

СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ АЛМАЗА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

© 1999 г. Вариченко В.С., Зайцев А.М., Мартинович В.А., Стельмах В.Ф.,
Лапчук Н.М., Ерчак Д.П.

Белорусский государственный университет

Доминирующий характер электронных потерь над ядерными при торможении высокоэнергетических ионов в кристалле, обуславливает особенности процесса дефектообразования, приводящие к возникновению в объеме алмаза протяженных одномерных дефектов – треков. Это приводит к новым парамагнитным свойствам облученной области алмаза, отличающимся от случая ионной имплантации с энергиями десятки и сотни кэВ.

Методом ЭПР установлено, что в алмазах, облученных ионами Ni с энергией 335 МэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{12}$ - $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и ионами В с энергией 92 МэВ и дозой $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², изотропные линии, обнаруженные ранее после низкоэнергетической имплантации и связываемые с парамагнитными центрами (ПЦ) областей аморфизации [1], становятся анизотропными. Доминирующие ПЦ, наблюдавшиеся в образцах, облученных ионами Ni с дозами $5 \cdot 10^{12}$ см⁻², $5 \cdot 10^{13}$ см⁻², в резонансных спектрах представлены двумя компонентами. Эти компоненты, имея практически совпадающую область изменения g-фактора, существенно различались по своим параметрам (интенсивности, ширине и степени асимметрии А/В линий (А и В – амплитуды высоко- и низкополевой части резонансной линии)), а также по угловым зависимостям указанных параметров. Анизотропные свойства узкой компоненты выражены более ярко. Увеличение дозы ионной имплантации до $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² привело к тому, что в спектрах ЭПР в области $g = 2.0027$ наблюдалась уже только одна компонента, соответствующая доминирующим ПЦ, с изотропной шириной. Анализ угловой зависимости степени асимметрии А/В резонансной линии в образце, облученном с дозой $5 \cdot 10^{13}$ см⁻², показал, что направление анизотропии строго ориентировано вдоль направления ионного пучка.

В процессе изучения изохронного отжига алмаза, облученного ионами Ni с энергией 335 МэВ и дозой $5 \cdot 10^{14}$ см⁻², обнаружена существенно немонотонная значительная зависимость ширины синглетной линии с ростом температуры. Так, в интервале температур отжига 650-700 °С ширина линии возрастает от 5.3 Гс до 7.7 Гс, и затем, в области температур отжига 750 - 850 °С умень-

шается до 3.3 Гс. Для известных точечных ПЦ, парамагнитный электрон которых локализован на оборванной связи, изменений ширины резонансных линий с температурой отжига не наблюдалось. Это обусловлено тем, что сильно локализованная волновая функция изолированных точечных дефектов „видит“ в процессе отжига практически одно и то же локальное окружение. В отличие от ПЦ с оборванной связью волновая функция солитонов в одномерных структурах алмаза, аналогичная волновой функции топологических солитонов в полиацетилене, может охватывать порядка 45 атомов углерода вдоль углеродного остова полимерной цепочки. Это обстоятельство наряду с подвижностью солитонов определяет высокую чувствительность параметров резонансной линии к структурному окружению и изменениям этого окружения. Таким образом, изменение ширины синглетной линии с температурой свидетельствует о происхождении синглетных линий как обусловленных резонансным поглощением на подвижных квазичастицах типа солитонов.

При исследовании образцов алмаза, облученного высокоэнергетичными ионами Ni, впервые была обнаружена анизотропия спектров ЭПР относительно магнитной компоненты H_1 поля СВЧ, сопровождающаяся возникновением в спектре дополнительных линий. Так, в случае, когда плоскость имплантации образца перпендикулярна H_1 , в спектрах ЭПР помимо основной резонансной линии L_1 дополнительно возникают линии L_2 и L_3 , когда же H_1 параллельна плоскости имплантации образца, то регистрируется только линия L_1 . Этот эффект возрастает после термической обработки облученного алмаза. При температуре 350°C и выше дополнительные линии регистрируются и в случае, когда плоскость имплантации образца параллельна H_1 .

По аналогии с результатами, полученными на алмазных пленках, имплантированных ионами бора [2], можно предположить, что линии L_1 , L_2 и L_3 представляют собой резонансные моды анизотропных спиновых волн, источником возбуждения которых является парамагнитная система солитонов. Соотношение амплитуд и ширин данных линий, расстояние между ними подчиняется квадратичному дисперсионному соотношению, подобно уравнению Киттеля для тонких металлических ферромагнитных пленок [3]. Однако, условия наблюдения спиновых волн в алмазных пленках и в неотожженном образце алмаза, облученном ионами Ni, существенно отличаются. В неотожженном монокристалле алмаза спиновые волны наблюдаются лишь в случае, когда H_1 перпендикулярна плоскости имплантации образца, т.е. параллельно направлению ионного трека, и не наблюдаются при отклонении от данного направления. Вероятно, этот эффект связан с анизотропией возбуждения спиновых волн и

объясняет анизотропию спектров ЭПР относительно магнитной составляющей СВЧ поля H_1 . Анизотропия возбуждения спиновых волн становится вполне понятна, если принять во внимание одномерную природу трекоподобных модифицированных структур, формируемых при торможении высокоэнергетического иона. Что касается образца алмаза, отожженного до температуры 350 °С и выше, в котором спиновые волны уже наблюдаются и в случае, когда магнитная компонента H_1 поля СВЧ параллельна плоскости имплантации, то этот факт свидетельствует об усилении электрон-электронных корреляций, связанных с атомами углерода в трекоподобных структурах. Это может быть связано с отжигом точечных дефектов при этих температурах.

Принимая во внимание ранее полученные результаты [4], можно сделать вывод, что, во-первых, высокоэнергетичное ионное облучение алмаза приводит к формированию в облучаемых образцах одномерных упорядоченных трекоподобных структур, т. е. образованию углеродной фазы с отличной от sp^3 гибридизацией химических связей. Во-вторых, природа доминирующих в спектрах ЭПР синглетных линий с областью изменения g -фактора вблизи $g = 2.0027$ обусловлена резонансным поглощением на подвижных квазичастицах типа солитонов. Таким образом, в качестве модели ионного трека в алмазе можно рассматривать одномерный низкоразмерный элемент в матрице твердого тела, ориентированный вдоль направления облучения и обладающий высокой степенью упорядоченности атомов.

Список литературы

- [1] Brosious P.R., Corbett J.W., Bourgoin J.C. EPR Measurements in Ion-Implanted Diamond // Phys. Stat. Sol. (a). 1974. Vol.21. P.677-683.
- [2] Erchak D.P., Guseva M.B., Aleksandrov A.F., Alexander H., Pilar van Pilchau A. Spin Waves in Polycrystalline Boron Implanted Diamond Films // JETP Lett. 1993. Vol.58. P.215-218.
- [3] Kittel C. Excitation of Spin Waves in a Ferromagnet by a Uniform rf Field // Phys. Rev. 1958. Vol.110, No.6. P.1295-1297.
- [4] Вариченко В.С., Зайцев А.М., Мартинович В.А., Стельмах В.Ф., Русецкий М.С., Пенина Н.М. Трекообразование в алмазе и кремнии, облученных ионами высоких энергий // Низкоразмерные системы. Сб. Матер. ежегодной отчетной конф. Минск. 1997. С.41-3.