

## О ВЛИЯНИИ МАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ $p$ -ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

Георгицэ Е. И., Иванов-Омский В. И., Мастеров В. Ф., Мунтяну Ф. М.

Исследовано магнитосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  образцов антимолида галлия, легированного марганцем, железом и гадолинием, в диапазоне магнитных полей 0–14 Т при температуре 4.2 К. Концентрация вводимых примесей изменялась в пределах 0.005–1 %. Показано, что в образцах антимолида галлия, легированных марганцем, в области магнитных полей до 4 Т наблюдается эффект отрицательного магнитного сопротивления. Величина отрицательного магнитного сопротивления растет с увеличением концентрации вводимого марганца. В антимолиде галлия, легированного марганцем, отрицательное магнитное сопротивление обусловлено спиновым рассеянием дырок на магнитных моментах ионов марганца.

Наличие поляризационного магнитного момента ионов железа и гадолиния в матрице антимолида галлия не приводит к эффекту отрицательного магнитного сопротивления в этих образцах.

Интерес к изучению свойств примесей переходных металлов в  $A^{III}B^V$  прежде всего связан с выяснением причин сильной локализации носителей заряда, а также с необходимостью развития представлений о глубоких центрах [1].

Известно [1, 2], что ионы металлов с незаполненной  $d$ - или  $f$ -оболочкой в кристаллической решетке соединений  $A^{III}B^V$  располагаются в узлах катионной подрешетки и существенно влияют на процессы рассеяния электронов (дырок) проводимости, особенно при низких температурах. Одно из проявлений этого влияния — эффект отрицательного магнитосопротивления (ОМС), который подробно изучен во многих соединениях  $A^{III}B^V$  [3, 4], исключение составляет антимолид галлия. Для объяснения данного явления предложены различные модели возникновения локализованных магнитных моментов и рассеяния электронов проводимости на них [5–9], но вероятность их реализации в каком-то конкретном материале или диапазоне концентраций легирующей примеси неоднозначна. В связи с этим представляет интерес изучение влияния магнитных примесей на гальваноманнитные явления в антимолиде галлия  $p$ -типа проводимости.

В настоящей работе приведены результаты исследования особенностей магнитосопротивления антимолида галлия  $p$ -типа проводимости, легированного магнитными примесями: железом, марганцем, гадолинием. Исследуемые кристаллы антимолида галлия, легированного железом, марганцем и гадо-

№ образца	Содержание примеси, %	$T = 77\text{ К}$		$T = 300\text{ К}$	
		$N_A - N_D$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> · В <sup>-1</sup> · с <sup>-1</sup>	$N_A - N_D$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> · В <sup>-1</sup> · с <sup>-1</sup>
1	0	$3 \cdot 10^{16}$	1970	$1.4 \cdot 10^{17}$	597
2М	0.005	$1.5 \cdot 10^{16}$	1600	$2.0 \cdot 10^{17}$	550
3М	0.01	$6.0 \cdot 10^{16}$	1530	$3.0 \cdot 10^{17}$	450
4М	0.1	$1.1 \cdot 10^{17}$	930	$3.3 \cdot 10^{17}$	520
5М	1	$3.2 \cdot 10^{18}$	200	$3.3 \cdot 10^{18}$	220
6Ф	0.01	$3.9 \cdot 10^{16}$	1500	$2.1 \cdot 10^{17}$	530
7Г	0.01	$2.4 \cdot 10^{16}$	2163	$1.50 \cdot 10^{17}$	710

Примечание. М — образец, легированный марганцем; Ф — образец, легированный железом; Г — образец, легированный гадолинием. Тип проводимости —  $p$ .

линием, выращены модифицированным методом зонной плавки. Равномерное распределение примесей по длине слитка достигнуто в результате неоднократного зонного выравнивания. Железо, марганец или гадолиний особой чистоты вводили в шихту в концентрациях соответственно  $0.005 \div 1$  %. Контроль за распределением примесей по длине слитка осуществлялся по электрическим измерениям с точностью до  $10 \div 15$  %. Характеристики изучавшихся образцов при температурах 77 и 300 К представлены в таблице. Данные таблицы свидетельствуют о способности гадолиния производить «очистку» основного материала за счет понижения концентрации фоновых примесей [10].

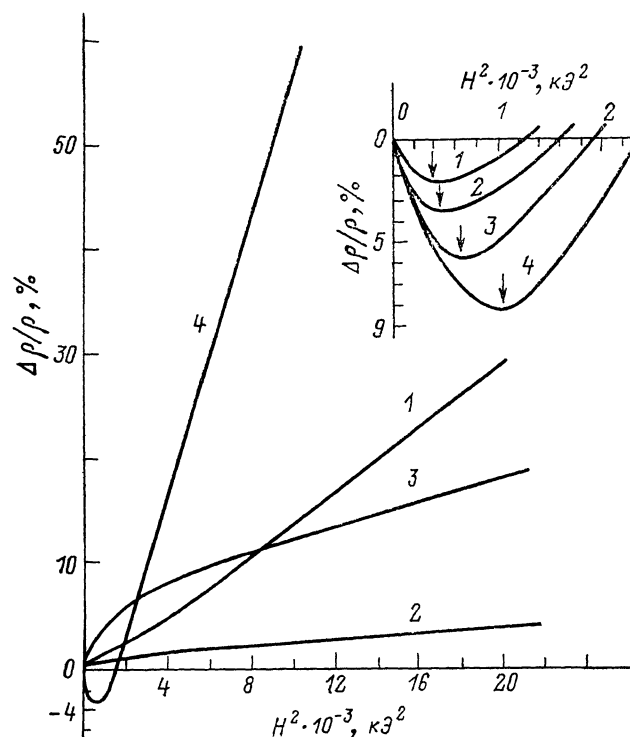


Рис. 1. Зависимость магнитосопротивления от напряженности магнитного поля при 4.2 К для следующих образцов:

1 — нелегированный антимионид галлия; 2 — GaSb(Fe),  $\langle \text{Fe} \rangle = 0.01$  %; 3 — GaSb(Gd),  $\langle \text{Gd} \rangle = 0.01$  %; 4 — GaSb(Mn),  $\langle \text{Mn} \rangle = 0.01$  %. На вставке — участок магнитнополевого спектра для антимионид галлия с различным содержанием марганца при 4.2 К. 1 — GaSb (0.005 % Mn); 2 — GaSb (0.01 % Mn); 3 — GaSb (0.1 % Mn); 4 — GaSb (1 % Mn).

Измерения проведены по стандартной методике при температуре 4.2 К в магнитных полях до 14 Т.<sup>1</sup>

Известно, что введение примесей переходных элементов, таких как железо и марганец, в других более широкозонных полупроводниках  $A^{III}B^V$  влечет за собой, как правило, появление глубоких уровней, снижение концентрации носителей заряда при низких температурах и возрастание удельного сопротивления кристалла на много порядков. Поэтому приходилось дополнительно легировать полупроводник мелкими примесями. Однако в этом случае интерпретация уже встречала затруднения возрастания отрицательного магнитосопротивления при увеличении концентрации магнитной примеси, к этому могла привести также компенсация [4, 7].

На рис. 1 представлены магнитополевые зависимости сопротивления при 4.2 К в образцах антимионид галлия, легированных марганцем (кривая 4), железом (кривая 2) и гадолинием (кривая 3), а также для сравнения — магнитосопротивление нелегированного антимионид галлия (кривая 1), полученного

<sup>1</sup> Измерения проведены в международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, Польша).

в тех же технологических условиях, что и легированных. Из представленных данных видно, что в нелегированном антимиониде галлия, а также в образцах, легированных железом и гадолинием, в исследуемом интервале магнитных полей магнитосопротивление, положительно изменяясь в сильных полях ( $H > 80$  кЭ), практически пропорционально  $H^2$ . Для этих образцов в слабых полях ( $H < 80$  кЭ) наблюдается отклонение от классического закона изменения магнитосопротивления в магнитном поле. Во всем интервале вводимых примесей в случае железа и гадолиния (0.005–1 %) магнитосопротивление остается при 4.2 К положительным. Необычно ведет себя магнитосопротивление образцов, легированных марганцем. Видно, что в образцах, легированных марганцем, в отличие от образцов, легированных железом и гадолинием, уже при

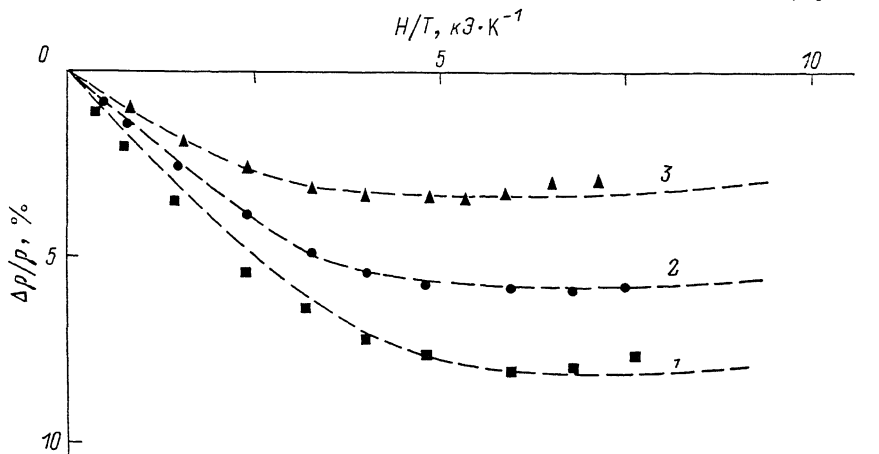


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления от  $H/T$  для антимионид галлия, легированного марганцем.

1 — <0.01 % Mn), 2 — <0.1 % Mn), 3 — <1 % Mn). Штриховая линия — теоретический расчет по формуле (1) точки — эксперимент.

$H > 40$  кЭ магнитосопротивление пропорционально  $H^2$ . В области слабых магнитных полей в образцах, легированных марганцем, наблюдается отрицательное магнитосопротивление. Величина отрицательного магнитосопротивления растет с увеличением содержания марганца в основной матрице. Область отрицательного магнитосопротивления в зависимости от содержания вводимого в матрицу марганца показана на вставке к рис. 1. С увеличением температуры в образцах антимионид галлия, легированного марганцем, область отрицательного магнитосопротивления исчезает.

Отрицательное магнитосопротивление в образцах антимионид галлия, легированных марганцем, при 4.2 К обусловлено спиновзависимым рассеянием дырок на магнитных моментах ионов марганца. Увеличение содержания локализованных магнитных моментов приводит к росту отрицательного магнитосопротивления в соответствии [5] с выражением

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim N^2 B_s^2 \left( \frac{H}{T} \right), \quad (1)$$

где  $B_s \left( \frac{H}{T} \right)$  — функция Бриллюэна,  $N$  — концентрация центров, ответственных за существование локализованных магнитных моментов, причем величина обменного взаимодействия, по-видимому, не зависит от относительного положения уровня Ферми и примесного центра на энергетической шкале. В матрице антимионид галлия ионы марганца, скорее всего, оказываются в состоянии  $Mn^{+2}(3d^5)$  и обладают ориентационным магнитным моментом. Исходя из модели рассеяния на локализованных спинах, на основании формулы (1) сопоставим экспериментальные результаты с теоретическими для образцов антимионид галлия, легированных марганцем, в области отрицательного магнитосопротивления. На рис. 2 штриховыми линиями показаны результаты расчета, а точками — эксперимента. Расчет удовлетворительно совпадает с результатами

эксперимента для 0.01 % Mn и 0.1 % Mn, если  $g$ -фактор принять равным  $(4 \pm 0.2)$ , и для эффективной температуры  $[^{11}]$  (подгоночный параметр в функции Бриллюэна) подобраны значения 2.1, 3.6, 4.8 К для 0.01 %, 0.1 % и 1 % марганца соответственно. Для образца, содержащего 1 % Mn, в области слабых магнитных полей наблюдается расхождение между расчетными и экспериментальными данными. Как видно из представленных на рис. 1 результатов, полевые зависимости магнитосопротивления при 4.2 К для антимонида галлия, легированного различными переходными элементами (в нашем случае марганец, железо и гадолиний), имеют неодинаковый характер. В области положительных значений зависимость магнитосопротивления от магнитного поля определяется выражением

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \simeq A(T)H^2, \quad (2)$$

где  $A$  — полевой коэффициент, т. е. тангенс угла наклона кривой  $\Delta\rho/\rho$  к  $f(H^2)$ . Нетрудно убедиться в том, что  $A(T)$  принимает значения  $A_1(\text{GaSb})=1.56 \times 10^{-3} (\text{кЭ})^{-2}$ ,  $A_2(\text{GaSb}\langle\text{Fe}\rangle)=0.15 \cdot 10^{-3} (\text{кЭ})^{-2}$ ,  $A_3(\text{GaSb}\langle\text{Gd}\rangle)=1.54 \cdot 10^{-3} (\text{кЭ})^{-2}$  и  $A_4(\text{GaSb}\langle\text{Mn}\rangle)=6.8 \cdot 10^{-3} (\text{кЭ})^{-2}$ . Эти данные говорят о том, что марганец, железо и гадолиний ведут себя неодинаково в матрице исходного антимонида галлия при низких температурах.

В таком случае, отсутствие отрицательного магнитосопротивления в антимониде галлия, легированного железом и гадолинием, показывает, что ориентационный магнитный момент ионов железа и гадолиния становится нулевым при гелиевых температурах.

Несущественное изменение сопротивления в магнитном поле для образца антимонида галлия, легированного железом, свидетельствует о том, что в этом случае, как и для других соединений, ( $A^{\text{III}}V$  [2]), резко увеличивается парамагнитный вклад в низкотемпературную магнитовосприимчивость, обусловленный образованием кластерных состояний с нулевым ориентационным моментом, которые обладают, скорее всего, поляризационным магнитным моментом. Кластерообразование в антимониде галлия, легированном железом, рассмотрено в работах [12].

Таким образом, результаты исследования магнитосопротивления в кристаллах антимонида галлия, легированных марганцем, железом и гадолинием, позволяют утверждать, что отрицательное магнитное сопротивление в образцах с марганцем обусловлено наличием у ионов марганца ориентационного магнитного момента, а поляризационный магнитный момент ионов железа и гадолиния по крайней мере в антимониде галлия  $p$ -типа проводимости не приводит к эффекту отрицательного магнитного сопротивления.

#### Список литературы

- [1] Мастеров В. М., Саморуков Б. Е. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 4. С. 625—652.
- [2] Омельяновский Э. М., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 191 с.
- [3] Шмарцев Ю. В., Шендер Е. Ф., Полянская Т. А. // ФТП. 1970. Т. 4. В. 12. С. 2311—2318.
- [4] Гарягдыев Г., Емельяненко О. В., Логунова Т. С., Наследов Д. Н. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 4. С. 700—705.
- [5] Toyozawa Y. // J. Phys. Soc. Japan. 1962. V. 17. P. 986—991.
- [6] Заваричкая Э. И., Воронова И. Р., Рождественская Н. В. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 10. С. 1945—1953.
- [7] Андрианов Д. Г., Рашевская Е. П., Фистуль В. И. // ФТП. 1967. Т. 1. В. 7. С. 1435—1442.
- [8] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Логунова Т. С., Тимченко И. Т., Чучаева З. И., Шерстнев В. В., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 780—786.
- [9] Андрианов Д. Г., Лазарева Г. В., Савельев А. С., Селянина И. В., Фистуль В. И. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 8. С. 1555—1560.
- [10] Furdyna J. K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 4. P. R29—R64.
- [11] Мастеров В. Ф., Захаренков Л. Ф. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 4. С. 610—630.
- [12] Куликовская Н. Ф., Миронов И. Ф., Тигков А. Н. // ФТП. 1978. Т. 11. В. 4. С. 689—692.