

## Эффект положительного магнитосопротивления в пленках ферромагнитного полупроводника $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$

© В.Ф. Кабанов, А.М. Свердлова

Саратовский государственный университет,  
Саратов, Россия

(Получена 12 мая 1996 г. Принята к печати 8 июля 1996 г.)

Рассмотрен эффект положительного магнитосопротивления в пленке ферромагнитного полупроводника  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$ , который не является характерным для данного класса материалов. Исследовано влияние на эффект положительного магнитосопротивления внешних магнитного и электрического полей, температуры. Показано, что величина магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  определяется рассеянием свободных носителей заряда на пространственных флуктуациях намагниченности, которые обусловлены неравномерным распределением дефектов в структурно-неупорядоченной системе (квазиаморфная пленка).

Известно, что некоторые оксидные соединения редкоземельных элементов, в частности, монооксид европия  $\text{EuO}$  и твердые растворы на его основе  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$ , являются ферромагнитными материалами. Настоящая работа посвящена исследованию эффекта положительного магнитосопротивления, обнаруженного в пленках  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$  и не характерного для данного класса магнитных полупроводников.

В работе исследованы свойства пленок оксида твердого раствора европия с самарием, полученных на монокристаллической кремниевой подложке  $n$ -типа проводимости термическим испарением 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 (оксид редкоземельного элемента)–кремний. Измерения сопротивления проводились в температурном диапазоне  $77 \div 300$  К в магнитном  $H = 3.0 \div 7.6$  кЭ и электрическом  $E = 10^3 \div 10^6$  В/см полях.

Полученные результаты представлены на рис. 1–4. В ферромагнитной области температур обнаружен эффект положительного магнитосопротивления. Как видно из рис. 1, 2, имеет место линейная зависимость изменения удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  от напряженности магнитного поля в рассматриваемом диапазоне. Такой вид характеристики практически не зависел от ориентации вектора магнитного поля относительно электрического (рис. 2). Величина эффекта при  $H = 7.6$  кЭ достигала обычно единиц процентов, на отдельных образцах была значительно выше (до 20%).

Величина удельного магнитосопротивления от напряженности электрического поля (при фиксированных значениях температуры и напряженности магнитного поля — см. рис. 3) для различных образцов имеет максимум при  $E \simeq (2 \div 3) \cdot 10^5$  В/см, подъем в области полей  $(0.7 \div 2) \cdot 10^5$  В/см, пологий спад в интервале  $(4 \div 10) \cdot 10^5$  В/см. Для сравнения на рис. 3 приведена кривая зависимости удельной электропроводности ( $\sigma$ ) от напряженности электрического поля.

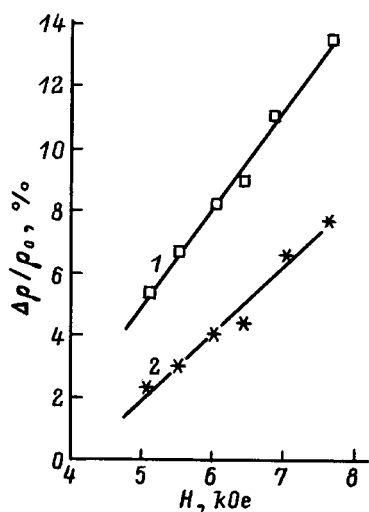
Величина  $\Delta\rho/\rho_0$  (рис. 4) обнаруживает достаточно резкий спад в области температуры Кюри  $T_c$  и при  $T > T_c$  снижается практически до нулевых значений. Здесь же помещена зависимость  $\sigma(T)$ .

Для объяснения эффекта положительного магнитосопротивления в пленках магнитных полупроводников мы воспользовались моделью магнитных кластеров [1], которая ранее применялась для анализа механизмов рассеяния в ближней парамагнитной области температур [2]. Вокруг различного рода нарушений благодаря более сильной ферромагнитной связи между дефектами и регулярными магнитными ионами  $\text{Eu}^{2+}$  образуется область (магнитный кластер) с аномально большим магнитным моментом  $\mathbf{K}$ , значительно превышающим величину спина иона европия  $\mathbf{S}_{\text{Eu}}$ . Исследуемые пленки являются сильно дефектными, квазиаморфными структурами [3], в которых возможно существование магнитных кластеров.

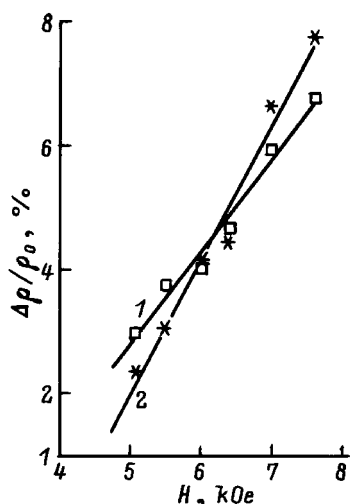
Величина момента кластера является геометрической суммой соответствующих проекций ионов, входящих в кластер, на выбранное направление намагничивания. Таким образом имеющие место флуктуации намагниченности могут быть доминирующими центрами рассеяния свободных носителей заряда (в данном случае электронов).

В образцах с эффектом отрицательного магнитосопротивления (характерного для обычных ферромагнитных полупроводников типа  $\text{EuO}$ ) при  $T \leq T_c$  внешнее магнитное поле вызывает подавление флуктуаций намагниченности. Это сопровождается увеличением подвижности носителей и уменьшением сопротивления в магнитном поле.

В нашем случае во внешнем магнитном поле также должно быть подавление флуктуаций. Однако в условиях высокой концентрации дефектов в исследуемых пленках и низкой температуры  $T \leq T_c$  существенную роль может играть неоднородность магнитных свойств пленки. В слабом магнитном поле благодаря пространственно-неоднородной намагниченности может происходить усиление флуктуаций намагниченности (неоднородно расположенных кластеров). Это позволяет объяснить положительное магнитосопротивление, обусловленное рас-



**Рис. 1.** Зависимость удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  от напряженности магнитного поля  $H$ . 1, 2 — различные образцы.  $T = 77\text{ K}$ ,  $E = 2.5 \cdot 10^5\text{ В/см}$ .

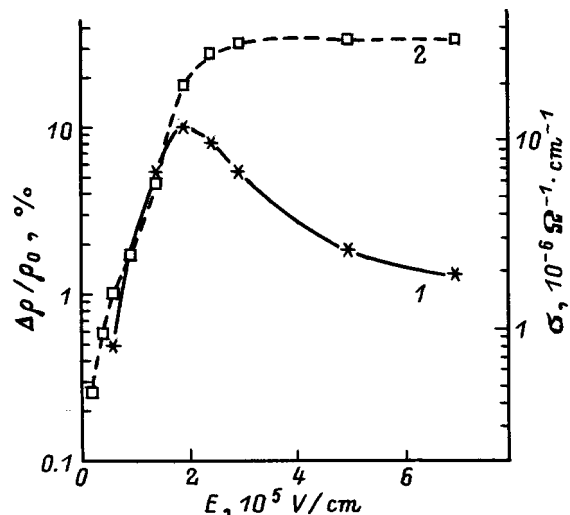


**Рис. 2.** Зависимость удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  от напряженности магнитного поля  $H$ . 1 —  $\mathbf{H} \perp \mathbf{j}$ , 2 —  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{j}$ .  $T = 77\text{ K}$ ,  $E = 2.5 \cdot 10^5\text{ В/см}$ .

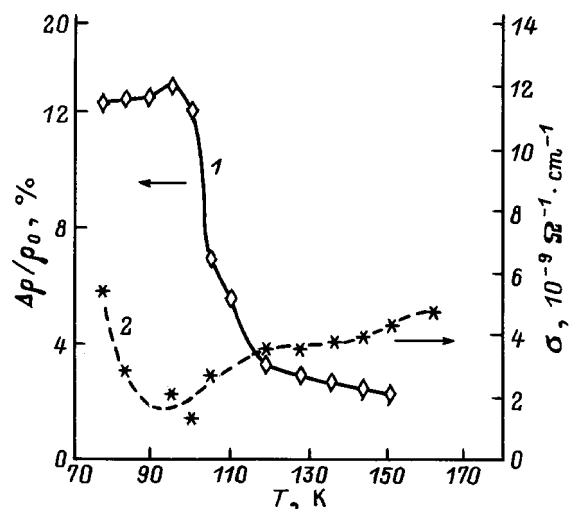
сеянием на увеличенных в магнитном поле магнитных моментах кластеров, и линейно возрастающее с напряженностью поля, как следует из эксперимента.

Данная точка зрения подтверждается тем, что изменение направления магнитного поля  $\mathbf{H}$  по отношению к вектору плотности тока носителей  $\mathbf{j}$ , совпадающему с вектором  $\mathbf{E}$ , не влияет на характеристики. Наблюдаемые различия значений  $\Delta\rho/\rho_0$  в зависимости от параллельного или перпендикулярного расположения векторов  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{j}$  объясняются известным эффектом магнитной анизотропии в исследуемых пленках [4].

Ранее эффект положительного магнитосопротивления наблюдался на образцах антиферромагнетиков  $\text{EuSe}$ ,  $\text{EuTe}$ . Для сильно дефектных материалов было дано



**Рис. 3.** Зависимость удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  (1) и удельной электропроводности  $\sigma$  (2) от напряженности электрического поля  $E$ .  $T = 77\text{ K}$ ,  $H = 7.6\text{ кЭ}$ .



**Рис. 4.** Температурная зависимость удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho_0$  при  $E = 3 \cdot 10^5\text{ В/см}$ ,  $H = 7.6\text{ кЭ}$  (1) и удельной электропроводности  $\sigma$  при  $E = 10^3\text{ В/см}$  (2).

следующее объяснение этого эффекта. В антиферромагнетике слабое магнитное поле способствует образованию ферромагнитных кластеров, рассеяние на которых и увеличивает сопротивление [5], что использовано нами при обсуждении.

Для анализа зависимости магнитосопротивления от напряженности электрического поля в образце необходимо учитывать, что электрическое поле в магнитных материалах изменяет не только электрические свойства, но и магнитное упорядочение. Известно [1], что для существования магнитоэлектрического эффекта электрическое поле должно быть неоднородным. В исследуемых нами образцах данная ситуация удачно реализуется, так как в них имеют место различные по величине

межкристаллитные барьеры, распределенные по образцу. Показано [6], что в пленках  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$  основной вклад в механизм электропроводности дает эффект Пула–Френкеля, связанный с понижением барьеров в указанном интервале напряжений. В электрических полях до  $\sim 3 \cdot 10^5$  В/см наблюдается резкое увеличение концентрации свободных электронов (рост  $\sigma$  на рис. 3), и при сохранении электрических барьеров можно говорить о существенно неоднородном распределении плотности свободных электронов по образцу. Увеличение концентрации электронов в окрестности дефекта усиливает ферромагнитную связь вблизи него и приводит к локальному возрастанию намагниченности. Рассеяние носителей увеличивается, подвижность падает, положительное магнитосопротивление растет.

В электрических полях, больших  $3 \cdot 10^5$  В/см, барьеры снижаются, что приводит к более равномерному распределению плотности носителей заряда, соответственно ослабевают и флуктуации намагниченности, рассеяние на них снижается, величина  $\Delta\rho/\rho_0$  падает.

Как видно, зависимость величины удельного магнитосопротивления от напряженности электрического поля имеет максимум при  $E \simeq 3 \cdot 10^5$  В/см в условиях эксперимента ( $T < T_c$  и слабые магнитные поля). Указанное значение  $E$  было получено нами ранее [6], и оно соответствовало напряжению изменения механизма токопрохождения в исследуемых пленках. В более сильных полях доминирующим становится механизм термополевой ионизации ловушек.

Полученная в работе температурная зависимость  $\Delta\rho/\rho_0$  (рис. 4) обнаруживает резкий спад при  $T \geq T_c$ , который имеет место благодаря уменьшению величины магнитного момента кластера с ростом температуры  $|\mathbf{K}| \sim 1/T$ . Это происходит в связи с температурным разуплотнением магнитных ионов внутри кластера и, возможно, разрушением самого кластера при более высоких значениях  $T$ . В области  $T \leq T_c$  величина  $\Delta\rho/\rho_0$  практически не изменяется, хотя получено, что в этой области температур электропроводность образцов увеличивается вследствие увеличения подвижности из-за спонтанной намагниченности.

Это свидетельствует о том, что эффект положительного магнитосопротивления имеет место только при температурах порядка  $T_c$  и ниже, когда существующая в этой области температур спонтанная намагниченность отражает неоднородность свойств в образце. Неоднородность намагниченности увеличивается внешним магнитным полем, что вызывает увеличение рассеяния носителей, уменьшение подвижности и появление эффекта положительного магнитосопротивления. При высоких температурах,  $T > T_c$ , исчезает спонтанная намагниченность и, соответственно, эффект положительного магнитосопротивления.

Таким образом, в данной работе рассмотрен эффект положительного магнитосопротивления в пленке ферромагнитного полупроводника  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$ , который не является характерным для данного класса материалов.

Исследовано влияние на эффект положительного магнитосопротивления внешних магнитного и электрического полей, температуры. Показано, что величина  $\Delta\rho/\rho_0$  определяется рассеянием свободных носителей заряда на пространственных флуктуациях намагниченности, которые обусловлены неравномерным распределением дефектов в структурно-неупорядоченной системе (квази-аморфная пленка).

## Список литературы

- [1] Э.Л. Нагаев. *Физика магнитных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [2] В.Ф. Кабанов. ФТП, **26**, 1837 (1992).
- [3] О.С. Вдовин, В.Н. Котелков, В.А. Рожков и др. *Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ и МДП структурах* (Саратов, Изд-во Сарат. ун-та, 1983).
- [4] В.Г. Бамбуров, А.С. Борухович, А.А. Самохвалов. *Введение в физико-химию ферромагнитных полупроводников* (М., Металлургия, 1988).
- [5] В.А. Кашин, Э.Л. Нагаев, Письма ЖЭТФ, **21**, 126 (1975).
- [6] В.Ф. Кабанов, А.М. Свердлова. ФТП, **25**, 1388 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

## Effect of positive magnetoresistance in films of ferromagnetic $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$ semiconductor

V.F. Kabanov, A.M. Sverdlova

Saratov State University, Saratov, Russia

**Abstract** A study has been made of the effect of positive magnetoresistance in a ferromagnetic  $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}$  semiconductor. The effect is not characteristic of this class of materials. The results indicate that the value of positive magnetoresistance is determined by carrier scattering by magnetic moments of disordered regions, which take place thanks to the uneven distribution of defects in a disordered–structure system (a quasi–amorphous film).