

07.2

Гибридный концентраторно-планарный фотоэлектрический модуль с гетероструктурными солнечными элементами

© М.З. Шварц¹, А.В. Андреева¹, Д.А. Андроников^{1,2}, К.В. Емцев^{1,2}, В.Р. Ларионов¹,
М.В. Нахимович¹, П.В. Покровский¹, Н.А. Садчиков¹, С.А. Яковлев^{1,2}, Д.А. Малевский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2022 г.

В окончательной редакции 12 декабря 2022 г.

Принято к публикации 12 декабря 2022 г.

Представлено решение для фотоэлектрических модулей, обеспечивающее преодоление основного концептуального ограничения для концентраторного направления в фотовольтаике, которое заключается в невозможности преобразования диффузно рассеянного солнечного излучения, приходящего на панель концентраторов излучения. Предложена конструкция гибридного концентраторно-планарного фотоэлектрического модуля, построенного на гетероструктурных солнечных элементах: трехпереходных III–V и кремниевых (Si-HJT). Обсуждаются результаты первичных натуральных исследований модуля и даются оценки его энергопроизводительности.

Ключевые слова: гибридный концентраторно-планарный фотоэлектрический модуль, многопереходный солнечный элемент, Si-HJT планарный фотопреобразователь, диффузно рассеянное излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.04.54520.19438

Расширение функциональных возможностей и энергетического потенциала фотоэлектрических систем прямого преобразования солнечной энергии за счет преимуществ концентраторной и планарной концепций является крайне перспективным научно-техническим направлением.

Создание гибридных фотоэлектрических модулей, выполненных на элементной полупроводниковой базе с использованием гетеропереходных структур III–V и структур Si-HJT (heterojunction technology — кремниевая гетеропереходная технология) [1,2], позволяет эффективно преобразовывать как энергию прямого солнечного излучения концентраторными фотоэлектрическими ячейками, так и энергию диффузного (рассеянного) солнечного излучения планарными солнечными элементами. Очевидное превосходство гибридных модулей над классическими концентраторными заключается в сохранении существенной энергопроизводительности в условиях облачной и пасмурной погоды, когда прямое излучение ослаблено или отсутствует, а диффузное излучение, свободно проникая сквозь концентратор преломляющего типа (например, линзу Френеля, которая для такого излучения выступает в роли достаточно эффективного рассеивателя), достигает планарных солнечных элементов. Такие гибридные концентраторно-планарные решения имеют потенциал применения для регионов со средним уровнем поступления прямой солнечной радиации (DNI — direct normal irradiance) в общем потоке излучения, приходящем на следящую поверхность (GNI — global normal irradiance). Работа на общую нагрузку обоих фотоэлектрических конту-

ров (концентраторного и планарного) должна снижать глубину колебаний электрогенерации при изменении режимов поступления излучения с „преимущественно прямого“ на „прямое+диффузное (смешанное)“ с соответствующим переходом в генерации от высокоэффективной III–V концентраторной подсистемы к более дешевой, но менее эффективной кремниевой.

Интерес к гибридным (комбинированным) решениям определяется необходимостью расширения территорий применения систем высокоэффективной концентраторной фотоэнергетики и подтверждается значительным числом публикаций по данному направлению, тема которых затрагивает как конструктивные и эксплуатационные особенности гибридных модулей [3–6], так и вопрос оценивания их энергетического потенциала [6–9].

В настоящей работе представлены результаты разработки гибридного (концентраторно-планарного) фотоэлектрического модуля (ГФМ) с гетеропереходными III–V и Si-HJT солнечными элементами и продемонстрированы данные по энерговыработке, позволяющие оценивать его энергетический потенциал.

В основу конструкции ГФМ положено совмещение двух хорошо проработанных концептуальных подходов. Для концентраторного контура это подход типа „modules of SMALFOC-design“ [1,10], в котором множество концентраторных солнечных элементов (СЭ) на радиаторах располагается на лицевой (обращенной внутрь модуля) поверхности стеклянной пластины, формируя тем самым электрогенерирующую панель. В качестве приемников-преобразователей сконцентрированного солнечного излучения использовались трех-



Рис. 1. Гибридный концентраторно-планарный фотоэлектрический модуль.

переходные (triple-junction, 3J) СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge, устанавливаемые на керамические малоразмерные платы-радиаторы (DBC-технология — подложка Al_2O_3 с двусторонним медным покрытием). Такое решение обеспечивало эффективный отвод тепла от 3J СЭ и его передачу стеклянному основанию при минимальном затенении этими платами поверхности Si-HJT СЭ (расположен под стеклянной пластиной). Для планарного контура это классический вариант неконцентраторного модуля, когда Si-HJT СЭ фиксируются под стеклом посредством ламинирования пленкой, которая служит защитой для их тыльной стороны и элементов электрической коммутации. Применение прозрачной ламинирующей планки позволяет использовать Si-HJT СЭ с двусторонней чувствительностью, что увеличивает энерговыработку планарного фотоэлектрического контура за счет преобразования излучения, отраженного

от окружающей инфраструктуры. В экспериментальном ГФМ использовались Si-HJT СЭ с двусторонней чувствительностью, коэффициент двусторонности (т.е. отношение между эффективностями преобразования солнечного излучения фронтальной и тыльной сторонами) для которых составлял 93%.

Экспериментальный ГФМ включает 32 ячейки с концентраторами типа „линза Френеля“ (40×40 mm каждая), объединенными в единую панель формата 4×8 линз. Планарный фотоэлектрический контур формировался на основе перспективных Si-HJT СЭ размером 157.4×157.4 mm со скошенными углами [2,11]. Фотография ГФМ из 32 концентраторных ячеек и двух полноразмерных Si-HJT СЭ представлена на рис. 1. Каждый такой элемент практически полностью (с учетом технологических периферийных областей шириной 1 mm) перекрывал поверхность тыльного основания, соответствующую по площади линзовой группе формата 4×4 линзы. Открытая (за вычетом затенения радиаторами и элементами коммутации концентраторного контура) для приема диффузного излучения поверхность кремниевого элемента составляет 88% от площади линзовой панели, используемой в ГФМ.

Важным преимуществом реализованной конструкции является максимально полное использование развитых технологических решений как для концентраторной части, так и для планарной, исключая какие-либо дополнительные затраты на обработку (резку) Si-HJT СЭ, производимых фотоэлектрической индустрией [12]. Последнее является главным отличием и одновременно преимуществом рассматриваемой концепции ГФМ по сравнению с вариантами исполнения аналогичных модулей, в которых кремниевые СЭ либо изготавливаются

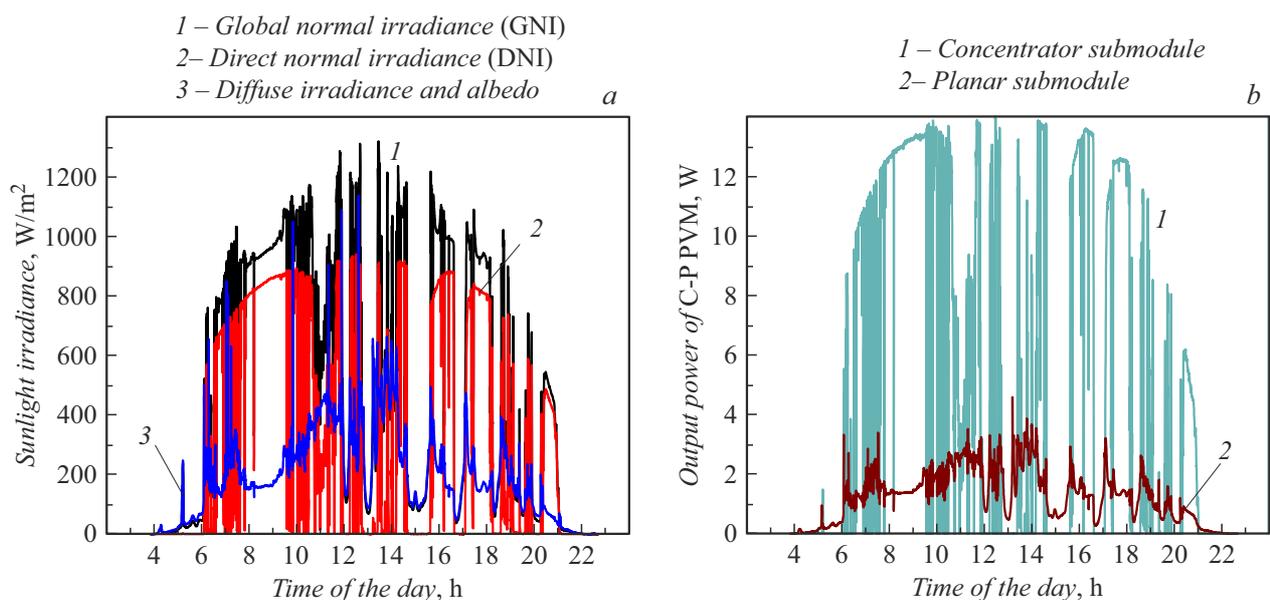


Рис. 2. Результаты мониторинга ГФМ: поступление солнечного излучения на следящую поверхность (a) и мгновенные значения электрических мощностей, генерируемых контурами ГФМ (b), при режиме поступления излучения „переменная облачность“.

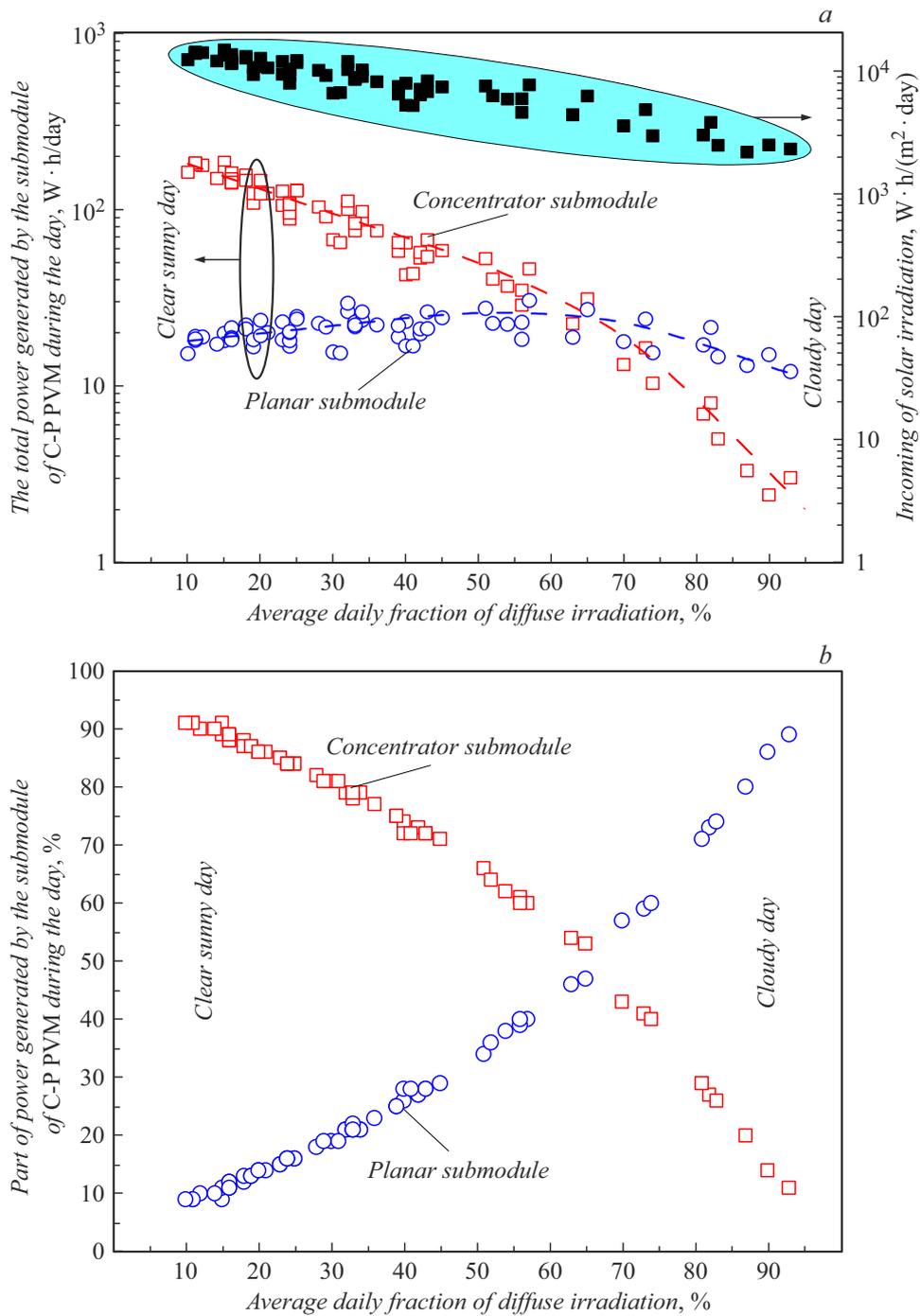


Рис. 3. Суммарная (a) и относительная (b) (для общей энергопроизводительности) мощности, вырабатываемые индивидуально концентраторным и планарным фотоэлектрическими контурами ГФМ в течение дня, в зависимости от доли диффузного излучения в общем световом потоке, поступающем на поверхность модуля. Наблюдения проводились в период с 17 июня по 8 сентября 2022 г. (пункт наблюдений — г. Санкт-Петербург, 59.94°N, 30.31°E) в режиме непрерывного слежения ГФМ за положением Солнца.

нестандартных размеров и имеют специальную контактную структуру [9,11,13], либо подвергаются специальной обработке с формированием отверстий для пропускания сконцентрированного линзой Френеля излучения к 3J СЭ [4].

Следует отметить, что рассматриваемый ГФМ отличается от вариантов, предлагаемых в работах [1,4],

прежде всего единством исполнения, когда планарные технологии дополняют хорошо зарекомендовавшую себя концентраторную концепцию, не усложняя ее конструктивно и технологически.

Для разработанной конструкции ГФМ наибольший интерес представляет выработка электроэнергии каждым из фотоэлектрических контуров в режимах поступления

энергии солнечного излучения с различными соотношениями прямой и диффузной составляющих в общем световом потоке. Наблюдения проводились в период с 17 июня по 8 сентября 2022 г. (пункт наблюдений — г. Санкт-Петербург, 59.94°N, 30.31°E) в режиме непрерывного слежения ГФМ за положением Солнца [13–15] с регистрацией полной, прямой, диффузной и отраженной (альbedo) энергетических составляющих светового потока, поступающих на следящую поверхность. Пример хода дневных зависимостей при характерном режиме переменной облачности для поступающего излучения и временные диаграммы выходной электрической мощности контуров ГФМ представлены на рис. 2.

Следует отметить, что для чистого неба, когда доля диффузного излучения в общем потоке излучения составляет 10–15% (при прямом потоке $\sim 800 \text{ W/m}^2$ и более), выработка электроэнергии ГФМ оказывается на 10–15% больше, чем в случае концентраторного контура, именно за счет электрогенерации планарным контуром. В режимах частичной (переменной) или полной облачности (доля диффузного излучения увеличивается) процент выработки энергии планарным контуром возрастает на фоне падения суммарной генерации ГФМ в силу снижения общей энергии в поступающем потоке солнечного излучения. При переменном характере облачности или при значительной мутности атмосферы, когда превалирует поступление солнечной энергии в форме диффузного излучения (более 65%), дневная энерговыработка планарного контура оказывается сравнимой с таковой для концентраторного или превышает ее (рис. 3), и это при практически двукратном превышении КПД концентраторного контура над КПД планарного (32 и 18% при 1000 и 200 W/m^2 поступающего излучения соответственно).

Представлена концепция гибридного концентраторно-планарного фотоэлектрического модуля, формируемого на элементной базе с использованием двух типов материалов (III–V и Si) и предназначенного для преобразования энергии полного потока солнечного излучения: прямого концентраторными фотоэлектрическими ячейками и рассеянного (диффузного) планарными солнечными элементами. Превосходство ГФМ над обыкновенными концентраторными модулями заключается в сохранении энергопроизводительности в условиях облачной и пасмурной погоды, когда прямое излучение ослаблено или отсутствует, а диффузное излучение, свободно проникая сквозь концентратор (линзу Френеля), достигает планарных солнечных элементов. Ведущий мониторинг энерговыработки ГФМ с систематизацией и анализом больших массивов экспериментальных данных показал преимущества гибридных концентраторно-планарных фотоэлектрических модулей для территорий с преимущественно переменным балансом прямой и диффузной составляющих в суммарном потоке солнечного излучения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00158.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 133–174. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4_8
- [2] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 113–132. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4_7
- [3] N. Yamada, K. Okamoto, *Opt. Express*, **22** (S1), A28 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.000A28
- [4] М.З. Шварц, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, А.В. Малевская, Н.А. Садчиков, М.В. Нахимович, В.Р. Ларионов, А.В. Андреева, *Концентраторный фотоэлектрический модуль с планарными элементами*, патент РФ на изобретение № 2773716 (приоритет 11.10.2021).
- [5] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, F. Dimroth, *AIP Conf. Proc.*, **2012**, 090005 (2018). DOI: 10.1063/1.5053543
- [6] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, T. Fellmeth, T. Dörsam, M. Wiese, S.W. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **28** (5), 349 (2020). DOI: 10.1002/pip.3239
- [7] V.M. Emelyanov, E.S. Aronova, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, *AIP Conf. Proc.*, **2012**, 080005 (2018). DOI: 10.1063/1.5053533
- [8] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, G. Siefer, S.W. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **29** (6), 614 (2021). DOI: 10.1002/pip.3410
- [9] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, G. Siefer, S.W. Glunz, F. Dimroth, in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC) (IEEE, 2020)*, p. 2708. DOI: 10.1109/PVSC45281.2020.9300496
- [10] V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev, A.V. Chekalin, N.Yu. Davidiyuk, O.A. Im, E.V. Khazova, N.A. Sadchikov, *AIP Conf. Proc.*, **1556**, 185 (2013). DOI: 10.1063/1.4822227
- [11] B.V. Stefani, M. Kim, M. Wright, A. Soeriyadi, D. Andronikov, I. Nyapshaev, S. Abolmasov, K. Emtsev, A. Abramov, B. Hallam, *Solar RRL*, **5** (9), 2100406 (2021). DOI: 10.1002/solr.202100406
- [12] <https://hjtvp.com/hjt-producers/>; <https://hjtvp.com/hjt-solar-cells/>
- [13] V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev, N.Yu. Davidiyuk, E.A. Ionova, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, A.O. Monastyrenko, P.V. Pokrovsky, N.A. Sadchikov, in *Proc. of the 25th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition/5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Valencia, Spain, 2010)*, p. 102. DOI: 10.4229/25thEUPVSEC2010-1DV.5.45

- [14] Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Р. Ларионов, А.В. Малевская, В.М. Андреев, Письма в ЖТФ, **46** (11), 11 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.11.49490.18273 [D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, V.R. Larionov, A.V. Malevskaya, V.M. Andreev, Tech. Phys. Lett., **46**, 523 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020060073].
- [15] M. Shvarts, V. Larionov, P. Pokrovskiy, N. Sadchikov, D. Malevskiy, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., **578**, 012054 (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012054