

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.383.51

*В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, И.Т. ТЫМЧУК, А.В. КРАВЧЕНКО,
Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук*

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНЦЕНТРАТОРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Введение

Вклад Солнца в энергетический баланс Земли в пять тысяч раз превышает вклад остальных вместе взятых источников энергии. Ежегодно с солнечной радиацией на Землю поступает около $5 \cdot 10^{24}$ Дж энергии. Расчеты показывают, что современные мировые энергетические потребности можно было бы обеспечить за счет солнечной энергии, ежегодно получаемой площадью в 20 тыс. км², что составляет всего 0,005 % земной поверхности [1].

Темпы роста и планы развития «солнечной» энергетики, которые реализуют промышленно развитые страны, впечатляют масштабностью. Солнечная энергетика становится ключевым сектором мировой электроэнергетики, который будет быстро расти в грядущие годы. Полная суммарная мощность, вырабатываемая путем преобразования энергии солнца, к началу 2017 г. составила около 300 ГВт. Снижение производственных затрат и повышение производительности солнечных элементов и модулей обеспечат долгосрочную конкурентоспособность фотовольтаики в мировой энергетике [2].

Союз немецкого машиностроения (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau – VDMA) выпустил юбилейное, десятое издание ежегодной «Международной дорожной карты технологий фотовольтаики» (International Technology Roadmap for Photovoltaic – ITRPV). Данный доклад не только является авторитетным справочником по основным технологическим тенденциям отрасли, но и содержит актуальную информацию по экономике солнечной энергетики.

Авторы доклада приводят прогнозы долгосрочного развития солнечной энергетики в мире. Самый пессимистичный прогноз предполагает глобальную установленную мощность солнечной энергетики в 4500 ГВт к 2050 г. В этом случае солнечная энергетика будет вырабатывать примерно 16 % мирового электричества. В самом оптимистическом прогнозе в мире будет установлено 63400 ГВт солнечных электростанций к 2050 г., и солнечная энергетика будет покрывать примерно 69 % потребления первичной энергии на Земле.

При этом рост мирового рынка потребления солнечных батарей происходит на фоне снижения цен на солнечные модули при постоянном росте эффективности, как солнечных элементов, так и солнечных модулей и систем на их основе. В 2018 г. розничная стоимость солнечных модулей из монокристаллического кремния сократилась до 0,354 доллара США за ватт, а в начале 2019 г. до 0,244 доллара США за ватт [3].

Такое состояние цен на мировом рынке солнечной энергетики имеет значительную инвестиционную привлекательность. Однако, к сожалению, очевидно, что невысокая плотность падающей солнечной энергии, которая характерна для большинства регионов Украины, не дает возможности эффективно и массово использовать непосредственно уже наработанные в мире технологии фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в электрическую. Даже самые современные и освоенные в массовом производстве кремниевые фотоэлектрические солнечные модули с КПД 15 – 20 %, которые неподвижно сориентированы в направлении на Юг, могут вырабатывать в течение суток только одну треть своего номинала. Это происходит по двум очевидным причинам: приходится иметь дело с низкой плотностью сол-

нечной энергии и с так называемым «косинус-фактором» – суточным движением Солнца по небосклону, в результате которого максимум вырабатываемой электроэнергии приходится только на время, близкое к полуденному, когда принимающая излучение поверхность фотоэлектрических модулей ориентирована максимально точно на Солнце. Исправить положение с низкой плотностью падающей солнечной энергии в этом случае и существенно повысить эффективность преобразования солнечной энергии может концентрирование солнечного излучения с постоянным слежением за Солнцем.

Наиболее активно ведутся работы по разработке концентраторных солнечных установок в Китае, Австралии, Южной Африке, странах Персидского залива и Магрибе, условия солнечного освещения которых особенно подходят для эффективного применения таких систем. В конце 2018 г. в мире было уже установлено концентраторных солнечных станций общей мощностью до 5079 МВт (4879 МВт на конец 2017 г.). Многие станции находятся в стадии строительства и после их введения в эксплуатацию обеспечат значительное увеличение установленной мощности после 2019 г.

В Европе в период между 2007 и 2014 гг. в Испании было построено достаточно много концентраторных установок. Это привело к тому, что установленная в ЕС общая мощность концентраторных станций в 2017 г. составила 2314,3 МВт, включая пилотные проекты и демонстрационные образцы. Строительство концентраторных солнечных установок ведется также во Французских Восточных Пиренеях и Сицилии, планируется в Италии и на Сардинии.

Таким образом, достичь экономически приемлемых значений показателей цены солнечной электроэнергии в Украине вполне реально за счет создания солнечных концентраторных систем нового поколения, которые основаны на концепции малоразмерных до (500x500мм) высокоэффективных арсенид-галлиевых фотоэлектрических модулей с высокой степенью концентрации (HCPV модулей). При создании таких модулей появляется возможность снизить расходы на полупроводниковые материалы для производства заданной электрической мощности пропорционально кратности коэффициенту концентрации солнечного излучения. При степени концентрации солнечного излучения в 500 – 1000 крат, цена солнечных арсенид-галлиевых модулей уже сейчас может быть уменьшена до уровня менее 1 Евро за 1 Вт. А создание на их основе крупных солнечных станций обеспечит стоимость производимой электроэнергии менее 0,1 Евро за 1 кВт час.

КПД многопереходных арсенид-галлиевых солнечных элементов (СЭ) для приемников концентрированного излучения в настоящее время уже достигли рекордных значений 46 % для условий AM 1.5. Предполагается, что после 2020 г. эффективность концентраторных арсенид-галлиевых солнечных элементов приблизится к 50 % (рис. 1).

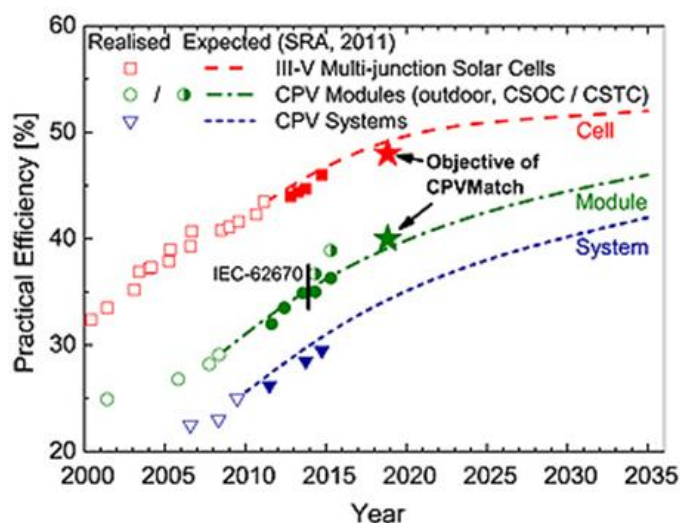


Рис. 1. Европейский прогноз повышения эффективности концентраторных фотоэлектрических систем и их элементов

Таким образом, главными движущими силами при создании современных эффективных приемников концентрированного солнечного излучения являются преимущества концентраторной солнечной фотоэнергетики, которые обеспечивают:

- снижение площади полупроводниковых СЭ в 500 – 1000 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения;
- увеличение более чем в два раза КПД в каскадных солнечных батареях по сравнению с кремниевыми батареями;
- увеличение в три раза удельного количества электроэнергии (кВт час/м²), вырабатываемой концентраторными солнечными батареями за счет большей эффективности и увеличение в 1,4 – 1,5 раза количества солнечной энергии, приходящей на поверхность солнечных батарей, за счет слежения за Солнцем;
- уменьшение в два раза стоимости солнечных батарей;
- создание солнечных фотоэнергоустановок с типовой мощностью на основе концентраторов и каскадных солнечных элементов, устойчивых к воздействию условий окружающей среды (ветер, дождь, снег и др.), с прогнозируемым сроком службы более 20 лет;
- значительное снижение экологической вредности производства за счет уменьшения площади солнечных батарей;

Концентраторные солнечные установки на арсенид-галлиевых высокоэффективных многокаскадных ФП могут серьезно потеснить традиционные кремниевые солнечные системы в жилищно-коммунальном секторе. А также в секторе локальных энергетических сетей и в секторе систем телекоммуникаций и навигационного обслуживания [3 – 7].

Цель работы – разработка новых подходов к созданию более совершенных конструктивно-технологических решений приемников излучения для концентраторных солнечных батарей на основе применения современных высокоэффективных материалов и комплектующих, которые способны обеспечить высокую конкурентную способность концентраторных солнечных систем с низким уровнем затрат на электроэнергию, до 5 – 10 евроцентов за кВт час.

1. Предмет и методы исследований

1.1. Концентраторные фотоэлектрические модули

Концепция «малоразмерных» концентраторных модулей была разработана еще в конце 1980-х годов. На базе высокоэффективных наногетероструктурных арсенид-галлиевых солнечных элементов (СЭ) в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ) спроектированы и созданы на практике впервые в мире различные модификации солнечных концентраторных модулей с устройствами слежения за Солнцем. В настоящее время с учетом этой концепции в мире активно проводятся работы по практической реализации коммерчески приемлемых концентраторных солнечных установок, а именно, – с применением точечных концентраторных модулей на линзах Френеля, основанных на преломляющей оптике, и модулей, основанных на отражающей оптике.

Концентраторные модули на плоских линзах Френеля.

В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе совместно с Фраунгоферовским институтом солнечных энергосистем уже разработана, запатентована и апробирована оригинальная конструкция концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ) площадью 0,5×0,5 м² (рис. 2, 3), объединяющая две зафиксированные друг относительно друга панели: концентраторную панель из 144 (12×12) плоских линз Френеля, изготовленных из прозрачного силикона, и электрогенерирующую панель с матрицей из 144 СЭ, размещенных в точках фокусировки отдельных концентраторов. СЭ смонтированы на теплопроводящих основаниях и объединены параллельно в электрогенерирующие линейки по 12 шт. Площадь отдельного СЭ составляет 2×2 мм². Площадь линзы Френеля – 40×40 мм², что позволяет реализовать концентрирование солнечного излучения около 400 крат. Выходное напряжение

КФЭМ в рабочей точке составляет 32 В, установленная мощность КФЭМ – 55 Вт. Отдельные КФЭМ объединяются в солнечные батареи (СБ) требуемой мощности [8].



Рис. 2. Внешний вид концентраторного фотоэлектрического модуля (КФЭМ) с апертурой $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$

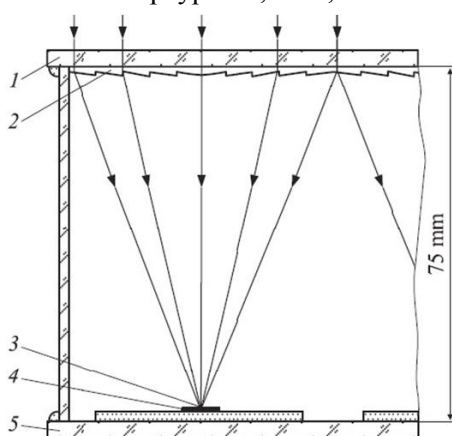


Рис. 3. Поперечный срез концентраторного модуля:
 1 – основа линзовой панели, выполненная из стекла;
 2 – микропризмы линз Френеля, сделанные из силикона;
 3 – сфокусированные солнечные лучи;
 4 – солнечный элемент, смонтированный на металлическом основании;
 5 – основа панели солнечных элементов, выполненная из стекла

Зеркальные концентраторные модули.

Одним из решений уменьшения хроматических аберраций, присущих линзам Френеля при высоких степенях концентрации солнечного излучения является использование в концентраторных системах отражающих зеркал. Первые результаты по созданию новых усовершенствованных современных вариантов конструкций зеркальных модулей HCPV (модулей с высокой степенью концентрации) были получены при выполнении проекта **APOLLON – Multi-APprOach for high efficiency integrated and inteLLigent cONcentrating PV modules (Systems)** седьмой рамочной программы ЕС по совместным исследованиям в области энергетики (2008 – 2013 гг.). Одним из инновационных признаков проекта APOLLON была возможность сравнить две основные концентрирующие фотоэлектрические технологии в процессе выполнения работ, а именно, – точечных концентраторных модулей на линзах Френеля – Point Focus (PF), основанных на преломляющей оптике, и Dense Array (DA) модулей, основанных на отражающей оптике. Конечным продуктом, разработанным в проекте APOLLON, стала зеркальная концентрирующая фотоэлектрическая система, состоящая из инновационных интеллектуальных модулей с системой слежения за Солнцем с эффективностью 30 % с запатентованной новой оптикой, работающей при высокой температуре и коэффициентом концентрации около 750 крат (рис. 4) [8].

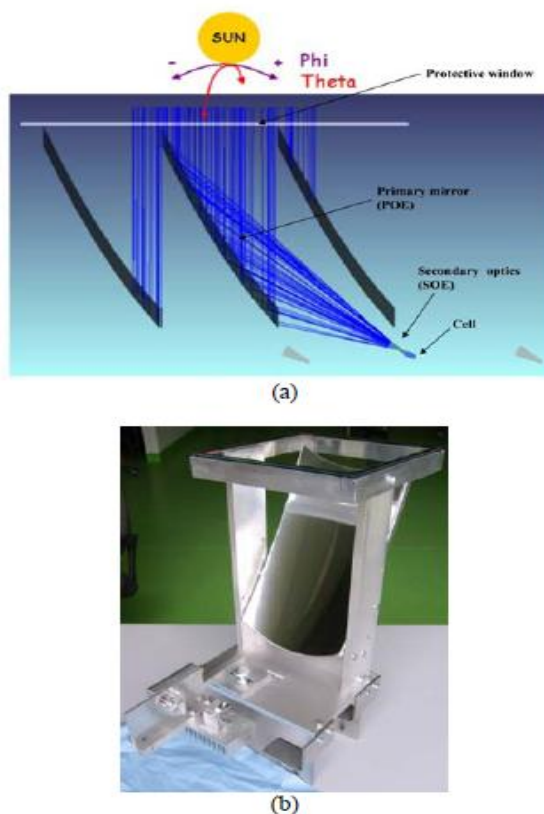


Рис. 4. Концепция зеркального концентратора с использованием внеосевых первичных оптических элементов (POE) и вторичных оптических элементов (SOE) – а; прототип модуля разработанного по проекту APOLLON – б

В 2015 г. ЕС продолжил работы по дальнейшему совершенствованию концентраторных солнечных технологий, которые были начаты в проекте APOLLON. Эта работа проводилась в рамках исследовательской и инновационной программы Европейского Союза Horizon 2020. Проект получил название **CPVMatch – Concentrating Photovoltaic Modules Using Advanced Technologies and Cells for Highest Efficiencies**.

Консорциум, который выполнял проект, состоял из четырех исследовательских институтов (Фраунгофер ISE, RSE, CEA, Tecnalia), одного университета (UPM), двух отраслевых партнеров (AZUR Space Solar Power, AIXTRON) и двух малых и средних предприятий ASSE и Cyclesco. Координатором проекта являлся Фраунгоферовский институт солнечных энергосистем.

Основная цель проекта – разработка и создание сверхэффективных солнечных элементов с мировым рекордным значением КПД 48 %, а также реализация на практике солнечных модулей HCPV, работающих с уровнем концентрации ≥ 800 крат при КПД 40 %. Это позволит приблизить практические характеристики модулей к теоретическим пределам. Получить такой результат предполагалось с помощью новых архитектур многопереходных солнечных элементов, использующих современные материалы и процессы для лучшего согласования солнечного спектра, а также с помощью инновационных концепций модулей с улучшенными оптическими и конструкционными параметрами. В том числе в процессе осуществления проекта предполагались:

- разработка нового четырехпереходного концентраторного солнечного элемента с архитектурой GaInP / GaAs // GaInAs / Ge с эффективностью 48 %;
- разработка многопереходного солнечного элемента с согласованной решеткой с высоким КПД и низкой стоимостью процесса, включающего наноструктурные многослойные покрытия из инновационных материалов, полученные путем комбинирования элементов III-V и IV;

- совершенствование интеллектуальных зеркальных HCPV модулей;
- разработка инновационных HCPV-модулей на основе ахроматических линз Френеля;
- оценка надежности и требуемого срока эксплуатации HCPV модулей.

Концентраторный зеркальный HCPV модуль разработан ASSE (рис. 5). В нем реализованы новые предложения по оптическому дизайну зеркала первичного оптического элемента и вторичного оптического элемента. А новые подходы по созданию конструкции приемников концентрированного солнечного излучения и технологии их сборки в итоге должны обеспечить низкие уровни затрат на электроэнергию в конце этого проекта ниже 5 евроцентов / кВт ч при степени концентрации до 850 крат [8, 9].

Предложенная инновационная конфигурация концентраторного зеркального модуля имеет следующие основные преимущества:

- за счет отсутствия препятствий во входящей апертуре зеркального концентратора достигается лучшая оптическая и собирающая эффективность;
- свет падает на первичные зеркала под большими углами падения, что увеличивает их отражающую оптическую эффективность;
- солнечные элементы располагаются в относительно холодном месте по отношению к концентратору и не освещаются солнцем. Такое их расположение позволяет заменить солнечные элементы при уменьшении их эффективности. Или заменить весь приемник на новые более эффективные СЭ и, тем самым, иметь возможность значительно увеличить срок эксплуатации зеркального модуля.

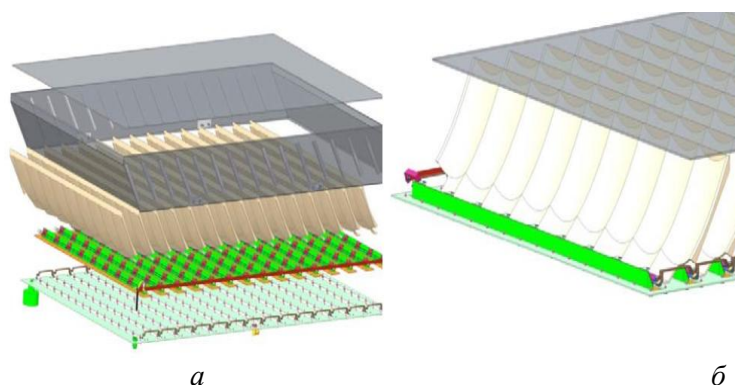


Рис. 5. Зеркальный модуль в разобранном виде – *а*;
зеркальный модуль, вид внутри – *б*

Тем не менее, в проекте CPVMatch также уделялось значительное внимание разработке инновационных HCPV-модулей на основе ахроматических линз Френеля.

В стандартных линзах Френеля хроматическая аберрация ограничивает коэффициент концентрации. Такие линзы могут быть наиболее эффективными при степени концентрации не более 100 крат (потерь эффективности практически нет). В интервале степеней концентрации от 100 до 350 крат эти потери незначительные. Но при высоких степенях концентрации эффективность стандартных линз Френеля значительно падает. Ахроматические линзы дают возможность обойти эту проблему.

В 2018 г. команде исследователей проекта CPVMatch во главе с экспертами Института солнечных энергетических систем Фраунгофера удалось разработать новую технологию создания короткофокусных точечных модулей на ахроматических линзах Френеля и солнечных элементах с КПД 46 % с рекордной эффективностью 41,4 % (рис. 6).



Рис. 6. Концентраторный модуль на двухосевом солнечном трекере

Кроме того, разработанная инновационная технология за счет применения высокоэффективных ахроматических линз Френеля позволила существенно упростить и удешевить конструкцию точечных концентраторных приемников, удалив из нее вторичные оптические элементы.

При этом дальнейшее совершенствование конструкций приемников, применяемых материалов и комплектующих, в том числе СЭ, способов обеспечения тепловых режимов их работы, а также технологии сборки приемников продолжало оставаться самым основным потенциалом для снижения стоимости, обеспечения высокой надежности и увеличения срока эксплуатации концентраторных солнечных модулей [9].

1.2. Приемники концентрированного солнечного излучения

Авторами статьи в рамках проекта APOLLON проведены работы по разработке ряда конструкций приемников концентрированного излучения для солнечных HCPV модулей на линзах Френеля на основе трехпереходных арсенид-галлиевых солнечных элементов, изготовленных компаниями ENE (Бельгия) и Azur Space (Германия), и инновационной алюминий-полиимидной Chip-On-Flex (COF) технологии сборки. Также были проведены работы по анализу и выбору материалов, проектно-расчетным исследованиям для разработки конструкций вторичных оптических элементов (ВОЭ). Для отработки технологии изготовления приемников были разработаны и изготовлены тестовые структуры качества и различные типы образцов приемников концентрированного излучения (рис. 7, 8). Также были проведены ускоренные термоциклические испытания образцов приемников с целью оценки их надежности и сроков эксплуатации в соответствии со стандартом IEC 62108 «Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies – Design qualification and type approval». Данный стандарт определяет требования к электрическим, механическим и температурным характеристикам концентраторных фотовольтаических приемников и их сборочных узлов, приемлемые для долговременного функционирования в нормальных климатических условиях [10 – 13].



а



б

Рис. 7. Приемники концентрированного солнечного излучения на основе трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ с интегрированной вторичной оптикой типа:

а – усеченный конус, *б* – усеченная пирамида

Тестовые структуры качества.

Объектом исследований и испытаний при проведении работ были образцы тестовых структур качества (ТСК) и образцы приемников концентрированного излучения на основе трехпереходных СЭ, изготовленных компаниями ENE (Бельгия) и Azur Space (Германия).

На рис. 8 приведены фотографии тестовых структур качества.

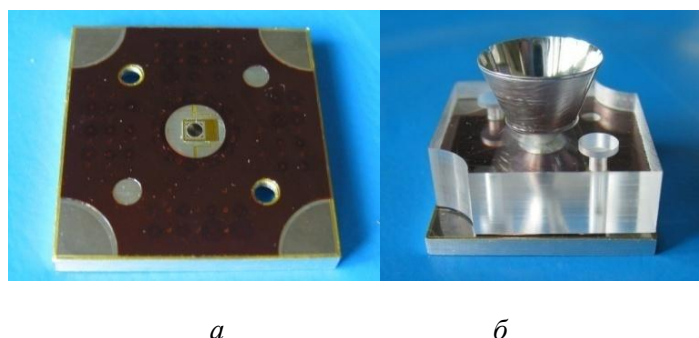
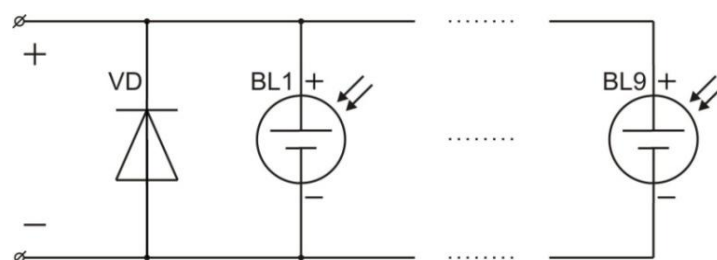


Рис. 8. Тестовые структуры качества на основе арсенид-галлиевых СЭ:
a – без вторичного оптического элемента (ВОЭ); *б* – с интегрированным ВОЭ

На рис. 9 приведена фотография общего вида приемника концентрированного солнечного излучения и схема его электрических соединений.



a



б

Рис. 9. Приемник концентрированного солнечного излучения на основе трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ: *a* – фотография общего вида приемника с интегрированными ВОЭ; *б* – электрическая схема соединений

В состав ТСК входили трехпереходные InGaP/GaAs/Ge солнечные элементы, герметизированные кремнийорганическим покрытием ELASTOSIL S690 (Waker Silicones, Германия). Держатель с ВОЭ в виде усеченного конуса, коммутационная плата на основе лакофольгового алюминий-полиимидного носителя, защитный диод и алюминиевый плоский теплоотвод.

Исследуемые ТСК отличались между собой производителем СЭ, материалом плоского теплоотвода, его толщиной, конструкцией ВОЭ и конструкцией коммутационной платы.

В состав приемников солнечного концентрированного излучения входили трехпереходные InGaP/GaAs/Ge солнечные элементы – 9 шт., ВОЭ – 9 шт., коммутационная плата, защитный диод и теплоотводящее основание.

Электрические параметры трехпереходных СЭ для условий освещенности AM 1,5 (1000 Вт/м²) при концентрации 750 крат приведены в табл. 1.

Основные электрические параметры трехпереходных СЭ

Параметр	Значение	
	СЭ Azur Space	СЭ ENE
	АМ 1,5 750крат $\varnothing=2,3$ мм $S_{акт} = 4,155$ мм ²	АМ 1,5 750крат $\varnothing=2,3$ мм $S_{акт} = 4,155$ мм ²
Напряжение холостого хода $U_{хх}$, мВ	3,26	3,05
Плотность тока короткого замыкания $j_{кз}$, мА/см ²	1005	970
Филфактор FF, отн. ед.	0,856	0,848
Эффективность, %	36,67	29,4

Ускоренные форсированные термоциклические испытания.

Ускоренные форсированные термоциклические испытания описанных образцов проводились для подтверждения правильности выбора конструктивных решений и технологии сборки приемников. Также определялось влияние одновременного воздействия знакопеременного изменения температуры и повторно-кратковременной токовой нагрузки в прямом направлении на солнечный элемент и группу СЭ $1,25 I_{кз}$ при $T > 25^{\circ}\text{C}$ и 10 электроциклов за один термоцикл. При этом исследовалось влияние на электрические параметры и долговечность приборов, рассчитанных на эксплуатацию в нормальных условиях в течение 20 лет (8 часов/день, полное время 58400 часов) со степенью концентрации до 750 крат и выходной мощностью от 1,5 до 15Вт.

Параметры испытательного режима определялись с учетом физико-механических свойств применяемых материалов, кинетики изменения характеристик и рекомендаций международных стандартов с целью не допустить условия, превышающие предельные температурные границы эксплуатации используемых материалов, и условия, ускоряющие нетипичные механизмы отказов.

Согласно стандарту IEC 62108 (п.10.6.3) существует три варианта испытательных режимов, позволяющие сравнивать различные используемые материалы и процессы (табл. 2).

Таблица 2

Варианты испытательных режимов

Опция	Максимальная температура СЭ, $^{\circ}\text{C}$	Общее количество циклов	Приложенный ток
TCA – 1	85	1000	Приложены импульсы тока $1,25 I_{кз}$ при $T > 25^{\circ}\text{C}$. Скорость – 10 электроциклов за один термоцикл
TCA – 2	110	500	
TCA – 3	65	2000	

С учетом свойств используемых материалов, ограничений финансовых затрат, экономии времени и ресурсов был выбран вариант TCA – 2 с максимальной температурой в термоцикле 110°C с общим количеством термоциклов не менее 500.

2. Результаты и их обсуждение

Результаты ускоренных форсированных испытаний ТСК и приемников концентрированного солнечного излучения:

1. Ускоренное время наработки на отказ обеспечивалось повышенной температурой, циклическим изменением температуры и высокими плотностями тока, соответствующими коэффициенту концентрации 750 крат.

2. Было изготовлено 9 ТСК с ВОЭ (рис. 10) на основе трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ компании Azur Space и компании ENE для того, чтобы подвергнуть их деградации по описанной выше процедуре. В трех вариантах ТСК на основе трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ компании Azur Space для сборки использовали гибкие платы из ФДИ-А-50 с Ni-покрытием на Al-проводниках толщиной 1-2 мкм.

3. Для исследования коррозионной устойчивости сварных соединений плоских алюминиевых проводников без никелевого покрытия, полученных ультразвуковой сваркой с Au/Ag контактными площадками СЭ была изготовлена партия из 6-ти ТСК с ВОЭ:

- СЭ ENE; Al; ФДИ-А-50; (2 шт.) – TJ-E17, TJ-E19 (алюминий $h = 30$ мкм);
- СЭ ENE; Al; ФДИ-А-24; (2 шт.) – TJ-C20, TJ-C18 (алюминий $h = 12$ мкм);
- СЭ ENE; Al; ФДИ-А-20; (2 шт.) – TJ-D17, TJ-E20 (алюминий $h = 10$ мкм).

4. Также было изготовлено три приемника концентрированного солнечного излучения на основе трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ с ВОЭ компании ENE с использованием гибкой платы из ФДИ-А-50 (алюминиевые плоские выводы толщиной $h = 30$ мкм).



а



б

Рис. 10. ТСК с ВОЭ для термоциклических испытаний:
а – испытательная плата; *б* – плата в испытательной камере

5. После сборки и проведения 100 термоциклов параметры $I_{кз}$ и $U_{хх}$ как в ТСК, так и в приемнике не изменились. После 500 термоциклов выходная мощность у восьми из девяти испытанных ТСК уменьшилась не более чем на 5,5 %, у приемников выходная мощность уменьшилась не более, чем на 2,5 %.

6. Это позволяет сделать вывод, что выбранные конструктивно-технологические решения концентраторных приемников на основе трехпереходных GaInP/GaAs/Ge-СЭ и COF технологии сборки удовлетворяют требованиям стандарта IEC 62108 (п. 10.6.3).

7. В соответствии с требованиями стандарта IEC 62108 (п.10.6.3) ожидаемый срок службы концентраторных приемников с ВОЭ составляет не менее 20 лет.

3. Новые подходы к созданию высокоэффективных приемников концентрированного солнечного излучения

В течение последних пяти лет после окончания проекта APOLLON в 2013г. специалисты компании ООО «Научно-производственное предприятие «ЛТУ» продолжали активно работать в области космического приборостроения. В частности, выполняли работы по разработке и производству солнечных батарей, гибких пленочных нагревателей и контрольно проверочной аппаратуры космического назначения. А также проводили разработку и изготовление гибких печатных плат, кабелей и детекторных гибких и гибко-жестких модулей для экспериментов в физике высоких энергий, в том числе для создания более современной усовершенствованной внутренней трековой системы международного эксперимента ALICE на LHC в CERN на основе полностью алюминиевой COF технологии сборки [14].

COF-технология сборки.

Ряд преимуществ полностью алюминиевой лакофольговой алюминий-полиимидной COF-технологии сборки по сравнению с технологиями проволочной сборки электронных узлов на основе различных фольгированных медью диэлектриков позволил существенно расширить возможности COF-технологии на современном этапе. Прежде всего, алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью. Несмотря на то, что алюминий по сравнению с медью обладает меньшей механической прочностью ($\sigma_{pAl}=(10-40) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$; $\sigma_{pCu}=(16-45) \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$), меньшей теплопроводностью ($\lambda_{TAl}=218 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_{TCu}=385 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), удельным электрическим сопротивлением примерно в 1,6 раза большим удельного электрического сопротивления меди ($\rho_{Al}=0,028 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$; $\rho_{Cu}=0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), большое значение имеет тот факт, что алюминий почти в 3,5 раза легче меди ($\gamma_{Al}=2,7 \text{ г}/\text{см}^3$, $\gamma_{Cu}=8,92 \text{ г}/\text{см}^3$). Благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая электрическая проводимость на единицу массы, то есть, при одинаковом номинале сопротивления и одинаковой длине алюминиевые проводники почти в два раза легче медных, несмотря на большее поперечное сечение. Кроме того, формирование ультразвуковой сваркой межсоединений гибких плат с СЭ и микросхемами с помощью алюминиевых плоских коммутирующих элементов вместо проволоки позволяет уменьшить габаритные размеры и объем электронных модулей и не требует повышенной точности и осторожности при проведении процессов сборки изделий, чтобы не допустить деформации проволочных межсоединений и закороток между ними.

Таким образом, плоские и гибкие коммутирующие элементы на основе алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков позволяют еще более минимизировать массу вещества и рабочий объем изделий.

Алюминиевая COF-технология легко адаптируется к существующему автоматизированному оборудованию ультразвуковой сварки типа Delvotec. При этом обеспечивается высокое качество и надежность сварных соединений не только из-за того, что свариваются однородные материалы (алюминиевые контактные площадки электронных компонентов и алюминиевые проводники коммутирующих элементов), но также и из-за того, что сварочные электроды, применяемые в сварочных установках, позволяют обеспечить оптимальные режимы процессов сварки. Кроме того, коммутирующие элементы на основе безадгезивных алюминий-полиимидных диэлектриков позволяют значительно улучшить емкостные характеристики электронных устройств. Благодаря еще одному положительному свойству алюминия – малой величине предела текучести ($\sigma_{0,2}=2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$) – имеется возможность в процессе ультразвуковой сварки осуществлять соединения через глубокие (40 – 70 мкм) “колодцы” в полиимиде. Это обеспечивает уменьшение выходных емкостей в 5 – 7 раз, что значительно повышает чувствительность и разрешающую способность преобразующих систем. Ввиду хорошей адаптивности к фотохимическому избирательному травлению полиимида безадгезивная структура материала позволяет полностью исключить из технологических процессов изготовления гибких коммутационных элементов механические операции сверления и фрезерования, заменяя их групповыми процессами, и таким образом сократить технологический цикл, снизить трудоемкость и, в конечном счете, уменьшить стоимость изготовления изделий. Кроме того, для микросхем с высокой плотностью и прецизионностью элементов топологии при использовании указанных материалов оказалось целесообразным применение методов микроэлектронной технологии, которая включает использование жидких фоторезистов, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Использование практически всех способов нанесения жидких фоторезистов (центрифугирование, погружение, пульверизация); сочетание позитивных и негативных фоторезистов. Применение стеклянных и гибких пленочных фотошаблонов, применение установок с односторонним и двусторонним экспонированием, применение плазмохимической и ионноплазменной избирательной обработки материалов [10, 14].

Описанные преимущества алюминиевой COF-технологии сборки определяются качеством, доступностью и стоимостью гибких лакофольговых алюминий-полиимидных слоистых материалов. В ООО «Научно-производственное предприятие «ЛТУ» удалось разработать и впервые в Украине освоить производство новых типов слоистых материалов для гибких и гибко-жестких алюминий-полиимидных печатных плат. Предложенные инновационные технические решения позволили создать такие способы изготовления безадгезивных гибких лакофольговых слоистых материалов, которые обеспечили использование более простых, малозатратных и воспроизводимых технологий изготовления слоистых материалов с необходимыми геометрическими размерами широкой номенклатуры применяемых алюминиевых фольг и работающих в диапазоне температур от минус 200°С до плюс 250°С (рис. 11). При этом исключить дорогостоящее, сложное в эксплуатации специализированное оборудование, в том числе вакуумное и прессовое оборудование [15]. За счет этого удалось снизить стоимость слоистых материалов по сравнению с мировыми аналогами в два раза – до 1,6 евро за дм^2 . Это в свою очередь позволило существенно снизить стоимость изготовления приемников концентрированного солнечного излучения для HSPV фокусно-точечных модулей на ахроматических линзах Френеля как самый простой (не требующий применения ВОЭ) и дешевый способ быстрой практической реализации концентраторных модулей с КПД более 40 % при степени концентрации более 500 крат, чтобы иметь возможность достичь выполнения требований к коммерчески приемлемой цене современных концентраторных солнечных модулей – значительно менее 1,0 Евро за Вт [8].

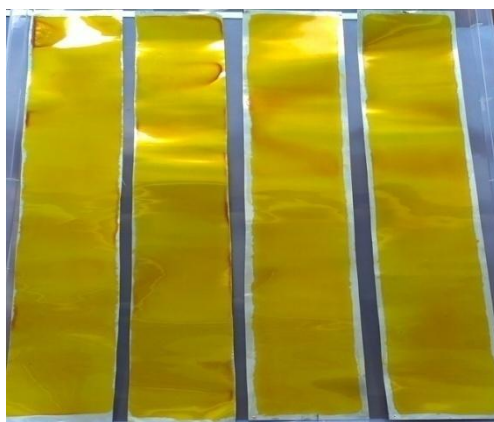


Рис.11. Образцы безадгезивных лакофольговых полиимидных слоистых материалов

*Новые КТР гибко-жестких приемников
концентрированного солнечного излучения.*

После обоснованного и тщательного подбора материалов с необходимыми физическими параметрами, оптимизации объемных и геометрических характеристик элементов конструкции приемников, а также учитывая при этом коммерчески приемлемую цену и доступность для приобретения выбираемых материалов и комплектующих, определен следующий состав и проектный облик приемника на основе алюминиевой COF технологии сборки (рис. 12)

Проектный облик приемника.

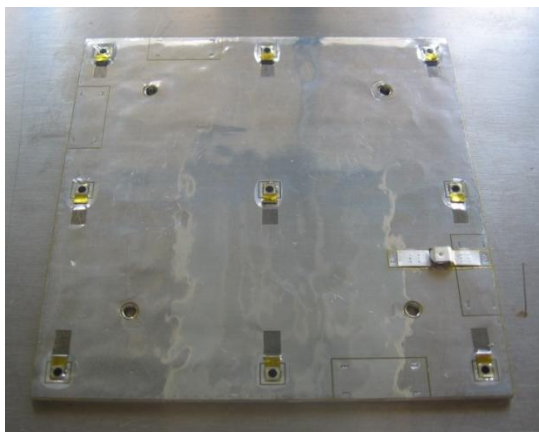


Рис. 12. Образец приемника, изготовленного по алюминиевой COF-технологии на плоском алюминиевом радиаторе

В состав приемника солнечного концентрированного излучения входят:

- четырехпереходные GaInP / GaAs // GaInAs / Ge солнечные элементы с эффективностью 48 %, шт. – 9;
- алюминий-полиимидная коммутационная плата, шт. – 1;
- защитный диод, шт. – 1;
- алюминиевый плоский радиатор, шт. – 1;
- электросоединители, шт. – 2.

Выводы

На основании всестороннего анализа состояния и современного технического уровня развития концентраторных солнечных технологий в мире авторами предложены новые коммерчески приемлемые конструктивно-технологические решения приемников солнечного излучения для HSPV фокусно-точечных модулей на ахроматических линзах Френеля как самый простой (не требующий применения ВОЭ) и дешевый способ быстрой практической реализации концентраторных модулей с КПД более 40 % при степени концентрации более 500 крат. Для реализации предложенных подходов при создании приемников для более высокоэффективных зеркальных концентраторных модулей при степени концентрации до 800 крат при КПД 40 % необходимо:

1. Проведение дополнительно научно-исследовательских работ по выбору конструктивно-технологических решений концентраторных приемников солнечного излучения на основе COF (Chip- on-flex) технологии сборки бескорпусных четырехпереходных кристаллов арсенид-галлиевых многопереходных солнечных элементов (СЭ) с архитектурой GaInP / GaAs // GaInAs / Ge с эффективностью 48 % с гибкими коммутирующими платами. В том числе создание печатных узлов с интегрированными в приемники зеркализированными вторичными оптическими элементами на основе материалов с коэффициентом отражения 95 – 98 % типа Mirosilver.

2. Проведение научно-исследовательских работ по созданию технологии сборки печатных узлов приемников на радиаторах, которые обеспечивают улучшенные условия отвода тепла, 3D компоновку и коммутацию элементов с помощью гибких кабелей и плат, как из алюминий-полиимидных, так и медь-полиимидных лакофольговых диэлектриков, а также технологии монтажа на приемную поверхность СЭ вторичных оптических элементов.

3. Изготовление экспериментальных образцов и проведение функциональных исследований приемников концентрированного солнечного излучения.

4. Проведение ускоренных форсированных испытаний в соответствии со стандартом ИЕС 62108 для подтверждения правильности выбора конструктивных решений, технологии сборки и ресурса концентраторных фотоэлектрических приемников наземного применения с коэффициентом концентрации до 800 крат.

5. Результаты работы потенциально позволят достичь значений конкурентноспособной стоимости электроэнергии, вырабатываемой серийными солнечными концентраторными модулями на основе разработанных конструкций новых солнечных приемников на уровне 0,2 – 0,5 Евро за Вт.

Список литературы

1. Волчок В. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Солнечная энергетика / В. А. Волчок, В. Н. Комар. Гродно : Гр ГУ, 2017. 55 с.
2. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century // REN21 URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> (дата обращения: 21.01.2017);
3. Ключевые отраслевые тенденции солнечной энергетики. Экономика и технологии 2019 г. Режим доступа: https://elektrovesti.net/65157_klyuchevye-otraslevye-tendentsii-solnechnoy-energetiki-ekonomika-i-tehnologii. Дата доступа 29.05.2019 г.
4. The State Of Renewable Energies In Europe Edition. 2018. 18th Eur Observ'ER Report. P. 70, P. 195. Дата доступа 29.05.2019 г.
5. <http://www.europeanenergyinnovation.eu/Latest-Research/Autumn-2016/CPVMatch-Project>. Официальный сайт. Дата доступа 29.05.2019 г.
6. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В. А. Миличко [и др.] // Успехи физических наук. Обзоры актуальных проблем. 2016. Т. 186, № 8. 70 с.
7. Паханов Н.А., Андреев В.М., Шварц М.З., Пчеляков О.П. Современные архитектуры и технологии высокоэффективных солнечных элементов на гетероструктурах III-V для космического и наземного применения // Автометрия. – 2018. Т54. №2. С.93-112.
8. RSE SpA. APOLLON (Multi-APPrOach for high efficiency integrated and intelLligent cONcentrating PV modules (Systems)). Available from: http://cordis.europa.eu/result/rcn/55852_en.html (2014).
9. Simon P. Philipps, Mathieu Baudrit, Karla Hillerich, Valentine Moreau, Rolando Parmesani, Eduardo Román, Gabriel Sala, Bernd Schineller, Gianluca Timò and Andreas W. Bett. CPVMatch – Concentrating Photovoltaic Modules Using Advanced Technologies and Cells for Highest Efficiencies. Presented at the 32nd European PV solar Energy Conference and Exhibition, 20-24, June 2016, Munich, Germany.
10. Замирец Н.В. Алюминиевая «Chip on flex» (COF) технология в радиационном приборостроении / Н.В. Замирец, В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, В.А. Антонова, Л.П. Семенов, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук // Технология приборостроения. 2007. №2. С. 3-9.
11. ИЕС 62108 Аттестация конструкции и утверждение типа концентраторных фотоэлектрических модулей и сборочных узлов. Дополнение 1.0 2007-12.
12. Борщев В.Н. Исследование тепловых характеристик высокоэффективных приемников концентрированного солнечного излучения нового поколения / В.Н. Борщев, В.А. Антонова, А.М. Листратенко, Я.Я. Костышин, Г.В. Буеров, И.Т. Тымчук, М.А. Проценко // Технология приборостроения. 2012. №1. С. 3-9.
13. Инновационные подходы к созданию высокоэффективных концентраторных батарей космического назначения на линейных линзах Френеля / В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, Н.В. Герасименко, Н.И. Слипченко, М.А.Проценко, И.Т.Тымчук, А.П.Кузнецов, В.В. Гаврилко // Радиотехника. 2015. Вып. 180. С. 5-18.
14. Vorshchov V.M., Listratenko O.M., Protsenko M.A., Tymchuk I.T., Fomin O.O. Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments // Functional materials. 24. No.1 (2017). P. 1-11.
15. Патент Украины на полезную модель № 119126 «Способ изготовления гибкого слоистого материала для изделий на основе фольги». Дата регистрации 11.09.2017 г. Изобретатели: Никитский Г.И., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Тымчук И.Т. и др.

ООО «Научно-производственное предприятие «ЛТУ», Харьков;
Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков

Поступила в редколлегию 19.06.2019