

ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ Ge-Si<Cu,Al, Sb>

П.Г. АЖДАРОВ, З.М. ЗАХРАБЕКОВА, С.М. БАГИРОВА

*Институт Физики НАН Азербайджана,
Баку, AZ-1143, пр. Г. Джавида, 33*

З.М. ЗЕЙНАЛОВ

*Гянджинский Государственный Университет,
Гянджа, пр. Шах Исмаила Хатаи, 187*

77-300 K intervalında Hall və elektrik keçiriciliyi ölçüləri əsasında mürəkkəb aşqarlanmış $Ge_{1-x}Si_x$ <Al, Sb> ($0 < x < 0,13$) kristallarında elektronların yürüklüyü Cu ilə aşqarlanmadan öncə, sonra və 650-800⁰C temperaturalarda emal edilmiş nümunələrdə tədqiq edilib. Al və Sb aşqarlarının konsentrasiyası kristallarda 10^{16} sm^{-3} tərtibində olub. Mis aşqarının və termik emalın elektronların yürüklüyünə əhəmiyyətli təsiri təyyin edilib. Əbətərilib ki, hər bir halda, eksperimental təyin edilmiş elektronların yürüklüyünün temperatur asılılığı kristalda sərbəst yük daşıyıcılarının fononlardan, ərinti nizamsızlıqlarından, aşqar və termik emal nəticəsində yaranmış akseptor komplekslərin ionlarından səpilməsi ilə nəzəri izah edilə bilər.

На основе измерения коэффициента Холла и электропроводности в интервале 77-300 К исследованы температурные зависимости подвижности электронов в сложнолегированных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ < Al, Sb> ($0 < x < 0,13$) до и после их легирования медью и последующих отжигов при 650-800⁰ С. Исходная концентрация примесей алюминия и сурьмы в образцах была порядка 10^{16} см^{-3} . Установлено существенное влияние наличия меди в кристаллах и термообработки на подвижность электронов в матрице. Показано, что экспериментальные данные по температурным зависимостям подвижности свободных электронов во всех случаях удовлетворительно согласуются с теоретическими результатами с учётом рассеяния на колебаниях решётки, беспорядках сплава и на полнотью ионизированных примесях и термоиндуцированных акцепторных комплексах.

On the bases of the Hall and conductivity measurements in the temperature range 77-300K mobility of electrons in $Ge_{1-x}Si_x$ < Al, Sb> ($0 < x < 0,13$) crystals before and after Cu-doping and heat-treatment of the samples at 650-800⁰C has been investigated. Essential influence of copper and the heat treatment on the electron mobility in the crystals was determined. It is shown that the experimental data of the temperature dependencies of electrons mobility in the crystals can be described theoretically satisfactorily by taking in the account scattering of electrons on phonons, alloy disorders and fully charged impurity atoms and thermo-induced acceptor complexes.

Подвижность свободных электронов и дырок в полупроводниках является одним из важных физических параметров, характеризующих материал. Величина подвижности свободных носителей заряда в матрице определяется конкретной зонной структурой полупроводника и характером взаимодействия электронов и дырок с тепловыми колебаниями атомов решётки и рядом несовершенств кристаллической структуры. Исследования подвижности электронов (μ_e) и дырок (μ_h) в кристаллах твёрдых растворов Ge-Si проводились ранее рядом авторов [1-3]. Были определены закономерности изменения (μ_e) и (μ_h) от температуры при фоновом и сплавном рассеянии свободных носителей заряда в кристаллах Ge-Si. Эксперименты проводились с образцами, легированными мелкими примесными центрами с концентрацией порядка $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В работе [4] было показано, что экспериментальные данные по подвижности электронов в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0,13$), легированных медью удовлетворительно согласуются с расчётными с учётом трёхкратного акцепторного поведения меди в матрице.

Экспериментальные исследования примесных уровней в сложнолегированных кристаллах Ge-Si<Cu,Al, Sb>, с концентрацией примесей порядка 10^{16} см^{-3} , подвергнутых термообработке при различных T в интервале 650-800⁰ С показывают на возникновение дополнительных акцепторных комплексов (АК), включающих атомы меди и алюминия [5]. С другой стороны имеет место существенная зависимость равновесной концентрации трёх-

кратных акцепторных атомов меди от температуры отжига образца [6]. В силу этих обстоятельств в сложнолегированных кристаллах Ge-Si<Cu,Al, Sb>, подвергнутых термообработке, следует ожидать ощутимую корреляцию между температурой отжига и подвижностью электронов в матрице.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании влияния термической обработки в интервале 650-800⁰С на подвижность электронов в германиеподобных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ <Cu,Al, Sb> ($0 < x < 0,13$) и в определении возможности теоретической интерпретации полученных результатов с учётом возникновения дополнительных акцепторных комплексов (АК) и рассеяния на трёхкратно ионизированных атомах примеси меди.

Кристаллы Ge и Ge-Si с содержанием Si до 13 ат.%, легированные одновременно алюминием и сурьмой, выращивались модернизированным методом Бриджмена [7]. Концентрация примесей Al и Sb в кристаллах была порядка 10^{16} см^{-3} . Легирование образцов медью производили диффузионным методом при температуре соответствующей максимальной растворимости примеси в кристаллах (875 -900⁰С). Измерение температурной зависимости коэффициента Холла и электропроводности образцов производили до и после легирования их медью и последующих термических обработок в интервале 650-800⁰С.

При каждой температуре образцы выдерживали до наступления равновесного состояния (3-4 часа [5]). За-

калку проводили «сбрасыванием» образцов в этиловый спирт при температуре сухого льда. Измерение температурных зависимостей коэффициента Холла и электропроводности образцов производили в интервале 77-350 К. Концентрацию свободных электронов и их омическую подвижность в образцах определяли с использованием известных данных по Холл-фактору электронов в Ge и Ge-Si [8].

В зависимости от исходной концентрации примесей алюминия и сурьмы в образцах, после легирования их медью при 875-900⁰С, проявляются уровни Sb, Al и Cu. Здесь мы будем рассматривать только те кристаллы, которые до и после легирования медью обладали электронной проводимостью, обусловленной избыточной концентрацией примеси сурьмы над суммарной концентрацией всех акцепторных уровней. В этих кристаллах, до легирования их медью, электропроводность осуществляется за счёт ионизации примеси сурьмы, с эффективной концентрацией $N_{Sb}^* = N_{Sb} - N_{Al}$. На рис.1 представлены характерные зависимости концентрации свободных электронов (n) в таких кристаллах до (1), после легирования медью при 875⁰С (2), а также последующих отжигах при 800 (3), 750 (4) и 650⁰С (5) на примере образца Ge-Si с 10 ат.% Si. Полная концентрация примесей алюминия и сурьмы в этом образце составляет: $N_{Al} = 2,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N_{Sb} = 8,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Здесь, электропроводность образца до легирования медью осуществляется за счёт ионизации примеси сурьмы с эффективной концентрацией $N_{Sb}^* = N_{Sb} - N_{Al}$. Неизменность концентрации электронов во всём интервале температур, свидетельствует о полной ионизации атомов сурьмы с концентрацией $N_{Sb}^* = 6,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Интерпретацию данных рис.1 после легирования образца медью и последующих его термообработок производили с учётом следующих обстоятельств:

- примесь меди в германии и твёрдых растворах Ge-Si ведёт себя как трёхкратный акцептор, с глубокими уровнями, два из которых расположены в нижней половине запрещённой зоны [5];

- большая скорость диффузии меди в кристаллах позволяет управлять концентрацией электроактивных атомов примеси путём термического отжига материала при различных температурах, приводящего к распаду пересыщенного раствора [6].

- термическая обработка кристаллов Ge<Cu, Al> и Ge-Si<Cu, Al> в интервале 650-800⁰С, с последующей закалкой образцов, приводит к образованию дополнительных акцепторных комплексов, включающих атом меди [5]. Энергетический уровень комплекса находится между первым и вторым акцепторными состояниями примеси меди.

Как видно из рис.1, после легирования образца медью при 875⁰С концентрация свободных электронов примерно на порядок меньше, чем до легирования. При этом концентрация электронов остаётся неизменной во всём интервале температур. Такое поведение (n) объясняется захватом значительной части электронов примеси сурьмы на акцепторные уровни меди, расположенные на достаточно большой глубине от дна зоны проводимости. При этом в рассматриваемой области температур кон-

центрация свободных электронов определяется полностью ионизированными атомами сурьмы с эффективной концентрацией $N_{Sb}^{**} = N_{Sb}^* - 3N_{Cu}$. Здесь N_{Cu} – концентрация акцепторных атомов меди, соответствующая их растворимости при температуре отжига.

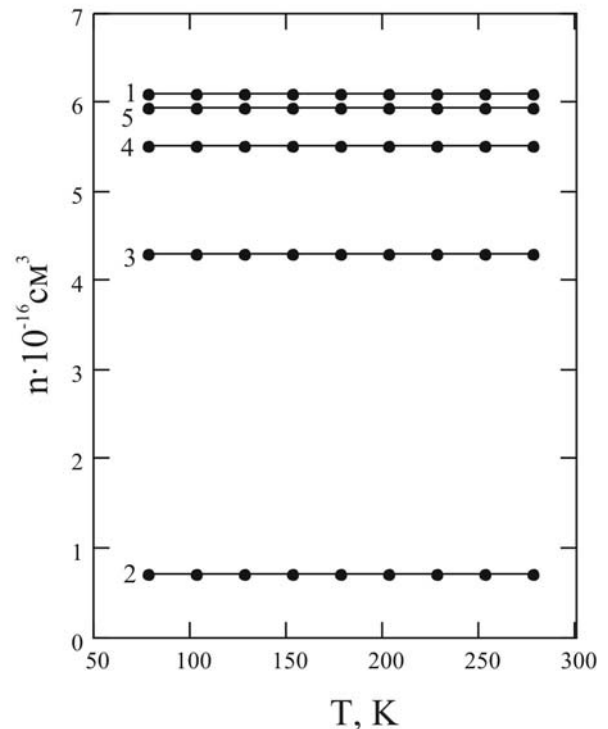


Рис.1. Температурные зависимости концентрации электронов в образце $Ge_{0,90}Si_{0,10}<Al, Sb, Cu>$ с исходной концентрацией $N_{Al} = 2,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb} = 8,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N_{Sb}^* = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Кривые 1-5 соответственно экспериментальные данные до, после легирования медью при 875⁰С и последующих отжигов при 800, 750 и 650⁰С.

Как было отмечено выше, отжиг образцов в интервале 650-800⁰ С приводит к образованию акцепторных комплексов (АК). Концентрация этих комплексов в образцах уменьшается с температурой отжига и в интервале 650-800⁰ С и составляет $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [5]. Несмотря на появление дополнительных центров захвата свободных электронов, после отжига образца при 800⁰ С, концентрация электронов растёт по сравнению с данными до отжига (рис.1(2)). Такое поведение объясняется преобладанием спада равновесной концентрации меди над концентрацией акцепторных комплексов в образце после термообработки. Дальнейший рост (n) с понижением температуры отжига связано как с уменьшением равновесной концентрации меди, так и дополнительных акцепторных комплексов.

На рис.2 кружками представлены экспериментальные данные температурной зависимости омической подвижности электронов (μ_e) в обсуждаемом образце, полученные из данных электропроводности и концентрации свободных носителей заряда. Как видно, во всей области температур, подвижность электронов максимальна в об-

разце до легирования его медью (1). Существенный спад подвижности имеет место после легирования образца

медью при 875⁰ С (2), несмотря на то, что концентрация свободных электронов в этом случае значительно ниже, чем в исходном образце.

Такое уменьшение μ_e объясняется интенсивным рассеянием электронов на трёхкратно отрицательно заряженных атомах примеси меди. Последовательный отжиг образца в интервале 650-800⁰ С приводит к уменьшению N_{Cu} и росту μ_e .

Интерпретацию экспериментальных данных по подвижности дырок в образце, до и после каждой из термических процедур, производили в приближении аддитивности различных механизмов рассеяния. Основными механизмами рассеяния в рассматриваемой области температур, являются фононы, беспорядки сплава и ионы примесей [3].

Подвижность электронов при рассеянии на фононах (μ_f) и беспорядках сплава (μ_d), представленную на рис.2 пунктирной кривой (а), рассчитывали по данным [8].

Подвижность, ограниченную рассеянием электронов на ионах примесей (μ_i) определяли по формуле Брукса Херринга [9], учитывающей экранировку кулоновского поля иона примеси свободными электронами:

$$\mu_i = \frac{64\pi^{1/2} \varepsilon^2 (2kT)^{3/2}}{(\sum N_i Z_i^2) e^3 m_e^{*1/2}} \left[\ln \frac{24m_e^* k^2 T^2 \varepsilon}{e^2 \hbar^2 n} \right]^{-1} \quad (1)$$

Здесь N_i –концентрация ионов соответствующей примеси (Cu, Al или Sb) и дополнительных АК ; Z_i – кратность зарядового состояния рассматриваемой примеси; ε - диэлектрическая проницаемость матрицы; m_e^* - эффективная масса плотности состояния электрона [9]. В рассматриваемом нами конкретном случае, все атомы Al и Sb и АК находятся в однократно ионизированном состоянии. Атомы примеси меди во всём интервале температур заряжены отрицательно с кратностью равной трём и их концентрация равна равновесной концентрации замещающих атомов меди при температуре отжига [5,6].

На рис.2 подвижности электронов в образце, ограниченные рассеянием на ионах примеси, до и после его легирования медью и последующих термообработок, представлены пунктирными линиями 1-5.

Расчётные кривые результирующих подвижностей электронов (μ_e), представленные на рис.2 сплошными линиями 1-5, вычислены по следующей формуле, основанной на аддитивности различных механизмов рассеяния электронов:

$$\frac{1}{\mu_e} = \frac{1}{\mu_f} + \frac{1}{\mu_d} + \frac{1}{\mu_i} \quad (2)$$

Как видно, эти кривые практически совпадают с соответствующими экспериментальными данными по температурной зависимости электронов в образце до и после соответствующих стадий его технологической обработки. Аналогичные результаты были получены нами для

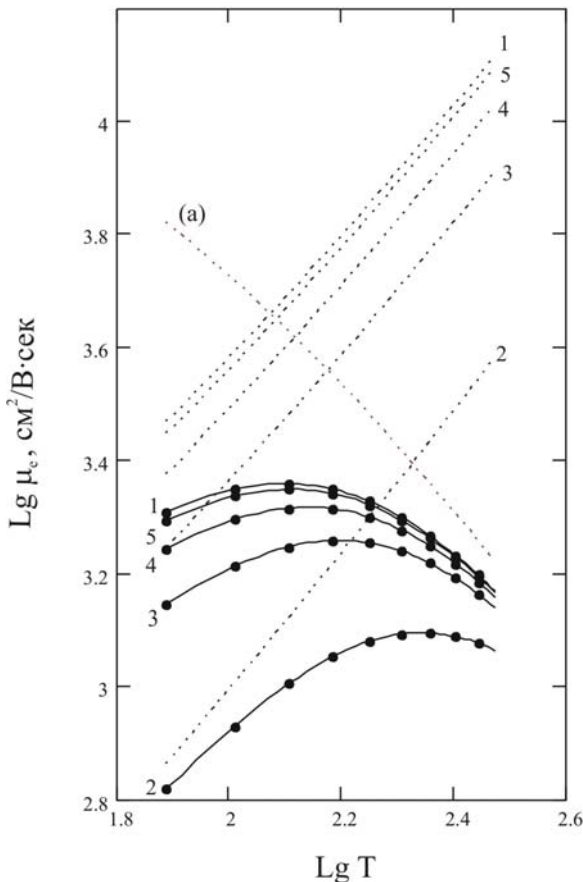


Рис.2. Температурные зависимости подвижности электронов (μ_e) в кристалле $Ge_{0.90}Si_{0.10} < Al, Sb, Cu >$ с исходной концентрацией $N_{Al}=2.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}=8.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N_{Sb}^*=1.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Кривые 1-5 соответственно данные до, после легирования медью при 875⁰С и последующих отжигов при 800, 750 и 650⁰С.. Кружки - экспериментальные данные. Пунктирные и сплошные линии - расчётные. Сплошные линии 1-5 - результирующие μ_e ; пунктирная линия (а) - μ_{f+d} при рассеянии на колебаниях решётки и беспорядках сплава; пунктирные линии 1-5 - μ_i при рассеянии на ионах примесей. Расчётные кривые 1-5 соответствуют следующим параметрам:

- 1- $N_{Al}=2.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}=8.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}^*=6.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- 2- $N_{Cu} = 1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}^{**} = N_{Sb}^* - 3N_{Cu} = 0.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- 3- $N_{Cu} = 6.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_k = 2.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}^{**}=4.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- 4- $N_{Cu} = 2.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_k = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}^{**}=5.51 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- 5- $N_{Cu} = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_k = 0.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{Sb}^{**}=5.93 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;

всех составов германиеподобных кристаллов Ge-Si (до 13 ат.% Si).

Резюмируя полученные данные по влиянию термообработки на электрические свойства электронных кристаллов $Ge_{1-x}Si_x$ <Cu,Al, Sb> можно сделать следующее заключение:

- Температурные зависимости концентрации свободных носителей заряда в электронных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ <Cu, Al, Sb>, легированных медью при 875-900⁰ С и подвергнутых последующим термообработкам в интервале 650-800⁰ С, описываются с учётом трёхкратного ак-

цепторного поведения примеси меди и зависимости её равновесной концентрации от температуры отжига образца и возникновения новых акцепторных комплексов в термообработанных кристаллах.

- Экспериментальные данные по подвижности свободных электронов в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ <Cu, Al, Sb>, в интервале 77-300 К, до и после термообработки образцов в интервале 650-800⁰ С согласуются с расчётными с учётом рассеяния электронов на фононах, беспорядках сплава и ионах примесей и термоиндуцированных акцепторных комплексов.

-
- [1]. *M. Glicksman*, Phys. Rev., 1958, v.111, p. 125.
[2]. *S. Ishida, E Otsuka*, J. Phys. Soc. Jap., 1968, v.24, p. 509.
[3]. *G. Kh. Azhdarov, N.A. Agaev, R.A. Kyazimzade*, Sol. State Commun., 1992, v. 84, p. 445.
[4]. *П.Г. Аждаров*, Fizika, т. 5, №3, с. 11.
[5]. *П.Г. Аждаров, З.М. Захрабекова, З.М. Зейналов*, Fizika, 2007, т. 13, с. 327.
[6]. *Б.С. Алиева, В.И. Тагиров, С.И. Тауров*, Неорг. Матер. 1971, т. 7, №4, с. 593.
[7]. *Z.M. Zakhrabekova, Z.M. Zeynalov, V.K. Kyazimova, G.Kh. Azhdarov*, Inorganic Materials, 2007, v.43, n.1, p.3.
[8]. *Р.А. Кязимзаде*, Дис. док. физ.-мат. наук. Баку. 1998, с.272.
[9]. *Р. Смит*, «Полупроводники», Москва, ИЛ, 1962, с. 467.

Daxil olunub: 01.07.2007