

Проведение климатических и механических испытаний для солнечных модулей, выполненных из гетероструктурных ФЭП с медной контактной сеткой

С. Н. Аболмасов¹, Г. Г. Шелопин²

НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике

Санкт-Петербург, Россия
s.abolmasov@hevelsolar.com,
g.shelopin@hevelsolar.com

Е. И. Теруков

НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике;

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Санкт-Петербург, Россия
e.terukov@hevelsolar.com

А. В. Кочергин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике

Санкт-Петербург, Россия
tem47@mail.ru

Аннотация. В статье приведено описание влияния воздействия климатических условий на солнечный модуль, состоящий из фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с медной контактной сеткой. Описана технологическая последовательность формирования медной контактной сетки на поверхности кремниевого гетероструктурного ФЭП. Приведено сравнение традиционного способа создания контактной сетки с помощью метода трафаретной печати серебряной пастой, и альтернативного метода, с использованием электрохимического осаждения меди. Показаны результаты тестов по определению устойчивости ФЭП к механическим повреждениям, определено, что использование гальванической медной сетки позволяет снизить деградацию ВАХ на 10 %. Показано, что солнечные модули, состоящие из ФЭП с медной контактной сеткой, успешно проходят климатические испытания.

Ключевые слова: солнечная энергетика, гетероструктурный фотоэлектрический преобразователь, металлизация, электрохимическое осаждение меди, климатические испытания

I. ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе кристаллического кремния занимают основную долю рынка по фотоэлектрическим системам наземного применения [1].

Гетероструктурные ФЭП на основе кристаллического кремния, являются одной из самых перспективных технологий, с точки зрения соотношения коэффициента полезного действия (КПД) и стоимости. Такие ФЭП носят сокращенное англоязычное наименование НИТ (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer solar cell). Процесс изготовления НИТ ФЭП состоит из нескольких основных технологических операций [2]: химическая обработка,

текстурирование, плазмохимическое осаждение аморфных слоев кремния, магнетронное осаждение антиотражающего слоя и металлизация. На стадии металлизации образуется контактная сетки, осуществляющая сбор электрических носителей заряда.

Традиционным способом создания контактной сетки является метод с использованием трафаретной печати и серебросодержащих паст. Эта технология хорошо зарекомендовала себя высокой надёжностью и простотой технологического процесса. Около 85 % солнечных элементов на основе кристаллического кремния изготавливаются с использованием трафаретной печати [3]. Перспективы развития повышения эффективности данного метода, заключаются в развитии и поиске новых подходов создания серебросодержащих паст. Однако, эта технология имеет свои недостатки: ограничения по размеру токопроводящих гребенок и высокую стоимость главного компонента пасты, серебра.

Потребление серебра в фотовольтаической индустрии на 2020 год составляло более 6% мирового предложения серебра [4]. Предполагается, что производственная мощность фотоэлектрических панелей вырастет со 132 ГВт в 2020 году до 200-500 ГВт в 2025 году и должна вырасти до уровня тераватт в следующие десятилетия для достижения климатических целей. Повышенный спрос на серебро может привести к росту цен. В связи с данным прогнозом, у научных исследователей в области возобновляемой солнечной энергетики присутствует научный интерес в разработке альтернативного способа создания контактной сетки для ФЭП. Одним из возможных альтернативных материалов для замены серебра, как сырья для создания контактной сетки, является медь [5].

В табл. 1 приведено сравнение свойств и стоимости меди (Cu) и серебра (Ag). Видно, что удельная

проводимость Cu лишь на 3,7% выше, чем Ag, в то время как цена меньше примерно в 100 раз. Главный недостаток Cu ее диффузия в кремний, что ведет к образованию в нем рекомбинационных центров.

ТАБЛИЦА 1 СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕРЕБРА И МЕДИ

Параметры	Ag	Cu
Проводимость (10 ⁶ См/м)	61.4	59.1
Плотность (г/см ³)	10.5	8.9
Цена (\$/кг)	431.0	4.5

Реализация замены серебра на медь может способствовать созданию более тонких токопроводящих гребенок, обладающих высокой удельной проводимостью контактов. Значительная разница в стоимости материала, может сделать медную контактную сетку серьезным конкурентом стандартной контактной сетке на основе серебросодержащей пасты.

В работе A. Lachowicz представлено сравнение стоимости различных способов создания контактной сетки, на этапе металлизации ФЭП [6], результаты данной работы представлены на рис. 1. На данной диаграмме видно, что с учетом всех составляющих, входящих в данной технологический этап, стоимость металлизация с использованием меди имеет наименьшее значение, часть из которой занимает стоимость амортизации оборудования, в виду более сложной технологического процесса создания контактной сетки.

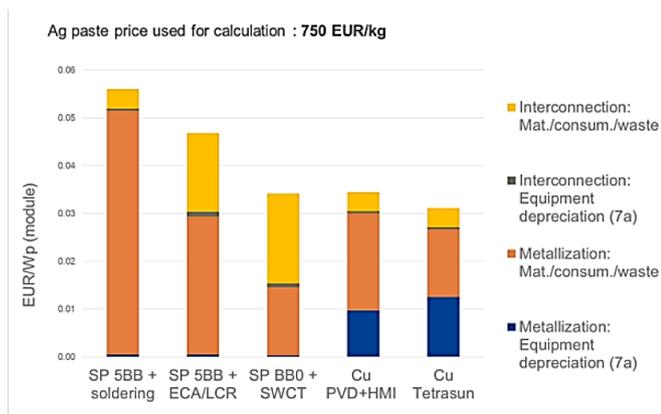


Рис. 1. Сравнение стоимости этапа металлизации контактной сетки.

II. МЕДНАЯ КОНТАКТНАЯ СЕТКА

Несколько лет назад, компания Meyer Burger стала рассматривать никелевые токопроводящие шины для передней и задней стороны металлизации, в то время как Fraunhofer – институт солнечных энергосистем (ISE) уже проводил исследования на основе медной металлизации [7].

Наивысшая заявленная эффективность для ФЭП, созданных по НИТ технологии, была достигнута 26,6 % [8], и даже с простой схемой контакта с обеих сторон, с медной металлизацией, было достигнуто 25,1 % [9].

На сегодняшний день существуют разные способы создания медной металлизации, различающиеся по методу формирования рисунка контактной сетки, а именно с помощью фотолитографии, диэлектрического слоя и струйной печати.

Стандартные технологии производства печатных плат и полупроводников, включая металлический затравочный слой и фотолитографию, могут быть применены для производства солнечных элементов. В

прошлом компания Silevo использовала сухой пленочный резист для производства ячеек с туннельным оксидным переходом [10], о фотолитографии сообщила компания Sun Supreme [11].

Другой подход заключается в использовании слоя диэлектрика, такого как нитрид кремния (Si₃N₄) или оксид кремний (SiO₂), чтобы предотвратить нанесение покрытия на прозрачный проводящий оксид (TCO) [12]. Диэлектрический слой может оставаться на ячейке и служить вторым антибликовым покрытием, что также позволяет уменьшить толщину TCO.

III. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ МЕДНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТКИ

В данной работе для создания медной контактной сетки используется метод электрохимического осаждения. Последовательность технологического процесса представлена на рис. 2.

Последовательность технологического процесса:

1. магнетронное осаждение адгезионного и медного проводящего слоя;
2. формирование рисунка контактной сетки;
3. электрохимического осаждение меди;
4. удаление защитной маски и травление адгезионного и медного слоя.

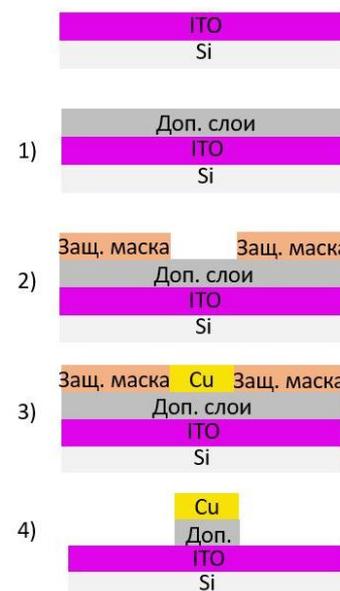


Рис. 2. Технологическая последовательность формирования медной контактной сетки

На первом этапе технологического процесса на поверхность кристаллического кремния, покрытого слоем оксида индия-олова (ITO), выступающего в роли антиотражающего покрытия, методом магнетронного напыления наносится адгезионный и проводящий медный слой. Для прямого формирования медной контактной сетки, путем электрохимического осаждения, поверхность ITO имеет недостаточную адгезию, для решения данной проблемы наносится дополнительный адгезионный слой. Медный слой необходим для увеличения проводимости электрического тока во время электрохимического осаждения меди на поверхность ФЭП.

На следующем этапе формируется рисунок контактной сетки. Для реализации данного этапа

используются тугоплавкие органические чернила (HMI – Hot Melt Inks) и принтер струйной печати.

В дальнейшем происходит электрохимическое осаждение меди. На последнем этапе осуществляется удаление защитной маски и стравливаются адгезионный и проводящий медный слой под маской.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

ФЭП с медной контактной сеткой

Формирование медной контактной сетки происходила на полноразмерных гетероструктурных ФЭП размером 156.75×156.75 мм. Результаты исследования основных характеристик ФЭП с медной контактной сеткой представлены в работе [13]. Снимок одного из изготовленных ФЭП с медной контактной сеткой и снимок его электролюминесценции представлены на рис. 3.

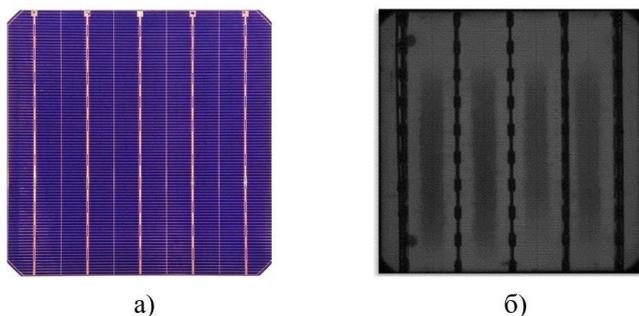


Рис. 3. Снимки изготовленных образцов: а) фронтальная поверхность ФЭП; б) снимок электролюминесценции

Полученный снимок электролюминесценции показывает, что медная контактная сетка не затеняет активную поверхность ФЭП и выполняется роль сбора носителей заряда.

Исследование устойчивости ФЭП с медной контактной сеткой к механическим повреждениям

В рамках данной работы исследуется и приводится сравнение устойчивости к механическим повреждениям ФЭП с серебряной пастой и с гальванической медной сеткой.

Для проведения эксперимента были изготовлены два гибких одноячеечных модуля. Первый модуль состоял из ФЭП со стандартной контактной сеткой на основе серебряной пасты, второй из ФЭП с медной контактной сеткой.

Исследование устойчивости модулей к механическому напряжению осуществлялось по средству их сгибания в горизонтальном и вертикальном направлении. Снимки фотолюминесценции одноячеечных модулей до и после механических воздействия представлены на рис. 4 и 5.

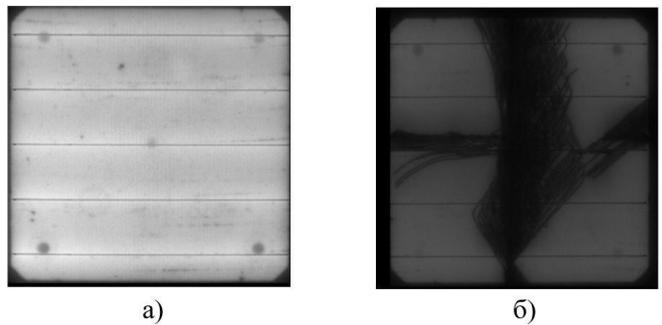


Рис. 4. Снимки фотолюминесценции ФЭП с серебряной контактной сеткой: а) до механических воздействия; б) после механических воздействия.

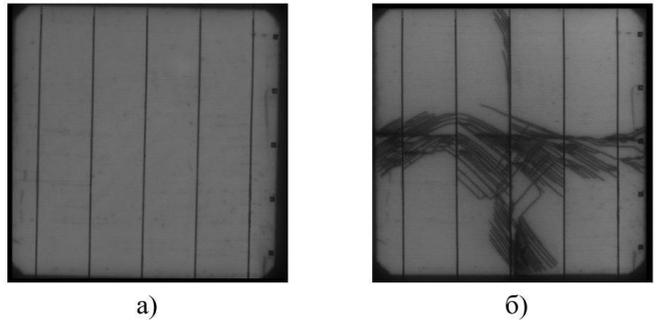


Рис. 5. Снимки фотолюминесценции ФЭП с медной контактной сеткой: а) до механических воздействия; б) после механических воздействия

Результаты исследования показали, что после повреждения модуль с медной контактной сеткой остается более целой по сравнению с модулем с контактной сеткой из серебряной пасты, осуществляя лучший токосъем с поврежденных частей ячейки. Данный результат говорит о том, что медная контактная сетка, состоящая из нескольких слоев, выступает в качестве проволоки, которая после механического воздействия, в отличие от серебряной контактной сетки не ломается и не прекращает контактировать со сломанными осколками, продолжая соединяться с ними и проводить электрический ток.

В связи с уменьшением активной области после механического воздействия наблюдается снижение электрических характеристик ФЭП. Исследования изменения максимальной мощности (P_{mpp}), модулей с серебряной и медной контактной сеткой, до и после механических воздействия представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II Основные параметры ФЭМ до и после испытаний

Образцы	P_{mpp} , Вт	Деградация P_{mpp} , %
ФЭП (Ag) before	5,06	
ФЭП (Ag) after	3,84	24,11
ФЭП (Cu) before	4,87	
ФЭП (Cu) after	4,20	13,73

Деградация P_{mpp} модуля с серебряной пастой существенно выше и составляет 24.11 %, тогда как деградация на модулях с гальванической сеткой всего около 14 %. Разница в 10 % делает приоритетными ФЭП с медной контактной сеткой для гибких модулей.

Исследование влияния климатических факторов на солнечный модуль

Одних из важнейших параметров солнечных фотоэлектрических модулей, наряду с номинальной пиковой мощностью, является параметр долговременной стабильности электрических характеристик. Этот параметр в настоящее время оценивается как гарантия сохранения пиковой мощности на 90 % от номинала после эксплуатации в течение 10 лет и на уровне 80 % от номинала после эксплуатации в течение 25 лет. Долговременная стабильность зависит от многих факторов [14], которые можно условно разделить на четыре группы:

- факторы, обусловленные качеством разработки и конструкции; определяются многими физическими, химическими, электрическими, оптическими и механическими свойствами применяемых материалов и солнечных элементов;
- факторы, обусловленные качеством изготовления; определяются качеством контроля технологического процесса, особенно, как правило, операций пайки и монтажа соединительной коробки.
- факторы, обусловленные качеством монтажа в системе; определяются степенью согласования элементов в системе, правильным выбором компонентов, в том числе кабелей, соединительных разъемов, электронных устройств, выбором монтажной конструкции;
- реальные климатические и др. внешние факторы.

Влияние всех этих факторов многократно исследовалось, и в результате были выработаны методы тестирования, объединенные в стандартные тестовые последовательности и опубликованные МЭК в стандарте IEC 61215 [15].

Для исследования влияния различных климатических условий на фотоэлектрический модуль (ФЭМ), состоящий из ФЭП с медной контактной сеткой, были изготовлены два солнечных модуля конфигурацией 4x5. Данные ФЭМ были подвергнуты техническим испытаниям: термоциклирование и влажное тепло.

Проведение испытания термоциклирования представляет из себя тестирование способности модуля противостоять температурным изменениям. В данном испытании модуль помещаются в климатическую камеру и обеспечивают непрерывный контроль сопротивления изоляции. Модуль подвергается воздействию серии температурных циклов от -40 °С до +85 °С, продолжительность испытания 200 циклов. Критерием прохождения ФЭМ является уменьшение P_{mpp} не более чем на 5 %.

Результаты проведения испытания термоциклирования ФЭМ, прошедшего 225 циклов, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ФЭМ

ФЭМ	Isc, А	Uoc, В	Pmpp, Вт	FF, %
0 циклов	8,908	14,54	98,07	75,73
225 циклов	8,899	14,52	97,36	75,33
Коэффициент деградации	0,1%	0,1%	0,7%	0,5%

Из табл. 3 видно, что после технического испытания термоциклирования P_{mpp} ФЭМ уменьшилась, что связано с деградацией активной области ФЭП, на что указывает уменьшение фактора заполнения (FF). Коэффициент деградации P_{mpp} 0,7% указывает на то, что ФЭМ, состоящий из ФЭП с медной контактной сеткой, успешно прошел техническое испытание – термоциклирование.

Для подробного изучения момента деградации P_{mpp} ФЭМ был построен график зависимости количества циклов, прошедший модулем, от P_{mpp} , смотрите рис. 6.

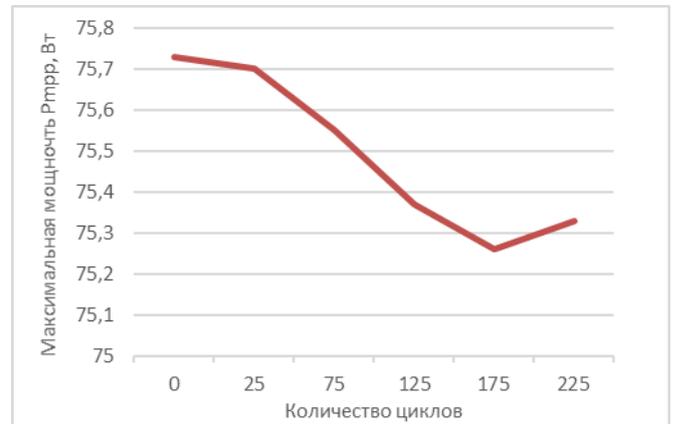


Рис. 6. График зависимости P_{mpp} ФЭМ от количества пройденных циклов в климатической камере, во время термоциклирования.

По рисунку 6 можно сказать, что основной спад P_{mpp} произошел в первые 125 циклов, последующие 100 циклов значение P_{mpp} практически не изменилось.

Второй ФЭМ проходил техническое испытание – влажное тепло, при котором исследуется устойчивость модуля к длительному воздействию температуры и повышенной влажности. Во время испытания модуль помещается в климатическую камеру и обеспечивается непрерывный контроль сопротивления изоляции. Модуль подвергают воздействию температуры +85 °С и относительной влажности 85, продолжительность испытания 1000 часов. Критерием прохождения ФЭМ является уменьшение пиковой мощности не более чем на 5 %.

Результаты данного испытания влажное тепло представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ФЭМ

Время прохождения испытания	Isc, А	Uoc, В	Pmpp, Вт	FF, %
0 часов	9.11	14.55	101.00	76.19
1000 часов	9.02	14.55	99.37	75.71
Коэффициент деградации	1,1%	0,4%	3,1%	1,6%

Как можно видеть из табл. 4 сильной деградации, после испытания влажное тепло, были подвержены следующие электрические параметры: сила тока короткого замыкания (Isc), FF и P_{mpp} .

Значение пиковой P_{mpp} ФЭМ после прохождения технического испытания влажное тепло составило 3,1 %, что свидетельствует о том, что данный ФЭМ, состоящий из ФЭП с медной контактной сеткой, успешно прошел данное техническое испытание.

Для подробного изучения момента деградации $P_{\text{мрр}}$ ФЭМ был построен график зависимости времени проведения испытания, от $P_{\text{мрр}}$, смотрите рис. 7.

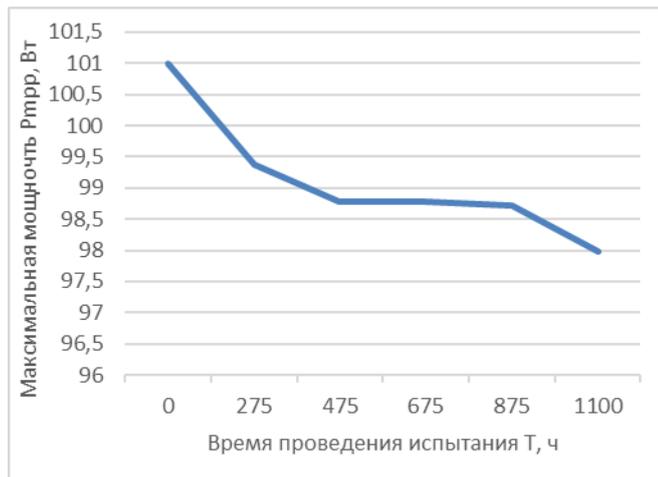


Рис. 7. График зависимости $P_{\text{мрр}}$ ФЭМ от времени пройденных в климатической камере при прохождении испытания влажное тепло

На рис. 7 наблюдается резкий спад $P_{\text{мрр}}$ в начале проведения испытания. Для изучения данного моменты был изучен снимок фотолюминесценции ФЭМ после 275 часов нахождения в климатической камере, смотрите рис. 8.

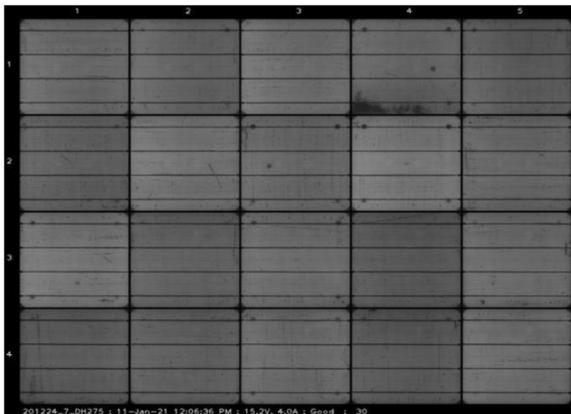


Рис. 8. Снимок фотолюминесценции солнечного модуля с ФЭП медной контактной сеткой после испытаний в камере повышенной влажности и температуры

Исследование снимка фотолюминесценции модуля после 275 часов нахождения в климатической камере, показало, что падение $P_{\text{мрр}}$ на 0,98%, скорее всего, связана с дефектом единичной ФЭП (отслоение контактной сетки).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ создания медной контактной сетки для гетероструктурного кремниевого ФЭП. Результаты исследования ФЭП с медной контактной сетки показали, что изготовленная сетка имеет хорошую адгезию к поверхности ФЭП и достаточную электропроводность, необходимую для сбора носителей электрического заряда.

По результатам исследования устойчивости ФЭП к механическим повреждениям, можно сделать вывод, что медная контактная сетка менее подвержена снижению

электрических характеристик, чем контактная сетка на серебряной пасте.

ФЭМ, состоящий из ФЭП с медной контактной сеткой, после прохождения технического испытаний: термоциклирования и влажное тепло, при длительном их воздействии, показал низкие результаты по деградации $P_{\text{мрр}}$, 0,7 % и 0,98 % соответственно. Данный факт свидетельствует о том, что ФЭМ, выполненные из гетероструктурных ФЭП с медной контактной сеткой успешно прошли климатические испытания.

Данная работа показывает возможность перехода с традиционного способа создания контактной сетки трафаретной печатью с серебряной пастой на электрохимическое осаждение меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Koch W, Endros AL, Franke D, et al. Bulk crystal growth and wafering for PV // Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. pp. 205-254, 2003
- [2] Saravanan S, Suresh ChSR, Subraveti VV, Kumar KC, Jayaram UK. Effects of texture additive in large-area diamond wire cut multicrystalline silicon solar cells // Photovoltaics International. Vol. 42, pp. 46-49, 2019
- [3] Nagarajan Balaji, Mehul C. Raval and S. Saravanan // Review on Metallization in Crystalline Silicon Solar Cells, 2019
- [4] P. Baliozian, S. Tepner, M. Fischer, J. Trube, S. Herritsch, K. Gensowski, F. Clement, S. Nold, R. Preu The International Technology Roadmap for Photovoltaics and the Significance of Its Decade-Long Projections // 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2020, pp. 420-426
- [5] A. Lachowicz, A. Descoedres, J. Champlaud, A. Faes, J. Geissbühler, M. Despeisse, S. Nicolay, C. Ballif COPPER PLATING PROCESSES FOR SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS: AN OVERVIEW // 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Switzerland, 2019
- [6] Fraunhofer ISE, Copper metallization for silicon solar cells.2013
- [7] K. Yoshikawa, W. Yoshida, T. Irie, H. Kawasaki, K. Konishi, H. Ishibashi, T. Asatani, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu and K. Yamamoto, Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology // Solar Energy Materials and Solar Cells, in press, 2017
- [8] D. Adachi, J. L. Hernández and K. Yamamoto, Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency // Applied Physics Letters 107 2015
- [9] J. Heng et al., >23.1% Efficiency Tunnel Oxide Junction Cell with Electroplated Cu Grid // 29th EU PVSEC, 2014
- [10] O. Schultz-Wittmann, High Volume Manufacturing of High Efficiency Crystalline Solar Cells with Shielded Metal Contacts // 32nd EU PVSEC, 2016
- [11] D. Adachi, T. Terashita, T. Uto, J. L. Hernández and K. Yamamoto, "Effect of SiOx barrier layer prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition on improvement of long-term reliability and production coast for Cu-plated amorphous Si/crystalline Si heterojunction solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells 163, 204-209, 2017
- [12] Mehul CR, Chetan SS. Review of Ni-Cu based front side metallization for c-Si solar cells // Journal of Solar Energy. Vol. 20, 2013, pp. 1-20
- [13] Аболмасов С.Н., Кочергин А.В., Теруков Е.И., Шелопин Г.Г. Формирование контактной сетки гетероструктурных кремниевых ФЭП методом электрохимического осаждения меди // Труды 15-й Международной конференции «Пленки и покрытия - 2021» СПб. Изд-во ООО «РПК «АМИГО-ПРИНТ», 2021. 383-387 стр.
- [14] Arends T., Kuitche J., Shisler W. IEC and IEEE design qualifications: an analysis of test results acquired over nine years // Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006. Vol. 2. 2078-2080
- [15] IEC 61215-ed 2. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules -Design qualification and type approval: International Electro technical Commission,-2005.