

УДК 537.635.666.233

ЭПР АЛМАЗА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ ИЗОТОПА УГЛЕРОДА ^{13}C .

Д. П. ЕРЧАК, В. А. МАРТИНОВИЧ, В. С. ВАРИЧЕНКО, Н. М. ПЕНИНА,
А. М. ЗАЙЦЕВ, М. С. КАМАРА (г. Минск)

Методом ЭПР исследованы в алмазе, синтезированном из изотопа углерода ^{13}C , при 300 К парамагнитный центр P1 (одиночный замещающий атом азота) и широкая ЭПР линия, связанная с обменными азотными донорными парами и комплексами из трех и более атомов азота, а при 80 К — парамагнитный центр W8. Подтверждена микроструктура центра W8, как включающего примесные атомы никеля. Делается вывод, что уширение линий центра P1 обуславливается неразрешенным ^{13}C сверхтонким взаимодействием. Различие в интенсивности, ширине и поведении при насыщении центральной и боковых компонент центра P1 объясняется возникновением дополнительной ЭПР линии, связанной с двухквантовыми переходами в обменных азотных парах.

Введение

Перспективы использования алмаза как рабочего материала для опто- и микроэлектроники уже неоднократно отмечались ранее в работах [1—3]. Было показано, что только ионно-лучевые методы позволяют контролируемым образом изменять электрофизические свойства алмаза и осуществлять основные технологические приемы при изготовлении активных электронных структур на его основе [4, 5]. Однако при разработке технологических процессов, связанных с алмазами, необходимо учитывать примесно-дефектный состав исходных алмазов. К настоящему времени уже известны основные типы дефектов в алмазе [1, 6, 7], но по-прежнему остается актуальной задача определения их структуры, установления их взаимовлияния. В связи с этим ЭПР представляется одним из основных методов для изучения дефектов кристаллической решетки в твердых телах. Возможность наблюдения сверхтонкой структуры позволяет предложить адекватную модель дефекта. Например, присутствие изотопа кремния ^{29}Si (ядерный спин $I=1/2$, содержание в кремнии 4,7 %) дает возможность установить микроструктуру большого числа дефектов, как собственных, так и включающих примесные атомы. Содержание изотопа ^{13}C в природных алмазах очень мало (1,1 %), что затрудняет наблюдение и исследование ^{13}C сверхтонкого взаимодействия (СТВ) структурных дефектов. Поэтому в настоящей работе был использован алмаз, синтезированный из изотопа углерода ^{13}C (в дальнейшем, для краткости — алмаз ^{13}C).

ЭПР исследования образца алмаза типа 1b, синтезированного в камере высокого давления из 99 % аморфного углерода ^{13}C , проведены на спектрометрах «Varian» и «Radiopan» при 80 и 300 К. Сигнал от ионов Cr^{3+} эталонного образца рубина, постоянно размещенного в измерительном резонаторе, был использован

для контроля добротности резонатора и для измерения относительной величины H_1 — компоненты СВЧ поля.

Экспериментальные результаты

ЭПР спектр синтетического алмаза типа 1b, наблюдаемый при комнатной температуре, приведен на рис. 1. Исследование угловой зависимости спектральных линий показало, что регистрируемый анизотропный спектр принадлежит к хорошо известному парамагнитному центру (ПЦ) P1 (т. е. одиночный атом азота, замещающий атом углерода в узле кристаллической решетки), впервые обнаруженному в образцах природного алмаза [8]. Видно, что ЭПР линии ПЦ P1 в исследуемом образце довольно широкие. Ширина линии ΔH низкочастотной компоненты, связанной со сверхтонким расщеплением ^{14}N (ядерный спин $I=1$), равна $14,7 \pm 0,5$ Гс. Следует отметить, что наблюдаемая ширина линии значительно превосходит ширину линий ПЦ P1 в природных и синтетических алмазах, содержащих только 1,1 % изотопа ^{13}C . Обычно ширина линий ПЦ P1 находится в пределах $0,035 \div 1$ Гс в природных алмазах [9] и около 8 Гс в синтетических [10]. В нашем случае ПЦ P1 был зарегистрирован на прямой фазе с модуляцией поля 100 кГц, тогда как обычно эти центры регистрируются в квадратуре. Это указывает на значительно меньшие времена парамагнитной релаксации в исследуемом образце.

Интересным установленным фактом является отсутствие равенства интенсивностей линий ^{14}N сверхтонкого расщепления ПЦ P1. Такое равенство соблюдается только для низкочастотной и высокочастотной компонент центра, тогда как интенсивность центральной компоненты значительно больше и имеет меньшую степень насыщения с уровнем мощности СВЧ поля (рис. 2). Что касается ширины центральной

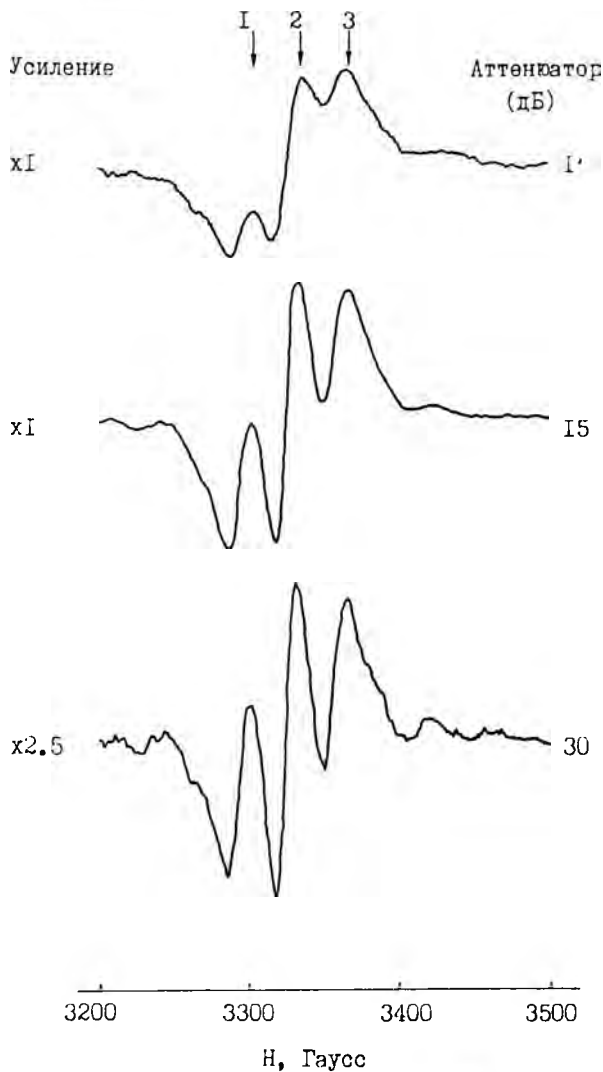


Рис. 1. Спектр ЭПР синтетического алмаза ^{13}C при различных уровнях мощности СВЧ поля при температуре 300 К. Внешнее магнитное поле параллельно направлению $\langle 100 \rangle$, $\gamma = 9318,46$ МГц, (1), (2), (3) — компоненты ПЦ П1.

компоненты, то она возрастает с уровнем мощности, тогда как ширина боковых линий остается неизменной (рис. 3). В спектре ЭПР (рис. 1) присутствует также дополнительная широкая линия с g-фактором, близким к g-фактору ПЦ П1, ($2,003 \pm 0,001$), и $\Delta H = 65$ Гс. Времена релаксации ПЦ, соответствующих данной линии, меньше, чем у ПЦ П1, что видно из сравнения кривых насыщения обоих центров. Впервые подобная линия ($g = 2,002$, $\Delta H = 28 \div 40$ Гс) была найдена в синтетических алмазах с высокой концентрацией ПЦ П1 [11, 12]. Появление этой линии объяснялось сильным обменным взаимодействием между атомами азота, ведущим к образованию обменных азотных пар и комплексов, состоящих из трех и более атомов.

Известно, что синтетические алмазы, выращенные с использованием ферромагнитных металлов (Ni, Co, Fe) в качестве катализаторов обычно имеют очень широкую резонансную линию поглощения с $g = 2,2 \div 2,5$ и $\Delta H = 2000 \div$

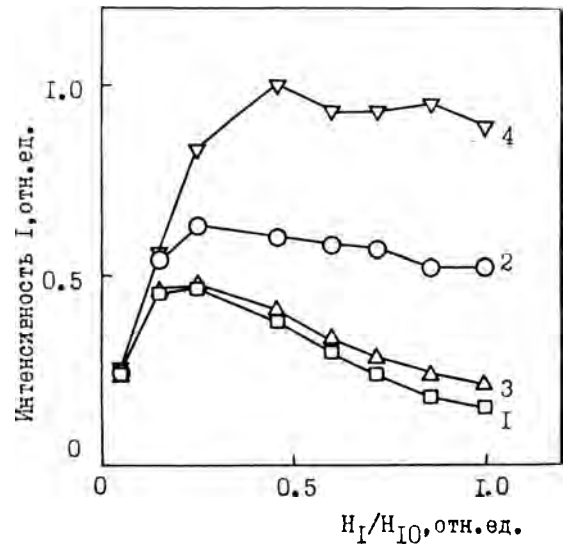


Рис. 2. Зависимость интенсивности I ЭПР линий ПЦ П1 (1), (2), (3) и широкой линии (4) от уровня СВЧ мощности. Кривые приведены к $H_1/H_{10} = 0,05$. H_1 — величина магнитной составляющей СВЧ поля, H_{10} — величина H_1 при ослаблении СВЧ поля 1 дБ; $T = 300$ К.

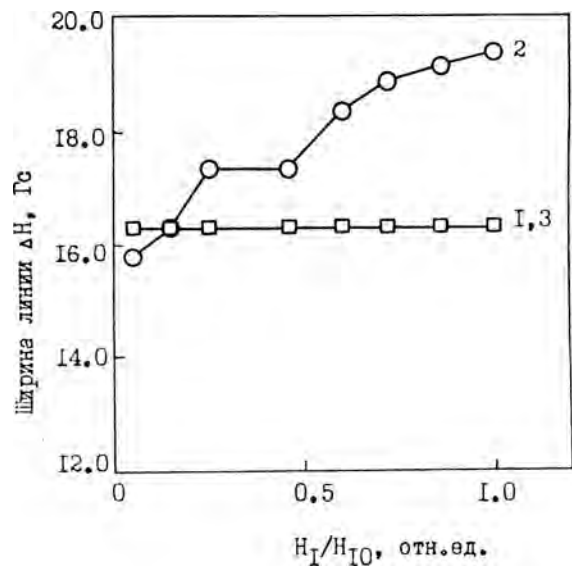


Рис. 3. Зависимость ширины ΔH линий П1 (1), (3) и (2) от уровня СВЧ мощности при $T = 300$ К.

$\div 3000$ Гс, обусловленную ферромагнитным резонансом на металлических включениях [13—15]. В спектрах исследуемого образца наблюдалось смещение нулевой линии во всей области сканирования магнитного поля до 10 000 Гс, что не регистрировалось в случае, когда образец в резонаторе не было. Такое смещение может быть обусловлено, вероятнее всего, магнитным резонансным поглощением на ферромагнитных включениях. Смещение нулевой линии не может быть связано с изменением добротности резонатора при сканировании магнитного поля, так как магнитосопротивление исследуемого образца алмаза при этом не меняется, что установлено по равенству интенсивностей сигнала от рубина в точках магнитного поля, близких к 1900 Гс и 5500 Гс при наличии образца в резонаторе и без него.

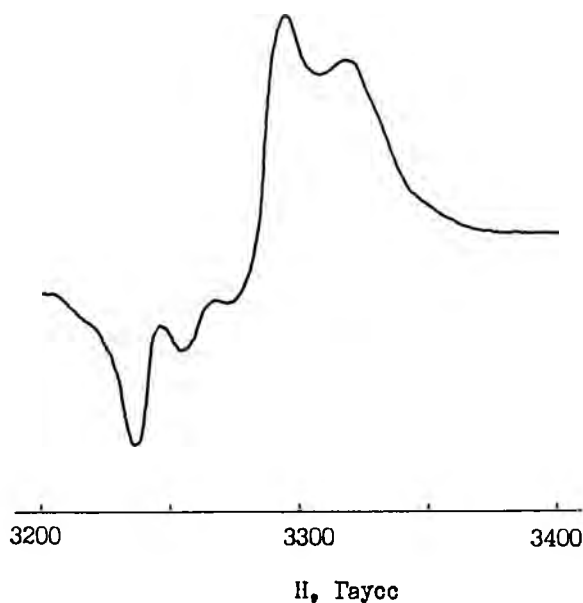


Рис. 4. Спектр ЭПР синтетического алмаза ^{13}C при $T=80$ К. Внешнее магнитное поле параллельно направлению $\langle 111 \rangle$, $\gamma=9208,21$ МГц.

При температуре 80 К в спектрах ЭПР наблюдалась дополнительная одиночная изотропная линия с $g=2,032 \pm 0,001$ и $\Delta H=7 \pm \pm 0,5$ Гс (рис. 4). Впервые эта линия была найдена авторами работы [16] и известна как W8 центр. Природа этого центра объясняется с различных позиций. В работах [16—18] ПЦ W8 связывают с ионами Ni. Существует другое мнение, что это межузельный атом углерода [19, 20] или поверхностный дефект [21]. Также при температуре 80 К исследована зависимость интенсивностей низкополевой I_1 и высокополевой I_2 компонент ПЦ P1 от уровня мощности (рис. 5). Рост отношения интенсивностей свидетельствует о кросс-релаксации между ПЦ P1 и W8. Это явление впервые было найдено на образцах поликристаллического синтетического алмаза [22].

Обсуждение результатов

Известно, что основной причиной уширения ЭПР линий ПЦ P1 является изотропное обменное взаимодействие между ПЦ с концентрацией атомов азота более, чем 10^{18} см^{-2} [23]. По мере возрастания концентрации от 4×10^{18} до 10^{19} см^{-2} ширина линии увеличивается от 3,68 Гс до 5,80 Гс. Концентрация ПЦ P1 в исследуемом образце равнялась $1,2 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$, и, следовательно, наблюдаемая ширина линий не может быть объяснена только таким механизмом уширения. В синтетических алмазах уширение может быть обусловлено также присутствием ферромагнитных включений, которые изменяют напряженность магнитного поля [10]. Однако, в данном случае наличием ферромагнитных включений нельзя объяснить величину 14,8 Гс при учете только атомов координационной сферы на расстоянии $r_i = d (= -d)$ В нашем слу-

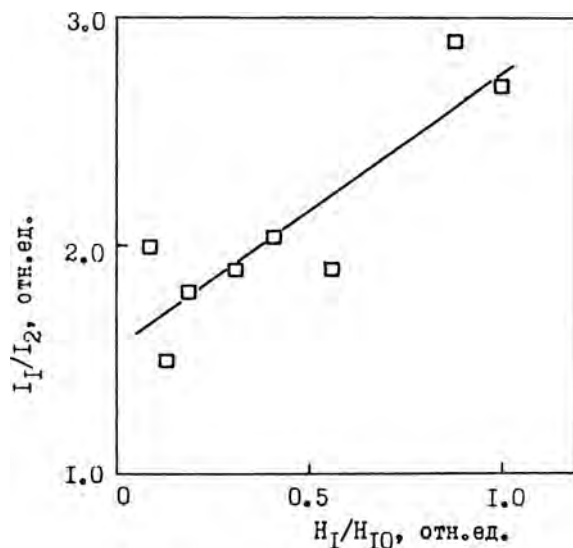


Рис. 5. Зависимость отношения интенсивностей низкополевой и высокополевой компонент ПЦ P1 I_1/I_2 от уровня мощности СВЧ поля при $T=80$ К.

чае содержание изотопа ^{13}C в образце 99 % следовательно, наблюдаемое уширение линии P1 центра обусловлено неразрешенным ^{13}C СТВ.

Отсутствие ^{13}C сверхтонкого расщепления одиночной линии ПЦ W8 свидетельствует в пользу того, что внутренние структурные дефекты (например, замещающие атомы углерода) не могут быть ответственными за данный центр. Поскольку значение ширины линии ПЦ W8 в исследованном образце близко к значению, наблюдаемому в образцах с обычным изотопным составом, это может означать, что волновая функция парамагнитного электрона локализована значительно сильнее, чем в случае ПЦ P1. И таким образом, становится ясным, что ЭПР линия W8 центра не может быть уширена за счет неразрешенного ^{13}C сверхтонкого взаимодействия, потому как парамагнитный электрон ПЦ W8 в значительной степени локализован на внутренней 3d оболочке атома никеля. Это хорошо согласуется с моделью ПЦ W8 как центров, состоящих из атомов никеля. Впервые ЭПР сигнал с g -фактором $2,0310 \pm 0,0005$ был обнаружен Лоубсером и Рейнвельдом в синтетическом поликристаллическом алмазе, выращенном из шихты, содержащей никель [16]. Было предположено, что наблюдаемый спектр обусловлен никелем Ni^+ с конфигурацией $3d^9$ и эффективным спином $S=1/2$ или Ni^- с конфигурацией $3d^9$ и связанной дыркой в валентной оболочке. Позже Самойлович и др. [18] наблюдали сверхтонкое расщепление на ядрах ^{61}Ni (ядерный спин $I=3/2$) в порошкообразных образцах синтетического алмаза с повышенным содержанием изотопа ^{61}Ni , что позволило им подтвердить и развить указанную выше модель этого центра. На основании более детального изучения данного центра, проведенного авторами работы [26], сделан вывод, что ЭПР сигнал с g -фактором 2,0319 соответствует центру Ni^- с эффективным спином $S=3/2$ и электронной конфигурацией $3d^7$.

Особенности кинетики параметров центральной компоненты наблюдаемого спектра (рис. 1) в зависимости от уровня мощности могут быть вызваны следующими причинами. Эта линия может быть рассмотрена как суперпозиция ^{14}N СТВ ПЦ Р1 и синглетной линии парамагнитного центра с таким же или близким значением g -фактора, но с более короткими временами парамагнитной релаксации. В работе [27] такие центры приписывались дислокациям. Однако, наблюдаемая концентрация этих ПЦ относительно велика, а, значит, в исследуемом образце, не подвергнувшись пластическим деформациям, такая концентрация дислокаций маловероятна. Кроме того, сравнение наших результатов с другими, приведенными, например, в работе [25], указывает на то, что существует корреляция между интенсивностью центральной линии и концентрацией атомов азота.

Другим возможным механизмом для объяснения более коротких времен релаксации центральной компоненты, может быть кросс-релаксация между ПЦ Р1 и широкой линией, связанной с азотными обменными парами и комплексами. В этом случае естественно ожидать, что эффективность кросс-релаксации центральной компоненты будет больше, чем боковых из-за большего перекрытия центральной линии с линией обменной пары. Однако, трудно объяснить возрастание ширины центральной линии по мере возрастания уровня мощности, тогда как при температуре 80 К такая зависимость ширины боковой линии, испытывающей кросс-релаксацию с ПЦ W8, не найдена (рис. 3).

Наблюдаемые особенности могут быть связаны с двухквантовыми переходами, вызванными обменными азотными парами, т. е. парами ПЦ Р1. Вычислим вероятность двухквантового перехода, исходя из преобразований, проделанных в работе [28]. Гамильтониан наблюдаемое уширение линий ПЦ Р1, так как резонансное поглощение в исследуемом образце довольно слабое, и он не обнаруживает магнитных свойств. В соответствии с работой [24] в этом случае ширина ЭПР линии не превышает 3 Гс.

Естественно предположить, что уширение компонента ^{14}N СТВ может быть обусловлено неразрешенным сверхтонким взаимодействием парамагнитного электрона с магнитными ядрами ^{13}C . Поэтому ширина линии вычисляется следующим образом:

$$\Delta H = 2\sqrt{M_2}, \quad (1)$$

$$\text{где } M_2 = 1/3 \cdot I(I+1) \sum n_i a_i^2 \quad (2)$$

— второй момент линии поглощения, I — ядерный спин изотопа ^{13}C , f — содержание изотопа в образце, n_i — количество ядер ^{13}C , которые локализованы на расстоянии r_i от примесного атома азота, a_i — изотропная постоянная сверхтонкого взаимодействия, которая может быть выражена:

$$a_i = 8\pi/3 \cdot \beta\beta_n g g_n |\psi(r_i)|^2 \quad (3)$$

где β и β_n — магнетон Бора и ядерный магнетон, соответственно; $\psi(r_i)$ — волновая функция парамагнитного электрона, которая выражается в следующем образом [25]:

$$\psi(r_i) = \sqrt{\frac{d^3}{\pi}} \eta e^{-2r_i/d}; \quad (\eta = \sqrt{44,3}, \quad 1/\alpha \approx 1,9\text{Å}) \quad (4)$$

Это уравнение хорошо описывает состояние парамагнитного электрона ПЦ Р1 в радиусе $r_i = \frac{\sqrt{8}}{4} d$ (d — постоянная решетки). Как было найдено из спектров угловой зависимости, только ЭПР линии ^{13}C СТВ, обусловленные атомами углерода, ближайшими в атомам азота могут быть разрешены. Следует ожидать, что взаимодействие с атомами углерода, локализованными на расстоянии $r_i \geq \frac{\sqrt{8}}{4} d$ приведет к уширению линии. Оценка ширины линии (1) — (4) дает взаимодействия может быть выражен следующим образом:

$$\hat{H} = \beta \hat{H}_g^{\uparrow\downarrow} (S_1 + S_2) + S_1 A I_1 + S_2 A I_2 + I (S_1 \cdot S_2) - \beta_n \hat{H}_g^{\uparrow\downarrow} (I_1 + I_2) \quad (5)$$

где A — параметр сверхтонкого взаимодействия, I — обменный интеграл, \hat{S} , \hat{I} — операторы спинов электронов и ядер соответственно. Уровень энергии одной из пары ПЦ Р1 — Р1 обозначим через (M_i, m_k) , где $M_i = +1/2, m_k = = 1, 0, -1$, т. е. $(-1/2, 1) = a, (-1/2, 0) = b, (-1/2, -1) = c$ и $(1/2, 1) = a', (1/2, 0) = b', (1/2, -1) = c'$. Предложим, что два Р1 центра первоначально находятся в состояниях a и c , соответственно. Такая система двух взаимодействующих центров поглощает квант энергии, переходя в (a', c) или (a, c') состояния. Азотная пара, поглощая другой квант энергии, может перейти в состояние (a', c') . Энергия кванта предположительно равна

$$E_q = \frac{E a' c' - E a c}{2} \quad (6)$$

где $E a' c'$, $E a c$ — энергии состояний (a', c') и (a, c) , соответственно.

Вероятность перехода выражается следующим образом:

$$P = \frac{2\pi}{\hbar} |K^2| \rho = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \frac{\langle a c 2q | H' | a' c' q \rangle \langle a' c q | H' | a' c' o \rangle}{E a' c - E a c - E q} + \frac{\langle a, c, 2q | H' | a, c' q \rangle \langle a, c', q | H' | a', c', o \rangle}{E a c' - E a c - E q} \right|^2 \quad (7)$$

Здесь $\langle a', c, q \rangle$ представляет собой волновую функцию промежуточного состояния. Если матричные элементы $\langle a, c, 2q | H' | a, a', q \rangle$, $\langle a, c, 2q | H' | c', c, q \rangle$ или $\langle a, c, 2q | H' | a, a', q \rangle$ имеют не запрещенные значения, то промежуточные состояния $\langle c, c', q \rangle$ и $\langle -a, a', q \rangle$ должны приниматься в расчет; ρ — число конечных состояний на единицу объема и на интервал энергии. В этом случае ρ , очевидно, пропорционально числу квантов и может быть выражено так:

$$\rho \sim \rho_q = \frac{E_\sigma^2 d \Omega}{(2\pi \hbar c)^3}, \quad (8)$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла.

Значения энергии $Ea'c$, Eac' , $Ea'c'$, Eac оценены при условии малости второго и третьего членов выражения гамильтониана взаимодействия (5). Таким образом, отношение матричных элементов переходов второго порядка к матричным элементам переходов первого порядка может быть вычислено:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{\gamma \hbar H_1}{A_{eff} - I^2} \quad (9)$$

где H_1 — амплитуда приложенного электромагнитного излучения; γ — гиромагнитное отношение.

Как показано в работе [28], вероятность двухквантового перехода может быть очень большой в силу близости значения A_{eff} и I . В общем случае, значение I может меняться от 0 до максимального. Таким образом, вероятность перехода выражается следующим образом:

$$P = \frac{2\pi}{\hbar} \int_0^{\infty} |k^2| \rho(h(I)) dI \quad (10)$$

где $h(I)$ — функция распределения. Если $h(I)$ имеет значительную величину при $I = A_{eff} \pm \pm 10$ Гс, уравнение (10) дает большую вероятность для двухквантового перехода.

В соответствии с вычислениями, проделанными в работе [28], значению I обменного интеграла порядка A_{eff} соответствует расстояние — 20 Å между взаимодействующими атомами азота.

Следует отметить, что кроме линии, локализованной в середине между левой и правой компонентами P1 центра, соответствующей двухквантовому переходу, также должны существовать линии, соответствующие двухквантовым переходам, в середине между центральной и боковыми компонентами. Однако, они не были найдены. Это может быть вызвано малой концентрацией обменных пар, соответствующих $I \sim \sim A_{eff}/2$.

Возрастание ширины линии при увеличении уровня мощности может быть объяснено умень-

шением времени жизни такой системы в промежуточном состоянии.

Заключение

При комнатной температуре в исследованном образце алмаза, синтезированного из изотопа углерода ^{13}C , наблюдались ПЦ P1 и широкая ЭПР линия с g -фактором $2,003 \pm 0,001$ и $\Delta H = 65$ Гс, связанная с обменными азотными донорными парами и комплексами из 3-х и более атомов азота.

При температуре жидкого азота, помимо вышеуказанных, наблюдался парамагнитный центр W8 и кросс-релаксация между ПЦ P1 и W8. Сравнение ЭПР характеристик ПЦ W8 в данном образце и в образцах алмаза с обычным изотопным составом позволило подтвердить микроструктуру ПЦ W8, как связанного с примесными атомами никеля.

Показано, что главным механизмом уширения линий ПЦ P1 является неразрешенное ^{13}C СТВ.

Было найдено различие в интенсивности, ширине и поведении при насыщении центральной и боковых линий наблюдаемого спектра ПЦ P1. Это различие может быть объяснено возникновением дополнительной ЭПР линии, связанной с двухквантовыми переходами в обменных азотных парах с величиной обменного интеграла I , близкой к величине A_{eff} сверхтонкого расщепления.

Summary

EPR studies of nitrogen nickel paramagnetic centers in diamond synthesised from 99 % carbon ^{13}C have carried out at 80 and 300 K. It was shown that the unresolved ^{13}C HFI is main origin of the PC P1 line broadening. The microstructure of the PC W8 as associated with nickel impurity atoms was confirmed. The difference of the intensity, linewidth and saturation behaviour of central and lateral components of the PC P1 was explained by the appearance of the additional EPR line associated with EPR double quantum transitions in exchange coupled nitrogen pairs.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В. С., Гиппиус А. А., Конорова Е. А. Электронные и оптические процессы в алмазе. — М.: Наука, 1985. — 120 с.
2. Баженов В. К., Викулин И. М., Гонтарь А. Г. Синтетические алмазы в электронике // ФТП — 1985. — Т. 19. — № 8. — С. 1345—1365.
3. Зайцев А. М., Гиппиус А. А., Вавилов В. С. Люминесценция азотсодержащих примесно-дефектных комплексов в ионно-имплантированных слоях природного алмаза // ФТП — 1982. — Т. 16. — В. 3. — С. 397—403.
4. Denisenko A. V., Melnikov A. A., Zaitsev A. M., Kurganskii V. I., Shilov A. J., Gorban Ju, P., Varichenko V. S. p-Type semiconducting structures in diamond implanted with boron ions // Materials Science and Engineering — 1992. — V. B. 11. — P. 273—277.
5. Моряков О. С., Квасков В. Б., Горбачев В. В., Зезин Р. Б., Храброва Т. В. Природные алмазы в полупроводниковой электронике // Обзоры по ЭТ. — Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1987. — В. 4. (1342).
6. Гиппиус А. А., Зайцев А. М., Вавилов В. С. Образование, отжиг и взаимодействие дефектов в ионно-имплантированных слоях природного алмаза // ФТП — 1982. — Т. 16. — В. 3. — С. 404—411.
7. Loubser J. H. N., van Wyk J. A. Electron spin resonance in the study of diamond // Rep. Prog. Phys. — 1978. — V. 41. — P. 1201—1248.

8. *Smith W. V., Sorokin P. P., Gelles I. L., Lasher G. J.* Electron — Spin Resonance of Nitrogen Donors in Diamond // *Phys. Rev.* — 1959. — V. 115. — N 6. — P. 1546—1552.
9. *Barklie R. C., Guven J. J.* ^{13}C hyperfine structure and relaxation times of the P1 center in diamond // *J. Phys. C.: Solid State Phys.* — 1981. — V. 14. — P. 3621—3631.
10. *Dyer H. B., Raal F. A., Du Preez L., Loubser J. H. N.* Optical absorption features associated with paramagnetic nitrogen in diamond // *Phil. — Mag.* — 1965. — V. 11. — N 5. — P. 703—711.
11. *Соболев Е. В., Самсоненко Н. Д., Бокий Г. В.* О некоторых особенностях спектров ЭПР алмазов // *ЖСХ* — 1965. — № 6. — С. 460—461.
12. *Faulkner E. A., Whippey P. W., Newman R. C.* Electron spin resonance in diamond coat // *Phil. Mag.* — 1965. — V. 12. — N 116. — P. 413—414.
13. *Haggins C. V., Cannon P.* Diamonds containing controllable impurity concentrations // *Nature* — 1962. — V. 194. — N 4831. — P. 829—830.
14. *Smith M. J. A., Angel B. P.* Some Electron Spin Resonance Properties of Heat Treated Synthetic Diamond // *Phil. Mag.* — 1967. — V. 15. — N 136. — P. 783—796.
15. *Шульман Л. А., Подзярей Г. А., Начальная Т. А.* Ферромагнитный резонанс (ФМР) на металлических включениях в синтетических алмазах // *Синтет. алмазы* — 1973. — № 1. — С. 15—19.
16. *Loubser J. H. N., van Byneveld W. P.* Electron Spin Resonance of Nickel in Synthetic Diamonds // *Nature* — 1966. — V. 211. — N 5048. — P. 517.
17. *Безруков Г. Н., Бутузов В. П., Самойлович М. И.* Синтетический алмаз. — М.: Недра, 1976. — 118 с.
18. *Самойлович М. И., Бутузов В. П., Безруков Г. Н.* Электронный парамагнитный резонанс никеля в синтетическом алмазе // *Письма в ЖЭТФ* — 1971. — № 14. — С. 551—553.
19. *Браташевский Ю. А., Литвин Ю. А., Самсоненко Н. Д., Соболев Е. В.* Электронный парамагнитный резонанс на дефектах решетки в синтетических алмазах // *Изв. АН БССР, Георг. мат.* — 1970. — Т. 6. — № 2. — С. 368—369.
20. *Браташевский Ю. А., Буханько Ф. Н., Самсоненко Н. Д., Шапиро О. З.* Динамический эффект Яна-Теллера на дефектах в порошках синтетических алмазов // *ФТТ* — 1971. — Т. 13. — С. 2154—2156.
21. *Loubser J. H. N.* ESR studies of diamond powders // *Solid State Commun.* — 1977. — V. 22. — N 12. — P. 767—770.
22. *Шульман Л. А., Подзярей Г. А.* Кросс-релаксация в спектрах ЭПР синтетических алмазов // *ФТТ* — 1974. — Т. 16. — № 7. — С. 2112—2114.
23. *Шульман Л. А., Подзярей Г. А.* Обменное уширение сверхтонких компонент спектра ЭПР азота в алмазе // *ФТТ* — 1972. — Т. 14. — № 6. — С. 1770—1776.
24. *Подзярей Г. А., Зарицкий И. М.* О влиянии ферромагнитных примесей на спектр ЭПР в синтетических алмазах // *ТЭХ* — 1968. — Т. 14. — № 2. — С. 281—283.
25. *Шульман Л. А., Зарицкий И. М., Тихоненко К. А.* Обменные пары примесных атомов азота в алмазе // *ФТТ* — 1967. — Т. 9. — № 7. — С. 1964—1968.
26. *Isoya J., Kanda H., Norris J. R., Tang J., Bowman M. K.* Fourier-transform and continuous-wave EPR studies of nickel in synthetic diamond: Site and spin multiplicity // *Phys. Rev. B.* — V. 41. — N 7. — P. 3905—3913.
27. *Самсоненко Н. Д., Бокий Г. В., Шульга И. А., Тимченко В. И.* О природе изменения электрических и оптических свойств природных алмазов // *ДАН СССР* — 1974. — Т. 218. — № 6. — С. 1336—1339.
28. *Katayama M.* Double Quantum Transition in Electron Spin Resonance of Gamma-Irradiated Acetyl-d, l-Alanine // *Phys. Rev.* — 1962. — V. 126. — N 4. — P. 1440—1442.

Белорусский государственный университет.
Поступила в редакцию 11.12.93 г.