

УДК 538.9

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ГЕРМАНИЙ – КРЕМНИЙ

О. Ю. СМЕРНОВА¹⁾, Г. Ф. СТЕЛЬМАХ¹⁾, Ю. М. ПОКОТИЛО¹⁾,
А. Н. ПЕТУХ¹⁾, В. П. МАРКЕВИЧ²⁾, О. В. КОРОЛИК¹⁾, А. В. МАЗАНИК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Университет Манчестера, Институт науки о фотонах,
ул. Саквилл, Манчестер M601QD, Великобритания

Электронные и структурные свойства твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0-0,062$), выращенных методом Чохральского и имплантированных водородом, изучались с помощью нестационарной спектроскопии глубоких уровней и комбинационного рассеяния света. Установлено, что с увеличением доли кремния в растворе однофотонный пик комбинационного рассеяния света, обусловленный колебаниями Ge—Ge, смещается в область более низких частот со скоростью $\Delta\omega_{\text{Ge-Ge}}/\Delta x = (31,3 \pm 0,7) \text{ см}^{-1}$, а температура максимума пика нестационарной спектроскопии глубоких уровней и комбинационного рассеяния света основного радиационного дефекта при постоянной скорости эмиссии электронов e_n возрастает. Соответствующее увеличение свободной энергии ионизации для эмиссии электронов составляет $\Delta E_c/\Delta x = (2,9 \pm 0,1) \text{ эВ}$. В ангармоническом приближении потенциала взаимодействия атомов в кристалле из анализа смещения пика комбинационного рассеяния света найдена зависимость уменьшения постоянной решетки $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, соответствующая закону Вегарда $a(x) = a_{\text{Ge}} - (a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})x = 5,623 - (0,25 \pm 0,3)x \text{ \AA}$, с ростом содержания Si. Установлена линейная зависимость изменения энергии активации дефекта от параметра решетки $\Delta E_c/\Delta a = (1,6 \pm 0,2) \text{ мэВ/\AA}$. Показано, что увеличение энергии ионизации дефекта связано с уменьшением средней длины связи Ge—Ge.

Ключевые слова: твердые растворы; кремний; германий; ионы; водород; комбинационное рассеяние; фонон; энергия ионизации; радиационный дефект.

Образец цитирования:

Смирнова О. Ю., Стельмах Г. Ф., Покотило Ю. М., Петух А. Н., Маркевич В. П., Королик О. В., Мазаник А. В. Оптические и электронные свойства твердых растворов германий – кремний // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 52–60.

For citation:

Smirnova O. Yu., Stelmach G. F., Pokotilo Yu. M., Petukh A. N., Markevich V. P., Korolik O. V., Mazanik A. V. Optical and electronic properties of germanium – silicon solid solutions. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 52–60 (in Russ.).

Авторы:

Ольга Юрьевна Смирнова – преподаватель кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Георгий Фомич Стельмах – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Юрий Мефодиевич Покотило – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры энергофизики физического факультета.

Алла Николаевна Петух – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник кафедры энергофизики физического факультета.

Владимир Павлович Маркевич – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник.

Ольга Васильевна Королик – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник кафедры энергофизики физического факультета.

Александр Васильевич Мазаник – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры энергофизики физического факультета.

Authors:

Olga Yu. Smirnova, lecturer at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

smirnova@bsu.by

Georgiy F. Stelmach, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

stelmach@bsu.by

Yuri M. Pokotilo, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of energy physics, faculty of physics.

pokotilo@bsu.by

Alla N. Petukh, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the department of energy physics, faculty of physics.

petukh@bsu.by

Vladimir P. Markevich, PhD (physics and mathematics); researcher.

v.markevich@manchester.as.uk

Olga V. Korolik, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the department of energy physics, faculty of physics.

zinchuk@bsu.by

Alexander V. Mazanik, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of energy physics, faculty of physics.

mazanik@bsu.by

OPTICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF GERMANIUM – SILICON SOLID SOLUTIONS

*O. Yu. SMIRNOVA^a, G. F. STELMACH^a, Yu. M. POKOTILO^a,
A. N. PETUKH^a, V. P. MARKEVICH^b, O. V. KOROLIK^a, A. V. MAZANIK^a*

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bUniversity of Manchester, Sackville Street, Manchester M601QD, United Kingdom

Corresponding author: A. N. Petukh (petuch@bsu.by)

The electronic and structural properties of $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions ($x = 0-0.062$) grown by the Czochralski method and implanted with proton were studied using deep level transient spectroscopy (DLTS) and Raman scattering. It was found that with an increase of the silicon fraction in the solution, the single-phonon peak corresponding to Ge—Ge vibrations shifts in the Raman spectra to lower frequencies with a rate $\Delta\omega_{\text{Ge-Ge}}/\Delta x = (31.3 \pm 0.7) \text{ cm}^{-1}$, and the temperature of the maximum of the DLTS peak for the main radiation defect at a constant electron emission rate e_n increases. The corresponding rate of increase in the free activation energy for electron emission is $\Delta E_e/\Delta x = (2.9 \pm 0.1) \text{ eV}$. The correlation between increasing Si content and decreasing in the lattice constant of $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, corresponding to Vegard's law $a(x) = a_{\text{Ge}} - (a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})x = 5,623 - (0.25 \pm 0.3)x \text{ \AA}$, was found from the Raman peak shift in the anharmonic approximation for the atomic interaction in a crystal. A linear dependence of the change in the activation energy of a defect on the lattice parameter $\Delta E_e/\Delta a = (1.6 \pm 0.2) \text{ meV/\AA}$ was found to occur. It was shown that an increasing in the ionization energy of defect is associated with a decreasing in the average length of the Ge—Ge bond.

Key words: solid solutions; silicon; germanium; ions; hydrogen; Raman scattering; phonon; ionization energy; radiation defect.

Введение

Твердые растворы GeSi – перспективные материалы для микроэлектронной промышленности вследствие возможности инженерии электронного спектра, позволяющей создавать новые оптические и высокочастотные полупроводниковые приборы [1]. В связи с этим актуальными являются исследования структурной трансформации кристаллической решетки в зависимости от компонентного состава растворов и механизмов ее влияния на свойства дефектов и примесей, особенно проявляющих электрическую активность в полупроводниках [2].

В настоящей работе изучается корреляция между смещением частоты однофононного пика комбинационного рассеяния света и изменением энергии ионизации радиационных дефектов, образованных имплантацией ионов водорода, при различной концентрации компонентов твердого раствора.

Методика эксперимента

Исследования проводились на объемных монокристаллических образцах твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0-0,062$) n -типа с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Имплантация ионов водорода флюенсом 10^{15} см^{-2} с энергией 300 кэВ и облучение электронами с энергией 6 МэВ осуществлялись при комнатной температуре.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) записывались при комнатной температуре с помощью конфокального спектрометра Nanofinder HE (LOTIS ТП, Германия). Регистрация спектров осуществлялась по схеме обратного рассеяния, разрешение спектрометра составляло $0,3 \text{ см}^{-1}$. Подводимая к образцу оптическая мощность равнялась 2 мВт, а диаметр возбуждающего пучка составлял около 1 мкм. Использовалось возбуждение излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм. КРС измерялись до имплантации и после нее.

Емкостные измерения проводились на диодах Шоттки, которые изготавливались путем термического напыления золота на поверхность кристаллов непосредственно после травления в растворе $1\text{HF} + 10\text{HNO}_3$. Качество Au—Ge, барьеров Шоттки, контролировалось путем измерения вольт-амперных характеристик при различных (77–290 К) температурах.

Глубокие электронные уровни характеризовались с помощью стандартной методики нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ) [3]. В основе этого метода лежит измерение разности емкостей $C(t_1) - C(t_2)$ на кривой релаксации емкости в процессе перезарядки центра при двух фиксированных значениях времени t_1 и t_2 . При изменении температуры функция

$$S(T) = \frac{[C(t_1) - C(t_2)]}{C}, \quad (1)$$

где C – стационарное значение емкости при обратном смещении, имеет вид спектральной линии. При постоянном значении отношения $\frac{t_1}{t_2}$ амплитуда $S(T)$ функции (1) однозначным образом связана с концентрацией дефекта, а постоянная времени термической эмиссии электронов с уровней дефектов τ_m , соответствующая температуре максимума пика, определяется соотношением

$$\tau_m = \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)}. \quad (2)$$

При изменении величины t_2 (окна регистрации) температуры максимумов пиков будут смещаться. Таким образом, измеряя спектры НСГУ при различных окнах регистрации, можно найти температурную зависимость скорости эмиссии носителей заряда $e_n = \frac{1}{\tau_m}$, которая, как следует из (2), связана с энтальпией H и энтропией S ионизации дефекта следующим соотношением [4]:

$$e_n = V_e \sigma_0 N_c \exp\left(-\frac{S}{k}\right) \exp\left(-\frac{H + E_\sigma}{kT}\right), \quad (3)$$

где $V_e = \left(\frac{3kT}{m_n}\right)^{0,5}$ – тепловая скорость электронов; $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_n}{m_0}\right)^{1,5} \left(\frac{T}{300}\right)^{1,5}$ – эффективная плотность состояний в зоне проводимости; m_n – эффективная масса электрона; m_0 – масса свободного электрона; σ_0 – сечение захвата при $T \rightarrow \infty$; E_σ – энергетический барьер при захвате носителей заряда. Фактически из измерений скорости эмиссии не удается определить отдельно H и S из формулы (3). Эти величины можно измерить лишь в сочетании с сечением захвата при $T \rightarrow \infty$ и энергетическим барьером для захвата, а именно: $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{S}{k}\right)$ и $E_c = H + E_\sigma$, где E_c – энергия активации для эмиссии электронов или дырок. Для определения значений энергии ионизации используются кривые Аррениуса, которые выражены в следующем виде [3]:

$$\frac{e_n}{T^2} = A_e \exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right), \quad (4)$$

где введен предэкспоненциальный фактор A_e , а скорость эмиссии электронов поделена на T^2 , так как произведение $(V_e \cdot N_c)$ является квадратичной функцией температуры.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Спектр КРС для образца $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0,062$), где наблюдаются три пика, обусловленных колебаниями связей Ge—Ge (1), Ge—Si (2) и Si—Si (3) [5], представлен на рис. 1.

Пики КРС, обусловленные колебаниями связи (Ge—Ge), при различных значениях x приведены на рис. 2. Видно, что наличие примеси кремния сдвигает однофононный пик Ge (см. рис. 2, пик 1) в область более низких частот. Согласно [5] это объясняется сжатием решетки германия при добавлении атомов кремния, что приводит к изменению силовой константы связи Ge—Ge. Зависимость максимума частоты пика от атомной доли кремния представлена на рис. 3. Полученная зависимость хорошо совпадает с результатами численного моделирования [6] (сплошная линия), в соответствии с которыми

$$\omega_{\text{Ge—Ge}} = \omega_{\text{Ge—Ge}}^0 - 32x + 12x^2, \quad (5)$$

где $\omega_{\text{Ge—Ge}}^0$, см^{-1} , – частота оптического фонона в чистом германии; $\omega_{\text{Ge—Ge}}$ – частота оптического фонона в твердом растворе. Для небольших значений концентрации кремния зависимость (5) может быть представлена линейным выражением $\omega_{\text{Ge—Ge}}^0 - \omega_{\text{Ge—Ge}} \approx 32x$. На рис. 3 сплошная линия соответствует соотношению $\omega_{\text{Ge—Ge}} = \omega_{\text{Ge—Ge}}^0 - (31,3 \pm 0,7)x \text{ см}^{-1}$.

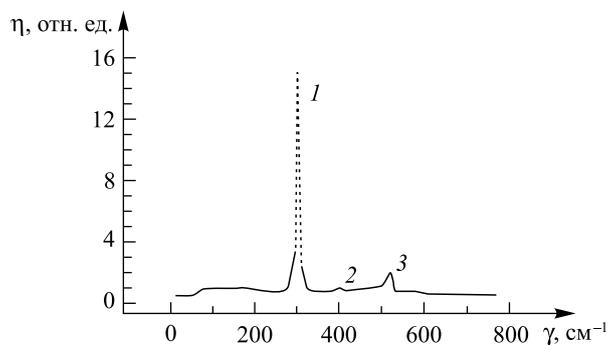


Рис. 1. Спектр КРС в твердом растворе $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0,062$).
Наблюдаемые пики соответствуют частотам колебаний мод:
1 – (Ge—Ge); 2 – (Ge—Si); 3 – (Si—Si)

Fig. 1. Raman spectrum in the solid solution $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0,062$).
The observed peaks correspond to the mode oscillation frequencies:
1 – (Ge—Ge); 2 – (Ge—Si); 3 – (Si—Si)

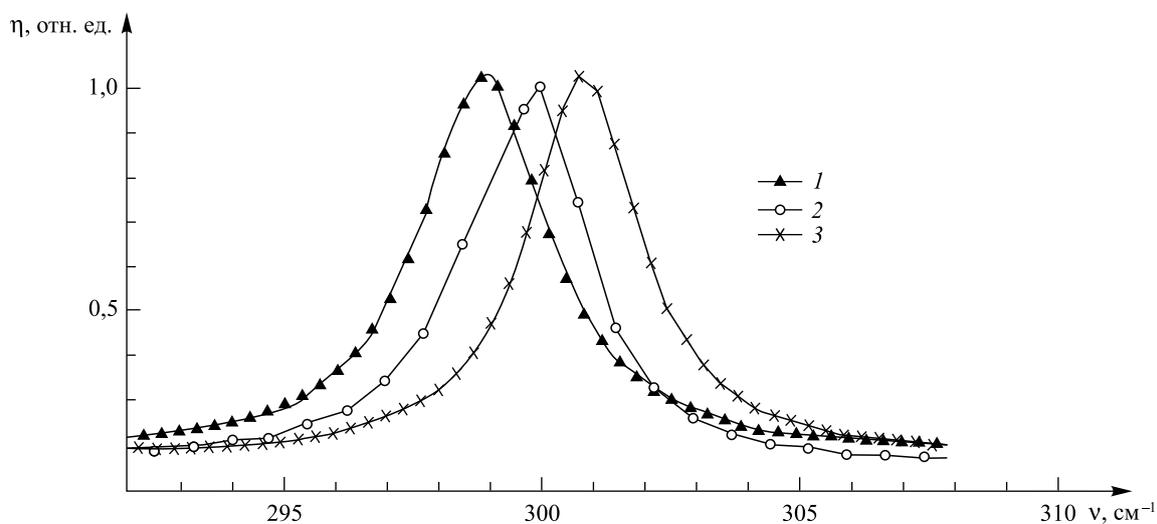


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света в области однофононного рассеяния
для $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с различным содержанием кремния (x : 1 – 0; 2 – 0,031; 3 – 0,062)

Fig. 2. Raman spectrum in the region of single-phonon scattering
for $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ with different Si content (x : 1 – 0; 2 – 0.031; 3 – 0.062)

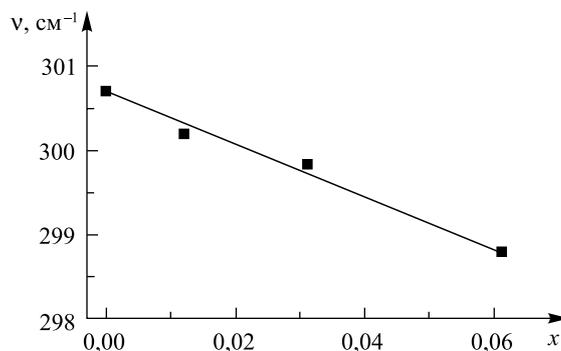


Рис. 3. Зависимость положения максимума пика КРС, обусловленного
колебаниями связи Ge—Ge, от атомной доли кремния (x)
в образцах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. Сплошная линия – расчет из работы [6]

Fig. 3. Position of the Raman peak maximum
caused by the Ge—Ge bond vibrations versus the atomic fraction
of silicon (x) in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ samples. Solid line is for calculations [6]

Зависимость изменения частоты пика, обусловленного колебаниями связи Ge—Ge, от содержания кремния x (см. рис. 2) может быть объяснена в модели ангармонического кристалла за счет изменения длины связи между атомами при релаксации решетки в процессе образования твердого раствора. Действительно, в ангармоническом приближении следует учитывать, что возвращающая сила не подчиняется закону Гука, а нелинейно зависит от смещения в соответствии с выражением [7]

$$F = -\beta(R - R_0) + \gamma(R - R_0)^2, \quad (6)$$

где β – коэффициент квазиупругой силы; γ – коэффициент ангармоничности; $(R - R_0)$ – отклонение атома от положения равновесия. В поле силы, как следует из (6), приводящей к растяжению или сжатию решетки кристалла, атомы будут занимать новое положение равновесия $(R_0 + \Delta R_0)$. Тогда для изменения частоты пика $\Delta\omega = \omega_{\text{Ge-Ge}}^0 - \omega_{\text{Ge-Ge}}$ можно получить соотношение [7]

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{Ge-Ge}}} = \frac{\gamma\Delta R_0}{\beta}. \quad (7)$$

Из анализа (7) видно, что только в ангармоническом приближении, когда величина γ не равна нулю, будет наблюдаться изменение частоты пика при изменении длины связи. Это позволяет определить зависимость параметра решетки германия от содержания неосновного компонента раствора кремния в соответствии с соотношением Грюнайзена [8]:

$$\frac{\omega_{\text{Ge-Ge}}^0}{\omega_{\text{Ge-Ge}}} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\gamma_{\text{Ge}}}, \quad (8)$$

где V_0 – объем недеформированной элементарной ячейки; V – объем элементарной ячейки в твердом растворе; γ_{Ge} – параметр Грюнайзена. Для германия эти параметры имеют следующие значения: постоянная решетки $a_{\text{Ge}} = 0,56579$ нм, параметр Грюнайзена для связи Ge—Ge $\gamma_{\text{Ge}} = (1,1-1,15)$ в диапазоне $(0,0 < x < 0,10)$ [9], $\omega_0 = 300 \text{ см}^{-1}$ [8].

Из данных рис. 3 на основании соотношения Грюнайзена найдена зависимость постоянной решетки в твердом растворе $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ от x , которая представлена на рис. 4. Сплошная линия на рис. 4 представляет собой аппроксимацию, соответствующую линейному закону Вегарда

$$a(x) = a_{\text{Ge}} - (a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})x = 5,623 - (0,25 \pm 0,3)x, \text{ \AA} \quad [10].$$

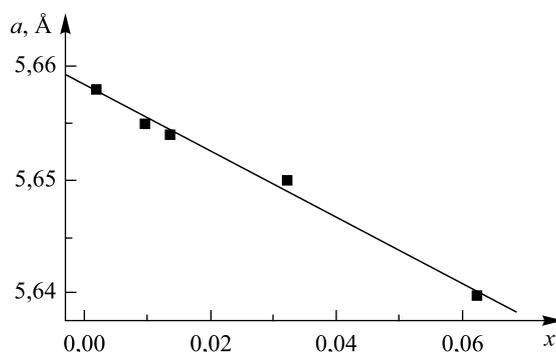


Рис. 4. Зависимость постоянной решетки твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ от x
 Fig. 4. The lattice constant of $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions as a function of x

В теории релаксированных твердых растворов обычно рассматривают два предельных случая изменения структуры решетки [11]:

а) длина связи между атомами есть величина постоянная, равная сумме радиусов составных элементов и не зависящая от состава, т. е. релаксация упругих напряжений происходит за счет незначительного искажения углов между связями (предел Паулинга [12]);

б) если энергетически более выгодно, длины связей между атомами изменяются линейно, без искажения углов между связями (предел Вегарда [10]).

В нашем случае слабого твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x < 0,062$) релаксация напряжения решетки происходит за счет линейного уменьшения длины связи Ge—Ge при добавлении атомов кремния (см. рис. 4).

Из анализа спектров НСГУ, представленных на рис. 5, следует, что максимум пика для образцов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, имплантированных ионами водорода, смещается в область низких температур с уменьшением содержания кремния при постоянной скорости эмиссии, что в соответствии с выражением (4) свидетельствует о снижении энергии активации для эмиссии E_c электронов.

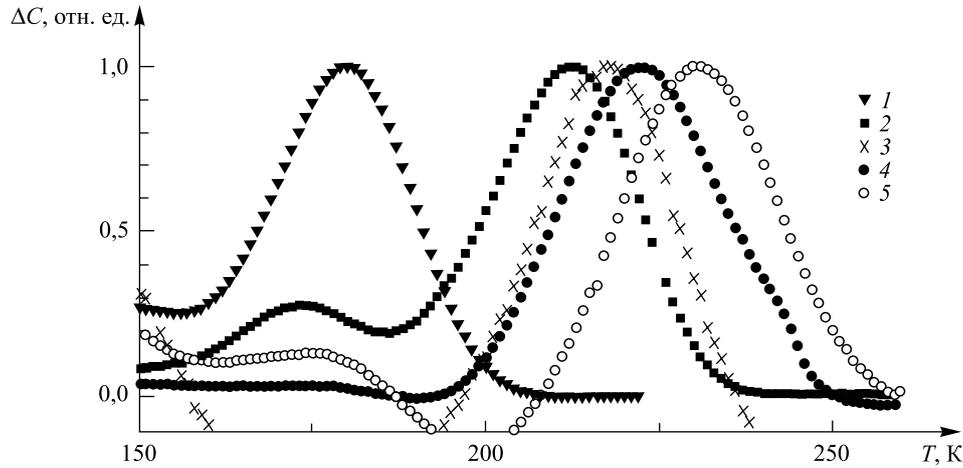


Рис. 5. Спектры НСГУ для $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с различным содержанием кремния (кривые 2–5), имплантированных ионами водорода флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, и для $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, облученного электронами флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1).
Параметры измерения: скорость эмиссии $e_n = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, напряжение смещения базы $U_b = -5 \text{ В}$, длительность импульса заполнения $t_p = 1 \cdot 10^4 \text{ с}$. Доля кремния x : 1, 4 – 0,012; 2 – 0; 3 – 0,008; 5 – 0,031

Fig. 5. DLTS spectra for $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ samples with different content of silicon (curves 2–5) implanted with hydrogen ions at the fluence $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, and for $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ (curve 1) irradiated with electrons at the fluence $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Measuring parameters: emission rate $e_n = 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, bias voltage of the base $U_b = -5 \text{ V}$, filling pulse duration $t_p = 1 \cdot 10^4 \text{ s}$. Silicon content x : 1, 4 – 0.012; 2 – 0; 3 – 0.008; 5 – 0.031

Кроме того, значения этих температур существенно отличаются от таковых для пика в образце, облученном электронами, поэтому при этих видах облучения образуются различные дефекты. Действительно, дефект при облучении электронами является известным компенсирующим радиационным дефектом – E-центром (комплекс фосфор – вакансия) со значениями параметров $E_c = 0,30 \text{ эВ}$ и $\sigma_0 = 2,7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [12; 13]. Значения параметров дефекта при имплантации ионами водорода, найденные из зависимостей Аррениуса (рис. 6), приведены в таблице.

Параметры радиационных дефектов в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$
Parameters of radiation defects in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions

x	$A_c(1 \cdot 10^5), \text{ с}^{-1} \cdot \text{ К}^{-2}$	$E_c, \text{ эВ}$	$\sigma_0, \text{ см}^2$
0	1,09	0,27	$2,5 \cdot 10^{-17}$
0,008	2,0	0,29	$4,6 \cdot 10^{-17}$
0,012	6,6	0,32	$1,46 \cdot 10^{-16}$
0,031	46,0	0,36	$1,05 \cdot 10^{-15}$

Из анализа полученных данных видно, что энергия ионизации и сечение захвата дефектов существенно изменяются в зависимости от величины x . Можно предположить, что это связано с различной природой образующихся дефектов. Однако зависимость $\ln A_c = f(E_c)$ (рис. 7) подчиняется правилу Мейера – Нельделя [12] и тем самым подтверждает одинаковую природу дефектов, образующихся в растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, при имплантации ионами водорода [12].

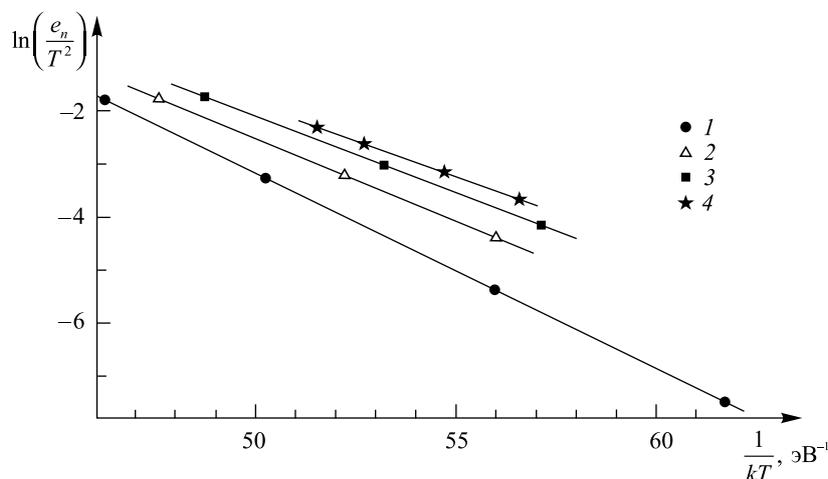


Рис. 6. Зависимости Аррениуса для центров, образованных в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ имплантацией ионами водорода. Параметры дефектов представлены в таблице, приведенной ниже.

Для x : 1 – 0,031; 2 – 0,012; 3 – 0,008; 4 – 0

Fig. 6. Arrhenius plots for the centers formed in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ by implantation with hydrogen ions. Parameters of the traps derived from the plots are listed in the table.

For x : 1 – 0.031; 2 – 0.012; 3 – 0.008; 4 – 0

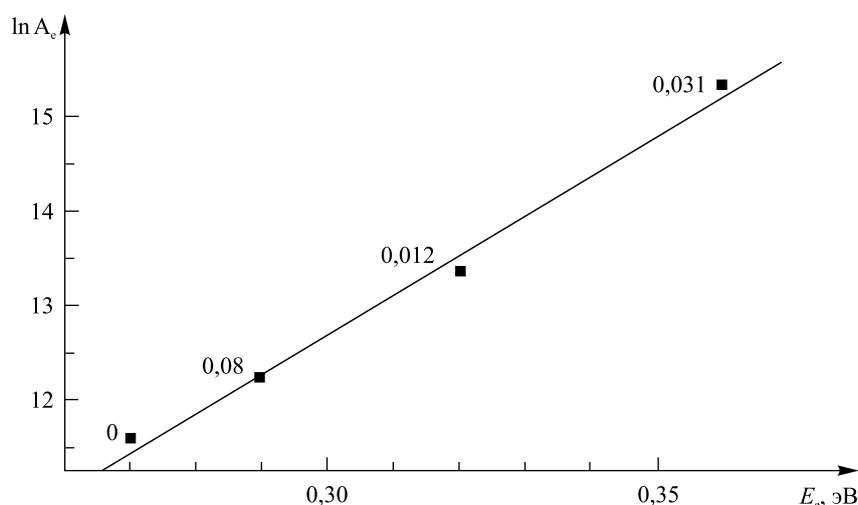


Рис. 7. Зависимость предэкспоненциального фактора $\ln A_e$ от энергии ионизации электронов E_e для дефектов в образцах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, имплантированных протонами

Fig. 7. Dependence of the pre-exponential factor $\ln A_e$ on the electron ionization energy E_e for the defects in proton implanted $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions

Следовательно, изменение параметров наблюдаемого радиационного дефекта, по-видимому, связано с деформацией решетки в области их локализации.

Зависимость энергии ионизации радиационных дефектов от состава твердых растворов кремния с примесью германия наблюдалась и ранее [12; 14]. Причиной этого, по мнению авторов [12; 14], являлось изменение параметра решетки (длины связи Si—Si).

В нашем случае так же, как и в [12; 14], наблюдается линейное изменение энергии ионизации электронов водородосодержащего дефекта в образцах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ в зависимости от атомной доли кремния x (рис. 8) с наклоном $\Delta E_e/\Delta x = (2,9 \pm 0,1)$ эВ.

Кроме того, изменение энергии ионизации $\Delta E_e = E_0 - E_x$ линейно уменьшается со снижением параметра решетки $\Delta E_e/\Delta a = (1,6 \pm 0,2)$ мэВ/Å (рис. 9).

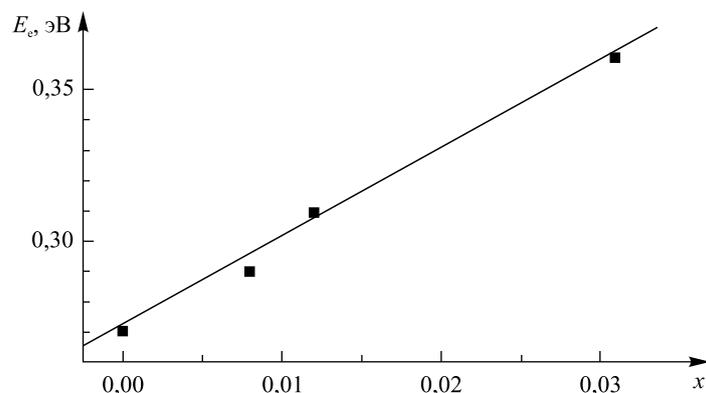


Рис. 8. Зависимость энергии ионизации электронов водородосодержащего дефекта в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ от атомной доли кремния x
Fig. 8. The electron ionization energy of a hydrogen-related defect in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions versus the atomic fraction of silicon x

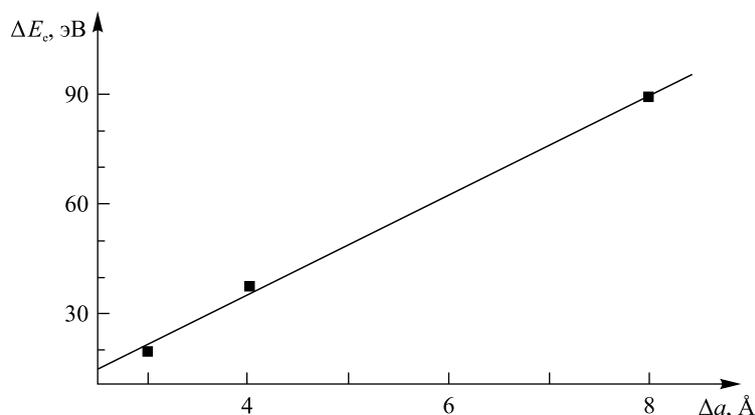


Рис. 9. Изменение энергии ионизации электронов водородосодержащего дефекта в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ при изменении параметра решетки
Fig. 9. Variations in the electron ionization energy for a hydrogen-related defect in the $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ solid solutions versus the lattice parameter

Заключение

Таким образом, наблюдаемые линейные зависимости частоты пика КРС и параметра решетки в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0-0,062$) обусловлены уменьшением связей Ge—Ge при увеличении содержания кремния. Следовательно, обнаруженное линейное возрастание энергии ионизации радиационного дефекта $\Delta E_e/\Delta x = (2,9 \pm 0,1)$ эВ и ее изменение $\Delta E_e/\Delta a = (1,6 \pm 0,2)$ мэВ/Å от параметра решетки обусловлены структурной деформацией твердых растворов при изменении длин связей атомов германия.

Библиографические ссылки

1. Claus C., Simoen E. Germanium Based Technologies. From Materials to Devices. Amsterdam : Elsevier, 2007.
2. Balsas A., Countinho J., Torres J. B., et al. Calculation of deep states in SiGe alloys. Interstitial carbon-oxygen complexes // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, issue 8. Article ID: 085201-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.085201.
3. Dast A., Singht V. F., Lang D. V. Deep level transient spectroscopy (DLTS) analysis of defect levels in semiconductor alloys // Semicond. Sci. Technol. 1988. Vol. 3, № 12. P. 1177–1183. DOI: 10.1088/0268-1242/3/12/005.
4. Markevich A. V., Litvinov V. V., Emtsev V. V., et al. Phonon-assisted changes in charge states of deep level defects in germanium // Phys. B: Condens. Matter. 2006. Vols 376–377. P. 61–65. DOI: 10.1016/j.physb.2005.12.017.
5. Wenli Z., Tinghui L. Compositional dependence of Raman frequencies in SiGe alloys // J. Semicond. 2012. Vol. 33, issue 11. Article ID: 112001-5. DOI: 10.1088/1674-4926/33/11/112001.

6. Володин В. А., Ефремов В. Д., Дерябин А. С. и др. Определение состава и механических деформаций в GeSi гетероструктурах из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света: уточнение параметров модели // ФТП. 2006. Т. 40, вып. 11. С. 1349–1355.
7. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников : монография. М. : Наука, 1978.
8. Гайслер В. А., Кузнецов О. А., Неизвестный И. Г. и др. Комбинационное рассеяние света на локальных колебаниях твердых растворов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ // ФТТ. 1989. Т. 31, вып. 11. С. 292–297.
9. Sui Z., Burke H. H., Herman I. P. Raman scattering in germanium-silicon alloys under hydrostatic pressure // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48, issue 4. P. 2162–2168. DOI: 10.1103/PhysRevB.48.2162.
10. Vegard L. Die Konstitution der Mischkristalle und die Raumfüllung der Atome // Zeitschrift für Physik. 1921. Vol. 5. P. 17–26. DOI: 10.1007/BF01349680.
11. Васин А. С. Моделирование локальных структурных свойств твердого раствора SiGe с использованием эмпирических потенциалов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5 (2). С. 371–375.
12. Markevich V. P., Hawkins I. D., Peaker A. R., et al. Vacancy-group-V impurity atom pairs in Ge crystals doped with P, As, Sb and Bi // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, issue 23. Article ID: 235213-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.235213.
13. Покотило Ю. М., Петух А. Н., Литвинов В. В. и др. Формирование доноров в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, имплантированных протонами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2014. № 2. С. 56–60.
14. Markevich V. P., Peaker A. R., Coutinho I., et al. Structure and properties of vacancy-oxygen complexes in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69, issue 12. Article ID: 125218. DOI: 10.1103/PhysRevB.69.125218.
15. Pauling L. The nature of the chemical bond. New York : Cornell university press, 1960.

References

1. Claus C., Simoen E. Germanium Based Technologies. From Materials to Devices. Amsterdam : Elsevier, 2007.
2. Balsas A., Coutinho J., Torres J. B., et al. Calculation of deep states in SiGe alloys. Interstitial carbon-oxygen complexes. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70, issue 8. Article ID: 085201-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.085201.
3. Dast A., Singht V. F., Lang D. V. Deep level transient spectroscopy (DLTS) analysis of defect levels in semiconductor alloys. *Semicond. Sci. Technol.* 1988. Vol. 3, No. 12. P. 1177–1183. DOI: 10.1088/0268-1242/3/12/005.
4. Markevich A. V., Litvinov V. V., Emtsev V. V., et al. Phonon-assisted changes in charge states of deep level defects in germanium. *Phys. B: Condens. Matter*. 2006. Vols 376–377. P. 61–65. DOI: 10.1016/j.physb.2005.12.017.
5. Wenli Z., Tinghui L. Compositional dependence of Raman frequencies in SiGe alloys. *J. Semicond.* 2012. Vol. 33, issue 11. Article ID: 112001-5. DOI: 10.1088/1674-4926/33/11/112001.
6. Volodin V. A., Efremov V. D., Deryabin A. S., et al. [Determination of composition and mechanical deformations in GeSi heterostructures from spectroscopic data of Raman scattering of light: refinement of model parameters]. *Fiz. Tekh. Poluprovodn. = Semiconductors*. 2006. Vol. 40, issue 11. P. 1349–1355 (in Russ.).
7. Anselm A. I. [Introduction to the theory of semiconductors] : monograph. Moscow : Nauka, 1978 (in Russ.).
8. Geisler V. A., Kuznetsov O. A., Neizvestnyi I. G., et al. [Raman scattering on local oscillations of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ solid solutions]. *Fiz. Tverd. Tela = Phys. Solid State*. 1989. Vol. 31, issue 11. P. 292–297 (in Russ.).
9. Sui Z., Burke H. H., Herman I. P. Raman scattering in germanium-silicon alloys under hydrostatic pressure. *Phys. Rev. B*. 1993. Vol. 48, issue 4. P. 2162–2168. DOI: 10.1103/PhysRevB.48.2162.
10. Vegard L. Die Konstitution der Mischkristalle und die Raumfüllung der Atome. *Zeitschrift für Physik*. 1921. Vol. 5. P. 17–26. DOI: 10.1007/BF01349680 (in Ger.).
11. Vasin A. S. [Modeling of local structural properties of SiGe solid solution using empirical potentials]. *Vestnik of N. I. Lobachevsky Univ. of Nizhni Novgorod*. 2010. No. 5 (2). P. 371–375 (in Russ.).
12. Markevich V. P., Hawkins I. D., Peaker A. R., et al. Vacancy-group-V impurity atom pairs in Ge crystals doped with P, As, Sb and Bi. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70, issue 23. Article ID: 235213-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.235213.
13. Pokotilo Yu. M., Petukh A. N., Litvinov V. V., et al. Donors formation in solid solutions $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ implanted with protons. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2014. No. 2. P. 56–60 (in Russ.).
14. Markevich V. P., Peaker A. R., Coutinho I., et al. Structure and properties of vacancy-oxygen complexes in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 69, issue 12. Article ID: 125218. DOI: 10.1103/PhysRevB.69.125218.
15. Pauling L. The nature of the chemical bond. New York : Cornell university press, 1960.

Статья поступила в редколлегию 12.01.2018.
Received by editorial board 12.01.2018.