



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

SILICON SOLAR THERMAL ELECTRIC PLANTS

Статья поступила в редакцию 06.04.20. Ред. рег. № 2780

The article has entered in publishing office 06.04.20. Ed. reg. No. 2780

УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАСТИН КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УСТРОЙСТВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ****Р. Алиев, Ж. Зиётдинов, Б. Урманов***

Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура
 д. 129, ул. Университетская, г. Андижан, 170100, Республика Узбекистан
 тел.: (374) 223-83-71; факс: (374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz; alievuz@yahoo.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.12-23

Заключение совета рецензентов: 12.05.20 Заключение совета экспертов: 20.05.20 Принято к публикации: 27.05.20

Работа относится к технологиям альтернативной энергетики, а именно солнечной энергетики. Анализировались результаты изменения оптических параметров кремниевых пластин вследствие ультразвуковой обработки (разновидность механической обработки). Для экспериментов выбраны монокристаллические кремниевые пластины *p*-типа проводимости, используемые для изготовления солнечных элементов. Ультразвуковая обработка поверхности пластин кремния проводилась при помощи специального устройства, которое состоит из: основного блока механического воздействия, компрессора воздуха и генератора ультразвуковой частоты. Основной блок механического воздействия снабжен системой регулировки давления воздуха, вибратором, рабочими цилиндрами передачи механического колебания, шарообразным микрозондом из твердого металла и каналом передачи давления на вибратор.

Измерены шероховатость поверхности и коэффициент отражения от поверхности в зависимости от длины волны падающего света до и после механической обработки. На основе полученных LSM-изображений и оценки шероховатости поверхности, а также измерения коэффициента отражения света предложен механизм текстурирования, который может быть использован для создания высокоэффективных солнечных элементов. Исследовано воздействие ультразвуковой обработки поверхности пластин кремния на время жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах до и после обработки при помощи специального устройства. Для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах до и после обработки применялся метод квазистационарной фотопроводимости, который основан на бесконтактном измерении проводимости пластины при воздействии импульсного излучения, позволяющий проводить оценку эффективного времени жизни неосновных носителей заряда. Полученные экспериментальные результаты, физическое обоснование процессов поглощения света в пластинах, подвергнутых поверхностной механической обработке, и изменение времени жизни фотогенерированных носителей заряда позволяют рекомендовать новый способ повышения эффективности кремниевых солнечных элементов.

Ключевые слова: кремний; LSM-изображение; шероховатость поверхности; коэффициент отражения света; текстурирование; солнечные элементы.

* Алиев Р., Зиётдинов Ж., Урманов Б. Влияние ультразвуковой обработки поверхностей пластин кристаллического кремния на физические свойства устройств солнечной энергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;07-18:12-23.



INFLUENCE OF ULTRASONIC VIBRATION MACHINING OF SURFACE OF THE CRYSTALLINE SILICON PLATES ON PHYSICAL PROPERTIES OF THE SOLAR ENERGY DEVICES

R. Aliev, J. Ziyotdinov, B. Urmanov

Andijan State University named after Z.M. Babur
129 University Str., Andijan, 170100, Uzbekistan
tel.: (374) 223 83 71, fax: (374) 223 88 30, e-mail: agsu_info@edu.uz; alievuz@yahoo.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.12-23

Referred 12 May 2020 Received in revised form 20 May 2020 Accepted 27 May 2020

The paper concerns technologies of alternative energy, in particular, solar energy. The research discusses the results of change in optical parameters of silicon plates influences due to ultrasonic machining. For experiments, the crystalline silicon plates of p-type of the conductivity are used for solar cells manufacturing are chosen. We have made ultrasonic machining of a surface of silicon plates by means of the special device. The device consists of the mainframe of mechanical influence, the air compressor and the of ultrasonic frequency generator. The mainframe of mechanical influence is supplied by system of adjustment of air pressure, a vibrator, working cylinders of mechanical vibration transmission, a spherical micro-probe from firm metal, the channel of pressure transfer upon the vibrator.

The roughness of a surface and factor of reflexing from a surface depending on length of a wave of an incident light before and after machining are measured. On the basis of LSM-images received and an estimation of roughness and also measurements of light reflexing factor, the surface texturing mechanism which can be used for production of high effective solar cells is offered. Moreover, we have researched the influence of ultrasonic machining of a surface of silicon plates for life period of the minority charge carriers in silicon plates before processing by means of the special device. For measurement of life time of minority charge carriers in silicon plates before machining, we have employed the method of quasi-stationary photoconductivity based on contactless measurement of conductivity of a plate at influence of pulse radiation allowing to spend an estimation of sizes of effective life time of minority charge carriers. The received experimental results, physical interpretation of processes of light absorption in the plates subjected to ultrasonic machining and change of life time of the photo-generated carriers of a charge allow us to recommend a new way of increase of silicon solar cells efficiency.

Keywords: silicon; LSM images; roughness; surface; light reflexing factor; texture; solar cells.



Райимжон Алиев
Rayimjon Aliev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры физики, Андижанский государственный университет.

Образование: Андижанский государственный педагогический институт (1979 г.).

Область научных интересов: полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи.

Публикации: более 300 работ, включая 6 книг и 25 патентов.

H-index 3; ORCID 0000-0003-1986-2199

Information about the author: DSc. in Engineering, Professor of Physics Department at Andizhan State University.

Education: Andijan State Pedagogical Institute, 1979.

Research interests: semiconductor photoelectric converters.

Publications: more than 300, including 6 books, and 25 patents.



Жахонгир Зиётдинов
Jakhongir Ziyotdinov

Сведения об авторе: докторант по специальности «Физика полупроводников», Андижанский государственный университет.

Образование: Андижанский государственный университет, бакалавр (2012 г.) и магистратура (2014 г.).

Область научных интересов: полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи.

Публикации: более 20, включая 5 патентов.

Information about the author: PhD student on Physics of Semiconductors specialty, Andijan State University.

Education: Andijan State University, BSc, 2012, and MSc, 2014.

Research interests: semiconductor photoelectric converters.

Publications: more than 20, including 5 patents.





Бахтиёр Урманов
Bakhtiyor Urmanov

Сведения об авторе: исследователь по специальности «Физика полупроводников», Андижанский государственный университет.

Образование: Сонмуновский университет, Асан, Корея (2019 г.).

Область научных интересов: полупроводниковые приборы; поверхностная инженерия.

Публикации: более 10.

Information about the author: Researcher on Physics of Semiconductors, Andijan State University.

Education: Somoon University, Asan, Korea, 2019.

Research interests: semiconductor devices; surface engineering.

Publications: more than 10.

1. Введение

Среди различных устройств на основе возобновляемых источников энергии солнечные фотоэлектрические энергетические станции (СФЭС) являются наиболее перспективными для наземной энергетики. Практически все существующие СФЭС базируются на кремниевых солнечных элементах (СЭ) [1], оптическая эффективность которых является одним из наиболее весомых параметров. Известно, что более 85 % используемых в различных отраслях экономики СЭ изготавливаются на основе кристаллического или поликристаллического кремния, значит, оптические свойства поверхности таких материалов повышают общую эффективность СЭ [2–4].

С целью улучшения оптических свойств поверхности кремния, то есть для снижения отражения па-

дающего света, применяются различные физические методы. В качестве наиболее простых рассматривается метод нанесения на поверхность антиотражающего (АО) покрытия из различных диэлектрических и металл-оксидных материалов. Если сформировать на поверхности кремния текстуру и последовательно нанести АО слои, то можно достигнуть наилучших результатов по повышению эффективности СЭ [5].

В связи с этим экспериментальные исследования по усовершенствованию оптических свойств кремниевых пластин являются актуальными. В данной работе рассматривается новый метод текстурирования поверхности кремния и обсуждаются результаты экспериментально проведенных исследований. Впервые применяется метод ультразвуковой обработки (разновидность механической обработки) поверхности кремния, предназначенного для изготовления солнечных элементов в качестве базового материала.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
D	Коэффициент диффузии
G	Скорость генерации, $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$
I	Сила тока, А
k	Постоянная Больцмана
L	Диффузионная длина носителей заряда
L_n	Длина диффузии электронов
L_p	Длина диффузии дырок
N_a	Концентрация акцепторов в базе
N_d	Концентрация доноров в эмиттере
n_i	Концентрация электронов в собственном полупроводнике
$\Delta n, \Delta p$	Избыточная концентрация фотогенерированных носителей заряда
q	Заряд электрона
S	Площадь солнечного элемента
T	Абсолютная температура
U	Скорость рекомбинации носителей заряда
U_e	Высота барьера
W	Толщина пластины, мкм
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
λ	Длина волны света, мкм / μ
μ_n, μ_p	Подвижность электронов и дырок соответственно
$\Delta\sigma$	Изменение проводимости
τ_{eff}	Эффективное время жизни неосновных НЗ
τ_v	Объемное время жизни неосновных НЗ
τ_s	Поверхностное время жизни неосновных НЗ
<i>Индексы нижние</i>	

Продолжение списка обозначений

<i>a</i>	Акцептор
<i>d</i>	Донор
<i>eff</i>	Эффективное
<i>i</i>	Собственный
<i>n</i>	Электрон
<i>p</i>	Дырка
<i>s</i>	Поверхностное
<i>v</i>	Объемное
<u>Аббревиатуры</u>	
a-Si:H	Аморфный гидрогенизированный кремний
c-Si	Кристаллический кремний
HIT	Heterojunction Intrinsic Technology
LSM	Лазерная сканирующая микроскопия (Laser Scanning Microscopy)
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally Diffused
Si	Кремний
SiO ₂	Двуокись кремния
V ₂ O ₅	Пентаоксид ванадия
АО	Антиотражающее
АИФ	Академический инновационный фонд
НЗ	Носители заряда
СЭ	Солнечный элемент



2. Экспериментальная часть

Для экспериментов выбраны монокристаллические кремниевые пластины *p*-типа проводимости,

используемые для изготовления СЭ. Произведена ультразвуковая обработка поверхности пластин кремния при помощи специального устройства (рис. 1).

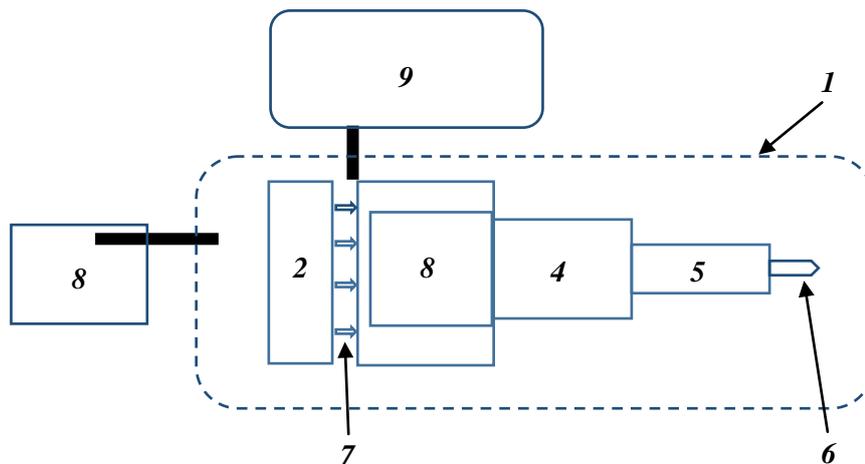


Рис. 1 – Блок-схема устройства для ультразвуковой обработки поверхности кремниевых пластин:

1 – блок механического воздействия; 2 – система регулировки давления воздуха; 3 – вибратор; 4, 5 – рабочие цилиндры передачи механического колебания; 6 – шарообразный микрозонд; 7 – канал передачи давления; 8 – компрессор; 9 – генератор ультразвуковой частоты

Fig. 1 – Block-scheme of the device for ultrasonic frequency processing of front surface of silicon plates: 1 – mechanical influence block; 2 – system of adjustment of air pressure; 3 – vibrator; 4, 5 – work cylinders of mechanical vibration transfer; 6 – spherical micro-probe; 7 – channel of pressure transfer; 8 – compressor; 9 – ultrasonic frequency generator

Устройство состоит из основного блока механического воздействия 1, компрессора воздуха 8 и генератора ультразвуковой частоты 9. Основной блок механического воздействия снабжен системой регулировки давления воздуха 2, вибратором 3, рабочими цилиндрами передачи механического колебания 4 и 5, шарообразным микрозондом 6 из твердого металла, каналом передачи давления 7 на вибратор 3.

В ходе исследования были измерены шероховатость поверхности и коэффициент отражения от поверхности в зависимости от длины волны падающего света до и после механической обработки. Кроме того, измерено время жизни носителей заряда до и после обработки. Часть результатов приведена на рис. 2 и рис. 3.



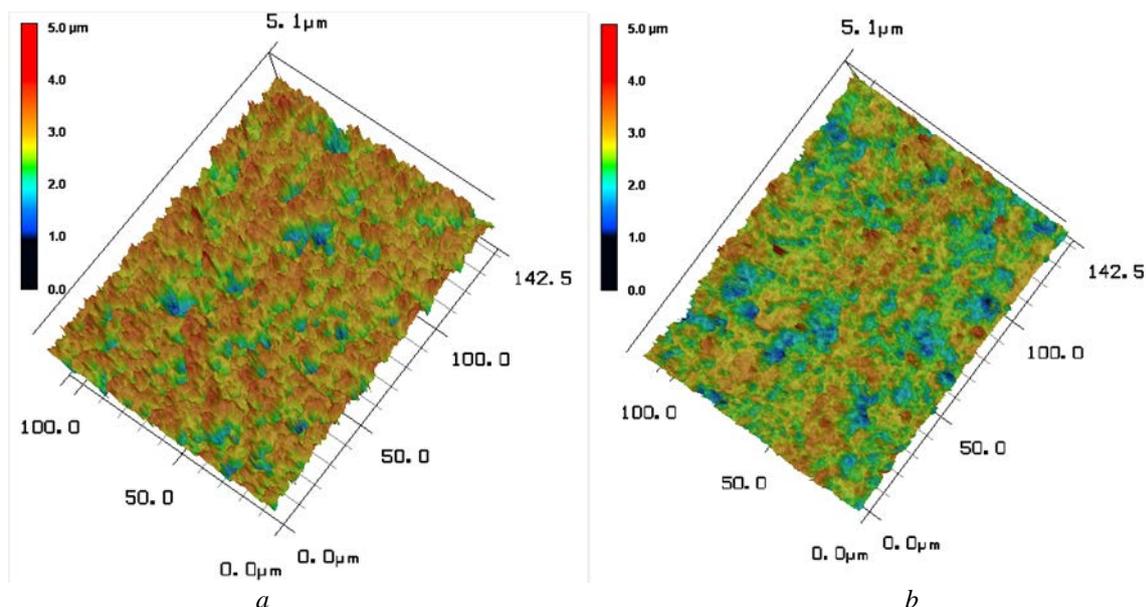


Рис. 2 – Трехмерное LSM-изображение поверхности кремния до (а) и после (b) обработки
 Fig. 2 – 3D LSM image of a silicon surface before (a) and after (b) processing

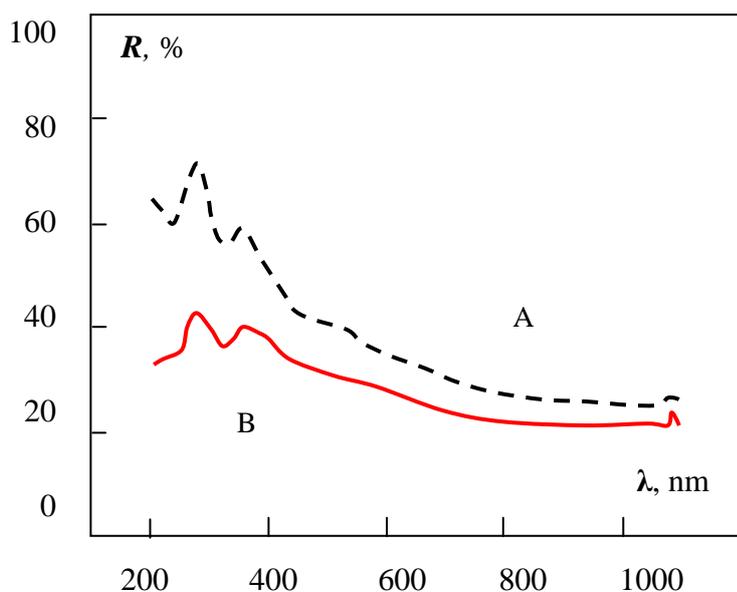


Рис. 3 – Спектральная зависимость коэффициента отражения от поверхности кремния до (А) и после (В) механической обработки
 Fig. 3 – Spectral dependence of reflexing factor on a silicon surface before (A) and after (B) processing

Изменение шероховатости поверхности изучено при помощи компактного конфокального лазерного сканирующего микроскопа (LSM) SJ-210, Mitutoyo (Japan) и VK-X100 3-D LSM (Japan). Такой инструмент с уникальной конструкцией в сочетании с чувствительными детекторами позволяет максимально минимизировать потери сигнала. LSM оснащен полупроводниковыми светодиодными лазерами, которые являются надежными, долговечными и стабильными в работе источниками возбуждения; лазерные линии LSM равномерно распределены по всему видимому диапазону оптического спектра.

Данные (см. рис. 2) позволяют сделать заключение о том, что ультразвуковая обработка поверхности приводит к повышению ее шероховатости. Изме-

рения показали, что количественный прирост неровности поверхности пластин кристаллического кремния после обработки составил $\approx 7 \div 9$ %. Важно отметить, что тонкие режимы воздействия специального обрабатывающего устройства пока не оптимизированы. Рабочему концу этого устройства можно придавать различные геометрические формы и размеры. Линейную форму обработки можно заменить нелинейными: круговыми, спиральными или волнистыми.

Измерения оптических свойств исследуемых кремниевых пластин до и после обработки проводились с помощью спектрометра видимого и ультрафиолетового диапазона. Результаты измерения спектральной зависимости коэффициента отраже-



ния от поверхности кремния, подвергнутого механической обработке, свидетельствует о существенном его изменении в коротковолновой области спектра. Как видно на графике (см. рис. 3), в области длины волны света $0,2 \div 0,4$ мкм коэффициент отражения уменьшается почти на $26 \div 28$ %; в области $0,5 \div 0,8$ мкм – на $10 \div 6$ %. Эти данные указывают на достаточно высокий уровень текстурирования поверхности после проведения соответствующей механической обработки. Дополнительное нанесение АО слоев на такую поверхность приводит к минимуму отраженной части светового потока, падающего на поверхность.

Одним из способов увеличения эффективности полупроводниковых СЭ является использование текстурированных слоев, расположенных на поверхности монокристаллической кремниевой пластины. Эти слои служат для увеличения поглощения излучения в активных кремниевых слоях за счет многократных отражений от стенок текстуры.

Распространенными способами текстурирования поверхности кремния являются анизотропное химическое и плазменное травление, а также фотолитография с последующим жидкостным травлением [6]. Анизотропное химическое травление и травление в плазме позволяют обрабатывать большие поверхности кремния и получать неупорядоченную пирамидальную текстуру с размерами от 1 мкм до $3 \div 4$ мкм [7]. Следует отметить, что традиционные фотолитографические методы позволяют получать упорядоченные и неупорядоченные структуры с большим разбросом размеров, в то же время они дороги и не обеспечивают высокой производительности.

Имеется возможность создания текстур на поверхности кремния путем его неоднородного окисления в результате твердофазного взаимодействия кремния и предельного оксида переходного металла с последующим растворением оксида кремния и оксида переходного металла в плавиковой кислоте. Для создания текстур на поверхности кремния необходимо, чтобы оксид переходного металла не испарялся, не разлагался при нагреве и легко растворялся в плавиковой и других кислотах. Авторами [6] исследован процесс текстурирования поверхности кремния, окисленного под слоем V_2O_5 , и показано, что интенсивное окисление кремния на границе Si/ V_2O_5 начинается при температуре 903 К, то есть на 200 К ниже, чем при термическом окислении кремния в атмосфере кислорода. На границе V_2O_5 /Si образуется слой диоксида кремния толщиной от $30 \div 50$ нм с включениями SiO_2 в кремний глубиной до 400 нм. Предложена модель низкотемпературного окисления кремния, основанная на диффузии атомарного кислорода из V_2O_5 через слой SiO_2 к кремнию и возникновении преципитатов SiO_x в кремнии. После удаления слоев V_2O_5 и SiO_2 на поверхности кремния образуется текстура, интенсивно рассеивающая свет в области длин волн $300 \div 550$ нм, что важно для текстурирования фронтальной и тыльной поверхностей СЭ.

Другая форма текстурированного кремния – это пористый кремний, который получают методом электрохимической обработки [8]. Такой материал обладает большой способностью к сорбции, что обусловлено его большой удельной поверхностью, поэтому он широко применяется в нанотехнологиях различного прикладного назначения. Авторами [9, 10] предложен способ использования кремния мультипористой текстуры на поверхности монокристаллической кремниевой пластины для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Однако этот способ не нашел широкого применения ввиду недостаточности оптимизации технологических процессов.

В работе [11] исследован процесс возникновения лазерно-индуцированной столбчатой структуры на поверхности кристаллического Si и мультикристаллического Si под действием наносекундных импульсов Nd:YAG-лазера (532 нм) в атмосфере диоксида углерода и в вакууме. Получены образцы текстурированных пластин мультикристаллического Si размером 20×20 мм с типичной столбчатой структурой (аспектное отношение ≥ 3) и полным отражением менее 3 %.

Обычно после лазерного текстурирования обработанные образцы должны подвергаться дополнительной поверхностной обработке с целью удаления с поверхности поврежденного кристаллического слоя и локально аморфизированных участков. Такая обработка заключается в химическом травлении в щелочном [12] и последующем кислотном растворе [13]. Авторами работы [11] показано, что лазерное текстурирование более эффективно снижает коэффициент отражения поверхности по сравнению с методом щелочного анизотропного травления, применяемым для формирования текстур в виде пирамид на монокристаллическом кремнии. Лазерный метод позволяет получать однородную по всей площади и нечувствительную к кристаллографическим ориентациям отдельных кристаллических текстур поверхность пластин мультикристаллического кремния. Поверхность кремния характеризуется полным отражением ниже 3 % непосредственно после текстурирования, 5,5 % – после кислотного травления и 13,4 % – после щелочного. Однако лазерные методы формирования текстуры на поверхности кремния не исключают химическую обработку, имеют недостаточно высокую воспроизводимость, и их применение может привести к некоторому повышению себестоимости СЭ.

Таким образом, эффективным методом снижения потерь является создание на фронтальной поверхности СЭ специального микрорельефа для увеличения коэффициента поглощения [14]. Наивысшее значение эффективности для кремниевого СЭ было достигнуто в структуре с рельефом в виде перевернутых пирамид. Пирамиды покрываются слоем оксида оптимальной толщины. Падающее излучение преимущественно попадает на их боковые поверхности и направляется в объем СЭ. Внутри СЭ не поглощен-



ная часть излучения достигает тыльной поверхности и отражается специальным отражателем в виде слоя окисла с алюминиевым покрытием. Отраженный от тыльной поверхности свет падает на поверхность пирамид на фронтальной поверхности и в зависимости от угла падения делится на два почти равных потока – один внутрь базы, а второй наружу. Выходящий поток можно ослабить, если нарушить симметрию текстуры путем отклонения осей пирамид от вертикали или размещением пирамид в шахматном порядке. Конструкцию такого СЭ называют Passivated Emitter and Rear Locally Diffused (PERL) структурой, которая обеспечивает существенное продление пути солнечного луча в базе (до 30 раз превышающей ее толщину).

Микрорельеф на поверхности кремния (100) можно получить при анизотропном травлении монокристаллической пластины кремния в водном растворе окиси щелочного металла [14]. Микрорельеф представляет собой полиэдры травления в виде правильных тетрагональных пирамид с боковыми гранями (111), являю-

щимися естественными поверхностями монокристалла, и углом при вершине в $70,5^\circ$. Такая поверхность, называемая текстурированной, имеет значительно более низкий коэффициент отражения солнечного излучения во всем видимом диапазоне длин волн. В настоящее время большинство промышленно выпускаемых СЭ имеют фронтальную текстурированную поверхность.

В предложенном способе формирования текстуры на поверхности кремниевых пластин шарообразный микрозонд *b* устройства для ультразвуковой обработки (см. рис. 1) передает механические колебания на решетку кристалла и оставляет сфероцилиндрические (в сечении) углубления – канавки вдоль траектории сканирования. При этом углубления оставляют узкие полосы плоской поверхности между соседними канавками. Ширина канавок определяется диаметром шарообразного микрозонда. Если сопоставить траектории падающего и преломленного луча в такой текстуре в виде перевернутой пирамиды с углублениями в виде канавок (рис. 4), то можно наблюдать сходную картину.

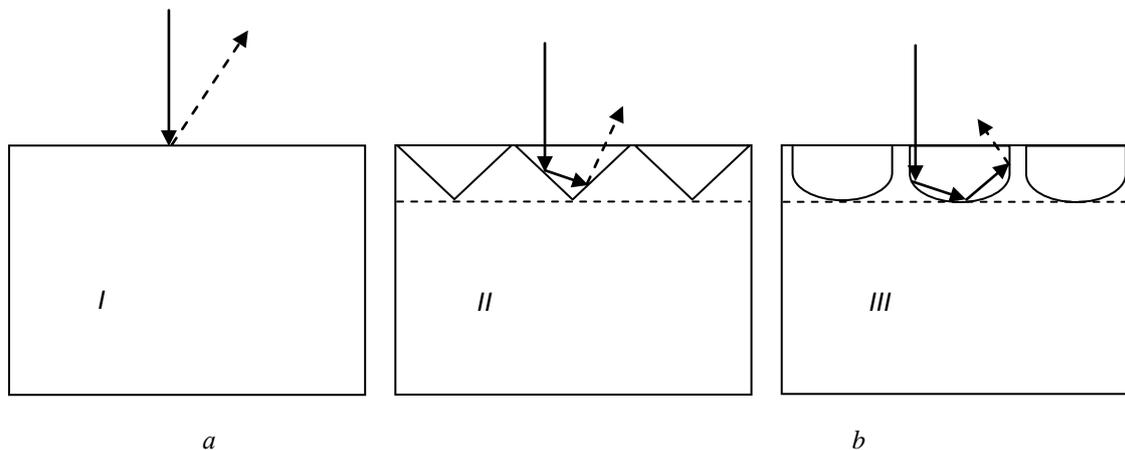


Рис. 4 – Упрощенная схема хода падающего на поверхность кремния и отражающегося от нее светового луча до (I) и после формирования текстуры в виде перевернутой пирамиды (II) и углублений в виде канавок (III)
Fig. 4 – The simplified scheme of a light beams trace at falling on a silicon surface and reflecting from it before (I) and after formation of a texture in the form of the turned pyramid (II) and flutes of deepening (III)

Более 30 % света, падающего на гладкую поверхность кремния (рис. 4, I), теряется на отражение. На текстурированной поверхности падающий луч преимущественно попадает на боковые поверхности перевернутой пирамиды (рис. 4, II) и направляется в объем СЭ. Более положительный эффект можно наблюдать в случае текстуры с углублениями в виде канавок (рис. 4, III), которая формируется ультразвуковой обработкой.

3. Теоретическая часть

Исходя из условий механической обработки поверхности, процесс отражения света от гладкой и текстурированной поверхности кремния можно рассмотреть в виде модели, приведенной на рис. 4. Не менее чем двукратное отражение света от поверхно-

стей текстуры (см. рис. 4, II и рис. 4, III), в отличие от гладкой поверхности (см. рис. 4, I), приводит к существенному снижению отражения и, следовательно, большему поглощению света в объеме полупроводникового кремния. Кроме того, как указано в работах [1, 4], текстурирование поверхности приводит к уменьшению глубины проникновения общего потока. Поглощение света вблизи области пространственного заряда *p-n*-перехода увеличивает вероятность сбора фотогенерированных неравновесных носителей заряда (НЗ) до их рекомбинационных потерь.

Известно, что наиболее чувствительным свойством поверхности является изменение плотности поверхностных зарядовых состояний. Такой процесс способствует существенному изменению темпа поверхностной рекомбинации НЗ, а значит, времени жизни поверхностных НЗ.



Согласно формуле [1]:

$$\tau_{eff}^{-1} = \tau_v^{-1} + \tau_s^{-1}, \quad (1)$$

обратное значение эффективного времени жизни неосновных НЗ определяется суммой обратных значений двух составляющих, где τ_{eff} – эффективное время жизни неосновных НЗ в материале; τ_v – объемное и τ_s – поверхностное время жизни неосновных НЗ.

Время жизни τ_v является одним из важнейших критериев качества полупроводникового материала и степени его пригодности для изготовления полупроводниковых приборов, оно меняется в широких пределах от кристалла к кристаллу, зависит от температуры и состава химических примесей.

Время жизни τ_s зависит не только от свойств материала, но и от состояния поверхности, размеров образца, технологии его изготовления. Химическая обработка полированной поверхности образца позволяет увеличивать время жизни носителей у поверхности настолько, что измеряемое время можно считать временем жизни носителей в объеме полупроводника. Однако ультразвуковая обработка поверхностей пластин кристаллического кремния при сохранении их исходных физических параметров может вызвать изменение τ_s и, следовательно, τ_{eff} . Поэтому целесообразно изучать механизм изменения времени жизни неосновных НЗ в кремниевой пластине с учетом механизма измерения τ_{eff} .

4. Результаты и их обсуждение

Другим важным параметром полупроводникового материала, определяющим его пригодность в качестве фотоэлектрического прибора, является диффузионная длина L или время жизни НЗ τ , которые взаимосвязаны:

$$L = (D\tau)^{1/2}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии НЗ.

Особенно большой интерес представляет время жизни неравновесных носителей заряда в пластине кристаллического кремния. В связи с этим исследовано воздействие ультразвуковой обработки поверхности пластин кремния на время жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах до и после обработки при помощи специального устройства (см. рис. 1).

Для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах до и после механической обработки необходимо было выбрать подходящий метод. Среди известных методов измерений следует выделить метод квазистационарной фотопроводимости, который основан на бесконтактном измерении проводимости пластины при воздействии импульсного излучения, позволяющий проводить оценку эффективного времени жизни неосновных НЗ. Такой

метод получил широкое распространение среди исследовательских групп, занимающихся разработкой НТ СЭ на основе a-Si:H/c-Si, и стал своего рода стандартом экспресс-диагностики качества пассивации поверхности кремния.

К преимуществам метода относятся его простота, высокая скорость измерений, бесконтактность, а также то, что этот метод не повреждает поверхность. Основным недостатком этой методики является то, что для измерений должны быть изготовлены симметричные структуры, не имеющие проводящих металлических или АО слоев, то есть измерения не могут проводиться на СЭ. В данной работе для измерения времени жизни неравновесных НЗ и поверхностного сопротивления использовалась неразрушающая стандартная измерительная установка «Sinton WCT-120 – Offline Wafer Lifetime Measurement» (рис. 5).



Рис. 5 – Установка измерения времени жизни НЗ «Sinton WCT-120»

Fig. 5 – Measurement devise of life time of minority charge carriers Sinton WCT-120

Метод измерения основан на вихревых токах. Высокочастотная катушка встроена в столик WCT-120. Кремниевую пластину помещают на верхнюю часть катушки, которая направляет электромагнитные волны в пластину. В импульсном режиме свет падает на пластину, создается избыточное число НЗ, катушка определяет изменение проводимости пла-

стины, и на основе этих данных вычисляется время жизни неосновных НЗ. Известно, что изменение проводимости в стационарных условиях выражается формулой [15]:

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)W = q\Delta n(\mu_n + \mu_p)W, \quad (3)$$

где $\Delta n = \Delta p$ – это избыточная концентрация фотогенерированных НЗ; W – толщина пластины; μ_n, μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно. В стационарных условиях скорость генерации электронно-дырочных пар находится в равновесии со скоростью рекомбинации:

$$U = G, \quad (4)$$

и общая скорость рекомбинации выражается как эффективное время жизни НЗ (τ_{eff}):

$$U = \Delta n / \tau_{eff}. \quad (5)$$

Тогда для эффективного времени жизни НЗ имеем:

$$\tau_{eff} = \Delta\sigma / q(\mu_n + \mu_p)W \times G, \quad (6)$$

где W – толщина пластины, которая задается в качестве входных данных в измерении; $(\mu_n + \mu_p)$ предполагается постоянным во всем диапазоне уровня легирования. Увеличение проводимости ($\Delta\sigma$) и скорость генерации (G) вычисляются из калибровки высокочастотной катушки, скорость генерации (G) рассчитывается для калибровочного СЭ. Этот метод представляет собой метод без визуализации, таким образом, с его помощью можно измерить только время жизни в данном пятне на пластине.

Результаты измерения времени жизни НЗ до и после механической обработки для различных пластин кремния приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерения времени жизни НЗ до и после обработки
Measurement results of life time of minority charge carriers before and after processing

Table

Толщина пластин Si, мкм	Время жизни неравновесных НЗ, мкс		
	До обработки	После обработки	На обратной поверхности
200	0,88	0,96	0,94
203	0,7	0,68	0,71
270	1,79	1,25	1,92
275	5,7	8,76	6,55

Данные таблицы свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка поверхности кремния приводит к существенному изменению времени жизни фотогенерированных НЗ. Увеличение времени жизни НЗ для пластин толщиной 275 мкм составляет почти 54 %. На основании этих данных и выражения (1) можно сделать вывод о том, что поверхностная обработка вызывает изменение эффективной времени жизни НЗ по всему образцу. Для более убедительного заключения было измерено время жизни НЗ при освещении пластин с тыльной стороны (данные 4-й колонки табл.), при этом прирост времени жизни составил почти 15 %. Такой разброс значений связан с большой толщиной пластин. При выборе более тонких пластин увеличение времени жизни НЗ по объему Si пластины должно проходить более однородно.

В рамках данной работы следует отметить некоторые новые тенденции развития прикладной науки – полупроводниковой фотовольтаики. Например, недавно материаловеды Австралийского национального университета (Australian National University) предложили обнаруженные ими новые свойства кремния для создания недорогой технологии СЭ [16]. Так, некоторая анизотропическая деформация кри-

сталлической решетки кремния может придавать материалу новые свойства, позволяющие расширить его спектральную фоточувствительность. Поэтому авторы считают целесообразным разработать новую технологию получения деформированного кремния для создания дешевых и высокоэффективных СЭ.

В Великобритании [17] предложен способ повышения эффективности СЭ за счет локального давления полупроводниковых кристаллов при их освещении оптическим светом определенной длины волны. Локальное давление на поверхность кристалла приводит к возникновению в нем градиента механического напряжения, и, следовательно, наблюдается флексофотовольтаический эффект. По кристаллографическим представлениям полупроводниковых материалов можно предположить, что такой эффект может наблюдаться и в кремнии. Известно, что если формировать *p-n*-переход, то чувствительность такой структуры намного повышается по сравнению с резисторной структурой без *p-n*-перехода. В связи с этим представляется важным целенаправленное исследование влияния локального механического напряжения на процесс фотоэлектрического преобразования в кремниевых структурах с *p-n*-переходом.



Как отмечено в работе [17], с физической точки зрения в материалах, имеющих кристаллическую структуру без центральной симметрии, фотогенерированные электроны могут иметь разную подвижность для различных кристаллографических ориентаций. При этом наблюдается аномальный фотовольтаический эффект, с помощью которого можно преобразовать некоторую энергию света в электрический ток. Следовательно, при правильной ориентации фронта p - n -перехода относительно направления локального напряжения кристалла можно повысить эффективность СЭ за счет аномального фотовольтаического эффекта.

При локальном деформировании освещенной поверхности полупроводникового кристалла наблюдается поляризация кристалла, которая вызывает флексоэлектрический эффект за счет генерации градиента механического напряжения. При деформировании поверхности кристалла с помощью иголки для микровдавливания с силой до 15 микроньютонов и облучении лазерными импульсами с длиной волны 405 нм наблюдалось повышение фототока почти на два порядка.

Для интерпретации такого аномального явления можно обратиться к природе положительного изменения некоторых фундаментальных параметров материала, таких как ширина запрещенной зоны E_g , кинетические параметры L и τ НЗ, наиболее ответственных за фотоэлектрические процессы переноса заряда в p - n -структурах. Так, время жизни τ НЗ в полупроводнике является одним из основных параметров материала, предназначенного для изготовления приборов различной структуры и различного назначения [18]. Согласно выражению (1), обратное значение эффективного времени жизни НЗ в полупроводнике определяется в виде суммы обратных значений объемного и поверхностного времени жизни НЗ. Для достижения максимального значения объемного времени жизни НЗ, выбирается оптимальный уровень концентрации легирующей примеси в базе, при этом сводится к минимуму плотность дефектов различного происхождения. Основным фактором, влияющим на значение эффективного времени жизни НЗ, остаются поверхностные состояния. Если обратить внимание на поверхностное искривление энергетических зон кремния p -типа (или n -типа) проводимости, можно заметить, что слой НЗ может быть или обогащенным, или обедненным, кроме того, не исключено инверсионное состояние. Авторами работы [18] показано, что ультразвуковая обработка кремниевых пластин приводит к повышению времени жизни НЗ в 1,54 раза.

Рассмотрим формулу для тока через p - n -переход полупроводникового СЭ, которая имеет следующий вид:

$$I = Sq n_i^2 \left[D_p / L_p N_d + D_n / L_n N_a \right] \cdot \left[e(U_e / kT) - 1 \right], \quad (7)$$

где S – площадь ФП; q – заряд электрона; n_i – концентрация электронов в собственном полупроводнике; D_p – коэффициент диффузии дырок; L_p – длина диффузии дырок; N_d – концентрация доноров в эмиттере; D_n – коэффициент диффузии электронов; L_n – длина диффузии электронов; N_a – концентрация акцепторов в базе; U_e – высота барьера; k – коэффициент Больцмана; T – абсолютная температура. Локальное механическое напряжение может вызвать некоторое изменение межатомного расстояния вблизи поверхности кристалла кремния, что в свою очередь может привести к изменению плотности поверхностного заряда, ширины запрещенной зоны и, следовательно, через изменение параметров, таких как время жизни или диффузионная длина НЗ, высота барьера – к изменению тока, проходящего через p - n -переход. Для более ясного определения природы влияния механического напряжения на процессы переноса заряда в СЭ необходимо провести отдельные исследования.

5. Заключение

Полученные экспериментальные результаты, физическое обоснование процессов поглощения света в пластинах, подвергнутых поверхностной ультразвуковой обработке, и изменения времени жизни фотогенерированных носителей заряда позволяют рекомендовать новый способ повышения эффективности кремниевых СЭ. Дальнейшее определение более точных режимов ультразвуковой обработки поверхности кремния будет способствовать практическому применению предложенного способа при производстве кремниевых СЭ.

Благодарности

Авторы выражают признательность коллегам по лаборатории «Возобновляемые источники энергии» Андijanского государственного университета за техническую поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Всемирного Банка в рамках научного проекта Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № АИФ-2/7.

Acknowledgments

Authors express gratitude to colleagues on «Renewable energy sources» Lab at Andijan State University for those technical support. Research is executed under financial support of World Bank through № AIF-2/7 Project of UZ MHSSE.

Список литературы

- [1] Зайнабидинов, С. Особенности поглощения излучения в кремнии с поверхностной текстурой и его влияние на свойства фотоэлектрических преобразователей / С. Зайнабидинов, Р. Алиев, М. Муйдинова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 28–33. – С. 312–317.



[2] Никитин, Б.А. Экспериментальная оценка коэффициента отражения кремниевых фотоэлектрических преобразователей / Б.А. Никитин, В.А. Гусаров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – Т. 7–8. – С. 12–18; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.07-08.012-018>.

[3] Никитин, Б.А. Оценка оптимальных параметров и предельных характеристик каскадных кремниевых фотопреобразователей. / Б.А. Никитин, В.А. Гусаров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 21. – С. 24–29; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.21.003>

[4] Зайнабидинов, С. Об оптической эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии / С. Зайнабидинов, Р. Алиев, М. Муйдинова, Б. Урманов // Гелиотехника. (Applied Solar Energy). – 2018. – № 6. – С. 12–17.

[5] Лизункова, Д.А. Исследование электрических и оптических свойств фоточувствительных структур на наноструктурированном кремнии. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников. Самара, 2018. – 150 с.

[6] Никитин, С.Е. Текстура поверхности монокристаллического кремния, окисленного под тонким слоем V_2O_5 / С.Е. Никитин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 1. – С. 105–110.

[7] Основы технологии изготовления кремниевых солнечных фотопреобразователей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://avenston.com/ru/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells/> – (Дата обращения: 26.11.2017)

[8] Алдашкин, Г.В. Исследование пористого кремния методом РЭМ / Г.В. Алдашкин // Молодой ученый. – 2016. – № 10. – С. 337–340. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/114/30315/> – (Дата обращения: 06.04.2020).

[9] Орехов, В.Ю. Кремний мультипористой текстуры для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии / В.Ю. Орехов, А.А. Дружинин. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 21–23.

[10] Kwon, H. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells / H. Kwon [et al.] // International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–4.

[11] Хайдуков, Е.В. Лазерное текстурирование кремния для создания солнечных элементов / Е.В. Хайдуков [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 2. – С. 26–32.

[12] Dobrzanski, L.A. Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization / L.A. Dobrzanski [и др.] // Archives of Mater. Sci. and Eng. – 2009. – Vol. 38. – P. 5–11.

[13] Abbott, M. Optical and electrical properties of laser texturing for high-efficiency solar cells / M. Abbott, J. Cotter // Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2006. – Vol. 14. – P. 225–235.

[14] Фотопроводимость и поглощение света полупроводниками. – 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://poznayka.org/s84837t1.html> – (Дата обращения: 22.06.2016.).

[15] Aouida, S. Effective minority carrier lifetime measured in qss mode and Silicon surface treatments [Электронный ресурс] / S. Aouida [et al.] // 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/286455363> – (Дата обращения: 15.09.2015).

[16] Mark Garlick. Flexo-photovoltaic effect. Science. – 2018. – Vol. 360. – Iss. 6391. – P. 904–907 [Электронный ресурс]; DOI: 10.1126/Science.aan3256. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect>. – (Дата обращения: 25.05.2018).

[17] Yang, M.-M. New type of silicon promises cheaper solar technology / M.-M. Yang, D. J. Kim, M. Alexe // Physical Review Letters, Apr., 24, 2019. Режим доступа: <https://phys.org/news/2019-04-silicon-cheaper-solar-technology.html>. – (Дата обращения: 24.04.2019.).

[18] Алиев, Р. Стимулирование времени жизни носителей заряда за счет флексоэлектрического эффекта на поверхности кремния / Р. Алиев, Б. Урманов, М. Муйдинова, Ж. Каххаров // Материалы IV Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах» ФерПИ, 26–27 май 2018, Фергана. – 2018. – С. 277–279.

References

[1] Zainabidinov S., Aliev R, Muydinova M. Features of radiation absorption in silicon with a surfaces structure and its influence on properties of photoelectric converters (Osobennosti pogloshcheniya izlucheniya v kremnii s poverkhnostnoi teksturoi i ego vliyanie na svoistva fotoelektricheskikh preobrazovatelei). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2019;28–33:312–317 (in Russ.).

[2] Nikitin B.A., Gusarov V.A. Experimental estimation of factor of reflexing of silicon photoelectric converters (Eksperimental'naya otsenka koeffitsienta otrazheniya kremnievykh fotoelektricheskikh preobrazovatelei). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2016;7–8:12–18; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.07-08.012-018> (in Russ.).

[3] Nikitin B.A., Gusarov V.A. Estimation of optimum parameters and limiting characteristics of silicon cascade photoconverters (Otsenka of optimum parameters and limiting characteristics of cascade silicon photoconverters). *International Scientific Journal for Alterna-*



tive Energy and Ecology (ISJAE), 2015;21:24–29; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.21.003> (in Russ.)

[4] Zainabidinov S., Aliev R., Muydinova M., Urmanov B. About optical efficiency of silicon photoelectric converters of solar energy (Ob opticheskoi effektivnosti kremnievykh fotoelektricheskikh preobrazovatelei solnechnoi energii). *Geliotekhnika (Applied Solar Energy)*, 2018;6:12–17 (in Russ.).

[5] Lizunkova D.A. Investigation on the electrical and optical properties of photosensitive structures on nanostructured silicon. PhD thesis on Physics and mathematics speciality (Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kand, fiz.-mat. nauk po spetsialnosti fizika poluprovodnikov. Issledovanie elektricheskikh i opticheskikh svoystv fotochuvstvitelnykh struktur na nanostrukturirovannom kremnii). Samara, 2018, 150 p. (in Russ.).

[6] Nikitin S.E., Nashekin A.V., Terukova, E.E., Trapeznikova, I.N., Bobil, A.V., Verbitskiy V.N. Surface texture of crystalline silicon oxidised under thin Layer V₂O₅ (Textura poverhnosti monokristallicheskogo kremniya, okislennogo pod tonkim sloem V₂O₅). *Fizika poluprovodnikov*, 2017;51(1):105–110 (in Russ.).

[7] Fundamentals of manufacturing technology of silicon solar photoconverters (Osnovy tehnologii izgotovleniya kremnievikh solnechnikh fotopreobrazovateley) [E-resource]. Available on: <https://avenston.com/ru/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells/> (11.26.2017) (in Russ.).

[8] Aldashkin G.V. SEM study of porous silicon (Issledovaniye poristogo kremniya metodom REM). *Molodoy ucheniy*, 2016;10:337–340 [E-resource]. Available on: <https://moluch.ru/archive/114/30315/> (04.06.2020) (in Russ.).

[9] Orehov V.Yu., Drujinin A.A. Silicon multiporous texture for solar energy photovoltaic converters (Kremniy multiporistiy texture dlya fotoelektricheskikh preobrazovateley solnechnoy energii). *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2009;3:21–23 (in Russ.).

[10] Kwon H., Lee J., Kim M., Lee S. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells. *International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology*, 2011;2011:1–4; Article ID 716409, doi: 10.5402/2011/716409. .

[11] Haydukov E.V., Hramova O.D., Rocheva V.V., Zuev D.A., Novodvorskiy O.A., Lotin A.A., Parshina L.S., Poroykov A.Yu., Timofeev M.A., Untila G.G. Silicon Laser Texturing for Solar Cells (Lazernoe texturirovaniye kremniya dlya sozdaniya solnechnih elementov). *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2011;54(2):26–32 (in Russ.).

[12] Dobrzanski L.A., Drygala A., Panek P., Lipinsky M., Zieba P. Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization. *Archives of Mater. Sci. and Eng.*, 2009;38:5–11.

[13] Abbott M., Cotter J. Optical and electrical properties of laser texturing for high-efficiency solar cells. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 2006;14:225–235.

[14] Semiconductor photoconductivity and light absorption (Fotoprovodimost i pogloshenie sveta poluprovodnikami), 2017 [E-resource]. Available on: <https://poznayka.org/s84837t1.html> (06.22.2016.) (in Russ.).

[15] Aouida S., Zaghouani R.B., Bachtouli N., Bessais B. Effective minority carrier lifetime measured in qss mode and Silicon surface treatments. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. [E-resource]. Available on: <https://www.researchgate.net/publication/286455363> (15/09.2015.).

[16] Garlick M. Flexo-photovoltaic effect. *Science*, 2018;360(6391):904–907; DOI: 10.1126/Science.aan3256 [E-resource]. Available on: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect>. (25.04.2018).

[17] Yang M.-M., Kim D.J., Alexe M. New type of silicon promises cheaper solar technology. *Physical Review Letters*, Apr., 24, 2019 [E-resource]. Available on: <https://phys.org/news/2019-04-silicon-cheaper-solar-technology.html>. (04.24.2019).

[18] Aliev R., Urmanov B., Muydinova M., Kahharov J. Stimulation of the lifetime of charge carriers due to the flexoelectric effect on the silicon surface (Stimulirovaniye vremeni jizni nositeley zaryada za chet flexo-elektricheskogo effekta na poverhnosti kremniya. Materialy IV Mejdunarodnoy konferentsii po “Opticheskim I fotoelektricheskim yavleniyam v poluprovodnikovyykh mikro- i nanostrukturah”), May 26–27, 2018, pp. 277–279 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

