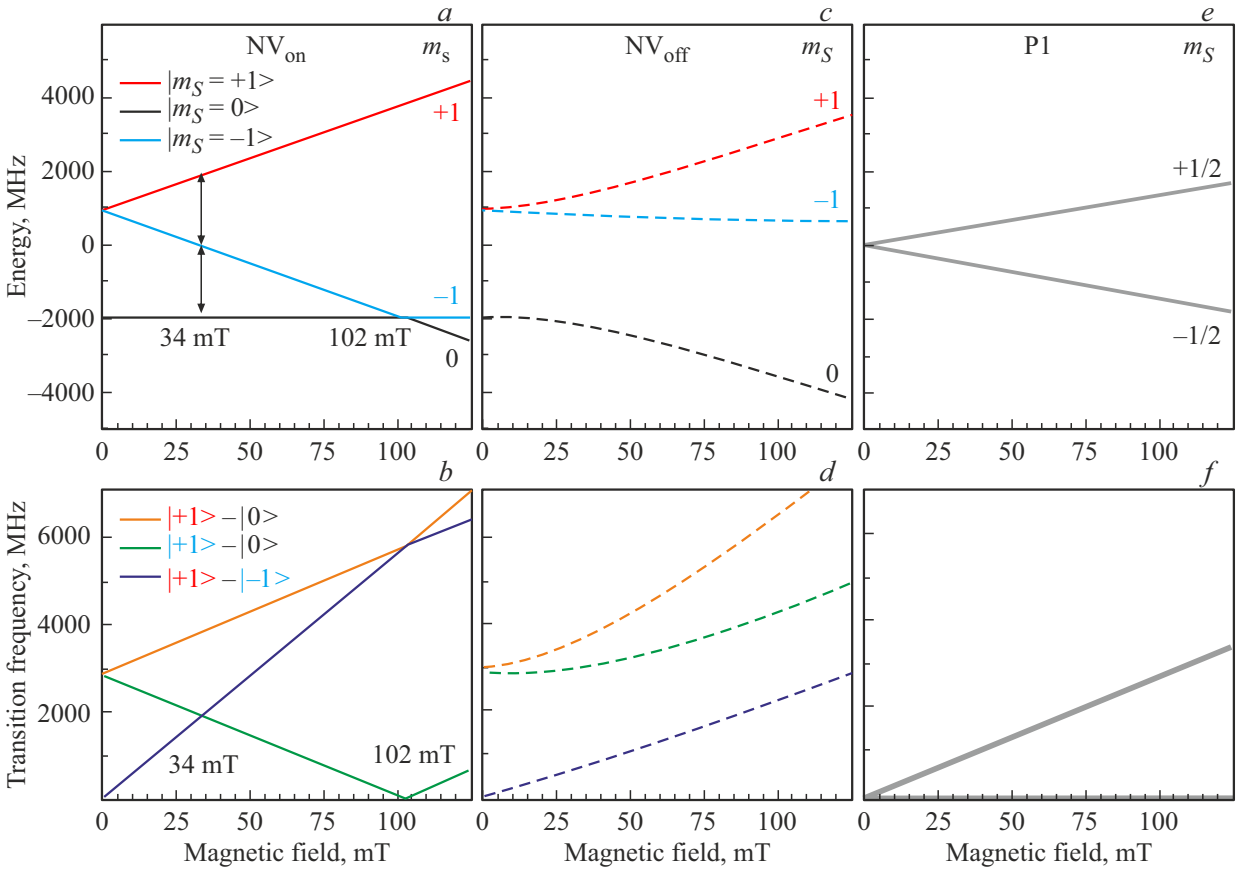

Рис. 3. *a, c* и *e*) Зависимость энергетических уровней от магнитного поля при $\mathbf{B} \parallel \langle 111 \rangle$ для NV- и P1-центров. *b, d* и *f*) Энергии переходов уровней NV- и P1-центров как функции магнитного поля при $\mathbf{B} \parallel \langle 111 \rangle$.

На рис. 3, *b, d* и *f* показаны энергии переходов (на рисунке обозначено „transition frequency“) как функция магнитного поля NV-центров (коллинеарных и неколлинеарных **B**), а также примесей со спином $S = 1/2$ (P1-центр), которые получаются вычитанием соответствующих уровней друг из друга ($|mS = -1\rangle - |m_S = 0\rangle$, $|m_S = +1\rangle - |m_S = -1\rangle$, $|m_S = +1\rangle - |m_S = 0\rangle$, $|m_S = +1/2, m_I = -1, 0, +1\rangle - |m_S = -1/2, m_I = -1, 0, +1\rangle$).

При совпадении энергий переходов NV-центра и других спиновых систем происходит КР. При магнитном поле 34 mT энергии переходов внутри центра NV_{on} $|m_S = -1\rangle - |m_S = 0\rangle$ и $|m_S = +1\rangle - |m_S = 0\rangle$ совпадают, что наглядно обозначено на рис. 3, *a* стрелками черного цвета и на рис. 3, *b* в виде точки пересечения линий энергий переходов.

При магнитном поле 102 mT наблюдается антипересечение уровней $|m_S = 0\rangle$ и $|m_S = -1\rangle$ для центра NV_{on}.

На рис. 4, *b* представлена интегральная зависимость фотолюминесценции от магнитного поля, зарегистрированная при комнатной температуре, модуляции магнитного поля 2 G, скорости развертки магнитного поля 60 G/min и лазерном возбуждении $\lambda = 532$ nm при магнитном поле, направленном вдоль одного из четырех эквивалентных направлений NV-центра ($\langle 111\rangle$). В низких магнитных полях наблюдался ряд сигналов. Часть из них хорошо объясняется пересечениями вышеописанных энергий перехода (рис. 3, *b, d* и *f*), одновременно нанесенными на рис. 4, *a*.

Группа линий около 51 mT, обозначенная красным цветом на рис. 4, *b*, возникает из-за КР процессов между NV-центром, сонаправленным магнитному полю **B**, и P1-центром. При магнитном поле 59 mT энергии переходов различно ориентированных NV-центров (коллинеарный и неколлинеарные магнитному полю) совпадают, и в этой точке происходит КР (на рис. 4, *b* сигнал обозначен голубым цветом) [21].

Группа сигналов (на рис. 4, *b* обозначены фиолетовым цветом), расположенных вблизи магнитного поля 102 mT, связана с антипересечением уровней основного состояния NV-центров [22,23]. Согласно [24,25], разрешенная структура спектра GSLAC обусловлена кросс-релаксационными процессами между NV- и P1-центрами.

На рис. 5, *a* представлена угловая зависимость GSLAC с шагом $\Delta\theta = 1°$. Следует отметить, что разрешение спектра антипересечения уровней основного состояния NV-центра зависит от ориентации алмаза. Из рисунка наглядно видно, что при ориентации $\theta = 53°$ не происходит пересечения энергий переходов между NV- и P1-центрами, при $\theta = 54°$ энергии переходов начинают пересекаться, и при $\mathbf{B} \parallel \langle 111\rangle$ происходит максимальное пересечение, при котором спектры GSLAC лучше всего разрешаются. Точность определения ориентации образца как раз и устанавливалась по хорошо разрешенной структуре спектра антипересечения уровней основного состояния NV-центра.

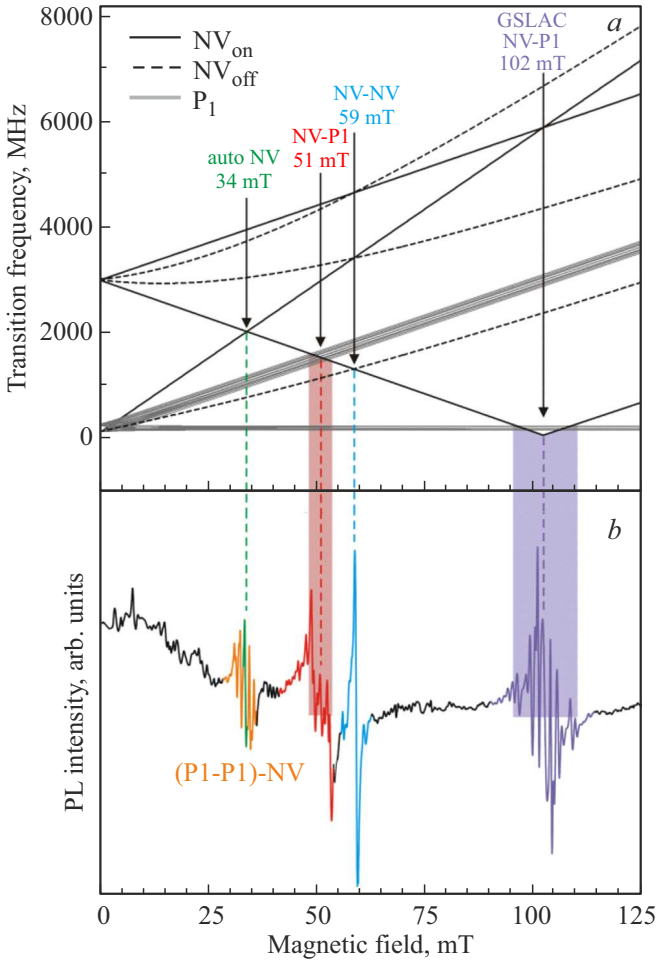

Рис. 4. *a*) Энергии переходов магнитных уровней NV- и P1-центров; *b*) спектр фотолюминесценции как функция магнитного поля при $\mathbf{B} \parallel \langle 111\rangle$.

Ряд сигналов КР, находящихся в магнитном поле около 34 mT, при ориентации магнитного поля вдоль кристаллографического направления $\langle 111\rangle$, наблюдался ранее в алмазах с высокой исходной концентрацией P1-центров, выращенных методом HPHT [26]. Авторы данной работы приписали всю группу сигналов автокроссингу NV-центров (autoNV), обусловленному взаимодействию с соседними спинами ^{13}C. Но наши расчеты, приведенные ниже, показали, что кроме autoNV (зеленая линия), существует ряд дополнительных сигналов, связанных с парами атомов азота (оранжевые линии), подробная энергетическая схема которых представлена на рис. 5, *b*. Следует отметить, что мы также провели расчеты уровней с учетом взаимодействия с ^{13}C, которые объяснили все линии малой интенсивности на рис. 5, *a*, но не стали их приводить, чтобы не усложнять рисунки.

Еще одним доказательством, что кроме автокроссинга NV-центров возникает КР между NOC4-NV, являются угловые зависимости фотолюминесценции от магнитного поля, зарегистрированные при комнатной темпера-

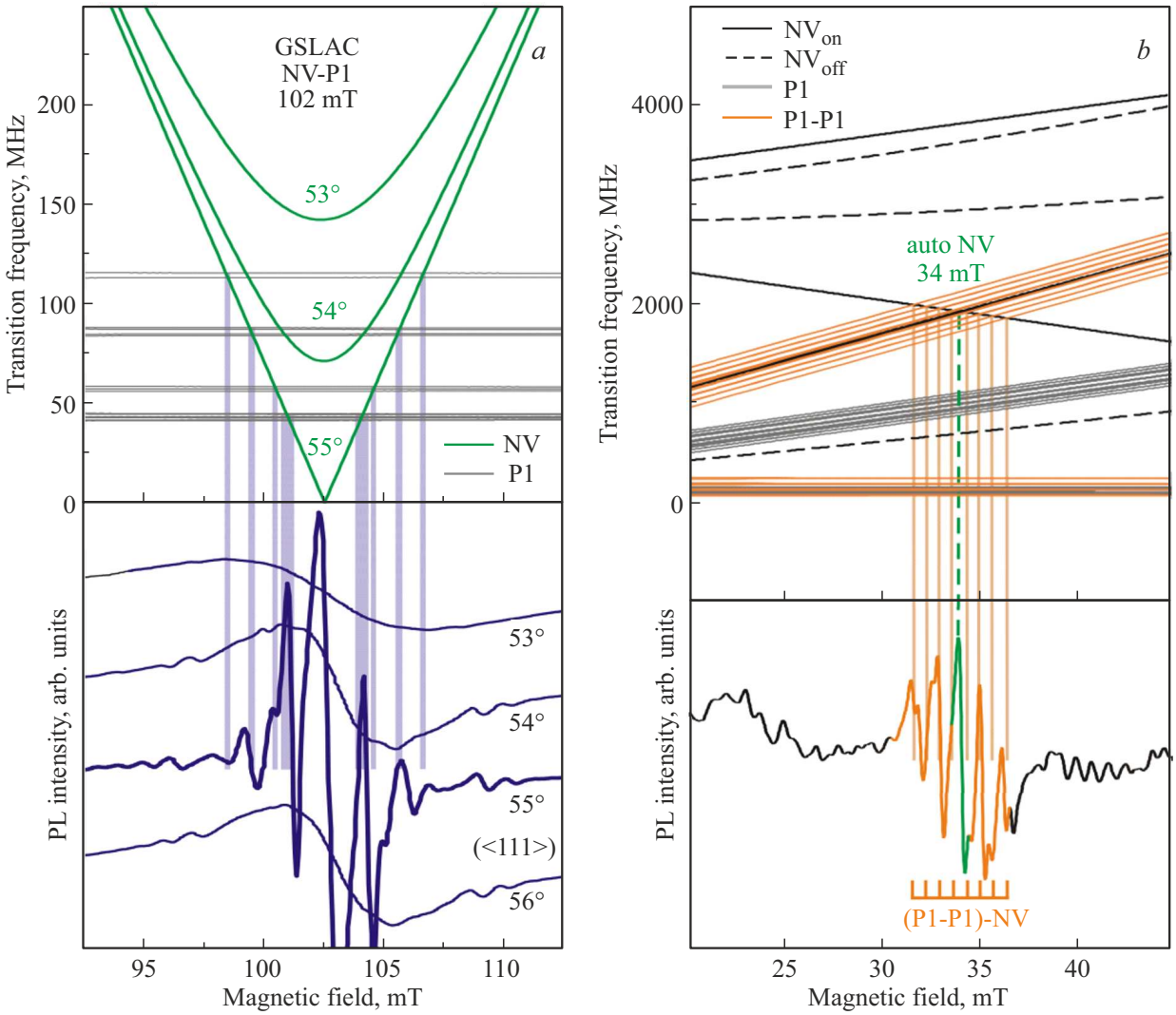

Рис. 5. а) Появление хорошо разрешенной структуры GSLAC. *b*) Расчет энергетических уровней КР для пар атомов азота (оранжевые линии), NV- (черные линии) и P1- (серые линии) центров при **B** ∥ ⟨111⟩.

туре, модуляции магнитного поля 2 G, приведенные на рис. 6, *a*.

На рис. 6, *b* точками обозначены экспериментальные положения сигналов КР, а линиями — расчетные угловые зависимости КР, которые были выполнены путем сравнения энергий перехода различно ориентированных NV-центров, P1 и пар атомов азота, с использованием приведенных выше параметров спинового гамильтониана для каждого из этих центров. Голубые и зеленые линии показывают расчетные угловые зависимости двух различно ориентированных NV-центров. На нижней правой вставке рис. 6, *a* представлены подробные экспериментальные угловые зависимости ФЛ от магнитного поля и расчетные линии КР между P1- и NV-центрами (красные линии). Оранжевые линии— расчетные угловые зависимости КР NOC4-NV-центров. Для упрощения расчета КР между NOC4- и NV-центрами мы не учитывали СТ-структуру пар атомов азота (широкая оранжевая полоса на рисунке условно показывает ряд линий, относящихся к КР NOC4-NV-центра с учетом СТ взаимодействия). На этих угловых зависимостях отчетливо видны три серии линий ФЛ, связанные с парами атомов азота, которые находятся в хорошем соответствии с нашими расчетами. Поэтому наши экспериментальные угловые зависимости КР и расчет показывают, что существует два типа сигналов на 34 mT, связанные с autoNV (зеленая линия) и парами атомов азота NOC4 (оранжевые линии), которые имеют различные угловые зависимости.

4. Заключение

Представлены спектры кросс-релаксации в синтетических алмазах, связанные с центрами азота, а также их угловые зависимости. Установлено, что в области магнитных полей 34 mT в дополнение к ранее интер-

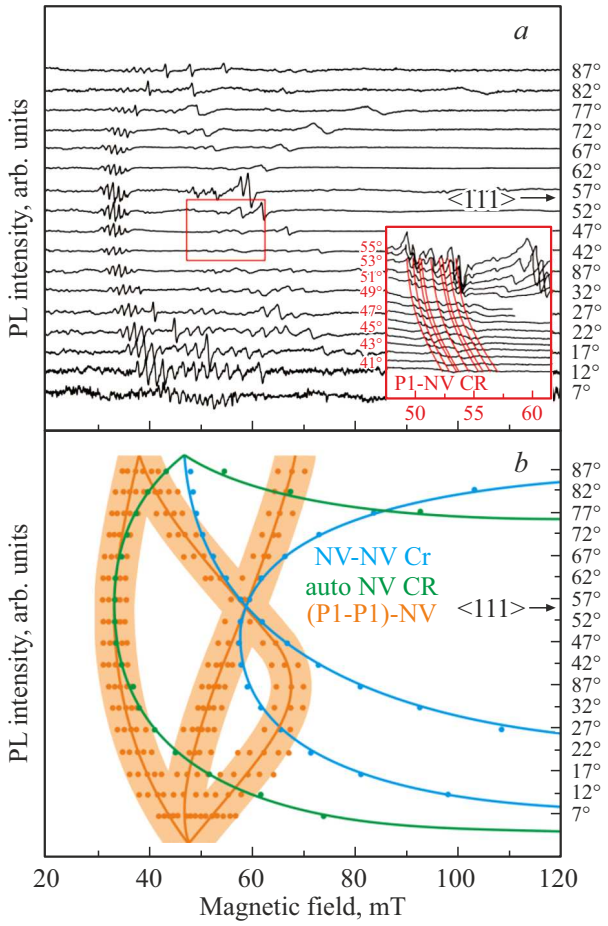

Рис. 6. *a*) Угловые зависимости спектров КР центров, связанных с азотом, в кристаллографической плоскости вращения (110). *b*) Экспериментальные данные показаны для автокроссинга NV-центров (линии зеленого цвета), КР между NV–NV-центром (линии выделены голубым цветом), NV и P1 (красного цвета) и между NV- и NOC4-центрами (оранжевого цвета). Здесь точки — это экспериментальные положения сигналов кросс-релаксации, а линии — расчетные угловые зависимости.

претированным сигналам КР, связанными с autoNV, существует КР между парами атомов азота (NOC4) и NV-центрами. Следует отметить, что в литературе до сих пор не встречались столь подробные угловые зависимости кросс-резонансов NV–P1- и NV–NV-центров, зарегистрированные в таком широком диапазоне углов; также, угловые зависимости кросс-релаксации между NOC4–NV-центрами представлены впервые.

Регистрация пар атомов азота методом кросс-резонанса может быть использована в квантовой магнитометрии. Важным преимуществом, по сравнению с магнетометрами, работающими на основе антипересечения уровней, является отсутствие необходимости прикладывания микроволнового излучения и точного ориентирования магнитного поля, а также использование более слабых магнитных полей.

Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FFUG-2024-0046).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D.D. Awschalom, R. Epstein, R. Hanson. Scientific American **297**, *4*, 84 (2007).
[2] J.H.N. Loubser, J.H. van Wyk. Rep. Prog. Phys. **41**, *8*, 1201 (1978).
[3] A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski. Sci. **276**, *5321*, 2012 (1997).
[4] F. Jelezko, I. Popa, A. Gruber, C. Tietz, J. Wrachtrup, A. Nizovtsev, S. Kilin. Appl. Phys. Lett. **81**, *12*, 2160 (2002).
[5] P. Nizovtsev, S.Ya. Kilin, F. Jelezko, I. Popa, A. Gruber, J. Wrachtrup. Phys. B: Condens. Matter **340–342**, 106 (2003).
[6] N. Bar-Gill, L.M. Pham, A. Jarmola, D. Budker, R.L. Walsworth. Nature Commun. **4**, *1*, 45 (2013).
[7] G. Popkin. Sci. **354**, *6316*, 1090 (2016).
[8] T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J.L. O'Brien. Nature **464**, *7285*, 45 (2010).
[9] K. Heshami, D.G. England, P.C. Humphreys, P.J. Bustard, V.M. Acosta, J. Nunn, B.J. Sussman. J. Modern Optics **63**, *20*, 2005 (2016).
[10] J.M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P.R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, M.D. Lukin. Nature Phys. **4**, *10*, 810 (2008).
[11] G. Balasubramanian, I.Y. Chan, R. Kolesov, M. AlHmoud, J. Tisler, C. Shin, C. Kim, A. Wojcik, P.R. Hemmer, A. Krueger, T. Hanke, A. Leitenstorfer, R. Bratschitsch, F. Jelezko, J. Wrachtrup. Nature **455**, *7213*, 648 (2008).
[12] J.R. Maze, P.L. Stanwix, J.S. Hodges, S. Hong, J.M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M.V. Gurudev Dutt, E. Togan, A.S. Zibrov, A. Yacoby, R.L. Walsworth, M.D. Lukin. Nature **455**, *7213*, 644 (2008).
[13] V.M. Acosta, E. Bauch, M.P. Ledbetter, C. Santori, K.-M.C. Fu, P.E. Barclay, R.G. Beausoleil, H. Linget, J.F. Roch, F. Treussart, S. Chemerisov, W. Gawlik, D. Budker. Phys. Rev. B **80**, *11*, 115202 (2009).
[14] K. Fang, V.M. Acosta, C. Santori, Z. Huang, K.M. Itoh, H. Watanabe, S. Shikata, R.G. Beausoleil. Phys. Rev. Lett. **110**, *13*, 130802 (2013).
[15] W.V. Smith, P.P. Sorokin, I.L. Gelles, G.J. Lasher. Phys. Rev. **115**, *6*, 1546 (1959).
[16] V.A. Nadolinny, A.P. Yelisseyev, J.M. Baker, D.J. Twitchen, M.E. Newton, A. Hofstaetter, B. Feigelson. Phys. Rev. B **60**, *8*, 5392 (1999).
[17] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L.C.L. Hollenberg. Phys. Rep. **528**, *1*, 1 (2013).
[18] M. Auzinsh, A. Berzins, D. Budker, L. Busaite, R. Ferber, F. Gahbauer, R. Lazda, A. Wickenbrock, H. Zheng. Phys. Rev. B **100**, *7*, 075204 (2019).
[19] M. Glasbeek. Appl. Magn. Reson. **7**, *4*, 479 (1994).
[20] В.Г. Грачев. ЖЭТФ **92**, *5*, 1834 (1987). [V.G. Grachev. JETP **65**, *5*, 1029 (1987).

[21] A. Jarmola, V.M. Acosta, K. Jensen, S. Chemerisov, D. Budker. Phys. Rev. Let. **108**, *19*, 197601 (2012).
[22] X.-F. He, N.B. Manson, P.T.H. Fisk. Phys. Rev. B **47**, *14*, 8809 (1993).
[23] L.J. Rogers, R.L. McMurtrie, M.J. Sellars, N.B. Manson. New J. Phys. **11**, *6*, 063007 (2009).
[24] A. Wickenbrock, H. Zheng, L. Bougas, N. Leefer, S. Afach, A. Jarmola, V.M. Acosta, D. Budker. Appl. Phys. Lett. **109**, *5*, 053505 (2016).
[25] V. Ivády, H. Zheng, A. Wickenbrock, L. Bougas, G. Chatzidrosos, K. Nakamura, H. Sumiya, T. Ohshima, J. Isoya, D. Budker, I.A. Abrikosov, A. Gali. Phys. Rev. B **103**, *3*, 035307 (2021).
[26] R. Wunderlich, R. Staacke, W. Knolle, B. Abel, J. Meijer. J. Appl. Phys. **130**, *12*, 124901 (2021).

Редактор Е.В. Толстякова