

А.В. СТЕПАНЯН, Ж.Р. ПАНОСЯН

РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Описаны конструкции новых фотоэлектрических модулей, включающих концентрирующие линзы Френеля и DLC-инкапсулированные фотоэлектрические преобразователи. В данных конструктивных решениях не используются стеклянные защитные покрытия и EVA ламинирующие слои. Эти модули обладают рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами, главными из которых являются экономичность, конкурентоспособность, простота и технологичность. Разработанные конструкции имеют двойную функцию, т.е. одновременно снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией.

Ключевые слова: солнечная энергия, преобразователь, фотоэлектрический модуль, концентратор, линза Френеля.

Введение. В настоящее время к полезному использованию солнечной энергии привлечено внимание большого числа исследователей во всем мире. Резко возрос интерес как к теоретическим, так и к прикладным разработкам в области преобразования солнечного излучения. Высокие результаты, достигнутые в фотоэлектрическом методе преобразования, открывают возможность широко использовать на Земле полупроводниковые солнечные батареи, которые в течение вот уже 40 лет служат надежным источником электроэнергии на борту космических аппаратов.

На сегодняшний день широкомасштабному распространению солнечных электростанций на Земле препятствует высокая себестоимость фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Существуют многочисленные пути снижения их себестоимости, но самым эффективным и надежным методом является использование дешевых концентраторов солнечного излучения, так как в этом случае большая поверхность полупроводниковых ФЭП заменяется линзами и зеркалами. Использование концентрического света приводит к увеличению выходной мощности установки приблизительно прямо пропорционально степени концентрации и к некоторому увеличению КПД преобразования. При больших степенях концентрации требуется эффективное охлаждение рабочей поверхности ФЭП, что можно легко осуществить проточной водой, если созданы ФЭП, надежно работающие в водной среде [1, 2].

В стандартной технологии изготовления фотоэлектрического модуля для защиты поверхности ФЭП стеклом в процессе ламинации используются полимерные клеи, например, из этиленвинилацетата (EVA), которые со временем теряют свою прозрачность.

Целью данной работы является разработка новой конструкции фотоэлектрического модуля с использованием концентрического света без стеклянного покрытия и EVA ламинирующего слоя. В данном модуле используются ФЭП, инкапсулированные алмазоподобной углеродной (DLC) пленкой, которая обеспечивает надежную и бесперебойную работу ФЭП в водной среде.

Технология инкапсуляции ФЭП. Разработана низкотемпературная технология выращивания DLC пленок при температуре не более, чем 100 °C на поверхности ФЭП из кристаллического Si (c-Si). DLC пленки были получены ионноплазменным методом из газовой смеси, включающей углеводороды. Чтобы осуществить этот процесс, в качестве базового устройства использовалась вакуумная установка УВН-71П-3, в которой был смонтирован радиальный ионный источник. Подробное описание технологии, а также исследование характеристик полученных DLC пленок приведены в [3, 4].

Образцы DLC пленок на поверхности c-Si, выращенных при помощи данной технологии, имеют оптимальные оптические, электрические и механические параметры: коэффициенты отражения ~1% и пропускания ~98% (в фоточувствительной области Si), удельное сопротивление в пределах $(8,5\cdot3,5)\cdot10^{-3}$ Ом·см, а также микротвердость ~3200 кг·с/мм² и стабильность к внешним воздействиям окружающей среды. Благодаря своим уникальным свойствам данное покрытие при нанесении на рабочую поверхность ФЭП защищает его от внешних воздействий и повышает КПД преобразования.

Для осаждения DLC пленки на поверхность ФЭП с площадью 100 см² из c-Si с разбросом параметров не более 5% по всей поверхности ФЭП было специально разработано новое технологическое устройство со сложным трехосевым вращением ФЭП [5].

Фотоэлектрические характеристики ФЭП были определены при помощи нового измерительного устройства [6]. Управление данной системой осуществляется при помощи специально созданной программы, которая производит построение световых вольт-амперных характеристик ФЭП, определяет из графика максимальную мощность и, в конечном итоге, рассчитывает КПД ФЭП по следующему выражению:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_c \cdot S} \cdot 100\% = \frac{f \cdot U_{xx} \cdot I_{k3}}{P_c \cdot S} \cdot 100\%,$$

где $P_{\max}$ – максимальная выработанная мощность ФЭП; P_c – мощность светового потока на единичной освещенной поверхности; S – площадь освещаемой поверхности ФЭП; U_{xx} – напряжение холостого хода; I_{k3} – ток к.з.; f – коэффициент заполнения.

Из световых вольт-амперных характеристик (рис. 1) следует, что вследствие осаждения DLC пленки на освещаемую поверхность ФЭП ток короткого замыкания увеличился до 45%. Зависимости мощности ФЭП от напряжения (рис. 2) показывают среднее увеличение мощности на 35(45%, что в итоге приблизительно настолько же повышает КПД преобразования.

Для эффективной работы ФЭП под концентрированным солнечным излучением необходимо, чтобы инкапсулирующее покрытие имело не только требуемые оптические и механические свойства, но также высокую стабильность к внешним воздействиям, особенно к влаге. Проведенные ускоренные испытания показали, что DLC пленки стабильны к воздействиям температуры, влаги, химически агрессивных сред и ультрафиолетового облучения. Результаты измерений свидетельствуют о защитных свойствах DLC пленок и высоких характеристиках ФЭП [7].

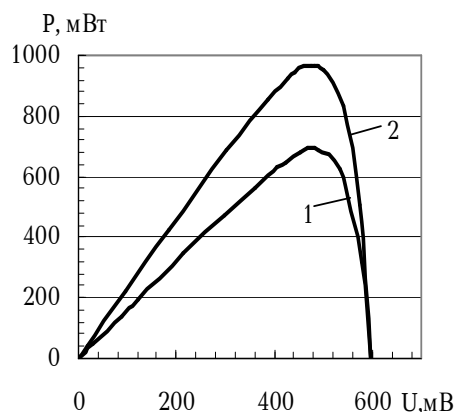


Рис. 1. Световые вольт-амперные характеристики ФЭП до осаждения DLC пленки (кр. 1) и после осаждения (кр. 2)

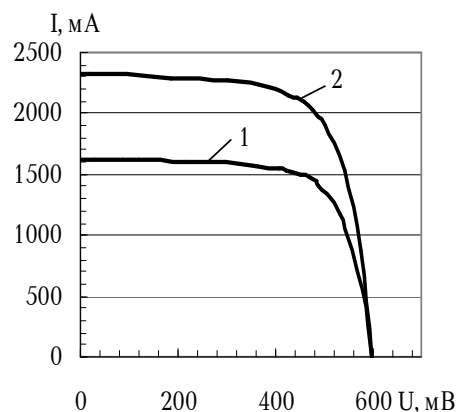


Рис. 2. Зависимости мощности ФЭП от напряжения до осаждения DLC пленки (кр. 1) и после осаждения (кр. 2)

Разработка конструкции фотоэлектрического модуля с использованием концентраторов солнечного излучения. В настоящее время в гелиотехнике большое внимание уделяется линзовым концентрирующим системам, особенно с применением линз Френеля. Можно отметить следующие достоинства этих линз по сравнению с другими концентраторами:

- дешевизна материала и технологии изготовления;
- достаточно удовлетворительные светостабильные свойства при защите линз от ультрафиолетового облучения;
- легкость и простота устройства самой линзы, обладающей конструктивной компактностью;
- система слежения за Солнцем может быть более грубой, чем для отражательной системы, что упрощает ее и делает более надежной.

Конструкция фотоэлектрического модуля с линзой Френеля является одним из самых экономичных и практических методов для концентрирования солнечного излучения в сфере использования солнечной энергии.

Как было отмечено выше, срок службы фотоэлектрического модуля сильно сокращается из-за потери прозрачности полимерной пленки, используемой в процессе ламинации для прикрепления ФЭП к внутренней поверхности защитного термообработанного стекла толщиной 3 мм. В процессе работы модуля, вследствие ультрафиолетового облучения Солнца, полимерный клей теряет свою прозрачность в среднем на ~0,5% в год. А при использовании концентрического света скорость потери прозрачности клея составляет 1...2% в год [8].

В разработанных конструкциях фотоэлектрического модуля не используются защитное стекло и, следовательно, полимерный слой клея. Стекло составляет 75...80% веса фотоэлектрического модуля, и применение тонкопленочных защитных слоев из DLC пленки (толщиной ~100 нм) позволит существенно снизить вес модуля, а также упростить

конструкцию. Кроме того, как было отмечено выше, DLC пленка обладает просветляющими свойствами и увеличивает КПД преобразования ФЭП.

В данной работе рассмотрены два варианта конструкции фотоэлектрического модуля. В обоих случаях используются концентрирующие линзы Френеля и ФЭП, инкапсулированные DLC пленкой. Существует несколько видов таких линз: например, плоские и параболоцилиндрические, которые имеют кольцевые и продолговатые канавки (фасеты).

На рис. 3 приведен общий вид конструкции фотоэлектрического модуля с продолговатой параболоцилиндрической линзой Френеля. Конструкция включает в себя: 1 - ФЭП, расположенный параллельно линии апекса конструкции и направленный лицевой стороной к световому потоку; 2 - двумерная продолговатая линза Френеля, завершающая конструкцию с верхней стороны; 3 - боковые стенки модуля, представляющие собой отражающие поверхности; 4 - каркас конструкции, выполненный из алюминиевого профиля; 5 - ввод и выход проточной воды, необходимой для охлаждения рабочей поверхности ФЭП; 6 - электрический выход, служащий для подсоединения электрической нагрузки или для подключения к другим модулям; 7 - прозрачный слой из стекла, расположенный между линзой Френеля и ФЭП, разделяющий внутреннее пространство конструкции на две секции; 8 - промежуточная перегородка, имеющая двусторонние отражательные поверхности.

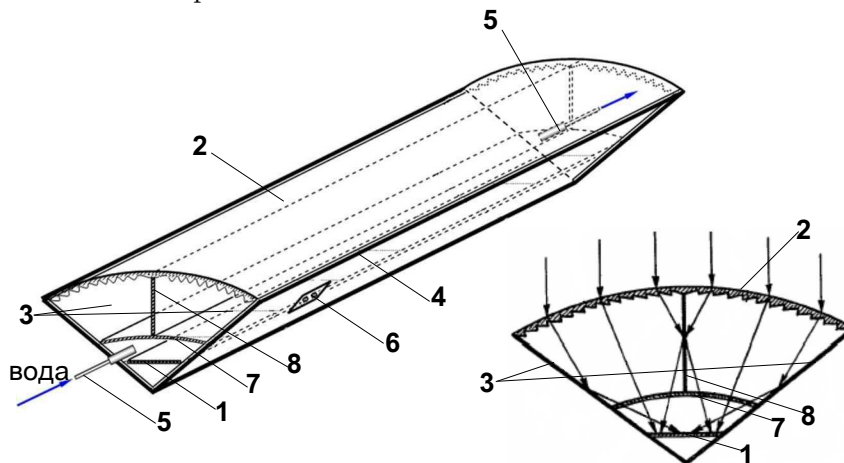


Рис. 3. Общий вид конструкции фотоэлектрического модуля с продолговатой параболоцилиндрической линзой Френеля

Другой вариант конструкции фотоэлектрического модуля приведен на рис. 4. В данном конструктивном исполнении используются плоские кольцевые линзы Френеля. Обозначенные номера элементов данной конструкции совпадают с номерами элементов, приведенных на рис. 3.

Солнечные лучи, попадая на поверхность линзы 2, преломляются в направлении рабочей поверхности ФЭП 1, расположенного выше фокусного расстояния линзы. Внутри конструкции солнечные лучи преломляются боковыми отражательными поверхностями 3 так же, как и промежуточной двусторонней отражательной перегородкой 8 по направлению ФЭП, пока все поступающие в конструкцию лучи не будут облучать рабочую поверхность.

Концентрированная солнечная энергия преобразуется в электрическую энергию при помощи ФЭП и в тепловую энергию при помощи жидкости-носителя, циркулирующей через секцию между прозрачным стеклянным слоем 7 и ФЭП 1. Жидкий теплоноситель (в данном случае вода) нагревается как вследствие парникового эффекта, обеспеченного стеклянным слоем 7, так и от поверхности ФЭП, нагретой солнечными лучами.

Для оценки экономической эффективности нового модуля сравним требуемые затраты на 1 Вт установочной мощности для обычного фотоэлектрического модуля и для разработанной конструкции.

В традиционной конструкции модуля основную часть затрат составляет стоимость ФЭП. Вследствие использования концентрического света становится возможным сократить количество дорогостоящих ФЭП на единицу площади, а стоимость полимерного концентратора в 20..30 раз ниже стоимости полупроводникового ФЭП.

При высоких степенях концентрации солнечного излучения усложняется применяемая система охлаждения рабочей поверхности ФЭП. Предложенный способ охлаждения элементов проточной водой не приводит к значительному повышению себестоимости модуля, а также к его конструктивному усложнению.

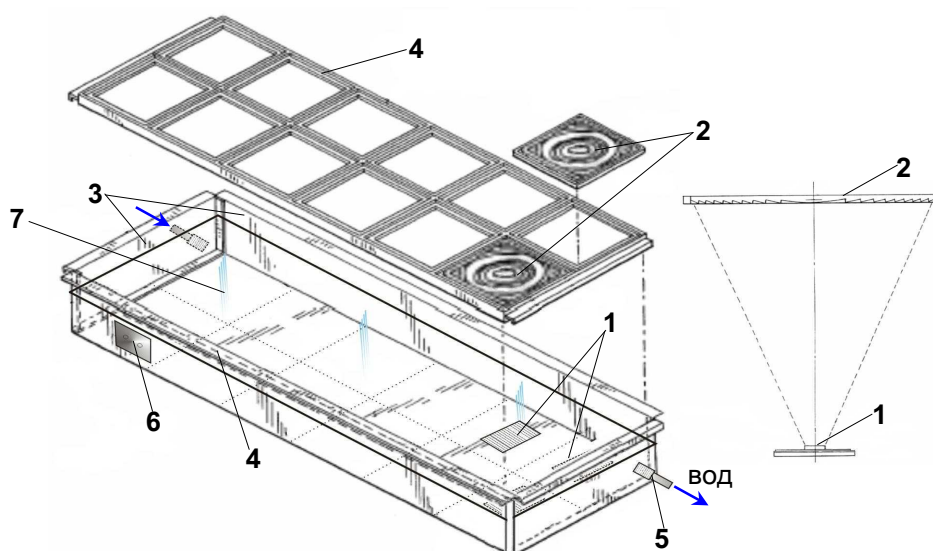


Рис. 4. Схематическое изображение конструкции фотоэлектрического модуля с плоскими кольцевыми линзами Френеля

В качестве примера приводятся результаты приблизительного расчета стоимости 1 Вт установочной мощности для стандартного модуля (без использования концентраторов) и для разработанной конструкции (с использованием концентрического света ~100X), приведенной на рис. 4. В таблице приведены стоимости отдельных элементов двух модулей. В конечной себестоимости модулей не учитываются затраты на зарплату и прибыль.

Таблица

№	Наименование компонентов	Сравниваемый модуль	Разработанный модуль
1	Фотоэлектрический элемент, $S=78 \text{ см}^2$, $P=1,1 \text{ Вт/шт}$	\$27,6 (12 шт.х\$2,3)*	\$27,6 (12 шт.х\$2,3)
2	Защитное стекло, 15х40 см	\$10,0	--
3	Френель линзы, 12 шт, 100х100 см	--	\$220,0
4	Алюминиевый профиль	\$3,0	\$40,0
5	Ламинирующие слои (EVA и Tedlar)	\$2,0	--
6	Прочие расходы	\$5,0	\$70,0
	Итого	\$47,6	\$357,6

* - рыночная цена ФЭП, предлагаемая одним из ведущих производителей в этой области, ОКБ завода "Красное Знамя".

В прочие расходы включены: 1) для разработанного модуля - стоимости боковых отражательных стенок конструкции и прозрачного слоя из стекла, стоимость охлаждающей системы, стоимость процесса инкапсуляции DLC пленкой и др.; 2) для сравниваемого модуля - стоимость процесса ламинации и др.

В модулях используются фотоэлектрические элементы мощностью 1,1 Вт/шт. На единицу площади модулей приходится одинаковое количество солнечной энергии. Следовательно, электрическая мощность первого модуля будет ~13,2 Вт, а второго:

$$12 \times 1,1 \times 100 = 1320 \text{ Вт}.$$

Принимая потери мощности ~10%, выработанная электрическая мощность разработанного модуля составит ~1188 Вт. Данный модуль одновременно вырабатывает и тепловую энергию. Экспериментальным путем было определено, что тепловая энергия составляет ~4000 Вт. С использованием теплоносителя с более высокой теплопроводностью, чем у воды, станет возможным повысить количество выработанной тепловой энергии. При грубом расчете можно принять суммарную эффективную мощность нового модуля ~5188 Вт. В данном случае для определения себестоимости 1 Вт установочной мощности рассмотрена только электрическая составляющая суммарной мощности. В итоге, стоимость 1 Вт каждого модуля будет

$$C_1 = Z_1 / P_2 = \$47,6 / 13,2 \text{ Вт} = 3,61 \$ / \text{Вт},$$

$$C_2 = Z_2 / P_2 = \$357,6 / 1,188 \text{ Вт} = 0,3 \$ / \text{Вт},$$

где C_1 – стоимость 1 Вт установочной мощности сравниваемого модуля; Z_1 – затраты на изготовление данного модуля; P_1 – мощность модуля; C_2 , Z_2 и P_2 – соответственно аналогичные параметры для разработанного модуля.

Итак, приведенные в данной работе конструкции фотоэлектрического модуля имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими на сегодняшний день аналогами, а именно: во-первых, данные конструкции не требуют высокой степени точности и четкости в геометрии и в изготовлении. Результатом этого является высокая экономичность и легкий вес модуля с концентратором солнечных лучей. Во-вторых, данный модуль преобразует

солнечную энергию в электрическую при концентрации света, следовательно, уменьшается необходимая поверхность ФЭП, что приводит к радикальному снижению стоимости выработанной электроэнергии приблизительно в 10...15 раз. А если принять во внимание и тепловую составляющую суммарной мощности, то снижение стоимости выработанной электроэнергии будет приблизительно в 45...55 раз. В-третьих, данные конструкции фотоэлектрического модуля снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией; двойная функция модуля обеспечивает более высокий КПД преобразования солнечной энергии и низкую первоначальную капитальную стоимость, высокое удобство в использовании, широкую область его применения и улучшенную эксплуатационную эффективность фотоэлектрического модуля. Разработанный модуль является универсальным устройством для использования как в коммунально-бытовом секторе, так и в различных промышленных применениях. Следует отметить, что возможно модифицировать конструкцию фотоэлектрического модуля согласно требованиям потребителя.

Заключение. Основные выводы данной работы сводятся к следующему:

1. На основе c-Si ФЭП с площадью 100 см^2 , инкапсулированные разработанной DLC пленкой, обеспечивающей не только требуемые оптические, электрические и механические характеристики, но и полностью сохраняющей их при длительном воздействии температуры, влаги, химически агрессивных сред, ультрафиолетового облучения и при других воздействиях окружающей среды, созданы новые фотоэлектрические модули, надежно работающие при высоких концентрациях солнечного излучения в водной среде.
2. Новые конструкции фотоэлектрического модуля с использованием полимерных линз Френеля, без EVA ламинирующего слоя и защитного стекла отличаются своей простотой, технологичностью, экономичностью и другими положительными свойствами. Фотоэлектрические модули имеют двойную функцию, т.е. одновременно снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией, что делает их универсальным устройством для использования в различных отраслях.
3. Разработанные конструкции фотоэлектрического модуля позволяют снизить себестоимость устройства, в результате чего электроэнергия, произведенная из солнечного излучения, станет конкурентоспособной для электроэнергии, выработанной традиционными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Panosyan Zh., Arakelova E., Voskanyan S., Voskanyan A., Yengibaryan Y., Stepanyan A., Torosyan G., Shaboyan A.** Obtaining and Investigation of Silicone Carbide Films and Diamond-Like Carbon on Silicone Surfaces// Proceedings of ISTC International Seminar "Conversion Potential of Armenia and ISTC Programs", October 2-7. - 2000.- Yerevan, 2000. - Part 2.- P. 207-210.
2. **Kassabian K., Panosyan Zh., Stepanyan A., Torosyan G., Yengibaryan Y.** Low-temperature Technology of Obtaining the Protecting Layer from Diamond-Like Films// Proceedings of the Sixth Applied Diamond Conference/Second Frontier Carbon Technology Joint Conference, Auburn, AL, USA, August 6-10. - 2001.- P. 431-435.
3. **Енгибарян Е., Восканян С., Восканян А., Степанян А., Паносян Ж.** Выращивание алмазоподобной углеродной пленки на поверхности кремниевого солнечного элемента// Материалы 3-й Нац. конф. «Полупроводниковая микроэлектроника», Севан, Сентябрь 10-12. - 2001. - Ереван, 2001.- С. 267-271.
4. **Паносян Ж., Восканян С., Енгибарян Е., Степанян А.** Получение и исследование тонкопленочных инкапсулирующих алмазоподобных углеродных пленок для фотоэлектрических преобразователей // Алмазные пленки и пленки родственных материалов: Сб. тр. 15-го Межд. симп. "Тонкие пленки в электронике".- Украина, Харьков. - 2003.- С. 213-216.
5. **Արտոնազարի հայտ P20030059, H01L31/02, C23C016/26, 28.04.2003/ Ճ. Փանոսյան, Ե. Ենգիբարյան, Ս. Ուկանյան, Ա. Ստեփանյան, Ս. Բերբերյան,** "Ալմաստանման ածխածնային թաղանթով պատված սարք", Գյուտերի հայտեր, 11.07.2003.- №36.- էջ. 5-6:
6. **Степанян А.** Воздействие ультрафиолетового облучения на устойчивость солнечного фотоэлемента и измерение его КПД// Сб. матер. Год. науч. конф., ГИУА.- Ереван, 2002.- Т. 1.- С. 158-160.
7. **Паносян Ж., Восканян С., Енгибарян Е., Степанян А., Туманян А.** Изучение стабильности алмазоподобных углеродных пленок к воздействиям окружающей среды// Материалы 4-й Нац. конф. «Полупроводниковая микроэлектроника», Цахкадзор, Май 29-31, 2003.- Ереван, 2003.- С. 196-199.
8. **Pern F.J., Glick S.H.** Photothermal Stability of Encapsulated Si Solar Cells and Encapsulation Materials upon Accelerated Exposures// Solar Energy Materials and Solar Cells.- 2000.- V.61.- P. 153-188.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.09.2003.

Ա.Վ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Ժ.Ռ. ՓԱՆՈՍՅԱՆ

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՑԱՆԻ ՆՈՐ ՖՈՏՈՎԵԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄՈԴՈՒԼԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ

Աշխատանքում նկարագրվում են նոր ֆոտոէլեկտրական (ՖԷ) մոդուլների կոնստրուկցիաներ, որտեղ կիրառված են խտացուցիչ Ֆրենելային ոսպնյակներ և DLC թաղանթով պատված ՖԷ կերպափոխիչներ: Այս կոնստրուկցիաներում չեն օգտագործված ապակե պաշտպանիչ ծածկույթներ և EVA լամինացիոն թաղանթներ: Տվյալ մոդուլները ունեն մի շարք առավելություններ, որոնցից կարևորագույններն են՝ խնայողականությունը, մրցունակությունը, պարզությունը և տեխնոլոգիականությունը: Մշակված կոնստրուկցիաները կատարում են կրկնակի ֆունկցիա, այսինքն՝ միաժամանակ մատակարարում են ինչպես էլեկտրական, այնպես էլ ջերմային էներգիա:

A.V. STEPANYAN, ZH.R. PANOSYAN

DEVELOPMENT OF THE NEW PHOTOVOLTAIC MODULE FOR SOLAR POWER STATIONS

The constructions of the photovoltaic (PV) modules utilizing the concentrating Frenel lenses and DLC-encapsulated PV cells are described. The modules have neither any protective glazing nor EVA laminar layers. These constructions offer a series of advantages over existing analogs, the main ones being effectiveness, competitiveness, simplicity, and fabricability. The worked out modules have double functionality, that is, they simultaneously provide both electric energy and thermal energy.