

СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ БОРОМ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ

Д.П.Ерчак, М.Б.Гусева, А.Ф.Александров, Г.Александр*,
А.Пилар фон Пильчау*

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия

* *Universitaet zu Koeln*
D-5000 Koeln, Germany

Поступила в редакцию 29 июня 1993 г.

Впервые обнаружены спиновые волны в неметаллических и немагнитоупорядоченных системах – в квазиодномерных углеродных структурах. Спиновые волны наблюдаются при комнатной температуре и обуславливаются парамагнитными топологическими солитонами. Ориентированные квазиодномерные структуры получены ионной имплантацией алмазных пленок.

Низкоразмерные системы являются в настоящее время предметом повышенного научного и практического интереса. Теоретическое исследование электронной структуры наиболее изученных низкоразмерных систем, таких, как полиацетилен и одномерная аллотропная форма углерода – карбин [1,2], показало, что они обладают рядом свойств, существенно отличных от свойств трехмерных систем. Так, в одномерных структурах на основе углерода, в отличие от трехмерной модификации этого материала – алмаза, легко могут быть реализованы условия образования солитонов [1,2], существование которых в этих структурах хорошо согласуется с серией экспериментальных магниторезонансных исследований полиацетилена, например [3], ориентированных образцов карбина [4], а также с исследованиями ЭПР на квазиодномерных структурах, образующихся в алмазе и алмазных пленках [5,6] в результате ионной имплантации (эффект модификации, то есть образования при определенных условиях имплантации квазиодномерных упорядоченных углеродных структур в алмазе, был обнаружен в работе [5]). Как следует из [7], главную роль в реализации конкретного типа электронной структуры одномерных углеродных систем, то есть реализации состояний, представляющих собой либо волны порядков связи (ВПС), либо волны спиновой плотности (ВСП), либо волны зарядовой плотности (ВЗП), играет величина и характер электрон-электронных корреляций.

В настоящей работе в квазиодномерных углеродных системах впервые обнаружен новый тип электронных возбуждений, являющихся прямым следствием эффекта электрон-электронных корреляций, а именно, спиновые волны, связываемые с парамагнитными топологическими солитонами. В качестве квазиодномерных систем использовались модифицированные структуры, образующиеся в имплантированных слоях поликристаллических алмазных пленок. Алмазные пленки толщиной 0,5 мкм были получены CVD-методом. Имплантация бора (150 кэВ , 10^{14} см^{-2}) осуществлялась в направлении, перпендикулярном поверхности пленки. Измерения ЭПР были проведены на спектрометре Bruker-VE-420 при комнатной температуре.

В спектре ЭПР исходной поликристаллической алмазной пленки наблюдалась малоинтенсивная синглетная изотропная линия с g -фактором 2,0027 и полушириной 6,2 Гс. Спектры ЭПР, наблюдавшиеся в этой пленке после имплантации бора, представлены на рис.1. Как видно из рисунка, спектр

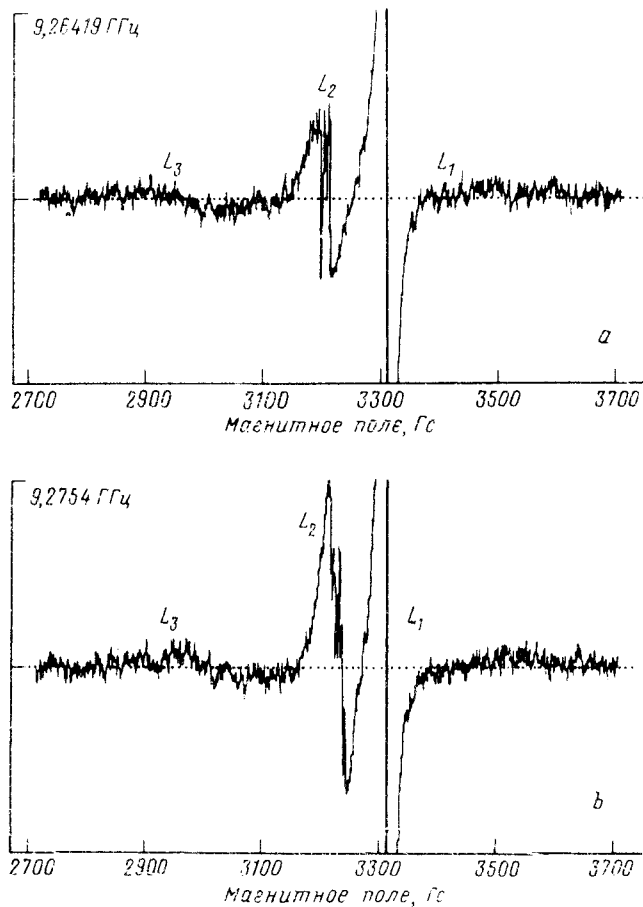


Рис.1. Спектры ЭПР поликристаллической алмазной пленки после имплантации бора (150 кэВ) в направлении магнитного поля H , параллельном (а) и перпендикулярном (б) поверхности пленки

состоит из трех сравнительно широких интенсивных линий L_1 , L_2 , L_3 и ряда относительно узких линий, перекрывающихся с линией L_2 . Исследование характера насыщения резонансного спектра показало, что линии L_1 , L_2 , L_3 принадлежат одной и той же магнитной системе. В то же время закономерность изменения ширины компонент в указанном ряду характерна для спиновых волн. Действительно, линия L_1 , крайняя справа в спектре рис.1, может быть рассмотрена как аналог моды с $n = 0$ сигнала спиновых волн в ферромагнитных металлических пленках [8]. Линии L_2 и L_3 соответствуют модам с $n = 3$ и 5. Положение линий в резонансном спектре описывается также квадратичным дисперсионным соотношением, аналогичным соотношению Киттеля для ферромагнитных металлических пленок:

$$\omega = Ak^2 + \omega_0, \quad (1)$$

$$k = n\pi/d, \quad (2)$$

где d - эффективная толщина структуры, создаваемой налетающим ионом, n

– квантовое число, A – коэффициент, характеризующий электрон-электронное взаимодействие.

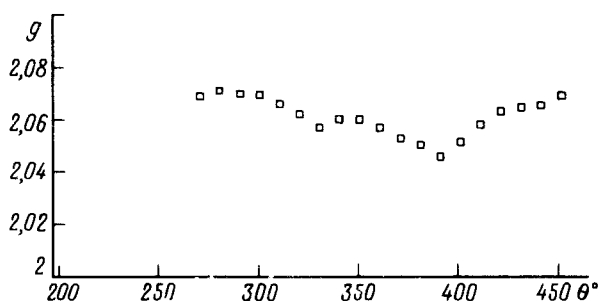


Рис.2. Угловая зависимость эффективного g -фактора линии L_2 , $\theta = 10^\circ$ соответствует направлению **Н**, перпендикулярному поверхности пленки

Из выражений (1), (2) может быть найдено отношение A/d^2 , которое оказалось равным $2,1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ и $1,6 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ для направлений магнитного поля, соответственно параллельного и перпендикулярного поверхности пленки. Дополнительным подтверждением, что L_1 , L_2 , L_3 – спин-волновые моды, является характер угловой зависимости их эффективного g -фактора. На рис.2 представлена угловая зависимость эффективного g -фактора, которая подобна угловой зависимости ширины линии, наблюдавшейся при высокоэнергетичной имплантации неона в монокристаллы алмаза [5]. Это понятно, поскольку как ширина линии [5], так и положение мод спин-волнового резонанса определяются одним и тем же механизмом, а именно, электрон-электронными корреляциями.

Следует заметить, что имеется существенное различие между спиновыми волнами, наблюдаемыми в данном эксперименте, в щелочных металлах и ферромагнитных материалах. В отличие от наблюдаемых нами, спиновые волны в щелочных металлах могут детектироваться только при очень низких температурах, и их резонансный спектр состоит из мод чередующихся полярностей [9]. Линия с $n = 0$ в спектре спиновых волн в ферромагнитных пленках является линией ферромагнитного резонанса. Значение соответствующего ей резонансного поля сильно анизотропно, когда форма образца не является сферической [10], что существенно отличается от наблюдаемого нами почти изотропного значения резонансного поля линии L_1 (рис.1). Кроме того, интенсивность спиновых мод как в щелочных металлах, так и в ферромагнитных пленках сильно уменьшается с возрастанием квантового числа n . В то же время, как было показано в работе [6], резонансная линия L_1 может быть причислена к парамагнитным солитонам. Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что возникновение спиновых волн обусловлено присутствием солитонов, являющихся носителями спина с протяженным распределением спиновой плотности, при этом движение солитонов и распространение спиновых волн представляются взаимосвязанными. В этом случае, поскольку солитоны могут переносить спины или заряды практически без потерь, интенсивность спин-волновых мод с различными квантовыми числами должна быть также практически одинаковой. Действительно, оценка концентраций показала, что величина $V\Delta H_{pp}^2$ (V – амплитуда) в пределах точности измерений одна и та же для исследуемых линий, и общая эффективная концентрация спинов оценивается равной $\approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Тот факт, что в присутствии электрон-электронных корреляций система парамагнитных солитонов может быть источником спиновых волн, позволяет объяснить также

очень высокую эффективную концентрацию участвующих в резонансном поглощении спинов: наряду с передачей энергии из спиновой системы решетке посредством механизма спин-решеточной релаксации происходит быстрое прямое преобразование энергии, поглощаемой спинами солитонов, в кинетическую энергию солитонов [4-6] вследствие гиромагнитной связи их спинового и механического момента в условиях очень малой ($0,002 \text{ эВ}$) [1] энергии активации движения солитонов. Время этого процесса ожидается сопоставимым с временем релаксации кинетической энергии электрона, то есть $\sim 10^{-13} \text{ с}$ [11]. Следовательно, один и тот же солитон может поглощать много раз за время спин-решеточной релаксации, что естественным образом приводит к высокой эффективной концентрации спинов. Следует заметить, что этот механизм хорошо согласуется с наблюдаемыми экспериментально временами $\sim 10^{-13} \text{ с}$ [3] одномерной "диффузии" энергии спинов в системе солитонов в полиацетилене. (Времена релаксации, обусловленные каким-либо механизмом магнитного взаимодействия, должны быть не меньше 10^{-10} с [11]).

Возможность одновременного наблюдения нелинейных (солитоны) и линейных (спиновые волны) свойств квазиодномерных углеродных цепочек может быть объяснена следующим образом. Для одномерных углеродных цепочек энергетически выгодными являются переходы металл-диэлектрик Пайерлса и Мотта-Хаббарда [2,7,12-14]. При этом существует область значений параметров электрон-электронных корреляций, в которой оба перехода могут наблюдаться одновременно [13,14]. В результате перехода Пайерлса имеет место альтернирование длин связей, являющееся физической основой для образования топологических солитонов. В то же время переход Мотта-Хаббарда создает условия для возникновения и распространения спиновых волн. Появление щели в энергетическом спектре углеродной цепочки вследствие упомянутых переходов и глубокое энергетическое состояние этой цепочки, отвечающее присутствию солитона, позволяют понять возможность наблюдения спиновых волн при комнатной температуре.

Авторы выражают благодарность А.А.Гиппиусу за полезное обсуждение и А.М.Зайцеву за предоставленные образцы.

-
1. M.P.Su, J.R.Schrieffer, and A.J.Heeger, *Phys. Rev. B* **22**, 2099 (1980).
 2. M.J.Rice, S.R.Phillpot, A.R.Bishop, and D.K.Campbell, *Phys. Rev. B* **34**, 4139 (1986).
 3. M.Nechtschein, F.Devreux, R.L.Greene et al., *Phys. Rev. Lett.* **44**, 356 (1980).
 4. D.P.Erchak, Ju.P.Kudryavtsev, S.E.Evsyukov et al., *Chem. Phys. Letters*, в печати.
 5. D.P.Erchak, V.G.Efimov, A.M.Zaitsev et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B* **69**, 443 (1992).
 6. D.P.Erchak, V.G.Efimov, I.A.Azarko et al., *Diamond and Related Materials*, 1993.
 7. А.Л.Чугреев, И.А.Мисуркин, *ЖСХ* **30**, 24 (1989).
 8. M.H.Seavey and P.E.Tannenwald, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 168 (1958).
 9. C.Schultz and G.Dunifer, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 283 (1967).
 10. А.Г.Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*, М.: Наука, 1973.
 11. А.Абрагам, *Ядерный магнетизм*, М.: ИИЛ, 1963, с.340.
 12. K.R.Subbaswamy and M.Grabowski, *Phys. Rev. B* **24**, 2168 (1981).
 13. S.Kivelson and D.E.Heim, *Phys. Rev. B* **26**, 4278 (1982).
 14. S.Masumdar and S.N.Dixit, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 292 (1983).