

- [10] Пермогоров С. А. В кн.: Физика соединений A_2B_6 / Под ред. А. Н. Георгобиани, М. К. Шейнкмана. М.: Наука, 1986, с. 146—225.
- [11] Травников В. В., Криволапчук В. В. ФТТ, 1982, т. 24, № 4, с. 961—970.
- [12] Травников В. В., Криволапчук В. В. Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 37, № 9, с. 419—422.
- [13] Nishimura H., Yamano T. J. Phys. Soc. Japan, 1982, vol. 51, N 9, p. 2947—2954.
- [14] Truong van Khiet, Nauailhat A. J. Phys. Soc. Japan, 1981, vol. 50, N 1, p. 121—126.
- [15] Plekhanov V. G., O'Connel-Bronin A. A. Phys. St. Sol. (b), 1978, vol. 86, N 1, p. K123—K125.

Институт физики АН ЭССР
Тарту

Поступило в Редакцию
4 апреля 1988 г.

УДК 538.955

Физика твердого тела, том 30, в. 9, 1988
Solid State Physics, vol. 30, № 9, 1988

ФЕРРОМАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ СПИНОВ ОБОРВАННЫХ СВЯЗЕЙ В АМОРФНОМ ГЕРМАНИИ

Ф. Н. Буханько

Парамагнетизм пленок a -Ge, Si вызван в основном наличием оборванных связей (ОС) и в настоящее время хорошо изучен [1]. Большинство измерений проводилось на отожженных или гидрогенизированных образцах с пониженной концентрацией ОС, в которых спины неспаренных электронов, локализованных на ОС, рассматривались как изолированные. Однако плотность N_s спинов для ОС в неотожженных пленках a -Ge, Si в некоторых случаях бывает довольно высока и может достигать значений 10^{20} — 10^{21} см $^{-3}$ [2]. В таких образцах возможно существование кластеров близко расположенных спинов, связанных обменным взаимодействием, а также возникновение магнитного упорядочения при достаточно низких температурах. Так, например, в пленках a -Ge, Si с $N_s \approx 10^{19}$ см $^{-3}$, полученных различными способами, установлено наличие антиферромагнитного упорядочения большинства спинов при температурах ниже 8 К [3]. В облученном ионами Si в поверхностном слое толщиной 100 Å с $N_s \approx 10^{21}$ см $^{-3}$ обнаружен переход в ферромагнитное состояние при температурах ниже 140 К [4].

В настоящей работе впервые методом магнитного резонанса обнаружено ферромагнитное упорядочение части спинов неспаренных электронов в аморфном германии при температурах ниже 170 К.

Пленки a -Ge толщиной 20—30 мкм были получены методом катодного распыления в атмосфере аргона с осаждением распыляемого материала на стеклянные подложки. Структура пленок контролировалась рентгеновским методом: анализировалась дифракционная картина, полученная на рентгенограммах в Fe-излучении в камере Дебая при комнатной температуре. Отжиг пленок проводился в вакууме 10^{-6} Тор. Для изучения температурной зависимости спектров магнитного резонанса стеклянные подложки стравливались плавиковой кислотой, после чего пленки измельчались.

Запись спектров производилась на супергетеродинном радиоспектрометре на частоте 9.2 ГГц. Образцы в виде измельченных пленок помещались в тефлоновую капсулу нагревателя [5] в пучность H_{102} моды прямоугульного резонатора, помещенного в гелиевый криостат между полюсами электромагнита. Контроль температуры нагревателя осуществлялся с помощью электронного стабилизатора температуры с точностью не хуже ± 0.1 град. Для теплообмена между нагревателем и образцом в криостат напускался гелий.

Во всех исследованных пленках *a*-Ge при 300 К наблюдался сигнал ЭПР в виде одиночной асимметричной линии поглощения с параметрами ($g=2.019 \pm 0.005$, $\Delta H=65$ Э), близкими к хорошо известному спектру поглощения, вызванного неспаренными электронами, локализованными на ОС атомов Ge [1]. Плотность изолированных спинов N_s в различных пленках менялась от 10^{19} до 10^{20} см $^{-3}$ в зависимости от толщины пленок и температуры подложки при напылении. С ростом температуры отжига N_s немонотонно уменьшалась, и при температурах отжига $T_a \geq 500$ °С, когда пленки оказывались закристаллизованы, сигнал ЭПР с $g=2.019$ не наблюдался.

В пленке *a*-Ge толщиной 25 мкм, отожженной при 70 °С ($N_s=2.5 \times 10^{19}$ см $^{-3}$), при температурах образца ниже 200 К было обнаружено расщепление линии ЭПР с $g \approx 2.019$ на две компоненты: линию с $g_1=2.019 \pm$

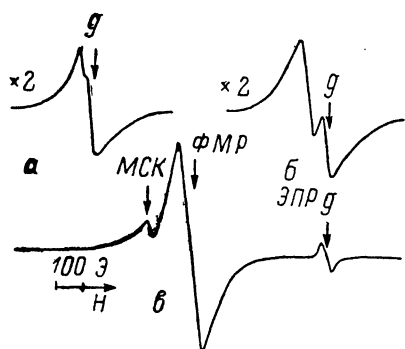


Рис. 1. Вид спектра магнитного резонанса в пленке *a*-Ge ($d=25$ мкм) при низких температурах.

a — расщепление спектра ЭПР для ОС при 190 К; *б* — спектр ЭПР и ФМР для ОС при 170 К; *в* — спектр ЭПР, ФМР и магнитостатического колебания (МСК) при 100 К. $g=2.019$.

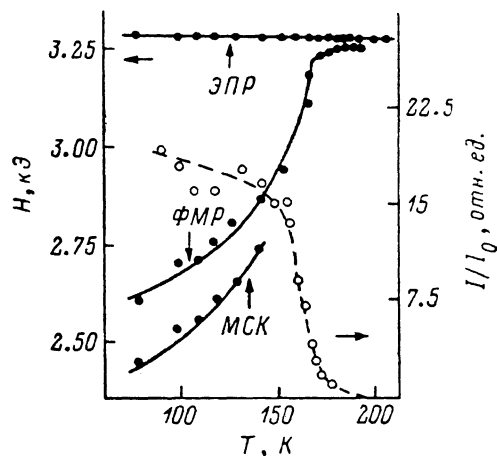


Рис. 2. Температурная зависимость резонансных полей для ЭПР, ФМР и МСК (сплошные линии) и отношения I/I_0 в пленке *a*-Ge ($d=25$ мкм) при низких температурах.

± 0.005 , $\Delta H=37 \pm 2$ Э, соответствующую изолированным спином, и линию дополнительного поглощения (рис. 1). В интервале 160—180 К происходило сужение линии ЭПР и уменьшение ее интенсивности в несколько раз, при этом интегральная интенсивность I дополнительного поглощения возрастала от нуля до величины, в десятки раз превосходящей интегральную интенсивность I_0 остаточного сигнала ЭПР (рис. 2). Положение в магнитном поле и ширина линии ЭПР при $T < 170$ К не зависели от изменений температуры, что согласуется с известным поведением спектра ЭПР изолированных спинов при низких температурах [6]. При $T > 170$ К не наблюдалось значительного изменения резонансного поля и ширины дополнительной линии. Однако при температурах образца ниже 170 К происходило резкое смещение дополнительного резонанса в малые магнитные поля на сотни эрстед, сопровождающееся ее уширением и расщеплением при температурах ниже 150 К (рис. 1, 2). Форма и положение в магнитном поле линии дополнительного поглощения при низких температурах зависели от направления изменения внешнего постоянного магнитного поля. Интенсивный дополнительный резонанс наблюдался в пленке также и после ее отжига при 130 °С, однако дальнейшее повышение T_a привело к полному исчезновению дополнительного сигнала. В остальных исследованных при 77 К пленках *a*-Ge дополнительный магнитный резонанс либо имел малую интенсивность, либо отсутствовал.

Известно, что распределение спиновой плотности ОС в пленках *a*-Ge крайне неоднородно. Согласно литературным данным, а также результатам

наших ЭПР и рентгеновских исследований, можно утверждать, что ОС в a -Ge расположено на поверхностях микропор либо в периферийных областях микронеоднородностей структуры типа кластеров атомов Ge с упорядоченной кубической или гексагональной плотной упаковкой, т. е. занимают относительно малый суммарный объем в немагнитной матрице a -Ge. В этом случае реальная спиновая плотность ОС в отдельных микрообластях значительно превосходит среднее значение N_s , полученное по данным ЭПР о количестве изолированных спинов во всем объеме образца, и может быть порядка 10^{21} см⁻³. При таких концентрациях спинов весьма вероятно ферромагнитное упорядочение части спинов при достаточно низких температурах, которое должно сопровождаться появлением неоднородной намагниченности $M_s(r, T)$ внутри образца.

Наблюдаемая нами при $T < 200$ К относительно узкая ($\Delta H \approx 120$ Э при 100 К) линия дополнительного поглощения имеет форму, близкую к лоренцевой. Мы считаем, что эта линия соответствует ФМР магнитных кластеров, связанных между собой обменным взаимодействием, способным существенно сузить неоднородно уширенную линию ФМР [7]. Известно, что резонансное поле H_0 для ФМР в неоднородном ферромагнетике определяется соотношением $\omega = \gamma[H_0 + H_i(r)]$, где $H_i(r)$ — внутреннее постоянное магнитное поле, обусловленное полями анизотропии и размагничивающими полями, вызванными наличием немагнитных фаз, пор и других видов неоднородностей намагниченности в ферромагнетике. Согласно модели Шлеманна [8], поле $H_i(r)$ в неоднородном ферромагнетике пропорционально величине $M_s(r)$ в образце. В этой связи резкое смещение линии ФМР, обнаруженное нами при температурах ниже 170 К, очевидно, связано с появлением в пленке a -Ge в результате ферромагнитного упорядочения спинов ОС внутреннего поля $H_{vi}(r, T)$, достигающего при 77 К величины 650 Э, пропорциональной величине $M_s(r, T)$ в образце. Следует отметить, что в опытах, проведенных в разное время, наблюдался разброс по интенсивности линии ФМР и соответственно в температурах магнитного упорядочения, что, по-видимому, связано с изменениями плотности спинов в магнитных кластерах. Расщепление линии ФМР при температурах ниже 150 К происходило аналогично обнаруженному ранее расщеплению ФМР в малых ферромагнитных сферах [9] и связано с возбуждением в пленке a -Ge наряду с ФМР магнитостатических колебаний. При температурах выше 170 К линия ФМР трансформируется в более узкую, относительно слабую линию с g -фактором, почти не зависящим от температуры, которая исчезает выше 200 К (рис. 1, 2). В этом интервале температур, по-видимому, существуют кластеры ОС с ближним магнитным порядком, для которых резонансное поле ФМР определяется только гиромагнитным отношением. Таким образом, температурная зависимость обнаруженного нами дополнительного магнитного резонанса хорошо согласуется с известными в литературе особенностями ФМР в неоднородных ферромагнетиках.

Автор благодарен В. Д. Окуневу за предоставленные для исследования пленки a -Ge и З. А. Самойленко за рентгеноструктурный анализ пленок.

Л и т е р а т у р а

- [1] Stutzmann M., Stuke J., Dersch H. Phys. St. Sol. (b), 1983, vol. 115, N 1, p. 141—151.
- [2] Момм Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982, т. 2. 290 с.
- [3] Hudgens S. J. Phys. Rev. B, 1976, vol. 14, N 4, p. 1547—1556.
- [4] Хохлов А. Ф., Павлов П. В. Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 24, № 4, с. 238—240.
- [5] Бухалько Ф. Н., Браташевский Ю. А. ИТЭ, 1974, № 1, с. 241.
- [6] Stutzmann M., Stuke J. Phys. St. Sol. (b), 1983, vol. 120, N 1, p. 225—234.
- [7] Geschwind S., Clogston A. M. Phys. Rev. B, 1957, vol. 108, N 1, p. 49—53.
- [8] Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
- [9] White R. L., Solt I. H. Phys. Rev. B, 1956, vol. 104, N 1, p. 56—62.