

07

Тепловые характеристики высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения

© В.М. Андреев¹, Н.Ю. Давидюк², Д.А. Малевский¹,
П.В. Покровский¹, Н.А. Садчиков¹, А.В. Чекалин^{1,¶},
А.В. Андреева¹

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

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: chekalin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 июля 2018 г.

Выполнены исследования влияния условий теплоотвода на величину перегрева фотоэлектрических преобразователей мощного (более 10^3 W/cm^2) лазерного излучения. Измерение температуры $p-n$ -перехода фотоэлементов осуществлялось путем регистрации мгновенного значения напряжения холостого хода, генерируемого лазерным излучением. Продемонстрирован эффект охлаждения в высокоэффективных фотоэлементах (КПД = 55%) за счет отвода существенной части поглощенной оптической мощности фототоком в полезную нагрузку. Показано, что при мощности лазерного излучения 2.5 W перегрев фотоэлемента площадью $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ в режиме холостого хода относительно температуры медного теплоотвода составляет 48°C , а при работе в режиме оптимальной нагрузки — 30°C .

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46862.17451

Мощные фотоэлектрические преобразователи, работающие в вентильном режиме (без приложения внешнего напряжения), находят все большее применение в высокоэффективных солнечных энергоустановках с промежуточным концентрированием солнечного излучения [1,2] и в системах беспроводной передачи энергии по лазерному лучу [3–5]. Достигнутые значения КПД фотоэлектрического преобразования мощного лазерного излучения превышают 50% в фотоэле-

ментах (ФЭ) AlGaAs/GaAs при длине волны лазерного излучения $\lambda = 0.8-0.86 \mu\text{m}$ [3–5].

При лазерном облучении фотоэлементов площадью менее $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ и мощности лазерного излучения порядка 2.5 W плотность мощности светового потока составляет более 10^3 W/cm^2 , что эквивалентно облучению концентрированным солнечным излучением при кратности концентрирования более 10 тысяч „солнц“. Облучение фотоэлементов световым потоком такой сверхвысокой интенсивности приводит к разогреву фотоэлементов, следствием чего является снижение эффективности фотоэлектрического преобразования оптического излучения.

В настоящей работе приведены результаты исследования тепловых характеристик высокоэффективных фотоэлементов (КПД = 55%) на основе гетероструктуры $n(p)\text{-GaAs-p-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ при их засветке (со стороны слоя $p\text{-AlGaAs}$) лазерным излучением ($\lambda = 808 \text{ nm}$) мощностью до 2.5 W из оптического волокна диаметром $200 \mu\text{m}$. Изготовленные фотоэлементы площадью $3.6 \cdot 10^{-3}$ и $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ были напаяны на медные теплоотводы большой площади, охлаждение которых осуществлялось за счет естественного воздушно-конвекционного сброса тепла. Температура теплоотводов контролировалась в непосредственной близости от места монтажа приборов с помощью термодатчиков и в процессе измерения незначительно отличалась от комнатной. Все изменения температуры теплоотводов учитывались при дальнейших расчетах.

Разработаны методики измерения температуры перегрева области $p\text{-}n$ -перехода по значению его напряжения холостого хода (V_{oc}) при отключенной нагрузке и в рабочих условиях при подключении ФЭ на внешнюю резистивную нагрузку [6,7].

Величина перегрева области $p\text{-}n$ -перехода (ΔT_{p-n}) относительно комнатной температуры определялась путем сравнения значений напряжений холостого хода на $p\text{-}n$ -переходе исследуемого ФЭ в разогретом состоянии и при комнатной температуре

$$\Delta T_{p-n} = \frac{V_{oc}^{hot} - V_{oc}^{amb}}{\alpha \cdot 10^{-3}}, \quad (1)$$

где α [mV/°C] — температурный коэффициент изменения напряжения на $p\text{-}n$ -переходе при заданной плотности тока; V_{oc}^{hot} [V] и V_{oc}^{amb} [V] — значения напряжений холостого хода на $p\text{-}n$ -переходе при установившейся

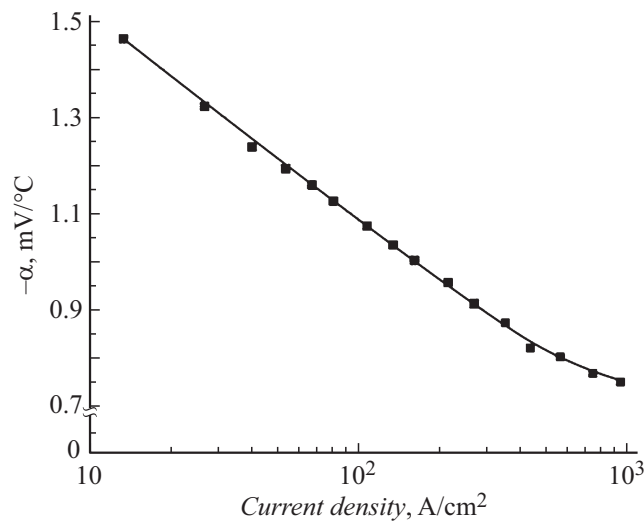


Рис. 1. Зависимость величины температурного коэффициента изменения напряжения на p – n -переходе α от плотности тока для фотоэлементов на основе гетероструктуры $n\text{-GaAs-p-GaAs-p-AlGaAs}$.

температуре в нагретом состоянии и при температуре окружающей среды соответственно.

Для определения зависимости величины температурного коэффициента α от плотности тока (рис. 1) исследуемые образцы ФЭ были помещены в термостат, температура в котором изменялась от комнатной до 100°C . При разных значениях температуры была проведена запись вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭ при пропускании электрического тока через p – n -переход в прямом направлении. При расчете изменений напряжения на ВАХ при изменении температуры для фиксированных значений тока были получены значения коэффициента α при разных плотностях тока для измеряемого образца.

Чтобы минимизировать изменение температуры активной области ФЭ за время измерения, все записи ВАХ в настоящей работе производились на одиночных импульсах тока при регистрации значений пар ток–напряжение на переднем фронте импульса тока длительностью не более $70\ \mu\text{s}$. Было установлено, что при длительности $100\ \mu\text{s}$ светового

импульса прямоугольной формы и плотности светового излучения до $5 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$ нагрев активной области ФЭ за время светового импульса не превышает 1°C . Поэтому разогревом активной области за время нарастания тока на переднем фронте одиночного импульса можно пренебречь.

Из полученной зависимости температурного коэффициента α от плотности тока видно, что величина $-\alpha$ уменьшается с увеличением фототока от $1.5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ при $j = 10 \text{ A/cm}^2$ до $0.75 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ при $j = 10^3 \text{ A/cm}^2$. Следствием этого является пропорциональное уменьшение температурного коэффициента снижения КПД фотоэлементов с увеличением плотности фототока.

Были выполнены исследования температуры перегрева (ΔT_{p-n}) области $p-n$ -перехода ФЭ при облучении лазерным излучением в непрерывном режиме с длиной волны 808 nm из волокна диаметром $200 \mu\text{m}$. Мощность лазерного излучения изменялась от 0.3 до 2.5 W .

При расчетах величины ΔT_{p-n} по формуле (1) значения температурного коэффициента α для каждого значения мощности лазерного излучения определялись по плотности тока короткого замыкания ФЭ, соответствующего мощности поглощенного светового излучения.

Значения V_{oc}^{amb} в холодном состоянии измерялись при облучении импульсами света длительностью $60 \mu\text{s}$ со скважностью 100 для предотвращения нагрева активной области ФЭ лазерным излучением. Значения V_{oc}^{hot} в нагретом состоянии измерялись в ФЭ, работающих в режиме холостого хода, при непрерывном режиме засветки. В ФЭ, подключенных к оптимальной нагрузке, разогрев системы происходил также в непрерывном режиме засветки. В этом случае по истечении времени, необходимого для достижения теплового баланса системы, ФЭ электронным коммутатором переключались в режим холостого хода и производилось измерение амплитуды возникшего броска напряжения, соответствующей значению V_{oc}^{hot} в нагретом состоянии при отводе части поглощенной световой мощности во внешнюю резистивную нагрузку. Время переключения не превышало $70 \mu\text{s}$.

Были исследованы температуры перегрева фотоэлементов площадью $3.6 \cdot 10^{-3}$ и $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$, напаянных на медный теплоотвод. Образцы ФЭ площадью $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ были напаяны также на пластину из металлизированной керамики AlN толщиной 0.5 mm , установленную на медный теплоотвод через теплопроводящую пасту (рис.2).

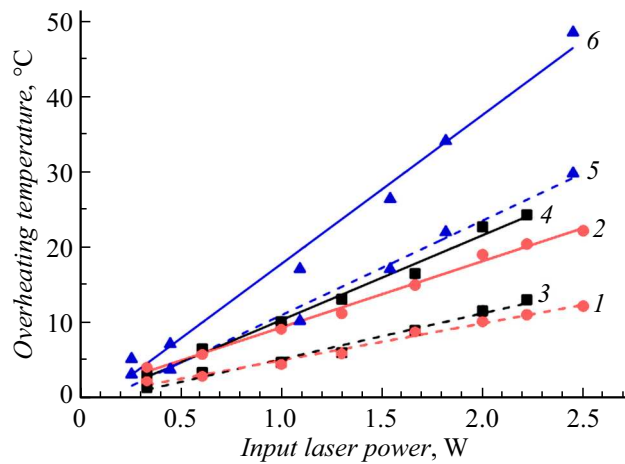


Рис. 2. Зависимости перегрева p - n -переходов в фотоэлементах относительно температуры медного теплоотвода от мощности лазерного излучения. 1, 2 — для фотоэлемента площадью $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ (на медном теплоотводе), работающего в режиме подключения к оптимальной нагрузке (1) и в режиме холостого хода (2); 3, 4 — для фотоэлемента площадью $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ (на пластине металлизированной керамики AlN), работающего в режиме подключения к оптимальной нагрузке (3) и в режиме холостого хода (4); 5, 6 — для фотоэлемента площадью $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ (на медном теплоотводе), работающего в режиме подключения к оптимальной нагрузке (5) и в режиме холостого хода (6).

При работе ФЭ в режиме оптимальной нагрузки при мощности лазерного излучения 2.5 W перегрев ФЭ площадью $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ составляет $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ при напайке ФЭ на медный теплоотвод. При уменьшении площади ФЭ до $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ величина перегрева ФЭ увеличивается до $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. Напайка ФЭ на промежуточную AlN-пластину толщиной 0.5 mm приводит к незначительному повышению температуры перегрева (на 2°C).

При работе в режиме оптимальной нагрузки уменьшение эффективности преобразования света в ФЭ приводит к увеличению перегрева p - n -переходов. Можно рассматривать работу ФЭ в режиме холостого хода как предельный случай для фотоэлементов с низким КПД преобра-

зования. При мощности лазера $P_L = 2.5 \text{ W}$ величина перегрева ФЭ площадью $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ в режиме холостого хода составляет $\Delta T = 22^\circ\text{C}$ и увеличивается до $\Delta T = 48^\circ\text{C}$ в ФЭ площадью $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$.

Таким образом, впервые проведены измерения эффекта охлаждения, имеющего место в высокоэффективных фотоэлементах за счет отвода существенной части поглощенной мощности фототоком в полезную нагрузку. Величина перегрева области p - n -перехода относительно температуры медного теплоотвода для образцов ФЭ площадью $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ в режиме холостого хода составила $\Delta T = 48^\circ\text{C}$ и уменьшалась до $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ в режиме оптимальной нагрузки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035).

Список литературы

- [1] *Andreev V.M., Grilikhes V.A., Romyantsev V.D.* Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1997. 308 p.
- [2] *Romyantsev V.D.* // Concentrator photovoltaics. Springer Ser. in Optical Sciences. Berlin: Springer, 2007. V. 130. Ch. 8. P. 151–174.
- [3] *Andreev V.M., Khvostikov V.P., Kalinovsky V.S., Grikhes V.A., Romyantsev V.D., Shvarts M.Z., Fokanov V., Pavlov A.* High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming // Proc. of WCPEC-3. (Osaka, Japan). IEEE, 2003. P. 3P-B5-33.
- [4] *Андреев В.М.* // Современ. электроника. 2014. № 6. С. 20–25.
- [5] *Oliva E., Dimroth F., Bett A.W.* // Prog. Photovolt. 2008. V. 16. P. 289–295.
- [6] *Kinsey G.S., Hebert P., Barbour K.E., Krut D.D., Cotal H.L., Sherif R.A.* // Prog. Photovolt. 2008. V. 16. P. 503–508.
- [7] *Romyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Chekalin A.V., Malevskiy D.A., Panchak A.N., Sadchikov N.A., Andreev V.M., Luque A.* // IEEE J. Photovolt. 2015. V. 5. N 6. P. 1715–1721.