

ПРИМЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ ТЕЛЛУРА В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЙ

Г.Х. АЖДАРОВ, Р.З. КЯЗИМЗАДЕ, Н.А. АГАЕВ, М.А. АКПЕРОВ

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

На основе холловских измерений определены закономерности изменения энергии связи донорных состояний замещающих атомов теллура (Te_s) от концентрации кремния в системе $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$). Показано, что во всём ряду твёрдых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ и в кремнии Te_s является двукратным донором, как и в германии. Энергии активации первого и второго донорных уровней Te_s изменяются линейно с составом как в германиеподобных ($x < 0,15$), так и кремниеподобных ($x > 0,15$) матрицах, в соответствии с моделью виртуального кристалла для твёрдых растворов.

Теллур относится к разряду глубоких примесных центров в германии, кремнии и их твёрдых растворах. В германии, легированном теллуrom, наблюдаются два донорных уровня с энергиями $E_c - 0,11$ эВ и $E_c - 0,30$ эВ [1]. Концентрации этих уровней равны. Двукратное донорное действие Te_s , являющегося элементом VI группы периодической системы, в Ge связывают с замещающими атомами этой примеси, в соответствии с моделью тетраэдрических ковалентных связей кристаллической решётки полупроводника. В кремнии с примесью теллура чётко выявлен только один донорный уровень с энергией $E_c - 0,14$ эВ [1]. Положение второго уровня, расположенного ближе к середине запрещённой зоны, точно не определено. Идентификация этих уровней в Si не произведена. Энергетические состояния теллура в системе $Ge-Si$ были изучены ранее в работе [2]. Исследования проведены только в германиеподобных составах кристаллов с содержанием кремния до 15 ат.%, дно зоны проводимости которых формируется минимумами в направлениях $\langle 111 \rangle$, как и в германии.

Настоящая работа посвящена исследованию основных энергетических состояний Te в $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) с целью определения закономерностей изменения с составом (x) энергии связи донорных уровней примеси как в германие-, так и в кремниеподобных составах твёрдых растворов, а также идентификации этих состояний.

Однородные кристаллы твёрдых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ с эффективной концентрацией мелких акцепторных (В) или донорных (Sb) примесей порядка $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ выращивались методом кристаллизации из большого объёма [3]. Образцы, размерами $(1 \div 2) \times (2 \div 3) \times (12 \div 15) \text{ мм}^3$, после соответствующей обработки и очистки поверхности [4], легировали теллуrom путём диффузии при 1050-1125 К, через газовую фазу. Время насыщения образцов теллуrom составляло 300-400 часов. Газотранспортное явление, имеющее место в данной системе, предотвращалось помещением образцов в среду из порошкообразного кремния [5]. Закалка кристаллов после легирования осуществлялась опусканием ампул в проточную воду. Энергетические положения донорных состояний Te определяли на основе холловских измерений в интервале 77-350 К с использованием данных работ [6] по холл-фактору электронов в $Ge_{1-x}Si_x$. Все образцы с электронной проводимостью с исходной концентрацией мелкой донорной примеси (N_D) $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ после легирования теллуrom не изменяют тип проводимости. В температурных зависимостях концентрации свободных электронов

(n) этих кристаллов проявляется верхнее донорное состояние Te_s , шунтированное электронами мелких донорных центров. В образцах с исходной дырочной проводимостью после легирования Te_s проявляются верхнее или нижнее донорные состояния с различной степенью компенсации в зависимости от соотношения концентраций мелкой акцепторной примеси (N_A) и атомов Te_s . Результаты исследования большого набора образцов в $Ge_{1-x}Si_x \langle Te_s \rangle$ показывают следующие особенности: зависимости n от T , обусловленные ионизацией первого или второго донорного уровней теллура, не описываются в рамках локального уровня с определённой энергией ионизации; увеличение степени компенсации уровня приводит к росту его эффективной энергии активации. Эти особенности имеют место и в случае других глубоких примесных центров в твёрдых растворах кристаллов (см., например [7,8]) и косвенно свидетельствуют о размытии уровней в пределах определённого энергетического интервала.

Причиной такого размытия является хаотический характер распределения компонентов в решётках твёрдых растворов кристаллов, который приводит к неидентичности в композиции ближайшего окружения примесного остова [7]. Учитывая это обстоятельство, из данных n от T определяли усреднённые значения энергии активации первого (E_1) и второго (E_2) донорных состояний теллура. Величина этого параметра определяется тем значением E , которое в уравнении электрической нейтральности кристалла, даёт наилучшее согласие с экспериментальными данными по зависимости n от T в случае с шунтированным состоянием исследуемого уровня [8]. На рис.1 представлены характерные зависимости n от T для образцов Ge и $Ge_{1-x}Si_x$ различного состава, в которых после легирования теллуrom проявляется первое донорное состояние примеси, шунтированное электронами от полностью ионизированных мелких донорных центров. В этих кристаллах удовлетворяется условие $N_{Sb} \ll N_{Te}$. В области низких T электропроводность образцов определяется в основном мелкими донорными центрами, концентрацией порядка $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. С повышением T рост концентрации свободных электронов связан с ионизацией верхнего уровня Te_s . Рис.2 демонстрирует зависимости n от T в кристаллах Ge и $Ge_{1-x}Si_x$, в которых проявляется второе донорное состояние теллура, шунтированное электронами верхнего уровня Te_s . В этих образ-

цах $0 < N_{Te} - N_a \ll N_{Te}$: здесь электропроводность кристаллов в области

низких T связана в основном с электронами верхнего уровня E_2 . Результаты определения значений E_1 и E_2 , вышеизложенным способом, указывают на линейный характер их изменения с составом (x) как в германиеподобных, так и в кремниеподобных кристаллах. Найденные значения этих параметров описываются следующими уравнениями:

$$E_1^x = E_c - (0,11 + 0,92x) \text{ эВ} \quad \text{при } 0 \leq x \leq 0,15$$

$$E_1^x = E_c - (0,22 + 0,05x) \text{ эВ} \quad \text{при } x > 0,15$$

$$E_2^x = E_c - (0,30 + 1,05x) \text{ эВ} \quad \text{при } 0 \leq x \leq 0,15$$

$$E_2^x = E_c - (0,41 + 0,14x) \text{ эВ} \quad \text{при } x > 0,15.$$

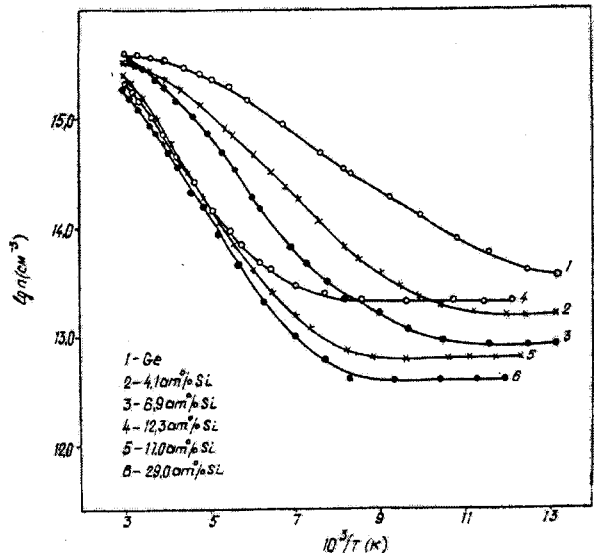


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации свободных электронов в кристаллах Ge и $Ge_{1-x}Si_x$ с шунтированным первым донорным уровнем теллура.

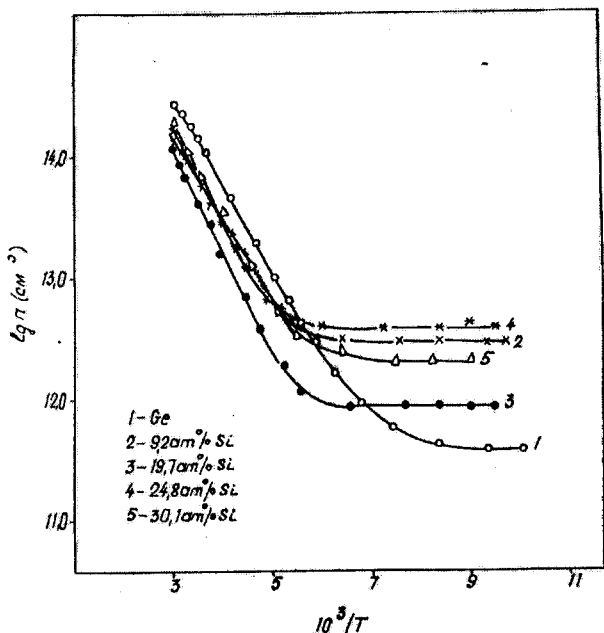


Рис. 2. Температурные зависимости концентрации свободных электронов в кристаллах Ge и $Ge_{1-x}Si_x$ с шунтированным вторым донорным уровнем теллура.

Для германиеподобных составов ($x < 0,15$) полученные значения E_1 и E_2 удовлетворительно согласуются с данными ранней работы [2]. Согласно полученным уравнениям примесь теллура во всём ряду твёрдых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ является двукратным донором, как и в Ge. Это свидетельствует о связи исследованных уровней с замещающими атомами Te в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$. Из уравнений для кремниеподобных составов имеем следующие значения для первого и второго ионизационных потенциалов замещающих атомов Te в кремнии: $E_1 = E_c - 0,27$ эВ и $E_2 = E_c - 0,55$ эВ. Эти значения существенно отличаются по энергии от уровня $E_c - 0,14$ эВ, экспериментально наблюдаемого в кремнии, легированном теллуром [1]. Очевидно, уровень $E_c - 0,14$ эВ не связан с замещающими атомами Te в Si и имеет другую природу. Отсутствие экспериментальных данных по энергетическим состояниям замещающих атомов Te в Si следует отнести к их относительно малой растворимости в этом полупроводнике, как и в случае примеси Cu [8].

Резюмируя результаты исследований энергетических состояний примеси Te в системе $Ge_{1-x}Si_x$, можно сделать следующее заключение. Замещающие атомы теллура в $Ge_{1-x}Si_x$ и в Si являются двукратными донорами, как и в Ge. Энергия связи первого и второго донорных состояний теллура растёт линейно с концентрацией кремния как в германие-, так и в кремниеподобных составах $Ge_{1-x}Si_x$, в соответствии с моделью виртуального кристалла для твёрдых растворов.

[1] А. Милнс. В кн. «Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках», Москва, «Мир», 1977, с. 562.
 [2] Г.Х. Аждаров, А.С. Ганиев, М.Г. Шахтахтинский. ФТП, 1979, т. 13, № 12, с. 2297-2301.
 [3] В.И. Романенко. В кн. «Управление составом полупроводниковых кристаллов», Москва, «Металлургия», 1976, с. 368.
 [4] У. Kamiura and F. Hashimoto. Phys. Stat. Sol., 1979, 54(a), p. 697-700.

[5] E. Janzen, R. Stedman, G. Grossman, H.G. Grimmeiss. Phys. Rev. (B), 1984, v. 29, № 4, p. 1907-1918.
 [6] P.З. Кязимзаде. ФТП, 1995, т. 29, № 6, с. 1101-1104.
 [7] L. Samuelson. In Proc. 13th Intern. Conf on Defects in Semiconductors, Coronado, CA, 1984; publ. by metal Society of AIME, Warrendale, PA (1985), p. 101.
 [8] Г.Х. Аждаров, P.З. Кязимзаде, В.В. Мур-Багиров. ФТП, 1992, т. 26, № 3, с. 553-556.

Н.Х. Əjdərov, R.Z. KazıMZadə, N.A. Ağayev, M.Ə.Əkbərov

GERMANIUM-SİLİSIUM BƏRK MƏHLULLARINDA TELLURUN AŞQAR HALLARI

Xoll ölçmələri əsasında $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) sistemlərində qəfəs düyünlərində yerləşən tellur atomlarının (Te_s) donor hallarının rabitə enerjisinin silisiumun konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişməsi qanunauyğunluğu təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, bütün $Ge_{1-x}Si_x$ bərk məhlulları sırasında və silisiumda Te_s germaniumda olduğu kimi özünü ikiqat donor kimi aparır.

İstər germaniumabənzər ($x < 0,15$) istərsə də silisiumabənzər matrislərdə Te_s -nin birinci və ikinci donor səviyyələrinin aktivləşmə enerjisi tərkibdən asılı olaraq xətti dəyişir ki, bu da bərk məhlullar üçün virtual kristal modelinə uyğundur.

G.Kh. Azhdarov, R.Z. Kyazimzade, N.A. Agaev, M.A. Akperov

IMPURITY STATES OF TELLURIUM IN GERMANIUM-SILICON SOLID SOLUTIONS

The relations of donor states activation energies of substitutional Tellurium atoms (Te_s) from Silicon concentration in $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) system have been determined on the basis of the Hall measurements. It is shown that in all range of $Ge_{1-x}Si_x$ solid solutions and in Si Te_s behaves as double acceptor, as well as in Germanium. The activation energies of the first and second donor states of Te_s change linearly with composition in Ge-like ($x < 0,15$), as well as in Si-like ($x > 0,15$) matrixes due to the model of virtual crystal for solid solutions.