

К. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО, д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА СО ВСТРОЕННЫМ ПОЗИСТОРНЫМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА С УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

*Экспериментально изучены способности к защите от перенапряжения фотогальванического элемента со встроенным позисторным слоем (полимерный наноккомпозит с углеродным наполнителем), находящимся в непосредственном тепловом контакте с ним. Исследована кинетика изменений электрических характеристик такой структуры при возникновении постоянных электрических перенапряжений на затененном фотогальваническом элементе, когда его р—п-переход оказывается включенным в обратном направлении. Показано, что ток и обратное напряжение на затененном фотогальваническом элементе ограничиваются и снижаются с того момента, когда его температура достигает значений, близких к температуре фазового перехода позисторного наноккомпозита в низкопроводящее состояние, равной примерно 125°C.*

*Ключевые слова: фотогальванический элемент, электрическое перенапряжение, кинетика, электрические характеристики, позисторный полимерный наноккомпозит, температура срабатывания.*

Структуры на основе неоднородных диэлектриков нашли широкое и эффективное применение в современной технике в качестве элементов твердотельной электроники [1—4]. Как правило, их стандартное назначение определено и основные функциональные свойства достаточно изучены. В направлении совершенствования современной элементной базы электроники перспективной является разработка новых элементов. В рамках этой задачи представляется интересным исследование функциональных характеристик комбинированных структур на основе уже известных неоднородных материалов [5—8], однако этому вопросу до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

Особое место среди составляющих элементов указанных комбинированных структур занимают наноккомпозиты для самовосстанавливающихся РРТС (polymeric positive temperature coefficient) предохранителей типа PolySwitch. Эти материалы, представляющие собой нанокуглеродный наполнитель в полимерной матрице, являются основой новых направлений решения проблем коммутации и защиты компонентов электрических систем от электрических перегрузок [3, 4]. Их базовое функциональное свойство — скачкообразное, на несколько порядков, увеличение сопротивления при достижении определенной температуры и возврата в исходное высокопроводящее состояние при понижении температуры [3, 4, 9]. Такие элементы нашли уже применение в аккумуляторах и гальванических источниках питания [10—14].

Построение схемотехнических систем защиты компонентов фотоэлектрических систем солнечных

батареи от электрических перегрузок на основе самовосстанавливающихся предохранителей в настоящее время рассматривается как одно из перспективных направлений повышения надежности таких возобновляемых источников электрической энергии. В частности, предложены такие схемотехнические решения:

— ограничение тока при наличии короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических модулей, что может быть реализовано включением последовательно с каждым модулем самовосстанавливающегося предохранителя типа PolySwitch [8, 15, 16];

— предотвращение перенапряжений в затененных (или неисправных) фотоэлектрических преобразователях и их последовательных соединениях с помощью ограничителя напряжения на основе двухслойной структуры, состоящей из варистора и РРТС-предохранителя PolySwitch, находящихся в тепловом контакте [17, 18].

Как уже указывалось, отличительным свойством таких предохранителей является резкое возрастание их сопротивления при нагреве до температур, близких к температуре фазового перехода в полиэтилене (около 125°C), называемой температурой срабатывания  $T_{trip}$  [3, 4]. Это свидетельствует о еще одном направлении решения проблемы предотвращения локальных перегревов («горячих пятен» [19]) в фотоэлектрических компонентах солнечных батарей, которое основано на срабатывании при повышении температуры распределенного самовосстанавливающегося предохранителя, непосредственно контактирующего с поверхностью фотоэлектрического преобразователя.

Актуальными задачами для продвижения в указанном направлении являются обоснование и апробация такого схемотехнического решения предотвращения локальных перегревов в цепях фотоэлектрических систем солнечных батарей. Следует отметить, что современные фотоэлектрические преобразователи относятся к элементам распределенного пленочного типа (толщина 0,1—0,2 мм, размеры до 15×15 см). При детальном исследовании электротепловых процессов, в частности теплового пробоя, происходящих в таких структурах, необходимо учитывать процессы распространения тепла в плоскости фотоэлектрического преобразователя, что приводит в итоге к сложным в математическом и экспериментальном смысле задачам [20—22]. Тем не менее, для выяснения эффективности и особенностей рассматриваемого здесь способа защиты от перенапряжения можно провести исследование сопровождающих его электрических эффектов, используя структуры небольшой площади, в частности отдельных фотогальванических элементов, для которых неоднородностью предпробойного нагрева можно пренебречь.

В настоящей работе приводятся и анализируются результаты экспериментальных исследований электрических свойств двухслойной структуры, представляющей собой фотогальванический монокристаллический кремниевый элемент с дополнительным слоем позисторного полимерного нанокompозита с углеродным наполнителем, находящегося в тепловом контакте, с целью оценки возможности ограничения электрического напряжения, прикладываемого к обратно включенному фотогальваническому элементу.

**Исследуемая структура и ее схемотехническое представление**

Структура образцов и эквивалентная электрическая схема образцов фотогальванического элемента с защитой от перенапряжений на основе двухслойных структур из монокристаллического кремниевого фотогальванического элемента (PV cell) и полимерного позисторного нанокompозита с углеродным наполнителем (PPTC fuse) представлены на **рис. 1**.

В экспериментах в качестве фотогальванического элемента использовались фрагменты солнечных элементов, изготовленных на основе монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ИТО-пленки [9, 23] (толщина 0,1 мм, площадь до 4 см<sup>2</sup>). Вторым слоем был рабочий элемент PPTC-предохранителя типа FRX375-60F (слой диаметром 28,5 мм и толщиной 1,6 мм, сопротивление элемента в проводящем состоянии составляет 0,08 Ом,  $T_{trip} = 125^{\circ}\text{C}$ ) [24, 25]. Тепловой контакт между слоями обеспечивался использованием кремниевой теплопроводной пасты КПТ-8 [26].

Исследования производились с использованием схемы, изображенной на **рис. 2**. Входное напряжение  $U$  подавалось от стандартного регулируемого источ-

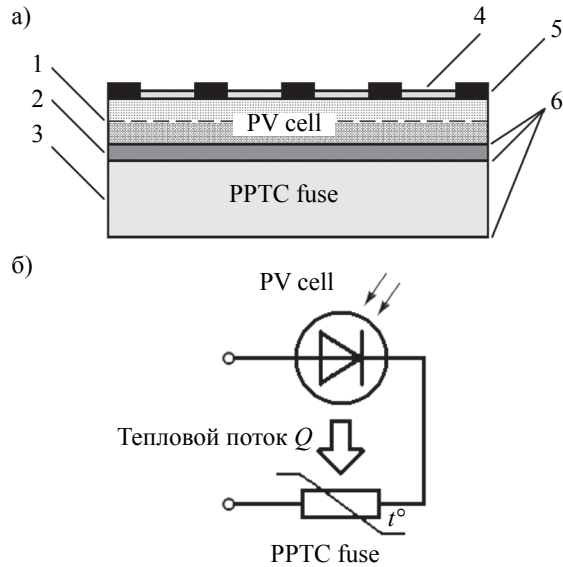


Рис. 1. Исследуемая структура (а) и ее электрическая схема (б):

1 —  $p-n$ -переход фотогальванического элемента; 2 — теплопроводящая паста; 3 — позисторный нанокompозит; 4, 5 — антиотражающее покрытие и металлическая сетка (электрод) слоя фотогальванического элемента; 6 — электродные слои

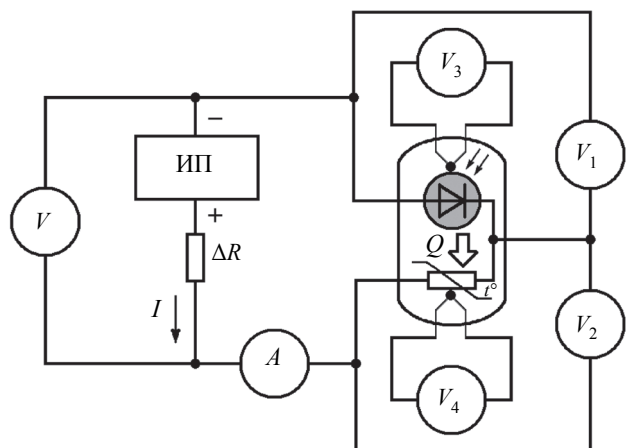


Рис. 2. Схема измерения электрических характеристик исследуемой структуры:

$V_1, V_2$  — вольтметры для измерения напряжения на фотогальваническом ( $U_{PV}$ ) и позисторном ( $U_{PPTC}$ ) элементах;  $V_3, V_4$  — вольтметры для фиксации температуры фотогальванического ( $T_{PV}$ ) и позисторного ( $T_{PPTC}$ ) элементов;  $A$  — амперметр для измерения протекающего через структуру тока ( $I$ );  $V$  — вольтметр для контроля напряжения источника питания;  $\Delta R$  — добавочное внутреннее сопротивление источника напряжения

ника напряжения типа ТЕС14 (ИП). Измерения тока  $I$  и напряжения на элементах исследуемой структуры ( $U_{PV}, U_{PPTC}$ ) проводились коммерческими вольтметрами и амперметром, значения их температуры ( $T_{PV}, T_{PPTC}$ ) фиксировались термopарами.

Состояние разогрева затененного фотогальванического элемента и всей рассматриваемой структуры достигалось подачей на него постоянного на-

пряжения в направлении обратного смещения  $p-n$ -перехода [27]. Кинетика изменения указанных параметров фиксировалась в синхронном режиме посекундно в течение времени  $t$ , достаточного для релаксации исследуемой структуры до равновесного состояния ( $t \approx 10$  мин).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение**

*Кинетика процесса ограничения напряжения фотогальванического элемента с позисторным слоем*

При проведении исследований электронный  $p-n$ -переход затененного фотогальванического элемента был включен в обратном направлении, что соответствует наиболее неблагоприятной ситуации, когда становится возможным его тепловой пробой [19, 28, 29].

Кинетические зависимости тока, напряжения и температуры рассматриваемой двухслойной структуры на основе монокристаллического кремниевого фотогальванического элемента и РРТС-предохранителя представлены на **рис. 3**. Как видно, на начальных участках ( $t < 100$  с) указанные временные зависимости подобны тем, что наблюдаются для фотогальванических элементов в предпробойном режиме [27]. При достижении позисторным элементом температуры срабатывания  $T_{trip}$  (кривая 5), т. е. при переходе его в состояние с высоким электрическим сопротивлением, имеет место перераспределение прикладываемого напряжения  $U$  в сторону существенного его

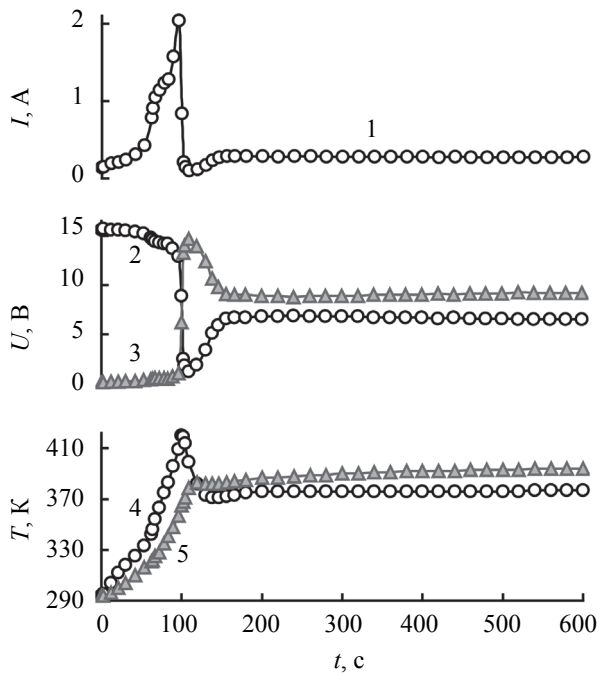


Рис. 3. Изменение во времени тока ( $I$ ), напряжения и температуры фотогальванического (2, 4) и позисторного (3, 5) элементов исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения 16 В

уменьшения на фотогальваническом элементе (кривая 2) и уменьшения тока (кривая 1). Значения температуры обоих элементов исследованной структуры после срабатывания позисторного элемента близки к  $T_{trip}$  и в дальнейшем не изменяются.

Из представленных данных следует, что:

- рассматриваемые структуры обладают способностью ограничения температуры;
- после срабатывания термочувствительного позисторного элемента температура остается постоянной и является практически одинаковой для всей структуры;
- максимальное значение тока через структуру наблюдается короткое время (порядка нескольких секунд);
- в области ограничения температуры все напряжение (прикладываемое вначале к фотогальваническому элементу) перераспределяется и его значительная часть падает на позисторном элементе.

*Влияние амплитуды перенапряжения и внутреннего сопротивления источника напряжения на кинетику процесса*

Как известно, одним из наиболее влиятельных факторов, который может привести к пробоем фотогальванического элемента, является прикладываемое к нему обратное напряжение. Это имеет место в фотоэлектрических модулях солнечных батарей, когда фотогальванический элемент затенен, неисправен или подвергся деградации. В таком случае он выступает в качестве активного сопротивления и не является источником тока.

На **рис. 4** можно увидеть, как величина (амплитуда) прикладываемого обратного постоянного напряжения  $U$  влияет на кинетику процесса ограничения напряжения фотогальванического элемента с позисторным слоем. С ростом напряжения наблюдается уменьшение времени достижения граничной температуры при перенапряжении и увеличение максимального тока через исследуемую структуру. Температурный режим при этом изменяется незначительно. Возникновение большого максимального тока при температуре структуры, меньшей температуры срабатывания защитного позисторного элемента, может привести к такому нежелательному эффекту, как пробой фотогальванического элемента, который произойдет до срабатывания рассматриваемой здесь защиты от перенапряжений.

При этом, однако, следует отметить, что в реальных условиях ток и напряжение источника питания являются ограниченными, например, в фотоэлектрических модулях солнечных батарей они не могут быть больше тока короткого замыкания и напряжения холостого хода фотоэлектрического модуля [30]. В этом случае может реализоваться ситуация, когда с ростом температуры сопротивление фотогальванического элемента становится сравнимым с внутрен-

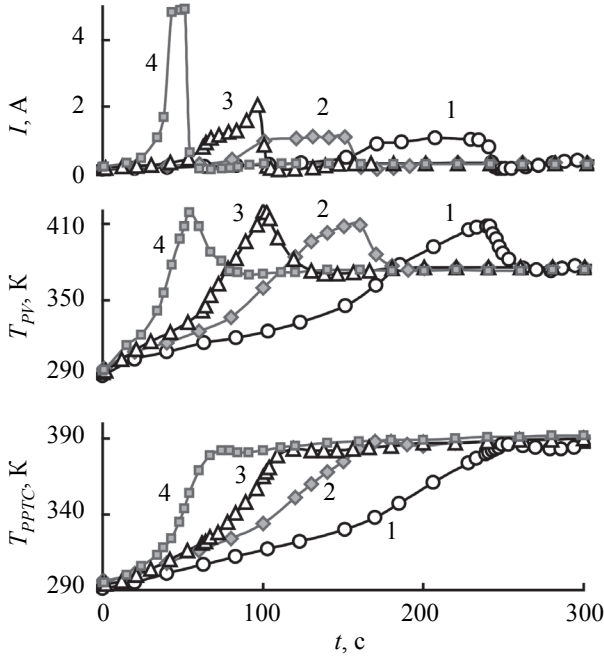


Рис. 4. Изменение во времени тока ( $I$ ) и температуры фотогальванического ( $T_{PV}$ ) и позисторного ( $T_{PPTC}$ ) элементов исследуемой структуры при подаче на нее постоянно-го напряжения  $U$  (в В):  
1 — 14; 2 — 15; 3 — 16; 4 — 17

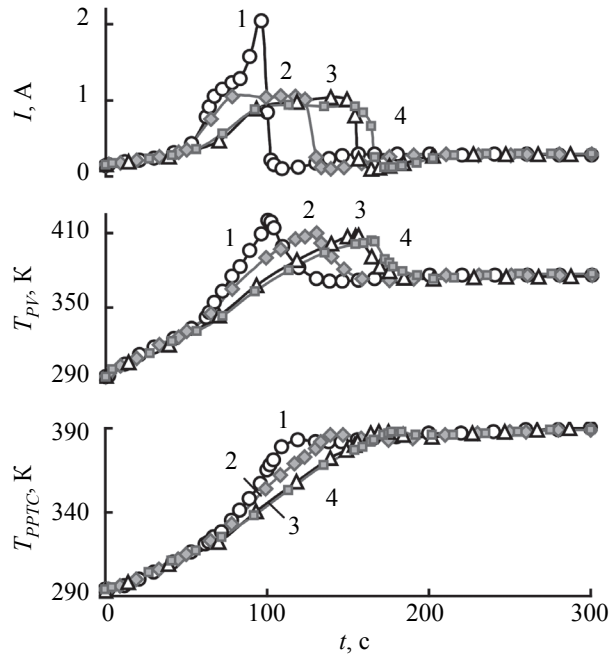


Рис. 5. Изменение во времени параметров  $I$ ,  $T_{PV}$  и  $T_{PPTC}$  исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения  $U = 16$  В и введении добавочных резисторов с сопротивлением  $\Delta R$  (в Ом):  
1 — 1; 2 — 1,5; 3 — 2; 4 — 3

ним сопротивлением источника питания до перехода в изолирующее состояние позисторного элемента.

Представленные на **рис. 5** временные зависимости изменения тока и напряжения получены при введении в схему источника питания добавочных резисторов с сопротивлением  $\Delta R$  (см. рис. 2). Здесь видно, что увеличение внутреннего сопротивления источника питания приводит к снижению пика тока и его размытию и смещению в сторону большего значения времени. То есть, энергия, необходимая для нагрева исследуемой структуры до температуры срабатывания защиты, накапливается дольше.

*Влияние параметров теплового контакта между фотогальваническим и позисторным элементами на кинетику процесса*

Наиболее важным параметром, влияющим на протекающие в рассматриваемой двухслойной структуре процессы, является тепловое сопротивление  $RT$  контакта между фотогальваническим и позисторным элементами. При проведении исследований величина  $RT$  варьировалась путем изменения площади контакта, которое осуществлялось сдвигом слоев фотогальванического элемента и позистора друг относительно друга. Меньшая площадь перекрытия слоев соответствовала большему значению  $RT$ .

Как видно из **рис. 6**, от величины теплового сопротивления контакта больше всего зависит ток, протекающий через рассматриваемую структуру. При плохой

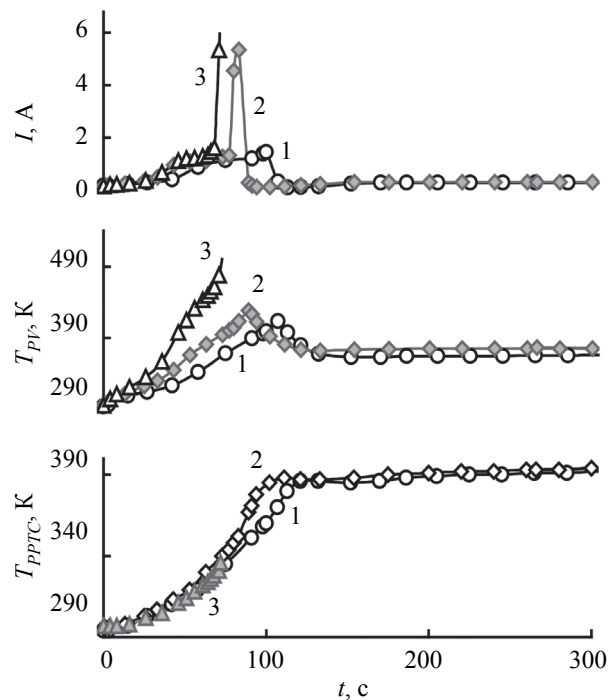


Рис. 6. Изменение во времени параметров  $I$ ,  $T_{PV}$  и  $T_{PPTC}$  исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения  $U = 16$  В при различных значениях теплового сопротивления контакта  $RT$  между фотогальваническим и позисторным элементами:  
1 —  $RT_1$ ; 2 —  $RT_2$ ; 3 —  $RT_3$   
( $RT_1 < RT_2 < RT_3$  и соответствуют перекрытию слоев на 100, 60 и 30 %)

теплопередаче между слоями варисторной керамики и РРТС-нанокompозита ток существенно возрастает, что может привести к тепловому пробую фотогальванического элемента. Чем больше значение  $RT$ , тем больший ток требуется для обеспечения теплопередачи, необходимой для достижения позисторным слоем температуры срабатывания. При очень большом  $RT$  (кривая 3) реализуется состояние, когда фотогальванический элемент практически теплоизолирован, что ведет к его тепловому пробую.

### Выводы

Исследования характеристик двухслойной структуры на основе фотогальванического полупроводникового элемента и позисторного слоя, находящихся в тепловом контакте, показали, что обратное напряжение на затененном, неисправном или деградированном фотогальваническом элементе ограничивается и снижается с того момента, когда температура этой структуры достигает значений, близких к температуре перехода позисторного нанокompозита в низкопроводящее состояние, т. е. не превышает  $125^{\circ}\text{C}$ . С ростом величины перенапряжения наблюдается уменьшение времени срабатывания рассматриваемой защиты и увеличение максимального тока через исследуемую структуру. Температурные режимы при этом изменяются незначительно. Уменьшение тока, необходимого для достижения позисторным слоем температуры срабатывания, может быть достигнуто снижением теплового сопротивления контакта между фотогальваническим и позисторным элементами структуры. Полученные результаты указывают на то, что введение позисторных слоев рассматриваемого типа в структуру фотогальванических элементов может быть использовано в качестве их защиты от перенапряжений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
- Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. USA, Mineola, New York. Dover Publications, Inc. 2002. 464 p.
- Gretzke W. Use of PolySwitch PPTC protection in automotive applications. In book: *42 V-PowerNets*. Eds. by H. Wallentowitz, C. Amsel. Germany, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, pp. 75–87. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9_4)
- Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок. *Новости Электроники*, 2014, № 12, с. 11–15.
- Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element*. Pat. USA, no. 7660096, 2010.
- Du Y., Kim H., Jiang T. *Solid state resettable fuses*. Pat. USA, no. 9998117, 2018.
- Anthony A. A. *Polymer fuse and filter apparatus*. Pat. USA, no. 6282074, 2001.
- Тонкошкур О. С., Иванченко О. В., Мазурик С. В., Макаров В. О. *Присрій захисту фотоелектричних модулів від струму перенавантаження*. Пат. 134899 України, 2019, бюл. №11.
- Тонкошкур А. С., Иванченко А. В., Накашидзе Л. В., Мазурик С. В. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 1, с. 43–49. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2018.1.43>
- Cheon K. Y. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
- Oglesbee J. W., Burns A. G., More G. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
- Minervini A. D., Nguyen T. K. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
- Littelfuse Inc. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries*, [http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application\\_notes/littelfuse\\_protecting\\_rechargeable\\_li\\_ion\\_and\\_li\\_polymer\\_batteries\\_in\\_consumer\\_portable\\_electronics\\_application\\_note.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf) (27 February 2020)
- Dimpault-Darcy E. C., Bragg B. J. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
- Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В. Моделирование ограничения тока в фотоэлектрических системах солнечных батарей с использованием самовосстанавливающихся предохранителей PolySwitch. *Радиоэлектроника, информатика, управління*, 2019, № 2, с. 15–22. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-2>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Modeling of electrical characteristics of photovoltaic solar arrays with protection against current overloads based on PolySwitch elements. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, p. 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of varistor-positistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 79–88. <https://doi.org/10.15421/331913>
- Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions. *Proceedings of the Second World conference on photovoltaic solar energy conversion*. Austria, Vienna, 1998, pp. 2357–2359.
- Воробьев Г. А., Похолоков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И. *Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие*, Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
- Чумаков В. И. Методы моделирования тепловых повреждений полупроводниковых приборов. *Радиоэлектроника и информатика*, 1999, № 2, с. 31–37.
- Virchenko Yu. P., Vodyanitskii A. A. Heat localization and formation of heat breakdown structure in semiconductor materials. I. Nonlinear model. *Functional Materials*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 428–434.
- Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2008, № 10(57), с. 100–103.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2018, vol. 26, no 1, p. 77–82. <https://doi.org/10.15421/331813>
- FRX Series - Radial Leaded PTC. [http://www.fuzetec.com/products\\_2.php?bgid=1&gid=31](http://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31) (27 February 2020)
- Теплопроводность термораст, сравнение термораст по теплопроводности и вязкости. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkost> (27 февраля 2019)

27. Иванченко А. В., Тонкошкур А. Изменения характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей после токовых перегрузок. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 3–4, с. 19–25. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.3-4.19>

28. d'Alessandro V., Guerriero P., Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>

29. Daliento S., Di Napoli F., Guerriero P., d'Alessandro V. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*. 2016, vol. 134, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.001>

30. Раушенбах Г. *Справочник по проектированию солнечных батарей*. Москва, Энергоатомиздат, 1983.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 12.02 2020 г.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.1-2.30

УДК 621.31

О. В. ИВАНЧЕНКО, О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет  
імені Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

### ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФОТОГАЛЬВАНІЧНОГО ЕЛЕМЕНТА З ВБУДОВАНИМ ПОЗИСТОРНИМ ШАРОМ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТУ З ВУГЛЕЦЕВИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

*Розглянуто проблеми запобігання перегріву і теплового пробою фотогальванічного елемента при прикладенні до його р—п-переходу високої зворотної напруги. Експериментально вивчено здатність до захисту від перенапруги структури у вигляді фотогальванічного елемента з вбудованим позисторним шаром, що знаходяться в безпосередньому тепловому контакті. Як фотогальванічний елемент використовувалися фрагменти сонячних елементів, виготовлених на основі монокристалічного кремнію. Позисторним шаром був полімерний наноккомпозит з вуглецевим наповнювачем, який використовується в самовідновлювальних запобіжниках типу PolySwitch.*

*Досліджено кінетику змін електричних характеристик такої структури при виникненні постійної електричної перенапруги на затіненому фотогальванічному елементі, коли його р—п-перехід опиняється включеним у зворотному напрямку. Показано, що струм і зворотна напруга на затіненому фотогальванічному елементі обмежуються і зменшуються з моменту, коли температура цієї структури досягає значень, близьких до температури переходу позисторного наноккомпозиту в низькопровідний стан, що дорівнює приблизно 125°C. При збільшенні величини перенапруги спостерігається зменшення часу спрацьовування розглянутого захисту і зростання максимального струму, який протікає досліджуваною структурою. Зменшення струму, необхідного для досягнення позисторним шаром температури спрацьовування, може бути досягнуто зниженням теплового опору контакту між фотогальванічним і позисторним елементами структури.*

*Отримані результати вказують на можливість реалізації захисту від зворотних електричних перенапруг і теплового пробою фотоелектричних систем на основі фотогальванічних елементів з вбудованими шарами запобіжників зазначеного типу.*

*Ключові слова: фотогальванічний елемент, електрична перенапруга, кінетика, електричні характеристики, позисторний полімерний наноккомпозит, температура спрацьовування.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.1-2.30

UDC 621.31

A. V. IVANCHENKO, A. S. TONKOSHKUR

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

### ELECTRICAL PROPERTIES OF PHOTOGALVANIC ELEMENT WITH BUILT-IN POSISTOR LAYER BASED ON POLYMER NANOCOMPOSITE WITH CARBON FILLER

*The study considers the problem of preventing overheat and thermal breakdown of a photovoltaic cell when a high reverse voltage is applied to its p—n junction. The overvoltage protection ability of a structure made up of a photovoltaic cell in direct thermal contact with a built-in posistor layer has been experimentally studied. Fragments of solar cells based on single-crystal silicon were used as a photovoltaic cells. The posistor layer was a polymer nanocomposite with carbon filler used in the resettable fuses of the “PolySwitch” technology.*

*The authors study kinetics of changes in the electrical characteristics of such a structure under constant electric overvoltage on a shaded photovoltaic cell, when its p—n junction is turned on in the reverse direction. It is shown that the current and reverse voltage on the shaded photovoltaic cell are limited and reduced from the moment when the temperature of this structure reaches the values close to the temperature of the phase transition of the posistor nanocomposite to the low-conductive state, which is  $\approx 125^{\circ}\text{C}$ . With an increase in the overvoltage value, a decrease in the response time of the considered protection and*

an increase in the maximum current value through the structure under study are observed. A decrease in the current value required to reach the tripping temperature by the posistor layer can be achieved by reducing the thermal resistance of the contact between the photovoltaic and posistor elements of the structure.

The results obtained indicate the possibility of implementing protection against reverse electrical overvoltage and thermal breakdown of photovoltaic systems based on photovoltaic cells with built-in fuse layers of a specified type.

**Keywords:** photovoltaic cell, electrical overvoltage, kinetics, electrical characteristics, posistor polymer nanocomposite, tripping temperature.

## REFERENCES

- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
- Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. USA, Mineola, New York. Dover Publications, Inc. 2002. 464 p.
- Gretzke W. Use of PolySwitch PPTC protection in automotive applications. In book: *42 V-PowerNets*. Eds. by H. Wallentowitz, C. Amsel. Germany, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, pp. 75–87. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9_4)
- Gavrikov V. [Resettable PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11–15. (Rus)
- Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element*. Pat. USA, no. 7660096, 2010.
- Du Y., Kim H., Jiang T. *Solid state resettable fuses*. Pat. USA, no. 9998117, 2018.
- Anthony A. A. *Polymer fuse and filter apparatus*. Pat. USA, no. 6282074, 2001.
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Mazurik S. V., Makarov V. O. [Device for protection of photovoltaic modules against overload current]. Pat. UA, no. 134899, 2019, bull 11. (Ukr)
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Mazurik S. V. Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 1, pp. 43–49. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43> (Rus)
- Cheon K. Y. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
- Oglesbee J. W., Burns A. G., More G. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
- Minervini A. D., Nguyen T. K. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
- Littelfuse Inc. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries*, [http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application\\_notes/littelfuse\\_protecting\\_rechargeable\\_li\\_ion\\_and\\_li\\_polymer\\_batteries\\_in\\_consumer\\_portable\\_electronics\\_application\\_note.pdf.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf) (27 February 2020)
- Dimpault-Darcy E. C., Bragg B. J. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
- Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V. Modeling of current limitations in photo-electrical systems of solar batteries using self-restoring fuses Polyswitch. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, no. 2, pp. 15–22. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-2> (Rus)
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Modeling of electrical characteristics of photovoltaic solar arrays with protection against current overloads based on PolySwitch elements. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, p. 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of varistor-posistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 79–88. <https://doi.org/10.15421/331913>
- Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions. *Proceedings of the Second World conference on photovoltaic solar energy conversion*. Austria, Vienna, 1998, pp. 2357–2359.
- Vorob'yov G. A., Pokholkov Yu. P., Korolev Yu. D., Merkulov V. I. [*Physics of dielectrics (region of strong fields): Study Guide*], Russia, Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011, 245 p. (Rus)
- Chumakov V. I. [Methods for modeling thermal damages to semiconductor devices]. *Radioelektronika i informatika*, 1999, no. 2, pp. 31–37. (Rus)
- Virchenko Yu. P., Vodyanitskii A. A. Heat localization and formation of heat breakdown structure in semiconductor materials. I. Nonlinear model. *Functional Materials*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 428–434.
- Nakashidze L. V., Knysh L. I. [Methodology for determining the composition and circuit design of solar photovoltaic equipments]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2008, no. 10(57), pp. 100–103. (Rus)
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2018, vol. 26, no 1, p. 77–82. <https://doi.org/10.15421/331813>
- FRX Series - Radial Leaded PTC*. [http://www.fuzetec.com/products\\_2.php?bgid=1&gid=31](http://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31) (27 February 2020)
- [*The thermal conductivity of the thermal pastes, comparison of the thermal pastes for thermal conductivity and viscosity*]. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkost> (27 February 2020) (Rus)
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Changes in the characteristics of silicon photovoltaic cells of solar arrays after current overloads. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3–4, pp. 19–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19> (Rus)
- d'Alessandro V., Guerriero P., Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>
- Daliento S., Di Napoli F., Guerriero P., d'Alessandro V. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*. 2016, vol. 134, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.001>
- Rauschenbakh G. [Handbook on the design of solar batteries] Moscow, Energoatizdat, 1983, 357 p. (Rus)

**Описание статьи для цитирования:**

Иванченко А. В., Тонкошкур А. С. Электрические свойства фотогальванического элемента со встроенным позисторным слоем на основе полимерного нанокompозита с углеродным наполнителем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 30–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.30>

**Cite the article as:**

Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Electrical properties of photogalvanic element with built-in posistor layer based on polymer nanocomposite with carbon filler. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 30–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.30>