

УДК 621.383:621.362

В. Н. Гульков, И. Д. Колесниченко, К. Е. Коротков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения

Рассматриваются возможности повышения КПД солнечных модулей при эксплуатации их в экстремальных условиях. Целью статьи является анализ эффективности работы солнечных модулей при значительных изменениях температуры и интенсивности воздействия солнечного излучения. Температура и уровень освещенности исследуемых солнечных модулей сильно влияют на выходную мощность. Поскольку рабочая температура может меняться в широком интервале, особенно при эксплуатации в континентальных условиях, это приводит, например, к заметному уменьшению чувствительности кремниевых солнечных элементов в длинноволновой области спектра. Предложены пути снижения температуры модуля, позволяющие повысить эффективность его работы. Установленные на тыльной стороне солнечного модуля тепловые рассеиватели различных типов дают рост выходной мощности до 8.5 %, увеличивая тем самым эффективность и снижая себестоимость преобразования излучения.

Солнечный модуль, солнечная энергетика, солнечный элемент, эффективность преобразования, фотоприемник, тепловой рассеиватель

В настоящее время доля солнечной энергии в условиях энергосбережения увеличивается, ведутся активные разработки в этой сфере над повышением качества, стабильности и улучшения характеристик солнечных элементов. Однако остается много нерешенных проблем. Одним из важных факторов, влияющих на стабильность выходных характеристик солнечных элементов, является температура. Повышение температуры солнечных элементов при облучении солнечным светом отрицательно влияет на их эффективность фотопреобразования, в результате чего падает выходная нагрузочная мощность.

Экспериментальные исследования показали, что при эксплуатации солнечных модулей в летнее время, при ясном небе и интенсивном солнечном излучении, они неизбежно подвергаются нагреву в течение дня. Это температурное воздействие может не только влиять на эффективность преобразования светового потока, но и приводить к ускорению деградации модуля, что в конечном итоге может вести к снижению характеристик.

В данное время доля солнечной энергии увеличивается и ведутся активные разработки в этой сфере в области повышения качества, стабильности и улучшения характеристик солнечных элементов. К важным факторам, влияющим на стабильность выходных характеристик солнечных элементов, относится температура.

Солнечные модули из кремния составляют 90 % в глобальном производстве благодаря тому, что в последние годы производителям удалось многократно сократить себестоимость производства таких элементов, что обеспечило укрепление их позиций на мировом рынке. Срок их службы обычно составляет 25–30 лет. Кристаллические кремниевые модули делятся на два типа: монокристаллические и поликристаллические.

Монокристаллические солнечные элементы обладают КПД в среднем 22 %. Для их производства используют ультрачистые кремниевые стержни, которые нарезают тонкими пластинами.

Поликристаллические солнечные элементы обладают КПД в среднем 17 % [1]. В отличие от монокристаллического кремния, в этом случае кремний отливается в блоки. В процессе затвердевания образуются кристаллические структуры различных размеров, на границах которых возникают дефекты, снижающие КПД.

Развитие технологии возможно при уменьшении стоимости и улучшении качества материалов, а также процессов производства и факторов экономики.

Элементы на основе тонких пленок, состоящих из ряда слоев толщиной от 1 до 4 мкм, нанесенных на дешевый вспомогательный слой (стекло, металл, полимерная пленка), требуют гораздо меньше полупроводникового материала для изго-

товления, чтобы поглотить то же количество солнечного излучения [2].

Из аморфного кремния α -Si изготавливаются самые разнообразные и широко известные тонкопленочные солнечные элементы (СЭ). КПД солнечного элемента на основе аморфного кремния в среднем составляет 16 %.

Аморфный кремний с микрокристаллическим кремнием α -Si/ μ c-Si состоит из аморфного кремния с дополнительными слоями микрокристаллического кремния, присоединенного к подложке. Преимущество слоя микрокристаллического кремния состоит в том, что он поглощает больше излучения из красного и инфракрасного спектров, тем самым увеличивая КПД элемента в среднем до 20 % [3].

Температура, при которой работают солнечные модули, – один из ключевых факторов, определяющих их КПД. Солнечные элементы имеют ограниченный КПД – это означает, что они не в состоянии преобразовать всю полученную энергию в электричество; остальная энергия при этом преобразуется в тепло. Повышенная температура вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника. Т. е. с ростом температуры ширина зоны уменьшается, и ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования электронно-дырочных пар. При этом ток короткого замыкания незначительно увеличивается, в то время как напряжение холостого хода уменьшается и приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности [4].

Температурные коэффициенты мощности различных фотоэлектрических технологиях изменяются от -0.2 до -0.4 % на 1 °C. Влияние температуры на значение выдаваемой мощности солнечного элемента можно оценить из выражения

$$P_{CЭ} = P_0 (1 + \beta \Delta t),$$

где $P_{CЭ}$ – мощность солнечного элемента, Вт; P_0 – мощность солнечного элемента при 25 °C, Вт; β – температурный коэффициент мощности, °C $^{-1}$; Δt – изменение температуры, °C.

Для солнечного элемента из монокристаллического кремния $\beta \approx -0.4$ %/°C. Таким образом, выходная мощность кристаллических кремниевых фотоприемников уменьшается на 0.4 %. Так как сила тока увеличивается значительно меньше, чем падает напряжение, при более высокой температуре эксплуатации элементов происходит снижение мощности.

Рабочая температура солнечного модуля – это результат равновесия между теплом, вырабатываемым в модуле, и теплом, уходящим в окружающую среду.

Существует три основных фактора, приводящих к отводу тепла: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводность возникает из-за разности температур между солнечным элементом и другими телами и средами, в том числе воздухом, который окружает модуль. Способность солнечного элемента передавать тепло своему окружению характеризуется тепловым сопротивлением материалов солнечной панели. Движущей силой при передаче тепла с различным тепловым сопротивлением является разность температур Δt , °C, между двумя материалами, т. е. $\Delta t = R_t P_h$, где P_h – это тепловой поток, создаваемый солнечным элементом; R_t – тепловое сопротивление поверхности, излучающей тепловой поток, Вт $^{-1}$. Тепловое сопротивление модуля зависит от толщины материала и его удельного теплового сопротивления. В расчет принимается площадь поверхности, проводящей тепло, толщина слоя материала, через который проходит тепло, и λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C).

Для расчета теплового сопротивления более сложных структур отдельные коэффициенты складываются последовательно или параллельно. Суммарный коэффициент теплопроводности при передаче тепла в окружающую среду тыльной и лицевой поверхностей можно рассчитать по закону параллельного сопротивления. Потери могут возникать и за счет конвективного теплообмена, когда материал обдувается потоком воздуха. В отличие от теплового сопротивления, рассчитать коэффициент конвекционного теплообмена прямыми способами сложно, поэтому его обычно получают эмпирическим путем для определенных сочетаний материалов и условий [5].

С помощью излучения солнечный модуль может отдавать тепло в окружающую среду [6]. Рабочая температура солнечного модуля – это результат равновесия между теплом, поглощенным в модуле, и теплом, уходящим в окружающую среду. Тепловая энергия, созданная в солнечном модуле, может быть оценена по закону Стефана–Больцмана с учетом потерь тепла в результате разности между теплом, полученным извне, и теплом, излученным в окружающую среду. В этом случае важно учитывать излучательную способность поверхности материала, которая

может изменяться от 0.3 до 0.95 с учетом разности температур солнечного элемента и температуры окружающей среды.

В данной статье рассматривается эффективный метод снижения температуры с помощью излучающих поверхностей, установленных на тыльной поверхности солнечного модуля. Исследование влияния температуры солнечного элемента на показания напряжения, силы тока элемента и выходной мощности проводилось с помощью лабораторной установки (рис. 1), состоящей из следующих элементов: 1 – галогеновая лампа накаливания, спектр излучения которой можно считать близким к солнечному; 2 – солнечный модуль; 3 – неселективный термоэлектрический приемник (для определения абсолютного значения падающего на солнечный элемент потока); 4 – термопара; 5 – измерительные приборы. Регулирование потока осуществляется за счет изменения расстояния L между солнечным модулем 2 и лампой накаливания 1.

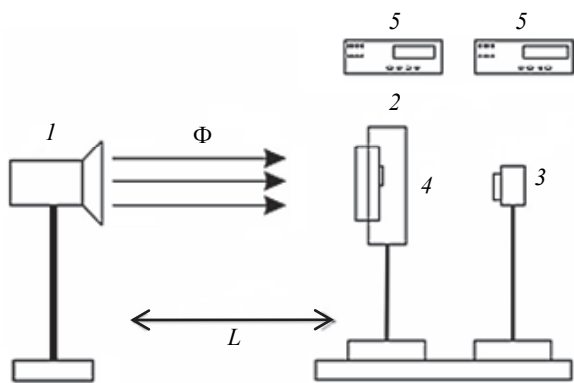


Рис. 1

Измерения проводились на различных расстояниях от солнечного элемента до лампы. На каждом расстоянии с помощью термоэлектрического приемника были сняты значения потока и показания температуры. Значение падающего потока определяется как отношение выходного сигнала к чувствительности неселективного термоэлектрического приемника $S = 0.088 \text{ мВ}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$. Зная абсолютную чувствительность приемника S , можно получить значение потока, падающего на исследуемый модуль. Термоэлектрический приемник

оптического излучения обладает постоянной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 0.3 мкм до 2.8 мкм. Для каждого расстояния значение потока Φ определяется с учетом чувствительности эталонного приемника.

Одна из главных проблем солнечного элемента – это ухудшение параметров за счет нагрева его самого. В табл. 1 приведены зависимости выходных параметров модуля от температуры при $\Phi = 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$. С ростом температуры (t) наблюдается падение выходного напряжения (U) солнечного элемента. Среднее значение падения выходного напряжения равно $0.047 \text{ В}/^\circ\text{C}$ при потоке $1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$. С увеличением температуры модуля ток в среднем увеличивается на $0.011 \text{ мА}/^\circ\text{C}$.

Из полученных результатов можно видеть, что увеличение температуры исследуемого модуля под действием солнечного излучения приводит к снижению эффективности преобразования энергии. Максимальное значение температуры составило $66 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом температура модуля увеличилась на $36 \text{ }^\circ\text{C}$, что привело к снижению выходной мощности на 7.3 мВт (9.2% от первоначального значения). В среднем при повышении температуры на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальная выходная мощность падает на 0.25% .

При увеличении потока до $2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ температура модуля стабилизируется при избыточной температуре $48 \text{ }^\circ\text{C}$, а выходная мощность ($P_{\text{вых}}$) падает на 16.6 мВт (14.6% от первоначального значения). В этом случае при повышении температуры на $1 \text{ }^\circ\text{C}$, выходная мощность падает на 0.16% .

На рис. 2 показана зависимость выходной мощности от температуры при различных интенсивностях источника излучения (1 – $\Phi = 800 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 2 – $1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 3 – $2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

Зависимость выходных параметров модуля от значения падающего потока показана в табл. 2.

Таким образом, из рис. 2 можно видеть, что даже при увеличении интенсивности потока в 2.5 раза выходная мощность практически не изменяется.

Таблица 1

Параметр	Температура модуля, $^\circ\text{C}$																		
	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
U , В	11.9	11.8	11.7	11.6	11.6	11.5	11.3	11.3	11.2	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.5	10.4	10.3	10.2	10.2
I , мА	6.7	6.7	6.7	6.7	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9	6.9	6.9	7.0	7.0	7.0	7.1	7.1	7.1	7.2
$P_{\text{вых}}$, мВт	79.9	79.5	78.9	78.6	78.6	77.9	77.2	76.7	76.7	76.6	76.0	75.5	75.1	75.0	74.6	74.0	73.9	73.0	72.6

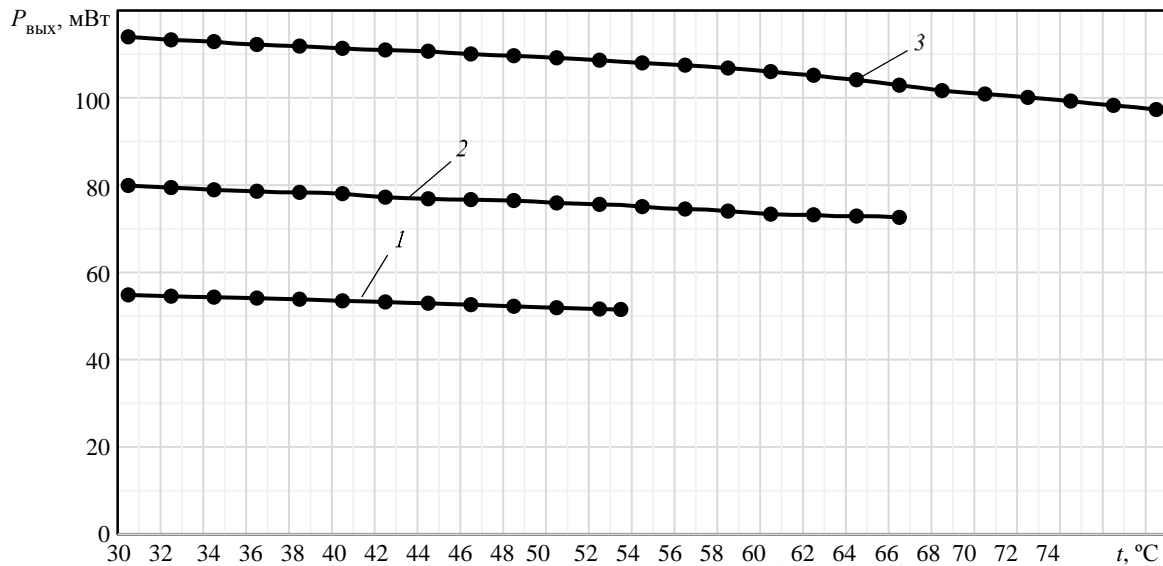


Рис. 2

Из полученных результатов следует, что увеличение температуры солнечного элемента под действием солнечного излучения приводит к снижению эффективности преобразования энергии. Максимальное значение температуры и средние значения изменения параметров можно увидеть в табл. 2, где U_{XX} – напряжение холостого хода (XX), I_{K3} – ток короткого замыкания (КЗ). Падение напряжения на 1 °С составляет 0.11, 0.21 и 0.28 В, а температура стабилизации – 3.3, 7.3 и 16.6 °С соответственно.

Максимальное значение температуры солнечного элемента для потока 800 Вт/м² составило 53 °С. Выходная мощность при достижении температуры стабилизации составляет 51.5 мВт, что на 3.4 мВт (6.1 %) меньше, чем при первоначальной температуре.

Таблица 2

Энергетический параметр	Поток излучения, Вт/м ²					
	800		1400		2000	
U_{XX} , В	11.6	10.6	11.9	10.2	12.4	10
I_{K3} , мА	4.7	4.9	6.7	7.1	9.2	9.7
$P_{вых}$, мВт	54.8	51.5	79.9	72.6	113.9	97.3

Для потока 1400 Вт/м² максимальное значение температуры составило 66 °С. Выходная мощность при достижении температуры стабилизации составляет 72.6 мВт, что на 7.3 мВт (9.13 %) меньше, чем при первоначальной температуре.

Для потока 2000 Вт/м² максимальное значение температуры составило 78 °С. Выходная мощность при достижении температуры стабили-

зации составляет 99.3 мВт, что на 16.8 мВт (14.7 %) меньше, чем при первоначальной температуре. Таким образом, в результате исследования мы получили, что при увеличении потока от 800 до 2000 Вт/м² увеличивается температура нагрева модулей и падает выходная мощность с 14.7 до 6 %. Для повышения эффективности работы модулей при указанных температурах было предложено использовать тепловой излучатель.

Зависимость мощности от температуры при воздействии потока $\Phi = 2000$ Вт/м² представлена кривой 3 на рис. 2. Аналогично предыдущему измерению, при увеличении температуры на 48 °С выходная мощность падает на 16.6 мВт, что соответствует 14.6 % от первоначального значения. В среднем при повышении температуры на 1 °С выходная мощность падает на 1.6 %. Увеличение температуры на 48 °С заняло 32 мин.

Для снижения температуры солнечного модуля было предложено устройство, позволяющее рассеивать накопленную температуру с тыльной стороны модуля (рис. 3). Рассеиватель представляет пластину из пластика размером 10 × 10 см толщиной 2.5 мм, с одной стороны плоскую, прикрепленную к модулю, а с другой имеющую рифленую поверхность с полусферическими выступами и покрытую черной краской с коэффициентом излучения 0.95. Сравним значения выходного напряжения, силы тока, мощности и температуры для такой конструкции при потоке 1400 Вт/м² с черным излучателем.

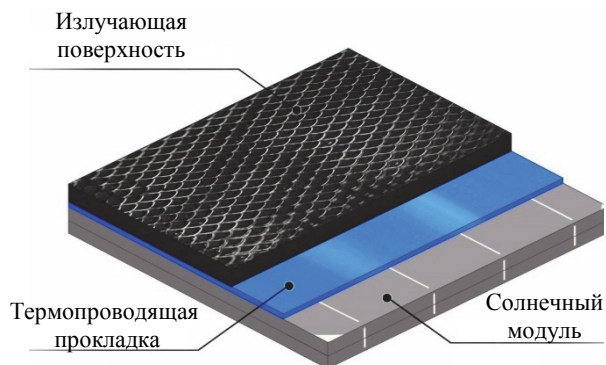


Рис. 3

Построим график зависимости выходной мощности для потока (800...1400...2000) Вт/м² с металлическим черным излучателем. На рис. 4 представлена зависимость выходной мощности от температуры с металлическим излучателем (штриховая линия) и без него при потоке 800 (кривые 1), 1400 (кривые 2) и 2000 (кривые 3) Вт/м².

В табл. 3 представлена зависимость выходной мощности и температуры от значения потока с результатами применения излучателей при исследовании модулей, где $t_{\text{стаб}}$ – установление температуры без черного излучателя; $t_{\text{стаб.изл}}$ – установление температуры при наличии дополнительного излучателя, $P_{\text{вых}}$ – мощность без излучателя, $P_{\text{вых.изл}}$ – установившаяся мощность при наличии черного излучателя; ΔP – увеличение максимальной мощности.

При потоке 800 Вт/м² температура стабилизировалась на 5 °С раньше и составила 48 °С вместо 53 °С. Среднее значение падения мощности на 1 °С практически не изменилось по сравнению с

пластмассовым излучателем и составило 0.12 мВт, но из-за меньшей максимальной температуры нагрева, выходную мощность удалось увеличить на 1.2 мВт, или на 2.3 %.

Таблица 3

Энергетический параметр	Поток излучения, Вт/м ²		
	800	1400	2000
$P_{\text{вых}}$, мВт	50.5	72.6	97.3
$P_{\text{вых.изл}}$, мВт	52.6	75.4	102
$t_{\text{стаб}}$, °С	53	66	78
$t_{\text{стаб.изл}}$, °С	48	58	71
ΔP , %	2.3	3.7	4.8

При потоке 1400 Вт/м² температура стабилизации снизилась на 8.1 °С и составила 58 °С. Максимальную мощность удалось увеличить на 2.8 мВт (3.7 %).

При потоке 2000 Вт/м² температура стабилизации снизилась на 7.1 °С и составила 71 °С. Максимальную мощность удалось увеличить на 4.9 мВт (4.76 %). В результате получаем, что максимальная температура нагрева с черным излучателем составила 63 °С. Увеличение температуры на 33 °С заняло 27 мин, за это же время образец без черного излучателя, разогрелся до 66 °С. Минимальное напряжение образца с теплоотводом составило 10.3 В, что на 0.14 В больше, чем у образца без теплоотвода.

Максимальная температура нагрева образца с черным излучателем составляет 63 °С, что на 3.2 °С меньше, чем у образца без теплоотвода. Выходная мощность при максимальной температуре составляет 73.6 мВт, что на 1 мВт больше, чем при максимальной температуре у образца без

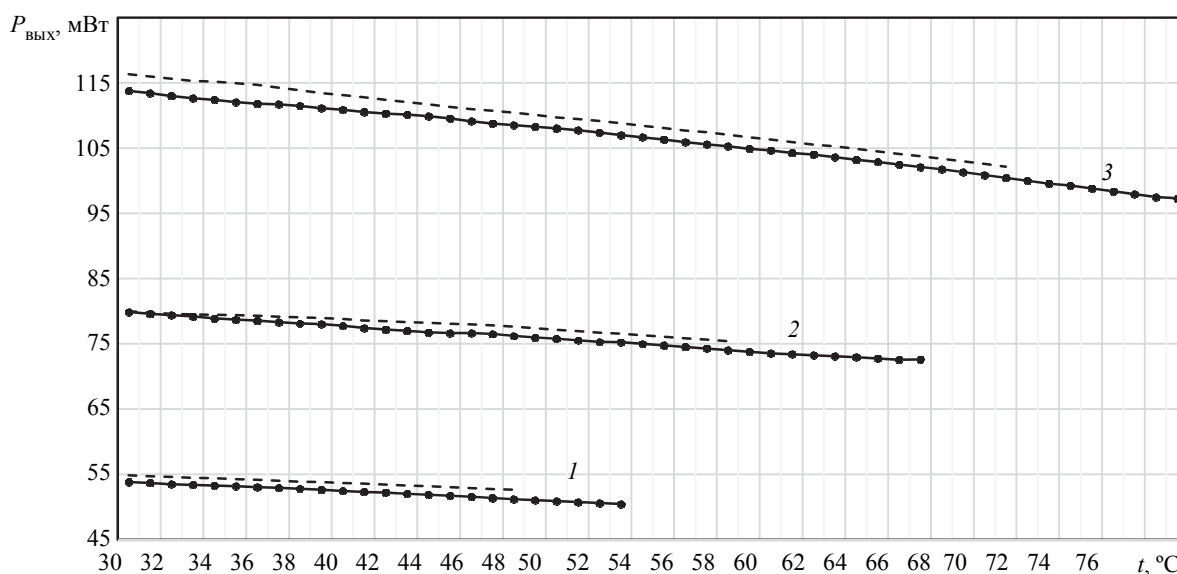


Рис. 4

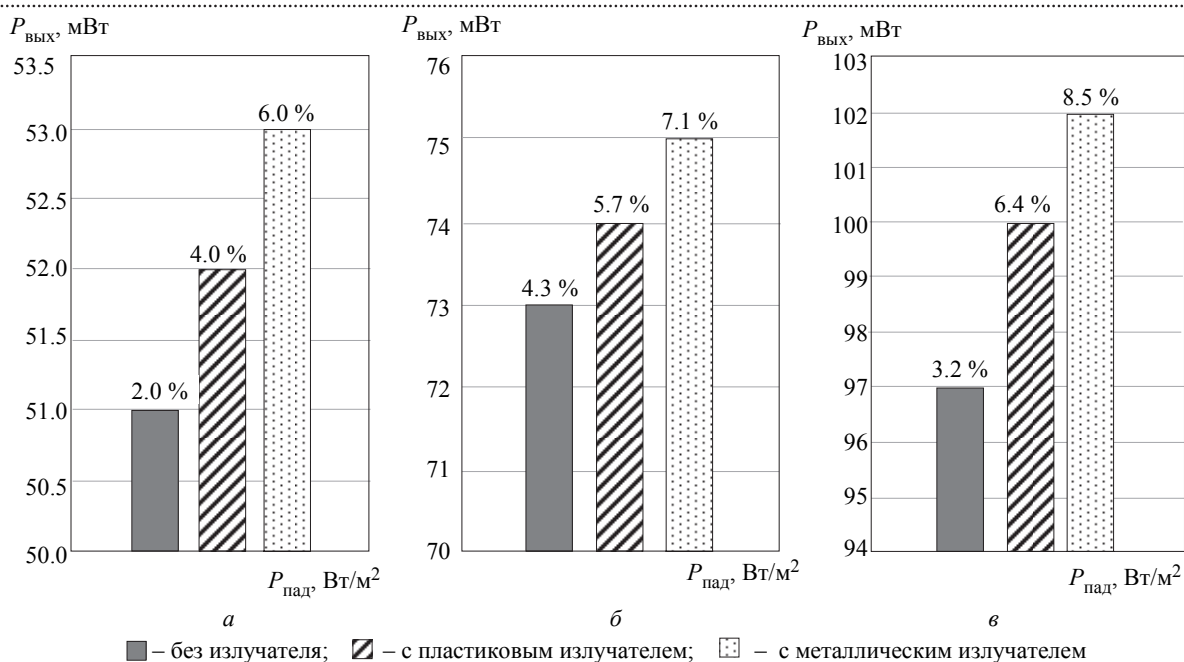


Рис. 5

черного излучателя. В среднем при повышении температуры на 1 °С, выходная мощность падает на 0.15 мВт, или на 2.4 %, что на 0.4 % меньше, чем без черного излучателя. Установка теплоотвода на солнечный элемент позволила увеличить выходную мощность при максимальной температуре нагрева на 1.5 % по сравнению с солнечным элементом без черного излучателя при потоке солнечного излучения 1400 Вт/м².

При исследовании выходной мощности от температуры для солнечного элемента с теплоотводом и без него при $\Phi = 2000$ Вт/м² получаем, что максимальная температура нагрева образца с черным излучателем составляет 76 °С, что на 17 °С меньше, чем у образца без теплоотвода. Выходная мощность при максимальной температуре составляет 99 мВт, что на 2 мВт больше, чем при максимальной температуре у образца без черного излучателя. В среднем при повышении температуры на 1 °С выходная мощность падает на 0.3 мВт, или на 2 %. Установка черного излучателя на солнечный элемент позволила увеличить выходную мощность при максимальной температуре нагрева на 2.5 % по сравнению с солнечным элементом без черного излучателя при потоке солнечного излучения 2000 Вт/м².

Результаты измерения эффективности исследуемых модулей при различных падающих потоках $P_{пад}$ показаны на рис. 5 (*a* – 800 Вт/м², *б* – 1400 Вт/м², *в* – 2000 Вт/м²). Измерения проводились без излучателя, с пластиковым и металлическим излучателями. Повышение выходной мощности $P_{вых}$ достигается при условии хорошего

контакта излучающего элемента с тыльной стороной модуля и наличии высокого коэффициента излучения исследуемой пластины.

По полученным результатам можно видеть, что увеличение температуры солнечного модуля под действием излучения приводит к снижению эффективности преобразования энергии. При этом, используя различные виды излучающих поверхностей и методики их установки при указанных падающих потоках (рис. 5, *a–в*), получаем увеличение выходной мощности от 50 до 102 мВт, что соответствует изменению доли выходной мощности от первоначального значения без излучателей при максимальной температуре 78 °С до 8.5 %. В среднем это повышение составляет 0.18 % на 1 °С.

В результате проведенных исследований параметров солнечных модулей при изменениях температуры и значений падающего потока рассчитана интенсивность падающего потока; определены значения предельной температуры при нагревании модулей; проведена оценка температурной зависимости для напряжения, тока и выходной мощности. Предложена система отвода тепла от плоскости модуля, которая позволяет снизить тепловую нагрузку и таким образом уменьшить температурную зависимость, а также увеличить КПД исследуемых модулей. Предложены пути снижения температуры модуля, позволяющие повысить эффективность его работы. Установленный на тыльной стороне солнечного модуля тепловой рассеиватель увеличивает выходную мощность на 3–5 %, повышая тем самым эффективность преобразования излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

2. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 308 с.

3. Patel M. R. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. New York, USA.: Taylor&Francis, 2006. 448 с.

4. Влияние температуры на эффективность солнечных батарей // GWS energy. URL: <http://gws-energy.ru/blog/40-vliyanie-temperatury-na-effektivnost-solnechnykh-batarej> (дата обращения 4.04.18).

5. Джумаев А. Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. 46-й междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: Сибак, 2015. № 5 (42). С. 33–40.

6. Linxiao Z., Aaswath R., Ken X. Radiative cooling of solar cells // Optical. 2014. Vol. 1. P. 32–38.

V. N. Gulkov, I. D. Kolesnichenko, K. E. Korotkov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEATING SOLAR MODULES ON THE EFFICIENCY OF RADIATION CONVERSION

The article talks about the possibility of increasing the efficiency of solar modules when operating them under extreme conditions. The purpose of the article is to analyze the efficiency of solar modules with significant changes in temperature and intensity of exposure to solar radiation. The temperature and illumination level of the solar modules under study strongly influence the efficiency of the output power. Since the operating temperature can vary over a wide range, especially under continental conditions, it results, for example, in a noticeable decrease in the sensitivity of silicon solar cells in the long-wave region of the spectrum. The ways of reducing the temperature of the module are suggested, which make it possible to increase the efficiency of their operation. Installed on the back of the solar module, the thermal diffuser increases the output power by 8.5%, thereby increasing the conversion efficiency of the radiation.

Solar module, solar energy, solar cell, conversion efficiency, photodetector, thermal diffuser

УДК 539.143.43

Я. Ю. Марченко, Б. П. Николаев
ФГУП «Гос.НИИ ОЧБ» ФМБА России

Магнитная гетерогенность пористых материалов и ее проявление в спектрах ЯМР

Проведен теоретический анализ возможностей метода ЯМР для исследования морфологии гетерогенных сред. Показана взаимосвязь между параметрами спектров ЯМР высокого разрешения и интегральными параметрами гетерогенности среды. Проведен расчет положения линий ЯМР жидкой фазы вещества, локализованной в полостях сферической формы двух- и трехкомпонентных сред. Различия в магнитных восприимчивостях компонентов сред оказывает влияние на положение линий через механизм неоднородного уширения. Зависимости между положением линий ЯМР жидкостей, диамагнитными восприимчивостями компонентов, размагничивающими факторами и объемной долей дисперсных частиц имеют вид линейных уравнений. Степень дисперсности материала не оказывает прямого воздействия на положение линий ЯМР при постоянстве сферической формы включений. Результаты теоретического рассмотрения могут быть распространены на более сложные типы гетерогенных сред с порами сферической морфологии.

Пористые материалы, гетерогенная среда, спектры ЯМР, форма линии

Положение линий в спектрах ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения отражает зеемановское распределение уровней

энергии системы ядерных спинов, помещенных в постоянное магнитное поле. При измерении спектров ЯМР жидкостей, входящих в состав ге-