

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАТРИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

*В. К. Борисов, кандидат технических наук  
В. И. Поляков, инженер  
ФГБНУ «Всероссийский институт электрификации  
сельского хозяйства», г. Москва, Россия  
e-mail: vforest41@mail.ru*

**Аннотация.** Разработаны высоковольтные кремниевые матричные солнечные элементы (МСЭ) с эффективностью преобразования 29,26% при 56-кратной концентрации солнечного света. Высокая эффективность преобразования достигнута в результате использования в технологии изготовления МСЭ защитного покрытия из оксида алюминия, получаемого комбинацией методов атомно-слоевого осаждения и осаждения из коллоидно-дисперсного раствора  $Al_2O_3$  в воде.

**Ключевые слова:** матричный солнечный элемент, концентрация солнечного излучения, пассивирующее и просветляющее покрытия, оксид алюминия, вольт-амперная характеристика, эффективность преобразования

С целью получения высокого удельного напряжения и мощности необходимо последовательно объединять СЭ с небольшим линейным размером базы, что невозможно для планарных СЭ, освещаемых нормально плоскости  $p$ - $n$  перехода. При последовательном соединении тонких  $p$ - $n$ -структур (микроэлементов), освещаемых параллельно плоскости  $p$ - $n$  перехода, фото-эдс микроэлементов суммируется. Конструкция фотоприёмников с вертикально расположенными  $p$ - $n$ -переходами получила название матричные солнечные элементы [1]. Для эффективного разделения фотогенерированных носителей тока на  $p$ - $n$ -переходах необходимо, чтобы диффузионная длина пробега неосновных носителей заряда (ННЗ) в базовой области микроэлементов была меньше толщины базы. Росту плотности напряжения у МСЭ способствует увеличение количества  $p$ - $n$ -переходов, число которых может достигать 40–50 на 1 линейном см длины МСЭ и, соответственно, удельные генерируемые напряжения более (20–25) В/см<sup>2</sup>.

В матричных СЭ пропорционально площади микроэлемента снижается фототок преобразователя. С целью увеличения КПД и вырабатываемой мощности, целесообразно использовать высоковольтные МСЭ с концентраторами солнечного излучения (КСИ). При использовании КСИ фототок, а, следовательно, и мощность,

возрастают пропорционально концентрации СИ. При этом стоимость энергии, вырабатываемой солнечными станциями, построенными на МСЭ, снижается за счёт уменьшения количества используемого кремния, который заменяется более дешевыми зеркальными отражателями концентраторов. Дополнительным преимуществом использования матричных приёмников в солнечных электростанциях над планарными СЭ является возможность преобразования генерированной фото-эдс. Преобразовывать напряжения с плотностью  $(20-25) \text{ В/см}^2$  у МСЭ к сетевому гораздо легче, чем  $0,6 \text{ В}$ , получаемых у планарных СЭ.

Матричные солнечные элементы имеют теоретический КПД порядка 44%. При освещённости большей  $100\,000 \text{ кВт/м}^2$  происходит испарение кремния. Реально использовать МСЭ при концентрациях света, превышающих тысячи крат, затруднительно из-за сложности отвода тепла от фотопреобразователей, в связи с чем КПД МСЭ, работающих в разрешённых пределах освещённости, в настоящее время составляет 20–25%. В работе сотрудников фирмы *Photovolt Inc* (США), являющейся лидером разработок МСЭ за рубежом, сообщается о  $\sim 20\%$  эффективности опытного образца МСЭ при 1000-кратном увеличении импульсной солнечной освещённости в условиях АМ 1.5 [2]. Изготовленные в исследовательском центре НАСА *John H. Glenn Research Center (GRC)* на базе разработанной в фирме *Photovolt Inc* технологии матричные фотоэлементы с площадью  $0,8 \text{ см}^2$  показали эффективность 25% при интенсивности солнечного излучения  $700 \text{ кВт/м}^2$ .

В работе [3], проведённой в ФГБНУ ВИЭСХ, сообщается об изготовлении опытного образца солнечного концентраторного модуля на базе МСЭ с КПД  $\sim 25\%$  при более чем на порядок меньшей интенсивности импульсного солнечного излучения –  $64,7 \text{ кВт/м}^2$  в условиях АМ 1,5. Увеличение КПД матричных преобразователей является наиболее существенным в снижении стоимости электроэнергии, вырабатываемой солнечными станциями.

**Цель исследований** – разработка высоковольтных матричных солнечных элементов с высокой эффективностью.

**Материалы и методика исследований.** МСЭ изготавливались из пластин монокристаллического кремния Ф100 КДБ10 (100). Выбор кремния *p*-типа проводимости предпочтителен, поскольку подвижность ННЗ (электронов) в базе микроэлементов выше, чем у дырок при выборе материала *n*-типа, что гарантирует получение больших значений коэффициента собирания и фототока. Ориентация (100) обеспечивает меньшую величину встроенного заряда на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , что весьма существенно при изготовлении МСЭ.

Выбор исходного сопротивления определяется из условий получения минимальных значений обратного тока и высоких величин напряжения холостого хода. В [1] показано, что в случае однородной генерации носителей заряда,  $g(x) = g$ , в базовой области МСЭ с уровнем легирования  $N_A$  при пренебрежении генерацией в тонких высоколегированных  $n^+$ - и  $p^+$ -слоях, полное напряжение холостого хода в

структуре не зависит явно от уровня легирования исходного полупроводника и определяется соответствующей зависимостью времени жизни от концентрации  $-\tau(N_A)$ :

$$U_{xx} = \frac{2kT}{q} \cdot \ln \frac{g\tau}{n_i} \quad (1).$$

Здесь и далее обозначения общепринятые.

С уменьшением исходной концентрации время жизни ННЗ в базе МСЭ растёт. Однако при этом из-за расширения области пространственного заряда (ОПЗ) возрастает плотность генерационно-рекомбинационного тока как в объёме, так и в месте выхода ОПЗ микроэлементов на поверхность.

Оптимальным для производства МСЭ является выбор исходного кремния с концентрацией примеси  $\sim (1-5) \cdot 10^{15}$  см<sup>3</sup> ( $\rho_{cp} \sim 10$  Ом·см).

Исходные пластины кремния отмывались, травились до толщины 0,3–0,33 мм, и легировались фосфором и бором для образования основного  $n^+p$  и изотипного  $p-p^+$  переходов. Полученные диски с  $n^+p-p^+$  структурой металлизировались и собирались в столбики толщиной 10 мм (практически могут быть любые). Столбики резались на полоски по 0,3–0,4 мм, при этом плоскость реза ориентировалась перпендикулярно плоскости пластин. Полученные заготовки размером  $1 \times 10 \times (0,3-0,4)$  мм ( $l$  – длина поперечного сечения) разрезались на элементы с нужной длиной МСЭ. Плоскость реза ориентировалась перпендикулярно плоскости сечения и длине микроэлементов. Торцы  $10 \times (0,3-0,4)$  мм и рабочие стороны полученных матричных структур травились. Рабочие поверхности пассивировались.

В настоящее время технология подготовки поверхности кремниевых СЭ достаточно отработана. Текстурированные поверхности фотоприёмников сначала пассивируются, а затем просветляются. Используются однослойные и многослойные покрытия окислов металлов, нитридов, аморфного кремния и др. Как правило, температура нанесения качественных пассивирующих и просветляющих покрытий превышает 300 °С. В МСЭ защитные покрытия необходимо наносить уже на металлизированные микроэлементы, использующие сплав ПОС-61 с температурой плавления 187 °С.

В работе [5] рассматривалось применение в качестве пассивирующих покрытий МСЭ тонких плёнок, полученных низкотемпературными методами и исследовалась рекомбинационная активность границы раздела и фотоэлектрические характеристики преобразователей. В МСЭ с пассивирующим покрытием оксида алюминия, наносимого методом атомно-слоевого осаждения (АСО) при освещённости 1 кВт/м<sup>2</sup> достигнута рекордная плотность тока короткого замыкания 50,53 мА/см<sup>2</sup>, что близко к теоретическому пределу для солнечных элементов из кремния [1].

С ростом на границе раздела защитное покрытие-кремний встроенного заряда со знаком, соответствующим знаку ННЗ, в базе МСЭ

наблюдалось снижение величины скорости поверхностной рекомбинации (СПР) и увеличение фоточувствительности МСЭ. Особенно этот эффект был ярко выражен при наличии плёнки оксида алюминия, наносимой АСО. Способность пленки оксида алюминия, содержащего большую плотность отрицательного заряда, локализованного на границе раздела Si-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, улучшать состояние поверхности кремниевых СЭ основана на комбинации химической пассивации, приводящей к уменьшению дефектов на границе раздела, и полевой пассивации, снижающей СПР фотогенерированных ННЗ.

Однако, использование АСО при нанесении оксида алюминия не всегда гарантирует получение высоких параметров. При изготовлении МСЭ по технологии, применённой в работах [3, 4] с использованием в качестве пассивирующего и просветляющего покрытия комбинации плёнок оксида алюминия, полученного методом АСО, и химически нанесённого хлорида алюминия лишь ~ у 3% образцов эффективность преобразования при засветках 1кВт/м<sup>2</sup> достигала 18%, в то время как у большинства матричных приёмников КПД был существенно ниже – 13–16 % и только у единичных образцов модулей на базе МСЭ при концентрированном импульсном излучении с плотностью потока 50–500 кВт/м<sup>2</sup> КПД поднимался до 25 % .

Нестабильность фотоэлектрических параметров МСЭ с пассивирующими слоями оксида алюминия, по всей вероятности, связана с отсутствием на границе раздела Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si качественного слоя оксида кремния, играющего ключевую роль в формировании связанного отрицательного заряда [6]. После химического травления свободные связи кремния насыщаются группами ОН-, присутствующими в деионизованной воде и кислородом воздуха, образуя ~ 30 ангстремный слой неравновесного «грязного» оксида. Нанесение на такую поверхность методом АСО плёнки оксида алюминия сводит на нет эффект химической и полевой пассивации и приводит к нестабильности параметров и снижению КПД преобразователя.

**Результаты исследований.** С целью стабилизации поверхности кремния, перед началом процесса АСО оксида алюминия, получаемого при взаимодействии газообразного триметилалюминия и паров воды, кремниевая пластина подвергалась термической обработке в атмосфере кислорода при температуре 180 °С в течение 60 секунд. Нанесение покрытий оксида алюминия производилось в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Возможности используемой установки позволяли вырастить плёнку Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной всего 10–15 нм. С целью получения оптимальных толщин покрытия, соответствующих правилу четвертьволнового просветления на длине волны 600 нм (для оксида алюминия первый порядок просветления соответствует толщинам ~85–90 нм), производилось дополнительное нанесение оксида алюминия. Использовался коллоидально-дисперсный раствор нанопорошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с размером частиц ~ 15–20 нм в воде (производство фирмы *Alfa Aesar Company A Johnson Matthe*). Осаждение осуществлялось на

ультразвуковой установке Кристалл-2,5. После нанесения и сушки на воздухе МСЭ и контрольные пластины отжигались в термостате в атмосфере азота сначала при температуре 130 °С в течение 1 часа, а затем при температуре 70 °С в течение 6 часов.

Комбинированный режим нанесения оксида алюминия позволил стабильно получать покрытия со следующими параметрами: толщина покрытия 85–90 мкм, показатель преломления 1,65–1,70, поверхностный заряд и скорость поверхностной рекомбинации соответственно –  $-(0,8-1,0) \times 10^{13}$  кул/см<sup>2</sup> и 100–120 см/с. Параметры плёнок и границы раздела полупроводник-диэлектрик определялись в ОАО НПО «Орион» на контрольных пластинах кремния КДБ 10 (100). Измерения толщины покрытия осуществлялось на эллипсометре ЛЭФ-3М на длине волны 0,63 мкм, Поверхностный заряд измерялся методом вольт-фарадных характеристик на частоте 1 МГц, скорость поверхностной рекомбинации определялась посредством измерения времени релаксации ёмкости МДП-структур.

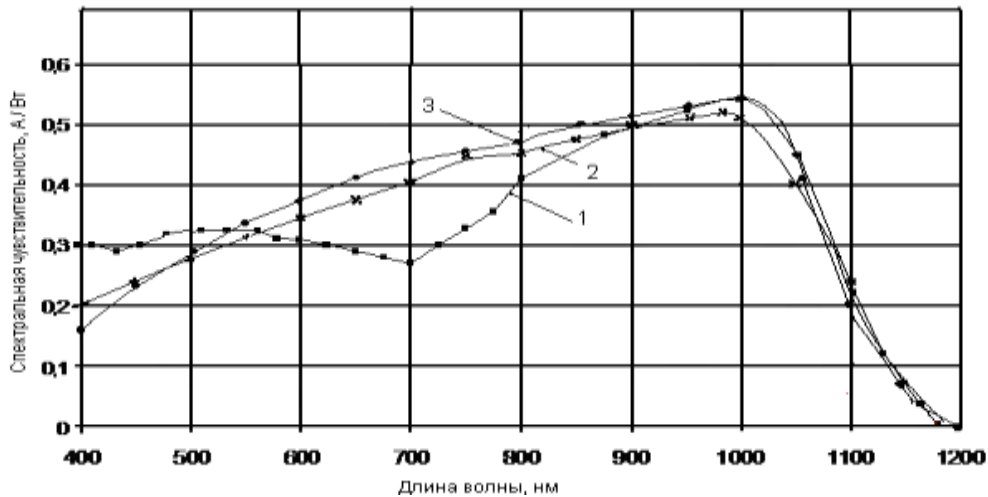
На рис. 1 представлена типичная спектральная характеристика токовой чувствительности МСЭ с комбинированным покрытием из оксида алюминия (1), снятая в НПО «Квант». Здесь же приведены характеристики МСЭ с пассивирующим покрытием из оксида тантала (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) толщиной 85 нм (2), изготовленного в соответствии с технологией [5], и матричного элемента с комбинированным покрытием из оксида алюминия толщиной 15 нм, полученного методом АСО, и хлорида алюминия толщиной 65 нм, нанесённого химическим методом (3) [4]. Контроль спектральной зависимости токовой чувствительности МСЭ (2 и 3) осуществлялся на спектральной измерительной установке ЛУИ-1 на заводе «Сапфир». В качестве источника излучения использовалась вольфрамовая лампа с температурой 2850 К и монохроматор МДРЗ. Однородно засвечивалась вся площадка приёмника, частота модуляции излучения составляла 800 Гц, в качестве контрольного образца использовался калиброванный кремниевый фотодиод.

Как видно из рис. 1, МСЭ с комбинированным покрытием из оксида алюминия (1) обладают очень высокой чувствительностью в области спектра 0,4–0,5 мкм, с квантовым выходом фотоэффекта превышающим 1.

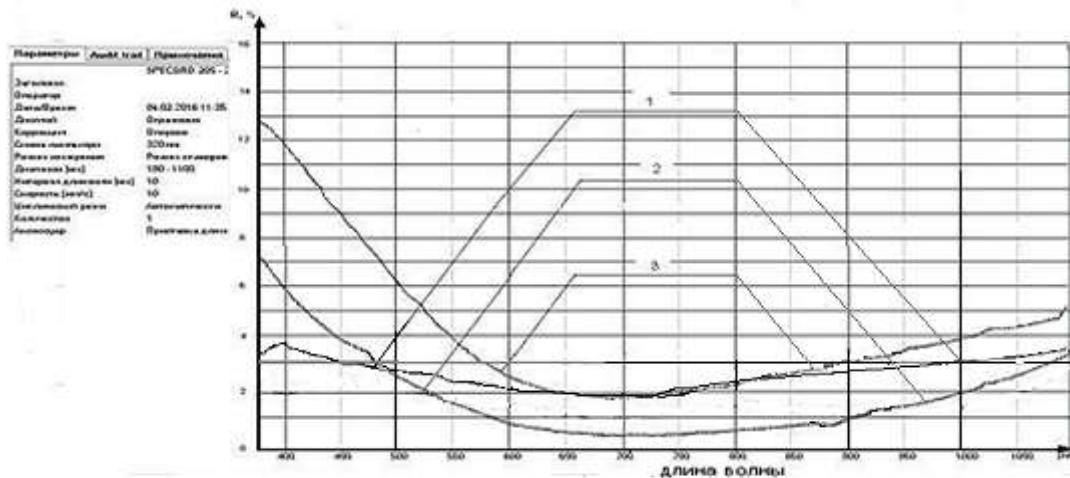
Возможными причинами высокого квантового выхода может быть большая энергия квантов солнечного излучения с длиной волны 0,3–0,5 мкм, в 2–4 раза превышающая ширину запрещенной зоны кремния [1], либо эффект Комптона в плёнке оксида алюминия, сдвигающий коротковолновый спектр солнечного излучения в область длин волн 0,4–0,5 мкм [7]. У матричных СЭ, использующих в качестве пассивирующего и просветляющего покрытий комбинацию плёнок оксида и хлорида кремния, а также у МСЭ с оксидом тантала, такого эффекта не наблюдалось.

Помимо увеличения квантового выхода, повышенная чувствительность в коротковолновой области спектра у МСЭ с покрытием из комбинированного оксида алюминия связана с малыми потерями СИ на отражение. На рис. 2 представлены спектры отражения

приёмной поверхности различных СЭ, снятые на спектрофотометре *Specord 205*. Во всём диапазоне длин волн величина коэффициента отражения МСЭ с покрытием из комбинированного оксида алюминия (кривая 1) не превышала 3,5%, а в коротковолновой области спектра была значительно меньше, чем у МСЭ с покрытием из хлорида алюминия (3) [4] и планарного СЭ фирмы *Sun Power* с КПД, превышающим 20% [8].

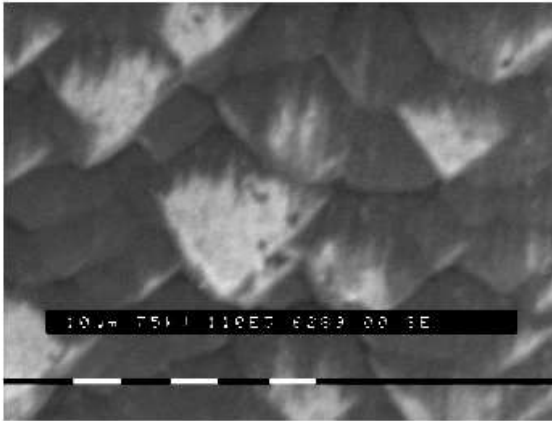


**Рис. 1. Спектральная зависимость токовой чувствительности МСЭ**

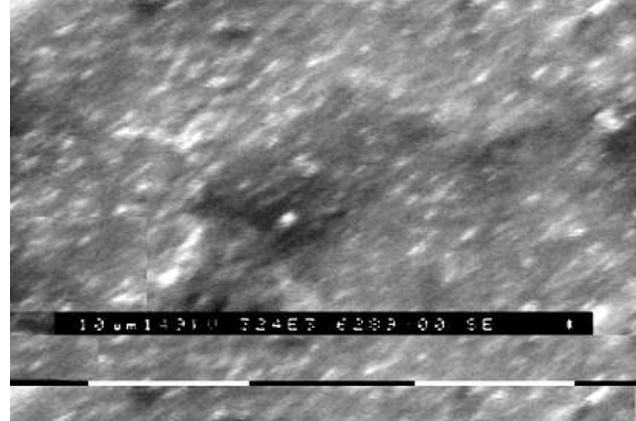


**Рис. 2. Спектры отражения СЭ: 1 – МСЭ с покрытием из комбинированного оксида алюминия; 2 – СЭ фирмы *Sun Power*; 3 – МСЭ с покрытием из хлорида алюминия**

На рис. 3 представлена фотография светоприёмной поверхности разработанных МСЭ с покрытием из оксида алюминия, снятая на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 фирмы Филипс. Тестирование поверхности и наличие двухслойного покрытия нанослоями оксида алюминия с суммарной толщиной, соответствующей первому порядку четвертьволнового просветления, способствовали малой величине коэффициента отражения, а с учётом полевой и химической пассивации поверхности обуславливали высокую чувствительность во всём диапазоне солнечного спектра.



а



б

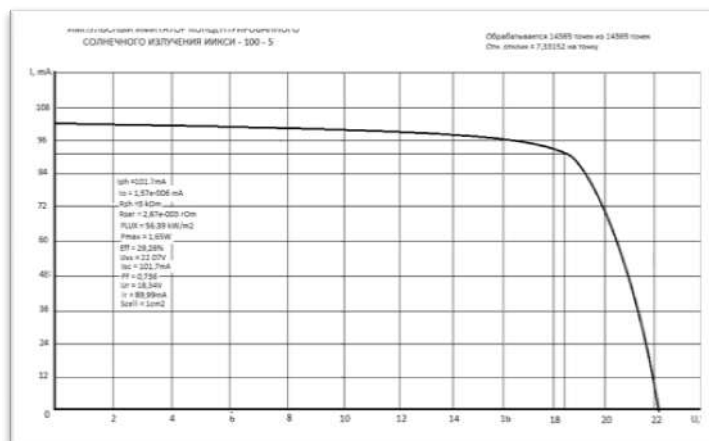
**Рис. 3. Активная поверхность МСЭ с комбинированным покрытием из оксида алюминия: (а) – до нанесения, (б) – после нанесения**

Чтобы защитить МСЭ с нанесённым оксидом алюминия от атмосферных воздействий, фотоэлементы помещались в стеклопакет, который заполнялся полисилоксановым гелем и герметизировался. В ФГБНУ ВИЭСХ, в качестве материала-заполнителя, разработана оптимальная рецептура низкомолекулярного полисилоксанового геля. Применение пленочного материала на основе полисилоксанового геля позволяет увеличить срок эффективной эксплуатации модулей в 1,5–2 раза [1]. В созданных на базе МСЭ с комбинированным покрытием оксида алюминия модулях за счёт просветляющего эффекта наполнителя (коэффициент преломления **ПОЛИСИЛОКСАНОВОГО ГЕЛЯ** ~1,5)

токовая чувствительность возрастала ~ на 5 % .

Вольт-амперные характеристики разработанных МСЭ и модулей на их основе измерялись при освещении 1 кВт/м<sup>2</sup> в атмосферных условиях АМ1,5, а также при концентрированном освещении на импульсном имитаторе. В качестве осветителя использовалась ксеноновая лампа-вспышка, спектр излучения которой близок к спектру излучения солнца. Длительность вспышки составляла около 5 мс. Переменная электронная нагрузка обеспечивала измерение вольт-амперной характеристики за время от 2 до 5 мс. При этом снималось от 6 до 16 тысяч пар значений ток-напряжение, при одновременной регистрации интенсивности излучения. Измерения проводились с помощью запоминающего осциллографа ОЦЗС-02-6, и затем обрабатывались с помощью разработанной для него программы ВАХ.

На рис. 4 представлена вольт-амперная характеристика опытного образца модуля на базе МСЭ с КПД 29,26%. Матричный фотоприёмник с покрытием из комбинированного оксида алюминия имел размер 10×10×0,3 мм и содержал 33 последовательно соединённых p+ - p - p+ структуры. При интенсивности импульсного излучения 56,4 кВт/м<sup>2</sup> рабочее напряжение МСЭ составило 18,34 В, рабочий ток – 89,99 мА, фото-э.д.с. – 22,07 В, электрическая мощность – 1,65 Вт.



**Рис. 4. Вольт-амперная характеристика модуля на базе МСЭ с КПД 29,26 %**

Столь высокие значения фотоэлектрических параметров, превосходящие показатели зарубежных аналогов, свойственны лишь единичным матричным фотоприёмникам. Как правило, значения эффективности преобразования разработанных МСЭ с покрытием из комбинированного оксида алюминия, в диапазоне засветок 50–500 кВт/м<sup>2</sup>, лежат в пределах 23–26 %, что соответствует мировому уровню.

### Выводы

Таким образом, в результате проведённой работы разработана технология изготовления высоковольтных МСЭ и концентраторных солнечных модулей на их основе с эффективностью преобразования 23–26 %, При 56-кратной концентрации солнечного света КПД матричного преобразователя составил 29,26 %. Разработанная технология включает процесс нанесения пассивирующего и просветляющего покрытия из оксида алюминия, получаемого комбинацией методов атомно-слоевого осаждения и осаждения из коллоидно-дисперсного раствора Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в воде.

### Список литературы

1. Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы. Т. 1, 2, 3 / Д. С. Стребков. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2009. – 2010.
2. Demand L. Sater, Neii D. Sater. High Voltage Silicon VMJ Solar Cells for up to 1000 Suns Intensivities. Photovolt Inc.21282 Woodview Circle Strongsville, OH 44149.
3. Высоковольтные солнечные модули третьего поколения / Д. С. Стребков, В. И. Поляков, Ю. Д. Арбузов, В. А. Панченко // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – Вып. 3 (8). – С.161–166.
4. Борисов В. К. Новые методы пассивации матричных солнечных элементов / В. К. Борисов, В. И. Поляков // Вестник ВИЭСХ. – 2015. – № 3 (20) . – С. 68–72.
5. Стребков Д. С. Влияние наноразмерных покрытий на параметры матричных солнечных элементов / Д. С. Стребков, В. К. Борисов, В. И. Поляков // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – № 3 (16) . – С. 23–27.



6. A. R. Chowdhuri, C. G. Takoudis, R. F. Klie, N. D. Browning // Appl. Phys. Lett., 80, 4241 (2002).

7. Особенности люминисцентных свойств наноструктурного оксида алюминия / Карпов В. С., Ермаков А. Е., Зацепин А. Ф. и др. // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Вып. 5. – С. 916–920.

8. J. Jurgens, P. Aschenbrenner, V. Desai and C. Erban. Back contact solar cells in BIPV applications – a new dimension of architectural PV design // Presented at 20th EUPVSEC, 6–10 June 2005, Barcelona, Spain. – P.1–3.

## **РОЗРОБКА ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ**

***В. К. Борисов, В. І. Поляков***

**Анотація.** Розроблено високовольтні кремнієві матричні сонячні елементи (МСЕ) з ефективністю перетворення 29,26 % при 56-кратній концентрації сонячного світла. Висока ефективність перетворення досягнута в результаті використання в технології виготовлення МСЕ захисного покриття з оксиду алюмінію, одержуваного комбінацією методів атомно-шарового осадження та осадження з колоїдно-дисперсного розчину  $Al_2O_3$  у воді.

**Ключові слова:** матричний сонячний елемент, концентрація сонячного випромінювання, пасивувальне та просвітлювальне покриття, оксид алюмінію, вольт-амперна характеристика, ефективність перетворення

## **DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE MATRIX SOLAR CELLS WITH HIGH EFFICIENCY**

***V. Borisov, V. Polyakov***

**Annotation.** Reported the development of high voltage silicon matrix of the solar cell (ITU) with a conversion efficiency of 29.26%, with 56-fold concentration of sunlight. High conversion efficiency is achieved as a result of use in the technology of ITU protective coating of aluminum oxide obtained by a combination of atomic layer deposition and deposition from colloid - disperse solution of  $Al_2O_3$  in water.

**Key words:** matrix solar cell, concentrating solar radiation, passivation and antireflection coating, aluminum oxide, current-voltage characteristic, conversion efficiency