

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 621.039:620.92

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ЯОП-УСТАНОВКИ

А.В. Карелин
(ФГУП ЦНИИмаш)
Л.А. Амелин
(ОАО «НИИЭМ»)
И.Н. Хиблин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрены халькопиритные фотопреобразователи и фотопреобразователи на основе кремния для ЯОП-установки по утилизации радиоактивных отходов. Проведено сравнение их характеристик по радиационной стойкости и КПД с учётом их долговременной работы в ЯОП-установке.

Ключевые слова: ЯОП-установка, ОЯТ, РАО, радиационная стойкость, излучение, спектральный диапазон, КПД, кремниевые фотопреобразователи, халькопиритные фотопреобразователи.

Для решения проблем, связанных с обращением с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), определённый интерес представляют технологии, позволяющие безопасно использовать радиацию и тепловыделение. В ядерно-оптических преобразователях (ЯОП) основным источником проникающей радиации отработанного топлива ядерных реакторов является γ -излучение Cs^{137} (период полураспада 30 лет, энергия γ -квантов $E_\gamma=662$ кэВ). В активной среде (смесь Ar-N₂, соотношение концентраций [Ar]:[N₂]=45:1, давление 1 МПа) γ -излучение преобразуется в оптическое излучение преимущественно в диапазонах длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм на переходах C→B и B→A молекулы азота N₂ соответственно с дальнейшей конверсией оптического излучения в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Это излучение находится в удобном для кремниевых и халькопиритных ФЭП диапазоне спектра. В этих условиях полный расчётный КПД смеси при облучении составляет 6% с примерно равным распределением энергии между рассматриваемыми диапазонами длин волн [1].

В ЯОП-установке, использующей 216 бочек (сумма объёмов 42 м³) ОЯТ или РАО в центральной части сферического хранилища с гамма-активностью $f=8,6 \cdot 10^{16}$ распадов/(м³·с), достигается расчётная удельная мощность объёмного тепловыделения в газе $q_v=5,5$ мВт/см³ и тогда в сферическом хранилище (радиус 15 м) энерго-

выделение в газе составляет около 80 МВт, что при КПД современных двухслойных ФЭП (примерно 20%) позволит получить полную постоянную электрическую мощность 1 МВт. Первоначальные затраты на сооружение и пуск ЯОП-установки составляют около 2 млрд. руб.; доля затрат на систему генерации и преобразования электроэнергии ≈ 115 млн. руб. [2].

Фотопреобразователи – ключевой элемент ЯОП. Разработка ФЭП для эффективного преобразования солнечной энергии – одно из перспективных направлений развития энергетики, где достигнуты значительные успехи (таблица) [3]. На сегодняшний день основные многопереходные фотопреобразователи (КПД более 40 % для концентрированного наземного солнечного излучения и более 30% для прямого космического [4 – 6]) содержат Ge субэлемент, а именно подложку Ge с сформированным в ней *p-n*-переходом и функциональным (широкозонное окно) эпитаксиальным слоем A3B5 материала (GaAs, GaP, InAs, GaSb или InSb). Однако оптическое излучение в ЯОП-установке распределено по объёму сферического хранилища, и трудно создать оптическую систему внутри хранилища, способную собрать такое излучение без больших потерь на плоскости ФЭП. Возможно лишь сконцентрировать часть излучения из части объёма ЯОП-установки, что увеличит КПД ФЭП, но потребуются дополнительное охлаждение ФЭП. Разработка системы концентрирования излучения может иметь смысл после изучения работы ЯОП-установок первого поколения.

По технологическим соображениям предлагается, чтобы ФЭП были собраны в модули (12 модулей), каждый модуль ФЭП в рабочем (развёрнутом) положении представляет собой сегмент (ФЭП с двух сторон, радиус 14 м, от хорды до центра дуги 9 м) в меридиональной плоскости. Монтаж и демонтаж модуля ФЭП выполняются путём опускания или подъёма через люки в сложенном виде (в транспортном положении): в конструкции модуля ФЭП предусмотрен механизм для раскрытия (и закрепления в рабочем положении) и для складывания модуля ФЭП в транспортное положение перед демонтажем. Кабельная сеть должна сохранять работоспособность в течение всего периода эксплуатации модуля ФЭП внутри ЯОП. Целесообразно предусмотреть стойкое отражающее покрытие внутренних поверхностей (сферический газгольдер, газораспределитель и т. п.).

Для работы ФЭП и других элементов конструкции в составе ЯОП существенное значение имеет вопрос радиационной стойкости. По соображениям обеспечения безопасности (долговременной прочности конструкции и сохранения работоспособности ФЭП, датчиков, кабельной сети и других элементов, относящихся к электрической и электронной части) для упрощения работы на ЯОП высокоактивные ядерные отходы, предназначенные для ЯОП-установки, следует подвергать специальной обработке после отделения урана, плутония и других актинидов с целью минимизации нейтронного потока. Известно, что цезий и стронций необходимо выделять при переработке; технической проблемы это не представляет.

Для ЯОП-установки можно использовать смесь (содержимое бочек) с теплопроводностью не менее 20 Вт/(м·К), в которой концентрация радиоактивной соли цезия обеспечивает гамма-активность $f=8,6 \cdot 10^{16}$ распадов/(м³·с).

Перечислим требования к ФЭП для ЯОП-установки.

Срок службы ФЭП по экономическим соображениям не должен быть меньше 9 – 10 лет при выходной электрической мощности не менее 90 – 95% от мощности в начале срока эксплуатации (относительно неизменной интенсивности и неизменного спектрального состава оптического излучения).

ФЭП должны сохранять работоспособность в потоке гамма-квантов: на расстоянии $r=10$ м от центра хранилища:

$$F = \frac{fV_{\Sigma}}{4\pi r^2} = 2,9 \cdot 10^{15} \text{ Бк/м}^2,$$

где V_{Σ} – общий объём 216 бочек.

ФЭП должны сохранять работоспособность при температуре газа в зоне ФЭП от 30 до $\approx 133^{\circ}\text{C}$ (на выходе из хранилища) при давлении 10 атм и скорости течения газа 3 м/с [7].

КПД ФЭП должен быть не менее 20%.

Рассмотрим сначала данные о современных ФЭП. Несмотря на значительные успехи в этой области по величине КПД и радиационной стойкости в условиях околоземного космоса (по отношению к протонному излучению $E_p > 1,0$ МэВ и электронному излучению $E_e > 0,04$ МэВ), выбор видов ФЭП, сохраняющих работоспособность в потоке гамма-квантов, невелик (см. таблицу), где приведены данные о тех современных ФЭП, лабораторные образцы которых имеют КПД не менее 10% для прямого солнечного света без концентрирования в условиях околоземного космоса (режим облучения АМ0 – 1353 Вт/м² или АМ1.5).

Многие организации, разрабатывающие и производящие фотопреобразователи, представляют результаты их тестирования, полученные имитацией солнечного света на поверхности Земли. Кривые АМ1 и АМ2 на рис. 1 иллюстрируют спектральное распределение солнечного излучения на поверхности Земли, когда Солнце в зените и при угле между Солнцем и зенитом 60° , соответственно. При этом полная мощность излучения – соответственно порядка 925 и 691 Вт/м² (см. рис. 1). Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при АМ1.5 (Солнце под углом 45° к горизонту). Величина КПД ФЭП практически одинакова для режимов облучения АМ0, АМ1.5, АМ1 и АМ2 при интенсивности света от 1353 до 691 Вт/м² [8, 9].

По результатам орбитальных испытаний продолжительностью до 10 лет в режиме облучения АМ0 (в условиях околоземного космоса) при $T > 40^{\circ}\text{C}$ получено, что промышленные монокристаллические кремниевые модули с высоким КПД имеют относительную радиационную потерю КПД свыше 20%, а арсенид-галлиевые с модифицированным монокристаллическим GaAs (3 p - n -перехода) 16%; для тех же кремниевых ФЭП температурный коэффициент КПД равен 0,35 и 0,19 % (для тех же арсенид-галлиевых ФЭП).

Аморфный кремний (тончайшие слои кремния, напылённые в вакууме на пластик,

стекло или металл) наиболее дешев в производстве, но обладает серьёзным недостатком. Процесс деградации в элементах тонкоплёночных модулей протекает быстрее, чем в кристаллических ячейках. Слои кремния выгорают на свету значительно быстрее, чем у предыдущих типов.

Снижение производительности на 20% может произойти уже через два месяца. Очень часто в России из экономических соображений при-

обретают такие панели и потом разочаровываются, поскольку уже через год-два такой элемент перестаёт давать энергию. Промышленные многопереходные гетероструктурные ФЭП (ГФП) имеют высокий КПД, который доходит до 35 – 40%, в том числе и для обычного (AM0 – 1000 Вт/м²) солнечного излучения, причём возможности для увеличения КПД не исчерпаны. Их максимальная рабочая температура до +150°С.

Таблица 1

Элементы	ФЭП условия освещения	Эффективность фотопреобразования (%); организация, год			Главная причина непригодности для ЯОП	
		Лабораторные образцы	Теоретическая величина	Промышленные модули		
						3
1	2	3	4	5	6	
Однопереходные (p-n)	Монокристаллический кремний c-Si AM0 (панели используются в космической отрасли)	25 (UNSV)	33,7	16,6 (UNSV, 1999 г.)	КПД падает вдвое при температуре выше 60 – 70°С	
				22 (Chinaland Solar Energy, 2013 г.) SunTech Power*		
	Поликристаллический кремний ms-Si	20,5 (FhG-ISE)	33,7	18 (FhG-ISE, 2004 г.), (Chinaland Solar Energy, 2013 г.)		
	<i>Тонкоплёночные</i>					
	Аморфный кремний a-Si	12,2 (United Solar)	33,7	10	Величина КПД недостаточна	
		17 (Sharp)				
	Теллурид Кадмия CdTe	17,3% (First Solar)	29 (34)	10 – 11 (First Solar, 2013 г.)		
				15,7* (MiaSole)		
	Диселенид меди, индия и галлия Cu(In, Ga)Se ₂ (CIGS) (Nanosolar) (GlobalSol) (Solibro)	19,9 (NREL, стекло); 20,4; 20,8% (ZSW, 2013 г., стекло) 20,4 (EMPA, 2013 г., гибкий полимер)	28	12 – 13 (Solar Frontier)		неизвестна
				15,7		
18,7* (EMPA, 2013 г.)						
GaAs/CIS	25,8	28 [10]	нет	нет		

* Для предсерийных элементов.

Продолжение табл. 1 на с. 42.

1	2	3	4	5	6
Многoperеходные	GaAs/CIS a-Si/mc-Si	40	нет	36 (Spectrolab EMCORE)	Высокая стоимость и недостаточная изученность радиационной стойкости
	Арсенид-галлиевые с модифицированным монокристаллическим GaAs (3 <i>p-n</i> -перехода) AM0	31	38 – 42	26,8 (2009 г., ОАО «Сатурн»)	
	InGaAlP/GaAs/InGaAsN/Ge (панели используются в космической отрасли)	40	42, 2 <i>p-n</i> перехода	23 (Emcore Photovoltaics, 2001 г.) (2 <i>p-n</i> -перехода)	
			49, 3 <i>p-n</i> перехода	35 (Emcore Photovoltaics, 2001 г.) (4 <i>p-n</i> -перехода)	
	GaInP/GaInAs/Ge (CTJ) спектр AM1.5D Low AOD, 1000 Вт/м ²	35		32 [11], AM0, 25°C ФТИ им. А.Ф. Иоффе; EMCORE, 2002 г.) [12]; 35, (SolFocus)	
Каскадные солнечные элементы на основе наногетероструктур AlGaInP/GaInAs/Ge по технологии HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) + слои нанокристаллического nc-Si)	нет	нет	23 (Sanyo 2008 г.)		

Также ГФП на основе GaAs в значительно меньшей степени, чем кремниевые ФЭП, подвержены разрушению потоками протонов и электронов высоких энергий; например, ФЭП (InGaAlP/GaAs/InGaAsN/Ge) с двумя *p-n*-переходами после облучения электронами (1 МэВ, $5 \cdot 10^{14}$ е/см²) сохраняют 88% от КПД и 67% от КПД после дозы $3 \cdot 10^{15}$ е/см² [13]. Более того, эксперименты показали, что значительная часть радиационных дефектов в ГФП на основе GaAs исчезает после их термообработки (отжига) при температуре порядка 150 – 180°C. Если ГФП из GaAs будут постоянно работать при температуре порядка 150°C, то степень радиационной деградации их КПД будет относительно небольшой на протяжении всего срока активного функционирования ФЭП (≈10 лет). Отметим, что стоимость многoperеходной ячейки примерно в 100 раз выше аналогичной по площади кремниевой, поэтому эти типы ячеек (с дополнительным

охлаждением) применяют для концентрированного солнечного излучения. Однако не исключено, что после исследования влияния проникающего гамма-излучения на фотоэлектрические свойства ФЭП этого типа будет подтверждена их достаточная радиационная стойкость в условиях ЯОП-установки. Высокая стоимость многoperеходных гетероструктурных ФЭП при совершенствовании технологии и 42 организации крупносерийного производства неизбежно уменьшится до приемлемой величины.

Наиболее подходящими для ЯОП-установки в настоящее время являются халькопиритные фотопреобразователи [14]. Длины волн оптического излучения ЯОП-установки (350 – 410 и 750 – 1050 нм) находятся в диапазонах спектральной чувствительности (рис. 2 и 3) диапазонах халькопиритных ФЭП.

Известно, что тонкоплёночные ФЭП из твёрдых растворов Cu(In,Ga)Se₂ со структурой халькопирита имеют исключительную радиационную

стойкость по сравнению с кремниевыми (Si) и арсенид-галлиевыми (GaAs) ФЭП, именно в 50 раз выше в условиях околоземного космоса [15 – 19]. После непрерывной работы в течение $7 \cdot 10^4$ ч при освещении имитатором солнечного излучения и температуре 60°C ни один из параметров негерметизированных элементов CuInSe_2 и $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ не ухудшился. В работе [20] впервые исследовано влияние проникающего гамма-излучения на фотоэлектрические свойства гетеропереходов $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$, созданных на одном из новых тройных соединений CuIn_3Se_5 , образующемся при фазовом взаимодействии на квазибинарном разрезе мишени $\text{Cu}_2\text{Se-In}_2\text{Se}_3$. Облучение осуществлялось в нормальной воздушной среде при комнатной температуре с помощью источника непрерывного действия кобальта ^{60}Co ($E=1,25$ МэВ) с интенсивностью $\approx 10^{13}$ квант/($\text{cm}^2 \cdot \text{c}$). Подтверждена возможность их применения при потоках до $2 \cdot 10^{23}$ квант/ m^2 , при которых такие гетеропереходы сохраняют радиационную стойкость.

Исходя из этих данных, срок службы рассматриваемых ФЭП в составе ЯОП – время, в течение которого сохраняется работоспособность на уровне 90% примерно 400 – 800 суток.

Принимая во внимание разницу в энергии гамма-квантов от кобальта ^{60}Co и Cs^{137} , видим, что срок службы ФЭП в рассматриваемых условиях имеет смысл уточнить экспериментально до применения ФЭП в составе ЯОП, а также уточнить экспериментально КПД ФЭП для оптического излучения в диапазонах длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм и проверить сохраняют ли ФЭП работоспособность при температуре до $\approx 133^\circ\text{C}$.

Необходимо отметить, что халькопиритные ФЭП обладают наибольшим потенциалом для дальнейшего совершенствования, как со стороны введения добавок галлия, серы, натрия и кислорода, так и с точки зрения совершенствования используемых технологических операций и стабилизации параметров ФЭП, так как в силу недостаточной изученности оптимальная технология синтеза CuInSe_2 пока не найдена. Это выгодно отличает CuInSe_2 и родственные ему соединения меди со структурой халькопирита от других светопоглощающих материалов, так как дальнейшая работа по совершенствованию этих фотопреобразователей неизбежно должна привести к улучшению их характеристик по сравнению с остальными элементами, которые уже достигли (или почти достигли) оптимальной технологии производства и опти-

мальной конструкции. Дальнейшее развитие фотоэлектрических преобразователей на основе неорганических тонких плёнок связано с усовершенствованием технологии производства. Существуют обоснованные прогнозы (ООО «СанЛит Технологии», NREL, ZSW, EMPA), что CIGS является и будет оставаться наиболее эффективной технологией в ближайшие годы.

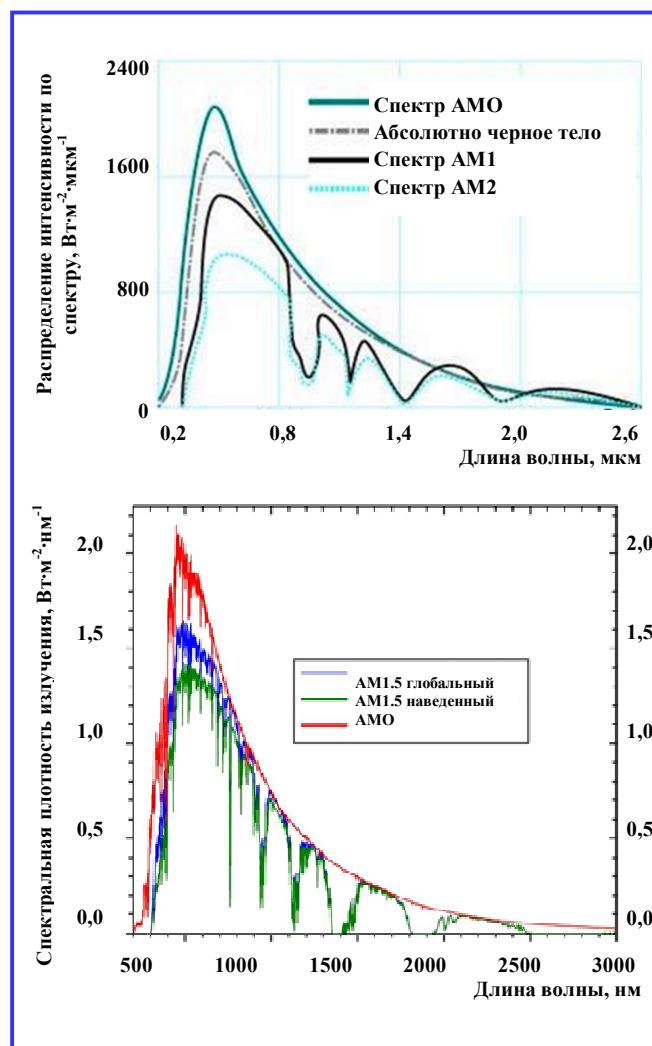


Рис. 1. Распределение интенсивности по спектру солнечного излучения

К началу рабочего проектирования экспериментальной ЯОП-установки имеет смысл проверить выбор ФЭП и конструкции модулей ФЭП на воздействие радиации конкретных (переработанных) высокоактивных ядерных отходов и на воздействие других перечисленных выше факторов, включая газовую активную среду при температуре от 30 до $\approx 133^\circ\text{C}$.

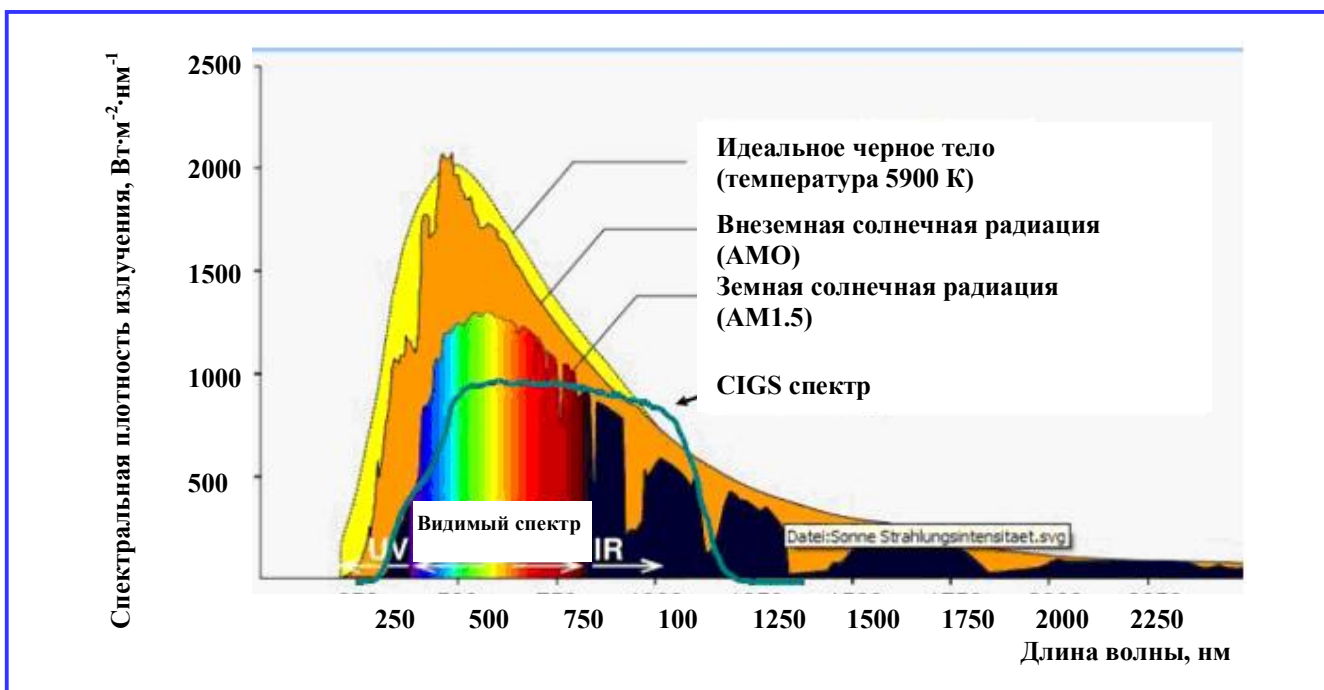


Рис. 2. Распределение интенсивности по спектру солнечного излучения (AM1.5 Global) и спектральная чувствительность CIGS (3 *p-n*-перехода)

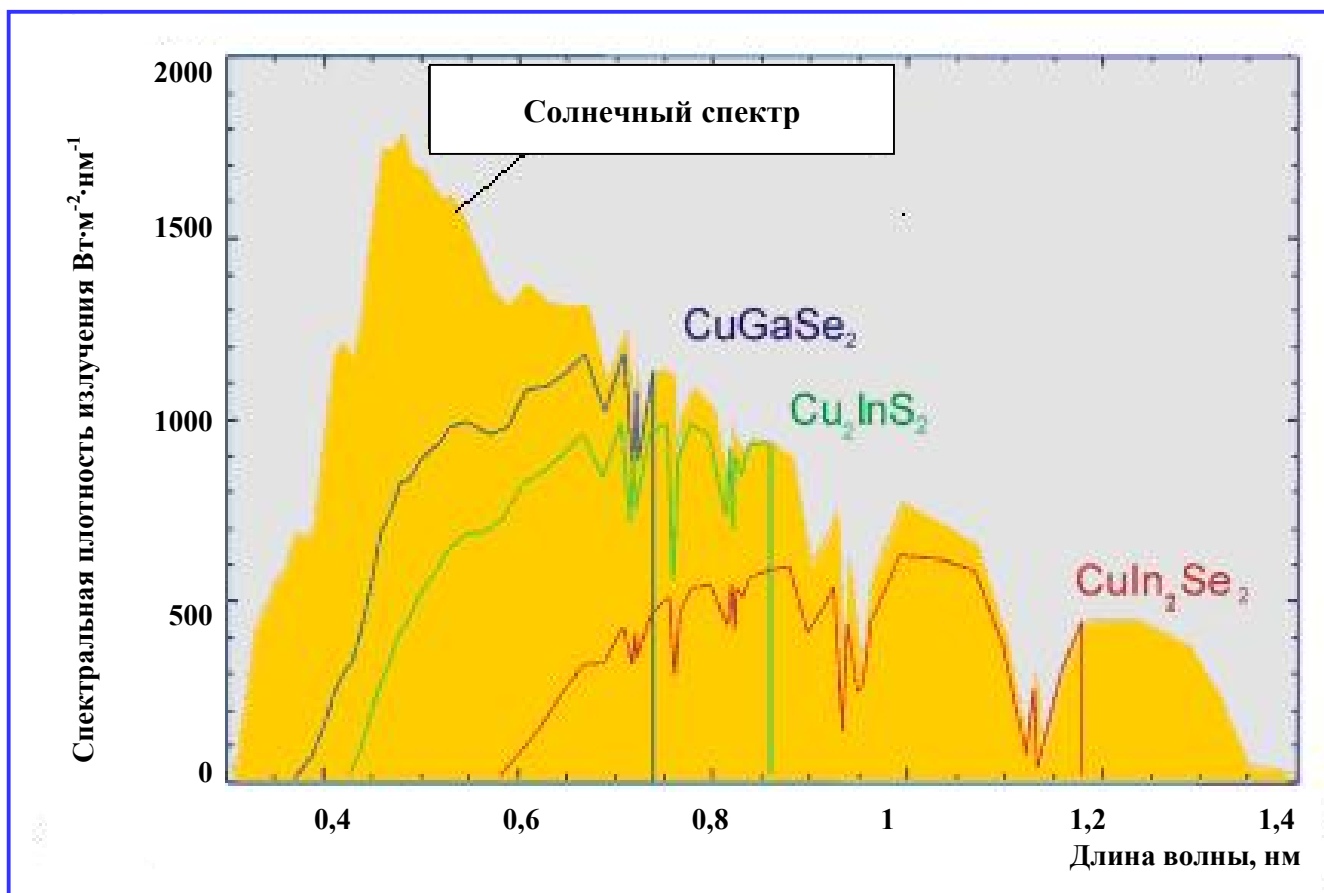


Рис. 3. Распределение интенсивности по спектру солнечного излучения (AM1.5 Global) и спектральная чувствительность CIGS (1 *p-n*-переход)

Экспериментальная ЯОП-установка должна содержать минимум ОЯТ или РАО, но достаточно хорошо воспроизводить температурный и радиационный режим в газовой активной среде (смесь Ar-N₂, соотношение концентраций [Ar]:[N₂]=45:1, давление 1 МПа); имеет смысл проверить сохранение прочности и герметичности корпуса, сохранение работоспособности датчиков, кабельной сети и других элементов, относящихся к электрической и электронной части. Ясно, что и такая малогабаритная действующая модель ЯОП достаточно сложное устройство, содержащее автомат поддержания заданных температуры и давления, а также системы сбора данных и обеспечения безопасности, причём безопасность должна быть гарантирована на случай разрушения корпуса или утечки ОЯТ. Детальное исследование и тщательная отработка режимов работы действующей модели необходимый этап до проектирования полномасштабной ЯОП-установки.

Противоречивость требований к ФЭП и значительная доля эмпирического подхода в технологии производства могут привести к необходимости разработать ФЭП именно для ЯОП-установки, ФЭП, сочетающий КПД 35 – 40% с сохранением работоспособности в течение 9 – 10 лет на уровне 90% при воздействии радиации и оптического излучения; суммарная стоимость модулей ФЭП не должна быть выше 10% стоимости ЯОП-установки. Наиболее подходящие для ЯОП-установки ФЭП (CIGS) в настоящее время лишь частично удовлетворяют перечисленным выше требованиям (см. таблицу): КПД ≈20%, радиационная стойкость характеризуется сохранением работоспособности на уровне 90% после 400 – 800 суток непрерывной работы, температурный коэффициент КПД лучше 0,1 – 0,2% (по данным «CIVICSolar»). Достигнутый уровень параметров ФЭП (CIGS) позволяет приступить к проектированию экспериментальной ЯОП-установки минимальных размеров.

Литература

1. Карелин А. В., Хиблин И. Н., Амелин Л. А., Широков Р. В. Теплофизические ограничения ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 117. – №4. – С. 43 – 51.
2. Карелин А. В., Хиблин И. Н., Амелин Л. А. Экономические характеристики ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 33 – 44.

3. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения: [монография] / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – М.: Наука, 1989.
4. Калюжный Н. А., Гудовских А. С., Евстропов В. В., Лантратов В. М., Минтаиров С. А., Тимошина Н. Х., Шварц М. З., Андреев В. М. Германиевые субэлементы для многопереходных фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaInAs/Ge // ФТП 44 (11). – 2010. – С. 1568 – 1576.
5. Kalyuzhnyy N. A., Gudovskikh A. S., Evstropov V. V., Lantratov V. M., Mintairov S. A., Timoshina N. Kh., Shvarts M. Z., Andreev V. M. Current flow and efficiency of Ge p-n junctions in triple-junction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells for space applications // Proceedings of the 25th EPSEC and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. – Valencia (Spain), 2010, 6 – 10 September. – P. 865 – 871.
6. Kalyuzhnyy N. A., Mintairov S. A., Mintairov M. A., Lantratov V. M. Investigation of photovoltaic devices crystallization in MOCVD with in-situ monitoring // Proc. of the 24th EPSEC. – Hamburg, Germany, 2009, 21 – 25 September. – P. 538 – 544.
7. Расчёт активной зоны и теплообменника ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов с учётом теплофизических ограничений. А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2011 – Т. 122. – № 3. – С. 41 – 53.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
9. Аббасова Т. С. Повышение эффективности систем преобразования солнечной энергии / Т. С. Аббасова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 3.
10. Международный проект по халькогенидным тонкопленочным солнечным батареям / П. П. Гладышев, С. В. Филин, В. Ф. Гременок, Г. С. Хрипунов, В. Б. Залесский, Е. К. Белоногов, В. М. Иевлев, М. Б. Дергачева // Всероссийская научно-практическая конференция «Принципы и механизмы формирования национальной инновационной системы Российской Федерации». – Дубна, 2010.
11. David Danzilio. Overview of EMCORE's multi-junction solar cell technology and high volume manufacturing capabilities, EMCORE Photovoltaics, 10420 Research Road SE, Albuquerque, NM 87123.
12. Первый международный форум по возобновляемой энергетике REENFOR-2013, Москва, 22 – 23 октября 2013 г. Дискуссионная сессия IX «Проблемы и перспективы создания космических солнечных электростанций и беспроводной передачи энергии». Тенденции развития каскадных фотоэлектрических преобразователей нового поколения для аэрокосмических солнечных электростанций / В. М. Андреев, Н. А. Калюжный, С. А. Минтаиров, В. С. Калиновский, М. З. Шварц / Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.
13. Development, space qualification and production of high-efficiency large-area InGaP/GaAs dual-junction solar cells on ge at emcore photovoltaics (EPV) Navid S. Fatemi, Hong Q.

Hou, Paul R. Sharps, Paul M. Martin, B. E. Hammons and Frank Spadafora Emcore Photovoltaics (EPV), 1999. 10420 Research Rd., SE Albuquerque, NM 87123; e-mail: navid_fatemi@emcore.com.

14. Гременок В. Ф., Тиванов М. С., Залесский В. Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. – Минск: Издательский центр БГУ, 2007.

15. Yamaguchi M., Nemura S., Yamamoto A. J. // Appl. Phys., 55, 1429 (1984).

16. Gay C. F., Potter R. R., Tanner D. P., Ansbaugh B. E. // Proc: 17th IEEE Photov. Spec. Conf. – 1984. – P. 151.

17. Yamaguchi M. // J. Appl. Phys, 78, 1476 (1995).

18. A. Jasenek, H.-W. Schock, J. H. Werner, U. Rau. Appl. Phys. Lett., 79, 2922 (2001).

19. Горюнова Н. А. Химия алмазоподобных полупроводников / Н. А. Горюнова. – Л.: ЛГУ, 1963.

20. Исследование влияния γ -облучения на фоточувствительность гетеропереходов ZnO/CuIn₃Se₅ / Б. Х. Байрамов, И. В. Боднар, В. В. Емцев, Д. С. Полоскин, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь, М. В. Якушев // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – Вып. 1. – С. 67 – 69.

Поступила в редакцию 01.09.2014

Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела,
т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru

Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (495) 994-54-88, e-mail: am-leonid@mail.ru

Иван Николаевич Хиблин, нач. лаборатории, т. (495) 366-14-11,
e-mail: nilbix@mail.ru