
ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

УДК 621.315.592

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО КРЕМНИЕВОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛЕГИРОВАНИЕМ НИКЕЛЕМ

**М. К. БАХАДЫРХАНОВ¹, З. Т. КЕНЖАЕВ², Б. К. ИСМАЙЛОВ¹,
В. Б. ОДЖАЕВ³, В. С. ПРОСОЛОВИЧ³, Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ³**

¹Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
ул. Университетская, 2, 100095, г. Ташкент, Узбекистан

²Каракалпакский государственный университет им. Бердаха,
ул. Ч. Абдирова, 1, 230112, г. Нукус, Узбекистан

³Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Исследована возможность корректировки эксплуатационных характеристик промышленных фотоэлементов производства фирмы *Suniva* на основе монокристаллического кремния посредством дополнительного диффузионного легирования их примесью никеля в интервале температур 700–1200 °С. Показано, что оптимальная температура диффузии никеля $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850$ °С, в этом случае значение максимальной мощности P_{max} возрастает на 20–28 % по отношению к параметрам исходного промышленного фотоэлемента. При температурах диффузии $T_{\text{диф}} > 1000$ °С происходит резкое уменьшение P_{max} , что связано с увеличением глубины залегания p – n -перехода вследствие разгонки атомов фосфора при проведении высокотемпературной диффузии никеля. Положительный эффект диффузионного легирования никелем на электрофизические свойства фотоэлементов является наибольшим в том случае, когда примесные кластеры никеля находятся в области p – n -перехода, т. е. при диффузионном легировании в лицевую сторону пластины. Действие электрически нейтральных кластеров никеля менее выражено при их расположении в области изотипного p – p^+ -перехода, т. е. при диффузионном легировании в обратную сторону пластины.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлемент; максимальная мощность; диффузия никеля; обогащенный никелем слой.

Образец цитирования:

Бахадырханов МК, Кенжаев ЗТ, Исмаилов БК, Оджаев ВБ, Просолович ВС, Янковский ЮН. Повышение эффективности промышленного кремниевого солнечного элемента легированием никелем. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2021;3:32–39.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-32-39>

For citation:

Bakhadirhanov MK, Kenzhaev ZT, Ismaylov BK, Odzhaev VB, Prasalovich US, Yankovski YuN. Improving the efficiency of an industrial silicon solar cell by doping with nickel. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2021;3:32–39. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-32-39>

Сведения об авторах см. на с. 38–39.

Information about the authors see p. 38–39.



IMPROVING THE EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL SILICON SOLAR CELL BY DOPING WITH NICKEL

M. K. BAKHADIRKHANOV^a, Z. T. KENZHAEV^b, B. K. ISMAYLOV^a,
V. B. ODZHAEV^c, U. S. PRASALOVICH^c, Yu. N. YANKOVSKI^c

^aTashkent State Technical University named after Islam Karimov,
2 University Street, Tashkent 100095, Uzbekistan

^bKarakalpak State University named after Berdakh,
1 Ch. Abdirov Street, Nukus 230112, Uzbekistan

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

Corresponding author: U. S. Prasalovich (prosolovich@bsu.by)

The possibility of adjusting the operational parameters of industrial solar cells produced by the company *Suniva* based on monocrystalline silicon by means of additional diffusion doping with nickel in the temperature range 700–1200 °C has been investigated. It is shown that the optimal temperature of nickel diffusion is $T_{\text{diff}} = 800\text{--}850$ °C. In this case the value of the maximum power P_{max} increases by 20–28 % in relation to the parameters of the original industrial photocell. At diffusion temperatures $T_{\text{diff}} > 1000$ °C, a sharp decrease in P_{max} occurs, which is associated with an increase in the depth of the $p\text{--}n$ junction due to the distillation of phosphorus atoms during high-temperature diffusion of nickel. The positive effect of diffusion alloying with nickel on the electrophysical parameters of photocells is greatest in the case when the nickel impurity clusters are in the region of the $p\text{--}n$ junction, i. e. with diffusion alloying to the front side of the plate. The action of electrically neutral nickel clusters is less pronounced when they are located in the region of the isotypic $p\text{--}p^+$ transition; in case of diffusion alloying with nickel in the opposite side of the plate.

Keywords: silicon photocell; maximum power; nickel diffusion; nickel-enriched layer.

Введение

Солнечная энергетика – один из перспективных экологических источников возобновляемой энергии. Однако ее существенным недостатком является довольно низкий коэффициент полезного действия применяемых приборов и устройств. Как следствие, основные работы в данной области направлены на повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей. С этой целью используются различные методы текстурирования поверхности для уменьшения ее коэффициента отражения, разрабатываются более эффективные просветляющие покрытия, совершенствуются технологии формирования изотипного перехода, увеличивающего эффективность сбора неравновесных носителей заряда, а также изучаются возможности применения различных видов гетероструктур на широкозонных полупроводниках [1; 2]. До настоящего времени наиболее распространенным с точки зрения соотношения цены и качества является использование фотоэлектрических преобразователей, изготовленных на основе монокристаллического кремния. В данном случае основная масса исследований посвящены как проведению многоступенчатой диффузии при формировании эмиттерной области, так и легированию материала нетрадиционными электрически нейтральными примесями в целях увеличения времени жизни неравновесных носителей заряда [3].

В работах [4–6] было показано, что обогащение никелем слоя в приповерхностной области кремниевых фотоэлементов (ФЭ) приводит к улучшению их электрофизических параметров. В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии формирования в приповерхностной области промышленных кремниевых ФЭ областей, обогащенных электрически нейтральными атомами никеля, а также изучение их влияния на эффективность работы ФЭ. Подобные исследования позволяют выявить влияние обогащенного никелем приповерхностного слоя на эксплуатационные параметры промышленных ФЭ с достаточно мелким $p\text{--}n$ -переходом (0,50–0,75 мкм). В связи с этим данной работе были установлены оптимальные условия формирования обогащенной никелем области, позволяющих повысить эффективность преобразования солнечной энергии промышленными кремниевыми ФЭ, и оценка применимости метода легирования никелем в стандартном технологическом процессе изготовления монокристаллических кремниевых ФЭ.

Материалы и методы исследования

В работе использовались ФЭ на основе монокристаллического кремния промышленного изготовления (кремниевые пластины диаметром 200 мм производства фирмы *Suniva* с базой p -типа и глубиной залегания $p\text{--}n$ -перехода $\sim 0,5$ мкм). Концентрация основной легирующей примеси бора в исходных



подложках, определенная методом Ван-дер-Пау (p_0), составляла $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В ходе исследований измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭ при освещении лампой накаливания с плотностью мощности излучения $\sim 150 \text{ мВт/см}^2$, запитанной от стабилизатора напряжения. На основе проведенных измерений определялись основные электрические параметры промышленного ФЭ: напряжение холостого хода $U_{\text{xx}} = 0,6 \text{ В}$, плотность тока короткого замыкания $J_{\text{кз}} = 50 \text{ мА/см}^2$. Стабильность температуры образцов поддерживалась пассивным водяным термостатом и составляла $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$. Для исключения нагрева образцов во время измерений их освещение проводилось импульсами длительностью 1 с, период следования которых равнялся 15 с.

По завершении тестирования исходных промышленных образцов ФЭ тыльный и лицевой омические контакты удалялись без разрушения просветляющего покрытия (тыльный – травлением в 10 % растворе HCl при комнатной температуре в течение 10 мин, а лицевой – травлением в 12 % растворе HNO₃ при комнатной температуре в течение 10 мин) [7–9]. После этого пластины ФЭ разрезались на отдельные образцы размером $1 \times 1 \text{ см}^2$ (90 шт.). Для контроля на некоторые образцы наносились контакты из индий-галлиевой эвтектики, определялись ВАХ данных образцов и вычислялись их электрические параметры ($J_{\text{кз}}$ и U_{xx}). Было установлено, что $J_{\text{кз}}$ и U_{xx} образцов после удаления контактов практически не изменились (сохранили свои исходные значения), что говорит о достаточно высоком качестве контактов из индий-галлиевой эвтектики. Таким образом, использованный метод удаления стандартных промышленных контактов ФЭ позволяет сохранить исходные параметры полупроводниковой структуры промышленного ФЭ.

Полученные образцы ФЭ размером $1 \times 1 \text{ см}^2$ делились на три группы (по 30 шт.):

- группа I – контрольные образцы, в которые диффузия никеля не проводилась;
- группа II – образцы, у которых на тыльную (p -типа) сторону структур в вакууме напылялся тонкий металлический слой чистого никеля толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$;
- группа III – образцы, у которых металлическая пленка никеля создавалась на поверхности диффузионного n -слоя.

Диффузия никеля проводилась в интервале температур $T_{\text{диф}} = 700\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Время диффузии для каждой температуры рассчитывалось с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии никеля в кремнии таким образом, чтобы p – n -переход был расположен в обогащенной никелем приповерхностной области [10–12]. Согласно расчетам время проведения диффузии для $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$ составляло 30–40 мин, а для $T_{\text{диф}} = 950\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ варьировалось от 10 до 25 мин в зависимости от температуры.

Все образцы групп II и III после проведения диффузии никеля в интервале температур $T_{\text{диф}} = 700\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ были подвергнуты стабилизирующему термическому отжигу при $T_{\text{отж}} = 750\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в целях снижения влияния глубоких рекомбинационных центров в решетке кремния, формирующихся при высокотемпературной обработке при проведении диффузии [6; 13–15]. Контрольные образцы также отжигались при соответствующих температурах диффузии и подвергались стабилизирующему термическому отжигу аналогично образцам групп II и III.

Для удаления оксида кремния и никеля с поверхности пластин выполнялась химическая обработка в 10 % растворе HCl при комнатной температуре в течение 10 мин, а затем в 12 % растворе HNO₃ при комнатной температуре в течение 10 мин. Перед измерениями ВАХ на исследуемые образцы наносились контакты из индий-галлиевой эвтектики в виде одной полоски шириной $\sim 0,5 \text{ мм}$ на месте удаленного контакта в центре образца. На основании проведенных измерений были определены максимальная мощность исследуемых экспериментальных образцов $P_{\text{max}} = \xi \cdot J_{\text{кз}} \cdot U_{\text{xx}}$ (ξ – коэффициент заполнения ВАХ) и ее изменение по отношению к параметрам исходного контрольного промышленного ФЭ, не подвергавшегося термообработке ($J_{\text{кз}} = 50 \text{ мА/см}^2$, $U_{\text{xx}} = 0,6 \text{ В}$, $\xi = 0,44$, $P_{\text{max}} = 13,2 \text{ мВт/см}^2$).

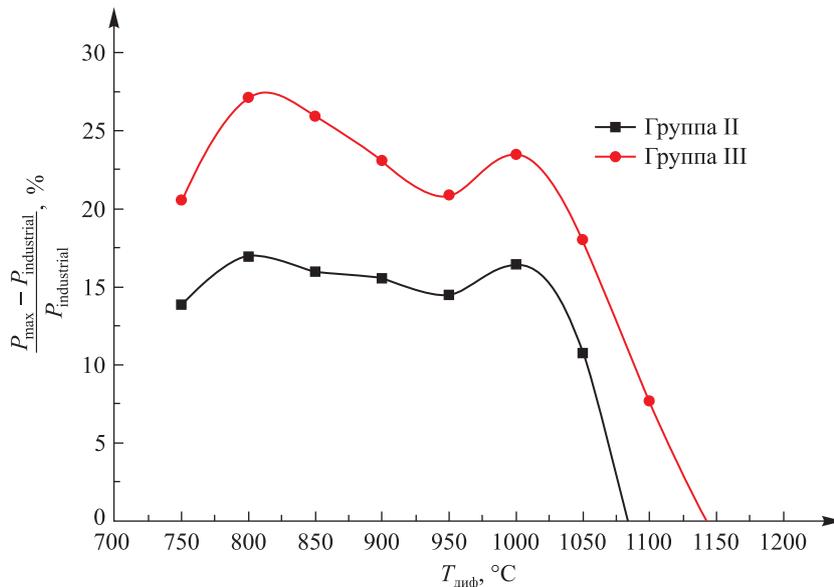
Результаты и их обсуждение

В ходе исследований установлено, что для ФЭ группы I (контрольные образцы) в интервале температур первой термообработки $T_{\text{диф}} = 950\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит снижение электрофизических параметров. Так, при проведении диффузии при $950 \text{ }^\circ\text{C}$ были получены значения $J_{\text{кз}} = 48 \text{ мА/см}^2$, $U_{\text{xx}} = 0,58 \text{ В}$, $\xi = 0,45$, $P_{\text{max}} = 12,5 \text{ мВт/см}^2$, а при $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ – $J_{\text{кз}} = 40 \text{ мА/см}^2$, $U_{\text{xx}} = 0,52 \text{ В}$, $\xi = 0,37$, $P_{\text{max}} = 7,7 \text{ мВт/см}^2$. Данный эффект, по всей видимости, обусловлен увеличением глубины p – n -перехода вследствие диффузии фосфора из эмиттерной области ФЭ. Авторами работы [15] установлено, что, с одной стороны, при увеличении глубины залегания p – n -перехода уменьшается слоиное сопротивление структуры и повышается коэффициент заполнения ВАХ. С другой стороны, рост толщины эмиттерного слоя приводит к ухудшению эффективности собирания неосновных носителей заряда, генерированных вблизи поверхности, а также снижению квантового выхода фотоответа во всем спектральном диапазоне fotocувствительности, особенно в коротковолновой ее части, что обуславливает уменьшение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.



Проведенные расчеты изменения глубины залегания $p-n$ -перехода при условии диффузии из слоя конечной толщины (диффузия из ограниченного источника) с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии фосфора в кремнии [11] показали, что глубина залегания $p-n$ -перехода при $T_{\text{диф}} = 950\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ увеличилась в 1,5–3,0 раза. Так, при $T_{\text{диф}} = 950\text{ }^\circ\text{C}$ глубина залегания $p-n$ -перехода выросла на 0,18 мкм, при $T_{\text{диф}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ – на 0,36 мкм, а при $T_{\text{диф}} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ – на 1,0 мкм. Следует отметить, что параметры контрольных ФЭ в интервале температур $T_{\text{диф}} = 700\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ практически не изменились, что подтверждает предположение об увеличении глубины залегания $p-n$ -перехода при $T_{\text{диф}} = 950\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$.

На рисунке представлены зависимости изменения относительной максимальной мощности ФЭ групп II и III при разных температурах диффузии никеля по сравнению с параметрами контрольного образца $\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{industrial}}}{P_{\text{industrial}}}$, где P_{max} – максимальная мощность исследуемого ФЭ после проведения диффузии никеля при соответствующих температурах; $P_{\text{industrial}}$ – максимальная мощность промышленного ФЭ, не подвергнувшегося диффузии никеля и различным видам термообработок.



Относительное изменение максимальной мощности ФЭ групп II и III в зависимости от температуры диффузии никеля по сравнению с параметрами ФЭ группы I

The relative change in the maximum power of photovoltaic cells' groups II and III depending on the nickel diffusion temperature in comparison with the parameters of the photovoltaic cells' group I

Как видно из рисунка, относительная максимальная мощность образцов ФЭ группы II после проведения диффузии никеля в интервале температур $T_{\text{диф}} = 950\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ увеличивается с понижением температуры диффузии никеля ниже $1050\text{ }^\circ\text{C}$. Так, при $T_{\text{диф}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ P_{max} возрастает на 16,43 % по сравнению с максимальной мощностью контрольного промышленного образца. Установлено, что при $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ значения электрофизических параметров составили: $J_{\text{кз}} \approx 55\text{ мА/см}^2$, $U_{\text{хх}} \approx 0,61\text{ В}$, $\xi \approx 0,46$, $P_{\text{max}} \approx 15,4\text{ мВт/см}^2$, т. е. наблюдается повышение значений $J_{\text{кз}}$ на $\sim 10\%$, $U_{\text{хх}}$ на $\sim 1,66\%$, а ξ на $\sim 4,54\%$. При этом P_{max} увеличилась на 16–17 % по отношению к параметрам исходного промышленного ФЭ. Максимальное значение данной величины достигается при $T_{\text{диф}} = 800\text{ }^\circ\text{C}$, в данном случае P_{max} возрастает на 16,92 % по сравнению с максимальной мощностью контрольного промышленного образца.

Аналогичные закономерности изменения максимальной мощности, как видно из приведенного рисунка, характерны и для образцов группы III, у которых никель напыляли с лицевой стороны, однако увеличение данного параметра было более существенным. При $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ значения электрофизических параметров составили: $J_{\text{кз}} \approx 53,3\text{ мА/см}^2$, $U_{\text{хх}} \approx 0,62\text{ В}$, $\xi \approx 0,51$, $P_{\text{max}} \approx 16,7\text{ мВт/см}^2$. Таким образом, происходит рост значений $J_{\text{кз}}$ на $\sim 6\text{--}7\%$, $U_{\text{хх}}$ на $\sim 2,5\%$, а ξ на $\sim 15,9\%$. В то же время P_{max} увеличилась на 26–27 % по отношению к параметрам контрольного промышленного ФЭ. Существенное повышение данной величины наблюдается при $T_{\text{диф}} < 900\text{ }^\circ\text{C}$, при этом глобальный максимум достигается при $T_{\text{диф}} \approx 800\text{ }^\circ\text{C}$ (увеличение P_{max} на 27,12 %). Имеется также локальный максимум при $T_{\text{диф}} \approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$ (увеличение P_{max} на 23,49 %).



Диффузия никеля при более низких температурах ($T_{\text{диф}} = 700\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$) ухудшает электрофизические параметры ФЭ групп II и III (относительно образцов, полученных при оптимальной температуре $T_{\text{диф}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это может быть связано с уменьшением толщины обогащенной никелем области, а также с понижением концентрации атомов никеля при более низких температурах диффузии [16; 17].

Коэффициент заполнения ВАХ ФЭ группы III при всех температурах диффузии никеля увеличился относительно такового образцов группы I на 15–16 %, образцов группы II на 10–11 %. Вероятно, это обусловлено уменьшением слоевого сопротивления поверхностных слоев эмиттера солнечного элемента. Действительно, измерение поверхностного сопротивления эмиттерной области (n -слоя) исследуемых образцов, легированных никелем ($\rho_{\text{пов}} = 1,8\text{ Ом на квадрат}$), показывает его снижение на 14,3 % по сравнению с поверхностным сопротивлением эмиттерной области контрольных образцов ($\rho_{\text{пов}} = 2,1\text{ Ом на квадрат}$), что примерно соответствует росту коэффициента заполнения ВАХ.

Резкое уменьшение P_{max} для образцов групп II и III при $T_{\text{диф}} > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, вероятно, связано с увеличением глубины залегания p – n -перехода вследствие разгонки атомов фосфора при проведении высокотемпературной диффузии никеля.

Максимальные значения параметров наблюдаются в тех случаях, когда мелкий p – n -переход [18–20] ФЭ расположен в обогащенной никелем приповерхностной области. Полученные экспериментальные результаты позволяют заключить, что эффект повышения эксплуатационных характеристик образцов обусловлен наличием обогащенного никелем слоя в приповерхностной области ФЭ.

Следует отметить, что наибольшее увеличение электрофизических параметров ФЭ наблюдалось, как сказано выше, в случае проведения диффузии никеля в рабочую сторону пластин, где расположен p – n -переход, т. е. в области осуществления генерации под действием излучения неравновесных носителей заряда. При проведении диффузии никеля в обратную сторону пластин диффузионно введенный никель находится в области изотипного p – p^+ -перехода, ответственного за процессы собирания неравновесных носителей заряда. В процессе диффузии никель формирует электрически неактивные примесные кластеры, которые являются геттерами для технологических фоновых примесей [4; 21], образующих в кремнии рекомбинационно активные глубокие примесные уровни в запрещенной зоне, и снижают время жизни неравновесных носителей заряда. Параллельно с формированием кластеров никеля при проведении термообработок происходит образование кислородных преципитатов, также выступающих эффективными геттерами для технологических фоновых примесей [22]. Формирование геттерирующих центров обуславливает увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда, что обеспечивает повышение напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и коэффициента заполнения ВАХ образцов. Данный эффект оказывает наибольшее влияние на электрофизические параметры ФЭ в том случае, когда примесные кластеры находятся в области p – n -перехода. При расположении в области изотипного p – p^+ -перехода их действие менее выражено. Таким образом, при использовании стандартного промышленного просветляющего покрытия и омических контактов, имеющих оптимальную форму, максимальная снимаемая мощность с ФЭ, изготовленных с применением представленного в настоящей работе способа дополнительного диффузионного легирования никелем, может быть повышена примерно на 20–28 %.

Следует отметить, что вакуумное осаждение никеля является достаточно дорогостоящим и длительным технологическим процессом. Для снижения стоимости изготовления ФЭ перспективным представляется использование способа легирования никелем исходных пластин из слоя химически осажденного никеля [23] с последующим проведением диффузии никеля при $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$. После удаления остатков металлического никеля химическим травлением можно использовать стандартную промышленную технологию изготовления ФЭ. Для отработки данного способа далее планируется провести соответствующие исследования.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для повышения фотоэлектрических параметров промышленных ФЭ целесообразно проведение дополнительного легирования пластин монокристаллического кремния примесью никеля. Оптимальные условия легирования никелем: $T_{\text{диф}} = 800\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$, время проведения диффузии – 30–40 мин с последующим термостабилизирующим отжигом при $T_{\text{отж}} = 750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30–40 мин.
2. Легирование пластин монокристаллического кремния никелем при условиях, перечисленных в п. 1, позволяет увеличить максимальную мощность промышленно изготовленного ФЭ на 20–28 %.
3. Положительный эффект диффузионного легирования никелем на электрофизические параметры ФЭ является наибольшим в том случае, когда примесные кластеры никеля находятся в области p – n -перехода,



т. е. диффузионное легирование производится в лицевую сторону пластины. Действие электрически нейтральных кластеров никеля менее выражено при их расположении в области изотипного $p-p^+$ -перехода, т. е. при диффузионном легировании в обратную сторону пластины.

Предложенный в настоящей работе способ корректировки электрофизических параметров промышленно изготовленного ФЭ позволяет совмещать его со стандартным технологическим процессом изготовления ФЭ без существенных изменений и с небольшими затратами.

Библиографические ссылки

1. Гременок ВФ, Тиванов МС, Залесский ВБ. *Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов*. Минск: Издательский центр БГУ; 2007. 222 с.
2. Середин ПВ, Леньшин АС. Основные проблемы формирования нано- и гетероструктур на основе кремния и полупроводников A^3B^5 для современной оптоэлектроники. *Молодой ученый*. 2013;11:28–31.
3. Бринкевич ДИ, Вабищевич СА, Просолович ВС, Янковский ЮН. *Редкоземельные элементы в монокристаллическом кремнии*. Новополоцк: Полоцкий государственный университет; 2003. 203 с.
4. Bakhadir khanov MK, Isamov SB, Kenzhaev ZT, Koveshnikov SV. Studying the effect of doping with nickel on silicon-based solar cells with a deep $p-n$ junction. *Technical Physics Letters*. 2019;45(10):959–962. DOI: 10.1134/S1063785019100031.
5. Bakhadir khanov MK, Isamov SB, Kenzhaev ZT, Melebaev D, Zikrillayev KhF, Ikhtiyarova GA. Silicon photovoltaic cells with deep $p-n$ junction. *Applied Solar Energy*. 2020;56(1):13–17. DOI: 10.3103/S0003701X2001003X.
6. Бахадырханов МК, Кенжаев ЗТ. Оптимальные условия легирования никелем для повышения эффективности кремниевых фотоэлементов. *Журнал технической физики*. 2021;91(6):981–986. DOI: 10.21883/jtf.2021.06.50868.332-20.
7. Kalinkin IP, Kukushkin SA, Osipov AV. Effect of chemical treatment of a silicon surface on the quality and structure of silicon-carbide epitaxial films synthesized by atom substitution. *Semiconductors*. 2018;52(6):802–808. DOI: 10.1134/S1063782618060118.
8. Воробьева ТН, Кобец АВ, Рева ОВ, Врублевская ОН. Осаждение из растворов многослойных пленок металлов на кремний. В: Ивашкевич ОА, Воробьева ТН, Аршанский ЕЯ, Браницкий ГА, Василевская ЕИ, редакторы. *Свиридовские чтения. Выпуск 7*. Минск: БГУ; 2011. с. 34–43.
9. Stapf A, Gondek C, Kroke E, Roewer G. Wafer cleaning, etching, and texturization. In: Yang D, editor. *Handbook of photovoltaic silicon*. Berlin: Springer; 2018. p. 1–47. DOI: 10.1007/978-3-662-52735-1_17-1.
10. Lindroos J, Fenning DP, Backlund DJ, Verlage E, Gorgulla A, Estreicher SK, et al. Nickel: a very fast diffuser in silicon. *Journal of Applied Physics*. 2013;113(20):204906. DOI: 10.1063/1.4807799.
11. Болтакс БИ. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках*. Ленинград: Наука; 1972. 384 с.
12. Vu Van Hung, Phan Thi Thanh Hong, Bui Van Khue. Boron and phosphorus diffusion in silicon: interstitial, vacancy and combination mechanisms. *Proceedings of the National Conference on Theoretical Physics*. 2010;35:73–79.
13. Чистохин ИБ, Фрицлер КБ. Влияние условий формирования геттера в высокоомном кремнии на характеристики PIN-фотодиодов. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(21):11–13. DOI: 10.21883/PJTF.2020.21.50188.18455.
14. Бахадырханов МК, Исмаилов БК. Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля в решетке кремния. *Приборы*. 2020;6:44–48.
15. Хвостиков ВП, Сорокина СВ, Хвостикова ОА, Тимошина НХ, Потапович НС, Бер БЯ и др. Высокоэффективные фотоэлементы на основе GaSb. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(2);273–279.
16. Bakhadir khanov MK, Ismaylov BK, Ismailov KA, Zikrillaev NF, Isamov SB. On how thermal annealing affects the state of clusters of nickel atoms in crystal lattice of silicon. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020;29(9s):6308–6312.
17. Асташенков АС, Бринкевич ДИ, Петров ВВ. Свойства кремния, легированного примесью никеля методом диффузии. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2008;38(8):37–43.
18. Панайотти ИЕ, Теруков ЕИ, Шахрай ИС. Метод расчета рабочих характеристик кремниевых гетеропереходных солнечных элементов с произвольными параметрами кристаллической подложки. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(17):3–5. DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49883.18377.
19. Green M, Dunlop E, Hohl-Ebinger J, Yoshita M, Kopidakis N, Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2021;29(1):3–15. DOI: 10.1002/pip.3371.
20. Саченко АВ, Шкробитий АИ, Коркишко РМ, Костылев ВП, Кулиш НР, Соколовский ИО. Особенности фотопреобразования в высокоэффективных кремниевых солнечных элементах. *Физика и техника полупроводников*. 2015;49(2):271–277.
21. Крюков ВЛ, Фурманов ГП, Бринкевич ДИ, Вабищевич НВ, Просолович ВС, Янковский ЮН. Свойства кремния, диффузионно-легированного никелем. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2002;1:22–24.
22. Васильев ЮБ, Вереzub НА, Меженный МВ, Просолович ВС, Простомолотов АИ, Резник ВЯ. Особенности дефектообразования в процессе термообработки бездислокационных монокристаллических пластин кремния большого диаметра с заданным распределением в объеме кислородсодержащих геттерирующих центров. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2012;2:43–51.
23. Dhar S, Chakrabarti S. Electroless Ni plating on n - and p -type porous Si for ohmic and rectifying contacts. *Semiconductor Science and Technology*. 1996;11(8):1231–1234.

References

1. Gremenok VF, Tivanov MS, Zaleckii VB. *Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovyykh materialov* [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk: Publishing Center of the Belarusian State University; 2007. 222 p. Russian.
2. Seredin PV, Len'shin AS. [The main problems of the formation of nano- and heterostructures based on silicon and A^3B^5 semiconductors for modern optoelectronics]. *Molodoi uchenyi*. 2013;11:28–31. Russian.



3. Brinkevich DI, Vabishchevich SA, Prosolovich VS, Yankovskii YuN. *Redkozemel'nye elementy v monokristallicheskom kremnii* [Rare earth elements in monocrystalline silicon]. Novopolotsk: Polotsk State University; 2003. 203 p. Russian.
4. Bakhadir Khanov MK, Isamov SB, Kenzhaev ZT, Koveshnikov SV. Studying the effect of doping with nickel on silicon-based solar cells with a deep $p-n$ junction. *Technical Physics Letters*. 2019;45(10):959–962. DOI: 10.1134/S1063785019100031.
5. Bakhadir Khanov MK, Isamov SB, Kenzhaev ZT, Melebaev D, Zikrillayev KhF, Ikhtiyarova GA. Silicon photovoltaic cells with deep $p-n$ junction. *Applied Solar Energy*. 2020;56(1):13–17. DOI: 10.3103/S0003701X2001003X.
6. Bakhadir Khanov MK, Kenzhaev ZT. [Optimal conditions for nickel alloying to increase the efficiency of silicon solar cells]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021;91(6):981–986. Russian. DOI: 10.21883/jtf.2021.06.50868.332-20.
7. Kalinkin IP, Kukushkin SA, Osipov AV. Effect of chemical treatment of a silicon surface on the quality and structure of silicon-carbide epitaxial films synthesized by atom substitution. *Semiconductors*. 2018;52(6):802–808. DOI: 10.1134/S1063782618060118.
8. Vorob'eva TN, Kobets AV, Reva OV, Vrublevskaia ON. [Deposition of multilayer metal films from solutions on silicon]. In: Ivashkevich OA, Vorob'eva TN, Arshanskii EYa, Branitskii GA, Vasilevskaia EI, editors. *Sviridovskie chteniya. Vypusk 7* [Sviridov readings. Issue 7]. Minsk: Belarusian State University; 2011. p. 34–43. Russian.
9. Stapf A, Gondek C, Kroke E, Roewer G. Wafer cleaning, etching, and texturization. In: Yang D, editor. *Handbook of photovoltaic silicon*. Berlin: Springer; 2018. p. 1–47. DOI: 10.1007/978-3-662-52735-1_17-1.
10. Lindroos J, Fenning DP, Backlund DJ, Verlage E, Gorgulla A, Estreicher SK, et al. Nickel: a very fast diffuser in silicon. *Journal of Applied Physics*. 2013;113(20):204906. DOI: 10.1063/1.4807799.
11. Boltaks BI. *Diffuziya i tochechnye defekty v poluprovodnikakh* [Diffusion and point defects in semiconductors]. Leningrad: Nauka; 1972. 384 p. Russian.
12. Vu Van Hung, Phan Thi Thanh Hong, Bui Van Khue. Boron and phosphorus diffusion in silicon: interstitial, vacancy and combination mechanisms. *Proceedings of the National Conference on Theoretical Physics*. 2010;35:73–79.
13. Chistokhin IB, Fritsler KB. [Influence of getter formation conditions in high-resistance silicon on the characteristics of PIN photodiodes]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2020;46(21):11–13. Russian. DOI: 10.21883/PJTF.2020.21.50188.18455.
14. Bakhadir Khanov MK, Ismaylov BK. [Gettering properties of nickel atom clusters in a silicon lattice]. *Pribory*. 2020;6:44–48. Russian.
15. Khvostikov VP, Sorokina SV, Khvostikova OA, Timoshina NK, Potapovich NS, Ber BYa, et al. High efficient photocells based on GaSb. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2013;47(2):273–279. Russian.
16. Bakhadir Khanov MK, Ismaylov BK, Ismailov KA, Zikrillayev NF, Isamov SB. On how thermal annealing affects the state of clusters of nickel atoms in crystal lattice of silicon. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020;29(9s):6308–6312.
17. Astashenkov AS, Brinkevich DI, Petrov VV. [Properties of silicon doped with nickel admixture by diffusion]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*. 2008;38(8):37–43. Russian.
18. Panaiotti IE, Terukov EI, Shakhrai IS. [Method for calculating the performance characteristics of silicon heterojunction solar cells with arbitrary parameters of the crystal substrate]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2020;46(17):3–5. Russian. DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49883.18377.
19. Green M, Dunlop E, Hohl-Ebinger J, Yoshita M, Kopidakis N, Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2021;29(1):3–15. DOI: 10.1002/pip.3371.
20. Sachenko AV, Shkrebtii AI, Korkishko RM, Kostilyov VP, Kulish NR, Sokolovskiy IO. Features of phototransformation in the high-efficiency silicon solar cells. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2015;49(2):271–277. Russian.
21. Kryukov VL, Furmanov GP, Brinkevich DI, Vabishchevich NV, Prosolovich VS, Yankovskii YuN. [Properties of nickel diffusion-doped silicon]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki*. 2002;1:22–24. Russian.
22. Vasil'ev YuB, Verezub NA, Mezhenyi MV, Prosolovich VS, Prostomolotov AI, Reznik VYa. [Features of defect formation in the process of heat treatment of dislocation-free single-crystal silicon wafers of large diameter with a given distribution in the volume of oxygen-containing gettering center]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki*. 2012;2:43–51. Russian.
23. Dhar S, Chakrabarti S. Electroless Ni plating on n - and p -type porous Si for ohmic and rectifying contacts. *Semiconductor Science and Technology*. 1996;11(8):1231–1234.

Получена 08.09.2021 / принята 09.09.2021.
Received 08.09.2021 / accepted 09.09.2021.

Авторы:

Мухаммад Кабир Бахадирханов – академик АН Республики Узбекистан, доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры цифровой электроники и микроэлектроники факультета электроники и автоматизации.

Зоир Тохир Кенжаев – базовый докторант кафедры физики полупроводников физического факультета. Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор К. А. Исмаилов.

Байрамбай Канатбаевич Исмаилов – кандидат физико-математических наук; старший преподаватель кафедры цифровой электроники и микроэлектроники факультета электроники и автоматизации.

Authors:

Mukhamed Kabir Bakhadir Khanov, academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of digital electronics and microelectronics, faculty of electronics and automation.
bahazeb@yandex.com

Zoir Toxir Kenzhaev, basic doctoral student at the department of physics semiconductors, physical faculty.
zoir1991@bk.ru

Bayrambay K. Ismaylov, PhD (physics and mathematics); senior lecturer at the department of digital electronics and microelectronics, faculty of electronics and automation.



Владимир Борисович Оджаев – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Владислав Савельевич Просолович – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Юрий Николаевич Янковский – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Vladimir B. Odzhaev, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

odzhaev@bsu.by

Uladislau S. Prasalovich, PhD (physics and mathematics), doцент; head of the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

prosolovich@bsu.by

Yuri N. Yankovski, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

yankouski@bsu.by