



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

SILICON SOLAR THERMAL ELECTRIC PLANTS

Статья поступила в редакцию 27.04.18. Ред. рег. № 1321-2678-1 The article has entered in publishing office 27.04.18. Ed. reg. No. 1321-2678-1

УДК 53.06; 535; 538.9

ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В КРЕМНИИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕКСТУРОЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*

С. Зайнабидинов, Р. Алиев, М. Муйдинова

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

doi: 10.15518/isjaee.2019.28-33.015-022

Заключение совета рецензентов: 15.08.18 Заключение совета экспертов: 24.01.19 Принято к публикации: 18.05.19

Исследовано влияние текстурирования фронтальной поверхности и толщины базового поликристаллического и мультикристаллического кремния на основные параметры фотоэлектрических преобразователей энергии. Сопоставлены виртуальные и экспериментальные результаты зависимости фотоэлектрических характеристик от толщины базы.

При проведении экспериментов использована традиционная планарная диффузионная технология. В качестве базового материала применялись кремниевые однослойные эпитаксиальные слои с удельным электрическим сопротивлением $1\div 3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенные на подложках из низкоомного кремния с $0,001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Формирование эмиттерной области осуществлялось высокотемпературной диффузией. Концентрация легирующей примеси (фосфора) в эмиттерном слое составляла $10^{19}\div 10^{21}\text{см}^{-3}$.

Проведены измерения оптических характеристик фронтальной поверхности созданных фотоэлектрических преобразователей (ФП) и их вольт-амперных характеристик при освещении симулятором солнечного излучения. Произведено слияние результатов измерения основных фотоэлектрических параметров экспериментальных и виртуальных ФП в зависимости от толщины базового кремния. Расчетный анализ влияния толщины базы на фототок короткого замыкания кремниевого ФП с диффузионным p - n -переходом показал, что, если использовать способ текстурирования фронтальной поверхности, можно получить высокие значения плотности тока при существенно меньших значениях толщины. Произведены расчеты некоторых физических параметров процесса поглощения излучения в кремнии, в частности, зависимости глубины проникновения излучения от длины волны. Установлено, что расчетные значения коэффициента отражения от поверхности кремния приблизительно соответствуют экспериментальным данным, полученным для кремниевых ФП.

Полученные результаты подтверждены особенностями изменения глубины поглощения солнечного излучения в объеме кремния после взаимодействия с поверхностным рельефом или текстурой. Представляется целесообразным рассмотреть результаты данной работы в качестве основы для разработки метода по дальнейшему снижению толщины кремниевой базы для создания эффективных фотоэлектрических преобразователей энергии, что важно с экономической точки зрения.

*Зайнабидинов С., Алиев Р., Муйдинова М. Особенности поглощения излучения в кремнии с поверхностной текстурой и его влияние на свойства фотоэлектрических преобразователей // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;28-33:15-22.



Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь; мультикристаллический и поликристаллический кремний; нанокристаллические структуры; текстура; оптическое поглощение; антиотражающее покрытие; электронно-дырочные пары; эффективность преобразования.

THE FEATURES OF RADIATION ABSORPTION IN SILICON WITH SURFACIAL STRUCTURE AND ITS INFLUENCE ON PHOTOELECTRIC CONVERTERS PROPERTIES

S. Zainabidinov, R. Aliev, M. Muydinova

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

doi: 10.15518/isjaee.2019.28-33.015-022

Referred 15 August 2018 Received in revised form 24 January 2019 Accepted 18 May 2019

The paper researches the influence of front surfaces texturing and a thickness of basic polycrystalline and multi-crystalline silicon on the main photoelectric parameters of photoelectric converters. We have compared the virtual and experimental results of dependence of photoelectric parameters on a thickness of base.

In experiments, we have employed the planar diffuse technology. As a base material, the silicon single-layered epitaxial layers with resistivity of $1 \div 3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ which have been grown up on substrates from silicon with resistivity of $0.001 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ are used. Formation emitter areas has been carried out by high-temperature diffusion. The concentration of an alloying impurity (phosphorus) in an emitter layer is $10^{19} \div 10^{21} \text{ sm}^{-3}$.

We have made calculations of optical characteristics of a front surface the Solar cell (SC) and their voltage-current characteristics at illumination by a sunlight simulator and merge together the calculations results of the basic photoelectric parameters of experimental and virtual SC depending on a base silicon thickness. The settlement analysis of influence of a thickness of base on a Silicon SC photocurrent with diffuse p-n-junction shows that if to use a way of front surface texturing, it is possible to receive high values of a current at essentially smaller values of a thickness. Calculations of some physical parameters of radiation absorption in silicon are made, in particular, calculation of dependence of radiation absorption depth on its wave length. Settlement values of a factor of reflexing from a silicon surface approximately corresponds to the experimental data received for silicon SC. The results obtained are confirmed due to the peculiarities of changing the depth of absorption of solar radiation in the silicon volume after interaction with a surface relief or texture.

It is represent expedient to consider results of the work as the certificate for working out of a method of the further decrease in a thickness of silicon base for creation of effective photoelectric converters of energy that has important prospect on the economic point of view.

Keywords: photoelectric converter; multicrystalline and polycrystalline silicon; nanocrystalline structures; texture; the optical absorption; antireflection cover; electron-hole pairs; efficiency of conversion.



Сиражиддин
Зайнабидинович
Зайнабидинов
Sirajiddin Zainabidinov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики Андijanского государственного университета, академик АН РУз.

Образование: Ташкентский государственный университет им. Мирзо Улугбека (1971 г.).

Область научных интересов: полупроводниковое материаловедение и физические эффекты в легированных полупроводниках и многослойных структурах на их основе.

Публикации: более 500, включая 20 учебных пособий и монографий, 7 патентов.
h-index 3; ORCID 0000 0003 2943 5844

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor at Chair of Physics, Andijan State University, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

Education: Tashkent State University, 1971.

Research interests: semiconductor material science and physical effects in doped semiconductors and multilayered structures on their basis.

Publications: more than 500, including 20 monographs, and 7 patents.



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: D.Sc. 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.



Мадина Муйдинова
Madina Muidinova

Сведения об авторе: магистр, преподаватель кафедры физики Андижанского государственного университета.

Образование: Андижанский государственный университет (2014 г.).

Область научных интересов: физика полупроводников.

Публикации: 6.
h-index 3

Information about the author: M.Sc., Lecturer of Physics Department at Andizhan State University.

Education: Andijan State University, 2014.

Research interests: semiconductor physics.

Publications: 6.



1. Введение

Поглощение оптического излучения в слое полупроводника является исходным процессом в работе фотоэлектрических преобразователей (ФП). По кристаллическому составу материала поглощающего слоя ФП подразделяются на монокристаллические, мульткристаллические, поликристаллические, микрокристаллические и нанокристаллические [1]. Монокристаллические ФП представляют собой структуры с поглотителем в виде монолитного кристалла полупроводника. Мульти-, поли-, микро- и нанокристаллические ФП имеют в качестве поглощающего вещества смесь полупроводниковых кристаллитов с различной ориентацией, структурой и формой, размер которых и определяет тип ФП: при размерах кристаллитов от 1 мм до 100 мкм материал называют мульткристаллическим; от 1 мкм до 1 000 мкм – поликристаллическим; менее 1 мкм – микрокристаллическим; менее 1 нм – нанокристаллическим. В зависимости от толщины светопоглощающего материала ФП подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные. Тонкопленочные ФП имеют толщину в несколько мкм, толстопленочные – в десятки или сотни мкм. Использование тонких слоев является одним из способов снижения стоимости созданных на его основе ФП, главным образом за счет экономии расхода дорогостоящего полупроводникового материала.

Поскольку кремниевая технология достаточно разработана, для изготовления ФП в большинстве случаев (85 %) используется кремний. Однако ширина запрещенной зоны не является оптимальной для ФП, из-за чего поглощательная способность солнеч-

ного излучения невысокая. Эту проблему можно решить за счет конструктивных решений, способствующих существенному снижению отражения света от поверхности ФП [2], или каскадных ФП, способствующих повышению доли поглощенного излучения в материале ФП [3].

Технология получения мульти- и поли-Si более простая по сравнению с получением моно-Si, что позволяет снизить стоимость ФП. Однако присутствие границ зерен (ГЗ) в таких материалах снижает их качество. Дефекты на ГЗ создают рекомбинационные энергетические уровни в запрещенной зоне кремния, что приводит к снижению времени жизни носителей заряда (НЗ). Кроме того, ГЗ в качестве шунта могут оказать отрицательное электрическое влияние на процесс переноса НЗ через *p-n*-переход. Для предотвращения этого в мульти- и крупноблочном поли-Si, ГЗ ориентируются перпендикулярно (направленная кристаллизация) фронту *p-n*-перехода.

В целях расширения применения полупроводниковых ФП для нужд наземной энергетики необходимо существенно снизить их стоимость, которая главным образом формируется из стоимости базового материала. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния текстурирования фронтальной поверхности, что способствует снижению толщины базового полупроводника при сохранении доли поглощенного в нем оптического излучения. Получены результаты расчетного и экспериментального исследования влияния толщины мульти- и поликристаллического кремния с поверхностной рельефностью на фотоэлектрические характеристики созданных на их основе ФП.



Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Коэффициент поглощения
η	Коэффициент полезного действия, %
λ	Длина волны света, мкм/μ
ν	Частота оптического излучения
ρ	Удельное сопротивление, Ом · см
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
d	Толщина (базы), мкм/μ
ff	Коэффициент заполнения ВАХ
G	Скорость генерации
h	Постоянная Планка
I	Интенсивность светового потока
J	Плотность тока, мА/см ²
k	Коэффициент гашения оптического излучения
L	Диффузионная длина носителей заряда
N	Концентрация носителей заряда
N_p	Концентрация дырок
U	Напряжение, В
x	Глубина проникновения света
<u>Индексы нижние</u>	
0	Исходно падающий
от	Объем с поверхностной текстурой
о	Объем без поверхностной текстуры
кз	Короткое замыкание
хх	Холостой ход
<u>Аббревиатуры</u>	
АОП	Антиотражающее покрытие
ВАХ	Вольт-амперная характеристика
ГЗ	Границы зерен
ИК	Инфракрасное
НЗ	Носители заряда
ФП	Фотоэлектрический преобразователь

2. Теоретическая часть

Использование некристаллических слоев полупроводника является одним из основных методов снижения стоимости ФП. Выбор оптимальной толщины полупроводника, в частности некристаллического кремния, для создания эффективных ФП с достаточно низкой стоимостью является актуальной проблемой современной солнечной фотоэлектрической энергетики.

С другой стороны, формирование на поверхности кремния текстуры или нанотекстуры с нанесенным дополнительным антиотражающим покрытием (АОП) приводит к существенному снижению отражения нормально падающего излучения [4].

Исследования показывают, что текстура или вообще рельеф поверхности вызывает некоторое отклонение от обычного представления о линейно проникающем в объем кремния излучении [5]. Если схематически представить падающее на поверхность оптическое излучение, то легко заметить некоторое рассеяние в области текстуры из-за наличия многократного отражения от наклонных поверхностей (рис. 1). Можно увидеть различия в усредненной глубине проникновения света в объем материала с ($x_{от}$) и без ($x_о$) поверхностной текстуры.

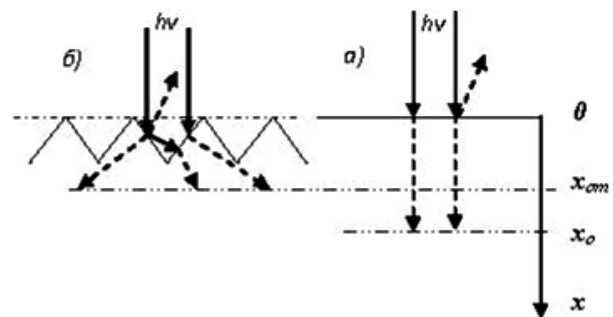


Рис. 1 – Схематический вид рассеяния и прохождения излучения на гладкой (а) и текстурированной (б) поверхности полупроводника

Fig. 1 – A schematic kind of dispersion and radiation passage on smooth (a) and textured (b) semiconductor surfaces

Можно увидеть различия в усредненной глубине проникновения света в объем материала с ($x_{от}$) и без ($x_о$) поверхностной текстуры.

3. Экспериментальная часть

В исследовании применялись два метода: 1) создание виртуальных ФП из стандартного мультикристаллического кремния с помощью программного обеспечения производственного процесса

«PVLighthouse» [6]; 2) создание экспериментальных ФП на основе поликристаллического кремния по технологии, описанной в [7]. Виртуальная технологическая линия [3] включает в себя последовательные операции: а) очистка и текстурирование поверхности пластин химическим травлением в кислотных растворах (HF, HNO₃); б) диффузия атомов фосфора на текстурированную и атомов бора на тыльную поверхность в высокотемпературной кварцевой печи; в) нанесение омических контактов на обе поверхности из Al/Ag; г) нанесение АОП из TiO₂ или SiN_x.

При выполнении экспериментов применялась технология, приближенная по режимам к описанной виртуальной технологии. В качестве базового материала использовались кремниевые однослойные эпитаксиальные слои $\rho \approx 1 \div 3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенные на подложках из низкоомного кремния с $\rho \approx 0,001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Формирование эмиттерной области в обоих методах осу-

ществлялось посредством высокотемпературной диффузии. Концентрация легирующей примеси (фосфора) в эмиттерном слое составляла $10^{19} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Проведены измерения оптических характеристик фронтальной поверхности созданных ФП и их ВАХ при освещении симулятором солнечного излучения. Произведено слияние результатов измерения основных фотоэлектрических параметров экспериментальных и виртуальных ФП в зависимости от толщины базового кремния.

4. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены кривые зависимости относительного отражения 1, внутренней 2 и внешней 3 квантовой эффективности изготовленных структур с поверхностной текстурой, рассчитанные по методике из работы [5].

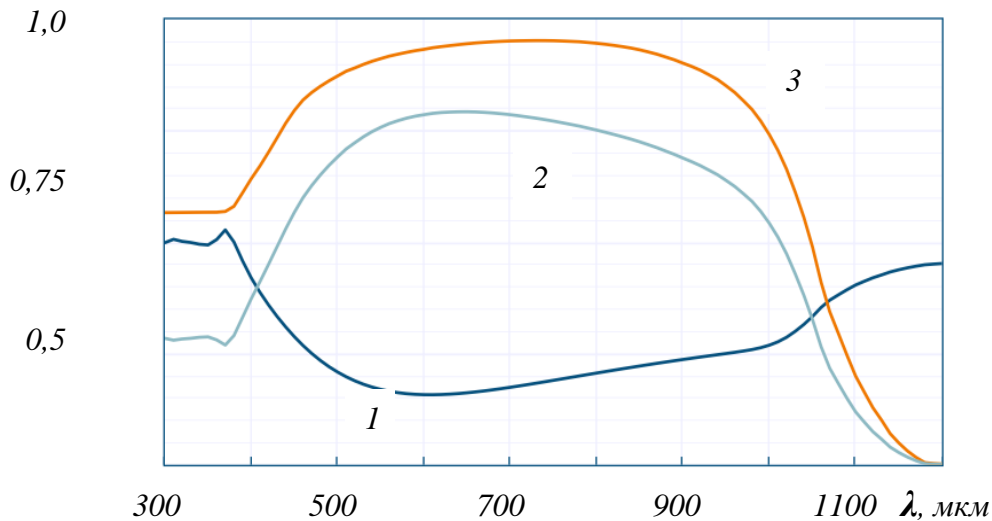


Рис. 2 – Спектральная зависимость отраженного от текстурированной поверхности 1 оптического излучения, а также внутренней 2 и внешней 3 квантовой эффективности изготовленных кремниевых структур
Fig. 2 – Spectral dependence of reflected from textured surfaces (1) optical radiations, and also internal (2) and external (3) quantum efficiency of the silicon structures

Для любого полупроводника, независимо от его кристалличности, поглощение излучения характеризуется через коэффициент поглощения, который определяется известным выражением [5]:

$$\alpha = 4\pi k / \lambda, \quad (1)$$

где k – коэффициент гашения оптического излучения; λ – длина волны излучения.

В результате поглощения в слое полупроводника уменьшается интенсивность излучения по выражению:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность излучения на поверхности; x – глубина проникновения излучения.

За счет энергии поглощенных фотонов генерируются электронно-дырочные пары, и путем дифференцирования предыдущего выражения (2) темп генерации можно выразить в виде:

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где N_0 – концентрация фотонов на поверхности.

Если сравнить данные рис. 2 с известными данными отражения света от гладкой поверхности кремния [8], то можно заметить существенное снижение отражения по всему спектру оптического излучения. Значения коэффициента отражения от поверхности кремния (рис. 2 кривая 1) приблизительно соответствуют экспериментальным данным, полученным для кремниевых ФП в работе [2].



На основе уравнений (1)–(3) произведены расчеты некоторых физических параметров процесса поглощения излучения в кремнии. В частности, выполнен расчет зависимости глубины Δx проникновения излу-

чения от его длины волны $\Delta x(\lambda)$ с помощью программы, предложенной в [5]. Результаты расчета $\Delta x(\lambda)$ в сопоставлении с зависимостью коэффициента поглощения от длины волны $\alpha(\lambda)$ представлены в табл. 1.

Таблица 1
Расчетные зависимости коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ и глубины проникновения излучения $\Delta x(\lambda)$ от длины волны

Table 1
Settlement dependences of absorption factor $\alpha(\lambda)$ and depth of penetration of radiation $\Delta x(\lambda)$ on wave length

λ , нм	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
α , см ⁻¹	$1,5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	$0,7 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^0$
Δx , мкм	$7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^0$	1·10	2·10	7·10	$1 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$

Можно отметить, что кремний является полупроводником с не прямозонной запрещенной зоной, ввиду этого в спектральной зависимости имеется длинный хвост поглощения в ИК-области. В табл. 1

не приведены данные в области $\lambda > 1\ 100$ мкм, так как при этом поглощение существенно уменьшается.

Скорость генерации электронно-дырочных пар при поглощении фотонов экспоненциально уменьшается по глубине (табл. 2).

Таблица 2
Изменение скорости генерации электронно-дырочных пар по глубине при поглощении фотонов в кремнии

Table 1
Speed change of generation of electron hole pairs in Silicon at absorption of photons on depth

Δx , мкм	0	50	100	150	200	250	300
g , м ⁻³	$6 \cdot 10^{21}$	$6 \cdot 10^{18}$	$1,6 \cdot 10^{18}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{17}$	$7 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{18}$

По результатам расчета и эксперимента можно заметить, что наиболее чувствительным к изменению толщины пластины параметром является плотность фототока $J_{кз}$, которая, увеличиваясь с коэффициентом $\Delta J_{кз}/\Delta d \approx 0,006$ мА/см²·мкм⁻¹ в диапазоне $d \approx 50 \div 150$ мкм, достигает максимального значения при толщине ~ 175 мкм (рис. 3).

Результаты свидетельствуют о некотором отклонении зависимости основных параметров ФП, особенно фототока к. з., от толщины базы, которая традиционно объясняется зависимостью коэффициента поглощения излучения от глубины проникновения. При этом надо учитывать, что поверхностная текстура или нанотекстура приводит к рассеянию света, уменьшая глубину линейного проникновения в объем. Следовательно, глубина проникновения света при этом тоже существенно отличается: $x_0 > x_{от}$ (см. рис. 1).

Другим более чувствительным к изменению толщины пластины параметром является коэффициент заполнения ВАХ ff , который, увеличиваясь с коэффициентом $\Delta ff/\Delta d \approx 0,0006$ мкм⁻¹ в диапазоне $d \approx 50 \div 150$ мкм, достигает максимального значения при толщине ~ 175 мкм (рис. 4). При толщине

кремниевой пластины от 150 мкм эффективность фотоэлектрического преобразования почти не меняется.

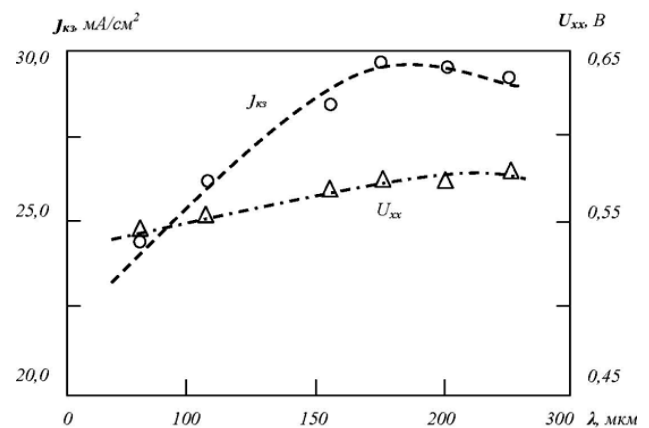


Рис. 3 – Зависимости основных фотоэлектрических параметров ($J_{кз}$ и $U_{кк}$) изготовленных кремниевых структур от толщины базового кремния (λ)

Fig. 3 – Dependences of the basic photoelectric parameters ($J_{кз}$ and $U_{кк}$) of the silicon structures on a thickness of basic silicon (λ)



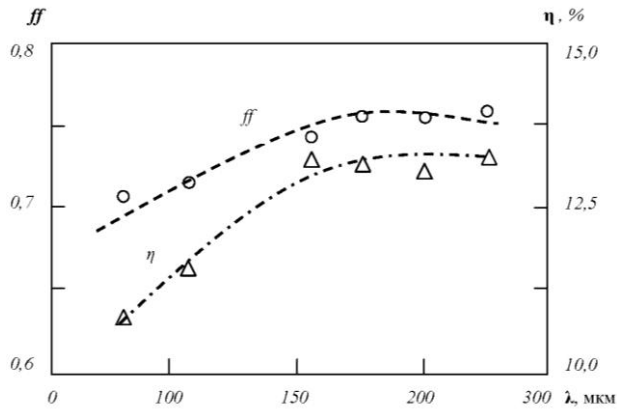


Рис. 4 – Зависимости основных фотоэлектрических параметров (ff и η) изготовленных кремниевых структур от толщины базового кремния (λ)

Fig. 4 – Dependences of the basic photoelectric parameters (ff and η) of the silicon structures from a thickness of base silicon (λ)

Влияние толщины базового кремния на значение фототока к. з. ФП без АОП на моно-, мульти- и поли-Si приведены в табл. 3. Расчетный анализ влияния толщины базы на фототок к. з. кремниевого ФП с диффузионным p - n -переходом показывает, что, если использовать способ текстурирования фронтальной поверхности, можно получить высокие значения плотности тока при существенно меньших значениях толщины. Другими словами, в таких случаях можно заменить толстые пластины кремния на тонкопленочные структуры. При уменьшении толщины на 3 порядка значение фототока к. з. уменьшается всего с 45 мА/см² до 36 мА/см² в случае применения метода текстурирования поверхности. Если рассмотреть традиционную структуру (без текстурирования), то аналогичное изменение составляет с 42 мА/см² до 12 мА/см² соответственно.

Таблица 3

Зависимость $J_{кз}$ фотоэлектрического преобразователя без антиотражающего покрытия от толщины кремниевой подложки

Table 3

Dependence of a photocurrent short circuit ($J_{кз}$) of photoelectrical converter without antireflection cover on thickness of silicon wafer

d , мкм	10	50	100	150	200	250	300
$J_{кз}$, мА/см ² для моно-Si	23	24	26,6	28,5	29	29,2	28
$J_{кз}$, мА/см ² для мульти-Si	22	23	25	27	28,3	28	27
$J_{кз}$, мА/см ² для поли-Si	20	23	24	24,4	24	23	22

Необходимо отметить, что программа [5] позволяет определить влияние и других параметров базового кремния, таких как удельное сопротивление ρ или концентрация легирующей примеси N_p , диффузионная длина L_p или время жизни НЗ τ_p на основные фотоэлектрические параметры созданных на основе этого материала ФП.

Так, представляют интерес результаты расчета влияния уровня легирования на значения напряжения холостого хода (U_{xx}) диффузионного p - n -перехода. Несмотря на ускоряющийся темп снижения L с ростом N_p в базе, особенно при уровнях легирования $N_p > 1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, имеет место неоднородное изменение U_{xx} с максимумом в области $N_p = 1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. При выборе удельного сопротивления базового материала для ФП как в случае моно-, так и в случае мультикристаллического кремния необходимо учитывать указанный факт. Для поликристаллического кремния, особенно для мелкозернистого, функция $L(N_p)$ может иметь совсем другой характер ввиду существенности влияния поверхностных состояний на ГЗ [9].

5. Заключение

Исследование влияния текстурирования фронтальной поверхности и толщины базового поликристаллического и мультикристаллического кремния

на основные фотоэлектрические параметры ФП показало, что имеется реальная возможность повышения эффективности ФП за счет усовершенствования их оптических свойств и существенного сокращения расхода кремния посредством уменьшения толщины базы ФП. Сопоставление виртуальных и экспериментальных ФП позволило осуществить слияние результатов зависимости их фотоэлектрических параметров от толщины базы. Полученные результаты обоснованы особенностями изменения глубины поглощения солнечного излучения в объеме кремния после взаимодействия с поверхностным рельефом или текстурой. Представляется целесообразным рассмотреть результаты данной работы в качестве основы для разработки метода по дальнейшему снижению толщины кремниевой базы для создания эффективных ФП, что имеет важную перспективу с экономической точки зрения.

Список литературы

- [1] Саидов, М.С. Легирование и пассивирование границ зерен солнечного поликристаллического кремния / М.С. Саидов // Гелиотехника. – 2004. – № 4. – С. 84–86.
- [2] Никитин, Б.А. Экспериментальная оценка коэффициента отражения кремниевых фотоэлектриче-



ских преобразователей / Б.А. Никитин, В.А. Гусаров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2016. – № 7–8. – С. 12–18.

[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» (ISJAEЕ). 2015;(21):24–29.

[4] Сычикова, Я.А. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на основе наноструктурированного кремния / Я.А. Сычикова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2015. – № 19. – С. 136–141.

[5] Алиев, Р. Улучшение оптических свойств наноструктурированием поверхности пленочного кремния, предназначенного для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии / Р. Алиев, К. Адамбаев, С. Алиев // Петербургский журнал электроники. – 2017– № 1 (86) – С. 18–22.

[6] Wenham, S.R. Manufacturing of screen printed solar cells through the virtual environment / S.R. Wenham, A. Bruce // Proceeding of PV in Europe - From PV Technology to Energy Solutions: Eds. J.–L. Bal, G. Silvestrini, A. Grassi et al. – Rome, Italy, WIP-Munich and ETA-Florence. – 2002. – P. 240–243.

[7] Алиев, Р. Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых p^+n-n^+ структурах / Р. Алиев // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31. – № 4. – С. 425–426.

[8] Заверюхин, Б.Н. Изменение коэффициента отражения излучения от поверхности полупроводников в спектральном диапазоне $\lambda = 0.2 \div 20 \mu\text{m}$ под воздействием ультразвуковых волн / Б.Н. Заверюхин, Н.Н. Заверюхина, О.М. Турсункулов // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – № 18. – С. 1–12.

[9] Алиева, Ж. Об аномальной подвижности носителей заряда в некристаллических полупроводниках / Ж. Алиева, М. Носиров // Узбекский физический журнал. – 2002. – № 2. – С. 133–135.

References

[1] Saidov M.S. Doping and passivation of grain borders of solar polycrystalline silicon (Legirovanie i passivirovanie granits zeren solnechnogo polikristallicheskogo kremniya). *Geliotekhnika*, 2004;(4):84–86 (in Russ.).

[2] Nikitin B.A., Gusarov V.A. Experimental estimation of factor of reflexion of silicon photo-electric con-

verters (Eksperimental'naya otsenka koeffitsienta otrazheniya kremnievykh fotoelektricheskikh preobrazovatelei). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEЕ)*, 2016;(7–8):12–18 (in Russ.).

[3] Nikitin B.A., Gusarov V.A. Estimation of optimum parametres and limiting characteristics of cascade silicon photoconverters (Otsenka optimal'nykh parametrov i predel'nykhk harakteristik kaskadnykh kremnievykh fotopreobrazovatelei). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEЕ)*, 2015;(21):24–29 (in Russ.).

[4] Sychikova Ya.A. Resource and power saving up technologies on a basis nanotextured silicon (Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na osnove nanostrukturirovannogo kremniya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEЕ)*, 2015;(19):136–141(in Russ.).

[5] Aliev R., Adambaev K., Aliev S. Improvement of optical properties nanotexturing of surfaces of the film silicon intended for manufacturing of photoelectric converters of energy (Uluchshenie opticheskikh svoystv nanostrukturirovaniem poverkhnosti plenochnogo kremniya, prednaznachennogo dlya izgotovleniya fotoelektricheskikh preobrazovatelei energii). *Peterburgskii zhurnal elektroniki*, 2017;1(86):18–22 (in Russ.).

[6] Wenham S.R., Bruce A. Manufacturing of screen printed solar cells through the virtual environment. Proceeding of PV in Europe – From PV Technology to Energy Solutions. Eds. J.–L. Bal, G. Silvestrini, A. Grassi et al., Rome, Italy, WIP-Munich and ETA-Florence, 2002; pp. 240–243.

[7] Aliev R. Injection strengthening of a photocurrent in polycrystalline silicon p^+p-p^+ structures (Inzhektionnoe usilenie fototoka v polikristallicheskikh kremnievykh p^+n-n^+ strukturakh). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1997; 31(4):425–426 (in Russ.).

[8] Zaveryukhin B.N., Zaveryukhina N.N., Tursunkulov O.M. Change of the light reflexion factor from a surface of semiconductors in a spectral range $\lambda = 0.2 \div 20 \mu\text{m}$ under the influence of ultrasonic waves (Izmenenie koeffitsienta otrazheniya izlucheniya ot poverkhnosti poluprovodnikov v spektral'nom diapazone $\lambda = 0.2 \div 20 \mu\text{m}$ pod vozdeistviem ul'trazvukovykh voln). *Pis'ma v ZhTF*, 2002; 28(18):1–12 (in Russ.).

[9] Alieva Zh., Nosirov M. About abnormal mobility of a charge carriers in not crystal semiconductors (Ob anomal'noi podvizhnosti nositelei zaryada v nekrystallicheskikh poluprovodnikakh). *Uzbekskii fizicheskii zhurnal*, 2002;(2):133–135 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

