

ФАКТОР ВЫРОЖДЕНИЯ АКЦЕПТОРНЫХ УРОВНЕЙ КАДМИЯ В $Ge_{1-x}Si_x$

Г.Х. АЖДАРОВ, М.А. АКПЕРОВ, Э.С. ГУСЕЙНОВА

Институт Физики АН Азербайджана

370143, Баку, ул. Г. Джавида, 33

На основе холловских измерений кристаллов $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,3$), легированных кадмием, определены факторы вырождения первого (γ_1) и второго (γ_2) акцепторных состояний этой примеси. Показано, что величины γ_1 и γ_2 в исследованных составах $Ge_{1-x}Si_x$ составляют $1,4 \pm 0,3$ и $4,5 \pm 1,5$, соответственно, и удовлетворительно согласуются с теоретическими значениями для факторов вырождения двухзарядных акцепторов германия.

Фактор вырождения (γ), определяемый как отношение кратностей вырождения примесного уровня в состояниях содержащих электрон (дырку) и без него, является одним из основных параметров примесного центра. Знание величины γ необходимо как для точной статистики носителей заряда на примесном уровне, так и при сопоставлении конкретных теоретических расчетов и моделей с результатами экспериментальных данных.

Энергетический спектр основных примесных состояний кадмия в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,3$) изучен в работах [1,2]. Установлено, что в исследованных составах кристаллов замещающие атомы примеси кадмия ведут себя как двукратные акцепторы, как и в германии. В работе [2] показано, что энергии связи первого (E_1) и второго (E_2) уровней кадмия изменяются линейно с составом кристалла и описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} E_1 &= (0,05 + 0,52x) \text{ эВ} \\ E_2 &= (0,16 + 0,75x) \text{ эВ} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь отсчет энергии ведется от потолка валентной зоны.

В работе [1] фактор вырождения исследовался только для нижнего уровня кадмия в германиеподобных кристаллах ($0 \leq x \leq 0,15$). Было показано, что экспериментальные значения γ для первого уровня кадмия, определенные из холловских измерений, удовлетворительно согласуются с теоретическими, рассчитанными в рамках предположения, что в формировании основных состояний акцепторных уровней решающую роль играют волновые функции валентной зоны.

В настоящей работе представлены результаты исследований факторов вырождения первого и второго акцепторных уровней кадмия в системе $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием кремния до 30 ат.%, охватывающего как германио- так и кремниеподобные составы кристаллов.

Однородные кристаллы твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ получались методом выращивания из большого объема [3]. Легирование кадмием осуществлялось в процессе выращивания путем закладки в ампулы соответствующего количества примеси с учетом ее коэффициента сегрегации. Для управления степенью компенсации акцепторных уровней кадмия, кристаллы легировались также мелкой донорной примесью сурьмы, вводимой в кристаллы в процессе роста [4].

Фактор вырождения уровней кадмия определялся на основе холловских измерений. Для исследований отбирались образцы с нулевой степенью компенсации первого и второго акцепторных уровней кадмия. В этом случае экспериментальные данные температурной зависимости концентрации свободных дырок позволяют вычислить γ с помощью уравнения электрической нейтральности в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ [5].

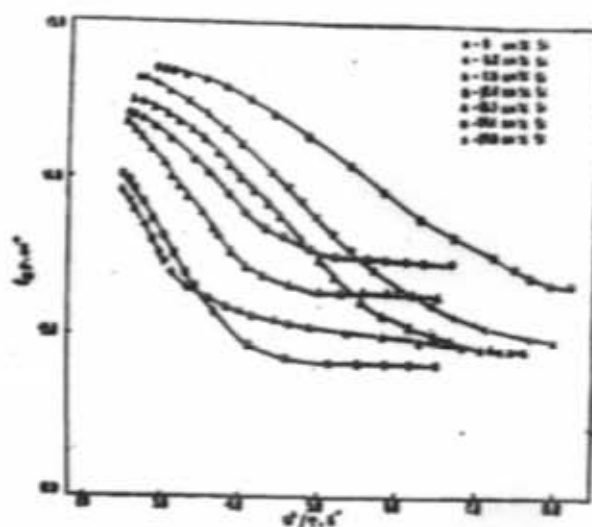


Рис. Температурные зависимости концентрации дырок в кристаллах Ge и $Ge_{1-x}Si_x$ с нулевой степенью компенсации первого акцепторного уровня кадмия.

На рис. представлен характерный ход температурных зависимостей концентрации свободных дырок (p) в таких кристаллах на примере нескольких образцов $Ge_{1-x}Si_x$ различного состава, в которых проявляется первое акцепторное состояние примеси кадмия. При определении p из данных коэффициента Холла использовались значения Холл-фактора дырок в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ [6]. В области низких температур насыщение обусловлено неконтролируемыми мелкими акцепторами всегда имеющимися в кристаллах [7]. С повышением температуры начинается заполнение первого акцепторного состояния кадмия и концентрация дырок растет. Плато в области высоких температур соответствует полному заполнению этого уровня. Уравнение электрической нейтральности, описывающее ход кривых на рис. имеет вид:

$$\frac{p(p - N_a)}{N_a + N_{Cs} - p} = N_v \gamma_1^{-1} \exp(\alpha_1 / k) \exp(-E_1 / kT) \quad (2)$$

Здесь N_a и N_{Cs} - концентрации мелких акцепторов и примеси кадмия, соответственно; N_v - эффективная масса плотности состояний в валентной зоне; γ_1 - фактор вырождения первого акцепторного уровня кадмия; k - постоянная Больцмана; α_1 - температурный коэффициент изменения энергии связи первого уровня кадмия.

Значения N_a и N_{Cs} определялись по данным низко- и высокотемпературным плато кривых рисунка. Значения энергии связи E_1 для каждого состава вычислялись по формуле (1). Множитель в правой части уравнения (2), связанный с температурным коэффициентом изменения E_1 , определялся из графика зависимости $\exp(\alpha/k)$ от E , представленного в работе [1]. Эффективная масса плотности состояний N_v в сплавах $Ge_{1-x}Si_x$ различного состава определялась с помощью интерполяционной процедуры с использованием известных значений эффективных масс в кремнии и германии [7]. Используя значения вышеприведенных параметров, из уравнения (2) были найдены значения γ_1 при различных температурах для каждого состава кристалла. Для определения уточненных значений параметров N_a , N_{Cs} , E_1 и γ_1 , которые дают наилучшее совпадение с экспериментальными данными во всей области температур, к формуле (2) был применен метод наименьших квадратов. Результаты проведенных расчетов показывают, что в пределах погрешности экспериментов, значения γ_1 составляют $1,4 \pm 0,3$ и не зависят от состава кристалла. Для второго акцепторного уровня кадмия, опреде-

ленное аналогичным способом значение γ_2 в $Ge_{1-x}Si_x$ составляет $4,5 \pm 1,5$.

Ионизация первого акцепторного состояния замещающих атомов кадмия в $Ge_{1-x}Si_x$ соответствует переходу центра из двухдырочного состояния в однодырочное. Для второго акцепторного уровня это переход из однодырочного состояния в бездырочное. Согласно теоретической работе [8], кратности вырождения этих зарядовых состояний для элементов IIIB подгруппы в германии составляют: $\beta_0=1$, $\beta_1=4$, $\beta_2=6$ (индексы 0, 1, 2 отвечают числу локализованных дырок у примесного центра). В работе [8] было принято, что акцепторные состояния элементов IIIB подгруппы в германии образованы из волновых функций экстремума валентной зоны. В этом случае, для двухзарядных акцепторов по определению фактора вырождения имеем: $\gamma_1 = \beta_1 / \beta_0 = 4/1 = 4$ и $\gamma_2 = \beta_2 / \beta_0 = 6/1 = 6$. Как видно, экспериментальные значения γ_1 и γ_2 для примеси кадмия в исследованных нами составах удовлетворительно согласуются с теоретическими значениями фактора вырождения для двухзарядных акцепторов в германии. Этот факт свидетельствует о том, что в формировании акцепторных состояний кадмия в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием кремния до 30 ат.% участвуют волновые функции четырехкратно вырожденного экстремума валентной зоны, как и в германии.

Как было отмечено выше, фактор вырождения первого акцепторного состояния кадмия был исследован и ранее в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием кремния до 15 ат.% [1]. Полученные в настоящей работе значения γ_1 для соответствующих составов удовлетворительно согласуются с результатами [1].

[1] Г.Х. Аждаров, М.Г. Шахтахтинский. Известия АН. Азерб. ССР, сер. физ.-техн. и матем. наук, 1976, №4, с.8-14.
 [2] Г.Х. Аждаров, Р.З. Кязимзаде, М.А. Алекперов, К.Н. Мамедов. Fizika, 1995, ;4, с. 27-33.
 [3] В.И. Романенко. В кн. "Управление составом полупроводниковых кристаллов", Москва, "Металлургия", 1976, 368с.
 [4] В.В. Мир-Багиров "Спектр основных примесных состояний меди в кристаллах твердых растворов германий-кремний". Дис. канд. физ.-мат. наук, Баку, 102 с.

[5] Д. Блекмор. В кн. "Статистика электронов в полупроводниках", Москва, "Мир", 1964, 392с.
 [6] Р.З. Кязимзаде. АЗНИИПТИ, 1994, №46, с.9.
 [7] Г.Х. Аждаров. "Энергетический спектр основных примесных состояний и гальваномагнитные свойства легированных кристаллов твердых растворов германий-кремний и соединений A^3B^5 ". Дис. докт. физ.-мат. наук, Баку, 1981, 347 с.
 [8] К.Я. Штигельман, Д.А. Романичев, П.Е. Ларин. Свойство легированных полупроводников. Москва, "Наука", 1977, с.5-8.

H.X. Əjdərov, M.A. Əkbərov, E.S. Hüseynova

$Ge_{1-x}Si_x$ -DA KADMIUMUN AKSEPTOR SƏVİYYƏLƏRİNİN CİRLƏŞMƏ FAKTORLARI

Kadmium ilə aşqarlanmış $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,3$) kristallarının Holl ölçüləri əsasında bu aşqarın birinci (γ_1) və ikinci (γ_2) akseptor səviyyələrinin cirləşmə faktorları təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, $Ge_{1-x}Si_x$ -in tədqiq olunmuş tərkiblərində γ_1 və γ_2 kəmiyyətləri müvafiq olaraq $1,4 \pm 0,3$ və $4,5 \pm 1,5$ -ə bərabərdir ki, bu da germaniumda ikiqat akseptorların cirləşmə faktorları üçün olan nəzəri qiymətlərə uyğundur.

G.Kh. Azhdarov, M.A. Akperov, E.S. Guseynova

DEGENERATION FACTOR OF CADMIUM ACCEPTOR LEVELS IN $Ge_{1-x}Si_x$

On the basis of the Hall measurement of Cd-doped $Ge_{1-x}Si_x$ crystals ($0 < x < 0,3$) the degeneration factor of the first (γ_1) and the second (γ_2) acceptor levels of the impurity are determined. It is shown that in the investigated compositions of $Ge_{1-x}Si_x$ crystals $\gamma_1 = 1,4 \pm 0,3$ and $\gamma_2 = 4,5 \pm 1,5$. This result is in satisfactory agreement with the theoretical values for the degeneration factors of double acceptors in germanium.

Дата поступления: 17.10.96

Редактор: М.Н. Ахмед