

# МАГНИТНАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$

*Г.Н.Абеляшев, В.Н.Бержанский, Ю.В.Федотов*

Предложен способ разделения сигналов ядерного спинового эха внутридоменных и внутрграницых ядер и на его основе показана магнитная гетерогенность ферромагнитных полупроводников типа  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ .

Экспериментальные данные о структуре магнитных фаз в магнитных полупроводниках на основе хромовых халькогенидных шпинелей в многодоменном состоянии в настоящее время отсутствуют. Поскольку реакция ненасыщенного магнетика на внешние воздействия в значительной степени определяется характером доменной структуры, ее изучение в объемных кристаллах ферромагнитных полупроводников представляется актуальным. В данной работе методом ЯМР изучен состав магнитных фаз в кристаллах на основе  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  и определены направления вектора намагниченности  $M$  в доменах в нулевом внешнем магнитном поле. ЯМР на ядрах  $^{53}\text{Cr}$  ( $I = 3/2$ ) регистрировался методом спинового эха при  $T = 4,2$  К.

Атомы Cr в структуре шпинели  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  занимают тригонально искаженные октаэдрические позиции. Поэтому наряду с изостропным сверхтонким взаимодействием (СТВ) в частоту ЯМР дают вклад также магнитное анизотропное и электрическое квадрупольное СТВ. Вид спектра ЯМР  $^{53}\text{Cr}$  зависит от угла между намагниченностью  $M$  и направлениями типа [111], являющимися главными осями тензоров магнитного анизотропного и квадрупольного СТВ. Если известны значения констант всех СТВ для исследуемого ядра, то анализ спектров ЯМР внутридоменных ядер позволяет определить углы между  $M$  и осями типа [111]. Константы СТВ для ядер  $^{53}\text{Cr}$  в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  были определены в<sup>1</sup> путем анализа угловой зависимости спектра ЯМР монокристалла во внешнем насыщающем магнитном поле  $H$ . Однако, в многодоменном  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  спектр ЯМР внутридоменных ядер  $^{53}\text{Cr}$  перекрывается с интенсивным и широким спектром ядер, находящихся внутри доменных границ (ДГ), и разделить эти спектры традиционными методами до сих пор не удавалось. Поэтому в работе<sup>2</sup> эти спектры интерпретировались как результат хаотического распределения направлений  $M$  в кристалле. Одновременное возбуждение внутридоменных и внутрграницых ядер в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  приводит не только к размытию спектра ЯМР, но и к тому, что сигнал спинового эха приобретает сложную форму, которая может быть описана как результат суперпозиции двух компонент, имеющих различные времена релаксации  $T_2^*$  (рис. 1). Компонента, имеющая большее время  $T_2^*$ , связана с сигналом эха от внутридоменных ядер. При записи спектров ЯМР методом спинового эха сигнал на вход накопителя попадает в момент времени, определяемый стробирующим импульсом, который открывает ключевое устройство. В стандартном способе записи стробирующий импульс подается в момент времени  $2\tau$ , когда сигнал эха максимален ( $\tau$  – временной интервал между возбуждающими импульсами). При этом

компоненты спектра не разделяются, и спектр имеет вид (рис. 2, а), подобный приведенному в<sup>2</sup>. В настоящей работе разделение компонент достигается путем подачи стробирующего импульса в момент времени  $2\tau + \Delta t$ , где  $\Delta t$  выбрано так, чтобы  $T_2^{*\text{д.г.}} < \Delta t < T_2^{*\text{д.}}$  (рис. 1). При этом выделяется компонента спектра, обусловленная резонансом ядер в доменах, имеющая большее  $T_2^*$ . Полученный в таких условиях спектр внутридоменных ядер <sup>53</sup>Cr в многодоменном CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> приведен на рис. 2, б. Из сравнения рис. 2, а и 2, б видно, что предлагаемый способ записи спектров ЯМР существенно повышает разрешающую способность метода спинового эха и позволил впервые зарегистрировать спектр внутридоменных ядер в CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>. Данные, полученные при анализе этого спектра, были использованы для идентификации магнитных фаз в ферромагнитных полупроводниках на основе CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> в многодоменном состоянии. Согласно<sup>3</sup>, вектор  $M$  в доменах кубического ферромагнетика при  $H = 0$  в зависимости от соотношения между величинами первой ( $K_1$ ) и второй ( $K_2$ ) констант анизотропии может быть ориентирован вдоль одного из основных кристаллографических направлений типа [111], [110] и [100] (Фазы  $\Phi_{111}$ ,  $\Phi_{110}$  и  $\Phi_{100}$ , соответственно).

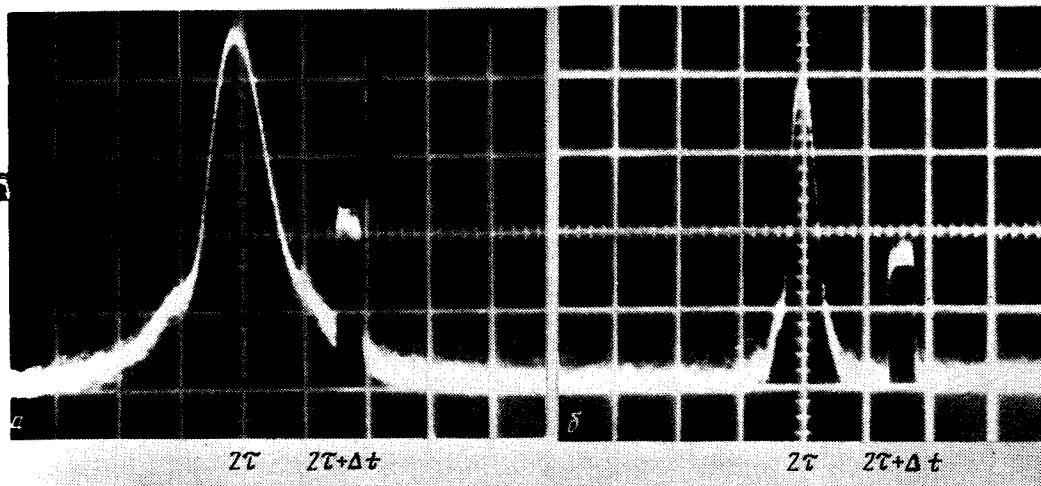


Рис. 1. Осциллограммы сигналов спинового эха ядер <sup>53</sup>Cr в CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> при возбуждении: а – в доменах и доменных границах; б – в доменных границах

В соответствии с данными ФМР<sup>4</sup> в чистом CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>  $K_1 > 0$  и в спектре ЯМР не должна наблюдаться фаза  $\Phi_{110}$ . Однако, спектр (рис. 2, б) имеет тонкую структуру, отражающую наличие трех фаз одновременно. (Линии  $a_2$ ,  $a_3$  принадлежат фазе  $\Phi_{111}$ ;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  –  $\Phi_{110}$ ;  $c$  –  $\Phi_{100}$ ). На рис. 2 пунктиром приведены значения частот наиболее интенсивных линий спектра ЯМР ядер <sup>53</sup>Cr в CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, рассчитанные для различных ориентаций  $M$  с использованием констант СТВ из<sup>1</sup>. При сопоставлении с частотами полученного нами спектра ЯМР внутридоменных ядер многодоменного CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, оказалось, что каждой линии спектра ЯМР внутридоменных ядер с хорошей точностью соответствует расчетное значение частоты, полученное для ориентации  $M$  вдоль одного из трех направлений [111], [110] и [100]. Это означает, что в многодоменном CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> существуют домены с намагниченностью, параллельной основным кристаллографическим направлениям, причем наиболее интенсивной является фаза  $\Phi_{110}$ . Объемы магнитных фаз  $\rho$ , определенные по интенсивности линий перехода  $+ \frac{1}{2} \leftrightarrow - \frac{1}{2}$ , равны:  $\rho_{110} = 84\%$ ;  $\rho_{111} = 8\%$ ;  $\rho_{100} = 8\%$ . Поскольку на фазовой диаграмме кубического ферромагнетика, построенной при учете только  $K_1$  и  $K_2$ , отсутствуют области,

где возможно сосуществование всех трех фаз<sup>3</sup>, можно предположить, что существование фаз в CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> является результатом действия факторов, неучтенных на этой диаграмме. К таким факторам относятся магнитоупругие эффекты и неоднородность распределения примесных ионовалентных ионов хрома по образцу. Для CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, где величины  $K_1$  и  $K_2$  рекордно малы, действие этих факторов может оказаться существенным.

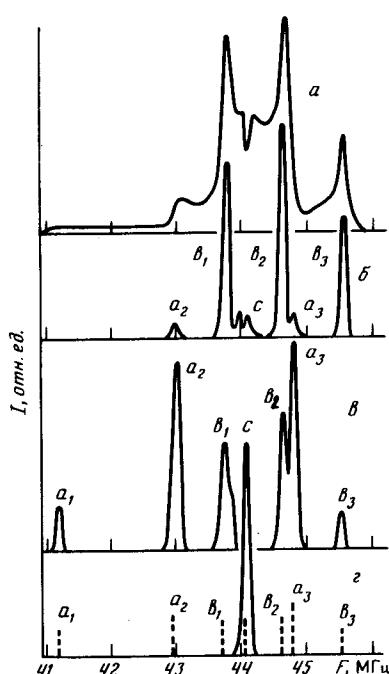


Рис. 2. Спектры ЯМР ядер <sup>53</sup>Cr: а, б – в CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>; в – в Cd<sub>0,985</sub>Ag<sub>0,015</sub>Cr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>; г – в Cd<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>Cr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>; линии  $a_1, b_2, c$  – соответствуют переходу  $+\frac{1}{2} \leftrightarrow -\frac{1}{2}$

С ростом констант анизотропии (величиной и знаком которых можно управлять соответствующим легированием) роль магнитокристаллической анизотропии в формировании фазового состава CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> должна возрастать. В связи с этим, описанным выше методом были исследованы спектры ЯМР ядер <sup>53</sup>Cr в легированных кристаллах: CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> : Ag и CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> : In (рис. 2, в, г). С увеличением концентрации Ag величина  $K_1$  становится отрицательной и растет по модулю<sup>4</sup>. При легировании In константа  $K_1$  растет, оставаясь положительной<sup>5</sup>. В спектре ЯМР Cd<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>Cr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> (рис. 1, г) остается одиночная линия, соответствующая фазе  $\Phi_{100}$  (линия  $c$ ). Поскольку область устойчивости фазы  $\Phi_{100}$  определяется условием  $K_1 \geq 0$ , этот результат согласуется с поведением величины  $K_1$  при легировании. При легировании CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> серебром происходит перераспределение магнитных фаз (рис. 1, г). Фаза  $\Phi_{100}$  исчезает, фаза  $\Phi_{111}$  (линии  $a_1, a_2, a_3$ ) становится доминирующей ( $\rho_{111} = 75\%$ ;  $\rho_{110} = 25\%$ ).

Таким образом, в работе произведено разделение сигналов ЯМР от внутридоменных и внутрграницевых ядер. Показано, что кристаллы CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> в многодоменном состоянии обладают магнитной гетерогенностью и равновесное направление  $M$  в доменах не совпадает с направлением, рассчитанным на основе данных о константах анизотропии, измеренных методом ФМР.

#### Литература

1. Абеляшев Г.Н., Рябченко С.М., Федотов Ю.В. Тезисы XVII Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений. 1985, Донецк.
2. Strauss G.H., Rubinstein M., Feinleib J., Dwight K., Menyuk N. J. Appl. Phys., 1986, 10, 667.
3. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. 1979. М.: Наука.

4. Байрамов А.И., Гуревич А.Г., Карпович В.И., Калинников В.Т., Аминов Т.Г., Эмирян А.М. ФТГ, 1976,  
18, 687.
5. Pinch H.L., Berger S.B. J. Phys. Chem. Solids, 1968, 29, 2091.

Симферопольский государственный университет  
им. М.В.Фрунзе

Институт физики  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
3 ноября 1986 г.