

07
Полугибкие фотоэлектрические модули на основе кремниевых НТ-ячеек

© С.А. Яковлев,^{1,2} И.Ю. Дмитриев,¹ М.Ю. Михайлов,¹ К.В. Емцев,^{1,2} А.С. Абрамов,^{1,2} Е.И. Теруков^{1,2}

¹ Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике,
194064 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: S.Yakovlev@hevelsolar.com

Поступило в Редакцию 15 мая 2024 г.

В окончательной редакции 20 июня 2024 г.

Принято к публикации 27 июня 2024 г.

Разработана конструкция полугибких фотоэлектрических модулей на основе гетероструктурных кремниевых солнечных элементов, соединенных между собой пленочно-проволочным электродом SmartWire. Изучена надежность полугибких модулей при климатических испытаниях: высокой температуре при высокой влажности и термоциклировании согласно ГОСТ Р 56980.2 (МЭК 61215-2:2016) — 2020. Показано, что одним из основных механизмов деградации характеристик модулей при повышенной влажности является коррозия пленочно-проволочных электродов. Проведено сравнение климатической стойкости модулей, собранных с применением проволок пленочно-проволочного электрода с разными покрытиями. Установлено, что проволока с покрытием SnBiAg более устойчива к влаге, чем проволока с покрытием InSn. Исследована стойкость полугибких модулей к локальному перегреву до и после механического воздействия ударами града. Показана эффективность системы коммутации SmartWire к ударам града и продемонстрирована необходимость контроля количества последовательно соединенных солнечных элементов для минимизации рисков критического локального перегрева полугибких модулей.

Ключевые слова: полугибкие фотоэлектрические модули, гетероструктурные кремниевые солнечные элементы, технология контактирования SmartWire, климатические испытания на надежность, локальный перегрев, стойкость к ударам града.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58865.173-24

Введение

Полугибкие фотоэлектрические модули (ФЭМ) на основе кремниевых ячеек — одно из быстроразвивающихся направлений в фотовольтаике [1–5]. Такие ФЭМ нашли широкое применение для электроустановок наземного транспорта, в судостроении, в авиации, а также для интегрированных в здания солнечных энергосистем (крыши, фасады) [6–9]. В полугибких ФЭМ фронтальное стекло заменено на прозрачный полимерный лист, что определяет их преимущества, к которым, во-первых, относится низкий вес — удельный вес стандартных ФЭМ стекло/тыльный лист составляет $\sim 12 \text{ kg/m}^2$, тогда как удельный вес полугибких ФЭМ, в зависимости от конструкции, варьируется от 1.5 до 3 kg/m^2 ; во-вторых, такие ФЭМ можно сгибать в определенных пределах, что позволяет использовать их на поверхностях с существенной кривизной, таких, как крыши автомобилей или корпуса лодок; в-третьих, независимость размера полугибких ФЭМ от размера стекла дает свободу для варьирования их формы (возможность срезать углы, делать закругления и т.п.), что позволяет максимально эффективно заполнить полезную поверхность. Кроме того, полугибкие ФЭМ обладают

разнообразными крепежными средствами, что делает их удобными в установке и применении в различных условиях эксплуатации. Они могут быть закреплены с использованием двухсторонних адгезивных лент, герметика, люверсов и саморезов, застежки, текстильных лент на основе системы крючок–петля и т.д. Но наряду с преимуществами у полугибких ФЭМ есть и недостатки. Замена стекла на лист пластика делает их более чувствительными к механическим и климатическим воздействиям, что сокращает срок их службы [10–12].

В настоящей работе представлена конструкция полугибких ФЭМ с защитными полимерными листами на основе полиэтилентерефталата (PET) и кремниевыми гетеропереходными фотоэлектрическими преобразователями (НТ ФЭП), скоммутированными между собой с помощью пленочно-проволочного электрода (ППЭ) по технологии контактирования SmartWire (SW) [13,14]. Эта конструкция успешно прошла климатические испытания согласно ГОСТ Р 56980.2 (МЭК 61215-2:2016) — 2020. Дополнительно было исследовано влияние типа проволоки SmartWire на надежность полугибких ФЭМ, а также их стойкость к локальному перегреву до и после воздействия ударов града.

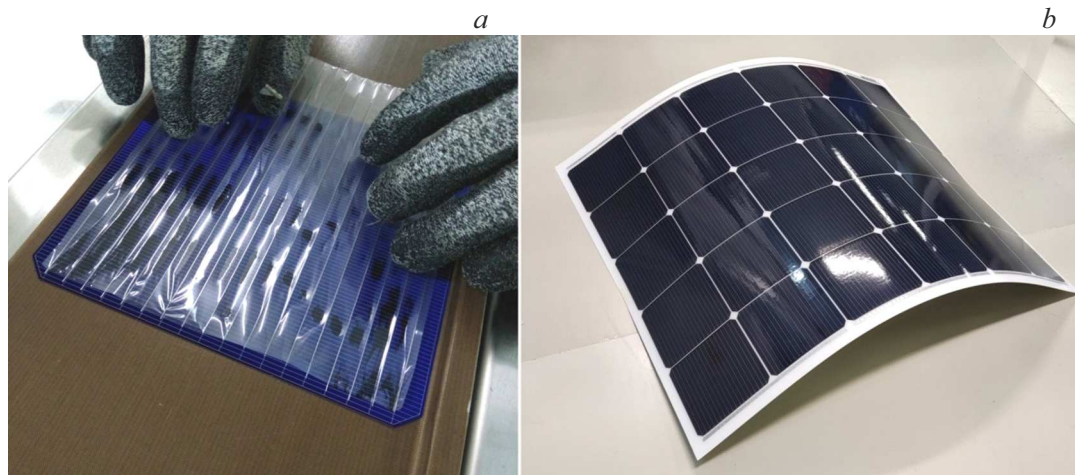


Рис. 1. *a* — ручное приклеивание ППЭ SW на ФЭП НТ на нагревательном столе для последовательной коммутации ФЭП в печетки; *b* — фотография полугибкого ФЭМ формата 6×5 ФЭП НТ.

1. Материалы и методы

Полугибкие ФЭМ для испытаний были изготовлены на основе НТ ФЭП размером 157.35×157.35 mm, толщиной $130 \mu\text{m}$, производства ООО „Хевел“ [15]. ФЭП НТ с эффективностью больше 23% были соединены в последовательную цепочку с помощью ППЭ SW и медной шины сечением 6×0.3 mm, покрытой припоем $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$ толщиной $14\text{--}20 \mu\text{m}$. ППЭ представляет собой двухслойную полимерную пленку (PET $12 \mu\text{m}$ + адгезионный слой полиолефина $65 \mu\text{m}$), в которую вплавлены 18 медных проволок диаметром $250 \mu\text{m}$, покрытых слоем припоя на основе расплава $\text{In}_{52}\text{Sn}_{48}$ (далее — InSn) или $\text{Sn}_{42}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_1$ (далее — SnBiAg) толщиной $5\text{--}7 \mu\text{m}$ (рис. 1). Контакт проволок с серебряной токосъемной сеткой ФЭП НТ обеспечивается пайкой в процессе ламинирования ФЭМ. В качестве фронтального/тыльного защитного листа использовался прозрачный/белый полимерный лист на основе PET толщиной $420 \mu\text{m}$ с паропроницаемостью менее $0.65 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$; в качестве инкапсулянта — термопластичная полиолефиновая пленка толщиной $450 \mu\text{m}$ с температурой плавления 130°C . Удельный вес такой конструкции ФЭМ составил $2.1 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Полугибкие ФЭМ формата 2×5 , 2×6 и 6×5 НТ ФЭП были изготовлены на лабораторном ламинаторе производства Burkle GmbH. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов проводились на установке h.a.l.m. elektronik GmbH cetisPV при стандартных условиях ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$, AM 1.5AM, 25°C). Изображения электролюминисценции (ЭЛ) получены с помощью осветительного стенда MBJ Solutions SM-EL-lab.

Испытания ФЭМ на надежность проводились согласно условиям ГОСТ Р 56980.2 (МЭК 61215-2:2016) — 2020. Проводилось испытание на воздействие высокой температуры при высокой влажности, термоциклирование, испытание на стойкость к местному перегреву,

испытание на стойкость к ударам града. В ходе климатических испытаний ФЭМ формата 6×5 НТ ФЭП подвешивались в камере за четыре точки крепления. Для испытания на стойкость к местному перегреву ФЭМ формата 2×5 и 2×6 НТ ФЭП приклеивались с помощью двухсторонней адгезивной ленты к теплоизоляционной сэндвич-панели для имитации реальных условий эксплуатации таких ФЭМ. Испытание на стойкость к ударам града проводилось на специально разработанной тестовой установке, обеспечивающей выстрел градом диаметром 25 mm со скоростью 23 m/s . При этом образцы крепились на жесткое основание с помощью тонкой двухсторонней адгезивной ленты.

2. Результаты и обсуждение

Для испытания на воздействие высокой температуры при высокой влажности ($85^\circ\text{C}/85\%$ (отн. влажность)) было изготовлено два полугибких ФЭМ 6×5 НТ ФЭП с различными слоями припоя InSn и SnBiAg проволок ППЭ SW. Результаты измерений ВАХ и ЭЛ ФЭМ до и после испытания представлены в табл. 1 и на рис. 2. Как видно из данных, ФЭМ с проволокой InSn не выдержал испытание, показав деградацию мощности 6.4% после 1000 h , при допустимом согласно стандарту уровне 5% . В то же время ФЭМ с проволокой SnBiAg продемонстрировал хорошую стойкость к воздействию влаги при повышенной температуре, показав деградацию мощности 3.1% даже после 1700 h .

На изображениях ЭЛ у ФЭМ с проволокой InSn после 1000 h испытания появились потемнения по всей площади ячеек, что свидетельствует о локальном увеличении сопротивления коммутации. Визуальный осмотр ФЭМ показал появление коррозии на проволоках InSn (рис. 3), что привело к ухудшению контакта проволоки с токосъемной металлизированной сеткой на

Таблица 1. Деградация электрических характеристик полугибких ФЭМ после испытания на воздействие высокой температуры при высокой влажности

Характеристики	ФЭМ с проволокой InSn		ФЭМ с проволокой SnBiAg		
	Исходный	После 1000 h	Исходный	После 1000 h	После 1700 h
I_{sc}, A	8.69	8.48	8.87	8.77	8.76
U_{oc}, V	21.98	21.86	22.08	22.03	22.04
I_{mpp}, A	8.20	7.98	8.46	8.36	8.30
U_{mpp}, V	18.40	17.70	18.52	18.33	18.29
P_{mpp}, W	150.93	141.20	156.63	153.19	151.77
FF, %	79.01	76.17	80.01	79.32	78.60
Деградация мощности, $\Delta P/P_{init}, \%$	—	~ 6.4%	—	~ 2.2%	~ 3.1%

Примечание. Здесь I_{sc} — ток короткого замыкания, U_{oc} — напряжение холостого хода, I_{mpp} и U_{mpp} — значения тока и напряжения в точке максимальной мощности, P_{mpp} — максимальная мощность ФЭМ, FF — фактор заполнения.

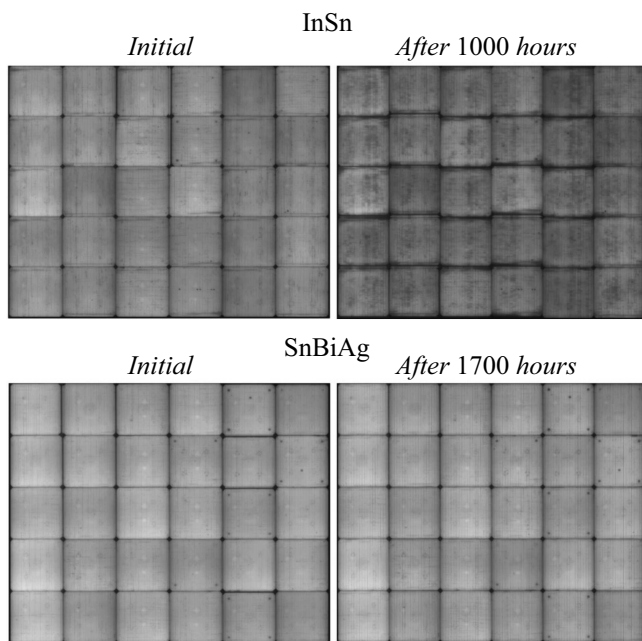


Рис. 2. Изображения ЭЛ полугибких ФЭМ до и после испытания на воздействие высокой температуры при высокой влажности.

поверхности ФЭП. Коррозия на ФЭМ с проволокой SnBiAg после 1700 h испытания не наблюдалась.

Для термоциклирования в диапазоне температур от -40 до $+85^\circ C$ также были изготовлены два полугибких ФЭМ 6×5 НТ ФЭП с проволоками InSn и SnBiAg. Результаты измерений ВАХ и ЭЛ ФЭМ до и после испытания представлены в табл. 2 и на рис. 4. Оба ФЭМ успешно выдержали требуемый по стандарту объем испытаний в 200 циклов. Более того, испытания были продолжены до 350 циклов. Деградация мощности ФЭМ с проволокой SnBiAg составила около 3.0%, а с ФЭМ с проволокой InSn — около 4.1%.

На изображениях ЭЛ у обоих ФЭМ после 350 циклов испытания появились потемнения, которые обусловлены, во-первых, частичной потерей контакта проволок к токосъемной сетке; во-вторых, поломкой проволок ППЭ SW в промежутках между ФЭП в последовательной цепочке (рис. 5).

Одной из критических проблем при использовании полугибких ФЭМ является локальный перегрев при частичном затенении и/или повреждении ФЭП (так называемый эффект „hot spot“ [16–18]). Полугибкие ФЭМ обычно крепятся на какую-либо поверхность, поэтому теплоотвод от них затруднен. В результате рабочая температура и температура при условии частичного затенения таких ФЭМ больше, чем у ФЭМ, устанавливаемых стандартно. Кроме этого, замена стекла на полимерный лист делает полугибкие ФЭМ более уязвимыми для механических повреждений и появлению трещин ФЭП, что может привести к сильному точечному разогреву и даже прогоранию ФЭМ при частичном затенении.

Для изучения влияния локального перегрева в режиме частичного затенения были изготовлены полугибкие ФЭМ с 10 (формат 2×5) и 12 (формат 2×6) последовательно соединенными ФЭП НТ на основе ППЭ

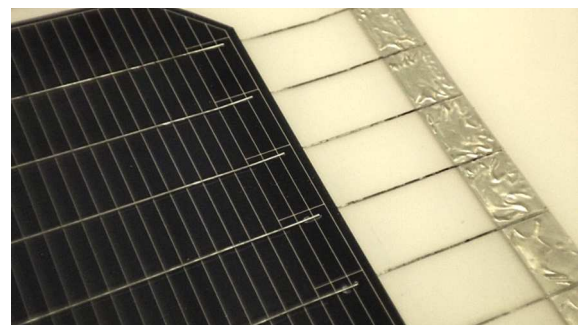
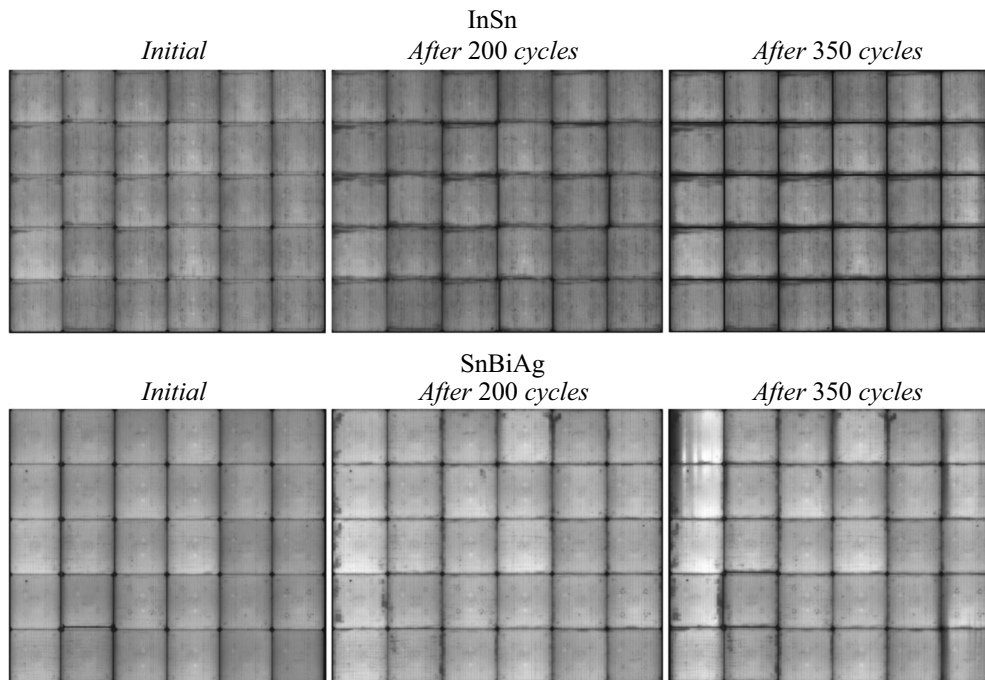


Рис. 3. Коррозия на проволоках InSn внутри ФЭМ после 1000 h испытания на воздействие высокой температуры при высокой влажности.

Таблица 2. Деградация электрических характеристик полугибких ФЭМ после термоциклирования

Характеристики	ФЭМ с проволокой InSn			ФЭМ с с проволокой SnBiAg		
	Исходный	После 200 циклов	После 350 циклов	Исходный	После 200 циклов	После 350 циклов
I_{sc} , А	8.80	8.52	8.62	8.88	8.84	8.82
U_{oc} , В	21.99	21.92	21.95	22.07	22.07	22.08
I_{mpp} , А	8.31	8.11	8.14	8.48	8.41	8.35
U_{mpp} , В	18.37	18.15	18.00	18.48	18.38	18.19
P_{mpp} , Вт	152.69	147.12	146.49	156.65	154.66	151.96
FF, %	78.94	78.78	77.40	79.95	79.28	78.03
Деградация мощности, $\Delta P/P_{init}$, %	—	~ 3.6	~ 4.1	—	~ 1.3	~ 3.0

Примечание. Здесь I_{sc} — ток короткого замыкания, U_{oc} — напряжение холостого хода, I_{mpp} и U_{mpp} — значения тока и напряжения в точке максимальной мощности, P_{mpp} — максимальная мощность ФЭМ, FF — фактор заполнения.

**Рис. 4.** Изображения ЭЛ полугибких ФЭМ до и после термоциклирования.**Рис. 5.** Поломка проволок ППЭ SW в промежутках между ФЭП после 350 циклов термоциклирования.

SW с проволокой SnBiAg. ФЭМ были закреплены на теплоизоляционной сэндвич-панели толщиной 65 mm из экструдированного пенополистирола для моделирования наихудшего теплоотвода. Испытание проводилось на открытом воздухе с контролем условий в соответствии с ГОСТ Р 56980.2 (МЭК 61215-2:2016) — 2020. Температура ФЭМ на сэндвич-панели в рабочем режиме без затенения составила приблизительно 70°C .

Экспериментально было установлено, что максимальная температура разогрева полугибкого ФЭМ достигается в испытании при затенении ФЭП на 15–20%. При этом ФЭМ формата 2×6 ФЭП разогревался до $\sim 140^{\circ}\text{C}$, ФЭМ формата 2×5 ФЭП — до $\sim 120^{\circ}\text{C}$. Измерения ВАХ и изображений ЭЛ после 3 h испы-



Рис. 6. Деформация полугибкого ФЭМ формата 2 × 6 ФЭП и отсутствие деформации ФЭМ формата 2 × 5 ФЭП после испытания на стойкость к местному перегреву.

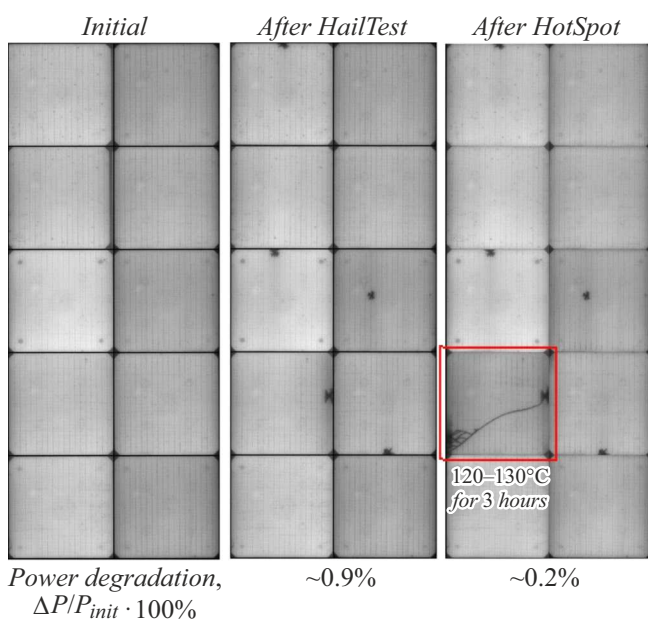


Рис. 7. Результаты испытаний полугибкого ФЭМ формата 2 × 5 ФЭП на стойкость к ударам града и последующему локальному перегреву.

тания показали незначительную деградацию мощности (~ 0.4%) и отсутствие изменений на ЭЛ на обоих ФЭМ. Однако внешний осмотр выявил сильную деформацию ФЭМ формата 2 × 6 ФЭП с нарушением герметичности в области затенения, в то время как на ФЭМ формата 2 × 5 ФЭП деформации отсутствовали (рис. 6).

Сильную деформацию ФЭМ формата 2 × 6 ФЭП можно объяснить тем, что температура ФЭМ во время испытания превысила температуру плавления инкапсулянта (130°C). Термопластичная полиолефиновая пленка при достижении температуры 140°C перешла в жидкое состояние, что при отсутствии жесткой подложки (стекла в случае стандартных ФЭМ) привело к деформации ФЭМ. Таким образом, для рассматриваемой конструкции полугибких ФЭМ максимальное количество последователь-

но соединенных ФЭП не должно превышать 10 штук на один байпасный диод.

Еще одной критической проблемой для полугибких ФЭМ является механическая прочность. Оценка устойчивости к механическим воздействиям проводилась с помощью испытания на стойкость к ударам града на ФЭМ формата 2 × 5 HJT ФЭП. Для минимизации повреждений ФЭМ был закреплен с помощью тонкой двухсторонней адгезивной ленты на жесткую поверхность так, чтобы между поверхностью и ФЭМ не оставалась воздушная прослойка [11]. После нескольких ударов градом в области ФЭП деградация мощности ФЭМ составила 0.9%, и внешние повреждения отсутствовали, следовательно, согласно критериям стандарта, ФЭМ выдержал испытание успешно. Однако необходимо отметить, что на отдельных ФЭП после испытания появились точечные повреждения — отдельные локальные трещины (рис. 7).

В рамках настоящей работы также было исследовано влияние повреждений ФЭП от града на возможный последующий локальный перегрев ФЭМ в месте повреждения. Для этого поврежденная ФЭП была затенена на 15–20%. Температура ФЭМ в области затененной ФЭП составила ~ 120–130°C. Контрольные измерения ЭЛ показывают, что на поврежденной ФЭП появилась протяженная трещина, источником которой стало точечное повреждение после попадания града (рис. 7). Таким образом, повреждения на ФЭП могут усиливать эффект локального перегрева, что в итоге может сказаться на надежности конструкции ФЭМ.

Заключение

В работе предложена конструкция полугибких легких ФЭМ на основе ФЭП HJT, соединенных по технологии контактирования SmartWire. Такая конструкция успешно выдержала испытание на воздействие высокой температуры в объеме, существенно превышающем требования стандарта (более 1500 h), а также испытание термоциклирования (более 350 h), при этом деградация мощности составила всего ~ 3%.

В результате исследования установлено, что для обеспечения надежной работы полугибких ФЭМ необходимо использовать проволоку для ППЭ SW с покрытием SnBiAg, поскольку она обладает более высокой стойкостью к коррозии при воздействии влаги по сравнению с проволокой, содержащей припой InSn. Также определено, что оптимальным дизайном ФЭМ является конструкция с количеством ФЭП на один байпасный диод не более 10 штук из-за потенциального риска локального перегрева ФЭМ выше температуры плавления инкапсулянта, что может привести к деформации ФЭМ и его отказу в режиме частичного затенения.

Отмечено, что, благодаря многопроволочной системе контактирования SmartWire, деградация мощности ФЭМ после ударов града является незначительной, однако дальнейшая эксплуатация ФЭМ с трещинами ФЭП увеличивает риск локального перегрева полугибкого ФЭМ. Эти результаты имеют существенное значение для дальнейшего совершенствования полугибких ФЭМ и их применения в практических условиях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Tachibana, K. Shirasawa, K. Tanahashi. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **262**, 11254 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112541
- [2] T.M. Hammam, B. Alhalaili, M.S. Abd El-sadek, A.A. Abuelwafa. *Sensors*, **23**, 7995 (2023). DOI: 10.3390/s23187995
- [3] J. Ulbikas, M. Rudzikas, P. Dubravskij, A.G. Ulyashin. *Proceed. Intern. Conf. 37th EU PVSEC, Poster 4AV.2.29* (2020).
- [4] N. Pervan, G.C. Eder, Y. Voronko, C. Ballif, F. Lisco, U. Desai, A. Derluyn, J. Govaerts, B. Luo, G. Oreski. *Proceed. Inter. Conf. 40th EU PVSEC, Poster 3AV.1.12* (2023).
- [5] H. Nussbaumer, M. Klenk, N. Keller. *Proceed. Inter. Conf. 32th EU PVSEC*, p. 56–60 (2016). DOI: 10.4229/EUPVSEC20162016-1BO.12.5
- [6] A. Abramov, D. Andronikov, K. Emtsev, D. Orekhov, I. Shakh-ray, E. Terukov, E. Terukova, S. Yakovlev. *Proceed. Inter. Conf. 35th EU PVSEC*, p. 1227–1229 (2018). DOI: 10.4229/35thEUPVSEC20182018-5CV.1.34
- [7] M.J. Park, S. Youn, K. Jeon, S.H. Lee, C. Jeong. *Appl. Sci.*, **12**, 5011 (2022). DOI: 10.3390/app12105011
- [8] B. Commault, T. Duigou, V. Maneval, J. Gaume, F. Chabuel, E. Voroshazi. *Appl. Sci.*, **11**, 11598 (2021). DOI: 10.3390/app112411598
- [9] G. Minak. *J. Mar. Sci. Eng.*, **11**, 1519 (2023). DOI: 10.3390/jmse11081519
- [10] S. Yakovlev, E. Schebet, K. Emtsev, D. Andronikov, A. Abramov, D. Orekhov, I. Shakh-ray. *Proceed. Inter. Conf. 37th EU PVSEC*, p. 1117–1119 (2020). DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.18
- [11] S. Yakovlev, E. Schebet, K. Emtsev, D. Andronikov, A. Abramov, D. Orekhov, I. Shakh-ray. *Proceed. Inter. Conf. 36th EU PVSEC*, p. 1040–1041 (2019). DOI: 10.4229/EUPVSEC20192019-4AV.1.22
- [12] F. Lisco, A. Virtuani, C. Ballif. *Proceed. Inter. Conf. 37th EU PVSEC*, p. 777–783 (2020). DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-4BO.11.5
- [13] A. Faes, M. Despeisse, J. Levrat, J. Champiaud, N. Badel, M. Kiaee, Th. Söderström, Yu Yao, R. Grischke, M. Gragert, J. Ufheil, P. Papet, B. Strahm, B. Cattaneo, G. Cattin, Ya. Baumgartner, A. Hessler-Wyser, Ch. Ballif. *Proceed. Inter. Conf. 29th EU PVSEC*, p. 2555–2561 (2014). DOI: 10.4229/EUPVSEC20142014-5DO.16.3
- [14] B. Strahm, D. Lachenal, D.L. Bätzner, W. Frammelsberger, B. Legradic, J. Meixenberger, P. Papet, G. Wahli, E. Vetter, M. Despeisse, A. Faes, A. Lachowicz, Ch. Allebé, P.-J. Alet, M. Bonnet-Eymard, Ch. Ballif, Yu Yao, Ch. Rychen, Th. Söderström, J. Heiber, G. Schiltges, S. Leu, J. Hiller, V. Fakhfour. *Proceed. Inter. Conf. 29th EU PVSEC*, p. 467–471 (2014). DOI: 10.4229/EUPVSEC20142014-2BO.4.1
- [15] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov. In *High-efficient low-cost Photovoltaics. Springer Ser. in Optical Sciences* (Springer, Cham, 2020), v. 140, p. 113–132. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4_7
- [16] F. Li, W. Dong, W. Wu. *Adv. Appl. Energy*, **9**, 100118 (2023). DOI: 10.1016/j.adapen.2022.100118
- [17] E. Özkalay, F. Valoti, M. Caccivio, A. Virtuani, G. Friesen, C. Ballif. *EPJ Photovoltaics*, **15**, 7 (2024). DOI: 10.1051/epjpv/2024001
- [18] S. Deng, Z. Zhang, C. Ju, J. Dong, Z. Xia, X. Yan, T. Xu, G. Xing. *Energy Procedia*, **130**, 77 (2017). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.399