

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Sheet Resistance and Magnetoresistance in Polycrystalline CVD Graphenes / A.K. Fedotov [et al.] // *Physics of the Solid State*. – 2022. – Vol. 64, № 7. – P. 889–901.
2. A spectrally tunable all-graphene-based flexible field-effect light-emitting device / X. Wang, [et al.] // *Nat Commun*. – 2015. – Vol. 6. – P. 7767.
3. Ab initio расчеты электронных свойств и явления переноса в графеновых материалах / М.М. Асадов и др. // *ФТТ*. – 2020. – Т. 64, № 11. – С. 1975–1978.
4. Влияние магнитных частиц Co - CoO на свойства электропереноса в однослойном графене / Ю.А. Федотова и др. // *ФТТ*. – 2020. – Т. 112, № 3. – С. 316–325.
5. Modification of graphene electronic properties via controllable gas-phase doping with copper chloride / M. G. Rybin [et al.] // *Appl. Phys. Lett*. – 2018. – Т. 112, № 3. – С. 033107.
6. So H. M. et al. Identifying and quantitating defects on chemical vapor deposition grown graphene layers by selected electrochemical deposition of Au nanoparticles // *Carbon letters*. – 2012. – Т. 13. – № 1. – С. 56–59.

ВЛИЯНИЕ КЛАСТЕРОВ НИКЕЛЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

**З. Т. Кенжаев¹, Н. Ф. Зикриллаев¹, В. Б. Оджаев², К. А. Исмаилов³,
В. С. Просолович², Б. К. Исмаилов³, А. А. Абдужалилов¹, М. А. Абдикаримова³**

¹⁾ *Ташкентский государственный технический университет, Университетская 2, 100095, г. Ташкент, Узбекистан, e-mail: zoir1991@bk.ru*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: odzaev@bsu.by*

³⁾ *Каракалпакский государственный университет, Ч. Абдиров 1, 230112, КАР, г. Нукус, Узбекистан, e-mail: kanatbay.ismailov@gmail.com*

Данная работа посвящена изучению влияния кластеров никеля на эффективность кремниевого солнечного элемента, включая слои, обогащенные никелем. Исследования показывают, что кластеры никеля могут способствовать увеличению времени жизни носителей заряда и повышению коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов. В работе проанализированы основные механизмы, благодаря которым никелевые кластеры могут улучшить эксплуатационные параметры солнечных элементов.

Ключевые слова: кластеры никеля; кремниевый солнечный элемент; обогащенный слой; КПД; время жизни носителей заряда; геттерирование.

THE INFLUENCE OF NICKEL CLUSTERS ON THE PERFORMANCE PARAMETERS OF SILICON SOLAR CELLS

Z. T. Kenzhaev¹, N. F. Zikrillaev¹, V. B. Odzhaev², K. A. Ismailov³,
V. S. Prosolovich², B. K. Ismaylov¹, A. A. Abduzhalilov¹, M. A. Abdikarimova³

¹⁾ Tashkent State Technical University, University 2, 100095, Tashkent, Uzbekistan,

²⁾ Belarusian State University, Independence Ave., 4, 220030 Minsk, Belarus,

³⁾ Karakalpak State University, Ch. Abdirov 1, 230112, KAR, Nukus, Uzbekistan,

Corresponding author: Z. T. Kenzhaev (zoir1991@bk.ru)

This study focuses on the influence of nickel clusters on the efficiency of silicon solar cells, including layers enriched with nickel. Research shows that nickel clusters can enhance the carrier lifetime and increase the overall energy conversion efficiency (Efficiency, η) of solar cells. The paper analyzes the primary mechanisms through which nickel clusters improve the operational parameters of solar cells.

Key words: nickel clusters; silicon solar cell; enriched layer; efficiency; carrier lifetime; gettering.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые солнечные элементы (СЭ) остаются основой для создания фотовольтаических систем благодаря своей доступности и высоким показателям преобразования солнечной энергии в электричество [1]. Для повышения эффективности СЭ на основе «солнечного кремния» необходимо, прежде всего, увеличить время жизни фотогенерируемых носителей заряда (τ), а также уменьшить оптические и электрические потери энергии [2]. Увеличение τ неосновных носителей заряда (ННЗ) в солнечных элементах возможно путем геттерирования неконтролируемых примесных атомов.

Исследование влияния различных примесей, таких как никель, на эксплуатационные характеристики солнечных элементов играет важную роль в повышении их эффективности [3]. Никелевые кластеры, обладая особыми рекомбинационными свойствами, могут выступать в роли центров для геттерирующих (gettering) примесей, что способствует улучшению электрических характеристик элемента [4]. Известно [5], что распределение концентрации атомов никеля после проведения диффузии имеет существенную неоднородность – высокая приповерхностная концентрация, достаточно быстро спадающая вглубь, и сравнительно постоянная её величина в объеме.

Целью работы являлось установление влияния атомов никеля, находящихся как в объеме, так и в приповерхностном обогащенном слое, на эффективность кремниевых СЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного материала использовались монокристаллические кремниевые пластины p -типа с удельным сопротивлением $0.5 \text{ Ом} \times \text{см}$, толщиной 220–380 мкм, выращенные методом Чохральского, которые были разделены на две группы: I – контрольные образцы, III – образцы с напыленным в вакууме на лицевую сторону пластины тонким слоем никеля толщиной 1 мкм, для последующей

диффузии. Диффузия примесных атомов никеля проводилась в интервале температур $T_{\text{дифф}} = 750\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 30$ мин. После диффузии никеля, для получения p - n -перехода, проводилась диффузия фосфора при $T_{\text{дифф}} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 0.5$ час. Для активации процесса геттерирования неконтролируемых рекомбинационно-активных примесей осуществлялся дополнительный термический отжиг на воздухе в интервале температур $T_{\text{отж}} = 600\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 30$ мин [3, 4]. После диффузии и термоотжига все образцы охлаждались на воздухе.

Распределение атомов никеля в приповерхностном слое кремния определялось с помощью масс-спектрометра CAMECA IMS-6f Magnetic Sector SIMS (SIMS). Элементный состав кластеров никеля как на поверхности, так и на сколе образца, исследовался на сканирующем электронном микроскопе марки TESCAN MIRA3 в режиме рентгеновского локального зондового микроанализа.

Затем напылением никеля создавались омические контакты. Просветляющее покрытие на поверхности элементов отсутствовало. После этого измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) и времена жизни ННЗ в полученных СЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования методом вторичной ионной масс-спектрометрии показали, что диффузионно-введенный никель распределен в кремнии в виде кластеров (рис. 1). При этом средняя поверхностная концентрация атомов Ni составляет $\sim 6 \cdot 10^{14}$ ат/см². По данным электронной и ИК-микроскопии установлено, что поверхностная плотность кластеров никеля составляет $\sim 5 \cdot 10^6\text{--}10^7$ см⁻² на лицевой поверхности кремния и $\sim (4\text{--}5) \cdot 10^6$ см⁻² в объеме. Распределение кластеров в объеме практически однородно, их размер не превышает 0.5 мкм, что согласуется с результатами работ [6]. Рассчитанные на основе полученных данных концентрации кластеров в объеме образца составляют $n_k \approx 10^{11}\text{--}10^{13}$ см⁻³, а в приповерхностной области – $n_k \approx 10^{13}\text{--}10^{15}$ см⁻³.

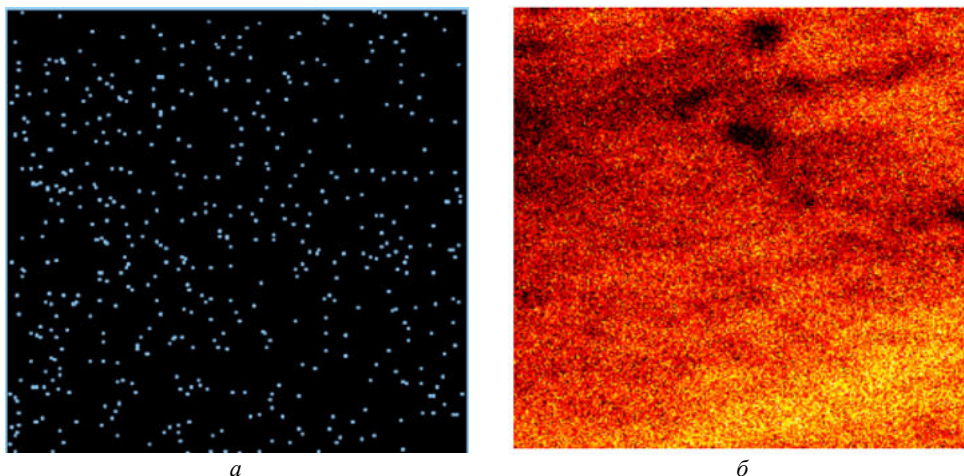


Рис. 1. Снимок поверхности кремния, легированного никелем, полученный методом SIMS для ионов:
a – Ni^+ , яркие точки соответствуют скоплениям атомов никеля;
б – Si^+ , яркие точки соответствуют кремнию

На рис. 2 представлены ВАХ СЭ I и III групп. Видно, что эффективность кремниевое СЭ в результате легирования атомами никеля увеличивается на ~29 % по сравнению с контрольным образцом. Видно, что время жизни ННЗ контрольного СЭ составляет $\tau = 14\text{--}16$ мкс, в группе III τ увеличивается почти в 2 раза.

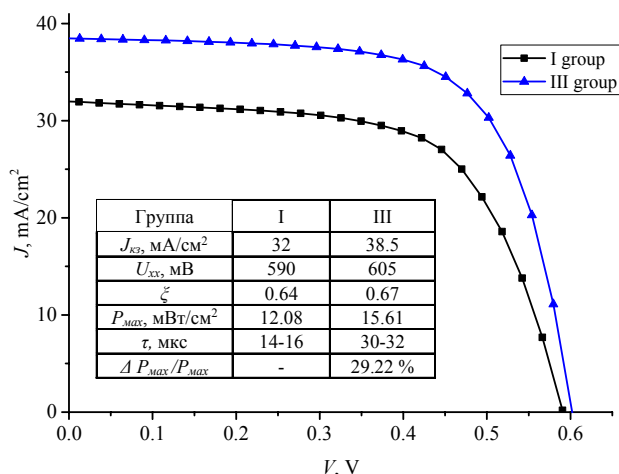


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики солнечных и электрофизические параметры (таблица) элементов I и III групп после дополнительного термоотжига при $T_{\text{отж}} = 750\text{--}800$ °С ($\Delta P_{\text{max}}/P_{\text{max}}$ – относительное изменение максимальной мощности по сравнению с контрольными образцами)

Это явление связано с тем, что кластеры никеля захватывают рекомбинационные примеси (Cu, Fe, Cr), уменьшая их негативное влияние на параметры элемента. Таким образом, наилучшие результаты были получены при диаметре кластеров 20–100 нм и их плотности на поверхности около 10^7 см^{-2} .

Также результаты измерения (максимальная снимаемая мощность и время жизни ННЗ) показали, что при увеличении толщины удаленного лицевого слоя τ монотонно уменьшается, а после удаления 1.5 мкм практически не изменяется.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существенном снижении концентрации рекомбинационно-активных центров в солнечных элементах, в которые проводилась диффузия примеси никеля. Это, по всей видимости, обусловлено геттерирующим действием как «объемных», так и «поверхностных» кластеров никеля. Причем наличие в образцах «поверхностных» кластеров дает более существенный вклад в повышение эффективности СЭ по сравнению с «объемными» кластерами.

Разработана [7] физическая модель структуры кластера примесных атомов никеля и физическая модель процесса геттерирования кластерами никеля вредных примесей, объясняющая влияние кластеров на параметры СЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в повышении эффективности солнечных элементов определяющую роль играют процессы геттерирования кластерами никеля рекомбинационно-активных быстродиффундирующих технологических примесей, происходящие в

обогащенной никелем лицевой приповерхностной области солнечных элементов. Эти результаты открывают новые перспективы для разработки более эффективных солнечных элементов.

Также следует утверждать, что легирование кремния никелем не только позволяет повысить эффективность СЭ, но и такой метод может быть широко использован практически во всех электронных приборах на основе кремния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Solar cell efficiency tables (version 58) / Green M. [et al.] // Prog. Photovolt. Res. Appl. – 2021. – V. 29. – P. 657–667.
2. Чистохин, И.Б. Влияние условий формирования геттера в высокоомном кремнии на характеристики PIN-фотодиодов / И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, № 21. – С. 11–13.
3. Influence of Nickel Impurity on the Operating Parameters of a Silicon Solar Cell / Kenzhaev, Z.T. [et al.] // Russ. Microelectron. – 2024. – V. 53, – P. 105–116.
4. Bakhadyrkhanov, M.K. Optimal Conditions for Nickel Doping to Improve the Efficiency of Silicon Photoelectric Cells / M.K. Bakhadyrkhanov, Z.T. Kenzhaev // Tech. Phys. – 2021. – Vol. 66, № 6. – P. 949–954.
5. Nickel: A very fast diffuser in silicon / J. Lindroos [et al.] // J. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 113. – P. 204906:1–7.
6. McHugo, S.A. Gettering of metallic impurities in photovoltaic silicon / S.A. McHugo, H. Hieslmair, E.R. Weber // Appl. Phys. A. – 1997. – Vol. 64. – P. 127–137.
7. The Physical mechanisms of gettering properties of nickel clusters in silicon solar cells / Z.T. Kenzhaev [et. al.] / Physical Sciences and Technology. – 2024, – Vol. 11, № 1–2. P. 13–22.

ПОГЛОЩЕНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТРУКТУРАМИ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$

С. В. Козодоев^{1,2}, А. И. Мухаммад¹, П. И. Гайдук¹

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: serikoz12345@gmail.com

²⁾ ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121А,
220108 Минск, Беларусь

Методом конечных разностей во временной области рассчитаны спектры поглощения инфракрасного излучения структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в зависимости от размеров их перфорации. Обнаружено, что для всех структур уровень поглощения составляет более 75 % во всём исследуемом диапазоне длин волн. Показан нелинейный характер зависимости уровня поглощения от диаметра цилиндрической перфорации. Установлено, что модификация профилированных структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ перфорацией может усиливать поглощение в диапазоне 8–8.4 мкм независимо от размера перфорации. Обнаружено, что усиление поглощения в диапазоне 11.2–13.2 мкм происходит в структурах с перфорацией диаметром 1 мкм.

Ключевые слова: перфорированные структуры; плазмонное поглощение; спектр поглощения.