

## МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПРИМЕСЕЙ ХРОМА В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Бродовой А. В., Бродовой В. А., Лашкарев Г. В.

Высокоомный арсенид галлия обычно получают легированием примесями переходных металлов, образующих глубокие компенсирующие уровни вблизи середины запрещенной зоны. К числу таких элементов относится, в частности, хром.

В настоящей работе приведены результаты исследования температурной зависимости магнитной восприимчивости (МВ), позволяющие в компенсированном хромом арсениде галлия изучать поведение магнитной примеси в диамагнитной матрице в зависимости от концентрации и температуры.

Изучались кристаллы GaAs(Cr) с удельным сопротивлением при  $T=300$  К  $\rho \sim 10^7$  Ом·см, проводимостью  $p$ -типа, по знаку термоэдс и ЭДС Холла, с кон-

центрацией примесей хрома из данных химического анализа  $N_{Cr} \sim (0.5 \div 4.0) \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ .

Арсенид галлия относится к слабомагнитным веществам. МВ исследовалась относительным методом Фарадея, описанным в работе [1], с применением высокочувствительных электронных микровесов. В качестве эталона был взят чистый германий. Максимальная погрешность измерений МВ составляла  $\sim 2\%$ .

Изучение температурной зависимости МВ легированных Cr образцов GaAs показало, что эта примесь дает парамагнитный вклад, возрастающий при понижении температуры. Анализ экспериментальных данных проводился в пред-

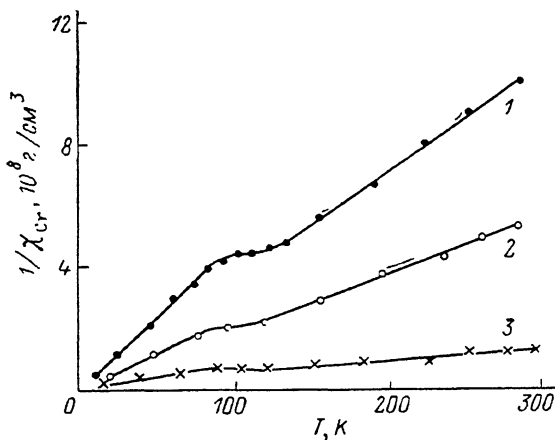
положении аддитивности отдельных вкладов. МВ примесных ионов Cr ( $\chi_{Cr}$ ) находилась как

$$\chi_{Cr} = \chi_{\text{эксп}} - \chi_0,$$

где  $\chi_{\text{эксп}}$  — МВ образцов GaAs, содержащих примеси хрома,  $\chi_0$  — МВ нелегированных, «чистых» кристаллов GaAs. На рисунке приведены типичные зависимости  $\chi_{Cr}^{-1}(T)$  для трех различных концентраций хрома. Видно, что парамагнитная компонента МВ исследованных кристаллов GaAs(Cr) подчиняется закону Кюри  $\chi_{Cr} = C/T$ , что может иметь место при отсутствии обменного взаимодействия между магнитными центрами вследствие их малой концентрации.

На зависимости  $\chi_{Cr}^{-1}(T)$  в области температур 100–120 К наблюдается характерный излом, что может быть связано с изменением зарядового состояния примесных уровней Cr.

Примесь хрома в GaAs может находиться в нескольких зарядовых состояниях: Cr $^{1+}$ , Cr $^{2+}$ , Cr $^{3+}$ , Cr $^{4+}$  [2–5]. Относительно широкий энергетический зазор между  $v$ -зоной и уровнями хрома, а также низкие температуры излома не позволяют связать изменение зарядового состояния примесей с термической перезарядкой. Одной из возможных причин экспериментально наблюдаемого изменения зарядового состояния примесей хрома может быть, по нашему мнению, эффект Яна—Теллера, имеющий место, согласно [6, 7], в кристаллах GaAs(Cr). Центры Cr $^{2+}$  и Cr $^{3+}$  в основном состоянии подвержены эффекту Яна—Теллера, в результате чего происходит перестройка энергетического спектра ионов по



Зависимость  $\chi_{Cr}^{-1}(T)$  в GaAs(Cr).

$N_{Cr} \cdot 10^{18}$ , см $^{-3}$ : 1 — 0.3, 2 — 0.8, 3 — 3.0.

сравнению с неискаженной электронной конфигурацией. Отметим, что концентрация хрома, определенная из МВ, на ~30 % меньше, чем найденная путем химического анализа. Это свидетельствует о том, что часть хрома в GaAs находится в немагнитном состоянии.

Как известно, одним из возможных состояний хрома в GaAs является  $\text{Cr}^{2+}$ . Если предположить, что  $\text{Cr}^{2+}$  находится в октаэдрическом окружении, то в чисто кубическом поле его основным состоянием будет дублет  $\Gamma_3$ , который вследствие эффекта Яна—Теллера расщепляется на два орбитальных синглета. Таким образом, основное состояние иона оказывается немагнитным.

В результате выполненной работы можно сделать вывод, что хром в GaAs находится в виде одиночных атомов, обменное взаимодействие между центрами при указанных выше концентрациях отсутствует. Изменение наклона на зависимости  $\chi_{\text{Cr}^{1+}} = f(T)$ , по-видимому, связано с перезарядкой состояний Cr вследствие эффекта Яна—Теллера. Наличие подобного эффекта, согласно литературным данным, оказывает влияние на положение энергетических состояний легированного полупроводника и на характер неравновесных процессов в электронной системе.

Отметим, что в тех же кристаллах GaAs(Cr) в интервале температур, соответствующем излому на кривой  $\chi_{\text{Cr}^{1+}} = f(T)$ , наблюдается переход от линейного характера рекомбинации к квадратичному [8]. При низких температурах ( $T < 100$  K) кинетика спада фототока описывается гиперболой первой степени. При  $T \geq 200$  K наблюдается экспоненциальный спад фототока с постоянной времени  $\tau \sim 5 \cdot 10^{-6}$  с. Такой переход может иметь место в случае перезарядки и увеличения концентрации примесных центров, ответственных за рекомбинацию фотодырок.

#### Список литературы

- [1] Lashkarev G. V., Migley D. F., Shevchenko A. D., Tovstyuk K. D. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 63. N 2. P. 663—668.
- [2] Look D. C., Chaudhuri S., Eaves L. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. N 23. P. 1728—1739.
- [3] Морозова В. А., Остробородова В. В. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 8. С. 1628—1631.
- [4] Салаев Э. Ю., Аскеров И. М., Каджар Ч. О., Мамедбегли И. А. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 9. С. 1664—1669.
- [5] Васильев А. Э., Ильин Н. П., Мастеров В. Ф. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 804—808.
- [6] Krebs J. J., Stauss G. H. // Phys. Rev. B. 1977. V. 15. N 1. P. 17—22.
- [7] Krebs J. J., Stauss G. H. // Phys. Rev. B. 1977. V. 16. N 3. P. 971—973.
- [8] Бродовой В. А., Мирец Л. З., Пека Г. П. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 7. С. 1335—1338.

Институт проблем материаловедения АН УССР  
Киев

Получено 5.02.1990  
Принято к печати 14.05.1990

ФТП, том 24, вып. 9, 1990

## НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ИНДУЦИРОВАННЫХ КИСЛОРОДОМ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ В ТЕРМООБРАБОТАННОМ КРЕМНИИ

Гляничук К. Д., Литовченко Н. М., Птицын В. Ю.

**Введение.** Известно, что в прогретых при 450 °С содержащих кислород кристаллах *n*- и *p*-кремния наблюдается электронная  $\delta n_r$  [в *n*-Si(O)] и дырочная  $\delta p_r$  [в *p*-Si(O)] длинновременная фотопроводимость (ДФП), обусловленная достаточно большими временами жизни избыточных электронов  $\tau_{nr}$  [в *n*-Si(O)] и дырок  $\tau_{pr}$  [в *p*-Si(O)] [1]. Появление ДФП связано с тем, что при прогреве кристаллов Si(O) вследствие миграции и последующего группирования у атомов кислорода на зародышах различной природы создаются отличающиеся от кислородных термодоноров  $\text{SiO}_x$  ( $x=3\div 5$ ) различные индуцированные