



# SCIENTIFIC BULLETIN

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL RESEARCH

**ILMIY HABARNOMA  
FIZIKA-MATEMATIKA  
TADQIQOTLARI**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Физика

<b>С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.С. САИДОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ</b>	
Получения, морфология и фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-Si}-p\text{-(Ge}_2\text{)}_{1-x-y}\text{(GaAs)}_x\text{(ZnSe)}_y$ .....	7
<b>Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, К.А. ИСМАЙЛОВ, С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, З.Т. КЕНЖАЕВ, Б.К. ИСМАЙЛОВ</b>	
Влияние легирования никелем на спектральную чувствительность кремниевых солнечных элементов .....	16
<b>М.Ш. ИСАЕВ, А.Т. МАМАДОЛИМОВ, Ш.К. АКБАРОВ</b>	
Структура приповерхностного слоя диффузационно-легированного кремния атомами хрома и кобальта.....	21
<b>М.В. TAGAEV, A.A. ABDREYMOV, U.D. BAIRAMOV</b>	
Kremniyli p-n o'tishda mikroplazmalarning shakllanishi.....	27
<b>М.В. FOZILJONOV, I.N. KARIMOV, A.E. ABDIKARIMOV</b>	
Influence of the local trapped charge in oxide to the gate - drain capacitance in a FinFET .....	33
<b>Ш.Х. ЙУЛЧИЕВ, И.М. СОЛИЕВ, Х.Ж. МАНСУРОВ</b>	
Рентгеноструктурные исследования кремния марки КДБ-20 с участием кислорода.....	37

### Техника

<b>Р.А. МУМИНОВ, В.Г. ДЫСКИН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Н. БУТУНБАЕВ, К.А. ДЖУМАМАРУТОВ</b>	
К вопросу применения гидрофобных плёнок для пассивной очистки фронтальной поверхности фотоэлектрических модулей.....	42
<b>С. ЗАЙНАБИДИНОВ, Б. УРМАНОВ, С. АЛИЕВ</b>	
Разработка конструкции нового солнечного осветительного устройства.....	47
<b>С.С. НАСРИДДИНОВ, А.К. ХАМРАКУЛОВ, Н.Т. МОВЛОНОВ, М.И. МАННАНОВ</b>	
Метод определения удельного сопротивления почвы.....	53
<b>Ш.А. ГУЛАМОВ, Г.М. МҮМИНОВА</b>	
Легирланган ва лнгирланмаган қўға ўсимлиги толаларини таййорлаш хамда уларнинг оптоэлектроник хоссалари тадқиқ қилиш усуллари.....	58

### Математика

<b>А.К. УРИНОВ, Д.А. УСМОНОВ</b>	
Нелокальная задача для вырождающегося уравнения второго порядка, содержащего интегро-дифференциальный оператор дробного порядка с функцией бесселя в ядре.....	64
<b>N. UMRZAQOV, I.S. ZAYNABIDDINOV</b>	
On a pursuit differential game with integral constraints in $R^n$ .....	75
<b>Д.Д. АХМЕДОВА</b>	
Динамические системы симплекса квадратичных гомеоморфизмов.....	83

<b>Ф.А. ЮСУПОВ, Д.Д. АХМЕДОВА</b>	
Инвариантность некоторых стохастических квадратичных операторов неволтеррного типа в двухмерном симплексе.....	87
<b><u>Информатика</u></b>	
<b>Р.К. АЗИМОВ, Б.Р. АЗИМОВ</b>	
Машинали ўқитишда регрессия усуллари.....	90
<b>М.К.МАХКАМОВ, Х.А.МАМАДАЛИЕВ, Ш.Ш.ХОЖИКУЛОВ</b>	
Метод Фурье для исследования распространения волны уплотнения в трубопроводах установленном демпфером.....	96
<b>Ғ.О. ТАЖИБАЕВ, М.М. МИРЗАЕВА, Ш.О. ТҮРАХОНОВА.</b>	
Юпқа пластина эгилиши масаласини интегралли усулда ечишда чегаравий шартларга боғлиқ бўлган маҳсусликни эътиборга олиш.....	104
<b><u>Персоналии</u></b>	
Академиг М.Мусахонов 80 ёшда.....	111
<i>Правила оформления статьи</i> .....	113

# Влияние легирования никелем на спектральную чувствительность кремниевых солнечных элементов

Н.Ф. Зикриллаев<sup>1</sup>, К.А. Исмайлова<sup>2</sup>, С.З. Зайнабидинов<sup>3</sup>, З.Т. Кенжаев<sup>1</sup>, Б.К.Исмайлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская 2

<sup>2</sup> Каракалпакский государственный университет, Узбекистан, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова 1

<sup>3</sup> Андижанский государственный университет, Узбекистан, г. Андижан, ул. Университетская

Получена 4 апреля 2023 г. Принята к печати 25 апреля 2023 г.

**Аннотация.** В работе приводятся результаты исследования по дополнительному легированию кремниевых солнечных элементов атомами никеля, для факторов, влияющие на длинноволновую и коротковолновую эффективность. Показано, что легирование никелем повышает эффективность солнечных элементов. Определено, что в видимой области спектра спектральная чувствительность кремниевого солнечного элемента, легированного никелем выше до 25÷35% из-за уменьшения поверхностной рекомбинации.

**Ключевые слова:** кремний, солнечный элемент, легирование никелем, спектральная чувствительность, скорость поверхностной рекомбинации

**Annotation.** The paper presents the results of a study on the additional doping of silicon solar cells with nickel atoms, for factors affecting the long-wave and short-wave efficiency. Nickel doping has been shown to increase the efficiency of solar cells. It is determined that in the visible region of the spectrum the spectral sensitivity of a silicon solar cell doped with nickel is higher up to 25÷35% due to a decrease in surface recombination.

**Keywords:** silicon, solar cell, nickel doping, spectral sensitivity, surface recombination rate

**Annotatsiya.** Maqolada uzun to'lqinli va qisqa to'lqinli samaradorlikka ta'sir qiluvchi omillar uchun kremniy quyosh elementlarini nikel atomlari bilan qo'shimcha diffuziya qilish bo'yicha tadqiqot natijalari taqdim etilgan. Nikelni diffuziy qilish quyosh elementlarining samaradorligini oshirishi isbotlangan. Spektrning ko'rindigan qismida nikel kiritilgan kremniyli quyosh elementining spektral sezgirligi sirt rekombinatsiyasining pasayishi tufayli 25÷35% gacha yuqori ekanligi aniqlangan.

**Kalit so'zlar.** kremniy, quyosh elementi, nikelni legirlash, spektral sezgirlik, sirt rekombinatsiya tezligi

PACS number(s): 61.80.Fe , 61.82.Fk

## Введение

Для повышения эффективности солнечного элемента (СЭ) на основе «солнечного кремния» требуется увеличить время жизни фотогенерируемых носителей заряда [1, 2], а также уменьшить оптические и электрические потери энергии [3, 4]. Увеличение времени жизни неосновных носителей заряда в СЭ возможно путем геттерирования неконтролируемых примесных атомов кластерами атомов никеля [5, 6].

В работах [7, 8] показано, что легирование лицевой стороны солнечного элемента с глубоко залегающим *p-n* переходом атомами никеля приводит к увеличению эффективности.

Исследование влияния кластеров примесных атомов никеля на параметры кремниевых СЭ представляет большой практический интерес, в силу технологических особенностей легирования никелем [9, 10].

Основная часть растворенных атомов никеля до 99,99%, в приповерхностной

области находятся в электронейтральном состоянии в междуузлиях и при определенных условиях термообработки могут формироватьnano- и микрокластеры, которые действуют как эффективные центры геттерирования для неконтролируемых примесных атомов и кислорода в кремнии [11, 12].

Одним из основных параметров вентильных СЭ является коэффициент сортирования фотогенерированных носителей заряда, который сильно зависит от конструктивных параметров структуры [2-4]. В современных эффективных СЭ глубина *p-n* перехода имеет порядок  $x_{p-n} = 0.3 \div 0.5$  мкм, что является оптимальным для видимой части солнечного спектра [1]. Однако при этом существенно уменьшается количество поглощенных вблизи *p-n* перехода квантов инфракрасного спектра Солнца, что уменьшает коэффициент сортирования. Инфракрасные лучи поглощаются в глубине базы, а значительная

часть генерированных носителей рекомбинируют. Поэтому разработка способа создания СЭ, который позволит повысить их эффективность в ИК-спектре [13], представляет большой интерес.

В работе приводятся результаты исследования по дополнительному легированию кремниевых СЭ с глубоким ( $x_{p-n}=28 \mu\text{m}$ ) и мелким ( $x_{p-n}=0.5 \div 0.75 \mu\text{m}$ )  $p-n$  переходом атомами никеля. В таком СЭ можно выявить факторы, влияющие на длинноволновую и коротковолновую эффективность.

### Технология и методы исследования

Для исходного материала использовались монокристаллических кремниевых пластин  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$  (КДБ-0.5), толщиной  $380 \mu\text{m}$  выращиванные с методом Чохральский. Управляя температурой и временем диффузии фосфора [14] в интервале  $T_{diff} = 1000 \div 1280^\circ\text{C}$  и  $t = 0.5 \div 5$  час в кремни  $p$ -типа с  $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ , были изготовлены СЭ с различной глубиной  $p-n$  перехода  $x_{p-n}$  – от  $28$  до  $0.5 \div 0.75 \mu\text{m}$ . Глубина  $p-n$  перехода в полученных структурах определялась послойным шлифованием.

Затем создались две разных группы. Из них I группа - контроль, II группа - в вакууме напылялся тонкий слой чистого никеля толщиной  $1 \mu\text{m}$  для диффузии на лицевой стороне. Диффузии примесных атомов никеля проводилась при  $T_{diff} = 800 \div 850^\circ\text{C}$  в течение  $t = 30 \div 40$  мин.

После диффузии все образцы проходили дополнительный термоотжиг при  $T_{anneal} = 750 \div 800^\circ\text{C}$  в течение  $t = 30 \div 40$  мин с целью активации процесса геттерирования [7-12] неконтролируемым рекомбинационных примесей.

После каждого технологического этапа проводилась очистка поверхности и химическая обработка, чтобы снять остатки никеля и оксид кремния с поверхности ( $10\% \text{ HCl}, 10\% \text{ HF}$ ).

Никелевые омические контакты к образцам создавались вакуумным напылением пленки никеля толщиной около  $1 \mu\text{m}$ , с последующим лужением. На тыльной стороне напылялся сплошной контакт, а на лицевой – через трафарет. Просветляющее покрытие на поверхности элементов отсутствовало.

После получения никелевых контактов измерялись ВАХ СЭ при освещении галогенной лампой накаливания, запитанной от стабилизатора напряжения, с плотностью мощности излучения около  $150 \text{ mW/cm}^2$ . Все

измерения проводились в практически идентичных условиях. Температура образцов поддерживалась пассивным водяным термостатом и составляла  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### Экспериментальные результаты

Экспериментально определено [9], что с уменьшением глубины залегания  $p-n$  перехода  $x_{p-n}$  основные параметры СЭ увеличиваются и максимальные их значения наблюдаются у СЭ с  $0.5 \div 0.75 \mu\text{m}$ . Эти данные согласуются с теорией, и экспериментом [1, 2].

На рис. 1 представлены изменение величины максимальные мощности  $P_{max}$  СЭ I и II групп в зависимости от  $x_{p-n}$  СЭ.

Как видно из рис. 1, легирование атомами никеля кремниевых СЭ дает существенный положительный эффект, который слабо зависит от  $x_{p-n}$  СЭ. С уменьшением  $x_{p-n}$  эффект легирования никелем несколько ослабляется, но остается достаточно заметным (26,62 %).

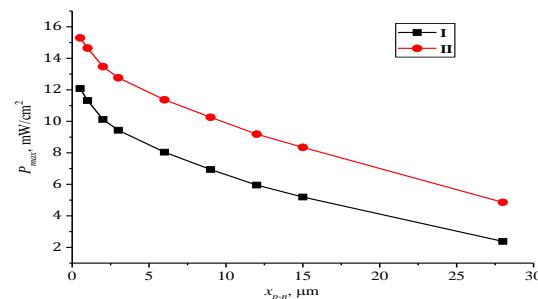


Рис. 1. Изменение величины максимальные мощности  $P_{max}$  СЭ I и II групп в зависимости от глубины залегания  $p-n$  перехода  $x_{p-n}$  СЭ.

Для оценки изменения спектральной чувствительности были измерена спектральная зависимость  $J_{sc}$  образцов I и II групп после дополнительного термического отжига при  $T_{anneal} = 750 \div 800^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 представлена спектральная зависимость  $J_{sc}(hv)$  СЭ II группы, легированных никелем при температуре  $T_{diff} = 850^\circ\text{C}$ , и контрольных СЭ I группы (не легированных никелем), измеренных при одинаковых условиях.

Измерения проводились в спектрометре ИКС-12 ( $\lambda = 0.496 \div 3.872 \mu\text{m}$ ) при плотности мощности излучения  $P = 5 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ , при  $T = 300 \text{ K}$ .

Как видно из рисунка 2, при этом наблюдается существенный рост величины  $J_{sc}$ , практически во всей исследуемой области спектра. При  $hv > 1.24 \text{ eV}$  наблюдается рост, который достигает своего максимального значения при  $hv = 1.84 \text{ eV}$  ( $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$ ). При этом для СЭ с  $x_{p-n} = 28 \mu\text{m}$  рост достигает 2.2 раза, а для

СЭ  $x_{p-n}=0.5$  мкм - рост до 1.65 раз. При  $hv>1.84$  еВ чувствительность СЭ, легированных никелем падает медленно.

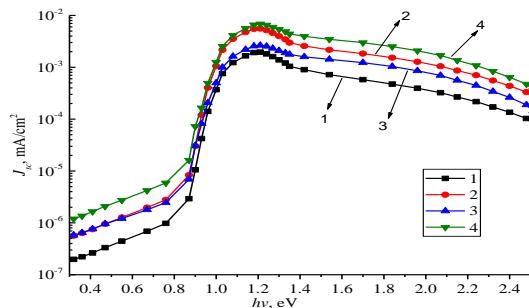


Рис. 2. Спектральные зависимости  $J_{sc}(hv)$  СЭ. 1 - I группа ( $x_{p-n}=28$  мкм), 2 - I группа ( $x_{p-n}=0.5$  мкм), 3 - II группа ( $x_{p-n}=28$  мкм), 4 - II группа ( $x_{p-n}=0.5$  мкм).

### Обсуждение результатов

Полученные результаты трудно объяснить поглощением электроактивных атомов никеля в исследуемой области спектра, так как их концентрация достаточно низкая. Поэтому мы предполагаем, что существенные улучшение спектральной чувствительности СЭ может быть связано с кластерами никеля, находящимися в приповерхностных областях СЭ в высокой концентрации.

Один из возможных вариантов влияния кластеров заключается в увеличении коэффициента поглощения «кластерных» областей СЭ в инфракрасной области спектра за счет возникновения плазмонного резонанса [15] 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 пресыщенения 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-Кельдаша.

Улучшение чувствительности в области спектра  $hv > E_g$  видимо объясняется уменьшением поверхностной и (или) объемной рекомбинации за счет легирования никелем.

Кластеры никеля, которых на поверхности значительно больше, чем в объеме, обладают сильными геттерирующими [16, 17] и возможно, что уменьшает рекомбинацию неосновных носителей заряда и, соответственно, приводят к пассивации поверхности и росту коэффициента собирания СЭ.

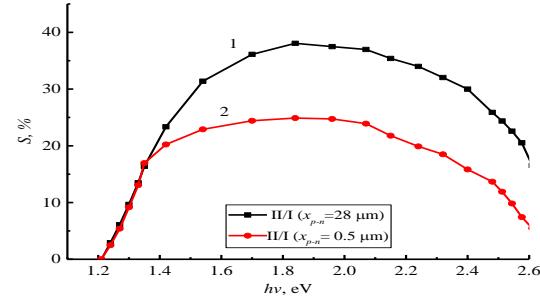


Рис. 3. Спектральная зависимость отношения величин  $J_{sc}/J_{sc,max}(hv)$  СЭ II к I группе - 1. СЭ ( $x_{p-n}=28$  мкм), 2. СЭ ( $x_{p-n}=0.5$  мкм).

Для исследования влияния поверхностной рекомбинации, была сделана нормировка (каждое значение  $J_{sc}$  делилось на максимальное значение  $J_{sc,max}$  этого СЭ). Затем значения  $J_{sc}/J_{sc,max}$  групп II и I делились друг на друга.

На рис. 3 представлена спектральная зависимость относительного изменения величины  $J_{sc}/J_{sc,max}$  СЭ, легированного атомами никеля, к току, контрольного СЭ. Из данных, полученных из рисунка 3 было рассчитано уменьшение поверхностной рекомбинации.

Увеличение чувствительности ( $S$ ) в видимой области спектра или уменьшение поверхностной рекомбинации определяем следующим образом:

$$S = \frac{J_{sc(Ni)}/J_{sc,max(Ni)}}{J_{sc(K)}/J_{sc,max(K)}} \quad (1)$$

где, индекс Ni – соответствует СЭ, легированному никелем, индекс K – соответствует контрольному СЭ.

Увеличение чувствительности  $S$  достигает своего максимального значения при  $hv=1,84$  еВ. При этом для кремниевого СЭ с  $x_{p-n}=28$  мкм оно составляет 38 %, а для СЭ с  $x_{p-n}=0.5$  мкм – 25 %.

Для получения глубины залегания 28 мкм диффузия фосфора проводилась при  $T=1280$  °С в течение 5 часов из нанесенного слоя, в этом случае часть фосфора испаряется из поверхности кремния. Уменьшение поверхностной концентрации при этом может достигать порядка величины, что и было подтверждено специально проведенными измерениями профиля легирования.

Кластеры никеля, расположенный в приповерхностной области кремния за счет

образования комплексов никель-фосфорных комплексов, ослабляют влияние «мертвого» поверхностного слоя. Соответственно, поверхностная рекомбинация ослабляется в СЭ с глубоким  $p-n$  переходом в большей степени, чем у СЭ с мелким  $p-n$  переходом. Это приводит к большей величине коротковолновой спектральной чувствительности СЭ с глубоким  $p-n$  переходом.

Таким образом, кластеры никеля, расположенные в приповерхностной области кремния, снижают поверхностную рекомбинацию кремниевого СЭ до 25÷35 % за счет геттерирующих и пассивирующих свойств.

В приповерхностной области концентрация электронейтральных атомов никеля весьма высока ( $10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ) и, соответственно, концентрация кластеров на 2÷3 порядка больше, чем в объеме. Кластеры геттерирует быстро диффундирующих примесей и экранируют влияние дефектов, вызывающих приповерхностную рекомбинацию.

Скорости поверхностной рекомбинации ( $S$ ) рассчитаем согласно работы [18]:

$$S \approx \frac{J_{sc}}{q\Delta p_{oc}} - \frac{D}{L_{diff}} \tanh\left(\frac{W}{L_{diff}}\right) \quad (2)$$

где,  $\Delta p_{oc}$  - концентрация избыточных носителей заряда в базе, связана с  $V_{oc}$ ,  $q$  - заряд электрона,  $W$  - толщина подложки (220  $\mu\text{м}$ ).

Экспериментально показано, что значение  $V_{oc}$  увеличивалось от 590 мВ до 605 мВ, значение  $J_{sc}$  увеличилось в 1.2 раза (38.5 и 32  $\text{mA/cm}^2$ ) [9], а значение  $\tau$  увеличивалось до 2 раз [17].

Сравнение скорости поверхностной рекомбинации СЭ, легированного никелем и контрольного СЭ показывает, что скорость поверхностной рекомбинации значительно снижается в СЭ, легированном никелем.

### Заключение

Показано, что легирование никелем увеличивает параметры солнечных элементов. Определено, что в видимой области спектра спектральная чувствительность СЭ, легированного никелем выше до 25÷35% из-за уменьшения поверхностной рекомбинации.

Кластеры геттерирует быстро диффундирующих примесей и экранируют влияние дефектов, вызывающих приповерхностную рекомбинацию.

Таким образом, легирование атомами никеля повышает эффективность кремниевых СЭ за счет увеличения времени жизни неосновных носителей заряда и увеличения

чувствительности в видимой области солнечного спектра.

### Список литературы

- Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J. et. al. // Prog Photovolt Res Appl. 2021., vol. 29, pp. 657–667.
- Panaiotti I. E., Terukov E. I. // Tech. Phys. Lett. 2019. vol. 45. no. 3. pp. 193–196.
- Richter A., Müller R., Benick J. et. al. // Nature Energy, 2021. vol. 6. pp. 429–438.
- Fuks B. I. // Semiconductors, Dec., 2014, vol. 48, no.12, pp. 1664–1673.
- Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I. et. al. // Nanoscale Res Lett., 2017. vol. 12, no. 78. pp. 1–7.
- McHugo S.A., Hieslmair H., Weber E.R. // Appl. Phys. A, 1997. vol. 64. pp. 127–137.
- Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T., Koveshnikov S.V. // Tech. Phys. Lett., 2019, vol. 45, no.10, pp. 959–962.
- Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T. et. al. // Appl. Sol. Energy, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 13–17.
- Bakhadyrkhanov M. K., Kenzhaev Z.T. // Tech. Phys., 2021. Vol. 66, no.7, pp. 851–856.
- M.K. Bakhadirkhanov, Z.T. Kenzhaev, Kh.S. Turekeev et. al. // Technical Physics, 2022, Vol. 67, No. 14, pp. 2217–2220.
- Bahadirkhanov M.K., Ismaylov B.K., Ismailov K.A. et. al. // International Journal of Advanced Science and Technology, 2020. – Vol. 29, No. 9. – pp. 6308–6312.
- Abdurakhmanov B.A., Bakhadirkhanov M.K., Ayupov K.S. et. al. // Nanoscience and Nanotechnology, 2014. – Vol. 4, No.2. – pp. 23–26.
- Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Илиев Х.М. и др. // Гелиотехника, 2014. – №2. – с. 3–5.
- Hung V.V., Hong P.T.T., Khue B.V. // Proc. Natl. Conf. Theor. Phys. May, 2010. – Vol. 35. –pp. 73–79.
- Астапенко В.А., Сахно С.В., Бергалиев Т.К. // Труды МФТИ. 2016. –Том 8, № 2. –С.8–13.
- Бахадирханов М.К., Исмайлов Б.К. // Приборы. 2020. 6(240) с.44–48.
- Bakhadyrkhanov M.K., Kenzhaev Z.T., Koveshnikov S.V., et. al. // Semiconductors, 2022, Vol. 56, No. 1, pp. 101–105.
- Panaiotti I. E., Terukov E. I., Shakhrai I. S. // Tech. Phys. Lett., 2020., Vol. 46, no.9, pp. 835–837

### Effect of Nickel Doping on the Spectral Sensitivity of Silicon Solar Cells

**N.F. Zikrillaev<sup>1</sup>, K.A. Ismailov<sup>2</sup>, C.Z. Zainabidinov<sup>3</sup>, Z.T. Kenzhaev<sup>1</sup>, B.K. Ismailov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University, Uzbekistan, Tashkent, st. University 2

<sup>2</sup>Karakalpak State University, Uzbekistan, Nukus, Ch. Abdirov St. 1

<sup>3</sup>Andijan State University, Uzbekistan, Andijan, st. University

**Abstract.** The paper presents the results of a study on the additional doping of silicon solar cells with nickel atoms, for factors affecting the long-wave and short-wave efficiency. Nickel doping has been shown to increase the efficiency of solar cells. It is determined that in the visible region of the spectrum the spectral sensitivity of a silicon solar cell doped with nickel is higher up to 25÷35% due to a decrease in surface recombination.

Technological recommendations for nickel doping of single-crystal silicon solar cells are proposed to be combined without significant changes with the standard technological process for manufacturing solar cells.

**Keywords:** silicon, solar cell, nickel doping, clusters, gettering, spectral sensitivity, surface recombination rate

### References

1. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J. et. al. // Prog Photovolt Res Appl. 2021., vol. 29, pp. 657–667.
2. Panaiotti I. E., Terukov E. I. // Tech. Phys. Lett. 2019. vol. 45. no. 3. pp. 193–196.
3. Richter A., Müller R., Benick J. et. al. // Nature Energy, 2021. vol. 6. pp. 429–438.
4. Fuks B. I. // Semiconductors, 2014, vol. 48, no.12, pp. 1664–1673.
5. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I. et. al. // Nanoscale Res Lett., 2017. vol. 12, no. 78. pp. 1–7.
6. McHugo S.A., Hieslmair H., Weber E.R. // Appl. Phys. A, 1997. vol. 64. pp. 127–137.
7. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T., Koveshnikov S.V. // Tech. Phys. Lett., 2019, vol. 45, no.10, pp. 959–962.
8. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T. et. al. // Appl. Sol. Energy, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 13–17.
9. Bakhadyrkhanov M. K., Kenzhaev Z.T. // Tech. Phys., 2021. Vol. 66, no.7, pp. 851–856.
10. M.K. Bakhadirkhanov, Z.T. Kenzhaev, Kh.S. Turekeev et. al. // Technical Physics, 2022, Vol. 67, No. 14, pp. 2217–2220.
11. Bahadirkhanov M.K., Ismaylov B.K., Ismailov K.A. et. al. // International Journal of Ad-

vanced Science and Technology, 2020. – Vol. 29, No. 9. – pp. 6308–6312.

12. Abdurakhmanov B.A., Bakhadirkhanov M.K., Ayupov K.S. et. al. // Nanoscience and Nanotechnology, 2014. – Vol. 4, No.2. – pp. 23–26.

13. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Iliev Kh.M. et. al. // Geliotekhnika, 2014. - No. 2. – pp. 3-5. (in Russian)

14. Hung V.V., Hong P.T.T., Khue B.V. // Proc. Natl. Conf. Theor. Phys. May, 2010. – Vol. 35. –pp. 73-79.

15. Astapenko V.A., Sakhno S.V., Bergaliev T.K. // Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology. 2016. -Vol. 8, No. 2. -C.8-13. (in Russian)

16. Bahadirkhanov M.K., Ismailov B.K. // Devices. 2020. 6(240) pp. 44-48. (in Russian)

17. Bakhadyrkhanov M.K., Kenzhaev Z.T., Koveshnikov S.V., et. al. // Semiconductors, 2022, Vol. 56, No. 1, pp. 101-105.

18. Panaiotti I. E., Terukov E. I., Shakhrai I. S. // Tech. Phys. Lett., 2020., Vol. 46, no.9, pp. 835–837

### Сведение об авторов

**Зикриллаев Нурилло Фатхуллаевич** –

доктор физико-математических наук, профессор кафедры цифровой электроники и микроэлектроники Ташкентского государственного технического университета. E-mail: [bahazeb@yandex.com](mailto:bahazeb@yandex.com)

**Исмайлов Канатбай Абдреймович** –

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников Каракалпакского государственного университета. E-mail: [kanatbay.ismailov@gmail.com](mailto:kanatbay.ismailov@gmail.com)

**Зайнабидинов Сирожиддин**

**Зайнабидинов** – Академик, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Андижанского государственного университета.

**Кенжаваев Зоир Тохир угли** – доктор

философии по физико-математическим наукам (PhD), доцент кафедры цифровой электроники и микроэлектроники Ташкентского государственного технического университета. E-mail: [zoir1991@bk.ru](mailto:zoir1991@bk.ru)

**Исмайлов Байрамбай Канатбекович** –

доктор философии по физико-математическим наукам (PhD), доцент кафедры цифровой электроники и микроэлектроники Ташкентского государственного технического университета. E-mail: [i.bairam@bk.ru](mailto:i.bairam@bk.ru)