

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск 220013, Беларусь

Поступила 23.11.2023

Принята к печати 24.04.2024

Точные и надёжные измерения суммарного потока солнечного излучения позволяют оценить эффективность использования наземных автономных фотоэлектрических систем энергообеспечения в различных метеорологических условиях. Это даёт возможность более точно прогнозировать во времени объёмы выработки энергии, параметры аккумуляторных и ёмкостных накопителей и сроки окупаемости затрат. Целью настоящей работы являлось создание полупроводниковой структуры и технологии фотоэлектрического преобразователя с двусторонней светочувствительностью и экстремально высокой эффективностью использования альбедо. Разработан фотоэлектрический датчик измерения интенсивности солнечного излучения с двусторонней светочувствительностью, который, в отличие от традиционных термоэлектрических пиранометров, является малоинерционным, а его спектральная чувствительность может быть достаточно близкой к этому показателю у силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволило оценивать уровень инсоляции, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра. Практически реализовано создание лабораторного измерительного стенда для проверки работоспособности датчика. Проведены моделирование и экспериментальные исследования характеристик датчика, подтверждающие адекватность модели и его работоспособность. Двусторонняя светочувствительность датчика позволяет одновременно с прямой и рассеянной составляющими солнечного излучения контролировать составляющую, отражённую от поверхности земли, давая более полную информацию об энергетическом потенциале Солнца в месте расположения фотоэлектрической системы электроснабжения.

Ключевые слова: поток солнечного излучения, фотоэлектрический датчик, двусторонняя светочувствительность, альбедо

Адрес для переписки:

Збышинская М.Е.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: 10mash@mail.ru

Address for correspondence:

Zbyshinskaya M.Y.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: 10mash@mail.ru

Для цитирования:

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская.
Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 2. С. 95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

For citation:

Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y.
Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(2):95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring

V.P. Vasilevich, M.Y. Zbyshinskaya

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus

Received 23.11.2023

Accepted for publication 24.04.2024

Abstract

Accurate and reliable measurements of the total solar radiation flux make it possible to evaluate the efficiency of using stand-alone photovoltaic systems in various meteorological conditions. These measurements allow more accurately predict in time the energy production volume, accumulator and capacitive storage devices parameters and the payback period. Research purpose was to study the possibility of creating a photoelectric sensor and a method of uninterrupted measurement based on this sensor which allows to measure total solar radiation flux including its direct, diffused and reflected components simultaneously. The photovoltaic sensor with bifacial photosensitivity was manufactured and applied, which is low-inertia comparing to traditional thermoelectric pyranometers, and its spectral sensitivity is quite close to the same parameter of photovoltaic power supply system. It creates the possibility to estimate the insolation level capable to be completely converted into electrical energy without an ineffective heat-generating long-wavelength part of the solar spectrum. A laboratory measuring stand was made to test the sensor's operability. Modeling and experiments' the sensor parameters were carried out and confirmed its operability. The bifacial photosensitivity sensor allows to control simultaneously direct, diffused and reflected from the earth's surface components of solar radiation, what gives more complete information about the energy potential of the photovoltaic power supply system location.

Keywords: solar radiation flux, photovoltaic sensor, bifacial photosensitivity, albedo

Адрес для переписки:

Збышинская М.Е.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: 10mash@mail.ru

Address for correspondence:

Zbyshinskaya M.Y.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: 10mash@mail.ru

Для цитирования:

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская.
Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 2. С. 95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

For citation:

Vasilevich VP, Zbyshinskaya MY.
Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring. *Devices and Methods of Measurements*. 2024;15(2):95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Введение

Как правило мониторинг интенсивности прямого, рассеянного и отражённого солнечного излучения метеорологическими станциями выполняется термоэлектрическими пиранометрами с плоской спектральной зависимостью, работа которых основана на термопарном эффекте Зеебека. Термопарный датчик пиранометра нагревается от солнечного излучения и преобразует повышение температуры в слабый электрический сигнал. Такие датчики предлагаются и для контроля инсоляции в системах солнечной энергетики, обладают высокой инерционностью (18–60 с), сложны в изготовлении и имеют высокую стоимость [1, 2].

Фотоэлектрический датчик солнечного излучения – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, преобразующий энергию фотонов в электроэнергию. Если внешняя цепь датчика замкнута, то в ней, при освещении светочувствительной стороны датчика, протекает ток, величина которого линейно зависит от интенсивности излучения. Совпадение спектра чувствительности датчика и солнечной батареи фотоэлектрической системы сводит к минимуму разброс данных из-за переменных спектральных условий. Инерционность фотоэлектрического датчика не более 10 мс, что на 3 порядка ниже, чем у термоэлектрического пиранометра. Датчики изготавливаются в виде диодной структуры из монокристаллического кремния, подключённой к шунту. Из-за низкого сопротивления шунта элемент работает в режиме, близком к короткому замыканию. Температурный коэффициент тока короткого замыкания создает незначительную погрешность [3].

Прототип фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с двусторонней светочувствительностью был создан в 1966 г., а уже в 1970-х гг. Россия впервые применила их в космосе для энергообеспечения спутников. В 1980 г. стало ясно, что дополнительное использование отражённого от поверхности земли солнечного излучения (альbedo) увеличивает мощность двусторонних солнечных элементов на (5–30) %, однако высокая себестоимость на долгое время задержала их промышленное производство [4].

Исследования двусторонних солнечных элементов (СЭ), выполненные на основе

монокристаллической кремниевой полупроводниковой подложке, базировались на определении вольтамперных (ВАХ), вольт-ваттных (ВВtX) характеристик и обеспечении внешней квантовой эффективности. Результаты показали, что двусторонние кремниевые СЭ – очень многообещающая технология с хорошими электрическими характеристиками и высоким значением эффективности фотопреобразования [5].

Создан коммерческий двусторонний СЭ на основе кремния *p*-типа с пассивацией поверхностей плёнкой нитрида кремния и рекордным КПД более 22 % и 15 % на фронтальной и тыльной сторонах соответственно при стандартных условиях измерения (АМ 1,5, 1000 Вт/м², 25 °С) [6].

В 2021 г. анализ рынка PV-индустрии показал, что двусторонние ФЭП в модульном исполнении стали доступны по той же цене за пиковый ватт, что и их односторонние эквиваленты. Причина этого в том, что модули из двусторонних СЭ требуют априори двойного остекления, и в то же время производители односторонних модулей чаще переходят на модули с двойным стеклом для увеличения срока службы таких модулей и продления гарантии на продукцию. Предполагается, что при использовании двусторонних модулей можно ожидать увеличения годовой выработки энергии до 30 % [7].

Современная двусторонняя солнечная фотоэлектрическая технология, основана на изучении почти 400 статей, опубликованных с 1979 г. Проведённые исследования направлены на повышение производительности и расширение общего вклада двусторонней технологии в быстро расширяющийся глобальный рынок солнечной энергии [8].

Запатентованы различные конструкции высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей с двусторонней светочувствительностью, использующих прямое и рассеянное излучение, а также альbedo [9–13].

Двусторонние фотоэлектрические модули являются многообещающей альтернативой обычным односторонним фотоэлектрическим модулям, однако индустрия двусторонних ФЭП до сих пор находится на стадии становления, и предстоит ещё много работы, прежде чем она станет полностью зрелой технологией.

Например, существует нерешённая задача по использованию этой технологии для постоянного мониторинга суммарного потока солнечного излучения, включая его отражённую составляющую, путём моделирования конструктивных и электрических характеристик ФЭП [14].

Целью настоящей работы являлось создание полупроводниковой структуры и технологии фотоэлектрического преобразователя с двусторонней светочувствительностью, а также экстремально высокой эффективностью использования альбедо.

Основная часть

Смоделирован фотоэлектрический датчик суммарного солнечного излучения на основе монокристаллического кремния, который использовался в качестве первичного преобразователя при измерениях интенсивности потока солнечного излучения, поступающей от Солнца, неба и от подстилающей поверхности земли. Фотоэлектрический датчик преобразует оптическое излучение в аналоговый электрический сигнал. Для моделирования полупроводниковой структуры ФЭП использована среда COMSOL Multiphysics.

Модельная полупроводниковая структура двустороннего датчика показана на рисунке 1. Как видно из рисунка, фотоэлектрический преобразователь с двусторонней светочувствительностью включал в себя спаянные между собой тыльными сторонами два идентичных СЭ, базовые области (1) которых, выполнены из кремния p -типа проводимости, легированного бором; эмиттерные области n -типа (2) СЭ, сформированные диффузией фосфора, образуют с базовыми областями гомогенные n - p -переходы; высоколегированные слои p -типа (3), полученные диффузией бора, образуют с базовой областью изотипные p - p -переходы; расположенные на тыльных сторонах СЭ сплошные металлические контакты (4) выполнены из химически осаждённого на кремний никеля, покрытого слоем припоя; на освещаемых сторонах СЭ металлические контактные сетки (5) выполнены из химически осаждённого на кремний никеля, покрытого слоем припоя; паяное соединение тыльных контактов (6); просветляющие плёнки из оксида

тантала Ta_2O_5 (7) расположены на эмиттерных областях СЭ; внешний металлический вывод (8) из медной фольги, покрытой слоем припоя; прямая и рассеянная составляющая светового потока (9); отражённая составляющая светового потока (10).

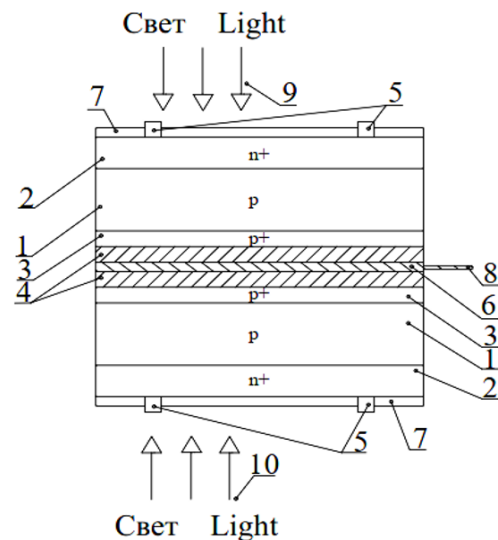


Рисунок 1 – Модельная полупроводниковая структура датчика с двусторонней светочувствительностью: 1 – базовые области; 2 – эмиттерные области; 3 – слой p -типа; 4 – металлические контакты; 5 – металлические контактные сетки; 6 – паяное соединение тыльных контактов; 7 – просветляющие плёнки; 8 – внешний металлический вывод; 9, 10 – световой поток

Figure 1 – Semiconductor structure of the sensor with bifacial photosensitivity: 1 – p -type base; 2 – n -type layer; 3 – p -type layer; 4 – metal contacts; 5 – grid metal contact; 6 – solder connection of the back contacts; 7 – antireflective film; 8 – external metal contact; 9, 10 – light flux

Технология изготовления двустороннего фотоэлектрического датчика легко реализуется на практике и не включает использования редких и драгоценных металлов. Применение для создания антиотражающего покрытия наноструктурированной плёнки оксида тантала толщиной 75 нм обусловлено простотой её нанесения методом центрифугирования из плёнообразующего раствора, аномально низким коэффициентом отражения света на длинах волн с максимальной энергией в диапазоне 0,5–0,7 мкм и химической стойкостью к электролиту для химического никелирования. Используемые для создания датчика два идентичных СЭ изготовлены на основе гомогенного кремниевого p - n -перехода имели КПД 18 %.

Новизна проведённых исследований заключается в оригинальности симметричной конструкции полупроводниковой структуры ФЭП с двусторонней светочувствительностью, содержащей два *p-n*-перехода для разделения носителей заряда вместо одного как у аналогов. Таким образом достигается одинаковая эффективность преобразования света как с фронтальной, так и с тыльной стороны ФЭП, в то время как у лучшего аналога КПД

с тыльной стороны значительно ниже, чем КПД с фронтальной: 15 % и 22 % соответственно [6].

Модель полупроводниковой структуры СЭ с двусторонней светочувствительностью получена на основе исходных данных, включая его структурные, электрические, оптические и геометрические параметры. Конструктивные параметры СЭ для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Исходные параметры моделируемой конструкции солнечного элемента

Parameters of the solar cell model

Параметр Parameter	Значение Value
Диаметр СЭ, мм SC diameter, mm	100
Толщина ФЭП, мкм Photovoltaic converter thickness, μm	350
Толщина базовых областей, мкм <i>p</i> -type base thickness, μm	150
Толщина эмиттера, мкм <i>n</i> ⁺ -type layer thickness, μm	1
Удельное сопротивление базы, Ом·см Base resistivity, $\text{Ohm}\cdot\text{cm}$	10
Поверхностное сопротивление эмиттера, Ом/□ <i>n</i> ⁺ -type layer surface resistance, Ohm/\square	40
Антиотражающее покрытие AR coating	Ta ₂ O ₅
Толщина слоя антиотражающего покрытия, нм AR coating thickness, nm	75
Фотоактивная площадь поверхности ФЭП, см ² Photoactive surface area of photovoltaic converter, cm^2	70x2
Площадь сетчатого металлического контакта, см ² Metal contact area, cm^2	6,6
Металлический контакт к кремнию Metal contact to silicon	Ni-припой ПОС-61 Ni-solder POS-61

При моделировании СЭ использовали следующие характеристики и допущения:

- стандартный спектр на поверхности Земли AM1,5G4;
- показатель преломления антиотражающего покрытия Ta₂O₅ 2,2;
- скорости генерации и рекомбинации носителей в зависимости от расстояния от поверхности СЭ при условии стандартного

солнечного спектра (AM 1.5).

В результате моделирования получены фотоэлектрические параметры СЭ: вольтамперная и вольт-ваттная характеристики при различных значениях интенсивности излучения. На рисунке 2 показаны результаты моделирования семейства вольтамперной, а на рисунке 3 – семейства вольт-ваттной характеристик СЭ.

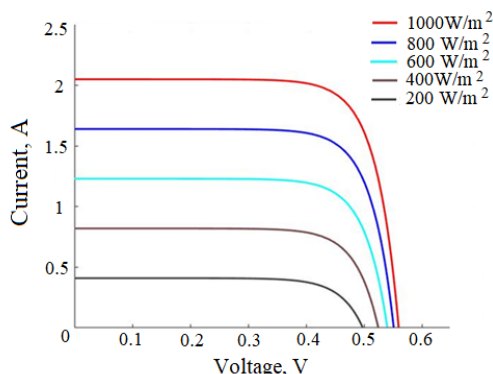


Рисунок 2 – Модельные вольтамперные характеристики солнечного элемента при различных условиях освещения

Figure 2 – Solar cell current-voltage curve model under various lighting conditions

Рисунки 2 и 3 демонстрируют полученные модельные семейства вольтамперных и вольт-

ваттных характеристик соответственно при различных значениях интенсивности солнечного излучения. Основные модельные электрические параметры СЭ, полученные из семейств ВАХ и ВВТХ сведены в таблицу 2.

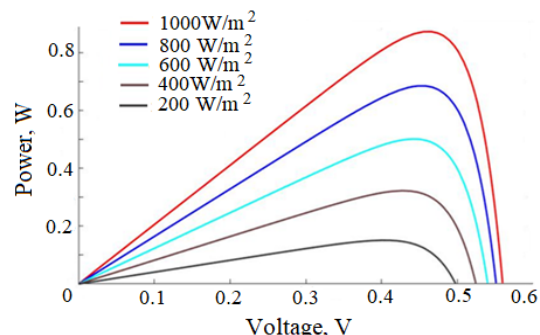


Рисунок 3 – Модельные вольт-ваттные характеристики солнечного элемента при различных условиях освещения

Figure 3 – Solar cell power-voltage curve model under various lighting conditions

Таблица 2/ Table 2

Основные электрические параметры солнечного элемента при условии интенсивности потока излучения 1000 Вт/м², спектр АМ 1,5

Main electrical characteristics of the solar cell under lighting condition AM 1,5

Параметры Parameters	Значение Value
Ток короткого замыкания, А Short circuit current, A	2.05
Напряжение холостого хода, В Open-circuit voltage	0.56
Ток максимальной мощности, А Maximum power current, A	1.79
Напряжение максимальной мощности, В Maximum power voltage, V	0.51
Максимальная мощность, Вт Maximum power voltage, W	0.92
Коэффициент заполнения, FF Fill factor, FF	0.78

В результате моделирования получена имитационная модель, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВТХ СЭ в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения. Разработанная модель описывает реальный

ФЭП лишь с некоторой степенью приближения, с учётом принятых допущений.

Изготовлен оригинальный трёхвыводной фотоэлектрический датчик диаметром 100 мм с двусторонней светочувствительностью

на основе монокристаллического кремния p -типа с симметричной относительно общей базовой области биполярной структурой $n+p-n+$. Датчик смонтирован на зеркальном пьедестале с помощью подвижного карданного устройства, позволяющего менять ориентацию датчика относительно пьедестала в различных плоскостях, создавая эффекты отражения света от подстилающей поверхности.

В процессе измерения параметров изготовленного датчика полученные результаты показали, что ток короткого замыкания ФЭП $I_{кз}$ практически линейно зависит от интенсивности света. Таким образом, можно утверждать, что, измеряя при освещении параметр $I_{кз}$, и при соответствующей калибровке можно получить идеальный измеритель интенсивности источника света с линейной шкалой.

Для проверки адекватности полученной модели и работоспособности разработанного датчика с двусторонней светочувствительностью собран лабораторный стенд по электрической схеме, изображённой на рисунке 4.

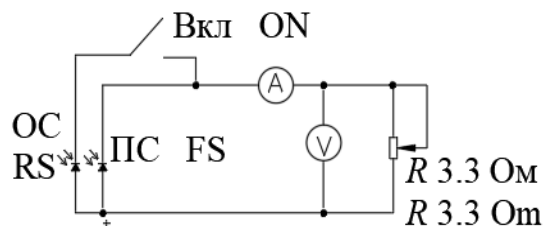


Рисунок 4 – Электрическая схема лабораторного стенда: ПС – прямая сторона датчика, обращённая к Солнцу; ОС – обратная сторона датчика, обращённая к зеркальному пьедесталу

Figure 4 – Electrical circuit of the laboratory equipment: FS – the forward side of the sensor turned to the Sun; RS – the reverse side of the sensor facing the mirror podium

Электрическая схема стенда позволила измерять параметры датчика: ток короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжение холостого хода $U_{хх}$ с фронтальной стороны и обеих светочувствительных сторон при натурном солнечном освещении одновременно, что снижало ошибку их сравнения. Экспериментальные, модельные и расчётные данные сведены в таблицу 3.

Таблица 3/ Table 3

Экспериментальные, расчётные и модельные параметры датчика

Experimental, calculated and model parameters of the sensor

Параметр датчика Sensor parameter	Фронтальная сторона Forward side	Тыльная сторона Reverse side	Обе стороны Both sides
Экспериментальные параметры при натурном солнечном излучении 1000 Вт/м ² Experimental parameters at full-scale solar radiation of 1000 W/m ²			
$I_{кз}$, А / I_{sc} , А	1.90	0.4	2.30
$U_{хх}$, В / ОСВ, V	0.560	0.558	0.560
Филл-фактор, FF / Fill Factor, FF	0.78	0.78	0.78
Альбедо, % / Albedo, %		20	
Мощность ФЭП, Вт / Photovoltaic converter power, W	0.830	0.174	1.005
Прирост мощности / Power increment			21
Модельные параметры при интенсивности излучения 1000 Вт/м ² Model parameters at a radiation intensity of 1000 W/m ²			
$I_{кз}$, А / I_{sc} , А	2.05	0.41	2.46
$U_{хх}$, В / ОСВ, V	0.560	0.560	0.560
Филл-фактор, FF / Fill Factor, FF	0.78	0.78	0.78
Альбедо, % / Albedo, %		20	
Мощность ФЭП, Вт / Photovoltaic converter power, W	0.895	0.179	1.074
Прирост мощности / Power increment			20

Как свидетельствуют данные таблицы 3, наблюдается хорошая сходимости данных по ключевым экспериментальным и модельным параметрам датчика, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Поскольку КПД с фронтальной и тыльной сторон в отличие от аналогов одинаковые, датчик имеет предельно высокий потенциал фотоэлектрического преобразования альbedo. Разработанный фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью после доработки и градуировки измерительного блока может быть использован для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Предложенная двусторонняя конструкция ФЭП из-за значительного прироста мощности на единицу площади может быть применена также в производстве силовых солнечных модулей.

Заключение

Для непрерывного мониторинга интенсивности солнечного излучения вместо термоэлектрического пиранометра предложено использовать кремниевый фотоэлектрический преобразователь (датчик) с двусторонней светочувствительностью, позволяющий в режиме реального времени отслеживать суммарный энергетический ресурс прямого, рассеянного и отражённого солнечного излучения. Такой датчик, в отличие от традиционных термоэлектрических пиранометров, является малоинерционным, а его спектральная чувствительность достаточно близка к этому же показателю силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволяет оценивать уровень инсоляции, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра.

Проведено моделирование полупроводниковой структуры датчика, его вольтамперных и вольтваттных характеристик при различной интенсивности солнечного излучения, что позволило определить модельные требования к конструктивно-технологическим и электрическим параметрам датчика с двусторонней светочувствительностью. Выполнены экспериментальные исследования параметров

изготовленного прототипа датчика, подтверждающие адекватность модели и работоспособность датчика

Проведены испытания прототипа в натуральных условиях при интенсивности прямого солнечного излучения 1000 Вт/м^2 . Интенсивность отражённого потока излучения, направляемого на тыльную сторону датчика, составляла 200 Вт/м^2 , соответственно, величина альbedo составляет 20 %. Прирост мощности за счёт фотоэлектрического преобразования альbedo составил 21 %, что является экстремальной величиной.

Список использованных источников

1. Основы солнечной энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа :<http://pvcdrom.pveducation.org/RU/index.html>. Дата доступа 20.09.2018.
2. Сайт компании KIPP&ZONEN [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>.
3. Сайт компании INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeier GmbH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ib-mut.de>.
4. Cuevas A. The early history of bifacial solar cells. Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2005, pp. 801–805.
5. Caruso M. Experimental Investigation and Characterization of Innovative Bifacial Silicon Solar Cells / M. Caruso [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 1996–2002. DOI: 10.20508/ijrer.v9i4.10029.g7805
6. Zhang C. Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22 % Using Laser Doped Selective Emitter / C. Zhang [et al.] // Energies, 2020, no. 13, vol. 6, pp. 1388–1400. DOI: 10.3390/en13061388
7. Kopecek R. Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges / R. Kopecek, J. Libal // Energies, 2021, vol. 8, no. 14, pp. 2076–2092. DOI: 10.3390/en14082076
8. Guerrero-Lemus R. Bifacial solar photovoltaics – A technology review / R. Guerrero-Lemus, R. Vega, Taehyeon Kim, L.E. Amy Kimm // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 60, pp. 1533–1549. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.041
9. Guerrero Pérez J, Torrano Carrillo J, Carpio Obre J, Teruel Hernández J. A. Patent ES, no. 4, 167, 472 A1, 2023.
10. Kim S.D., Bunea G. US Patent, no.20,140,116,495 A1, 2014.
11. Woo T, Yu J, Kim T, Lee E, Mun S., Hong J, Electronics INC. US Patent No.20,120,048,353 A1, 2012.

12. Заддэ В.В., Пинов А.Б., Тимербулатов Т.Р., Тимербулатов В.Т., Токарев В.Е. Конструкция и способ изготовления кремниевого фотопреобразователя с двусторонней фоточувствительностью. Патент RU 2432639. Бюл. 2011. № 30

13. Фотоэлектрический преобразователь с двусторонней светочувствительностью: пат. 13086 U, Респ. Беларусь: МПК (2006) H 01Q 17/00 / Василевич В.П., Збышинская М.Е.; заявл. 29.04.2022; опубл. 30.12.2022. – 5 с.

14. Garrod A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Front / A. Garrod, A. Ghosh // Energy*, 2023, no. 17, pp. 704–726. DOI: 10.1007/s11708-023-0903-7

References

1. Obuchayushchij resurs Osnovy solnechnoj energetiki [Website of Solar Energy Basics]. Available at: <http://pvcdrom.pveducation.org/RU/index.html> [Accessed 20.09.2018].

2. Sajt kompanii KIPP&ZONEN [Website of KIPP&ZONEN]. Available at: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>.

3. Sajt kompanii INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeyer GmbH [Website of INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeyer GmbH]. Available at: <http://www.ib-mut.de>.

4. Cuevas A. The early history of bifacial solar cells. *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2005;801–805.

5. Caruso M, Galluzzo FR, Zumbo L, Acciari G, Adamo G, Ala G, Busacca A, Gerardi C, Lombardo S, Miceli R, Parisi A, Schettino G, Viola F. Experimental Investigation and Characterization of Innovative Bifacial Silicon Solar Cells. *International Journal of Renewable*

Energy Research. 2019;9(4):1996–2002.

DOI: 10.20508/ijrer.v9i4.10029.g7805

6. Zhang C, Shen H, Sun L, Yang J, Wu S, Lu Z. Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22 % Using Laser Doped Selective Emitter. *Energies*. 2020;6(13):1388–1400. DOI: 10.3390/en13061388

7. Kopecek R, Libal J. Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges. *Energies*, 2021;8(14):2076–2092.

DOI: 10.3390/en14082076

8. Guerrero-Lemus R, Vega R, Kim Taehyeon, Kimm Amy, Shephard LE. Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;60:1533–1549.

DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.041

9. Guerrero Pérez J, Torrano Carrillo J, Carpio Obre J, Teruel Hernández J. A. Patent ES, no. 4, 167, 472 A1, 2023.

10. Kim S. D., Bunea G. US Patent, no. 20,140,116,495 A1, 2014.

11. Woo T, Yu J, Kim T, Lee E, Mun S, Hong J, Electronics INC. US Patent No. 20,120,048,353 A1, 2012.

12. Zаддэ ВВ, Пинов АВ, Тимербулатов ТР, Тимербулатов ВТ, Токарев ВВ. Конструкция и способ изготовления кремниевого фотопреобразователя с двусторонней фоточувствительностью [Design and manufacturing method of a silicon photoconverter with bifacial photosensitivity]. Patent RF, no 2432639, 2011.

13. Василевич ВП, Збышинская МЯ. Фотоэлектрический преобразователь с двусторонней светочувствительностью [Bifacial solar photovoltaic converter]. Patent RB, no 13086 U, 2022.

14. Garrod A, Ghosh A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Front. Energy*, 2023;(17):704–726. DOI: 10.1007/s11708-023-0903-7