

О. Н. ПОКЛОНСКАЯ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ CVD-АЛМАЗОВ: СОСТОЯНИЕ СПИНОВОГО СТЕКЛА

Представлены результаты исследования парамагнетизма, обусловленного большой концентрацией локализованных некомпенсированных магнитных моментов электронов в поликристаллических пластинках CVD-алмаза. Методом электронного спинового, или парамагнитного, резонанса (ЭСР, или ЭПР) зарегистрировано состояние спинового стекла радиационных дефектов в тонких пластинках CVD-алмаза, облученных нейтронами флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ в атомном реакторе. Впервые обнаружено флуктуационное изменение величины g -фактора линии ЭСР от ориентации пластинки алмаза относительно постоянного магнитного поля, величины мощности СВЧ-излучения, а также последовательности измерений. Показано, что это обусловлено формированием состояния спинового стекла (антиферромагнитного упорядочения спинов электронов) в пластинках при лабораторных условиях. Перспективы технических применений данных результатов связаны с обнаруженной возможностью создания на основе синтетических алмазов аморфных магнетиков. Результаты работы могут быть использованы для контроля качества синтетических алмазов и прогнозирования их парамагнитных свойств при облучении реакторными нейтронами.

Ключевые слова: синтетические поликристаллические пластинки алмаза; электронный спиновый (парамагнитный) резонанс; реакторные нейтроны; спиновое стекло.

The results of the study of paramagnetism (caused by the high concentration of localized non-compensated magnetic moments of electrons) in polycrystalline CVD diamonds are presented. The state of spin glass of irradiation-induced defects is detected by electron spin (or paramagnetic) resonance method (ESR or EPR) in thin plates of CVD diamond irradiated in a nuclear reactor with neutrons with fluence $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. A fluctuating change in g -factor of ESR line with respect to the diamond plate orientation relative to the constant magnetic field, to the microwave power, and to the sequence of measurements is observed for the first time. It is shown that this occurs due to the formation of a spin glass (antiferromagnetic ordering of electron spins) in CVD diamond plates under laboratory conditions. Perspectives of practical applications of the results are related to the possibility of creation of amorphous magnets based on synthetic diamond. The results can be applied to the control of the quality of synthetic diamonds and to the prediction of their paramagnetic properties under reactor neutron irradiation.

Key words: synthetic polycrystalline diamond plates; electron spin (paramagnetic) resonance; nuclear reactor neutrons; spin glass.

Исследование парамагнетизма синтетических алмазов, обусловленного большой концентрацией локализованных некомпенсированных магнитных моментов электронов, актуально для полупроводниковой магнитоэлектроники [1]. Научная и практическая значимость таких исследований заключается в обосновании возможности придания алмазам магнитной активности посредством воздействия на них ионизирующим излучением, создающим радиационные дефекты. Важно, что точечные радиационные дефекты и их ассоциаты можно равномерно (однородно) ввести ионизирующим излучением в алмаз в значительной концентрации, превышающей концентрацию атомов примесей [2, 3]. Поиски способов придания магнитной активности синтетическим алмазам актуальны также для приложений, в частности для создания на основе таких алмазов аморфных магнетиков [4, 5].

Цель работы – исследовать электронный спиновый, или парамагнитный, резонанс (ЭСР, или ЭПР) поликристаллических пластинок CVD (chemical vapor deposition) алмазов, содержащих большую концентрацию радиационных дефектов – радикалов (некомпенсированных магнитных моментов, или спинов электронов), созданных при облучении их в атомном реакторе.

Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследовались три свободные поликристаллические пластинки CVD-алмаза, выращенные в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва. (Технология получения CVD-алмаза такого типа представлена в [6].) Толщина каждой пластинки составляла 0,4 мм, площадь – $5 \times 2 \text{ мм}^2$, типичные размеры зерен (кристаллитов) на ростовой поверхности – от 80 до 100 мкм. Размер кристаллитов на нуклеативной поверхности (границе с кремниевой подложкой) существенно меньше, чем на ростовой поверхности, т. е. контактирующей со смесью метана с водородом. Пластинки алмаза содержали азот в концентрации $\approx 1,7 \text{ ppm}$ и водород в концентрации $\approx 80 \text{ ppm}$ (здесь $1 \text{ ppm} = 1,76 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для концентрации атомов углерода в алмазе $1,76 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$). Две пластинки (#1 и #2) облучались порознь быстрыми нейтронами двумя флюенсами: $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (средняя кинетическая энергия нейтрона $> 0,1 \text{ МэВ}$, интенсивность потока $\approx 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) при температуре $325 \pm 10 \text{ К}$. (Методика облучения CVD-алмазов реакторными нейтронами описана в [7].) Одна пластинка была выбрана в качестве исходной (образец #3).

Регистрация ЭСР образцов проводилась на радиоспектрометре RadioPan SE/X-2543 с резонатором H_{102} в X -диапазоне по стандартной методике [8–10] при комнатной температуре, в темноте, на воздухе. Максимальная мощность сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения – 70 мВт. Постоянное магнитное поле, поляризующее электронные спины, модулировалось с частотой 100 кГц и амплитудой до 0,1 мТл. В спектрометре частота клистрона (генератора СВЧ) автоматически стабилизировалась по частоте H_{102} -резонатора с образцом и регистрировалась частотомером ЧЗ-54 с при-

ставкой ЯЗЧ-46. Скорость сканирования индукции B постоянного магнитного поля при регистрации синфазного с модуляцией сигнала ЭСР не превышала 10 мТл/мин. Для контроля добротности резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ-излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке H_{102} -резонатора. Чувствительность ЭСР-спектрометра $\approx 3 \cdot 10^{12}$ спин/мТл. Образцы приклеивались клеем, не дающим сигнал ЭСР, к кварцевому держателю и помещались в пучность магнитной компоненты СВЧ-поля в центре резонатора.

Величина g -фактора (фактора спектроскопического расщепления [11]) по данным ЭСР определяется из формулы [8, 12, 13]

$$g = \frac{\hbar \omega_r}{\mu_B B_r}, \quad (1)$$

где $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка, $\omega_r/2\pi = f_r$ – частота СВЧ-излучения, μ_B – магнетон Бора, B_r – резонансное значение индукции внешнего однородного постоянного магнитного поля, создаваемого между полюсными наконечниками электромагнита.

Относительная среднеквадратичная ошибка $\overline{\delta g}/g$ при расчете по формуле (1) величины g -фактора (см., например, [14]):

$$\left(\frac{\overline{\delta g}}{g}\right)_{\text{det}}^2 = \left(\frac{\overline{\delta \hbar}}{\hbar}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\delta \omega_r}}{\omega_r}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\delta \mu_B}}{\mu_B}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\delta B_r}}{B_r}\right)^2, \quad (2)$$

где согласно [15] $\overline{\delta \hbar}/\hbar = 5 \cdot 10^{-8}$, $\overline{\delta \mu_B}/\mu_B = 2,5 \cdot 10^{-8}$. Из спецификации используемых в спектрометре ЭСР частотомера и датчика магнитного поля (на основе протонного магнитного резонанса) имеем $\overline{\delta \omega_r}/\omega_r \approx 1 \cdot 10^{-5}$, $\overline{\delta B_r}/B_r \approx 1 \cdot 10^{-5}$. С учетом этих значений рассчитанная по (2) погрешность измерений g -фактора

$$(\overline{\delta g}/g)_{\text{det}} \approx 1,4 \cdot 10^{-5}. \quad (3)$$

Экспериментальная погрешность используемого радиоспектрометра, протестированная на классических спин-метках (дифенилпикрилгидразил, кристалл рубина и др.), в лабораторных условиях регистрации сигнала ЭСР оказалась равной $(\overline{\delta g}/g)_{\text{exp}} \approx 2 (\overline{\delta g}/g)_{\text{det}} \approx 3 \cdot 10^{-5}$.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Образец #1. Спектр ЭСР пластинки поликристаллического CVD-алмаза, облученной нейтронами флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$, содержит две новые изотропные линии резонансного поглощения (частично с примесью сигнала дисперсии): низкополевую ($g_l \approx 2,7$) и высокополевую ($g_h \approx 1,7$) (рис. 1). Центральная линия ($g = 2,0025$) наряду с линиями от P1-центров (атомов азота в C-форме) проявлялась в ЭСР исходной (необлученной) пластинки, однако и амплитуда, и ширина линии были в десятки раз меньше, чем эти же параметры в облученной нейтронами пластинке. Центральная линия спектра ЭСР имеет ширину $\Delta B = 3,3$ мТл (от пика до пика), что в несколько раз больше ширины линии, обусловленной уединенными оборванными C–C-связями в алмазе (см., например, [16, 17]). Такие сигналы ЭСР скорее характерны для скоплений ферромагнитных атомов (Fe, Co) в алмазе, но исследуемые CVD-алмазы таких примесей не содержат. Заметим, что величина g -фактора электрона обусловлена в основном его спиновым магнитным моментом [11], однако в измеряемой величине g -фактора проявляются и локальные магнитные поля в его окружении [18].

Регистрируемые спектры ЭСР двух спутников ($g_l \approx 2,7$, $g_h \approx 1,7$) центральной линии рассмотрим с учетом того обстоятельства, что при облучении реакторными нейтронами образуются области с повышенной локальной концентрацией радикалов (нескомпенсированных спинов электронов) внутри кристаллитов и/или модифицируются границы раздела между кристаллитами. Эту частично разупорядоченную область (очаг аморфного углерода), следуя работе [19], условно назовем *ферроном* в диамагнитной алмазной матрице [20]. Предположим далее, что каждый феррон обладает частичным магнитным упорядочением (ферромагнитного или антиферромагнитного типа) с эффективной магнитной проницаемостью μ_r . Заметим, что феррон наряду с радиационными дефектами может содержать

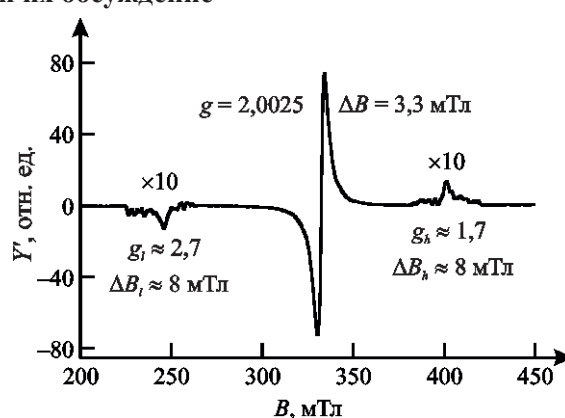


Рис. 1. Зависимость интенсивности Y' синфазного сигнала ЭСР поликристаллического CVD-алмаза, облученного быстрыми нейтронами (флюенс $3 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$), от индукции B внешнего постоянного магнитного поля (образец #1): время регистрации сигнала – 4 мин, мощность СВЧ-излучения – 56 мВт в резонаторе типа H_{102}

технологические примеси (атомы водорода и азота), т. е. нескомпенсированные магнитные моменты электронов с различными временами парамагнитной релаксации. Полагаем, что ферроны являются уединенными агрегатами, и их магнитное взаимодействие незначительно. Ясно, что внутри феррона, на его внешней поверхности и вдали от него расположены нескомпенсированные спины электронов с приблизительно одинаковыми g -факторами ($g \approx 2,0027$), характерными и для многих других углеродных материалов (см., например, [4, 18]).

Следуя схеме учета проявления в сигнале ЭСР размагничивающего магнитного поля [21], можно оценить, какие эффективные величины g -факторов будут иметь одни и те же радикалы внутри феррона, на его внешней поверхности, а также вдали от феррона. Это дает (см. детали расчета в [22]) магнитную проницаемость феррона $\mu_f \approx 1,6$ при факторе размагничивания $N \approx 0,31$ для двух линий ЭСР ($g_f \approx 2,7$, $g_h \approx 1,7$). Таким образом, размагничивающий фактор феррона N близок к размагничивающему фактору шара ($N = 1/3$; см., например, [13]). Это обстоятельство может служить косвенным подтверждением того, что ферроны (области скопления радиационных магнитоактивных дефектов) имеют форму, близкую к шару.

Заметим, что линия ($g_f \approx 2,9$) в спектре ЭСР природного алмаза наблюдалась в работе [23] только после имплантации в него ионов Хе (энергия иона 500 кэВ, флюенс $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и последующей пассивации радиационных дефектов в водородной плазме. В этом, возможно, и проявляется роль водорода в процессах магнитного структурирования неупорядоченных углеродных систем [24].

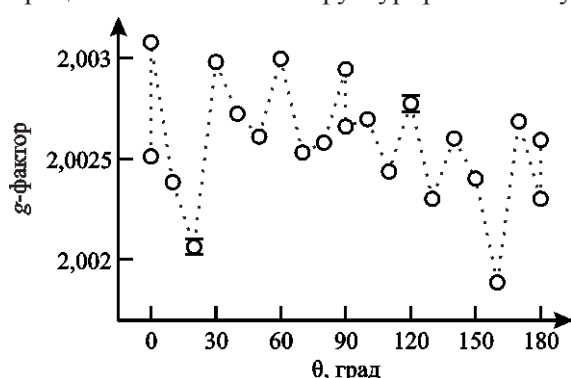


Рис. 2. Зависимость g -фактора (центральная линия на рис. 1) от угла θ между нормалью к плоскости пластинки CVD-алмаза, облученной нейтронами флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, и индукцией B постоянного магнитного поля (образец #1): время регистрации каждого сигнала ЭСР — 4 мин, скорость сканирования центральной линии на спектре ЭСР — менее 2 мТл/мин, мощность СВЧ-излучения — 56 мВт

В свете предложенной выше модели проявления ферронов вернемся к обсуждению центральной линии в спектре ЭСР на рис. 1. Эта линия имеет g -фактор, изменяющийся примерно от 2,0018 до 2,0032, значения которого случайным образом зависят от угла θ между нормалью к плоскости пластинки и индукцией B постоянного магнитного поля (рис. 2), а также от количества измерений. При повороте поликристаллической пластинки на угол $\theta = 360^\circ$ значение g -фактора не восстанавливалось, флуктуации величины g -фактора при последовательных измерениях превосходили расчетную (3) и экспериментальную статистическую погрешность ($(\delta g/g)_{\text{exp}} \approx 3 \cdot 10^{-5}$). Это обстоятельство позволяет заключить, что флуктуации величины g -фактора не случайны, а являются проявлением изменения окружения среднестатистического радикала (оборванной C—C-связи), т. е. происходит либо локальное намагничивание, либо локальное размагничивание при воздействии на образец #1 внешнего постоянного магнитного поля и магнитной компо-

ненты СВЧ-излучения в резонаторе. Отметим, что флуктуации g -фактора наблюдались и при изменении СВЧ-мощности в резонаторе, однако они были менее выраженными, чем на рис. 2.

Итак, можно предположить, основываясь на исследованиях различных неупорядоченных магнитных систем [25–27], что в облученной нейтронами (флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) пластинке поликристаллического CVD-алмаза имеются метастабильные состояния как электронной, так и атомной структуры типа спинового стекла. (Возможно, что флуктуации g -фактора есть проявление магнитоластичного эффекта в диамагнитных материалах [28, 29].)

При увеличении мощности СВЧ-излучения в H_{102} -резонаторе до 70 мВт амплитуда центральной линии ЭСР (см. рис. 1) практически не насыщается, а ширина линии немного увеличивается. (Анализ формы линии ЭСР по известной методике [30] показал, что форма центральной линии является промежуточной между линиями Лоренца и Гаусса.) Здесь отметим, что флуктуации g -фактора при увеличении мощности СВЧ-излучения в резонаторе наблюдались ранее [31] в кристаллах природного алмаза типа Па, имплантированных ионами ксенона $^{132}\text{Xe}^{23+}$ (кинетическая энергия иона 130 МэВ) последовательно дозами $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В [31] эти флуктуации величины g связывались с формированием спинового стекла в сильнодефектном слое алмаза (на глубине проекционного пробега ионов ксенона).

Образец #2. Экспериментально установлено [32], что облученный нейтронами CVD-алмаз (как и аморфный углерод [33]) обладает заметной электропроводностью на переменном токе. Проявление нерезонансного поглощения СВЧ-излучения при регистрации ЭСР (определяемого уменьшением амплитуды сигнала спин-метки — кристалла рубина на стенке H_{102} -резонатора) является характерным признаком наличия в резонаторе электрически проводящих объектов (см., например, [10, 34, 35]). При регистрации первой производной линии спинового резонансного поглощения в образце #2 на-

блюдалось изменение частоты СВЧ-излучения в резонаторе в момент прохождения через резонанс. Это обстоятельство позволяет измерить дисперсию магнитной восприимчивости образца #2 при одновременной регистрации ЭСР.

В образце #2 при комнатной температуре наблюдались: синфазный с модуляцией (на частоте 100 кГц) постоянного магнитного поля сигнал ЭСР и немонокотное изменение при этом частоты f резонатора. В исходном (необлученном) образце #3 сигналы ЭСР были примерно в 1000 раз менее интенсивными. В то же время интенсивности центральной линии ЭСР (произведение амплитуды сигнала Y' на квадрат ширины ΔB) в спектре образцов #1 и #2 были примерно одинаковы. Известно [8–10], что дисперсия χ_1 магнитной восприимчивости $\chi = \chi_1 - i\chi_2$ образца проявляется в изменении частоты резонатора, а величина χ_2 характеризует поглощение им СВЧ-излучения и проявляется в изменении добротности резонатора.

Согласно [34, 35] импеданс Z резонатора спектрометра ЭСР можно записать в виде

$$Z = R + i(\omega L - 1/\omega C), \quad (4)$$

где R , L и C – сопротивление, индуктивность и емкость эквивалентной схемы резонатора, ω – угловая частота; $Q = \omega L/R$ – добротность RCL -цепи (считается, что величины R и C не изменяются при регистрации сигналов ЭСР).

Исследуемый образец заполняет $0 < \eta < 1$ долю объема резонатора, и так как сигнал ЭСР обусловлен изменением индуктивности резонатора, то [34]

$$L = L_0[(1 - \eta) + \eta(1 + \chi)] = L_0(1 + \eta\chi), \quad (5)$$

где $1 + \chi = 1 + \chi_1 - i\chi_2$ – относительная магнитная проницаемость образца.

Резонансная частота резонатора ω_0 с образцом в отсутствие магнитных потерь (вдали от парамагнитного резонанса, когда $\chi_1 = \chi_2 = 0$) есть [9, 10]

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{L_0 C}. \quad (6)$$

С учетом формул (5) и (6) выражение (4) можно переписать в виде

$$Z = R + \eta\omega L_0\chi_2 + iL_0[\eta\omega\chi_1 + (\omega^2 - \omega_0^2)/\omega]. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что если стабилизировать частоту клистрона (источника СВЧ-излучения) по частоте измерительного резонатора ЭСР-спектрометра, то частота клистрона сдвигается так, что реактивная составляющая импеданса резонатора поддерживается равной нулю. Это дает дисперсию магнитной восприимчивости:

$$\chi_1 = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\eta\omega^2} = \frac{(\omega_0 - \omega)(\omega_0 + \omega)}{\eta\omega^2}, \quad (8)$$

где ω_0 – угловая частота измерительного резонатора с образцом вдали от парамагнитного резонанса (т. е. при условии $\chi_1 = \chi_2 = 0$).

Поглощение СВЧ-мощности при электронном парамагнитном (спиновом) резонансе проявляется как изменение добротности резонатора Q в виде [10, 35]:

$$Q^{-1} = Q_0^{-1} + Q_\chi^{-1}, \quad (9)$$

где $Q_0 = \omega_0 L_0/R$ – ненагруженная добротность резонатора, Q_χ – часть добротности, обусловленная резонансным поглощением образцом магнитной компоненты СВЧ-излучения. Если восприимчивость χ_2 одинакова во всем объеме образца, то согласно [10] имеем $Q_\chi^{-1} = \eta\chi_2$, где η – доля полной энергии СВЧ-излучения, взаимодействующая с образцом при регистрации ЭСР. Тогда из (9) получаем

$$\chi_2 = \frac{Q_0 - Q}{\eta Q_0 Q}. \quad (10)$$

В итоге формулы (8) и (10) принимают вид [8, 10, 34, 35]:

$$-\chi_1 = \frac{(f - f_0)(f + f_0)}{\eta f^2}, \quad -\chi_2 = \frac{Q - Q_0}{\eta Q Q_0}, \quad (11)$$

где $f_0 = \omega_0/2\pi$ и Q_0 – частота и добротность резонатора с образцом вдали от парамагнитного резонанса (т. е. при условии $\chi_1 = \chi_2 = 0$), η – коэффициент заполнения, показывающий, какая часть энергии магнитной компоненты СВЧ-излучения в H_{102} -резонаторе объемом $V_c = 10 \text{ см}^3$ находится в исследуемом образце алмаза объемом $V_s = 0,4 \times 5 \times 2 \text{ мм}^3$; $\eta = 2V_s/V_c = 8 \times 10^{-4}$.

На рис. 3 показаны средние значения χ_1 , определенные по формуле (11) из десяти экспериментально измеренных зависимостей частоты f резонатора с образцом #2 от индукции B внешнего постоянного магнит-

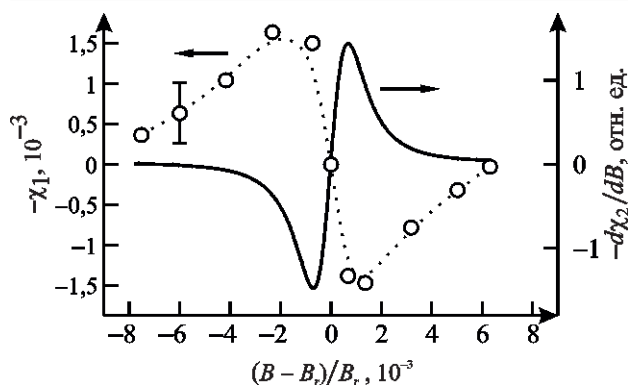


Рис. 3. Изменение дисперсии χ_1 и $d\chi_2/dB$ (первой производной от резонансного поглощения СВЧ-излучения по индукции B внешнего постоянного магнитного поля) при прохождении резонансного значения $B_r = 332,5$ мТл (ширина линии $\Delta B = 0,46$ мТл, резонансная частота $f_r = f_0 = 9,3195339$ ГГц, $g = 2,0026$, частота модуляции магнитного поля 100 кГц) поликристаллической пластинки алмаза, облученной нейтронами флюенсом $5 \cdot 10^{20}$ см $^{-2}$ (образец #2)

ного поля при десяти последовательных измерениях сигнала ЭСР, т. е. $Y' = -d\chi_2/dB$. Значения резонансной частоты $f_0 = f_r$ определялись при $d\chi_2/dB = 0$ (из десяти последовательных измерений сигнала ЭСР) как средние от значений частоты по обе стороны от резонанса $f_0 = (f_- + f_+)/2$, где f_- (f_+) – частота СВЧ-поля в резонаторе при магнитном поле $B_- = B_r - 5\Delta B$ ($B_+ = B_r + 5\Delta B$), здесь $B_r = 332,5$ мТл – резонансное магнитное поле, соответствующее центру линии ЭСР, когда $\hbar\omega_r = hf_r = g\mu_B B_r$; $\Delta B = 0,46$ мТл – ширина линии ЭСР «от пика до пика».

Заметим, что проявление дисперсии при регистрации сигнала поглощения в режиме автоподстройки частоты генератора СВЧ-излучения по измерительному резонатору H_{102} может быть обусловлено взаимодействием двух связанных резонаторов: собственно измерительного объемного резонатора и «резонатора образца #2», перестраиваемого внешним постоянным магнитным полем (см., например, [36, 37]).

1. Методом электронного спинового резонанса в облученной реакторными нейтронами (флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$) пластинке поликристаллического CVD-алмаза обнаружены метастабильные спиновые состояния (типа спинового стекла). Предложена модель, связывающая появление двух новых линий в ЭСР-спектре (g -факторы $g_i \approx 2,7$ и $g_h \approx 1,7$) с неоднородным распределением в пластинке алмаза шарообразных скоплений магнитоактивных радиационных дефектов.

2. Впервые методом ЭСР измерена дисперсия магнитной восприимчивости при одновременной регистрации резонансного парамагнитного поглощения CVD-алмазом, облученным нейтронами флюенсом $5 \cdot 10^{20}$ см $^{-2}$.

Автор выражает признательность А. В. Хомичу за предоставленные исходную и облученные нейтронами пластинки CVD-алмаза, Н. М. Лапчук и С. А. Вырко за помощь в эксперименте. Работа выполнена в рамках программы «Кристаллические и молекулярные структуры» и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Ф12Д-003, Ф12МВ-033).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захарченя Б. П., Коренев В. Л. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику // УФН. 2005. Т. 175. № 6. С. 629–635.
2. Вавилов В. С. Алмаз в твердотельной электронике // УФН. 1997. Т. 167. № 1. С. 17–22.
3. Брудный В. Н., Колин Н. Г., Смирнов Л. С. Модель самокомпенсации и стабилизация уровня Ферми // ФТП. 2007. Т. 41. № 9. С. 1031–1040.
4. Макарова Т. Л. Магнитные свойства углеродных структур // ФТП. 2004. Т. 38. № 6. С. 641–664.
5. Ивановский А. Л. Магнитные эффекты в немагнитных sp -материалах, индуцированные sp -примесями // УФН. 2007. Т. 177. № 10. С. 1083–1105.
6. Ральченко В. Г., Конов В. И. CVD-алмазы: применение в электронике // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2007. № 4. С. 58–67.
7. Karkin A. E., Voronin V. I., Berger I. F., Kazantsev V. A., Ponomov Yu. S., Ralchenko V. G., Konov V. I., Goshchitskii B. N. Neutron irradiation effects in chemical-vapor-deposited diamond // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78. № 3. P. 033204.
8. Weil J. A., Bolton J. R. Electron paramagnetic resonance. Elementary theory and practical applications. Hoboken, Wiley, 2007.
9. Ингрэм Д. Электронный парамагнитный резонанс в биологии. М., 1972.
10. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М., 1970. Гл. 12, § 7; гл. 13, § 1.
11. Демков Ю. Н., Ребане Т. К. О магнитных моментах атомов и молекул, обусловленных аномальным магнитным моментом электрона // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 71. № 5. С. 714–716.
12. Jonas M. Concepts and methods of ESR dating // Radiat. Meas. 1997. Vol. 27. № 5/6. P. 943–973.
13. Боровик Е. С., Еременко В. В., Мильнер А. С. Лекции по магнетизму. М., 2005.
14. Кембровский Г. С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. Минск, 1997.
15. Fundamental physical constants from NIST [Electronic resource]. Mode of access: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>. Date of access: 01.05.2013.
16. Поклонский Н. А., Лапчук Т. М., Горбачук Н. И., Николаенко В. А., Бачучин И. В. Наноструктурирование кристаллических зерен природного алмаза ионизирующим излучением // ФТП. 2005. Т. 39. № 8. С. 931–934.
17. Talbot-Ponsonby D. F., Newton M. E., Baker J. M., Scarsbrook G. A., Sussmann R. S., Whitehead A. J. EPR and optical studies on polycrystalline diamond films grown by chemical vapor deposition and annealed between 1100 and 1900 K // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. № 4. P. 2302–2309.

18. Маклочлан К. А. Магнитный резонанс. М., 1976.
19. Нагаев Э. Л. Магнитные автолокализованные состояния носителей тока в аморфных кремнии и германии // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3097–3099.
20. Давыдов С. Ю., Тихонов С. К. О магнитной восприимчивости широкозонных полупроводников // ФТП. 1996. Т. 30. № 4. С. 695–698.
21. Поклонский Н. А., Лапчук Т. М., Горбачук Н. И. Измерение методом ЭСР размагничивающего поля на поверхности металлических образцов // ЖПС. 2001. Т. 68. № 4. С. 419–422.
22. Поклонская О. Н. Электронный спиновый резонанс поликристаллической алмазной пленки, облученной нейтронами // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2011): сб. докл. Междунар. науч. конф. (Минск, 18–21 окт. 2011 г.). Минск, 2011. Т. 2. С. 306–308.
23. Поклонская О. Н., Лапчук Н. М. Парамагнитные дефекты в имплантированных ионами ксенона и пассивированных в плазме водорода кристаллах природного алмаза // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й Междунар. конф. (Минск, 26–28 сент. 2007 г.). Минск, 2007. С. 216–218.
24. Андриевский Р. А. Водород в наноструктурах // УФН. 2007. Т. 177. № 7. С. 721–735.
25. Кинцель В. Спиновые стекла как модельные системы для нейронных сетей // УФН. 1987. Т. 152. № 1. С. 123–131.
26. Семенцов Д. И., Шутый А. М. Нелинейная регулярная и стохастическая динамика намагниченности в тонкопленочных структурах // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831–857.
27. Андриевский Р. А. Металлические нано- и микростекла: новые подходы в наноструктурном материаловедении // УФН. 2013. Т. 183. № 3. С. 277–285.
28. Бучаченко А. Л. Магнитопластичность диамагнитных кристаллов в микроволновых полях // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. № 3(9). С. 673–679.
29. Поклонский Н. А., Потоцкий И. В., Горбачук Н. И. Увеличение парамагнетизма композитов $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{SiO}_2$ во время регистрации спектров ЭПР // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. IV Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 5–7 июля 2004 г.). СПб., 2004. С. 151–152.
30. Тихомирова Н. Н., Воеводский В. В. Метод анализа формы линий электронного парамагнитного резонанса // Оптика и спектроскопия. 1959. Т. 7. № 6. С. 829–832.
31. Поклонская О. Н., Лапчук Н. М., Поклонский Н. А., Вырко С. А. Имплантированный ионами ксенона кристалл природного алмаза: состояние спинового стекла // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф. (Минск, 23–25 сент. 2009 г.). Минск, 2009. С. 117–119.
32. Поклонский Н. А., Горбачук Н. И., Ксенович В. К., Поклонская О. Н., Карькин А. Е., Ральченко В. Г., Власов И. И., Хомич А. А. Импеданс поликристаллических CVD-алмазных пленок, облученных нейтронами // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. VII Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 28 июня – 1 июля 2010 г.). СПб., 2010. С. 157–158.
33. Shimakawa K., Miyake K. Hopping transport of localized π -electrons in amorphous carbon films // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. № 11. P. 7578–7584.
34. Пейк Дж. Парамагнитный резонанс. М., 1965. Гл. 2, § 5.
35. Лебедев Я. С., Муромцев В. И. ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов. М., 1972. Гл. 4, §§ 4.1–4.3.
36. Giordano M., Martinelli M., Pardi L., Santucci S. Observations of bistability effects in electron paramagnetic resonance experiments // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. № 3. P. 327–330.
37. Адашкевич С. В., Акунец В. В., Киранов В. С., Стельмах В. Ф. Особенности формы линии электронного парамагнитного резонанса фуллереноподобных систем // Фуллерены и фуллереноподобные структуры: сб. науч. тр. Минск, 2005. С. 292–299.

Поступила в редакцию 06.05.13.

Ольга Николаевна Поклонская – аспирант кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники Н. М. Лапчук.

УДК 53.083

В. Ю. СТАНКЕВИЧ, А. Г. СВЕТАШЕВ

ВЛИЯНИЕ ОСЛАБЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Для увеличения точности непрерывных измерений общего содержания озона (ОСО) предложен оптимизационный метод восстановления значений этого показателя по спектрам энергетической освещенности земной поверхности, позволяющий, в отличие от традиционных таблиц Стамнеса, учитывать мгновенные значения различных параметров атмосферы, характеризующие ослабление солнечного излучения, проходящего через атмосферу Земли. Было показано, что полученные с помощью данного метода результаты обладают устойчивостью в течение дня и хорошо согласуются со спутниковыми данными. Новые исследования связаны с учетом влияния на восстановленные значения ОСО ослабления солнечного излучения облачностью. Для повышения точности результатов предлагается коррекция входных данных в соответствии с опорным каналом спектро-радиометра, находящимся в отличном от полосы активного поглощения озона спектральном диапазоне. Показано, что такая корректировка позволяет увеличить точность получаемых значений ОСО на 0,5–3,0 % для каждого измерения, проведенного в выбранные дни.

Ключевые слова: атмосфера; озон; метод Стамнеса; УФ-излучение; измерения общего содержания озона; ослабление излучения.

To increase the accuracy of continuous measurements of the total ozone column (TOC), an optimization method has been proposed. The method employs the spectral irradiance data collected at the Earth's surface. This enables to account for actual values of different