

Температурная зависимость магниторезистивного эффекта в пленках ферромагнитных полупроводников на основе оксидов редкоземельных элементов

© В.Ф. Кабанов, С.А. Карасев, Я.Г. Федоренко[¶]

Саратовский государственный университет,
410026 Саратов, Россия

(Получена 8 июня 2000 г. Принята к печати 26 июля 2000 г.)

Рассмотрена и проанализирована температурная зависимость эффекта положительного магнитосопротивления в пленках некоторых оксидов редкоземельных элементов (гадолиния, европия и твердого раствора европия с самарием) в области температуры Кюри. Показано, что ход температурной зависимости эффекта, его знак и величина определяются зависимостью величины магнитного момента магнитного кластера как от напряженности внешнего магнитного поля, так и от параметров пленок — величины спина магнитного иона, обменной энергии, концентрации дефектов и ряда других.

Ранее был рассмотрен эффект положительного магнитосопротивления, обнаруженный в пленках некоторых оксидов редкоземельных элементов (ОРЗЭ) и не характерный для данного класса материалов [1]. Цель настоящей работы — изучение и анализ температурной зависимости эффекта вблизи области магнитного фазового перехода (температуры Кюри).

Нами исследовались оксиды редкоземельных элементов европия, гадолиния, твердого раствора европия с самарием, полученные на монокристаллической кремниевой подложке *n*-типа методом термического испарения в вакууме соответствующей лигатуры и последующим окислением. Толщина пленок составляла 0.1 мкм; в качестве электродов использовались алюминиевые контакты. Измерялся поперечный ток через структуру в режиме обогащения на границе ОРЗЭ—кремний. Эффект магнитосопротивления измерялся по изменению тока в диапазоне изменения величины напряженности магнитного поля $H = 3.0 \div 7.5$ кЭ, температуры $T = 77 \div 300$ К, напряженности электрического поля $E = 10^3 \div 10^6$ В/см. Направление вектора магнитной индукции магнитного поля **B** было выбрано параллельно вектору плотности электрического тока **j**.

Типичные результаты температурных зависимостей величины удельного магнитосопротивления ($\Delta\rho/\rho_0$) указанных пленок представлены на рис. 1. Практически для всех исследуемых образцов величина $\Delta\rho/\rho_0$ в области температуры Кюри T_c [1] обнаруживала скачкообразное уменьшение. Диапазон значений T_c для различных образцов находился от 90 до 110 К. В области $T < T_c$ (ближняя ферромагнитная область) величина удельного магнитосопротивления практически не зависела от температуры; в ближней парамагнитной области ($T > T_c$) наблюдался достаточно гладкий спад величины $\Delta\rho/\rho_0$, которая в ряде образцов имела значение более 1% и при $T > 200$ К. В ближней ферромагнитной области при $T = 77$ К исследовались зависимости величины удельного магнитосопротивления образцов различного

состава от напряженности внешнего магнитного поля. Полученные зависимости, имеющие практически линейный характер в рассматриваемом диапазоне напряженности магнитного поля, представлены на рис. 2.

На основании известных теоретических представлений [2,3] был сделан вывод о наличии в исследуемых пленках флуктуаций намагниченности (магнитных кластеров), связанных с группированием вблизи дефектов (обычно обусловленных вакансиями кислорода [4]) магнитных ионов РЗЭ, благодаря более сильному обменному взаимодействию и соответственно более сильной ферромагнитной связи в данной области. Величина магнитного момента кластера **K** намного превышает величину магнитного момента одного редкоземельного иона, что дает существенный вклад в рассеяние свободных носителей заряда флуктуациями намагниченности в области

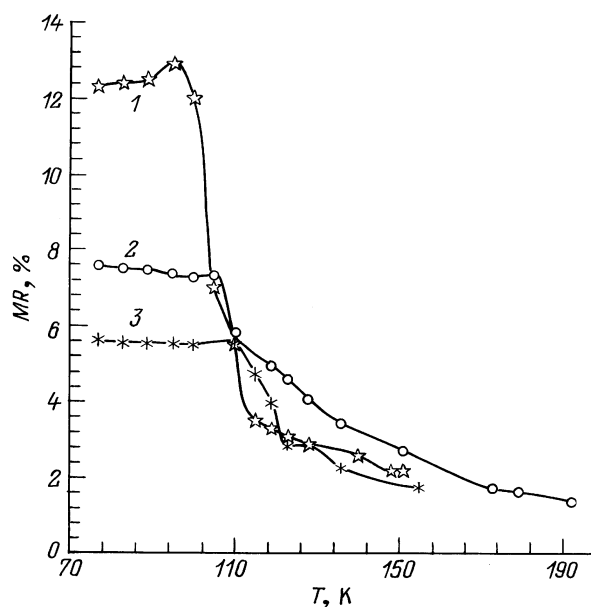


Рис. 1. Температурная зависимость удельного магнитосопротивления. 1, 3 — различные образцы оксида твердого раствора европия с самарием, 2 — оксид гадолиния. $H = 7.6$ кЭ.

[¶] E-mail: fedorenko@info.sgu.ru

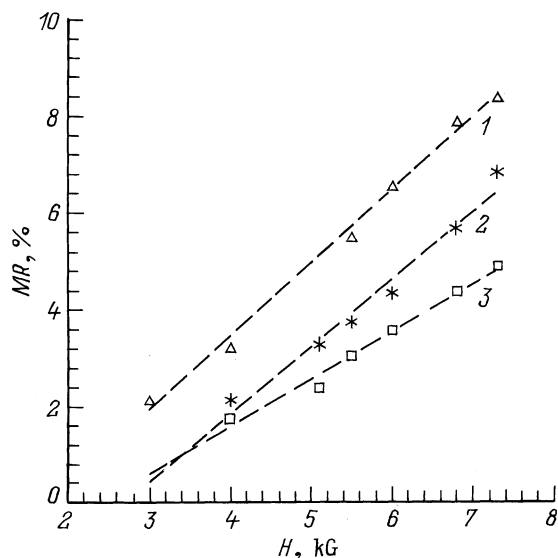


Рис. 2. Зависимость удельного магнитосопротивления от напряженности магнитного поля H . 1 — оксид гадолиния, 2 — оксид самария, 3 — оксид твердого раствора европия с самарием. $T = 77$ К.

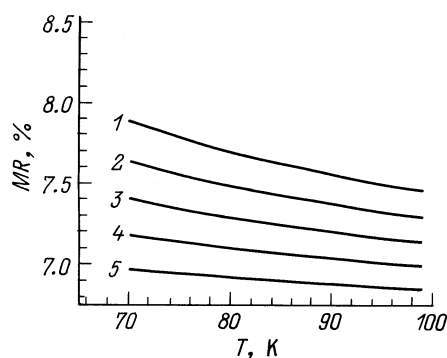


Рис. 3. Температурная зависимость удельного магнитосопротивления в ближней ферромагнитной области температур, E_i , эВ: 1 — 0.1, 2 — 0.15, 3 — 0.2, 4 — 0.25, 5 — 0.3. $H = 7$ кЭ, $n = 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, $z = 12$.

магнитного фазового перехода. Внешнее магнитное поле может не только подавлять эти флуктуации, что характерно для объемных образцов рассматриваемых материалов (эффект отрицательного магнитосопротивления), но и усиливать их. Например, если в отсутствие поля кластеры расположены хаотически и средняя намагниченность по образцу мала, то поле может вызвать появление дополнительной намагниченности кластеров, величина которой флуктуирует вместе с электронной плотностью. Следствием рассмотренного выше процесса будет появление положительного магнитосопротивления, величина которого является сложной функцией, зависящей от напряженности внешнего магнитного поля, температуры, электронной плотности вблизи дефекта и ряда параметров самого материала. Важным представ-

ляется то, что суммарный момент магнитных ионов вблизи дефекта (K) может быть достаточно большим и в парамагнитной области температур.

В [2] анализ температурной зависимости магнитосопротивления проводился с помощью использования функции положительной обратной связи (Γ_0), через которую выражается эффективное поле, действующее на электрон. Это поле включает в себя электрическое поле в кристалле и обмен электрона с магнитными ионами.

В случае слабых магнитных полей в ближней ферромагнитной области температур с учетом доминирования косвенного обмена можно записать:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{2HS}{T_c} \cdot \frac{\Gamma_0}{1 - \Gamma_0}, \quad (1)$$

где

$$\Gamma_0 = Q \cdot T, \quad (2)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{N}{n} \cdot \frac{1}{E_i}, \quad (3)$$

N — концентрация магнитных ионов, n — концентрация локализованных в окрестности дефекта носителей заряда (определяется плотностью состояний на уровне дефекта), E_i — энергетическая глубина донорного уровня, S — величина спина магнитного иона.

Рассчитанные кривые для рассматриваемой области температур при следующих параметрах: $H = 7$ кЭ, $S = 7/2$, $N/n = 2 \cdot 10^2$, E_i от 0.1 до 0.3 эВ, $T_c = 100$ К представлены на рис. 3. Видно удовлетворительное качественное (а при подборе варьируемых параметров и количественное) согласование с экспериментальными результатами (рис. 1, 2): по знаку эффекта, его величине и ходу температурной и полевой зависимости.

В парамагнитной области температур полученные по соответствующим формулам [2] кривые $\Delta\rho/\rho_0(T)$ совершенно не коррелировали с экспериментальными данными ни по величине эффекта, ни по форме зависимости от температуры. В связи с этим нами был использован следующий подход. Известно, что время релаксации при рассеянии носителей магнитными кластерами в ближней парамагнитной области связано с величиной момента кластера следующим образом: $\tau \sim K^{-2}$. [2,5]. Задавая зависимость величины магнитного момента кластера от параметров материала и внешних воздействий, можно оценить изменение времени релаксации и соответственно величины удельного магнитосопротивления.

Мы предположили, что величину магнитного момента кластера можно представить в виде

$$K = K_0 + \Delta K, \quad (4)$$

где $K_0 = zS$ — величина магнитного момента кластера, обусловленная количеством магнитных ионов (z), входящих в кластер;

$$\Delta K = \frac{S(S+1)}{3(T-T_c)} \left(H + \frac{A n}{2 N} \right) \quad (5)$$

— дополнительная локальная намагниченность, которая определяется как внешними воздействиями (H, T), так

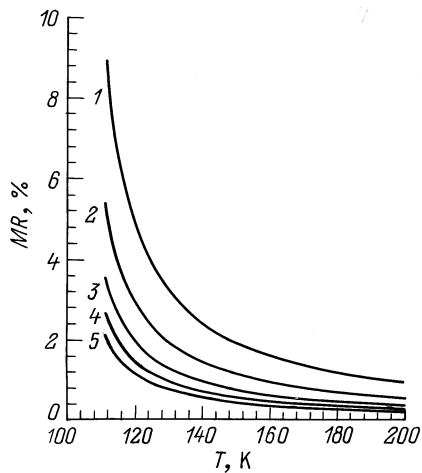


Рис. 4. Температурная зависимость удельного магнитосопротивления в ближней парамагнитной области температур, z : 1 — 12, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50. $H = 7$ кЭ, $n = 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$.

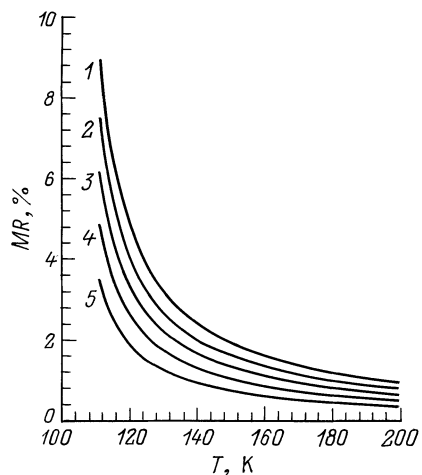


Рис. 5. Температурная зависимость удельного магнитосопротивления в ближней парамагнитной области температур, n , 10^{18} см $^{-3}$: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 4, 5 — 5. $H = 7$ кЭ, $z = 12$.

и параметрами материала (A — величина обменной энергии).

После несложных преобразований получаем следующую зависимость величины удельного магнитосопротивления при наличии внешнего магнитного поля:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \cong \left(1 + \frac{S+1}{3z(T-T_c)} \left(H + \frac{A}{2} \frac{n}{N}\right)\right)^2 - 1. \quad (6)$$

В отсутствие поля величина магнитосопротивления равна нулю.

В работе рассматривалась температурная зависимость полученного выражения (6) для различных значений параметров исследуемых пленок, находящихся в диапазоне величин, характерных для данных материалов: n изменялась от 10^{18} до $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, z от 12 до 50,

$A = 0.12$ эВ, $H = 7$ кЭ, $T_c = 100$ К. Соответствующие результаты представлены на рис. 4, 5. При сравнении их с экспериментальными данными (рис. 1) видно хорошее согласование рассчитанных кривых как по ходу температурных зависимостей удельного магнитосопротивления, так и по величине и знаку эффекта.

Таким образом, в данной работе проанализирована температурная зависимость эффекта положительного магнитосопротивления в пленках ОРЗЭ в ближней ферро- и парамагнитной областях с точки зрения рассеяния носителей заряда на флуктуациях намагниченности. Показано, что ход температурной зависимости эффекта, его знак и величина определяются зависимостью величины магнитного момента кластера как от напряженности внешнего магнитного поля, так и от параметров исследуемых образцов (величины спина магнитного иона, обменной энергии, концентрации дефектов и ряда других).

Список литературы

- [1] В.Ф. Кабанов, А.М. Свердлова. ФТП, **31**, 626 (1997).
- [2] Э.Л. Нагаев. *Физика магнитных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [3] В.А. Капустин. В сб.: *Редкоземельные полупроводники* (Л., Наука, 1977) с. 82.
- [4] В.Г. Бамбуров, А.С. Борухович, А.А. Самохвалов. *Введение в физикохимию ферромагнитных полупроводников* (М., Металлургия, 1988).
- [5] В.Ф. Кабанов. ФТП, **26**, 1837 (1992).

Редактор В.В. Чалдышев

Temperature dependence of magnetoresistance effect on ferromagnetic semiconductor films based on rare earth oxides

V.F. Kabanov, S.A. Karasev, Y.G. Fedorenko

Saratov State University,
410026 Saratov, Russia

Abstract The temperature dependence of positive magnetoresistance effect on rare earth oxides GdO, EuO, Eu $_{1-x}$ Sm $_x$ O has been analysed in ferro- and paramagnetic temperature range near phase transition temperature. The essential influence of carrier scattering by the magnetic cluster momentum was found out. The temperature dependence of magnetoresistance and its magnitude are conditioned by the magnetic field magnitude and film parameters. These are magnetic ion spin magnitude, the exchange interaction energy, and the defect density in the films.