

ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕРМООБРАБОТАННЫХ КРИСТАЛЛАХ $Ge_{1-x}Si_x$ С ПРИМЕСЬЮ МЕДИ

П.Г. АЖДАРОВ

*Институт Физики АН Азербайджана,
370143, Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Исследовано влияние термообработки на подвижность электронов в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0.13$) легированных медью при 900°C . Концентрация замещающих атомов примеси меди (Cu_S) и компенсирующих мелких доноров (Sb) в образцах составляла $\approx 10^{16}\text{см}^{-3}$. На основе измерений температурных зависимостей коэффициента Холла и электропроводности показано, что последовательное снижение температуры отжига образцов с 900°C до 700°C приводит к уменьшению концентрации Cu_S и росту подвижности электронов (μ_e). Экспериментальные данные зависимости μ_e от T , в интервале 77-300 К согласуются с расчетными с учетом рассеяния электронов на фононах, беспорядках сплава и мультиплетно заряженных атомах примеси меди.

Подвижность свободных носителей заряда в полупроводниках является одним из важных физических параметров, характеризующих материал. Величина этого параметра определяется конкретной зонной структурой матрицы и характером взаимодействия электронов (дырок) с тепловыми колебаниями решетки, а также рядом несовершенств кристаллической структуры. Среди последнего ряда основную роль, в большинстве случаев, играет рассеяние носителей заряда на ионах примеси.

Исследования подвижности электронов и дырок в кристаллах системы германий-кремний проводились ранее рядом авторов (см., например, [1-3]). Основной целью этих работ было установление закономерностей изменения подвижности от температуры при фононном и сплавном рассеяниях. Эксперименты проводились с образцами легированными мелкими примесными центрами с концентрацией порядка 10^{14} - 10^{15}см^{-3} , в условиях доминирования указанных механизмов рассеяния.

Атомы меди в Ge, Si и в $Ge_{1-x}Si_x$ относятся к разряду глубоких примесных центров. Установлено, что замещающие атомы меди (Cu_S) в этих кристаллах являются трехкратными акцепторами, в соответствии с моделью тетраэдрических ковалентных связей [4]. Энергетические состояния первого и второго акцепторных состояний Cu_S попадают в нижнюю половину запрещенной зоны. Третье акцепторное состояние Cu_S расположено в верхней половине запрещенной зоны и в электрических измерениях проявляется в кристаллах с электронной проводимостью, как псевдодонорный уровень [5]. Зарядовое состояние Cu_S с заполненным третьим акцепторным уровнем является трехкратно отрицательным и оказывает существенное влияние на рассеяние электронов. Известно, что концентрацией быстродиффундирующей примеси меди в кристаллах можно управлять путем отжига образцов при различных температурах [6]. В силу этого обстоятельства следует ожидать ощутимую корреляцию между температурой отжига электронных кристаллов с примесью меди и подвижностью свободных носителей заряда.

В настоящей работе приводятся результаты исследований влияния последовательного снижения температуры отжига образцов с 900°C до 700°C на подвижность электронов в германиеподобных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.13$), легированных медью и интерпретации экспериментальных данных в рамках существующих представлений.

Однородные кристаллы твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.13$) с электронной проводимостью, обусловленной мелкой донорной примесью (Sb), с эффективной концентрацией $N_{sb} \approx 10^{16}\text{см}^{-3}$ получали методом выращивания из большого объема [7]. Легирование образцов медью производилось диффузионным методом при температуре $\approx 900^\circ\text{C}$, отвечающей максимальной растворимости этой примеси [8]. В ходе эксперимента температуру отжига образцов последовательно снижали с шагом 100°C . Время выдержки образцов при каждой температуре составляло 4ч. За это время устанавливалось равновесное состояние [9]. После каждой стадии отжига измеряли температурные зависимости коэффициента Холла и электропроводности. Концентрацию (n) и омическую подвижность (μ_e) электронов определяли из экспериментальных значений коэффициента Холла и холловской подвижности с использованием данных по Холл – фактору электронов [10]. В основу анализа экспериментальных результатов была заложена схема, учитывающая трехкратное акцепторное действие Cu_S и неизменность N_{Sb} с T отжига, обусловленная достаточно малой скоростью диффузии атомов Sb в матрице [6].

На основе холловских измерений для исследования отбирались кристаллы, которые после легирования медью при 900°C не изменяли тип проводимости и в которых проявлялся третий акцепторный уровень примеси. На рис.1, представлена характерная для таких образцов зависимость n от T , на примере кристалла с 6.5at% Si. Там же приведены зависимости n от T после отжига при 800 и 700°C , а также исходного образца с $N_{Sb} \approx 3.2 \cdot 10^{16}\text{см}^{-3}$. Как видно в исходном образце концентрация свободных электронов остается неизменной с T (кривая 1), что связано с полной ионизацией мелкой донорной примеси (Sb) в рассматриваемой области температур. Экспоненциальный рост n с T после легирования образца медью (кривая 2) свидетельствует о частичной компенсации верхнего уровня Cu_S , проявляющегося как псевдодонорный центр. В образце в этом случае выполняется условие $2N_{Cu} < N_{Sb} < 3N_{Cu}$. Отжиг образца при 800 и 700°C приводит к распаду пересыщенного раствора Cu_S в кристалле.

Как видно из рис.1 после отжига образца при этих T верхний уровень Cu_S в зависимостях n от T фактически не проявляется. Это связано с относительно малым значением N_{Cu} , шунтированием верхнего уровня Cu_S мелки-

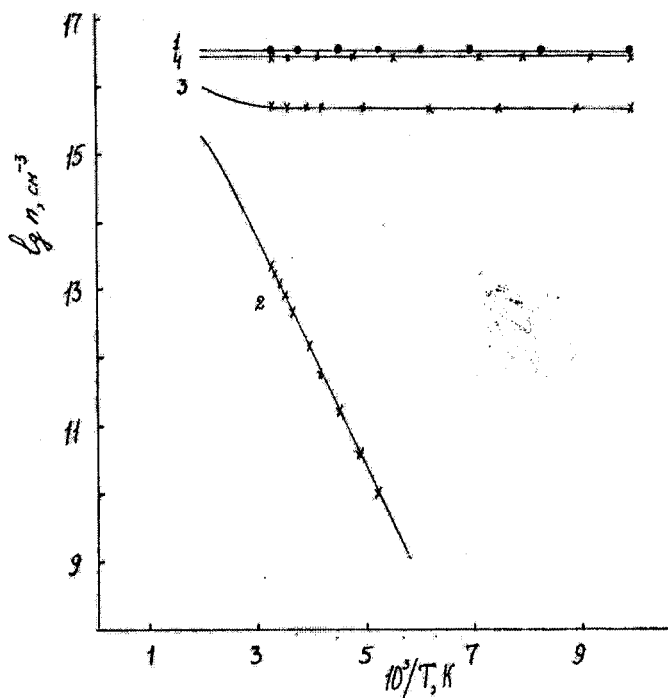


Рис.1. Температурные зависимости концентрации свободных электронов в кристалле $Ge_{1-x}Si_x$ ($x=0,065$) до (кривая 1) и после легирования медью при $900^\circ C$ (кривая 2) и последующих отжигах при $800^\circ C$ (кривая 3) и $700^\circ C$ (кривая 4) в течении 4ч. Сплошные линии расчетные.

ми донорными центрами и достаточно большим значением энергии связи этого уровня в образце ($E=E_c-0,29\text{эВ}$ [5]). Экспериментальные данные кривых рис.1 анализировались в рамках уравнения электрической нейтральности с учетом наличия в кристалле примесей меди и сурьмы. Сплошные линии, представленные на рис.1, отвечают расчетным. В расчетах использованы данные работ [5, 11] по E и максимальной растворимости N_{Cu} при различных температурах.

На рис.2 представлены температурные зависимости омической подвижности электронов в обсуждаемом образце до (кривая 1) и после легирования медью при $900^\circ C$ (кривая 2), а также отжига при $800^\circ C$ (кривая 3) и $700^\circ C$ (кривая 4). Крестиками и кружками представлены экспериментальные данные. Как видно из рис.2 подвижность электронов после легирования медью существенно уменьшается во всем интервале температур по сравнению с исходным образцом. Хотя концентрация свободных электронов в образце после легирования медью значительно понижается (см., рис.1), спад μ_e объясняется их интенсивным рассеянием на трехкратно отрицательно заряженных ионах Cu_2 . В исходном образце рассеяние электронов происходит, в основном, на однократно заряженных атомах примеси сурьмы. Отжиг образцов при 800 и $700^\circ C$ приводит к уменьшению концентрации Cu_2 и увеличению μ_e . Отметим, что дальнейший отжиг образца при $500^\circ C$ в течении 4 ч. фактически полностью восстанавливает первоначальные значения μ_e во всем интервале температур.

Анализ экспериментальных данных зависимости μ_e от T проводили в предположении аддитивности различных механизмов рассеяния. Основными механизмами

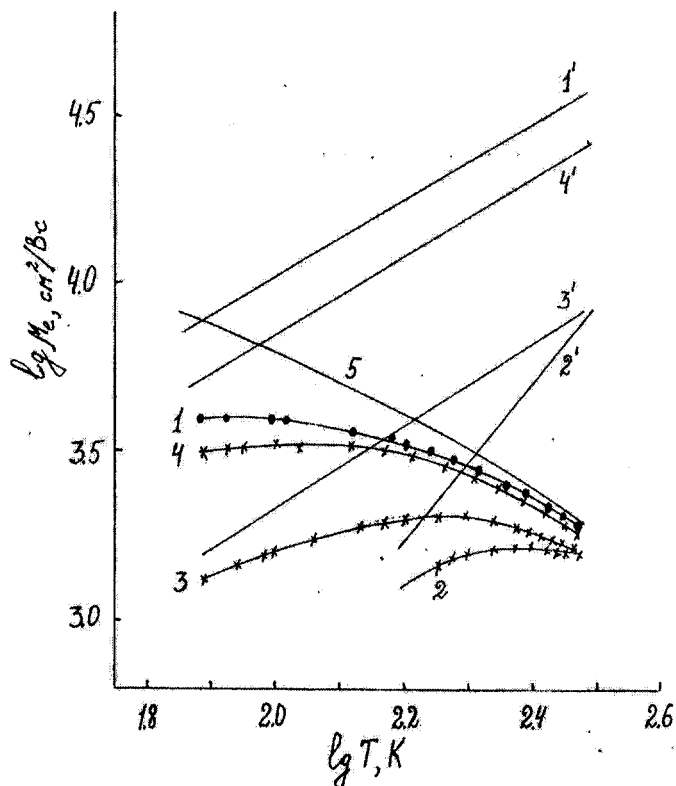


Рис.2. Температурные зависимости подвижности электронов (μ_e) в кристалле $Ge_{1-x}Si_x$ ($x=0,065$) с $N_D=3,2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ до (1,1') и после легирования медью при $900^\circ C$ (2,2') и термообработки при $800^\circ C$ (3,3') и $700^\circ C$ (4,4') в течении 4 ч. Сплошные линии теоретические. Крестики и кружки экспериментальные данные. Кривые 1-4 – результирующие μ_e ; 1'-4' – μ_e при рассеянии на ионах примеси; 5 – μ_e при рассеянии на колебаниях решетки и беспорядках сплава [3]. N_{Cu} , см^{-3} : 2,2' - $8,24 \cdot 10^{15}$; 3,3' - $3,4 \cdot 10^{15}$; 4,4' - $6,3 \cdot 10^{14}$.

рассеяния в рассматриваемой области температур являются фононы, беспорядки сплава и ионы примеси [3]. Подвижность, ограниченную рассеянием электронов на первых двух механизмах, представленную на рис.2 кривой 5, рассчитывали по данным работы [3]. Величины μ_e при рассеянии на ионах примеси определяли по формуле Брукса-Херринга [12], которая учитывает экранировку поля иона свободными носителями:

$$\mu = \frac{64\pi^{1/2}\epsilon^2(2kT)^{3/2}}{\left(\sum N_i Z^2\right)e^3 m_e^{*1/2}} \left[\ln \left\{ \frac{24m_e^* k^2 T^2 \epsilon}{e^2 h^2 n} \right\} \right]^{-1}$$

Здесь $\sum N_i Z^2$ - полная концентрация зарядов у примесей; Z -заряд соответствующих ионов примеси; n -концентрация электронов в зоне проводимости; ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника; m_e^* - эффективная масса плотности состояний электрона. В рассматриваемом нами случае все атомы мелкой примеси находятся в ионизированном состоянии с однократно положительным зарядом, а примесь меди в зависимости от температуры - в состояниях с трехкратно и двукратно отрицательными зарядами. В этом случае $\sum N_i Z^2 = 9N_{Cu}^{-3} + 4N_{Cu}^{-2} + N_{Sb}$. Используя данные, вытекающие из рис.1, были рассчитаны значения μ_e в образце, после всех стадий его обра-

ботки. На рис.2 кривые 1'-4' демонстрируют ход μ_e от T для соответствующих стадий. Сплошные линии на кривых 1-4 являются расчетными результирующими подвижностями. Как видно из рис.2 расчетные кривые достаточно хорошо описывают ход экспериментальных данных.

Резюмируя полученные экспериментальные данные по влиянию термической обработки на подвижность электронов в германиеподобных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ легированных медью при 900°C, можно сделать следующее заключение. Последовательное снижение темпера-

туры отжига образцов с электронной проводимостью с 900°C до 700°C приводит к уменьшению концентрации Cu_s и увеличению подвижности электронов. Экспериментальные данные по температурной зависимости подвижности электронов в кристаллах в интервале 77-300K согласуются с расчетными с учетом рассеяния на колебаниях решетки, беспорядках сплава и ионах примеси. Полученные результаты подтверждают нахождение замещающих атомов меди в электронных кристаллах в двух – и трехкратно отрицательно заряженных состояниях.

[1] *M.Glicksman* Phys. Rev., 1958, v.111, p.125-129.
 [2] *S.Ishida, E.Otsuka* J. Phys. Soc. Jap., 1968, v.24, p.509-511.
 [3] *G.Kh.Azhdarov, N.A.Agaev, R.A.Kyazimzade*. Sol.State Commun., 1992, v.84, №4, p.445-447.
 [4] *Ф.Милнс*. В кн. "Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках", Москва, "Мир", 1997, с.562.
 [5] *Г.Х.Аждаров, Р.З.Кязимзаде, В.В.Мир-Багиров*, ФТП, 1992. Т.26, №3, с.553-556.
 [6] *А.А.Гвелесиани, В.Ф.Дегтярев, Е.В.Скуднова*. Изв. АН СССР. Неорг. Матер., 1987, т.23, №3, с.368-372.

[7] *В.И.Романенко*. В кн. "Управление составом полупроводниковых кристаллов", Москва, "Металлургия", 1976, с.368.
 [8] *Е.А.Шелонин, А.Г.Яковенко, А.М.Хорт*. Изв.АН СССР. Неорг.Матер., 1988, т.24, №2, с.138-144.
 [9] *J.Katira, F.Hashimoto, T.Nobusada and S.Joneyama*. J. Appl. Phys., 1984, v.56, №4, p.936-941.
 [10] *Р.З.Кязимзаде*. ФТП. 1995, т.29, №6, с.1101-1104.
 [11] *В.С.Алиева, В.И.Тагиров, с.И.Тауров*. Изв. Ан СССР, Неорг. Матер., 1971, т.7, №4, с.593-596.
 [12] *Р.Смит*. В кн. "Полупроводники", Москва, Изд. И.Л. 1962, с.467.

Р.Н. Əjdərov

TERMİK E'MAL EDİLMİŞ MİS AŞQARLI $Ge_{1-x}Si_x$ KRİSTALLARINDA ELEKTRONLARIN YÜRÜKLÜYÜ

900°C temperaturda mislə legirə edilmiş $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0,13$) kristallarında elektronların yürüklüyünə termoe'malın təsiri tədqiq edilmişdir. Qəfəs düyünlərində yerləşən mis aşqarlarının (Cu_s) və kompensasiyaedici xırda donorların (Sb) nümunələrdə konsentrasiyası $\approx 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ tərtibdədir. Xoll əmsalının və keçiriciliyin temperatur asılılığının ölçülməsi əsasında göstərilmişdir ki, nümunələrin tabalma temperaturunun ardıcıl olaraq 900°C-dən 700°C-yə qədər endirilməsi Cu_s aşqarlarının konsentrasiyasının azalmasına və elektronların yürüklüyünün (μ_e) artmasına gətirib çıxarır. 77-300 K intervalında $\mu_e(T)$ asılılığının eksperimental nəticələri elektronların fononlardan, ərinti nizamsızlıqlarından və multiplet yüklənmiş mis aşqarı atomlarından səpilmələri nəzərə alınmaqla aparılmış hesablamalarla uzlaşır.

P.G. Azhdarov

ELECTRON MOBILITY IN HEAT-TREATED $Ge_{1-x}Si_x$ CRYSTALS WITH COPPER IMPURITY

The influence of heat-treatment on the electron mobility in $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0.13$) crystals doped by copper at 900°C has been investigated. Concentrations of substitutional copper impurity atoms (Cu_s) and compensating small donors (Sb) in samples were $\approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. On the basis of the temperature dependences of Hall coefficient and electroconductivity it is shown that the successive decreasing of the sample annealing temperature from 900°C to 700°C leads to the decreasing of Cu_s density and increasing of the electron mobility (μ_e). Experimental data of the μ_e dependence on T in the range 77-300 K agrees with the calculated data taking into account scattering of electrons on phonons, alloy disorders and multiplet charged copper impurity atoms.