

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-232

P14-96-232

В.С.Вариченко<sup>1</sup>, А.Ю.Дидык, Д.П.Ерчак<sup>1</sup>,  
В.А.Мartiнович<sup>1</sup>, В.А.Киранов<sup>1</sup>, В.Ф.Стельмах<sup>1</sup>

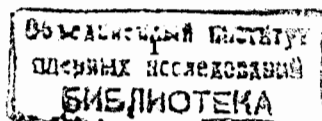
ПАРАМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АЛМАЗА,  
ИМПЛАНТИРОВАННОГО  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ НИКЕЛЯ

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск

1996

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание сверхрешетки элементов с размерами нанодиапазона в объеме полупроводников является актуальнейшей задачей современной электроники. Ионно-лучевая технология дает принципиальную возможность создания квазиодномерных (квази-1D) трекоподобных пространственно-упорядоченных структур в твердых телах, в том числе в таких сверхтвердых материалах, как алмаз и кубический нитрид бора с поперечными размерами отдельного 1D-элемента, удовлетворяющего указанным требованиям. Впервые о возможности создания упорядоченных квази-1D – структур в сверхтвердых материалах, т.е. о конструктивной, в смысле создания атомного упорядочения, роли высокоэнергетических ионов в процессе взаимодействия с веществом, сообщалось в работах [1–5]. Так, в работе [1] особенности дефектообразования при высокоэнергетичной ионной имплантации изучались методом катодолюминесценции, а в работе [2] следы треков высокоэнергетических ионов на поверхности алмаза обнаружены с помощью сканирующего туннельного микроскопа. В работах [3–5] на основе изучения ЭПР было обнаружено, что в монокристаллах алмаза, имплантированных ионами меди и неона с энергией  $\sim 1$  МэВ/а.е.м., изотропные линии ЭПР, обнаруженные Брозиусом, Корбеттом и Бургузном в алмазе после низкоэнергетичной (100 кэВ) имплантации [6] и связанные с парамагнитными центрами (ПЦ) областей аморфизации [6–8], становятся



анизотропными. При этом анизотропными оказались как  $g$ -фактор, так и остальные параметры, характеризующие данную линию, например, ширина  $\Delta H$  и степень асимметрии. В работе [5], а также в работах [9–13] были высказаны идеи относительно природы ПЦ, ответственных за наблюдаемые анизотропные синглетные линии, а именно предположено, что подвижными ПЦ могут быть квазичастицы типа солитонов, аналогичные топологическим солитонам в трансполиацетилене [14–16].

Следует заметить, что специфический квазиодномерный характер движения парамагнитных квазичастиц в среде с электрон-электронными корреляциями может проявляться и в ряде других физических свойств и явлений, например, в отличии функции формы резонансной линии парамагнитных квазичастиц от известных функций формы резонансных линий ПЦ в 3D-системах, то есть функций Гаусса, Лоренца, либо свертки Гаусса-Лоренца. Экспериментальное обнаружение данного факта явилось целью настоящей работы.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы Ia природного алмаза имплантировались ионами никеля с энергией 335 МэВ в интервале флюенсов  $5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при температуре 300 К. Измерения ЭПР проводились на спектрометрах 3-сантиметрового диапазона "Radiopan" и "Varian-E-Line". Для контроля добротности были использованы линии спектра ЭПР ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в стандартном образце рубина, помещенном постоянно в резонаторе  $\text{TE}_{102}$  - спектрометра. При этом рубиновый стандарт помещался в резонаторе спектрометра таким образом, чтобы обеспечивалась линейность отклика интенсивности  $I$  резонансного поглощения указанного образца на изменение величины магнитной компоненты  $H_1$  поля СВЧ во всем диапазоне мощностей СВЧ. Оказалось, что для мощностей СВЧ, используемых в спектрометре "Radiopan", размещение образца в середине задней стенки резонатора удовлетворяло указанному условию. Это было подтверждено посредством регистрации зависимости  $I(H_1)$  одновременно двух образцов рубина - вышеупомянутого и дополнительного, помещенного на коленчатом держателе. Держатель вставлялся в резонатор таким образом, чтобы колено, размер которого составлял  $\sim 5$  мм, было направлено вдоль горизонтальной оси, перпендикулярной постоянному магнитному полю  $H$ . При этом достигалось уменьшение амплитуды магнитной компоненты СВЧ-поля  $H_1$  в 3.4 раза. Наличие линейной зависимости (рис.1) между интенсивностями поглощения обоими образцами свидетельствует о линейности отклика стандартного образца на изменение  $H_1$ . Это и дало возможность использовать резонансные линии образца рубина для калибровки относительной величины магнитной компоненты  $H_1$  СВЧ-поля, а также для точной настройки фазы ВЧ-модуляции. Тем самым было обеспечено корректное измерение кривых насыщения и фазомодуляционных зависимостей резонансных сигналов в изучаемых образцах. Заметим, что использование в промышленных спектрометрах калиброванных аттенуаторов СВЧ-мощности не обеспечивает корректных измерений кривых насыщения вследствие существенной зависимости коэффициента связи как от уровня СВЧ - мощности, так и от электрических характеристик исследуемых образцов.

Абсолютные значения эффективной концентрации спинов определялись путем сопоставления спектров исследуемых образцов со спектром калиброванного угольного эталонного образца.

Профили распределения характеристик ПЦ по глубине были получены с помощью метода ионного распыления при регистрации спектров ЭПР после каждого снятого слоя. Ионное распыление проводилось в вакуумной установке ВУП-4К с использованием ионов аргона и кислорода с энергией 5 кэВ при токе 0.1 мкА. В указанном режиме скорость распыления образцов алмаза составляла от 0.5 до 3 мкм/ч. Толщина изучаемых образцов контролировалась с точностью 0.3 мкм.

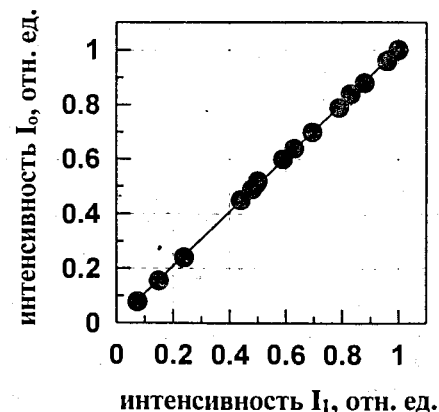


Рис.1. Соотношение относительных интенсивностей резонансного поглощения ПЦ  $\text{Cr}^{3+}$  в стандартном образце рубина ( $I_0$ ) и образце рубина, помещенном на горизонтальной оси  $\text{TE}_{102}$  резонатора между пучностями магнитной и электрической компоненты СВЧ-поля ( $I_1$ ). Диапазон изменения мощности СВЧ - 0-25 дБ

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как сообщалось в работе [17], имплантация в алмаз ионов никеля с энергией 335 МэВ приводит к появлению в спектрах ЭПР слабоанизотропных синглетных линий в области  $g$ -факторов вблизи  $g = 2.0027$ , соответствующих доминирующим ПЦ, аналогичным наблюдавшимся в [3-5], и набору сравнительно малоинтенсивных, сильноанизотропных линий, соответствующих радиационным точечным дефектам решетки алмаза. Доминирующие слабоанизотропные ПЦ с областью изменения  $g$ -фактора вблизи  $g = 2.0027$  при флюенсах  $5 \cdot 10^{12}, 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  представлены двумя компонентами (узкой - I, широкой - II) в резонансных спектрах (рис.1 в работе [17]). В результате имплантации  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в спектрах ЭПР наблюдалась одна компонента, соответствующая доминирующим ПЦ в области  $g = 2.0027$ . Ширина указанной компоненты была изотропной. Как отмечалось в [17], дозовые зависимости суммарной интенсивности линий I и II доминирующих ПЦ и степени асимметрии (линии I и II при флюенсах  $5 \cdot 10^{12}, 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) являются коррелированными. Дозовая зависимость является сублинейной в интервале  $5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и

становится суперлинейной в интервале флюенсов  $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . В то же время степень асимметрии существенно возрастает на первом участке интервала флюенсов имплантируемых ионов и уменьшается, приводя в результате к практически симметричной линии, на втором участке указанного интервала. Следует заметить, что на данных участках меняется также характер насыщения линий микроволновой мощностью (рис.2, 3). При малых дозах кривые насыщения носят сублинейный характер (рис.2). Причем характерно, что зависимость  $I(H_1)$  является аналогичной для узкой и широкой компонент (рис.2). При флюенсе  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  кривая насыщения является суперлинейной, аналогично наблюдавшейся в [5,13] для  $\sim 1\text{-МэВ}$  имплантации (рис.3). При этом обнаружено, что характер насыщения сигнала, детектируемого в квадратуре с полем модуляции, является также суперлинейным (рис.3, кривая б). Более того, обе зависимости  $I(H_1)$  и  $I_q(H_1)$  соответственно для сигналов, регистрируемых в фазе и квадратуре с полем модуляции, идентичны, то есть математически могут быть описаны одной и той же функцией.

В результате изучения изохронного отжига была обнаружена, как сообщалось в [17], существенно немонотонная зависимость ширины синглетной линии с ростом температуры отжига (рис.4 в работе [17]). При этом изменения ширины оказались значительными в отличие от всех известных ПЦ с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне, в том числе для ПЦ, парамагнитный электрон которых локализован на оборванной связи, например, ПЦ Si-G8, фосфор-вакансия в кремнии [18], заметных изменений ширины резонансных линий с температурой отжига для которых не наблюдалось.

Наряду с данными по изучению профиля распределения ширины линии  $\Delta H$ , также сообщавшимися в работе [17], интересными представляются данные, полученные в настоящей работе в результате исследования таких характеристик резонансной линии указанных ПЦ, как интенсивность  $I$  и функция формы при послойном снятии образца, имплантированного флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и отожженного при температуре  $1400^\circ\text{C}$  (рис.4, 5). Как видно из рис.4, зависимость интенсивности парамагнитного поглощения с толщиной удаленного слоя является немонотонной. При этом обращают на себя внимание два участка роста интенсивности в интервалах  $\sim 19\text{-}27 \text{ мкм}$  и  $31\text{-}34 \text{ мкм}$ . Характерно, что максимум интенсивности достигается при последовательном удалении слоев образца до глубины  $27.8 \text{ мкм}$  (рис.4). Это соответствует максимуму профиля распределения ширины данной линии [17], а также проекционному пробегу ионов  $27.7 \text{ мкм}$ , рассчитанному согласно TRIM-90. Отметим также соответствие между дополнительной ступенькой на глубине  $\sim 32 \text{ мкм}$ , превышающей проективный пробег, в профиле распределения ширины линии и максимумом на этой же глубине в распределении интегральной интенсивности.

Анализ функции формы показал, что спектры поглощения описываются функцией, спадающей на крыльях существенно более медленно, чем функция Лоренца, т.е. функцией, которая может быть названа суперлоренцевой (рис.6а). Интересным представляется изменение функции формы интегрального сигнала поглощения при удалении слоев имплантированного участка образца (рис.5). До  $28 \text{ мкм}$  происходит непрерывное уменьшение отклонения функции формы от лоренцевой. В интервале  $28\text{-}31 \text{ мкм}$  функция формы является практически лоренцевой (рис.7а). При дальнейшем снятии слоев от  $31$  до  $46 \text{ мкм}$  происходит увеличение отклоне-

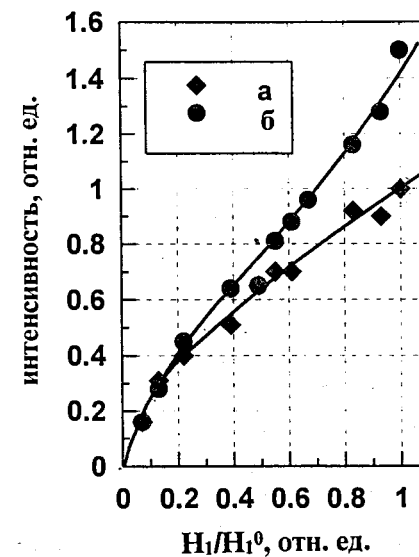


Рис.2. Зависимость относительной интенсивности резонансного поглощения доминирующими ПЦ в образце алмаза, имплантированного ионами Ni ( $335 \text{ МэВ}$ ,  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) от амплитуды магнитной компоненты  $H_1$  СВЧ-поля: а - узкая компонента, б - широкая компонента. Относительные интенсивности линий а и б нормированы таким образом, чтобы их значения при  $H_1/H_1^0 = 0.07$  совпадали ( $H_1^0$  - значение  $H_1$  при 0 дБ)

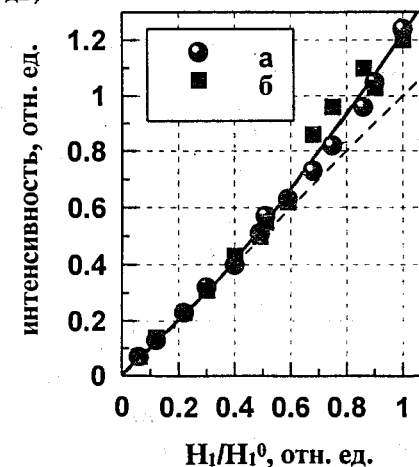


Рис.3. Зависимость относительной интенсивности резонансного поглощения доминирующими ПЦ в образце алмаза, имплантированного ионами никеля  $335 \text{ МэВ}$ ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ): а - поглощение, регистрируемое в фазе с полем высокочастотной (ВЧ)  $100\text{-кГц}$  модуляции; б - поглощение, регистрируемое в квадратуре с полем ВЧ  $100\text{-кГц}$  модуляции. Относительные интенсивности линий а и б нормированы таким образом, чтобы их значения при  $H_1/H_1^0 = 0.22$  совпадали ( $H_1^0$  - значение  $H_1$  при 0 дБ)

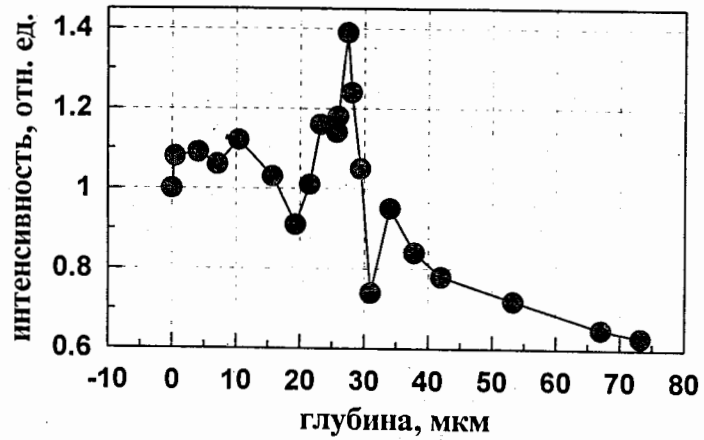


Рис.4. Зависимость относительной интегральной интенсивности резонансного поглощения от толщины удаляемой имплантированной никелем (335 МэВ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) области в образце, отожженном при  $1400^\circ \text{C}$

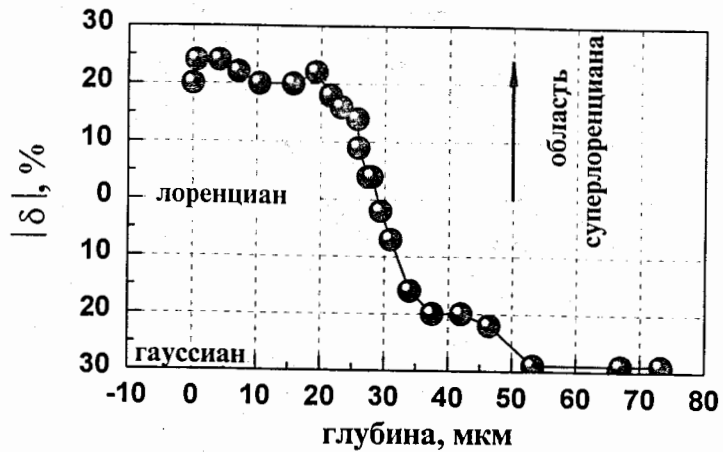


Рис.5. Зависимость параметра  $\delta$ , характеризующего отклонение формы наблюдаемой линии от лоренцевой, от толщины удаленного слоя в образце, имплантированном ионами никеля (335 МэВ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и отожженном при  $1400^\circ \text{C}$ .  $\delta$  - амплитуда отклонения нормированной на единицу производной наблюдаемой резонансной линии от лоренциана при значении  $(H_0 - H) / \Delta H_{pp} = 1.5$

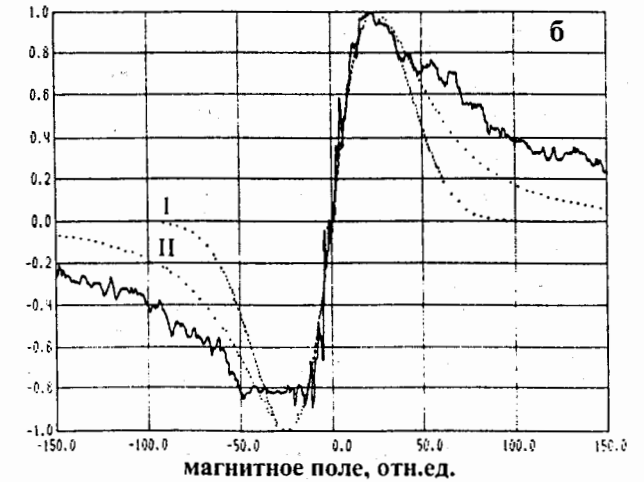
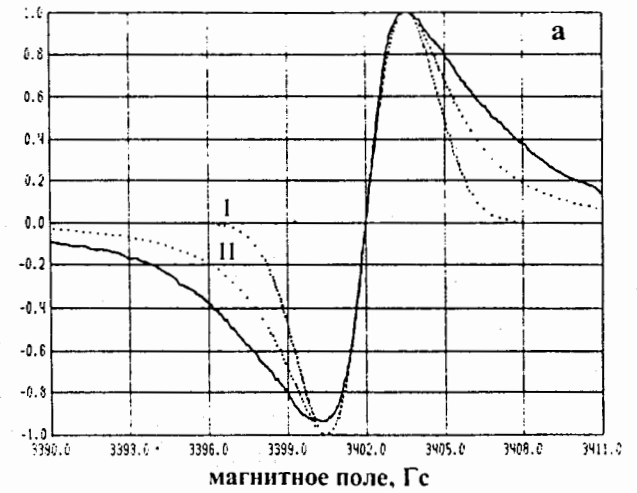


Рис.6. Спектр ЭПР алмаза, имплантированного ионами никеля (335 МэВ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и отожженного при  $1400^\circ \text{C}$ , частота поля СВЧ - 9537.8 МГц, частота модуляции - 25 МГц: а) интегральный спектр, б) дифференциальный спектр в слое 4.1 - 7.1 мкм. I - гауссиан, II - лоренциан.

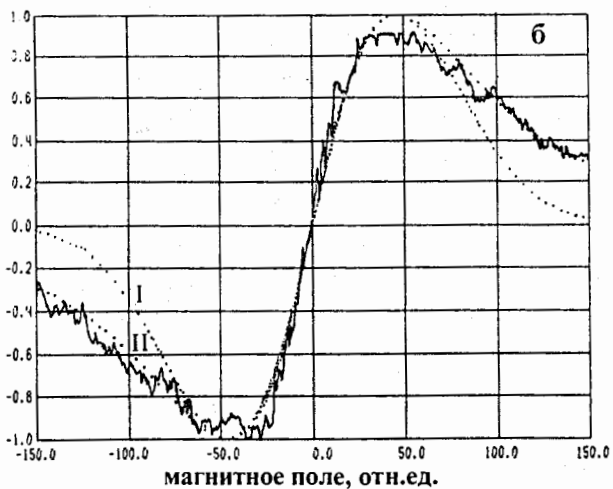
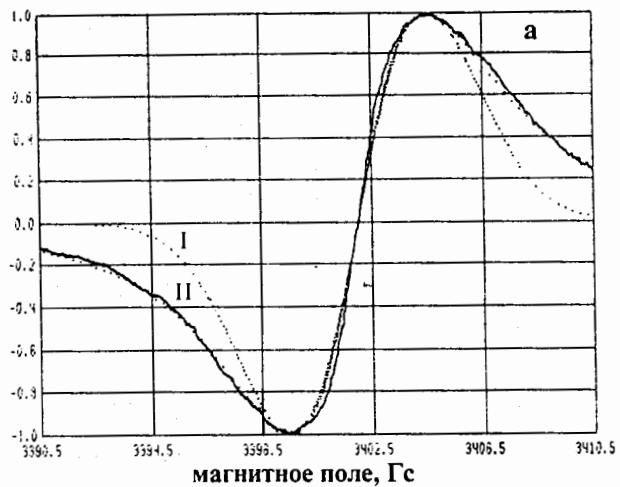


Рис.7. Спектр ЭПР алмаза, имплантированного ионами никеля ( $335 \text{ МэВ}$ ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и отожженного при  $1400^\circ \text{ С}$ , частота поля СВЧ -  $9539.5 \text{ МГц}$ , частота модуляции -  $25 \text{ МГц}$ : а) интегральный спектр после удаления облученного слоя толщиной  $29.4 \text{ мкм}$ , б) дифференциальный спектр в слое  $28 - 29.4 \text{ мкм}$ . I - гауссиан, II - лоренциан

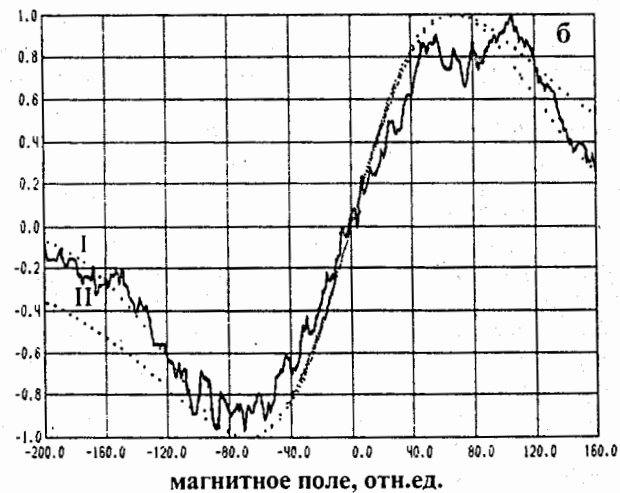
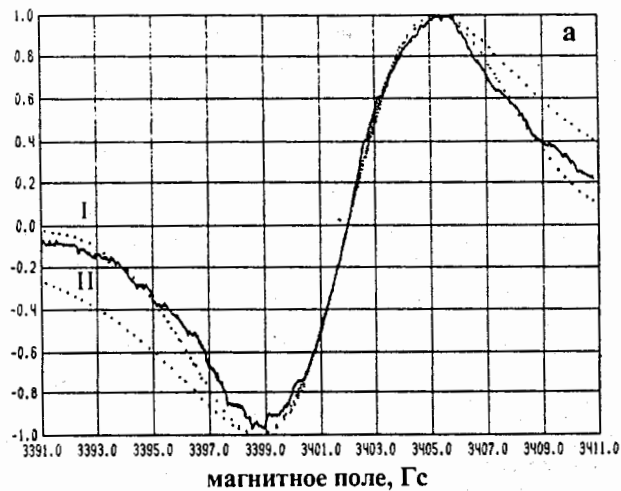


Рис.8. Спектр ЭПР алмаза, имплантированного ионами никеля ( $335 \text{ МэВ}$ ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и отожженного при  $1400^\circ \text{ С}$ , частота поля СВЧ -  $9536.1 \text{ МГц}$ , частота модуляции -  $25 \text{ МГц}$ : а) интегральный спектр после удаления облученного слоя толщиной  $46.4 \text{ мкм}$ , б) дифференциальный спектр в слое  $46.4 - 53.3 \text{ мкм}$ . I - гауссиан, II - лоренциан

ния функции формы, однако уже в ином направлении, а именно в направлении гауссовой функции формы, которая достигается при 46.4 мкм (рис.8а). Оказалось, что дифференциальный спектр ЭПР, т.е. спектр отдельного слоя, полученный в результате компьютерной обработки указанной интегральной зависимости, обладает аналогичными свойствами – дифференциальный спектр имеет суперлоренцеву форму на начальном участке (рис.6б), практически лоренцеву форму в слое 28–29.4 мкм (рис.7б) и гауссову форму в слое 46.4–53.3 мкм (рис.8б).

Изучение кинетики отжига интенсивности синглетной линии, коррелирующей с концентрацией доминирующих ПЦ в образце, имплантированном флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , показало, что изменение интенсивности данной линии также наблюдалось в образцах, имплантированных ионами с энергией  $\sim 1 \text{ МэВ/а.е.м.}$ , например, ионами меди (см. рис.2 в [19]). Как отмечалось в [19] и [17], существует температурный интервал корреляции кинетики отжига концентрации исследуемых ПЦ и кинетики отжига вакансий, соответствующих полосе GR1 в спектре катодолуминесценции. Это проявляется в том, что в области температур 600–800°C происходит резкое уменьшение интенсивности синглетной линии, совпадающее со стадией отжига вакансий в алмазе. Следует, однако, заметить, что если отжиг вакансий завершается до  $\sim 800^\circ\text{C}$  полностью, то ПЦ, соответствующие синглетной линии, сохраняются частично до максимальных температур 1400°C. Более того, начиная с  $\sim 900^\circ\text{C}$ , интенсивность синглетной линии почти не меняется и эффективная концентрация в слое  $\sim 10 \text{ мкм}$  вблизи максимума концентрации взаимодействующих ПЦ сохраняется на уровне  $\sim 9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Заметим, что сам факт сохранения ПЦ, связанных с ионно-модифицированными структурами, в достаточно высокой эффективной концентрации свидетельствует о высокой стабильности части образующихся структур.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совокупность полученных результатов может быть объяснена на основе предложенной в [2–5] концепции формирования в алмазе в результате высокоэнергетичной имплантации квазиодномерных упорядоченных трекоподобных структур, т.е. формирования углеродной фазы с отличной от  $\text{sp}^3$  гибридизацией химических связей с учетом природы доминирующих в спектрах ЭПР синглетных линий с областью изменения  $g$ - фактора вблизи  $g = 2.0027$  как обусловленных резонансным поглощением на подвижных квазичастицах типа солитонов [5, 11–13]. Действительно, сублинейный характер зависимости интенсивности сигнала парамагнитного поглощения от мощности СВЧ при малых флюенсах (рис.2) и суперлинейный характер этой зависимости при флюенсе  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  может быть объяснен, аналогично [13], ростом коэффициента парамагнитного поглощения с ростом амплитуды микроволнового поля, реализующемся в случае достаточно длинных участков непрерывности трекоподобных структур, составляющих согласно оценке [13] не менее 0.1–1 мкм. Таким образом, участки непрерывности модифицированной фазы в образце, имплантированном флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , являются достаточно протяженными, в то время как при флюенсах  $5 \cdot 10^{13}$  и  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  они заведомо меньше указанной величины. Дискретность системы квазиодномерных образований при малых

дозах согласуется с данными изучения асимметрии производной резонансной линии и дозовой зависимости интенсивности поглощения [17]. Заметим также, что отмеченная выше идентичность и суперлинейность зависимостей  $I(H_1)$  и  $I_r(H_1)$  (рис.3) соответственно для сигналов, регистрируемых в фазе и квадратуре с полем модуляции, наблюдались впервые. С одной стороны, это свидетельствует об идентичности ПЦ, ответственных за оба сигнала. С другой стороны, это указывает на механизм формирования квадратурного сигнала, отличающийся от известного, обусловленного присутствием ПЦ с длинными временами парамагнитной релаксации и имеющими, как правило, иную природу в сравнении с ПЦ, детектируемыми одновременно в фазе с полем ВЧ-модуляции. Возникновение суперлоренцевой функции формы может быть качественно понято из следующих рассуждений. Известно (см., например, [20]), что заужание поперечной намагниченности может быть аппроксимировано в системе координат, вращающейся с резонансной частотой  $\omega_0$ , следующим выражением:

$$M(t) = \exp \left[ \int_0^t (\tau - t) \psi(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где

$$\psi(\tau) = \langle [H'(\tau), M_+] [M_-, H'(0)] \rangle / h^2 (M_+ M_-), \quad (2)$$

$M_+$ ,  $M_-$  –повышающие и понижающие операторы полной поперечной намагниченности, угловые скобки означают термическое усреднение,  $H'$  – оператор возмущения, определяемый спин-спиновыми и/либо сверхтонкими взаимодействиями. явный вид которого в данных качественных рассуждениях значения не имеет. Движение парамагнитных квазичастиц будет приводить к модуляции  $H'$ , т.е. в конечном счете к зависимости от времени  $\psi(\tau)$ . Эта зависимость во всех известных случаях является степенной, например,  $\psi(\tau) \sim t^{-1/2}$  в случае гейзенберговских линейно-цепочечных систем [21]. Легко показать, что если  $\psi(\tau) \sim t^\alpha$  с  $-2 < \alpha < 3/2$ , то мы получим суперлоренцеву функцию формы, качественно подобную наблюдаемой в исследуемых образцах при имплантации флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Для объяснения характера изменения интенсивности ЭПР – поглощения и функции формы при послойном снятии–следует принять во внимание следующее. Методика послойного снятия является разрушающей, и, если распределение по глубине, например концентрации, либо других характеристик, касающихся точечных дефектов, может быть получено вполне адекватно, то, что касается протяженных объектов, какими являются треки и созданные вдоль треков упорядоченные 1D-структуры, сам метод вносит изменения в свойства треков и в динамические характеристики ПЦ квазичастиц, образованных в этих структурах. Кроме того, следует учитывать ПЦ, созданные на поверхности в результате ионного распыления, имеющие, по нашему мнению, ту же природу, что и доминирующие ПЦ, созданные имплантацией, однако – иные динамические характеристики вследствие двумерного характера их распределения. С учетом сказанного наблюдаемое изменение формы линии по глубине представляется нам обусловленным уменьшением участков движения квазичастиц, приводящем в конечном счете к их локализации на больших глубинах  $\sim 46 \text{ мкм}$ , что и соответствует гауссовой форме линии [21]. В выражении (1) это соответствует независимости  $\psi(t)$  от времени  $t$ .

Лоренцева форма линии и необычное явление возрастания интенсивности интегрального сигнала при достижении толщины удаленного слоя, соответствующей длине проективного пробега ионов, связывается нами с усилением взаимодействия между отдельными 1D-элементами структур, образовавшихся первоначально в различных треках. Механизмом, приводящим к усилению указанного взаимодействия может быть увеличение перекрытия р-электронных орбиталей атомов, принадлежащих различным 1D-элементам из-за, например, дальнейшего снятия напряжений при приближении данного слоя к поверхности. Тогда характер движения квазичастиц становится трехмерным, что по аналогии с 3D-спиновой диффузией в гейзенберговских магнитных системах [21] должно соответствовать лоренцевой функции формы. Рост же интенсивности представляется нам обусловленным возрастанием числа актов поглощения одними и теми же носителями спинов за время спин-решеточной релаксации вследствие существования прямого канала преобразования спиновой энергии в кинетическую аналогично обсуждавшемуся в [13, 22].

В пользу того, что наблюдавшаяся форма линии обусловлена корреляциями, связанными с движением квазичастиц, и не является результатом присутствия ПЦ, соответствующих линиям лоренцевой формы с различными ширинами, свидетельствуют результаты дифференциальной обработки спектров ЭПР при послойном снятии имплантированного участка образца. Действительно, форма линий, соответствующих отдельным слоям на начальных глубинах, также суперлоренцева (рис.6), т. е. та же, которую имеет интегральное поглощение до послойного снятия, определяемое, естественно, ПЦ, формируемыми вблизи максимума концентрации. При этом величины отклонения  $\delta$ , и  $\delta_{eff}$ , характеризующие соответственно форму линии приповерхностного слоя и суммарного имплантированного участка, близки. Это означает, что в случае, если бы функция формы определялась суперпозицией линий лоренцевой формы с различными ширинами от статичных, глубоких ПЦ нескольких типов, соотношение их концентраций в приповерхностной и глубинной областях должно быть также близким. Следовательно, форма линии отдельного слоя на глубине вблизи максимума также должна была бы быть суперлоренцевой формой в отличие от наблюдаемого экспериментально лоренциана.

Результаты настоящей работы с учетом работ [2,23], в которых сообщалось об обнаружении в имплантированном высокоэнергетичными ионами криптона алмазе кратеров диаметром от 3 до 20 нм, связываемых с треком отдельного иона или нескольких ионов в одном месте поверхности, позволяют конкретизировать модель трека в алмазе с точки зрения его химической структуры. Основой, строительным звеном квази-1D – структур, по нашему мнению, могут служить С-С- звенья, характерные для остова полиацетилена. В пользу такого предположения указывает совпадение g-факторов солитонов в полиацетиле [14–16] с g-факторами доминирующих ПЦ, наблюдаемых в имплантированном алмазе, и обусловленном квази-частицами, предположительно также солитонами. Следует заметить, что элементарные фрагменты, соответствующие остову полиацетилена, лежат в основе конструкции тубуленов, что дает возможность предложить конструкцию части трека в виде полый изнутри тубуленоподобной структуры, образование которой является

энергетически более выгодным в условиях имплантации ионами с энергиями 1–5 МэВ/а.е.м., чем, например, рекристаллизации в структуре алмаза.

## 5. ВЫВОДЫ

Изучение ЭПР в образцах монокристаллического алмаза, имплантированного ионами никеля с энергией 335 МэВ, проведенное в настоящей работе, показало, что форма линий доминирующих ПЦ является суперлоренцевой, т. е. спадающей на крыльях более медленно, чем функция Лоренца.

Получен дифференциальный спектр ЭПР от отдельных слоев образца.

Впервые наблюдалась суперлинейная зависимость интенсивности линии доминирующих ПЦ, регистрируемой в квадратуре с полем ВЧ-модуляции, с ростом амплитуды микроволнового поля.

Обнаружено необычное возрастание интенсивности интегрального сигнала ЭПР доминирующих центров в области максимума ядерного торможения при послойном снятии.

Указанные особенности объясняются на основе предложенной ранее концепции формирования квазиодномерных упорядоченных структур при высокоэнергетичной имплантации алмаза и с учетом природы доминирующих ПЦ как подвижных квазичастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда INTAS, грант номер "INTAS-94-1982".

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Вариченко, Е.Д.Воробьев, А.М.Зайцев и др. ФТП, т.21, No 6 (1987) 1095.
2. V.S.Varichenko, A.M.Zaitsev, M.S.Rusetskii et al. Diamond & Related Materials, No 3 (1994) 711.
3. D.P.Erchak, N.M.Penina, V.F.Stelmakh et al. The 7th Int. Conf. "IBMM-90", Abstracts, Knoxville, USA (1990) 313.
4. V.G.Efimov, D.P.Erchak, R.B.Gelfand et al. E-MRS-90 Fall Meeting, Strasbourg, France, Abstracts, (1990) C-V/P12.
5. D.P.Erchak, V.G.Efimov, A.M.Zaitsev et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., B69 (1992) 443.
6. P.R.Brosious, J.W.Corbett, J.C.Bourgoin. Phys. Stat. Sol. (a), 21 (1974) 677.
7. P.R.Brosious, Y.H.Lee, J.W.Corbett, L.J.Cheng. Phys. Stat.Sol.(a), 25 (1974) 541.
8. Y.H.Lee, P.R.Brosious, J.W.Corbett. Phys. Stat. Sol. (a), 50 (1978) 237.
9. D.Fink, L.T.Chadderton, F.Hosoi et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., B91 (1994) 146.
10. V.B.Odzhayev, I.I.Azarko, I.A.Karpovich et al. Mater. Lett., 23 (1995) 163.
11. D.P.Erchak, V.G.Efimov, I.I.Azarko et al. Diamond & Related Materials, 2 (1993) 1164.
12. D.P.Erchak, V.G.Efimov, I.A.Karpovich, V.F.Stelmakh. "ICNDST-3" and "Diamond Films-92" Conf., Heidelberg, FRG, August 31 – September 4, 1992, Abstracts, 8.187.



13. D.P.Ertchak, V.A.Martinovich, V.G.Efimov et al. Submitted to Diamond & Related Materials.
14. W.P.Su, J.R.Schrieffer, A.J.Heeger. Phys. Rev. Lett., 42 (1979) 1898.
15. W.P.Su, J.R.Schrieffer, A.J.Heeger. Phys. Rev. B, 22 (1980) 2099.
16. I.B.Goldberg, H.R.Crowe, P.R.Newman et al. J.Chem. Phys., 70 (1979) 1132.
17. В.С.Вариченко, А.Ю.Дидык, В.А.Мартинович и др. Препринт ОИЯИ Р14-95-145, Дубна, 1995.
18. G.D.Watkins, J.W.Corbett. Phys.Rev., 134A (1964) 1359.
19. D.P.Erchak, R.B.Gelfand, N.M.Penina et al. Phys.Stat.Sol.(a), 121 (1990) 63.
20. R.Kubo, K.Tomita. J. Phys. Soc. Japan 9, (1954) 888.
21. M.J.Hennessy, C.D.McElwee, P.M.Richards. Phys. Rev. B, 7, N 3, (1973) 930.
22. D.P.Erchak, M.B.Guseva, A.F.Aleksandrov et al. Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 58, No 4 (1993) 268, JETP. Lett. v. 58, No 4 (1993) 275.
23. A.Yu.Didyk, V.S.Varichenko, Radiation Measurements, V.25, No 1-4 (1995) 119.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июля 1996 года.

Вариченко В.С. и др.

P14-96-232

Парамагнитные свойства алмаза,  
имплантированного высокоэнергетическими ионами никеля

Изучение ЭПР в алмазе, имплантированном ионами никеля с энергией 335 МэВ, показало, что синглетная линия доминирующих парамагнитных центров (ПЦ) имеет форму, которая может быть названа суперлоренцевой благодаря наличию крыльев, имеющих большую интенсивность, чем у лоренциана. Получены дифференциальные спектры ЭПР, т.е. спектры отдельных слоев имплантированной области. Исследовано распределение облученного слоя концентрации доминирующих ПЦ. Особенности дефектообразования в облученном алмазе объясняются на основе концепции формирования квазиодномерных структур при высокоэнергетической имплантации алмаза с учетом природы доминирующих ПЦ как подвижных квазичастиц.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Varichenko V.S. et al.

P14-96-232

Paramagnetic Properties  
of Diamond Implanted with High Energy Ni Ions

EPR investigations of diamond implanted with 335 MeV nickel ions have demonstrated that singlet line of dominant paramagnetic centres (PC) has a shape which can be described as a super-Lorentz because of more intensive wings than Lorentzian. Differential spectra characterising each layer of irradiated region have been obtained. Depth distribution profile of concentration of dominant paramagnetic centres has been also studied. Peculiarities of defect production in irradiated diamond are discussed in terms of low-dimensional structures formed in diamond by swift ions taking into account origin of dominant PC as mobile quasi-particles.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996