

ДИНАМИЧЕСКИЙ ВКЛАД В МАГНИТНУЮ АНИЗОТРОПИЮ

*К.Г.Никифоров, А.Г.Гуревич, Л.Я.Пасенко,
С.И.Радауцан, Л.М.Эмирян*

В ферромагнетике HgCr_2Se_4 : Au обнаружены "аномалии угловых и температурных зависимостей резонансного поля, которые могут быть объяснены динамическим вкладом в кубическую магнитную анизотропию. Восстановленные "статические" (без этого вклада) зависимости не имеют таких аномалий.

Исследовался ферромагнитный резонанс в кристаллах HgCr_2Se_4 , легированных 2 ат. % золота, выращенных методом химических транспортных реакций¹. Полированные сферы диаметром $\sim 0,7$ мм были ориентированы рентгеновским способом с точностью не хуже 1° . На рис. 1 приведены угловые, а на рис. 2 — температурные зависимости резонансного поля $H_{\text{рез}}$ и ширины линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H$.

Ферромагнетизм HgCr_2Se_4 обусловлен упорядочением магнитных моментов ионов Cr^{3+} , а магнитная анизотропия и релаксация определяются, в основном, ионами Cr^{2+} и Cr^{4+} , которые возникают в процессе роста кристаллов вследствие образования вакансий и легирования. Особенностью HgCr_2Se_4 ^{2,3}, по сравнению, например, с CdCr_2Se_4 ⁴ является сосуществование ионов Cr^{2+} и Cr^{4+} в сравнимых количествах. Необходимо заметить, что в действительности возникают сложные центры, включающие ионы Cr^{2+} и Cr^{4+} , но магнитные свойства, во всяком случае, при низких температурах определяются этими ионами. Максимумы $H_{\text{рез}}$ и $2\Delta H$ на рис. 1 в направлениях $\langle 111 \rangle$ обусловлены ^{2,3} ионами Cr^{2+} , а в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ — ионами Cr^{4+} .

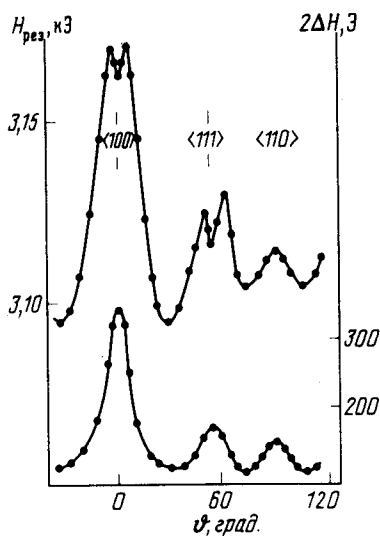


Рис. 1

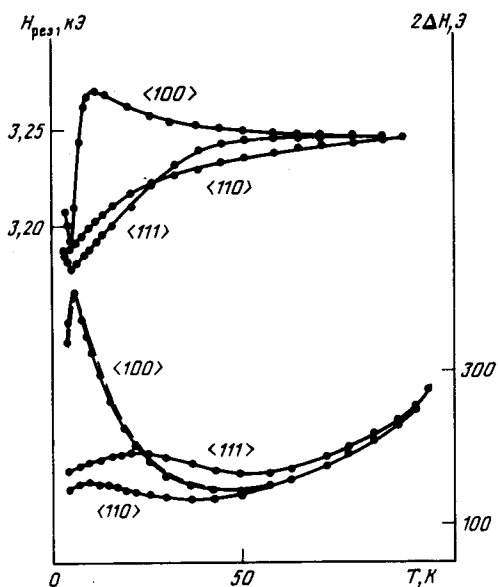


Рис. 2

Рис. 1. Угловые зависимости $H_{\text{рез}}$ и $2\Delta H$ в HgCr_2Se_4 : 2 ат. % Au, $T = 4,2$ К, $f = 8,9$ ГГц, θ — угол в плоскости $\{110\}$ между постоянным полем и осью $\langle 100 \rangle$

Рис. 2. Температурные зависимости $H_{\text{рез}}$ и $2\Delta H$ в HgCr_2Se_4 : 2 ат. % Au, $f = 9,1$ ГГц. Штриховая линия — расчет при $\Delta\epsilon = 7,7$ К и $\tau_{i0} = 5 \cdot 10^{-11}$ с

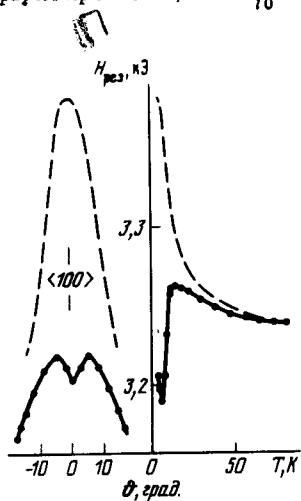


Рис. 3

Рис. 3. Фрагмент угловой (вблизи оси $\langle 100 \rangle$ при $T = 4,2$ К) и температурная (для той же оси) зависимости $H_{\text{рез}}$. Точки — эксперимент, штриховые линии — восстановленные "статические" значения

Зависимости, приведенные на рис. 1 и 2, обладают следующими особенностями, которые, насколько нам известно, ранее не наблюдались: провалы на угловых зависимостях $H_{\text{рез}}$ в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ и низкотемпературные минимумы $H_{\text{рез}}$ для этих направлений. Как

будет показано, эти особенности могут быть объяснены динамическим (или релаксационным) вкладом в магнитную кристаллографическую анизотропию.

Влияние быстрорелаксирующих ионов - с сильной спин-орбитальной связью, какими являются ионы Cr^{2+} и Cr^{4+} , на магнитную анизотропию и релаксацию при ферромагнитном резонансе обычно описывают (см., например, $^{2-5}$) (с помощью теории "медленной" релаксации⁶, которая основана на представлении о запаздывающих изменениях населенностей энергетических уровней ионов, модулируемых прецессией намагниченности. Согласно этой теории динамический вклад этих ионов в резонансном поле

$$\delta H_{\text{рез}} = -\omega\tau_i \Delta H_i, \quad (1)$$

где ω - круговая частота, τ_i - время релаксации населенностей уровней, а ΔH_i - вклад ионов в полуширину резонансной кривой. Для выделения этого вклада из суммарной ширины линии мы предположили, что он является преобладающим при низких температурах и пренебрежимо мал в угловых минимумах ΔH .

Рассмотрим сначала направление $\langle 100 \rangle$. Температурная зависимость τ_i при низких температурах может быть аппроксимирована⁷ следующим образом:

$$\tau_i = \tau_{i0} \text{th} \frac{\Delta\epsilon}{2kT}, \quad (2)$$

где $\Delta\epsilon$ - расстояние между двумя низшими уровнями иона. Значения параметров $\Delta\epsilon$ и τ_{i0} были определены исходя из температурной зависимости $2\Delta H$, причем оказалось, что эта зависимость очень хорошо описывается теорией медленной релаксации (см. рис. 2) при найденных значениях параметров. С использованием полученной таким образом зависимости $\tau_i(T)$ и экспериментальных величин $2\Delta H$ по формуле (1) были рассчитаны $\delta H_{\text{рез}}$ и восстановлены "статические" (за вычетом $\delta H_{\text{рез}}$) значения резонансного поля $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}$. Зависимость $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}(T)$ (рис. 3) является монотонной и хорошо описывается теорией⁶ без динамического вклада, т.е. одноионной теорией анизотропии.

Аналогичным образом в предположении, что τ_i мало изменяется при небольших отклонениях поля от оси $\langle 100 \rangle$, была восстановлена угловая зависимость $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}$ (рис. 3). Она представляет собой одиночный максимум, что находится в согласии с⁶.

В направлении $\langle 111 \rangle$ ионы Cr^{2+} и Cr^{4+} дают сопоставимые вклады, и для восстановления $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}$ необходимо их разделить, найти для каждого динамический вклад и просуммировать их. Такой расчет приводит, как и для направления $\langle 100 \rangle$, к монотонной зависимости $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}(T)$ и максимуму $H_{\text{рез}}^{\text{ст}}(\theta)$ без провала.

Таким образом, обнаруженные "аномалии" угловых и температурных зависимостей $H_{\text{рез}}$ могут быть объяснены динамическим вкладом в анизотропию согласно теории медленной релаксации. Заметим, что другой механизм влияния ионов с сильной спин-орбитальной связью - "быстрая релаксация"⁸ также приводит к соотношению (1), но рассчитанные динамические вклады оказываются слишком малыми. С другой стороны, теория медленной релаксации, хорошо описывающая, как мы видели, температурные зависимости $2\Delta H$ и угловые и температурные зависимости $H_{\text{рез}}$, предсказывают наличие резких угловых минимумов в направлениях $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. Как видно из рис. 1, эти минимумы в нашем случае (как и во многих других работах) не наблюдались. Таким образом, механизм ферромагнитной релаксации в кристаллах HgCr_2Se_4 и аналогичных нуждается в уточнении, возможно, с учетом сложной структуры центров или электронных переходов между ионами. Однако соотношение (1) и при таких уточнениях, по-видимому, останется справедливым.

Литература

1. Пасенко Л.Я., Никифоров К.Г., Радауцан С.И. Кн. Халькогенидные полупроводники. Кишинев, 1985, стр. 26.

2. Эмирян Л.М., Гуревич А.Г., Щукюров А.С. и др. ФТТ, 1981, 23, 2916.
3. Никифоров К.Г., Пасенко Л.Я., Гуревич А.Г. и др. ФТТ, 1985, 27, 229.
4. Гуревич А.Г., Эмирян Л.М., Васильев Л.Н. и др. Изв. АН СССР, сер. физическая, 1980, 44, 1447.
5. Ferreira J.M., Coutinho-Filho M.D. J. Magn. Magn. Mat. 1986, 54 - 58, 1280.
6. Clogston A.M. Bell Syst. Tech. J., 1955, 34, 739.
7. Orbach R. Proc. Roy. Soc. 1961, A - 264, 458.
8. Van Vleck J.H. J. Appl. Phys., 1964, 35, 882.

Институт прикладной физики
Академии наук Молдавской ССР

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 марта 1987 г.