

УДК 621.383

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ МОДУЛИ С НАПРЯЖЕНИЕМ 1 000 В

В.А. Панченко, Д.С. Стребков, В.И. Поляков, Ю.Д. Арбузов

ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ)
РФ 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2
тел.: +7(926)275-21-04; e-mail: pancheska@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.010

Заключение совета рецензентов: 07.10.15 Заключение совета экспертов: 15.10.15 Принято к публикации: 23.10.15

В статье приведён обзор исследований высоковольтных матричных солнечных модулей. Высоковольтный солнечный модуль с двухсторонней рабочей поверхностью выполнен в виде матрицы из коммутированных миниатюрных солнечных элементов (микроСЭ), у которых один или два линейных размера соизмеримы с диффузионной длиной неосновных носителей тока в базовой области, а плоскости *p-n*-переходов перпендикулярны рабочей поверхности высоковольтного солнечного модуля (ВСМ). При работе высоковольтных солнечных модулей совместно с концентраторами солнечного излучения заметно улучшаются электрические характеристики по сравнению с работой солнечных элементов без концентраторов. ВСМ третьего поколения с КПД 20–24 % разработаны и изготовлены на экспериментально-технологическом участке ФГБНУ ВИЭСХ, а испытаны при концентрированном солнечном излучении в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», (г. Харьков, Украина).

Ключевые слова: высоковольтные солнечные модули, матричные солнечные модули, эффективность, постоянное напряжение, полисилоксановый компаунд.

HIGH-VOLTAGE SOLAR MODULES WITH A VOLTAGE OF 1000 V

V.A. Panchenko, D.S. Strebkov, V.I. Polyakov, Yu.D. Arbuzov

All-Russian Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture
2, 1st Veshnyakovsky dr., Moscow, 109456 Russian Federation
ph.: +7(926)275-21-04, e-mail: pancheska@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.010

Referred 7 October 2015 Received in revised form 15 October 2015 Accepted 23 October 2015

The paper deals with the study of high-voltage matrix solar modules. The high-voltage solar module with two-sided working surface is in the form of a matrix of switched miniature solar cells, in which one or two linear dimensions are comparable with the diffusion length of minority carriers in the base region, and the plane of *p-n* junctions are perpendicular to the working surface of the high-voltage solar module. Using high-voltage solar modules together with solar radiation concentrators markedly improves the electrical characteristics of the solar cells compared to the work without a concentrator. Third generation high-voltage matrix solar modules with efficiency of 20–24 % were designed and manufactured in the experimental area of the process of the VIESH and tested under concentrated solar radiation in National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine.

Keywords: high-voltage solar modules, matrix solar modules, efficiency, constant voltage, polysiloxane compound.



Панченко
Владимир Анатольевич
Vladimir A. Panchenko

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией солнечных фотоэлектрических модулей, ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Область научных интересов: солнечная энергетика, автономное энергоснабжение, сельское хозяйство.

Публикации: 42.

Information about the author: PhD (engineering), the Head of the Laboratory of Solar Photovoltaic Modules, VIESH.

Education: Bauman Moscow State Technical University.

Research area: solar energy, autonomous power supply, agriculture.

Publications: 42.



Стребков Дмитрий Семёнович
Dmitriy S. Strebkov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, научный руководитель института, ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, МГУ им. М.В. Ломоносова.

Область научных интересов: возобновляемая энергетика, автономное энергоснабжение, сельское хозяйство.

Публикации: 1 340.

Information about the author: DSc (engineering), the scientific director of the institute, VIESH.

Education: Moscow Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture; Lomonosov Moscow State University.

Research area: renewable energy, autonomous power supply, agriculture.

Publications: 1 340.



Поляков Владимир Иванович
Vladimir I. Polyakov

Сведения об авторе: начальник экспериментально-технологического участка, ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: Военная академия РВСН имени Петра Великого.

Область научных интересов: солнечные элементы, полупроводники.

Публикации: 41.

Information about the author: Head of Experimental Technology Section, VIESH.

Education: Military Academy of Strategic Rocket Forces.

Research area: solar cells, semiconductors.

Publications: 41.



Арбузов Юрий Дмитриевич
Yuriy D. Arbuзов

Сведения об авторе: канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ ВИЭСХ.

Образование: Московский физико-технический институт.

Область научных интересов: солнечные элементы, полупроводники.

Публикации: 162.

Information about the author: PhD (engineering), leading researcher, VIESH.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology.

Research area: solar cells, semiconductors.

Publications: 162.

Введение

Все известные современные планарные солнечные элементы из кремния не используются при концентрированном солнечном излучении из-за резкого снижения эффективности при увеличении освещённости. В настоящее время большинство мировых производителей изготавливают солнечные элементы из кремния с эффективностью 15–18 %, а в массовом производстве для повышения эффективности до 25 % и более нужны новые физические принципы, новые конструкции и технологии. В технологии матричных солнечных модулей (высоковольтных сол-

нечных модулей – ВСМ) предлагается разделить пространственно освещаемые поверхности солнечного элемента на области генерации носителей заряда и области с $p-n$ -переходом, ответственные за разделение и сбор носителей. При этом площадь легированного слоя, $p-n$ -перехода и $p-p^+$ -перехода на освещаемых поверхностях снижена более чем в 50 раз, а 99 % площади поверхности отведено для генерации электронно-дырочных пар при прямом взаимодействии квантов солнечного излучения с базовой областью солнечного элемента. Целью рассматриваемой технологии является создание высокоэффективных высоковольтных солнечных модулей третье-

го поколения на основе монокристаллического кремния с рабочим напряжением до 1 000 В, эффективностью 20 % и более при концентрированном солнечном излучении.

Свойства высоковольтного солнечного модуля

На рисунке 1 ВСМ состоит из миниатюрных солнечных элементов 1, содержащих *p-n*-переходы 2, изотопные переходы 3, базовую область *n*-типа 4 и легированный изотопный *p*⁺ слой 5, внешние металлические контакты 6, внутренние металлические контакты 7, пассивирующую пленку 8, просветляющее покрытие 9 на рабочей поверхности 10. При этом *p-n*-переходы 2 расположены перпендикулярно рабочей поверхности 10. Один или два линейных размера миниатюрных солнечных элементов 1 соизмеримы с диффузионной длиной неосновных носителей тока в базовой области 4. Пассивирующая пленка 8 толщиной 10–30 нм расположена на свободной от *p-n*-переходов поверхности 10.

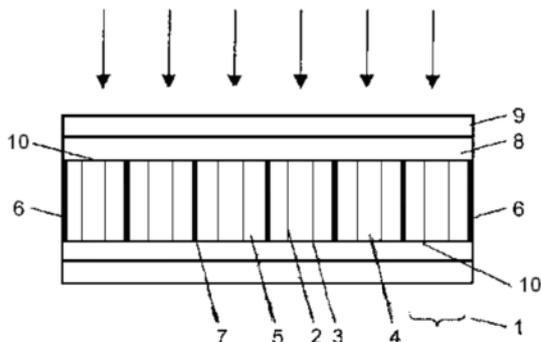
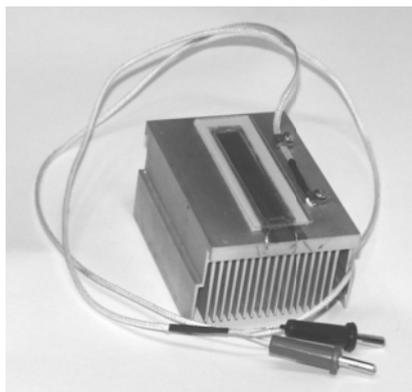


Рис. 1. Высоковольтный солнечный модуль
Fig. 1. High-voltage solar module



а

Рис. 3. Секция высоковольтного солнечного модуля с радиатором воздушного охлаждения (а). Вольтамперные характеристики высоковольтного солнечного модуля с размерами 10 x 60 x 0,4 мм (б): 1' – освещенность 102 кВт/м², КПД 24 %; 1'' – 493 кВт/м², КПД 20 %; 2 – ВАН планарного солнечного модуля размером 1,2 x 0,54 м при освещенности 1 кВт/м², КПД 12 %

Fig. 3. Section of high-voltage solar module with the air-cooling radiator (a).

Current-voltage characteristics of high-voltage solar module with dimensions of 10 x 60 x 0.4 mm (б):

1' – illumination 102 kW/m², efficiency 24 %; 1'' – 493 kW/m², efficiency 20 %;

2 – current-voltage characteristics planar solar module with dimensions 1.2 x 0.54 m at the illumination 1 kW/m², efficiency 12 %

Характеристики ВСМ с размерами 1 см² x 1 см²

На рисунке 2 представлена вольтамперная характеристика ВСМ с КПД 20–24 %, испытанного в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина профессором Г.С. Хрипуновым и кандидатом технических наук В.Р. Копац.

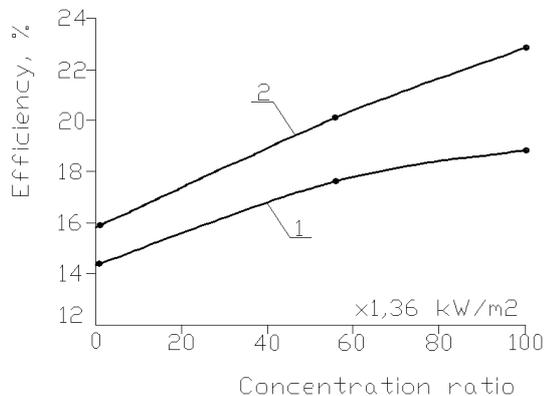
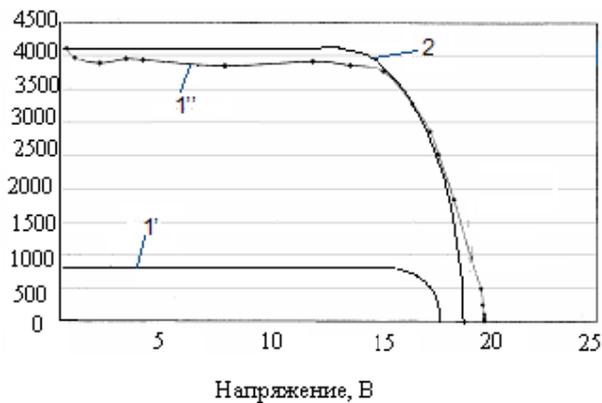


Рис. 2. Зависимость эффективности высоковольтного солнечного модуля (1 см x 1 см) от интенсивности солнечного излучения с использованием импульсного симулятора солнечного излучения: 1 – при одностороннем освещении и закрытой тыльной поверхности; 2 – при одностороннем освещении и открытой тыльной поверхности

Fig. 2. The dependence of the efficiency of high-voltage solar module (1 cm x 1 cm) on the intensity of solar radiation using a pulse simulator of solar radiation:

1 – with one-sided illumination and closed the back surface; 2 – with one-sided lighting, and an open rear surface

Экспериментальные характеристики ВСМ с размерами 1 см² x 6 см²



б

На рис. 3а показана секция ВСМ с размерами $10 \times 60 \times 0,4$ мм в оболочке из стекла с полисилоксановым компаундом, содержащая 25 микроэлементов и установленная на воздушном радиаторе. Общая ширина контактов всех солнечных фотоэлектрических микроэлементов на рабочей поверхности составила 150 мкм [1]. На рис. 3б представлены вольтамперные характеристики ВСМ размером $10 \times 60 \times 0,4$ мм с радиатором воздушного охлаждения при различной освещенности. При концентрированном импульсном освещении с плотностью потока $102,5 \text{ кВт/м}^2$ КПД ВСМ площадью 6 см^2 составил 24 %, рабочее напряжение 16,3 В, рабочий ток 0,9 А, фото-ЭДС 19 В (кривая 1'). Сила тока короткого замыкания ВСМ линейно увеличивается с ростом освещенности, напряжение растёт, как и коэффициент заполнения, что повышает КПД до 24 % при освещенности $102,5 \text{ кВт/м}^2$. Электрическая мощность 59,16 Вт получена при освещенности 493 кВт/м^2 и КПД ВСМ 20 % (рисунок 3б, кривая 1').

Таким образом, ВСМ площадью 6 см^2 при интенсивности освещения 493 кВт/м^2 имеет электрическую мощность 60 Вт, рабочее напряжение 15 В и силу тока 4 А, равную пиковой мощности, напряжению и силе тока традиционного фотоэлектрического модуля на основе планарных кремниевых солнечных

элементов при стандартной освещенности 1 кВт/м^2 и температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Двусторонний высоковольтный солнечный модуль с напряжением 1 000 В

Двусторонний матричный ВСМ с размерами $0,7 \text{ м} \times 0,1 \text{ м}$ (рис. 4) предназначен для создания солнечных электростанций постоянного тока с высоким напряжением (более 1 000 В). Столь высокое напряжение позволяет использовать модули с бестрансформаторными инверторами и присоединять их к высоковольтным линиям постоянного тока с напряжением 110–500 кВ без преобразовательных подстанций. Эффективность разработки заметна при использовании матричного ВСМ с концентраторами по сравнению с планарным ВСМ (одинаковой мощности). Матричный солнечный модуль длиной 0,7 м имеет напряжение холостого хода 1 059 В и рабочее напряжение 900 В. Стоимость же преобразовательных подстанций составляет до 30 % от стоимости солнечных электростанций, а для получения рабочего напряжения 900 В с использованием традиционных планарных солнечных модулей потребуется соединить последовательно более 1 500 планарных солнечных элементов с размерами 156×156 мм каждый.

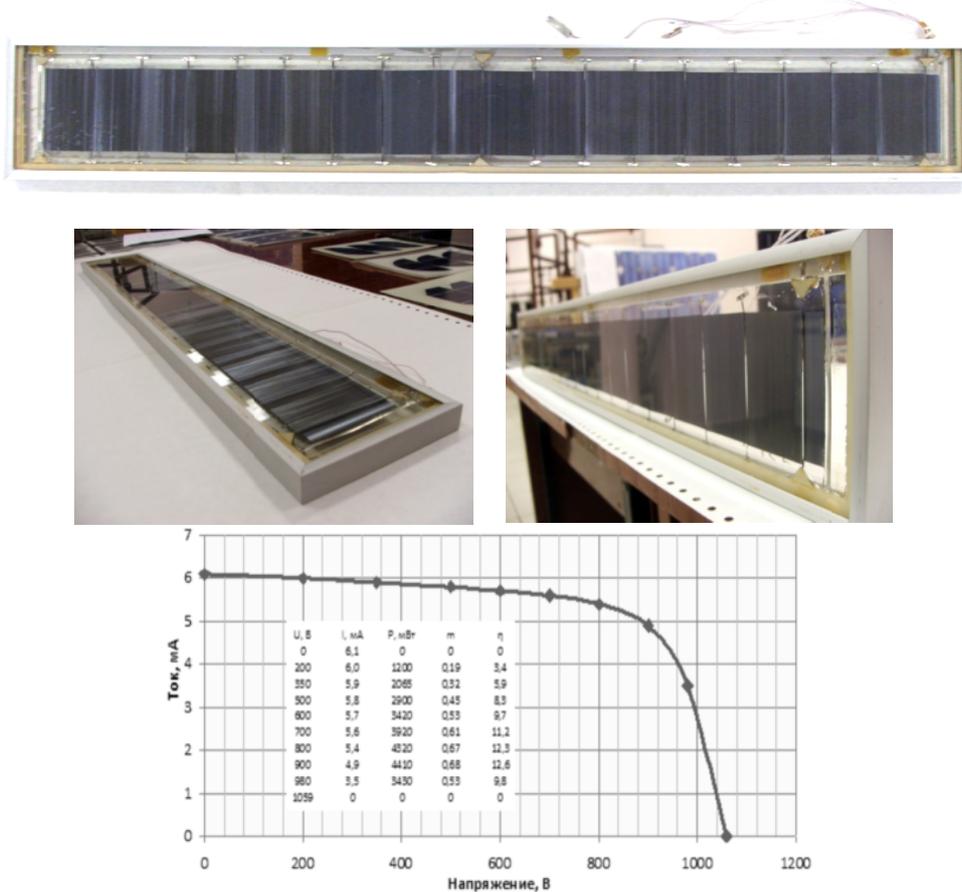


Рис. 4. Высоковольтный матричный солнечный модуль с размерами $0,7 \text{ м} \times 0,1 \text{ м}$ и его вольтамперная характеристика без концентрации солнечного излучения
 Fig. 4. High-voltage matrix solar module with dimensions of $0.7 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ and its current-voltage characteristic without concentration solar radiation

Параметры ВСМ при естественном солнечном освещении (814 Вт/м²) без концентрации представлены в таблице 1.

Параметры ВСМ с размерами 0,7 м x 0,1 м при естественном солнечном освещении (814 Вт/м²)

Таблица 1

Parameters of the HVSM with the sizes 0.7 m x 0.1 m with natural sunlight (814 W / m²)

Table 1

Общие размеры солнечного модуля: Длина, мм Ширина, мм Толщина, мм Масса модуля, кг Гарантийный срок номинальной мощности, лет Заполнитель-герметик Возможность использования с концентраторами солнечного излучения Рост силы тока при концентрации солнечного излучения Рост КПД при концентрации солнечного излучения	703 105 17 1,8 40–50 Двухкомпонентный полисилоксановый компаунд Есть (1–500 крат и более, ограничена свойствами концентратора) Линейный КПД увеличивается (нелинейно)
Размеры единичного фотоэлемента: Длина, мм Ширина, мм Толщина, мм Количество в модуле, шт	35 60 0,3 18
Показатели без концентрации: Напряжение холостого хода, В Сила тока короткого замыкания, мА Напряжение в рабочей точке, В Сила тока в рабочей точке, мА Мощность (одна сторона), Вт Коэффициент заполнения ВАХ КПД фотопреобразования (без концентрации), %	1059 6,1 900 4,9 4,4 0,68 12,6

ВСМ состоит из определённого количества последовательно соединённых секций. Суммируя ВАХ всех секций, можно рассчитать параметры ВАХ ВСМ размером 650 × 60 мм при освещённости 51 кВт/м², где сила тока короткого замыкания составляет 337 мА, фото-ЭДС 1 559 В, рабочее напряжение 1 365 В, коэффициент заполнения ВАХ 0,78, сила тока в рабочей точке 0,3 А, оптимальная мощность 409 Вт, КПД 20,42 %. Последовательная коммутация 370 высоковольтных модулей в солнечной электростанции позволит получить выходное напряжение 500 кВ при электрической мощности 151,3 кВт. Дальнейшее увеличение мощности можно получить при параллельном соединении ВСМ.

Результаты экспериментов и выводы

Сравнение характеристик планарных [2] и высоковольтных матричных солнечных модулей из монокристаллического кремния представлено в таблице 2. ВСМ имеют двустороннюю рабочую поверхность. За счёт отражения солнечного излучения на тыльную поверхность, электрическая мощность и КПД модуля растут, и это надо учитывать при сравнении планарных и высоковольтных солнечных модулей. Также ВСМ служат в 2 раза дольше (40–50 лет) в сравнении с зарубежными планарными солнечными модулями, КПД 20–24 % при 50–200 кратной концентрации, причём такое значение КПД сохраняется при повышении температуры до 60 °С, что упрощает систему охлаждения модулей, а сила тока модуля растёт пропорционально концентрации.



Сравнение характеристик планарных и высоковольтных солнечных модулей

Comparison of the planar and high-voltage solar modules characteristics

Параметр	Высоковольтный солнечный модуль (технология заливки компаундом)	Планарный солнечный модуль (технология ламинирования)
Напряжение, В	1 000	12, 24
Гарантийный срок номинальной мощности, лет	40 – 50 [3,4]	20–25
Средний КПД при солнечном излучении 1 кВт/м ² , спектре АМ 1,5 и температуре 25 °С, %	12–14	15,1
КПД при концентрированном солнечном излучении 100 кВт/м ² , спектре АМ 1,5 и температуре 25 °С, %	20 – 24	1
Температура эксплуатации	–30 ÷ + 60 °С	–50 ÷ + 250 °С
Стойкость к ультрафиолету	высокая	низкая
Корродирующий агент при изготовлении	нет	уксусная кислота
Корродирующий агент при старении	нет	уксусная кислота
Механическое напряжение изготовления старение	нет	да
	нет	да
Прозрачность для солнечного излучения с различными длинами волн	90 % ($\lambda = 360$ нм)	8 % ($\lambda = 360$ нм)
	92 % ($\lambda = 400$ нм)	62 % ($\lambda = 400$ нм)
	93 % ($\lambda = 600 \div 1\,000$ нм)	91 % ($\lambda = 600 \div 1\,000$ нм)

Технология производства ВСМ адаптирована к условиям промышленного производства, в ней не используются многостадийная диффузия, фотолитография, сеткография, вакуумная металлизация и т.д., исключено применение серебра. Стоимость производства ВСМ соизмерима со стоимостью планарных модулей в расчёте на единицу площади. Развитие технологии ВСМ третьего поколения на основе монокристаллического кремния позволит создать солнечные электростанции с концентраторами с более низкими удельными затратами на 1 кВт установленной мощности и более высокой эффективностью производства электроэнергии по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на угле.

Список литературы

1. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А., Осьмаков М.И., Плохих С.А. Солнечная установка с матричными фотоэлементами и концентратором // *Электро*. 2013. № 2. С. 50–52.
2. Panchenko V.A. Review and applications of solar modules developed and produced by GNU VIESH // *Research in Agricultural Electric Engineering*. 2014. Vol. 2, № 3. P. 82–89.
3. Стребков Д.С., Персик И.С., Чирков А.В., Кузнецов К.В. Опыт-промышленная технология производства фотоэлектрических модулей и комплект оборудования для её реализации // *Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве»*, Ч. 4: Возобновляемые источники энер-

гии. Местные энергоресурсы. Экология» (Москва, 18–19 мая 2010 г.). М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. С. 87–92.

4. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S., Libra M. Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology // *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 3103–3108.

References

1. Strebkov D.S., Majorov V.A., Panchenko V.A., Os'makov M.I., Plohih S.A. Solnečnaâ ustanovka s matričnymi fotoèlementami i koncentratorom. *Èлектро*, 2013, no. 2, pp. 50–52 (in Russ.).
2. Panchenko V.A. Review and applications of solar modules developed and produced by GNU VIESH. *Research in Agricultural Electric Engineering*, 2014, vol. 2, no. 3, pp 82–89 (in Eng.).
3. Strebkov D.S., Persits I.S., Chirkov A.V., Kuznetsov K.V. Opytno-promyšlennââ tehnologiâ proizvodstva fotoèlektričeskikh modulej i komplet oborudovaniâ dlâ eë realizacii. *Trudy 7th Meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii “Ènergoobespečenie i ènergobereženie v sel'skom hozâjstve”*, part 4: “Vozobnovljæmye istočniki ènergii. Mestnye ènergoresursy. Èkologiâ” (Moscow, 18–19 May 2010). Moscow: GNU VIESH Publ., 2010, pp. 87–92 (in Russ.).
4. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S., Libra M. Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. *Solar Energy*, 2012, vol. 86, pp. 3103–3108 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

