

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННОГО n- И p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>

*Г. В. Бокучава, Г. Э. Мургулия, В. Г. Кашия*

*Сухумский физико-технический институт им. ак. И. Векуа, г. Тбилиси, Грузия*

Представлены результаты исследования влияния реакторного облучения на термоэлектрические свойства сильнолегированных (концентрация носителей заряда  $\geq 10^{20}$  см<sup>-3</sup>) сплавов Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> электронной и дырочной проводимости (легированных фосфором и бором соответственно). Показано, что «пороговые» значения флюенсов быстрых нейтронов, по достижению которых в кремний-германиевых сплавах начинается резкое возрастание электросопротивления и термоэлектродвижущей силы, составляет  $\Phi \sim 6 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> для n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> и  $\Phi \sim 1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> для p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>. Установлено, что при флюенсе нейтронов  $\geq 10^{19}$  см<sup>-2</sup> и температуре облучения  $> 873$  К более радиационно-стойким является сплав n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>, который может быть использован в составе ядерных энергетических установок при рабочих температурах 873...973 К и флюенсах по быстрым нейтронам  $10^{19} \dots 10^{20}$  см<sup>-2</sup>.

На современном этапе освоения космического пространства разрабатываются разные Международные программы типа «Марс» и «Юпитер», которые включают запуск беспилотных и пилотируемых космических аппаратов, оснащённых мощными автономными источниками тока. В подобных системах самым перспективным источником первичной энергии считается атомный реактор, а среди устройств преобразования реакторного тепла в электричество лучше всех разработаны термоэлектрические генераторы (ТЭГ) тока. Физический принцип работы ТЭГ основан на эффекте Зеебека, который заключается в возникновении электродвижущей силы в твёрдых телах под воздействием температурного градиента. В техническом отношении термоэлектрический генератор представляет собой высокоэффективную термопару или целую батарею термопар. Разработка термоэлектрических генераторов тока в Грузии началось в конце 50-х годов прошлого века, когда создание термоэлектрических автономных источников тока бортовых систем космических аппаратов было поручено одному из ведущих научных организаций бывшего Советского Союза – Сухумскому физико-техническому институту (СФТИ) [1, 2].

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в СФТИ под научным руководством директора института, академика И.Г. Гвердцители, показали, что для изготовления высокоэффективных термоэлектрических генераторов наиболее перспективными являются полупроводниковые материалы на основе системы кремний-германий (Si-Ge) [3]. Сплавы Si-Ge имеют высокую температуру плавления, приемлемую ширину запрещенной зоны, низкое давление насыщенных паров и хорошие физико-механические свойства, которые позволяют создать надёжные электрические коммутации термоэлементов. Уже в 1964 году

была создана и запущена в космос первая в мире ядерная термоэлектрическая энергетическая установка (ЯТЭУ) под кодовым названием «Ромашка». Эта была компактная установка «встроенного» типа, в которой горячий спай ТЭГ получал тепло по теплопроводности непосредственно из активной зоны реактора. В термогенераторе использовался кремний-германиевый сплав определённого состава, а коммутационные узлы были изготовлены на основе графита [1].

Скоро после «Ромашки» был разработан двухкаскадный ТЭГ космического назначения под условным названием «Бук», который в отличие от «Ромашки» был «выносного» типа. Это значит, что электрогенерирующие элементы термогенератора располагались вне активной зоны реактора и подвод тепловой энергии горячим спаем из активной зоны реактора осуществлялся теплопередающим жидкометаллическим контуром с литий-калиевой эвтектикой. Это практически исключило влияние быстрых нейтронов и жесткого  $\gamma$ -излучения реактора на конструкционные элементы ТЭГ. В 1975 году после многолетних многопараметрических ведомственных испытаний «Бук» был передан в серийное производство и прошел эксплуатацию в составе более 30 искусственных спутников земли серии «Космос» [1].

В последние годы прошлого столетия в термоэлектрическом приборостроении внимание разработчиков вновь привлёк «встроенный» вариант ядерной термоэлектрической энергетической установки, который имеет целый ряд преимуществ перед ЯТЭУ с теплоносителем [1]. Однако практическая реализация «встроенного» варианта ЯТЭУ наталкивается на ряд проблем, главная из которых – радиационная деградация термоэлектрических свойств материалов ТЭГ [1, 3]. Именно нахождение термоэлектрических и конструкционных материалов

ТЭГ в сильных полях ядерной радиации, где флюенсы нейтронов могут достигать и даже превышать  $10^{20} \text{ см}^{-2}$ , является характерной особенностью систем преобразования энергии на основе ядерных реакторов. Поэтому исследование радиационной стойкости термоэлектрических материалов и, особенно сплавов Si-Ge при высоких флюенсах, является актуальной проблемой [3-5].

Радиационная стойкость термоэлектрических сплавов системы Si-Ge после облучения образцов при низких температурах ( $T \leq 373 \text{ K}$ ) и флюенсе по быстрым нейтронам не выше  $\sim 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  исследовалась в работах [4, 5]. Поскольку вид и количество создаваемых облучением дефектов существенно зависит от температуры [6], то ясно, что использовать данные работ [4, 5] для оценки радиационной стойкости кремний-германиевых сплавов в области рабочих температур (773...973 K) нельзя.

В настоящей работе изложены основные результаты реакторных испытаний сплавов  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  при температурах в диапазоне 773...973 K с набором флюенса по быстрым нейтронам до  $\sim 4,0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ .

Исследования проводились на водо-водяном энергетическом реакторе (ВВР-М) Института ядерных исследований (ИЯИ) Академии наук Украины в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы ядерных энергетических установок. В качестве донорной примеси образцов сильнолегированного сплава  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  с электронной проводимостью (n-типа) применялся фосфор (P), а сплав с дырочной проводимостью (p-типа) был легирован бором (B) с различным содержанием изотопов  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{B}$ .

Технология изготовления образцов и конструкция физмакета описаны в работе [3]. Методика измерения и обработки экспериментальных результатов включали регистрацию величин значения коэффициента термоэлектродвижущей силы ( $\alpha$ ) и удельного электросопротивления ( $\rho$ ) образцов до облучения (соответственно  $\alpha_0$  и  $\rho_0$ ) и в процессе облучения (соответственно  $\alpha_\Phi$  и  $\rho_\Phi$ ) в зависимости от флюенса по быстрым нейтронам ( $\Phi, \text{ см}^{-2}$ ) на информационно-измерительном комплексе «Муссон». После этого строились зависимости относительного изменения коэффициента термоэлектродвижущей силы  $\alpha_{от} = \alpha_\Phi / \alpha_0$  и удельного электросопротивления  $\rho_{от} = \rho_\Phi / \rho_0$  образцов от флюенса по быстрым нейтронам и проводился соответствующий анализ. Точность измерений  $\alpha$  и  $\rho$  в среднем за весь период облучения составляла  $\sim 8...10 \%$ .

Полученные в экспериментах некоторые результаты испытаний показаны на рис. 1 и 2 в виде дозовых зависимостей  $\alpha = f(\Phi)$  и  $\rho = f(\Phi)$  для электронных и дырочных образцов соответственно. Здесь же приведены графики изменения температуры облучаемого образца в процессе облучения. Значительные скачки температуры объясняются нестабильностью энергетического режима реактора, частыми аварийными остановками. Вид дозовых зави-

симостей типичен для физики радиационных процессов: начиная с некоторого «порогового» значения флюенса  $\Phi$ , оба кинетических параметра возрастают, причём  $\rho$  более чувствительно к облучению, чем  $\alpha$ .

Возрастание  $\alpha$  и  $\rho$  в облучаемых полупроводниках связано в основном со следующими процессами [7]:

- Вводимые облучением дефекты кристаллической решётки (кластеры дефектов) создают в материале систему энергетических барьеров, а рассеяние носителей заряда на барьерах приводит к увеличению  $\alpha$  и  $\rho$ .
- Захват носителей заряда на пограничные энергетические состояния, связанные с кластерами дефектов, сопровождающийся связыванием части атомов легирующей примеси в комплексы и переход их из электроактивного в нейтральное состояние, обедняет объём неповреждённой матрицы (M) свободными носителями заряда, что приводит к увеличению  $\alpha$  и  $\rho$ .
- Наличие в материале кластеров дефектов, изолированных от M барьерами, приводит к уменьшению проводящего сечения образца, искажению распределения токовых линий и возрастанию  $\rho$ . Влияние этого фактора на величину  $\alpha$  значительно более слабое.

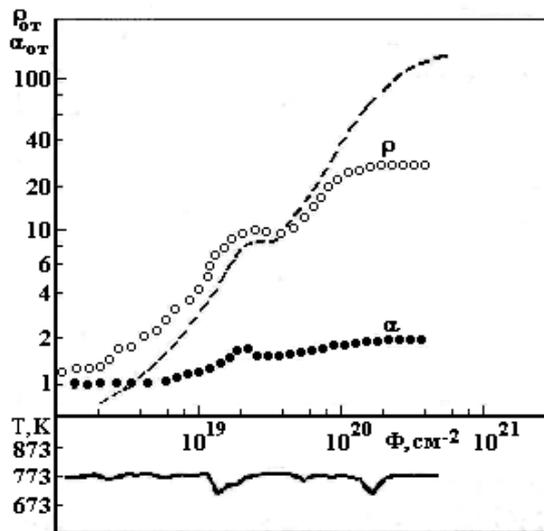


Рис. 1. Дозовые зависимости  $\alpha$  и  $\rho$  в образцах электронного  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  при температуре экспозиции  $T_\Phi = 773 \text{ K}$

Как в электронных, так и в дырочных образцах имеются аномалии в дозовых зависимостях  $\alpha$  и  $\rho$  в области флюенсов  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Здесь монотонный рост обоих параметров сменяется падающими участками с последующим увеличением вплоть до выхода на насыщение. Насыщение дозовых зависимостей  $\alpha = f(\Phi)$  и  $\rho = f(\Phi)$  свидетельствует о переходе материала в квазиравновесное состояние, когда устанавливается динамическое равновесие между

процессами зарождения новых кластеров дефектов и распадом и перестройкой старых.

Исследования показали, что в области флюенсов, соответствовавших аномалиям дозовых зависимостей, резко менялась и температура экспозиции  $T_3$ , причём на половине образцов экспериментальной сборки  $T_3$  скачком уменьшалась (см. рис. 2,а), а на остальных – увеличивалась (см. рис. 2,б). Аномалии наблюдались и в том, и в другом случаях. Причины обнаруженных явлений пока не ясны. Можно высказать предположение, что причиной немонотонности дозовых зависимостей электрофизических свойств облучаемых образцов является перекрытие отдельных кластеров дефектов в материале и образование суперкластера, пронизывающего весь образец. Появление в образце второго проводящего канала должно приводить к снижению  $\alpha$  и  $\rho$ . Оценка объёмной доли  $f$  кластеров дефектов в исследуемых сплавах при флюенсе  $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  даёт значения  $f \approx 0,3 \dots 0,5$ , так что перекрытие кластеров дефектов

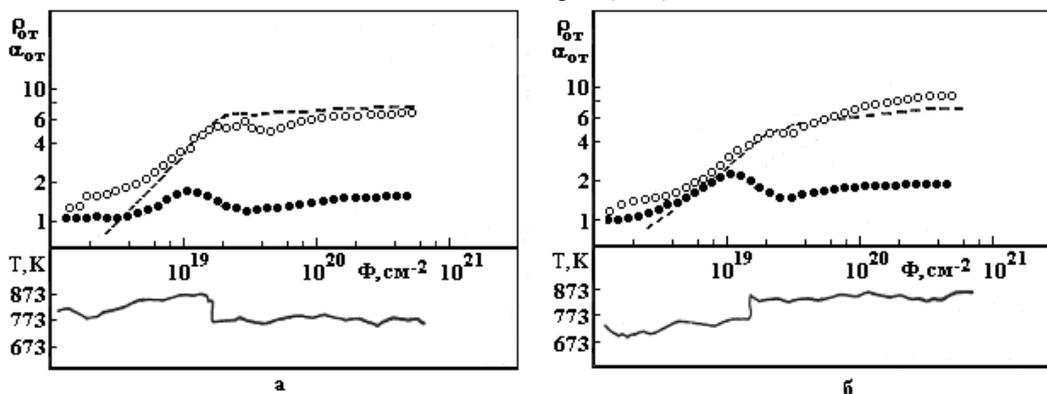


Рис. 2. Дозовые зависимости  $\alpha$  и  $\rho$  в дырочном  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  при  $T_3=673 \text{ K}$  (а) и  $T_3=773 \text{ K}$  (б)

На рис. 1 и 2 пунктиром отмечены электросопротивления образцов, измеренные при комнатной температуре на холодном реакторе. Видно, что на всех образцах при флюенсах  $\Phi < 10^{19} \text{ см}^{-2}$  сохраняется исходный «металлический» тип температурной зависимости  $\rho$ , а при  $\Phi > 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  он меняется на полупроводниковый. Характерно, что смена типа происходит в области аномалий. В  $p\text{-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  отличия низкотемпературных и высокотемпературных значений  $\rho$  незначительны, причём, чем выше температура экспозиции, тем при больших флюенсах наступает насыщение. Известно [7], что повышение температуры экспозиции при облучении приводит к увеличению доли более стабильных кластеров дефектов, скорость образования которых замедлена по сравнению с более стабильными. В дырочном материале, в отличие от электронного, эти закономерности прослеживаются довольно отчётливо. В электронных образцах изменение температуры экспозиции с 673 до  $\sim 823 \text{ K}$  практически не сдвигает момент выхода на насыщение ( $\Phi \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ), а сами дозовые зависимости, представленные в относительных единицах, почти точно накладываются друг на друга. Можно предположить, что в электронном сплаве

может быть обосновано и в рамках теории протекания. Косвенным свидетельством в пользу высказанного предположения может служить и наблюдаемый сдвиг аномалий в  $n\text{-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  в сторону больших  $\Phi$  по сравнению с  $p\text{-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ . Качественно это можно объяснить особенностью легирующей примеси: изотоп  $^{10}\text{B}$ , составляющий  $\sim 18\%$  от общего количества введённой в сплав лигатуры, имеет большое сечение захвата ( $\sim 1000 \text{ бн}$ ) тепловых нейтронов. Осколки ( $n, \alpha$ )-реакций взаимодействия медленных нейтронов с атомами  $^{10}\text{B}$  обладают большой кинетической энергией и дополнительно (по сравнению с  $n\text{-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ -сплавом) повреждают матрицу. Следовательно, при равных флюенсах концентрация кластеров дефектов в дырочном материале будет больше, чем в электронном, и перекрытие произойдёт при меньшей дозе облучения. В работе [8] указывалось, что замена изотопа  $^{10}\text{B}$  на изотоп  $^{11}\text{B}$  позволяет значительно повысить радиационную стойкость сплава  $p\text{-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ .

спектр кластеров дефектов в этом температурном интервале существенно не изменяется.

На основе экспериментально полученных результатов можно по сплавам  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  оценить вклады в интегральное электросопротивление облучаемых образцов от рассеяния носителей на барьерах кластеров дефектов ( $\rho_c$ ) и обеднения матрицы свободными носителями заряда ( $\rho_m$ ). При этом измеряемое при облучении электросопротивление  $\rho_\Phi$  можно рассматривать как сумму вкладов обоих механизмов  $\rho_\Phi = \rho_c + \rho_m$ . Расчёт проводился для ограниченного диапазона флюенсов ( $1 \cdot 10^{18} \dots 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ). В этом диапазоне с достаточной уверенностью можно считать, что измеряемый коэффициент термоэлектродвижущей силы определяется свойствами неповреждённой облучением матрицы и его рост отражает обеднение матрицы свободными носителями заряда. Тогда из графиков зависимости  $\alpha = f(\rho_m)$ , при фиксированной температуре, можно определить  $\rho_m$  для данного флюенса и рассчитать  $\rho_c$ .

На рис. 3. показаны дозовые зависимости  $\rho_m$  и  $\rho_c$  для электронных (а) и дырочных (б) образцов сплава  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ . Для начальных этапов облучения, когда  $\Phi < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , из имеющихся данных можно оценить средний радиус кластеров дефектов в сплавах

$Si_{0.7}Ge_{0.3}$ , используя простейшую сферическую модель кластеров дефектов [6]. Это имеет важное значение, так как согласно [9] изменение электрофизических свойств материала при высокотемпературном облучении в реакторе при  $\sim 773$  К обусловлено в основном именно образованием кластеров дефектов, в объёме которых находится до 100 атомов легирующей примеси, а число первично смещённых атомов кремния и германия превышает 1000.

Весь процесс смещения атомов в каскаде завершается за время  $\sim 10^{-13}$  с. За время  $\sim 10^{-12}$  с получен-

ная кинетическая энергия передаётся решётке и только успевают реализоваться хаотическое, подобное жидкости, распределение атомов. При этом средний объём кластера  $V_c$  можно определить из соотношения:

$$f = 1 - \exp[-V_c W \Phi], \quad (1)$$

где  $f$  – объёмная концентрация кластеров дефектов в облучаемом материале;  $W$  – макроскопическое сечение их образования (для реакторного спектра  $W \approx 0,16 \text{ см}^{-1}$ ).

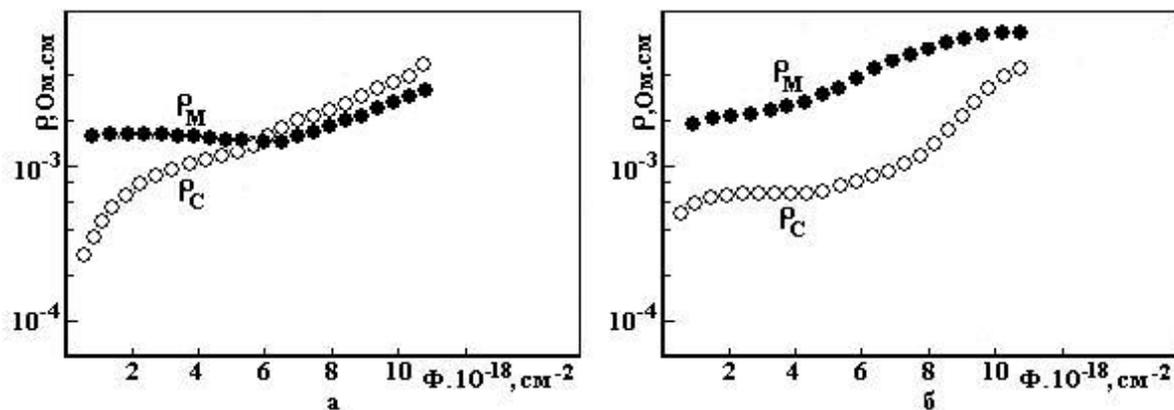


Рис. 3. Дозовые зависимости электросопротивлений неповреждённой матрицы ( $\rho_M$ ) и материала с кластерами дефектов ( $\rho_c$ ) в электронном (а) и дырочном (б) сплавах  $Si_{0.7}Ge_{0.3}$  при  $T_3 = 773$  К

Для эффективной проводимости  $\sigma_e$  среды с кластерными дефектами теория эффективной среды даёт выражение

$$\sigma_e = \sigma_\phi = \sigma_M \frac{(1 - Lx)(1 - f)}{1 - Lx(1 - f)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_\phi$  – проводимость облучаемого материала;  $\sigma_M$  – проводимость неповреждённой матрицы;  $Lx$  – коэффициент деполяризации, характеризующий форму включения ( $0 \leq Lx \leq 1$ ).

Сравнение уравнений (1) и (2) для  $V_c$  даёт выражение:

$$V_c = \frac{1}{W\Phi} \ln \frac{\sigma_\phi Lx + \sigma_M(1 - Lx)}{\sigma_\phi}. \quad (3)$$

На рис. 4 изображены кривые дозовых зависимостей среднего радиуса кластеров, рассчитанные в предположении сферической формы кластерных дефектов ( $Lx = 1/3$ ).

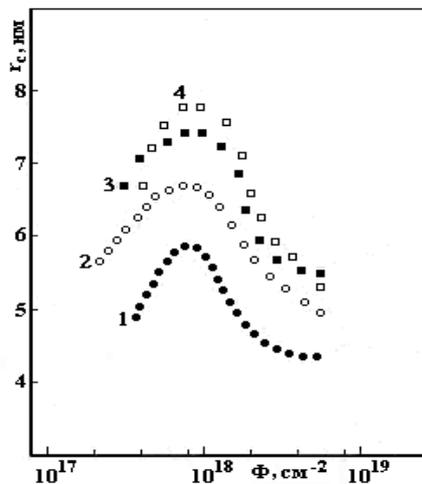


Рис. 4. Расчётные дозовые зависимости среднего радиуса кластеров  $r_c$  в облученных сплавах  $Si_{0.7}Ge_{0.3}$  электронного (3, 4) и дырочного (1, 2) типов при  $T_3 = 673$  К (2, 4) и  $T_3 = 773$  К (1, 3)

Все кривые подобны и имеют максимумы при  $\Phi \approx 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . В электронном материале кривые для температур экспозиции 673 и 773 К различаются мало, а в дырочном материале с уменьшением  $T_3$  объём кластеров увеличивается.

Уменьшение  $r_c$  с увеличением  $\Phi$  (при  $\Phi > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) может быть связано с распадом какого-либо кластера дефектов в материале. С другой стороны, следует учитывать и несовершенство расчетной модели – форма кластера дефектов, например, может сильно отличаться от сферической. Однако

пересчёт экспериментальных данных на эллипсоидальную форму кластера дефектов, незначительно меняя численные значения, оставляет неизменным качественный вид расчётных кривых.

Изменения удельного сопротивления в зависимости от дозы облучения быстрыми нейтронами в рамках теории эффективной среды проведено в работе [9], где получено, что характерные размеры кластеров дефектов равны в n- и p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>, соответственно, 4 и 4,4 нм при флюенсе ~10<sup>20</sup> см<sup>-2</sup>. Эти результаты хорошо согласуются с полученными в данной работе значениями g<sub>c</sub>, если их экстраполировать в сторону больших флюенсов.

На ряде образцов сплавов Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>, облучённых в реакторе в различных температурных интервалах 673...873 К и набравших различные дозы по быстрым нейтронам, были проведены серии изохронных (20 мин) отжигов с шагом через 50 К в интервале 473...823 К. Было установлено, что отжиг радиационных дефектов в этих сплавах протекает в три стадии (493, 603, 743 К), что весьма близко к соответствующим цифрам для чистого кремния. При этом, чем выше температура экспозиции при облучении и больше набранный флюенс, тем выше должна быть температура восстанавливающего отжига.

Полученные в этих экспериментах данные позволяют предположить, что рабочий ресурс ЯТЭУ на кремний-германиевых сплавах можно увеличить при помощи программированных внутризонных восстанавливающих отжигов.

Суммируя полученные экспериментальные результаты, можно сделать следующие практически важные выводы.

1. «Пороговые» значения флюенсов быстрых нейтронов, по достижению которых в кремний-германиевых сплавах начинается резкое возрастание электросопротивления и термоэлектродвижущей силы, составляют  $\Phi \approx 6 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> для электронного материала и  $\Phi \approx 1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> для дырочного.
2. Впервые для сплавов Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> наблюдался выход на насыщение дозовых зависимостей  $\alpha=f(\Phi)$  и  $\rho=f(\Phi)$  при флюенсах  $\Phi \approx 1 \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup> в электронном материале и  $\Phi \approx 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup> в дырочном.
3. К концу реакторного облучения коэффициенты термоэлектродвижущей силы увеличились, по сравнению с начальным значением, в ~1,8-2 раза в электронном и в 1,4-1,7 раза в дырочном материале; электросопротивление в электронном материале увеличилось в 20-23 раза, а в дырочном – в 6-8 раз.
4. Радиационную стойкость дырочного сплава Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>, легированного бором, можно значительно повысить путём замены изотопа <sup>10</sup>B на изотоп <sup>11</sup>B.

5. Можно предположить, что термоэлектрические модули из сплава Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> в поле радиации реактора будут отличаться ресурсоспособностью, которую можно дополнительно увеличить путём программированных внутризонных восстанавливающих отжигов.

В настоящее время УНТЦ финансирует совместный Украинско-Грузинский Международный Проект Gr-20j, в котором в качестве n-ветви термоэлемента предполагается применение радиационно-стойкого сплава Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Кашия, В.А. Шерозия, Г.В. Бокучава. Термоэлектрические генераторы тока космического, наземного и подводного назначения // *Georgian Engineering News (Ru)*. 2003, № 4, с. 46–52.
2. G. Bokuchava, O. Gogishvili, V. Kashia, V. Sherozia. Thermoelectric Generator for Direct Transformation of Low-Potential Heats into Electric Power // *Bulletin of the Georgian Academy of Sciences*. 2002, v. 165, N1, p. 82–85.
3. Г.Е. Мургулия. Разработка экспериментальных устройств и методов и исследование термоэлектрических свойств сильнолегированных кремний-германиевых сплавов в условиях реакторного излучения: Автореф. дис....докт. техн. наук. Тбилиси, 1997.
4. Г.С. Карумидзе, Р.Ш. Метревели, Ю.А. Соловьёв. Исследование влияния реакторного облучения на термоэлектрическую эффективность сплава Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> // *Прямое преобразование тепловой энергии в электричество и топливные элементы*. 1972, №2, с. 45–48.
5. Г.С. Карумидзе, С.П. Лалыкин, Ю.А. Соловьёв. Исследование причин понижения термоэлектрической эффективности сплава кремний-германий при облучении в реакторе // *ИБ ППТЭЭ и ТЭ*. 1974, №5, с. 58–63.
6. Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин. *Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий*. М.: «Атомиздат», 1971, 75 с.
7. В.В. Болотов, А.В. Васильев. *Высокотемпературное облучение германия и кремния* // Радиационные дефекты в полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск: «Наука», 1979, с. 61–77.
8. И.Г. Гвердцители, Г.С. Карумидзе, Ю.А. Соловьёв. Влияние изотопного состава легирующего элемента «В» на термоэлектрические параметры сплава Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> в установках реакторного облучения // *ИБ ППТЭЭ и ТЭ*. 1970, №4, с. 55–60.
9. А.П. Долголенко. Отжиг в процессе реакторного облучения высоколегированного n- и p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> // *Труды XV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. 10-15 июня, 2002. Алушта, Крым*, с. 284–285.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕАКТОРНОГО ОПРОМІНЕННЯ  
НА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИЛЬНОЛЕГОВАНОГО n- I p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>**

*Г.В. Бокучава, Г.Е. Мургулія, В.Г. Кашія*

Представлені результати дослідження впливу реакторного випромінювання на термоелектричні властивості сильнолегованих (концентрація носіїв заряду  $\geq 10^{20} \text{см}^{-3}$ ) сплавів Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> електронної та діркової провідності (легованих фосфором та бором відповідно). Показано, що “порогові” значення флюенсів швидких нейтронів при досяженні яких в кремній-германієвих сплавах починається різке зростання електроопору та термоелектродвижучої сили становить  $\Phi \sim 6 \cdot 10^{18} \text{см}^{-2}$  для n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> та  $1 \cdot 10^{18} \text{см}^{-2}$  для p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>. Встановлено, що при флюенсі нейтронів  $\geq 10^{19} \text{см}^{-2}$  і температурі опромінення  $> 873 \text{ K}$  більш радіаційно-стійким виявляється сплав n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>, який може бути використаний у складі ядерних енергетичних установок при робочих температурах 873...973 K та флюенсах по швидким нейтронам  $10^{19} \dots 10^{20} \text{см}^{-2}$ .

**STUDY OF REACTOR IRRADIATION IMPACT ON THERMOELECTRIC PROPERTIES  
OF HIGHLY DOPPED n- AND p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>**

*G. V. Bokuchava, G. E. Murgulia, V. G. Kashia*

We present the results of study of reactor irradiation impact on thermoelectric properties of highly doped (the concentration of charge carriers  $\geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> alloys of the silicon-germanium system of electron and hole conductivity (doped with phosphorus and boron, correspondingly). It has been shown that the “threshold” values of fast neutrons fluences on the reach of which an abrupt increase of electric resistance in silicon-germanium alloys begins and thermoelectromotive forces make  $\Phi \sim 6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  for n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> and  $\Phi \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  for p-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>. It has been established that during the fluence of neutrons  $\geq 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  and irradiation temperature  $> 873 \text{ K}$  the n-Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub> alloy is more radiation stable. It can be used in the composition of nuclear energetic devices at the temperatures of operation 900...1000 K and fluences on fast neutrons  $10^{19} \dots 10^{20}$ .