

МАГНИТОСТРИКЦИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА HgCr_2Se_4

В. С. Викторавичюс, А. П. Галдикас, С. И. Гребинский,
С. В. Мицкявичюс, С. Я. Захаров

Влияние магнитного упорядочения на электрические и магнитные свойства ферромагнитного полупроводника HgCr_2Se_4 , выделяющегося среди полупроводников этого класса высокой подвижностью электронов, исследовалось в ряде работ [1, 2]. Однако взаимосвязь между магнитной и фононной подсистемами HgCr_2Se_4 , т. е. магнитоупругие свойства, до сих пор не изучалась. В настоящей работе приводятся результаты измерений констант магнитоэлектричества в HgCr_2Se_4 n - и p -типа. Отметим, что знание этих констант важно как с точки зрения выяснения связи между магнитными и упругими свойствами халькогенидных хромовых шпинелей, так и для интерпретации других экспериментов, например исследования анизотропии магнито- и пьезосопротивления HgCr_2Se_4 [3].

Монокристаллы HgCr_2Se_4 были выращены методом газового транспорта с использованием $2\text{CrCl}_3 + \text{Al}$ в качестве транспортирующего агента. Образцы с разным типом электропроводности получены при варьировании условий роста и специально не легировались. Тип электропроводности определялся по знаку термоэлектродвижущей силы, удельное сопротивление измерялось четырехконтактным методом. Из монокристаллов октаэдрической формы вырезались диски диаметром 0.5—1 мм с базисной плоскостью $(1\bar{1}0)$. Феноменологические константы магнитоэлектричества $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ и $\lambda_{\langle 100 \rangle}$, полностью описывающие явление магнитоэлектричества в кубических кристаллах, определялись из измерений сдвига резонансного поля ферромагнитного резонанса (ФМР) однородной прецессии намагниченности $\delta H = H(P) - H(0)$ при одноосном давлении P по соотношению

$$\lambda_{\langle 111 \rangle; \langle 100 \rangle} = -\frac{1}{3} \frac{\delta H_{\langle 111 \rangle; \langle 100 \rangle}}{\delta P_{\langle 111 \rangle; \langle 100 \rangle}} \frac{\sqrt{(4\pi M \gamma)^2 + 4\omega^2}}{\omega} \frac{\pi r^2 M}{P}, \quad (1)$$

где $\delta H_{\langle 111 \rangle; \langle 100 \rangle}$ — сдвиг резонансного магнитного поля H под влиянием давления P при $H \parallel \langle 111 \rangle$ или $H \parallel \langle 100 \rangle$, $P \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle$; r — радиус диска; M — намагниченность; ω — круговая частота; $\lambda = 1.76 \cdot 10^7$ Гц/Э. Соотношение (1) получено в предположении, что M не зависит от P . Оно отличается от формулы для расчета $\lambda_{\langle 111 \rangle}$, $\lambda_{\langle 100 \rangle}$ в случае сферы [4] множителем $\sqrt{(4\pi M \gamma)^2 + 4\omega^2}/2\omega$. Этот множитель учитывает размагничивающие факторы относительно намагниченного диска и для HgCr_2Se_4 при 78 К, когда $M = 230$ Э, и для частоты измерения $\omega = 2\pi \cdot 9.6 \cdot 10^9$ Гц равен 1.085.

Экспериментальные зависимости H от P были прямыми. Определенные по этим зависимостям при помощи (1) $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ и $\lambda_{\langle 100 \rangle}$, а также удельное сопротивление ρ и ширина линии ФМР ΔH представлены в таблице. Кроме того, в этой таблице показаны значения констант магнитоупругой связи, найденные по соотношениям $B_1 = -3/2 \cdot \lambda_{\langle 100 \rangle} (c_{11} - c_{12})$, $B_2 = -3\lambda_{\langle 111 \rangle} c_{44}$ [5]. Данные о модулях упругости c_{ij} взяты из [6].

Полученные значения констант магнитоэлектричества HgCr_2Se_4 по знаку и величине близки к их значениям для других халькогенидных хромовых шпинелей CdCr_2Se_4 [7, 8] и CdCr_2S_4 [9]. Для CdCr_2Se_4 в [7] в приближении одноионной модели и при учете диполь-дипольного взаимодействия оценены $\lambda_{\langle 111 \rangle} = -(28 \pm 22) \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{\langle 100 \rangle} = -(4 \pm 6) \cdot 10^{-6}$, обусловленные ионами Cr^{3+} . При оценке использовались параметры, найденные для Cr^{3+} в MgO . Из сравнения результатов оценки и эксперимента сделан вывод, что в CdCr_2Se_4 за $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ ответственна одноионная анизотропия ионов Cr^{3+} , а за $\lambda_{\langle 100 \rangle}$ — диполь-дипольное взаимодействие.

	$\rho_{78\text{ К.}}^{\text{Ом} \cdot \text{см}}$	$\Delta H, \text{ Э}$	$\lambda_{\langle 111 \rangle} \cdot 10^6$	$\lambda_{\langle 100 \rangle} \cdot 10^4$	$B_1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^3}$	$B_2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^3}$
$n\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$	300	33	-9 ± 2	-2 ± 2	30 ± 33	102 ± 25
$p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$	1400	35	-12 ± 2	-2 ± 2	30 ± 33	136 ± 26

Отметим, что данные о c_{ij} [6] позволяют уточнить оценку констант магнитострикции: при $T=0$ $\lambda_{\langle 111 \rangle} = -(37 \pm 12) \cdot 10^{-6}$ для HgCr_2Se_4 и $\lambda_{\langle 111 \rangle} = -(45 \pm 14) \cdot 10^{-6}$ для CdCr_2Se_4 .

Однако в [8] для CdCr_2Se_4 были получены гораздо меньшие отрицательные значения $\lambda_{\langle 111 \rangle} \approx -0.7 \cdot 10^{-6}$. Отжиг образцов в вакууме приводил к значительному росту $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ (до $\lambda_{\langle 111 \rangle} \approx -2 \cdot 10^{-4}$). Из этого следует, что за магнитострикцию в CdCr_2Se_4 ответственны не ионы Cr^{3+} , так как их концентрация при термической обработке практически не меняется. Испарение селена при отжиге CdCr_2Se_4 , как показывают исследования анизотропии ФМР [10], обуславливает образование в образцах ионов хрома с неосновной валентностью Cr^{2+} . Орбитальный момент L этих ионов в октаэдрическом окружении ионами Se^{2-} отличен от нуля. Сильная спин-орбитальная связь и приводит, согласно [8], к росту $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ при увеличении концентрации Cr^{2+} . Предположим, что ионы Cr^{2+} ответственны за магнитострикцию при $\mathbf{H} \parallel \langle 111 \rangle$ также и в HgCr_2Se_4 . Тогда одинаковые значения $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ в HgCr_2Se_4 n - и p -типа (см. таблицу) указывают на то, что концентрация Cr^{2+} и, следовательно, дефицит по Se в образцах с разными типами электропроводности того же порядка. Этот вывод не противоречит оценкам концентрации ионов Cr^{2+} , полученным из исследования анизотропии ФМР в HgCr_2Se_4 с разными величинами электропроводности [3, 4], и данным о дефиците Se в HgCr_2Se_4 , определенным из рентгенографического анализа [11].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Белов К. П., Третьяков Ю. Д., Гордеев И. В., Королева Л. И., Кеслер Я. А. // Магнитные полупроводники—халькогенидные шпинели. М.: Изд-во МГУ, 1981. 279 с.
- [2] Selmi A., Mauger A., Heritier H. // JMMM. 1987. V. 66. N 3. P. 295—316.
- [3] Galdikas A., Grebinskii S., Mickevičius S. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 107. N 1. P. K53—K55.
- [4] Smith A. B., Jones R. V. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 4. P. 1283—1284.
- [5] Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных оксидов. Т. 2. М.: Мир, 1976. 504 с.
- [6] Галдикас А. П., Гребинский С. И., Аминов Т. Г., Очертянова Л. И. // Деп. в ЛитНИИТИ. 1988. № 2224.
- [7] Eastman D. E., Shafer M. W. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 12. P. 4761—4763.
- [8] Arai K. I., Kubo V., Tsuya N., Okamoto F., Baltzer P. K. // IEEE Trans. Mag. 1972. V. 8. N 4. P. 479—481.
- [9] Hoekstra B. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 63. N 1. P. K7—K11.
- [10] Гуревич А. Г., Эмпрян Л. М., Васильев Л. Н., Оскотский В. С., Никифоров К. Г., Радауцан С. И., Тэзлэвян В. Е. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1980. Т. 44, № 7. С. 1447—1450.
- [11] Чеботаев Н. М., Симонова М. И., Арбузова Т. И., Глжевский Б. А., Самохвалов А. А. // Изв. АН СССР, неорг. матер. 1985. Т. 21. № 9. С. 1468—1470.

Институт физики
полупроводников АН ЛитССР
Вильнюс

Поступило в Редакцию
4 октября 1988 г.