

# Влияние гамма-облучения на электрофизические параметры кремниевых фотоэлементов, легированных никелем

З. Т. Кенжаев<sup>a,\*</sup>, Х. М. Илиев<sup>a</sup>, В. Б. Оджаев<sup>b</sup>, Г. Х. Мавлонов<sup>a</sup>, В. С. Просолович<sup>b</sup>,  
Е. Ж. Косбергенов<sup>c</sup>, Б. К. Исмаилов<sup>d</sup>, С. Б. Исамов<sup>a</sup>, Ш. З. Олламбергенов<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, 100095, Узбекистан

<sup>b</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, 220050, Беларусь

<sup>c</sup>Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, 100174, Узбекистан

<sup>d</sup>Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, г. Нукус, 230112, Узбекистан

e-mail: [zoir1991@bk.ru](mailto:zoir1991@bk.ru)

Поступила в редакцию 30.03.2024

После доработки 20.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Представлены результаты исследований изменения электрофизических параметров ( $U_{xx}$  – напряжение холостого хода,  $J_{кз}$  – плотность тока короткого замыкания, и  $\tau$  – время жизни неравновесных носителей заряда) фотоэлементов, изготовленных на пластинах монокристаллического кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho$  0,5 Ом см, легированных никелем, при облучении  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$ . Показано, что у фотоэлементов, легированных никелем, эффективность преобразования солнечной энергии остается выше, чем у стандартных, вплоть до доз облучения  $10^8$  рад. Обнаружено, что с увеличением температуры диффузии атомов никеля радиационная устойчивость электрофизических параметров фотоэлементов увеличивается. Снижение концентрации рекомбинационно-активных радиационных дефектов обусловлено геттерированием атомами никеля технологических (фоновых) примесей и действием скоплений никеля как стоков для радиационно-индуцированных вакансий.

*Ключевые слова:* кремниевый солнечный элемент, диффузия, кластеры никеля,  $\gamma$ -облучение, рекомбинационные центры, геттерирование

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.62>

## ВВЕДЕНИЕ

Использование кремниевых фотоэлементов (ФЭ) в космическом пространстве обуславливает воздействие на них различных видов высокоэнергетических частиц, присутствующих в солнечной радиации. Облучение ФЭ частицами высоких энергий сопровождается образованием радиационных дефектов в кристаллической решетке, которые являются эффективными рекомбинационными центрами [1–3]. В результате данного воздействия время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ)  $\tau$  в структуре уменьшается. При высокой дозе облучения значительный рост рекомбинационных потерь может стать причиной критического ухудшения рабочих характеристик ФЭ. На радиационные изменения параметров кремниевых ФЭ влияют различные факторы: концентрация основной легирующей примеси, содержание и тип структурных дефектов в исходном материале, технология формирования прибора.

Для повышения стойкости ФЭ к воздействию радиации предпринимались попытки нейтрализации действия радиационных рекомби-

национных центров введением некоторых примесей [4, 5], в частности никеля [6–8]. Никель в кремнии имеет достаточно высокую объемную растворимость, а в приповерхностной области его концентрация может достигать  $N_{\text{Ni}} \sim (10^{20} - 10^{21}) \text{ см}^{-3}$  [9]. Основная часть растворенных в объеме кремния атомов никеля находится в электронейтральном состоянии в междоузлиях. Как в процессе введения никеля, так и при дальнейших термообработках могут образовываться скопления примесных атомов никеля [10, 11]. За счет формирования скоплений атомов никеля, являющихся геттерами для неконтролируемых рекомбинационных примесей, можно увеличить эффективность кремниевых ФЭ [12, 13].

При  $\gamma$ -облучении параметры никелевых скоплений (размер скоплений и расстояние между ними) изменяются [14]. Это свидетельствует о генерации потока междоузельных атомов никеля при комнатной температуре и изменении их концентрации, что может оказывать влияние на рекомбинационные и ряд других свойств материала. Ранее было показано [15], что радиационная стабильность  $\tau$  монокри-

сталлического кремния повышается с возрастанием концентрации атомов никеля. Это обусловлено увеличением количества примесных пар типа никель–кислород. В работах [16, 17] также показано, что легирование кремниевых солнечных элементов атомами никеля приводит к повышению эффективности необлученных фотоэлементов до 20–25% и увеличению времени жизни ННЗ до 2 раз по сравнению с контрольными ФЭ.

Таким образом, исследование влияния  $\gamma$ -облучения на параметры кремниевых ФЭ, легированных никелем, является актуальным, учитывая ряд технологических особенностей легирования данной примесью. Влияние, оказываемое примесью никеля на какую-либо из электрофизических характеристик фотоэлемента, удобно оценивать как отношение соответствующих электрофизических параметров ФЭ с никелем и без него (коэффициент влияния никеля) [8]:

$$\delta_A = A_{\text{Ni}} / A_K,$$

где  $A$  – характеристика ФЭ ( $U_{\text{хх}}$  – напряжение холостого хода;  $J_{\text{кз}}$  – плотность тока короткого замыкания;  $\tau$  – время жизни ННЗ);  $\delta_A$  – безразмерный параметр, показывающий вклад никеля в изменение эффективности ФЭ;  $A_{\text{Ni}}$  – характеристики фотоэлемента, легированного никелем;  $A_K$  – характеристики контрольных ФЭ, изготовленных по той же технологии, но не легированных никелем.

Значения  $\delta_A$  зависят как от технологических условий процесса легирования никелем (температура и время диффузии [12]), так и от технологических условий формирования  $p$ – $n$ -перехода ФЭ (температура, время, вид легирующей примеси для создания  $p$ – $n$ -перехода, глубина  $p$ – $n$ -перехода и режим дополнительной термообработки). Например, в [12] было установлено, что для ФЭ с глубоким ( $\sim 29$ – $30$  мкм)  $p$ – $n$ -переходом (диффузия никеля проводилась при температуре  $T_{\text{дифф}} = 1200$  °С в течение 1 часа)  $\delta_{J_{\text{кз}}} = 1,89$ ,  $\delta_{U_{\text{хх}}} = 1,19$ , а после дополнительной термообработки (при температуре  $T_{\text{отж}} = 700$  °С в течение 1 часа)  $\delta_{J_{\text{кз}}} = 3,75$ ,  $\delta_{U_{\text{хх}}} = 1,35$ . Повышение  $\delta_A$  фотоэлементов в результате легирования их никелем обусловлено геттеризирующим действием кластеров никеля. В настоящей работе проведен анализ влияния облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  на основные электрофизические параметры (величины  $\delta_{J_{\text{кз}}}$ ,  $\delta_{U_{\text{хх}}}$ ,  $\delta_{\tau}$ ) кремниевых ФЭ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

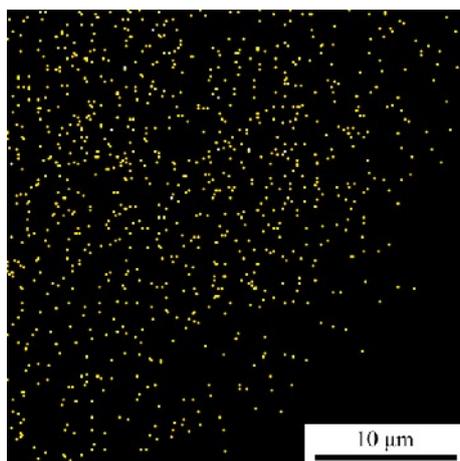
Для исследований в качестве исходного материала использовались пластины монокристаллического кремния, выращенного по методу

Чохральского,  $p$ -типа проводимости толщиной  $d = 380$  мкм с удельным сопротивлением  $\rho = 0,5$  Ом·см (содержание кислорода  $N_{\text{O}}$  составляло  $\sim 7 \times 10^{17}$  см $^{-3}$ , плотность дислокаций –  $N < 10^2$  см $^{-2}$ , время жизни ННЗ –  $\tau > 6$  мкс). На основе данного материала изготавливались ФЭ по технологии, приведенной в [16, 17], дополнительно легированные никелем (группа-Ni). В качестве контрольных использовались образцы, не содержащие примесных атомов никеля (группа-K), изготовленные по аналогичной технологии, но без дополнительного легирования никелем.

Для получения ФЭ группы-Ni на поверхность кремниевых пластин в вакууме напылялся слой чистого никеля толщиной 1 мкм, диффузия никеля проводилась при температурах  $T_{\text{дифф}} = 850$  °С, 1000 °С, 1200 °С в течение  $t_{\text{дифф}} = 30$  мин, 10 мин, 3 мин соответственно. Затем создавался  $p$ – $n$ -переход диффузией фосфора в «никелевую» сторону пластины при  $T = 1000$  °С в течение  $t = 30$  мин. После формирования  $p$ – $n$ -перехода осуществлялась дополнительная термообработка при температуре  $T_{\text{отж}} = 800$  °С в течение  $t = 30$  мин [16] с целью активации процесса геттерирования неконтролируемых рекомбинационных примесей [18, 19]. После каждого технологического этапа проводилась химическая обработка (в 10% HCl, затем в 10% HF) для удаления остатков никеля и оксида кремния с поверхности образцов.

Омические контакты создавались после дополнительной термообработки методом вакуумного напыления никеля при температуре 350 °С. На тыльной стороне напылялся сплошной контакт, а на лицевой – через трафарет с шириной полосок 0,5 мм и шагом 2 мм. Непосредственно после напыления контактов проводилось лужение припоем с температурой плавления 160 °С. Просветляющее покрытие на поверхности элементов отсутствовало. ФЭ контрольной группы-K изготавливались по той же технологии (со всеми термообработками), исключая напыление никеля.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭ проводилось аналогично [16, 17]. На основании анализа ВАХ фотоэлементов определялись электрофизические характеристики – напряжение холостого хода  $U_{\text{хх}}$  и плотность тока короткого замыкания  $J_{\text{кз}}$ . Время жизни неравновесных носителей заряда в полученных структурах измерялось методом, приведенным в [20]. Время жизни ННЗ в структурах ФЭ соответствует времени восстановления обратной проводимости  $p$ – $n$ -перехода, которое измерялось с использованием затухающих колебаний резонансного LC-контура, ошибка измерений не превышала 10%.



**Рис. 1.** Снимок поверхности образца кремния, легированного никелем и отожженного при температуре  $T_{отж} = 800$  °С в течение  $t = 30$  мин.

**Таблица.** Средние значения электрофизических параметров фотоэлементов до и после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$

Температура диффузии Ni $T_{дифф.}$ °С	Параметры ФЭ	Исходные ( $\Phi = 0$ )			После облучения $\Phi = 10^8$ рад		
		Группа-К	Группа-Ni	$\delta_A$	Группа-К	Группа-Ni	$\delta_A$
1200	$U_{xx}$ , мВ	541	590	1,09	490,3	542,8	1,1
	$J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup>	26	33	1,27	15,5	23,64	1,52
	$\tau$ , мкс	8	14	1,75	5	12	2,4
1000	$U_{xx}$ , мВ	570	590	1,04	466	514	1,1
	$J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup>	30	35	1,17	17,56	24,15	1,38
	$\tau$ , мкс	12	20	1,67	10	17	1,7
850	$U_{xx}$ , мВ	590	605	1,03	482	541,4	1,12
	$J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup>	32	38	1,19	18,8	27,74	1,48
	$\tau$ , мкс	15	24	1,6	13	21	1,61

Спектры релаксационной спектроскопии глубоких уровней (*DLTS*) измерялись при обратном смещении  $-5$  В в режимах заполнения ловушек основными и неосновными носителями заряда. В первом случае напряжение заполнения составляло  $0$  В, а во втором  $+2$  В. Длительность импульса заполнения равнялась  $0,01$  с, окно скорости эмиссии  $-19$  с<sup>-1</sup>.

Облучение  $\gamma$ -квантами от изотопа  $\text{Co}^{60}$  фотоэлементов проводилось поэтапно при комнатной температуре в интервале доз  $\Phi = 10^5$ – $10^8$  рад. После каждого этапа облучения  $\gamma$ -квантами измерялись параметры ( $J_{кз}$ ,  $U_{xx}$ ,  $\tau$ ) ФЭ и рассчитывались значения безразмерных коэффициентов, показывающих вклад никеля  $-\delta_A$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На **рис. 1** представлено измеренное методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) распределение примесных атомов никеля по площади образца, легированного никелем и дополнительно отожженного при температуре  $T_{отж} = 800$  °С в течение  $t = 30$  мин. Видно, что имеют место скопления Ni, их размер составляет  $< 1$  мкм. Определенная методом ВИМС поверхностная концентрация примесных атомов никеля достаточно высокая  $-6,52 \times 10^{11}$  ат./см<sup>2</sup>.

В **таблице** приведены значения электрофизических параметров ФЭ и рассчитанные коэффициенты влияния никеля на необлученные и облученные дозой  $\gamma$ -квантов  $10^8$  рад образцы. Видно, что фотоэлементы группы-Ni имеют эффективность преобразования солнечной энергии выше, чем ФЭ группы-К (значения  $\delta_{U_{xx}}$ ,  $\delta_{J_{кз}}$ ,  $\delta_{\tau} > 1$ ), что соответствует результатам работ [12, 13, 16, 17].

Следует отметить, что с уменьшением температуры диффузии никеля (и соответствующей дополнительной термообработкой контрольных образцов) параметры необлученных ФЭ группы-К и группы-Ni улучшаются, а значения коэффициентов влияния никеля  $\delta_A$  уменьшаются. При увеличении дозы облучения  $\gamma$ -квантами электрофизические параметры ФЭ всех исследованных групп образцов снижаются. При дозе  $\Phi = 10^8$  рад значение  $U_{xx}$  для ФЭ группы-Ni (легированного никелем при  $1200$  °С) уменьшается на  $\sim 8\%$ , а для ФЭ группы-К – на  $\sim 9,4\%$ . Значение  $J_{кз}$  для ФЭ группы-Ni уменьшается на  $\sim 28\%$ , ФЭ группы-К – на  $\sim 40\%$ . Однако при возрастании дозы  $\gamma$ -облучения все коэффициенты влияния никеля  $\delta_A$  увеличиваются и всегда имеют значения больше единицы. Таким образом, электрофизические параметры ФЭ из группы-Ni

при облучении изменяются существенно меньше, чем параметры контрольных образцов группы-К. Следует отметить, что указанные особенности поведения параметров ФЭ, легированных никелем, при  $\gamma$ -облучении характерны при всех исследованных температурах диффузии никеля ( $T_{\text{дифф}} = 1200$  °С,  $T_{\text{дифф}} = 1000$  °С,  $T_{\text{дифф}} = 850$  °С).

Как известно [1–5],  $U_{\text{xx}}$  и  $J_{\text{кз}}$  связаны со временем жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  согласно соотношениям:

$$J_{\text{кз}} = qg\sqrt{D\tau}, \quad (1)$$

$$J_0 = \frac{qn_i^2}{N} \sqrt{\frac{D}{\tau}}, \quad (2)$$

$$U_{\text{xx}} = \frac{\beta kT}{q} \ln \left( \frac{J_{\text{кз}}}{J_0} + 1 \right), \quad (3)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, характеризующий скорость рекомбинации;  $J_0$  – плотность тока насыщения;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – заряд электрона;  $g$  – скорость генерации носителей заряда (НЗ);  $D$  – коэффициент диффузии НЗ;  $\tau$  – время жизни неравновесных носителей заряда.

Таким образом, величины тока короткого замыкания и напряжения холостого хода определяются временем жизни неравновесных носителей заряда. При воздействии  $\gamma$ -излучения в полупроводнике образуются радиационные дефекты (РД) с глубокими уровнями, скорость рекомбинации неравновесных НЗ возрастает, а их диффузионная длина уменьшается. Вследствие этого снижается количество неравновесных носителей заряда, достигающих  $p$ - $n$ -перехода. Как видно из выражений (1)–(3), основная причина ухудшения параметров ФЭ  $U_{\text{xx}}$  и  $J_{\text{кз}}$  определяется прежде всего уменьшением  $\tau$  под действием  $\gamma$ -излучения.

Из приведенных в таблице экспериментально измеренных времен жизни НЗ в базе исследуемых фотоэлементов видно, что время жизни НЗ ФЭ группы-К до облучения составляет  $\tau = 8$ – $15$  мкс, это соответствует типичным значениям времени жизни для таких структур [5]. Следует отметить, что время жизни неосновных НЗ ФЭ для образцов группы-Ni во всех случаях больше, чем для соответствующих образцов группы-К ( $\delta_\tau > 1$ ). Измерения времен жизни НЗ после облучения дозой  $\Phi = 10^8$  рад показывают, что значение  $\delta_\tau$  для всех температур диффузии никеля остается больше единицы, однако уменьшается при снижении температуры диффузии никеля. Влияние примеси никеля на величину электрофизических параметров фотоэлементов возрастает после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Максимальное значение  $\delta_\tau = 2,4$  после облучения дозой  $\Phi = 10^8$  рад имеет место

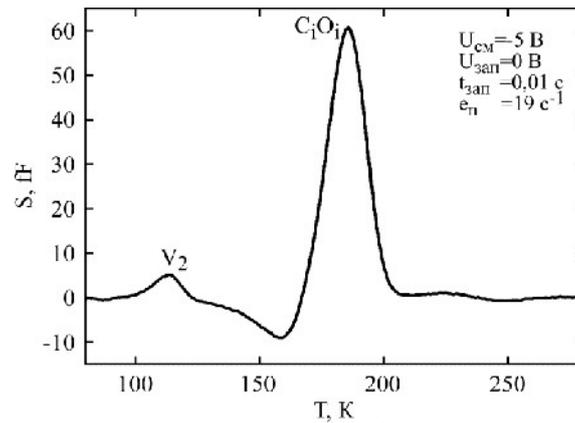
для ФЭ, легированных никелем при температуре  $1200$  °С.

Приведенные экспериментальные результаты позволяют заключить, что с увеличением температуры диффузии атомов никеля возрастает устойчивость электрофизических параметров ФЭ к воздействию облучения  $\gamma$ -квантами. Поскольку при увеличении  $T_{\text{дифф}}$  увеличивается растворимость никеля в кремнии, следовательно, радиационная стабильность  $\tau$  кремниевых фотоэлементов повышается с ростом концентрации атомов никеля. Это обусловлено влиянием атомов никеля в ФЭ на процессы образования рекомбинационно-активных радиационных дефектов – снижением эффективности их генерации.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенностью междоузельных атомов никеля в решетке кремния является изменение структуры их  $d$ -электронов с уменьшением радиуса нейтрального атома никеля [21], что обуславливает высокую подвижность нейтральных атомов примеси никеля в решетке кремния даже при комнатной температуре. Это, с одной стороны, определяет их высокие скорости диффузии и миграции в кристаллической решетке [11], а с другой – объясняет их активное взаимодействие с дефектами решетки и технологическими примесями (такими как кислород [22–24]).

При облучении кремния  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  (энергия  $\sim 1,25$  МэВ) основным механизмом взаимодействия высокоэнергетических частиц с матрицей является эффект Комптона. При этом происходит рассеяние  $\gamma$ -кванта на валентных электронах с образованием быстрых электронов, производящих формирование первичных радиационных дефектов – пар Френкеля (вакансия и междоузельный атом) [25]. Следует отметить, что отличительной особенностью радиационного дефектообразования при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  является практически однородное формирование радиационных дефектов по объему полупроводника. В результате взаимодействия компонентов пар Френкеля между собой, с основными легирующими и технологическими примесями, а также с размерными дефектами структуры формируется широкий спектр радиационных дефектов, определяемый, прежде всего, примесным составом и структурным совершенством матрицы [26]. В монокристаллическом кремнии  $p$ -типа такими центрами являются дивакансия и комплекс междоузельный углерод–междоузельный кислород  $C_iO_i$  [25, 26]. Генерирующиеся при облучении  $\gamma$ -квантами в кремнии точечные (первичные) радиационные дефекты – смешанные из узлов атомы кремния и свободные



**Рис. 2.** Спектры *DLTS* фотоэлемента, облученного  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозой  $10^8$  рад, зарегистрированные в режиме перезарядки уровней ловушек основными носителями заряда.

вакансии – обладают высоким коэффициентом диффузии и малыми энергиями миграции [27]. Благодаря этому они мигрируют по объему кристалла кремния и взаимодействуют между собой и с атомами основных легирующих и фоновых технологических примесей в кремнии.

Из измерений *DLTS* в режиме перезарядки уровней ловушек основными носителями заряда установлено, что после облучения всех групп фотоэлементов  $\gamma$ -квантами спектры имеют типичный вид для кремния *p*-типа проводимости (рис. 2). Первый пик (начиная с низких температур) соответствует уровню дивакансии ( $V_2$ ) в кремнии *p*-типа, второй – комплексу междуузельный углерод–междуузельный кислород ( $C_iO_i$ ). Таким образом, в нашем случае новых видов радиационных дефектов в результате облучения обнаружено не было. Следует отметить, что именно примесно-дефектный комплекс  $C_iO_i$  является основным рекомбинационно-активным центром в монокристаллическом кремнии, облученном  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ .

Первичные РД (вакансии и междуузельные атомы кремния), возникающие в процессе облучения, имеют большую вероятность встречи с подвижными атомами никеля и их скоплениями. При аннигиляции вакансий с междуузельными атомами никеля ( $\text{Ni}_i$ ) по реакции



в узлах кристаллической решетки образуются электрически активные атомы никеля ( $\text{Ni}_s$ ), изменяющие удельное сопротивление материала [28, 29].

Как ранее было установлено [11, 17], междуузельные электрически нейтральные атомы никеля и их скопления являются эффективными геттерами неконтролируемых технологических рекомбинационно-активных примесей (Fe, Cu и т.д.). Кроме того, примесь никеля заметно уменьшает концентрацию оптически активного междуузельного кислорода [8–17, 22], участвующего в образовании центров  $C_iO_i$ . Взаимодей-

ствие первичных РД с примесью никеля также сокращает вероятность образования комплексов  $C_iO_i$  и снижает эффективность формирования вторичных РД, таких, например, как центр  $B_i$  (междуузельный атом бора), являющийся также одним из радиационных дефектов в монокристаллическом кремнии *p*-типа проводимости. Данный дефект формируется по механизму Воткинса вследствие вытеснения узловых атомов бора в междуузлия собственными междуузельными атомами кремния [30]. Кроме того, необходимо учитывать, что атомы никеля образуют после диффузии скопления второй фазы. Это приводит к возникновению на границе их раздела с матрицей кремния полей упругих напряжений, которые, как было ранее установлено для включений редкоземельных элементов в кремнии [31], являются эффективными стоками для свободных вакансий, образующихся при облучении высокоэнергетическими частицами. Таким образом, при легировании фотоэлементов атомами никеля имеет место, с одной стороны, геттерирование Ni технологических фоновых примесей, приводящее к снижению эффективности генерации рекомбинационно-активного радиационного дефекта  $C_iO_i$ . С другой стороны, действие скоплений никеля как стока для вакансий приводит к подавлению эффективности генерации дивакансий и других вакансие-содержащих радиационных дефектов. Все вышеуказанные факторы приводят к снижению при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  концентрации рекомбинационных центров в фотоэлементах, легированных никелем, и, как следствие, уменьшению скорости деградации времени жизни неравновесных носителей заряда. Экспериментально показано, что с увеличением температуры диффузии никеля и, соответственно, концентрации атомов никеля радиационная стабильность  $\tau$  кремниевых ФЭ повышается. Это обусловлено подавлением эффективности генерации как первичных (вакансии и собственные

междоузлия), так и вторичных рекомбинационно-активных радиационных дефектов (дивакансии, комплекс  $C_iO_i$ , центр  $V_i$  и примесных пар типа никель–кислород).

### ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что легирование никелем фотоэлементов на основе монокристаллического кремния позволяет повысить устойчивость их электрофизических параметров к воздействию облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . С увеличением температуры диффузии атомов никеля данный эффект выражен значительно сильнее, что обусловлено увеличением концентрации атомов никеля вследствие возрастания предельной растворимости данных атомов в кремнии при повышении температуры. Снижение концентрации рекомбинационно-активных радиационных дефектов в фотоэлементах, легированных никелем, определяется как геттерированием технологических фоновых примесей атомами никеля, так и действием скоплений никеля как стока для радиационно-индуцированных вакансий. Показано, что легированные никелем фотоэлементы при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  имеют эффективность преобразования солнечной энергии выше, чем у стандартных фотоэлементов, как минимум до доз  $10^8$  рад.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность профессору Н.Ф. Зикриллаеву за ценные советы и участие в обсуждении результатов.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Praneeth, Kandlakunta, Matthew, Van Zile and Lei, Raymond, Cao, Silicon solar cells for post-detonation monitoring and gamma-radiation effects, *Nucl. Sci. Eng.*, 2022, vol. 196, no. 11, p. 1383. <https://doi.org/10.1080/00295639.2022.2091905>
- Tobnaghi, D.M., Rahnamaei, A. and Vajdi, M., Experimental study of gamma radiation effects on the electrical characteristics of silicon solar cells, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2014, vol. 9, p. 2824.
- Koval'chuk, N.S., Lastovskii, S.B., Odzhaev, V.B., Petlitskii, A.N., et. al., Influence of structural defects on the electrophysical parameters of pin-photodiodes, *Russ. Microelectron.*, 2023, vol. 52, p. 276. <https://doi.org/10.1134/S1063739723700518>
- Wysocki, J.J., Rappaport, P., Davison, E., Hand, R., et. al., Lithium doped, radiation resistant silicon solar cells, *Appl. Phys. Lett.*, 1966, vol. 9, no. 1, p. 44. <https://doi.org/10.1063/1.1754594>
- Makhkamov, Sh., Muminov R.A., Karimov, M., Abdurakhmanov, K.P., et. al., Formation of radiation defects in zinc doped silicon solar cells, *Appl. Solar Energy*, 2013, vol. 49, no. 4, p. 185. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040117>
- Насриддинов, С.С., Исследование термодатчиков на основе Si <P, Ni>, *Журнал нанотехнологической физики*, 2015, т. 7, № 3, статья 03037.
- Chistyakova, A.A. and Bazhanov, D.I., The study of nickel impurity segregation on LSNT perovskite open surfaces by ab initio molecular dynamics, *Russ. Microelectron.*, 2022, vol. 51, p. 654. <https://doi.org/10.1134/S1063739722080121>
- Ismailov, K.A., Kenzhaev, Z.T., Koveshnikov, S.V., Kosbergenov, E.Zh., et. al., Radiation stability of nickel doped solar cells, *Phys. Solid State*, 2022, vol. 64, no. 3, p. 154. <https://doi.org/10.1134/S1063783422040011>
- Zikrillayev, N., Kenzhaev, Z., Ismailov, T., Kurbanova, U., et. al., Effect of nickel doping on the spectral sensitivity of silicon solar cells, *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 434, art. ID 01036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401036>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Ismailov, K.A. and Kosbergenov, E.Zh., Thermal stability of electrical parameters of silicon crystal doped with nickel during growth, *Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectr.*, 2022, vol. 25, no. 1, p. 006. <https://doi.org/10.15407/spqoe25.01.006>
- Ismaylov, B.K., Zikrillayev, N.F., Ismailov, K.A. and Kenzhaev, Z.T., Clusters of impurity nickel atoms and their migration in the crystal lattice of silicon, *Phys. Sci. Technol.*, 2023, vol. 10, no. 1-2, p. 13. <https://doi.org/10.26577/phst.2023.v10.i1.02>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Kenzhaev, Z.T., Melebaev, D., et. al., Silicon photovoltaic cells with deep p-n junction, *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 1, p. 13. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2001003X>
- Bakhadirkanov, M.K., Kenzhaev, Z.T., Turekeev, Kh.S., Isakov, B.O., et. al., Gettering properties of nickel in silicon photocells, *Tech. Phys.*, 2022, vol. 67, no. 14, p. 2217. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.14.55221.99-21>
- Makhkamov, Sh., Karimov, M., Khakimov, Z.M., Odilova, N.J., et. al., Interaction of deep impurities with radiation defects in n-Si at  $\gamma$  – irradiation, *Rad. Effects Defects Solids*, 2005, vol. 160, no. 8, p. 349. <https://doi.org/10.1080/10420150500415116>
- Зайнабидинов, С.З., Курбанов, А.О., Влияние  $\gamma$ -радиации на рекомбинационные и фотоэлектрические свойства кремния, легированного никелем, *Узбекский физический журнал*, 2018, т. 20, № 2, с. 105. <https://doi.org/10.52304/v20i2.35>

16. Bakhadyrkhanov, M.K. and Kenzhayev, Z.T., Optimal conditions for nickel doping to improve the efficiency of silicon photoelectric cells, *Tech. Phys.*, 2021, vol. 66, no. 7, p. 851. <https://doi.org/10.1134/S1063784221060049>
17. Kenzhaev, Z.T., Zikrillaev, N.F., Ayupov, K.S., Ismailov, K.A., et. al., Enhancing the Efficiency of silicon solar cells through nickel doping, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, no. 6, p. 858. <https://doi.org/10.3103/S1068375523060108>
18. Liu, A., Phang, S.P. and Macdonald, D., Gettering in silicon photovoltaics: A review, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2022, vol. 234, art. ID 111447. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111447>
19. Tanaka, Sh., Ikari, T. and Kitagawa, H., In-diffusion and annealing processes of substitutional nickel atoms in dislocation-free silicon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 40, part 1, no. 5A, p. 3063. <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.3063>
20. Togatov, V.V. and Gnatyuk, P.A., A method for measuring the lifetime of charge carriers in the base regions of high-speed diode structures, *Semiconductors*, 2005, vol. 39, p. 360. <https://doi.org/10.1134/1.1882802>
21. Kveder, V., Khorosheva, M. and Seibt, M., Interplay of Ni and Au atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si, *Sol. State Phenom.*, 2016, vol. 242, p. 147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.242.147>
22. Iliiev, Kh.M., Saparniyazova, Z.M., Ismailov, K.A., Sattarov, O.E., et. al., Interaction of Radiation defects with nickel atom clusters in silicon, *Surf. Eng. Appl. Electrochem*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 385. <https://doi.org/10.3103/S1068375511050103>
23. Togatov, V.V., Gnatyuk, P.A. and Ternovskii, D.S., Switching processes in high-frequency converters, *Instrum. Exp. Tech.*, 2008, vol. 51, p. 808. <https://doi.org/10.1134/S0020441208060079>
24. Yarykin, N. and Weber, J., Evidence for room-temperature in-diffusion of nickel into silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 109, art ID. 102101. <https://doi.org/10.1063/1.4962394>
25. Смирнова, Л.С., *Вопросы радиационной технологии полупроводников*. Новосибирск: «Наука», Сибирское отделение, 1980. 296 с.
26. Макаренко, Л.Ф., Ластовский, С.Б., Гаубас, Э., Павлов, Е., и др., Инжекционный отжиг комплекса собственное димеждоузлие – кислород в кремнии р-типа, *Весці нац. акад. навук Беларусі. Серыя фізіка-матэ. навук*, 2018, т. 54, № 2, с. 220.
27. Lukjanitsa, V.V., Energy levels of vacancies and interstitial atoms in the band gap of silicon, *Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 4, p. 404. <https://doi.org/10.1134/1.1568459>
28. Kveder, V., Khorosheva, M. and Seibt, M., Interplay of Ni and Au Atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si, *Sol. State Phenom.*, 2016, vol. 242, p. 147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.242.147>
29. Galashev, A. and Vorob'ev, A., Electronic properties and structure of silicene on Cu and Ni substrates, *Materials*, 2022, vol. 15, art. ID 3863. <https://doi.org/10.3390/ma15113863>
30. Berezhnov, N.I., Chelyadinskii, A.R., Jadan, M. and Suprun-Belevich, Yu.R., On the problem of Watkins substitution and migration of silicon atoms in silicon, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1993, vol. 73, no. 3, p. 357.
31. Карпов, Ю.А., Петров, В.В., Просолович, В.С., Фотопроводимость и электрические свойства Si<Er>, облученного  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , *ФТП*, 1982, т. 16, № 9, с. 1676.

### Summary

The results of the studies of changes in the electro-physical parameters ( $V_{oc}$  – no-load voltage,  $I_{sc}$  – short-circuit current density;  $\tau$  – lifetime of nonequilibrium charge carriers) of photocells made on plates of monocrystalline silicon of the  $p$ -type conductivity with the specific resistance  $\rho$  0.5 Ohm cm, doped with nickel, under irradiation with  $\gamma$ -quanta from  $^{60}\text{Co}$  source are presented. It is shown that the efficiency of the solar energy conversion in nickel-doped photovoltaic cells remains higher than in standard cells up to irradiation doses of  $10^8$  rad. It was established that with increasing diffusion temperature of nickel atoms radiation stability of electrophysical parameters of photovoltaic cells also increases. A decrease in the concentration of recombination-active radiation defects is due to the getterization by nickel atoms of technological (background) impurities and the action of nickel clusters as effluents for radiation-induced vacancies.

**Keywords:** silicon solar cell, diffusion, nickel clusters,  $\gamma$ -irradiation, recombination centers, gettering