

3-3-2020

THE EFFECT OF NICKEL ALLOYING ON THE INFRARED SENSITIVITY OF SILICON SOLAR CELLS

K. A. Ismayilov

Karakalpak State University, i.bairam@bk.ru

Z. T. Kenzhaev

Karakalpak State University, zoir1991@bk.ru

S. B. Isamov

Tashkent State Technical University, bahazeb@yandex.com

S. V. Koveshnikov

Tashkent State Technical University, bahazeb@yandex.com

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/karsu>

 Part of the [Physics Commons](#)

Recommended Citation

Ismayilov, K. A.; Kenzhaev, Z. T.; Isamov, S. B.; and Koveshnikov, S. V. (2020) "THE EFFECT OF NICKEL ALLOYING ON THE INFRARED SENSITIVITY OF SILICON SOLAR CELLS," *Karakalpak Scientific Journal*: Vol. 3 : Iss. 1 , Article 6.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/karsu/vol3/iss1/6>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Karakalpak Scientific Journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

THE EFFECT OF NICKEL ALLOYING ON THE INFRARED SENSITIVITY OF SILICON SOLAR CELLS

²K.A. Ismayilov, ²Z.T. Kenzhaev, ¹S.B. Isamov, ¹S.V. Koveshnikov

¹Tashkent State Technical University

Tashkent, Uzbekistan, E-mail: bahazeb@yandex.com

²Karakalpak State University

Nukus, Uzbekistan, E-mail: zoir1991@bk.ru

ABSTRACT

The diffusion method was used to obtain new silicon-based photocell structures with deep p–n junctions. It is shown that the presence of nickel clusters in the structure leads to an increase in the parameters of the solar cell. The spectral sensitivity region and the spectral dependence of the absorption coefficient are investigated. It was shown that additional doping of silicon p-n structures with nickel allows the creation of solar cells with greater efficiency in the IR spectral region. Improving the sensitivity in the infrared, we associate due to the influence of electrically neutral nickel clusters or nickel and phosphorus compounds.

Keywords: photocell, nickel alloying, gettering, nickel clusters, binary compounds, sensitivity, extinction.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НИКЕЛЕМ НА ИНФРАКРАСНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

К.А. Исмаилов, З.Т. Кенжаев, С.Б. Исамов, С.В. Ковешников

¹Ташкентский государственный технический университет, 100095,

Ташкент, Узбекистан, E-mail: bahazeb@yandex.com

²Каракалпакский государственный университет, 230112 Нукус,

Узбекистан, E-mail: zoir1991@bk.ru.

Аннотация. Диффузионным методом были получены новые структуры фотоэлементы на основе кремния с глубокими p–n-переходами. Показано, что присутствие кластеров никеля в структуре, приводит к увеличению параметров солнечного элемента.

Исследованы спектральной области чувствительности и спектральной зависимости коэффициента поглощения. Показано, что дополнительное легирование никелем кремниевых p-n-структур позволяет создать фотоэлементы с большей эффективностью в ИК области спектра.

Улучшение чувствительности в инфракрасной области, мы связываем за счет влияния электронейтральных кластеров никеля или соединений никеля и фосфора.

Ключевые слова: фотоэлемент, легирование никелем, геттерирование, кластеры никеля, бинарные соединения, чувствительность, погашение.

Введение

Существующие в настоящее время технологические методы изготовления, используемые при разработке эффективных фотоэлементов с максимальным коэффициентом полезного действия и стабильными параметрами, практически достигли своего предела [1.7, 2.181]. Одним из способов повышения параметров фотоэлементов является использование части спектра солнечного излучения с энергией $h\nu < E_g$ для фотогенерации носителей тока. Как известно, существенная доля (44%) спектра солнечного излучения находится в инфракрасной области $\lambda=0,75\div 3$ мкм [3.3]. Значительная часть этой энергии не используется при преобразовании фотоэнергии в электрическую в существующих кремниевых солнечных элементах.

Таким образом, представляет большой интерес создание конструкции фотоэлемента, позволяющего более эффективно использовать инфракрасного (ИК) спектр Солнца за счет использования примесного фотоэффекта [4.959] или других явлений.

В данной работе приводятся результаты исследования по дополнительному легированию кремниевых фотоэлементов с глубоким p - n -переходом атомами никеля. В таком фотоэлементе можно выявить факторы, влияющие на длинноволновую эффективность.

Использование никеля, как легирующей примеси, определялось тем, что он имеет не только достаточно высокую объемную растворимость ($n\sim 10^{18}$ см⁻³), но тем что в приповерхностной области ($d=2\div 3$ мкм) его концентрация может достигать $n_s\sim 10^{20}\div 10^{21}$ см⁻³. На рисунке 1 показано распределение атомов никеля в поверхностном слое кремния, получены на CAMECA IMS-6f Magnetic Sector SIMS.

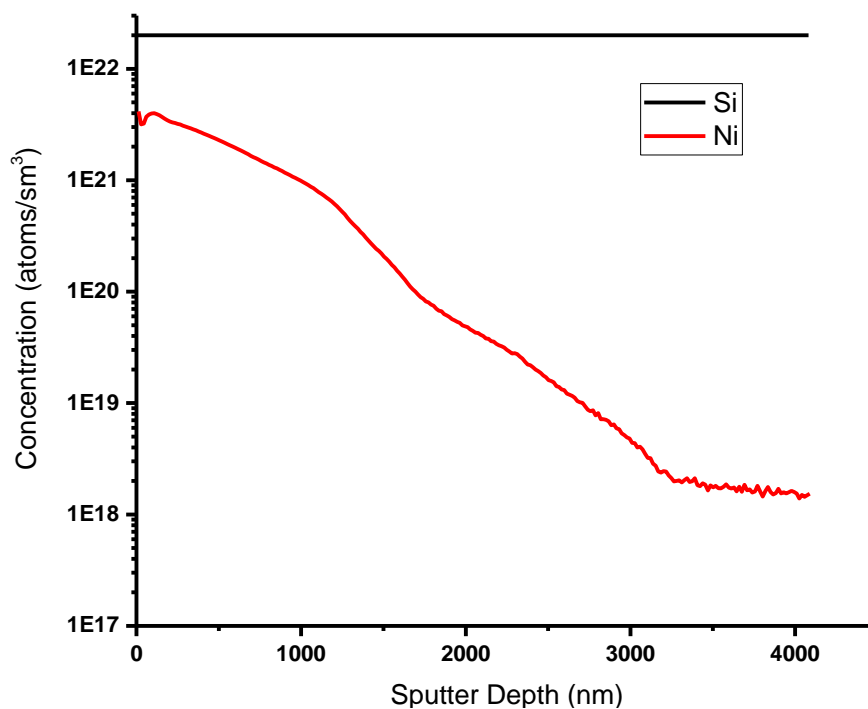


Рис.1. Распределение атомов никеля в поверхностном слое кремния.

Известно [5. 204906-6], что основная часть растворенных атомов никеля - 99,99%, а в приповерхностной области еще больше, находятся в электронейтральном состоянии в междоузлиях и при определенных условиях термообработки могут формировать нано - и микрокластеры (имеющие достаточно высокую концентрацию ($10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$), которые действуют как эффективные центры геттерирования для неконтролируемых примесных атомов и кислорода [6.998, 7.25].

Методика экспериментов

Исходные *p-n*-структуры создавались диффузией фосфора при $T = 1280 \text{ }^\circ\text{C}$ в кремниевых пластинах *p*-типа (КДБ-0,5). Глубина *p-n*-перехода в образцах составляла $L = 29 \div 30 \text{ мкм}$.

Так как в солнечном элементе использовался очень глубоко залегающий *p-n* переход, в котором ультрафиолетовая и видимая область спектра поглощаясь вблизи поверхности, практически не внося вклад в выходной ток солнечного элемента, то фактически исследовалось влияние легирования никелем только на чувствительность в ИК области спектра.

Далее, полученная *p-n*-структура разрезалась на отдельные образцы с размером $1 \times 0,5 \text{ см}^2$, которые подвергались соответствующей механической обработке и химической очистке. Для всех образцов (без просветляющих слоев и с индий-галлиевыми контактами) при одинаковых условиях были определены напряжение холостого хода V_{oc} и плотность тока короткого замыкания J_{sc} . Параметры исследуемых структур были измерены при освещении лампой накаливания с плотностью мощности излучения около 150 мВт/см^2 . Средние значения параметров образцов соответствовали большой глубине *p-n*-перехода и составляли: и $J_{sc} \sim 2.8\text{-}2.9 \text{ мА/см}^2$, $V_{oc} \sim 370\text{-}380 \text{ мВ}$.

Все образцы делились на 4 группы для получения разных структур (структуры показаны на рисунке 2. I группа – контрольные образцы. II группа – образцы, у которых на тыльной (*p*-стороне) структур в вакууме напылялся тонкий металлический слой чистого никеля толщиной 1 мкм. III группа – металлическая пленка никеля создавались на поверхности диффузионного *n*-слоя. IV групп - металлическая пленка никеля создавались на поверхности диффузионного *n*-слоя и с тыльной стороны.

1)

b	n-Si
c	p-Si

2)

a	n-Si
b	n-Si
c	p-Si

3)

a	n-Si
b	n-Si
c	p-Si
d	p-Si

Рис.2. Разновидности структур – 1) группа II, 2) группа III, 4) группа IV.

a) – Обогащенная никелем приповерхностная область *n*-типа, $x \sim 3$ мкм, концентрация никеля - N_{Ni} – от 10^{21} до 10^{18} см⁻³, концентрация фосфора - N_P – от 10^{21} до 10^{19} см⁻³. б) – диффузионный слой *n*-типа, толщина $x = 29 \div 30$ мкм, концентрация никеля - N_{Ni} – $10^{17} \div 10^{18}$ см⁻³, концентрация фосфора - N_P – от 10^{19} до $4 \cdot 10^{16}$ см⁻³. в) – база *p*-типа, концентрация никеля - N_{Ni} – $10^{17} \div 10^{18}$ см⁻³, концентрация бора - N_B – $4 \cdot 10^{16}$ см⁻³, d) – Обогащенная никелем тыльной стороны *p*-типа, $x \sim 2 \div 3$ мкм, концентрация никеля - N_{Ni} – от 10^{18} до 10^{21} см⁻³, концентрация бора - N_B – $4 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Все образцы подвергались диффузионному термоотжигу в одинаковых условиях в печи «Nabertherm - L 3/12/B410» при $T = 1200$ °С в течение $t = 1$ часа. При этом во всех группах образцов за счет разгонки глубина *p*–*n*-перехода увеличилась до $L = 32 \pm 2$ мкм. После этого все образцы подвергались химической обработке в HF, чтобы снять оксидные слои с поверхности.

Результаты и обсуждение

В таблице I представлены средние значения V_{oc} и J_{sc} каждой группы образцов. Как видно из таблицы, в образцах II группы значение P_{peak} – увеличивается 71 % (относительно среднего значения P_{peak} I группы), т.е. наблюдается заметное улучшение параметров. В образцах III и IV группы наблюдается еще более заметное улучшение параметров. Среднее значение P_{peak} образцов III группы по отношению к I группе увеличивается на 126 %, а IV – на 146,58%.

Таблица 1. Средние значения V_{oc} и J_{sc} для образцов различных групп, а также изменение V_{oc} и J_{sc} II, III и IV групп относительно параметров I группы.

Группы	I – группа (контроль)	II – группа	III – группа	IV-группа
Температура, время	После термоотжига 1200 °С, 1 час	После диффузии Ni, 1200 °С, 1 час		
J_{sc} , (mA/cm ²)	2,7	3,9	5,1	5,5
$\Delta J_{sc} / J_{sc}$	-	+ 44,44 %	+ 88,9 %	+ 103,7 %
V_{oc} , (mV)	380	450	455	460
$\Delta V_{oc} / V_{oc}$	-	+ 18,42 %	+ 19,73 %	+ 21 %
P_{peak} , (mW/cm ²)	1.026	1,755	2,320	2,530
$\Delta P_{peak} / P_{peak}$	-	71 %	126 %	146,58 %
Примечания: $\Delta J_{sc} / J_{sc}$ - изменение плотности тока короткого замыкания (в процентах) относительно контрольных образцов; $\Delta V_{oc} / V_{oc}$ - изменение напряжения холостого хода (в процентах) относительно контрольных образцов; P_{peak} , (mW/cm ²) – удельная пиковая мощность (вычисляется как произведение J_{sc} на V_{oc}); $\Delta P_{peak} / P_{peak}$ изменение удельной пиковой мощности (в процентах) относительно контрольных образцов.				

На основе полученных результатов можно утверждать, что дополнительное легирование примесными атомами никеля приводит к

улучшению параметров V_{oc} и J_{sc} , при этом наиболее существенный рост наблюдается в образцах III и IV группы.

Для проверки влияния кластерообразования образцы подвергались термообработке при $T = 700, 750, 800, 900, 1000$ и 1100 °C в течение 1 часа. После дополнительной термообработки образцы подвергались механической и химической обработке, аналогичной обработке после диффузии никеля. Параметры (V_{oc} и J_{sc}) также измерялись аналогично.

Исследования показали, что термоотжиг при $T = 750 \div 800$ °C существенно увеличивает основные параметры фотоэлемента с глубоким p - n -переходом. В образцах I группы (контроль) при отжиге $T = 750 \div 800$ °C наблюдается слабое улучшение параметров (в пределах нескольких процентов).

Таблица 2. Средние значения параметров образцов II, III и IV групп после дополнительной термообработки при $T=750-800$ °C относительно параметров до отжига.

Параметр	II – группа	III – группа	IV – группа
J_{sc} , (mA/cm ²)	6,92	9,8	10,5
$\Delta J_{sc} / J_{Isc}$,	+ 79,27 %	+ 92 %	91 %
V_{oc} , (mV)	510	518	520
$\Delta V_{oc} / V_{Ioc}$,	+ 13,33 %	+ 13,8 %	+13 %
P_{peak} , (mW/cm ²)	3,529	5,076	5,418
$\Delta P_{peak} / P_{Ipeak}$	+ 101 %	+ 118,8 %	+ 114 %

Примечания: $\Delta J_{sc} / J_{Isc}$ - изменение плотности тока короткого замыкания (в процентах) относительно значений до термообработки; $\Delta V_{oc} / V_{Ioc}$ - изменение напряжения холостого хода (в процентах) относительно значений до термообработки; $\Delta P_{peak} / P_{Ipeak}$ - изменение удельной пиковой мощности (в процентах) относительно значений до термообработки.

Как видно из таблицы 2, параметры образцов II, III, IV группы при дополнительном отжиге изменялись в сторону улучшения.

Таким образом, в III группе образцов значение параметров U_{oc} , J_{sc} , P_{peak} значительно больше чем в образцах II группы (после диффузии рост P_{peak} на 33,56%, а после термоотжига рост P_{peak} на 46%.

Можно сделать вывод - для повышения эффективности фотоэлемента существенную роль играет именно обогащенная никелем приповерхностная область n -слоя ($d=2 \div 3$ мкм) фотоэлемента, где концентрация атомов никеля может быть почти на 2-2,5 порядка больше, чем объеме.

Известно, что основная часть атомов никеля не является электроактивными. Поэтому показанные выше результаты должны быть связаны с влиянием электронейтральных атомов или кластеров.

Так как кластеры никеля легко образуются как в процессе диффузии, так и при дальнейшей термообработке, то их влияние должно быть более существенно, чем изолированных межузельных атомов никеля, в силу низкой концентрации последних.

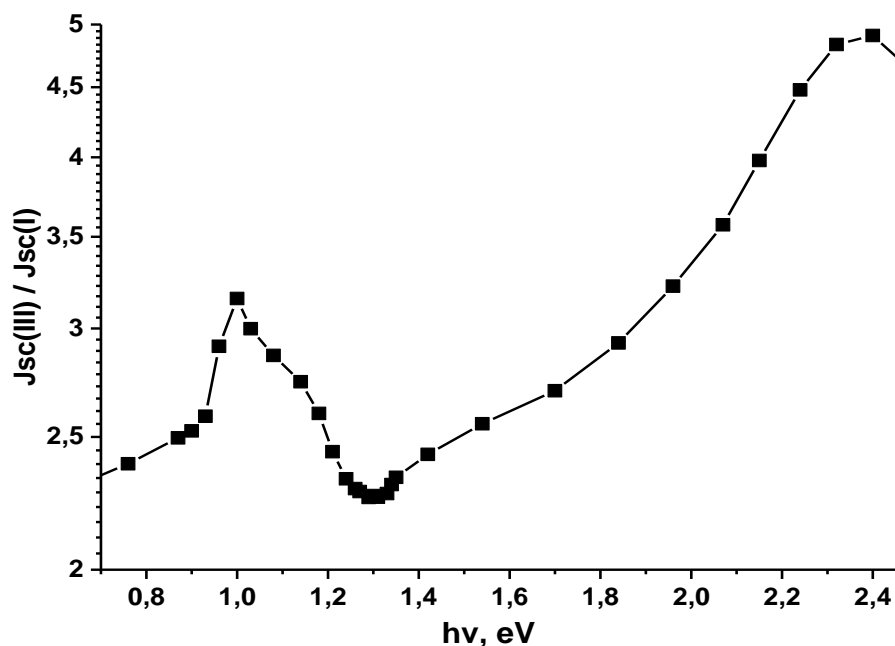


Рис. 3. Спектральная зависимость отношения J_{sc} III и I группы образцов.

Для оценки изменения инфракрасной чувствительности, измеряли спектральную зависимость J_{sc} всех групп образцов. На рис. 3 представлено относительное изменение спектральной зависимости J_{sc} фотоэлементов I и III группы после дополнительного отжига.

Результаты показывает улучшение чувствительности в ближней инфракрасной области спектра до 45% на длине волны 1,24 мкм. Непосредственное влияние атомов никеля на примесное инфракрасное поглощение маловероятно из-за малой концентрации электроактивных атомов никеля. Мы считаем, что легирование кластерами никеля может увеличить коэффициент поглощения базы солнечного элемента в инфракрасной области спектра за счет возникновения плазмонного резонанса, что приводит к лучшему совмещению области поглощения ИК-света с $p-n$ -переходом. Не исключена также вероятность действия микрокластеров никеля как своеобразных приемных антенн инфракрасного диапазона волн.

Как было показано [8.302], атомы никеля в кремнии диффундируют в виде электронейтральных атомов. Атомный радиус никеля равен 1,25 Å. Это обеспечивает нахождение атомов никеля в междоузлиях и их перемещение по междоузлиям без существенной деформации решетки кремния. Так как размер междоузлий в кремнии 1,27 Å, то есть больше чем радиус атома никеля, поэтому можно предполагать, что кластер состоит из совокупности плотно упакованных цепочек электронейтральных атомов никеля, находящихся в междоузельных положениях кристаллической решетки кремния.

На основе выше изложенного, мы предполагаем, что электронейтральные атомы никеля, находящиеся в ближайших эквивалентных междоузельных положениях, образуют, аналогично

регулярным решетки Si, кубическую под решетку, расчеты показывают, что атомы в кластерах никеля могут образовывать внутри кристалла кремния кубическую решетку с постоянной $a \sim 4,2 \text{ \AA}$. Так как размеры кластеров зависят от дефектов решетки кремния, степени пресыщения и условий термообработки, то можно получить кластеры никеля со значительным разбросом размеров. Частота плазмонного резонанса в них будет разной, что значительно расширит область спектральной чувствительности.

Улучшение чувствительности в видимой области спектра - более чем в 4 раза (рис. 3) видимо объясняется уменьшением поверхностной рекомбинации за счет легирования никелем. Механизм этого воздействия пока неясен. Возможно, что кластеры атомов никеля, которых на поверхности значительно больше, чем в объеме, обладают сильными геттерирующими или пассивирующими свойствами, что уменьшает поверхностную рекомбинацию неосновных носителей заряда и, соответственно, приводит к увеличению коэффициента собирания фотоэлемента с глубоким $p-n$ -переходом.

Однако результаты экспериментов с образцами III группы показывают, что этих механизмов недостаточно. Можно предложить несколько возможных механизмов влияния электронейтральных кластеров никеля или соединений никеля и фосфора [9.8, 10.4814].

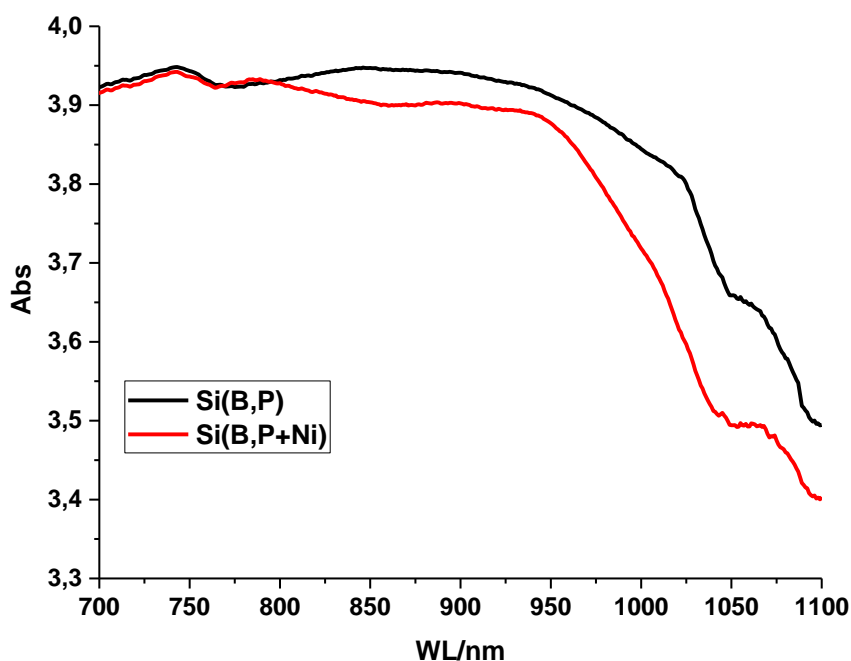


Рис. 4. Спектральные зависимости логарифма интенсивности проходящего через образец света для различных образцов легированного кремния.

Для проверки этих возможностей, были исследованы спектральные зависимости коэффициента поглощения в области $400 \div 1100 \text{ нм}$. На рис. 4 показаны спектральные зависимости логарифма интенсивности света, проходящего через образец, для образцов кремния, легированных примесными атомами P (I группа) и P+Ni (III группа). Значение параметра

поглощения в области $\lambda=550\div 800$ нм для всех образцов слабо меняется от длины волны. В области $\lambda=800\div 940$ нм наблюдается достаточно большая (~10 %) разница в коэффициенте поглощения.

Кроме того, в материалах легированных никелем, в области $\lambda=940\div 1100$ нм (вблизи края собственного поглощения) наблюдается более плавный спад коэффициента поглощения. Существенное изменение поглощения вблизи границы собственного поглощения в образцах III группы мы связываем с образованием бинарных нанокластеров примесных атомов Ni и P, за счет чего возможно изменение ширины запрещенной зоны материала.

Заключение

Легирование никелем дает новые возможности для создания кремниевых фотоэлементов с повышенной эффективностью в инфракрасной области солнечного спектра. Кластеры примесных атомов в решетке кремния действуют как микрокристаллы с другими фундаментальными параметрами. Появление таких структур в решетке дает возможность управлять фундаментальными параметрами кремния.

Выявление механизма влияния кластеров никеля на фотоэлектрические свойства приповерхностных областей солнечного элемента требует дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность академику М.К. Бахадирханову за участие при эксперименте и обсуждение результатов.

References

1. L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.S. Pashenko, D.L. Alfimova, D.A. Arustamyan, A.E. Kazakova. *Kaskadnye solnechnye elementy na osnove nanogeterostruktur GaP/Si/Ge* [Cascade solar cells based on GaP/Si/Ge nanoheterostructures], *Pisma v Zhurnal tehnicheckoj fiziki* [[Technical Physics Letters](#)], 2019, vol. 45, no. 6, pp. 7-9. (in Russian).
2. M.K. Bakhadyrhanov, U.X. Sodikov, D. Melibayev, Tuerdi Wumaier, S.V. Koveshnikov, K.A. Khodjanepesov, Jiangxiang Zhan. Silicon with Clusters of Impurity Atoms as a Novel Material for Optoelectronics and Photovoltaic, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 180-190, DOI: 10.4236/msce.2018.64017.
3. M.K. Bahadyrhanov, S.B. Isamov, H.M. Iiev, S.A. Tachilin, K.U. Kamalov. *Fotoelementy s rasshirennoj spektralnoj chuvstvitelnostyu na osnove kremniya s nanovarizonnymi strukturami* [Photo cells with the expanded spectral response on the basis of silicon with nanovariband structures nanosize various band], *Geliotehnika* [Applied Solar Energy], 2014, no. 2, pp. 3-5. (in Russian).
4. M.K. Bakhadyrkhanova, S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev, S.V. Koveshnikov. Studying the Effect of Doping with Nickel on Silicon-Based Solar Cells with a Deep p-n-Junction, *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 10, pp. 959–962. DOI: 10.1134/S1063785019100031.
5. J. Lindroos, D.P. Fenning, D.J. Backlund, E. Verlage, A. Gorgulla, S.K. Estreicher. H. Savin, T. Buonassisi, Nickel: A very fast diffuser in silicon, *Journal*

of applied physics, 2013, V. 113, p. 7. 0021-8979, DOI: 10.1063/1.4807799.

6. N. N. Lathiotakis, A. N. Andriotis, M. Menon, J. Connolly. Tight binding molecular dynamics study of Ni clusters, *J. Chem. Phys.*, 1996, V. 104, No. 3, pp. 992-1003.

7. B.A. Abdurakhmanov, M.K. Bakhadir Khanov, K.S. Ayupov, H.M. Iliyev, E.B. Saitov, A. Mavlyanov, H.U. Kamalov. Formation of Clusters of Impurity Atoms of Nickel in Silicon and Controlling Their Parameters, *Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, V. 4, no. 2, pp. 23-26, DOI: 10.5923/j.nn.20140402.01.

8. M.K. Bakhadyrkhanov, K.A. Ismailov, B.K. Ismaylov, Z.M. Saparniyazova, "Clusters of nickel atoms and controlling their state in silicon lattice", *V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine*, 2018, V. 21, no. 4, pp. 300-304, doi: <https://doi.org/10.15407/spqeo21.04.XXX>.

9. C.W. Hsu, W.Y. Wang, K.T. Wang, H.A. Chen and T.C. Wei. Manipulating the adhesion of electroless nickel-phosphorus film on silicon wafers by silane compound modification and rapid thermal annealing, *Scientific Reports*, Aug. 2017, 7: 9656. DOI:10.1038/s41598-017-08639-x.

10. K.C. Lai, P.Y. Wu, C.M. Chen, T.C. Wei, C.H. Wu, and S.P. Feng, Interfacial Characterizations of a Nickel-Phosphorus Layer Electrolessly Deposited on a Silane Compound-Modified Silicon Wafer Under Thermal Annealing, *Journal of Electronic materials*, 2016, V. 45, No. 10, pp. 4813-4825. DOI: 10.1007/s11664-016-4708-x.