

06

Оптимальные условия легирования никелем для повышения эффективности кремниевых фотоэлементов

© М.К. Бахадырханов,¹ З.Т. Кенжаев²

¹ Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан

² Каракалпакский государственный университет,
230112 Нукус, Узбекистан
e-mail: zoir1991@bk.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 2 декабря 2020 г.

Принято к публикации 8 декабря 2020 г.

Исследована стабильность обогащенного никелем поверхностного слоя кремния при термообработках. При термообработках ниже 900°C обогащенный никелем слой сохраняется. Установлено, что легирование кремниевого фотоэлемента никелем приводит к улучшению эффективности независимо от глубины залегания p - n -перехода. Оптимальные условия диффузии никеля в кремний — $T = 800\text{--}850^\circ\text{C}$, $t = 30\text{ min}$. Наблюдался рост тока короткого замыкания фотоэлементов, легированных никелем, во всей исследованной области спектра. Показано, что легирование никелем до формирования p - n -перехода фотоэлемента является более эффективным и технологичным. Улучшение параметров фотоэлемента при легировании никелем в основном связано с свойствами поверхностного слоя.

Ключевые слова: кремний, фотоэлемент, легирование никелем, диффузия, термоотжиг, кластер, поверхностный слой.

DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50868.332-20

Введение

В работах [1,2] было показано, что формирование обогащенного никелем слоя в приповерхностной области кремниевых фотоэлементов (ФЭ) с глубоким p - n -переходом приводит к улучшению их параметров. В этих работах легирование кремния никелем проводилось при достаточно высокой температуре ($T = 1200^\circ\text{C}$), и после формирования p - n -перехода может ухудшать эффективность фотоэлемента из-за разгонки фосфора.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей влияния легирования никелем, в том числе приповерхностного обогащенного никелем слоя на параметры фотоэлемента и определение оптимальных технологических условий легирования, пригодных для использования в промышленном производстве фотоэлементов.

При диффузионном легировании никель имеет достаточно высокую объемную растворимость ($n \sim 10^{18}\text{ cm}^{-3}$). В то же время в приповерхностной области ($d = 2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$) его концентрация может достигать $n_s \sim 10^{20}\text{--}10^{21}\text{ cm}^{-3}$ [3,4].

Основная часть растворенных атомов — 99,999%, а в приповерхностной области еще больше, находятся в электронейтральном состоянии в междоузлиях, и при определенных условиях термообработки могут формировать кластеры [5].

Указанные выше кластеры, расположенные в дефектных приповерхностных слоях, на лицевой и тыльной сто-

ронах ФЭ могут действовать как эффективные центры геттерирования для рекомбинационных неконтролируемых примесных атомов и кислорода [6,7]. Кроме того, они могут за счет своей „металлической“ проводимости эффективно уменьшать поверхностное сопротивление лицевого n -слоя ФЭ, что приводит к уменьшению последовательного сопротивления.

В связи с этим были поставлены следующие задачи.

1. Исследовать стабильность обогащенного никелем слоя кремния.
2. Определить оптимальную температуру легирования никелем.
3. Оценить эффективность легирования никелем для фотоэлементов с различной глубиной p - n -перехода.
4. Исследовать возможность легирования никелем до формирования p - n -перехода ФЭ.
5. Результаты таких исследований могут быть непосредственно применены в технологии производства кремниевых ФЭ.

1. Исследование стабильности обогащенного никелем слоя кремния

Для проверки стабильности приповерхностного обогащенного никелем слоя, образующегося в условиях промышленной технологии ФЭ, была проведена диффузия

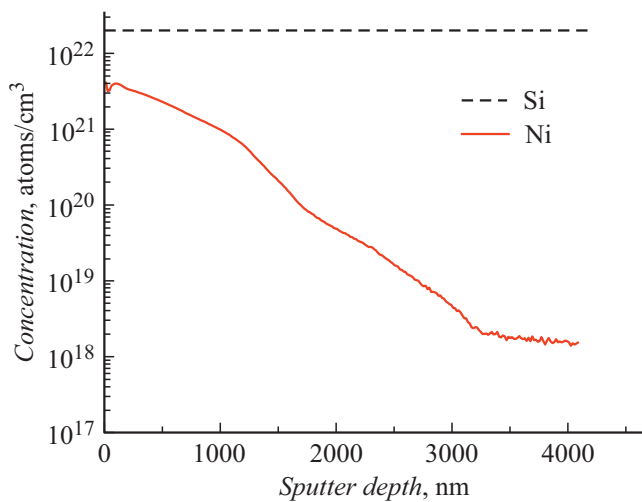


Рис. 1. Распределение атомов никеля в поверхностном слое кремния.

никеля из металлической пленки в кремниевые пластины p -типа с удельным сопротивлением $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$, толщиной $380 \mu\text{m}$ и диаметром 76mm при $T_{diff} = 1200^\circ\text{C}$, в течение 30min . На рис. 1 показано распределение атомов никеля в приповерхностном слое кремния, полученное на CAMECA IMS-6f Magnetic Sector SIMS.

Как видно из рисунка, поверхностная концентрация никеля $n_S \sim 4 \cdot 10^{21} \text{cm}^{-3}$, а толщина обогащенного слоя $d \sim 3\text{--}3.2 \mu\text{m}$. Эксперимент показал, что при последующих термообработках с температурой ниже 900°C обогащенный слой сохраняется. Это видимо обуславливается тем, что дефекты приповерхностного слоя являются центрами преципитации атомов никеля. Также экспериментально установлено, что максимальная концентрация никеля в приповерхностном обогащенном слое слабо зависит от температуры диффузии.

Измерения поверхностного сопротивления четырехзондовым методом, выполненные при послойном шлифовании образцов (по $10 \mu\text{m}$), показали незначительное влияние никеля на удельное сопротивление объема кремния, подтверждая результаты работ [8,9].

2. Определение оптимальной температуры легирования никелем

Исходные p - n -структуры ФЭ создавались диффузией фосфора в кремниевые пластины p -типа с удельным сопротивлением $0.5 \Omega\text{cm}$ при $T_{diff} = 1000^\circ\text{C}$ в течение $t = 0.5 \text{h}$. Далее полученная структура разрезалась на отдельные образцы размером $1 \times 1 \text{cm}$. Параметры всех полученных фотоэлементов были практически одинаковы. На поверхность диффузионного слоя n -типа (на лицевую сторону фотоэлемента) в вакууме напылялся слой чистого никеля толщиной $1 \mu\text{m}$. С учетом коэффициента диффузии Ni в кремний было рассчитано

оптимальное время диффузии для каждой температуры [3,10,11]. Диффузия никеля проводилась в интервале температур $T_{diff} = 700\text{--}1300^\circ\text{C}$, с шагом 50°C . Все образцы проходили дополнительный термоотжиг при $T_{ann} = 750\text{--}800^\circ\text{C}$ в течение $t = 30 \text{min}$ после диффузии никеля с целью активации процесса геттерирования [12–14] неконтролируемых рекомбинационных примесей.

Для контроля изготавливались образцы ФЭ, у которых этапы, связанные с диффузией никеля и дополнительным термоотжигом, не проводились. Полученные контрольные образцы примерно соответствуют конструкции типового промышленного ФЭ без просветляющего покрытия.

После каждого технологического этапа проводилась очистка поверхности и химическая обработка, чтобы снять остатки никеля и оксид кремния с поверхности. Затем напылением никеля создавались омические контакты. На тыльной стороне напылялся сплошной контакт, а на лицевой — через трафарет. Просветляющее покрытие на поверхности элементов отсутствовало. После получения контактов для всех образцов при одинаковых условиях были измерены ВАХ фотоэлементов и определены параметры — напряжение холостого хода V_{oc} и плотность тока короткого замыкания J_{sc} , максимальная отдаваемая мощность P_{max} и коэффициент заполнения ВАХ ξ ($\xi = P_{max}/J_{sc}V_{oc}$). В табл. 1 представлены основные параметры полученных фотоэлементов.

Как видно из табл. 1, с понижением температуры диффузии никеля происходит практически монотонное улучшение параметров J_{sc} и V_{oc} . Следует отметить, что значение J_{sc} увеличилось больше чем на 56%, а V_{oc} на 9.1% (при температуре диффузии никеля $T_{diff} = 800^\circ\text{C}$) по отношению к ФЭ, в которых диффузия никеля проводилась при 1300°C . В то же время при сравнении с контролем ($J_{sc} = 32 \text{mA/cm}^2$, $V_{oc} = 590 \text{mV}$, $\xi = 0.64$, $P_{max} = 12.08 \text{mW/cm}^2$), параметры ФЭ, легированных никелем, начинают улучшаться при температуре диффузии никеля $T_{diff} \leq 1000^\circ\text{C}$.

Диффузия никеля, проведенная при более низких температурах — $T_{diff} = 750\text{--}700^\circ\text{C}$, приводила к незначительному ухудшению параметров фотоэлементов (в отношении образцов, полученных при $T_{diff} = 800^\circ\text{C}$). Это может быть связано с уменьшением толщины обогащенной никелем области, а также с понижением концентрации атомов никеля при таких температурах диффузии.

Таким образом, на основе этих результатов можно утверждать, что оптимальная температура диффузии никеля составляет $T_{diff} = 800\text{--}850^\circ\text{C}$. Низкая температура диффузии (ниже 900°C) существенно ослабляет процесс разгонки примеси фосфора в p - n -переходе, и его глубина почти не меняется. Это особенно важно для мелких p - n -переходов.

Таблица 1. Средние значения параметров ФЭ, полученных при разных температурах диффузии никеля

$T_{diff}, ^\circ\text{C}$	1300	1250	1200	1100	1050	1000	950	900	850	800	750
t, min	3	3	3	5	7	10	15	20	30	30	60
$T_{ann}, ^\circ\text{C}$	800	800	800	800	800	800	800	800	750	750	700
$x_{p-n}, \mu\text{m}$	3.51	2.35	1.56	0.87	0.70	0.60	0.56	0.54	0.53	0.53	0.53
$J_{sc}, \text{mA/cm}^2$	24	26	28	29	30	32.8	34.2	34.8	36.5	37.5	36
V_{oc}, mV	550	560	570	575	580	585	590	595	600	600	590
ξ	0.71	0.708	0.705	0.70	0.698	0.692	0.689	0.686	0.68	0.68	0.68
$P_{max}, \text{mW/cm}^2$	9.37	10.31	11.25	11.67	12.14	13.28	13.90	14.20	14.89	15.30	14.44

Примечание. T_{diff} — температура диффузии никеля, t — время диффузии, T_{ann} — температура дополнительного термоотжига, x_{p-n} — расчетная глубина $p-n$ -перехода.

Таблица 2. Средние значения параметров ФЭ, не легированных никелем (контроль) и легированных никелем с разными глубинами залегания $p-n$ -перехода

Глубина залегания $p-n$ -перехода, μm		28	15	9	6	3	2	1	0.5–0.75
I группа	$J_{sc}, \text{mA/cm}^2$	7.5	14.7	19	21.8	25.2	27	30	32
	V_{oc}, mV	500	530	552	560	570	575	585	590
	ξ	0.68	0.667	0.662	0.659	0.657	0.652	0.645	0.640
	$P_{1max}, \text{mW/cm}^2$	2.55	5.196	6.943	8.045	9.437	10.122	11.320	12.083
II группа	$J_{sc}, \text{mA/cm}^2$	12.5	21	25.3	28	31.3	33	36	37.5
	V_{oc}, mV	540	560	575	580	585	590	595	600
	ξ	0.72	0.71	0.705	0.7	0.697	0.692	0.684	0.680
	$P_{2max}, \text{mW/cm}^2$	4.86	8.408	10.256	11.368	12.762	13.473	14.651	15.30
$(P_{2max} - P_{1max})/P_{1max}, \%$		90.59	61.58	47.716	41.304	35.236	33.105	29.43	26.622

3. Эффективность легирования никелем для ФЭ с различной глубиной $p-n$ -перехода

Управляя температурой и временем диффузии фосфора [10,11,15] в интервале $T_{diff} = 1000\text{--}1280^\circ\text{C}$ и $t = 0.5\text{--}5 \text{ h}$ в кремнии p -типа с $0.5 \Omega\text{cm}$, были изготовлены контрольные фотоэлементы с различной глубиной $p-n$ -перехода — от 28 до $0.5\text{--}0.75 \mu\text{m}$. В табл. 2 представлены основные параметры таких фотоэлементов Si(P) (I группа — контроль), не легированных никелем, без просветляющего покрытия. Никелевые омические контакты создавались по вышеприведенной технологии. Как видно из таблицы, с уменьшением глубины $p-n$ -перехода основные параметры фотоэлемента увеличиваются и максимальные их значения наблюдаются в фотоэлементах с $0.5\text{--}0.75 \mu\text{m}$. Эти данные хорошо согласуются с теорией и экспериментом [16–18].

У ФЭ II группы (Si(P + Ni)) на поверхность слоя n -типа (на лицевую сторону фотоэлемента) в вакууме напылялся слой чистого никеля толщиной $1 \mu\text{m}$ и подвергался диффузии при $T_{diff} = 800^\circ\text{C}$ в течение $t = 30 \text{ min}$. После диффузии проводился дополнительный термоот-

жиг при $T_{ann} = 750^\circ\text{C}$, длительностью $t = 30 \text{ min}$. После отжига остаток никеля на поверхности удалялся травлением в HCl, а затем в HF до получения чистой поверхности. Никелевые омические контакты изготавливались аналогично контролю (I группа). Параметры ФЭ измерялись в тех же условиях, что и контрольных образцов. В табл. 2 представлены основные параметры фотоэлементов II группы (также без просветляющего покрытия). В последней строке приведено относительное изменение максимальной мощности по сравнению с контролем.

Как видно из табл. 2, легирование никелем приводит к улучшению параметров ФЭ не зависимо от глубины залегания $p-n$ -перехода. Положительное влияние никеля сохраняется на достаточно высоком уровне в ФЭ с малой глубиной $p-n$ -перехода. Например, в ФЭ с глубиной $p-n$ -перехода $0.5\text{--}0.75 \mu\text{m}$, легированных никелем, значение J_{sc} увеличивается на 17.2%, V_{oc} — на 2%, коэффициент заполнения ξ — на 6.25% относительно контрольных фотоэлементов.

Полученные результаты мы связываем с влиянием обогащенного никелем слоя в приповерхностной области ФЭ. Обогащенный никелем слой может являться гет-

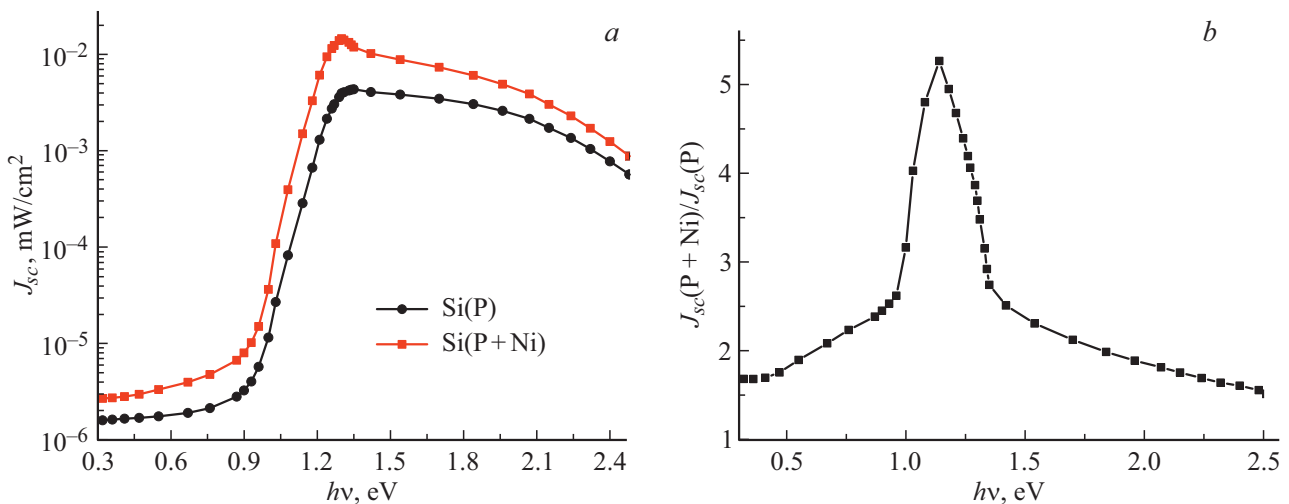


Рис. 2. Спектральные зависимости фотоэлементов: *a* — J_{sc} , *b* — $(J_{sc(\text{Ni+P})} - J_{sc(\text{P})})/J_{sc(\text{P})}$.

терирующим, а также может уменьшать поверхностное сопротивление тонкого лицевого n -слоя ФЭ, увеличивая коэффициент заполнения ВАХ.

4. Спектральные зависимости тока короткого замыкания ФЭ

На рис. 2, *a* представлена спектральная зависимость $J_{sc}(h\nu)$ ФЭ Si(P + Ni), легированных никелем при температуре $T_{diff} = 850^\circ\text{C}$, и контрольных ФЭ Si(P), не легированных никелем, измеренных при одинаковых условиях. Как видно из рисунка, при этом наблюдается существенный рост величины J_{sc} , практически во всей исследуемой области спектра. На рис. 2, *b* представлена спектральная зависимость относительного изменения величины J_{sc} фотоэлемента, легированного никелем, к току ФЭ, не легированного никелем.

Как видно из рисунка, улучшение чувствительности фотоэлементов, легированных никелем относительно контрольных, начинается в инфракрасной области спектра и монотонно увеличивается до $\lambda = 1.24\ \mu\text{m}$ ($h\nu = 1\ \text{eV}$), затем наблюдается резкий рост, который достигает своего максимального значения при $\lambda = 1.09\ \mu\text{m}$ ($h\nu = 1.14\ \text{eV}$), при $h\nu > 1.14\ \text{eV}$ чувствительность фотоэлементов, легированных никелем, также падает достаточно резко до $h\nu = 1.35\ \text{eV}$.

Полученные результаты трудно объяснить поглощением электроактивными изолированными атомами никеля в исследуемой области спектра, так как их концентрация достаточно низкая ($N \sim 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$). Поэтому мы предполагаем, что расширение спектра ИК-поглощения может быть связано с кластерами атомов никеля, находящимися в приповерхностных областях фотоэлементов в достаточно высокой концентрации.

Один из возможных вариантов влияния кластеров заключается в увеличении коэффициента поглощения „кластерных“ областей ФЭ в инфракрасной области

спектра за счет возникновения плазмонного резонанса в кластерах никеля, что приводит к лучшему совмещению области поглощения ИК-света с p - n -переходом. Размеры кластеров зависят от концентрации дефектов решетки кремния, степени пресыщения и условий термообработки, поэтому можно получить кластеры никеля со значительным разбросом размеров. Частота плазмонного резонанса в них будет разной, что значительно расширяет область спектральной чувствительности.

Не исключена также вероятность действия кластеров никеля как своеобразных приемных антенн инфракрасного диапазона волн. В этом случае происходит локальное увеличение амплитуды электрического поля световой частоты вблизи краев кластера, что может вызвать как непосредственно эмиссию электронов из кластера в полупроводник, так и уменьшение ширины запрещенной зоны за счет эффекта Франца-Келдыша.

Улучшение чувствительности в области спектра $h\nu > E_g$ видимо объясняется уменьшением поверхностной и (или) объемной рекомбинации за счет легирования никелем. Кластеры атомов никеля, которых на поверхности значительно больше, чем в объеме, обладают сильными геттерирующими и возможно, пассивирующими [19] свойствами, что уменьшает рекомбинацию неосновных носителей заряда и соответственно приводит к увеличению коэффициента сбора фотоэлемента.

5. Возможность легирования никелем до формирования p - n -перехода ФЭ

Вышеприведенные результаты получены в случае, когда обогащенная никелем область в кремниевых ФЭ создавалась после формирования p - n -перехода. Однако, с точки зрения технологии, это неудобно. Поэтому представляет интерес возможность формирования обогащенной никелем слоя до создания p - n -перехода ФЭ.

Таблица 3. Средние значения параметров ФЭ, полученных при разных температурах диффузии никеля

Диффузия никеля	$T_{diff} = 1200^{\circ}\text{C}, t = 3 \text{ min}$		$T_{diff} = 1000^{\circ}\text{C}, t = 10 \text{ min}$		$T_{diff} = 800^{\circ}\text{C}, t = 30 \text{ min}$	
	После создания $p-n$ -перехода	До создания $p-n$ -перехода	После создания $p-n$ -перехода	До создания $p-n$ -перехода	После создания $p-n$ -перехода	До создания $p-n$ -перехода
$J_{sc}, \text{mA/cm}^2$	28	33	32.8	36	37.5	38.5
V_{oc}, mV	570	590	585	590	600	605
ξ	0.705	0.69	0.692	0.68	0.68	0.67
$P_{max}, \text{mW/cm}^2$	11.25	13.43	13.278	14.443	15.30	15.61

В качестве исходного материала использовались кремниевые пластины p -типа толщиной $380 \mu\text{m}$ с удельным сопротивлением $0.5 \Omega\text{cm}$.

На поверхность кремниевых пластин в вакууме напылялся тонкий металлический слой чистого никеля толщиной $1 \mu\text{m}$, и проводилась диффузия никеля при температурах $T = 1200, 1000$ и 800°C , в течение $t = 3, 10$ и 30 min соответственно. Затем создавался $p-n$ -переход диффузией фосфора в „никелевую“ сторону пластины при $T = 1000^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 0.5 \text{ h}$, при этом глубина $p-n$ -перехода составляла $0.5-0.75 \mu\text{m}$. После диффузии проводился дополнительный термоотжиг при $T = 800^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 0.5 \text{ h}$. После создания никелевых омических контактов были измерены ВАХ ФЭ и определены параметры U_{oc} и J_{sc} . В табл. 3 представлены основные параметры полученных фотоэлементов.

Как видно из табл. 3, технология легирования никелем до формирования $p-n$ -перехода дополнительно улучшает параметры фотоэлементов независимо от температуры диффузии никеля. Введение этапа легирования никелем до формирования $p-n$ -перехода практически не усложняет технологию изготовления ФЭ, но повышает эффективность.

6. Влияние „объемного“ и „поверхностного“ никеля

Как показано выше, при диффузии никеля распределение атомов имеет особый характер — высокая и быстро спадающая концентрация на поверхности, и сравнительно постоянная в объеме. Поэтому можно выявить относительный вклад „поверхностных“ и „объемных“ атомов никеля, если удалить поверхностный, сильнолегированный никелем слой.

Образцы ФЭ изготавливались по вышеприведенной технологии, диффузия никеля проводилась до формирования $p-n$ -перехода. После диффузии никеля с поверхности образцов сошлифовали порядка $2.5-3 \mu\text{m}$, чтобы убрать обогащенный никелем слой в приповерхностной области. При этом равновесная „объемная“ концентрация никеля соответствовала растворимости никеля при температуре диффузии, и составила $10^{16}-10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Как показали результаты экспериментов, заметного эффекта улучшения параметров ФЭ при этом не наблю-

дилось. Поэтому мы можем однозначно утверждать, что улучшение параметров ФЭ в основном связано со свойствами поверхностного слоя, в котором концентрация никеля достигает $n_s \sim 10^{20}-10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

Для использования полученных результатов при производстве кремниевых ФЭ предлагается проводить диффузию никеля из химически осажденного на поверхность кремния слоя [20]. Это позволяет непосредственно использовать разработанную технологию улучшения параметров ФЭ в промышленном производстве кремниевых фотоэлементов.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Максимальная концентрация никеля в приповерхностном обогащенном слое слабо зависит от температуры диффузии и при последующих термообработках с температурой ниже 900°C обогащенный слой сохраняется.

2. Оптимальные условия диффузии никеля в кремний — $T_{diff} = 800-850^{\circ}\text{C}, t = 30 \text{ min}$.

3. Положительный эффект влияния легирования никелем кремниевого фотоэлемента сравнительно слабо зависит от глубины $p-n$ -перехода.

4. Наблюдался существенный рост величины J_{sc} для ФЭ, легированных никелем, практически во всей исследованной области спектра.

5. Легирование никелем кремния до формирования $p-n$ -перехода является более эффективной и простой технологией.

Если использовать стандартное просветляющее покрытие и омические контакты, имеющие оптимальную форму, то параметры фотоэлементов на основе предлагаемой технологии могут быть улучшены на $15-20\%$. Это означает, что предложенное решение позволяет без существенных изменений технологического процесса и с малыми затратами создавать более эффективные фотоэлементы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему преподавателю С.В. Ковешникову за участие в обсуждении результатов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта ОТ-Ф2-50 „Разработка научных основ формирования элементарных ячеек $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$ в решетке кремния — новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.К. Бахадырханов, С.Б. Исамов, З.Т. Кенжаев, С.В. Ковешников. Письма в ЖТФ, **45** (19), 3 (2019). [M.K. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev, S.V. Koveshnikov. Tech. Phys. Lett., **45** (10), 959 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019100031]
- [2] М.К. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev, D. Melebaev, Kh.F. Zikrillayev, G.A. Ikhtiyarova. Appl. Solar Energy, **56** (1), 13 (2020). DOI: 10.3103/S0003701X2001003X
- [3] J. Lindroos, D.P. Fenning, D.J. Backlund, E. Verlage, A. Gorgulla, S.K. Estreicher, H. Savin, T. Buonassisi. J. Appl. Phys., **113**, 204906 (2013). DOI: 10.1063/1.4807799
- [4] F.H.M. Spit, D. Gupta, K.N. Tu. Phys. Rev. B, **39** (2), 1255 (1989). DOI: 10.1103/PhysRevB.39.1255
- [5] М.К. Bahadir Khanov, B.K. Ismaylov, K.A. Ismailov, N.F. Zikrillayev, S.B. Isamov. Intern. J. Adv. Sci. Technol., **29** (9s), 6308 (2020).
- [6] V.L. Mazalova, O.V. Farberovich, A.V. Soldatov. J. Phys.: Conf. Series, **640**, 012025 (2015). DOI:10.1088/1742-6596/640/1/012025
- [7] М.К. Бахадирханов, Б.К. Исмаилов. Приборы, **6** (240), 44 (2020).
- [8] А.С. Астащенко, Д.И. Бринкевич, В.В. Петров. Доклады БГУИР, **8** (38), 37 (2018).
- [9] D.J. Backlund, S.K. Estreicher. Phys. Rev. B, **81**, 235213 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.235213
- [10] D.J. Fisher. *Diffusion in Silicon 10 Years of Research* (Scitec publications, 2010)
- [11] Б.И. Болтакс. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках* (Наука, Л., 1972)
- [12] Е.П. Неустроев, С.А. Смагулова, И.В. Антонова, Л.Н. Сафронов. ФТП, **38** (7), 791 (2004). [E.P. Neustroev, S.A. Smagulova, I.V. Antonova, L.N. Safronov. Semiconductors, **38** (7), 758 (2004). DOI: 10.1134/1.1777595]
- [13] В.И. Орлов, Н.А. Ярыкин, Е.Б. Якимов. ФТП, **53** (4), 433 (2019). [V.I. Orlov, N.A. Yarykin, E.B. Yakimov. Semiconductors, **53** (4), 411 (2019). DOI: 10.21883/FTR.2019.04.47672.9020]
- [14] И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер. Письма в ЖТФ, **46** (21), 11 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.21.50188.18455
- [15] V.V. Hung, P.T.T. Hong, B.V. Khue. Proc. Natl. Conf. Theor. Phys., **35**, 73 (2010).
- [16] И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков, И.С. Шахрай. Письма в ЖТФ, **46** (17), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49883.18377
- [17] M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Wart, et al. (version 54), Prog Photovolt Res Appl., **27**, 565 (2019). <https://doi.org/10.1002/pip.3171>
- [18] Б.И. Фукс. ФТП, **48** (12), 1704 (2014).
- [19] А.Г. Рябухин, Е.Г. Новоселова, И.И. Самарин. Вестник ЮУрГУ, **10**, 34 (2005).
- [20] A.A. Istratov, P. Zhang, R.J. McDonald, A.R. Smith, M. Seacrist, J. Moreland, J. Shen, R. Wahlich, E.R. Weber. J. Appl. Phys., **97** (02), 023505 (2005). DOI: 10.1063/1.1836852