

Д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. О. В. ІВАНЧЕНКО

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ШАРУ НА ОСНОВІ МАТЕРІАЛІВ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ «МЕТАЛ — НАПІВПРОВІДНИК» ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Шляхом моделювання досліджено кінетичні залежності розподілів температури, струму і напруги фотоелектричного елемента з додатковим шаром на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник», які знаходяться в тепловому контакті. Показано, що основою застосування таких терморезисторних шарів для реалізації захисту сонячних фотоелементів від електричного перегріву є істотне перевищення їхнього опору в «холодному» стані відносно опору освітленого прямозміщеного сонячного елемента, а також опір зазначених шарів, який у «нагрітому» стані має бути значно меншим за опір зворотноміщеного фотоелемента та джерела живлення.

Ключові слова: сонячний елемент, терморезистор, фазовий перехід, перенапруга, локальний перегрів.

Проблема локальних перегрівів і появи так званих гарячих плям у сонячних батареях (СБ), яка була виявлена на ранніх етапах їх використання, до теперішнього часу є однією з найактуальніших. Наявність дефектних сонячних елементів у електричному колі СБ призводить до значного зниження функціональних можливостей всієї системи енергогенерування аж до її повного виходу з ладу.

Основний метод, який використовується для запобігання виникненню гарячих плям, — встановлення пасивного байпасного (обвідного) діода паралельно ланцюгу фотоелектричних сонячних елементів (СЕ) [1—3]. Проте дослідження систем з байпасними діодами показали, що гарячі плями все ж виникають, і це призводить до прискореного погіршення характеристик СБ. Методами моделювання та експериментальними дослідженнями показано, що часткове затемнення ланцюга СЕ з обвідним діодом може призвести до розсіювання значної кількості тепла і формування гарячих плям [4, 5].

Розробці нових методів і засобів запобігання електричним перевантаженням, що призводять до появи локальних перегрівів й інших відмов у СБ, приділяється значна увага. Тут слід відзначити рішення такої задачі шляхом використання СЕ з низькою напругою зворотного пробою [6]; включення до СБ додаткових елементів — активних обвідних транзисторних перемикачів [6, 7]; методи і технічні засоби, що основані на виявленні гарячих плям за допомогою автоматизованих систем відстеження точки максимальної потужності МРРТ (*maximum power point tracking*) в поєднанні з активним захистом способом розімкнутого контуру [8]. Але всі ці схемотехнічні підходи не є достатньо ефективними за технічними та економічними показниками [3, 4, 6—8].

Останнім часом одним з нових перспективних напрямів вирішення проблеми захисту компонентів фотоелектричних систем від електричних перевантажень вважається застосування елементів сучасної твердотільної електроніки, зокрема виробів на основі варисторної кераміки і позисторних наноконструкцій [9—11]. Прийнятий в дослідженнях підхід базується на використанні недорогих самовідновлювальних запобіжників PolySwitch, виготовлених з композитних матеріалів типу нановуглецевий наповнювач у полімерній матриці. Пропонується використовувати базову функціональну властивість самовідновлювального запобіжника — стрибкоподібне збільшення опору на кілька порядків при досягненні критичної температури та повернення в початковий високопровідний стан при зниженні температури. Проведені останнім часом дослідження дозволили обґрунтувати загальні схеми використання самовідновлювальних запобіжників для обмеження струму в паралельних з'єднаннях фотоелектричних елементів і шаруватих структур типу «варистор — самовідновлювальний запобіжник», що знаходяться в тепловому контакті, для обмеження напруги у фотоелектричних модулях з байпасними діодами.

Слід зазначити, що розглянуті засоби реалізують захист за способом розімкнутого контуру, при цьому вхідними параметрами є електричні величини (сила струму або перенапруга). Проте видається актуальною розробка елементів захисту, що реагують безпосередньо на підвищення температури. Одним з можливих рішень такого завдання представляється використання терморезисторів на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» (ФПМН) [12]. Ці твердотільні елементи мають стрибкоподібну зростаючу залежність

електричної провідності від температури [13—16]. Вони широко застосовуються при реалізації пристроїв автоматики, контролю, перемикачів і обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних і оптичних сигналів [13, 17—20]. Однак відомості про їх використання в сонячних батареях у літературі не зустрічаються. Для просування ж в цьому напрямку необхідно проводити аналіз, обґрунтування можливостей і перспектив використання терморезисторів на основі матеріалів з ФПМН для запобігання перегрівів у ланцюгах фотоелектричних систем сонячних батарей.

В представленій роботі наводяться результати моделювання та аналіз електричних характеристик фотоелектричного елемента з додатковим шаром з критичного терморезистора на основі діоксиду ванадію, що знаходяться в тепловому контакті, в умовах електричного перегріву.

Фізичні основи

Конструкцію та еквівалентну електричну схему досліджуваного об'єкта, що являє собою двошарову структуру із монокристалічного кремнієвого фотоелектричного елемента і шару матеріалу з ФПМН (діоксиду ванадію), представлено на **рис. 1, 2**.

За відносно низьких температур (до температури фазового переходу $T_{tr} = 340$ К) терморезисторний шар на основі діоксиду ванадію має електричний опір R_{IT} , величина якого близька до опору діелектриків і розраховується, як $R_{IT} = d_2/S/\sigma_p$, де S , d_2 — площа і товщина терморезисторного шару; σ_p — електрична провідність терморезистора в низькопровідному стані. У вузькому температурному діапазоні поблизу T_{tr} такий терморезисторний шар переходить у стан з високою провідністю, а його електричний опір R_c стрибкоподібно зменшується до значень, близьких до опору металів.

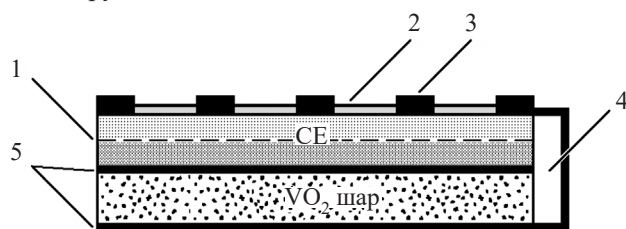


Рис. 1. Досліджувана структура:

1 — p-n-перехід фотоелектричного елемента; 2, 3 — просвітлювальне покриття та металева сітка (електрод) фотоелектричного елемента; 4 — шар ізолятора; 5 — електропровідні шари

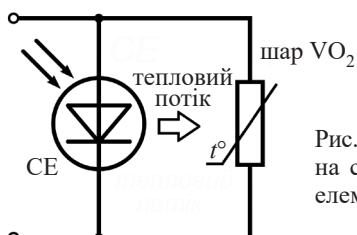


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема фотоелектричного елемента із захистом від перенапруги

Температурну залежність електричної провідності $\sigma(T)$ такого терморезисторного матеріалу можна апроксимувати рівнянням, аналогічним відомому у фізиці сегнетоелектриків і феромагнетиків закону Кюри — Вейса [21]:

$$\sigma(T) = \begin{cases} \frac{\sigma_l (T_{tr} - 273)}{T_{tr} - T}, & \text{якщо } T < T_{tr}; \\ \sigma_h, & \text{якщо } T \geq T_{tr}, \end{cases} \quad (1)$$

де σ_h — вибрана константа, яка визначається значеннями $\sigma(T)$ в діапазоні температур, що відповідає стану високої провідності.

Слід зазначити, що ці параметри і величина стрибка електропровідності істотно залежать від технології отримання та структурних добавок [22—26].

Таким чином, якщо температура фотоелектричного елемента нижче T_{tr} , що відповідає умовам режиму фотогенерації в сонячних модулях, то електричний опір паралельно включеного йому терморезисторного шару R_{IT} має бути значно вищим за опір освітленого прямозміщеного фотоелектричного елемента r_s і не впливати на його роботу, тобто

$$R_{IT} \gg r_s. \quad (2)$$

Якщо на фотоелектричний елемент подається зворотна напруга, яка відповідає стану його загінення (або несправності), то він має порівняно великий опір r_{sh} і нагрівається струмом інших освітлених фотоелектричних елементів сонячного модуля, який протікає через нього [7, 27].

Тепло, що розсіюється пластиною СЕ, нагріває шар терморезистора, який знаходиться в тепловому контакті й електрично паралельно з'єднаний з ним, і викликає різке зменшення його опору до R_{hT} ($R_{hT} = d_2/S/\sigma_h$), яке «закорочує» зворотнозмщений СЕ. При виконанні умов

$$\begin{cases} R_{hT} \ll (n-1)r_s; \\ R_{hT} \ll r_{sh}, \end{cases} \quad (3)$$

відбувається перерозподіл вхідної перенапруги між СЕ всього модуля, що в результаті забезпечує необхідне зниження падіння напруги на фотоелектричному шарі.

Основні рівняння

Математична модель, що дозволяє проаналізувати вплив обмеження зворотної напруги на фотоелектричний елемент і визначити найбільш ефективні режими такого захисту електричних кіл, оснований на рівняннях теплового балансу з урахуванням теплового контакту між шарами структури (рис. 1, 2).

Кінетика процесу виникнення локального перегріву включає поширення високої температури в поздовжніх напрямках розглянутої шаруватої структури до моменту спрацювання її терморезисторного

шару (площею S), що спричиняє коротке замикання пластини фотоелемента. У першому наближенні для опису цього процесу представляється обґрунтованим розглядати область локального перегріву як систему з зосередженими параметрами.

Систему рівнянь і початкових умов можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} c_1 \rho_1 d_1 S \frac{dT_1}{dt} = P_1 - \frac{T_1 - T_0}{RT_{dis}} - \frac{T_1 - T_2}{RT_{con}}; \\ c_2 \rho_2 d_2 S \frac{dT_2}{dt} = P_2 - \frac{T_2 - T_0}{RT_{dis}} + \frac{T_1 - T_2}{RT_{con}}; \end{cases} \quad (4)$$

$$T_1(0) = T_2(0) = T_0,$$

де c_i — питома теплоємність фотоелектричних (індекс $i = 1$) і терморезисторних (індекс $i = 2$) елементів ($c_1 = 0,7$ Вт·с/г·К, $c_2 = 0,465$ Вт·с/г·К [28—30]);

ρ_i — густина ($\rho_1 = 2,328$ г/см³, $\rho_2 = 4,571$ г/см³ [28—30]);

d_i — товщина ($d_1 = 0,02$ см, $d_2 = 0,1$ см);

S — площа ($S_1 = S_2 = S$);

T_i — температура;

P_i — електрична потужність елементів, що перетворюється в теплову;

T_0 — температура навколишнього середовища (прийнято $T_0 = 300$ К);

RT_{dis} — тепловий опір розсіювання в навколишнє середовище (прийнятий однаковим для обох шарів конструкції);

RT_{con} — тепловий опір теплопередачі контакту між шарами конструкції.

Електрична потужність елементів розраховується згідно з виразами

$$P_1 = \frac{U}{R_S + \frac{R_1(T_1) \cdot R_2(T_2)}{R_1(T_1) + R_2(T_2)}} \cdot R_1(T_1);$$

$$P_2 = \frac{U}{R_S + \frac{R_1(T_1) \cdot R_2(T_2)}{R_1(T_1) + R_2(T_2)}} \cdot R_2(T_2),$$

де R_1, R_2 — електричний опір фотоелектричних і терморезисторних елементів відповідно;

U, R_S — напруга та внутрішній опір джерела живлення, $U \approx E = (n-1) \cdot u_F$, $R_S = (n-1) \cdot r_s$;

u_F, r_s — генерована напруга і електричний опір окремого освітленого прямокутного СЕ (приймалось $u_F = 0,56$ В, $r_s \approx 0,01$ Ом);

n — число СЕ, послідовно з'єднаних з паралельно приєднаним обвідним діодом, які утворюють підмодуль сонячного фотоелектричного модуля [7].

Температурна залежність зворотного опору фотоелектричного елемента $r_{sh} = R_1$ з використанням уявлень [31, 32] може бути апроксимована рівнянням

$$R_1(T) = R_1(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{\Delta E_g}{mkT} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (5)$$

де ΔE_g — заборонена зона напівпровідникового матеріалу фотоелектричного елемента (для кремнію $\Delta E_g = 1,11$ еВ);

k — постійна Больцмана;

m — поправочний коефіцієнт для визначення енергії активації цієї температурної залежності (визначається експериментально, приймалося $m = 2$).

Температурна залежність електричного опору терморезисторного шару на основі діоксиду ванадію з урахуванням виразу (1) описується рівнянням

$$R_2(T) = \frac{d_2}{S \cdot \sigma(T)}. \quad (6)$$

Кінетичні характеристики електричних параметрів досліджуваного фотоелектричного елемента

Кінетика обмеження температури і зворотної напруги

Кінетичні залежності розподілу температури, струму та напруги двошарової структури на основі монокристалічного кремнієвого фотоелектричного елемента і терморезисторного шару, коли елек-

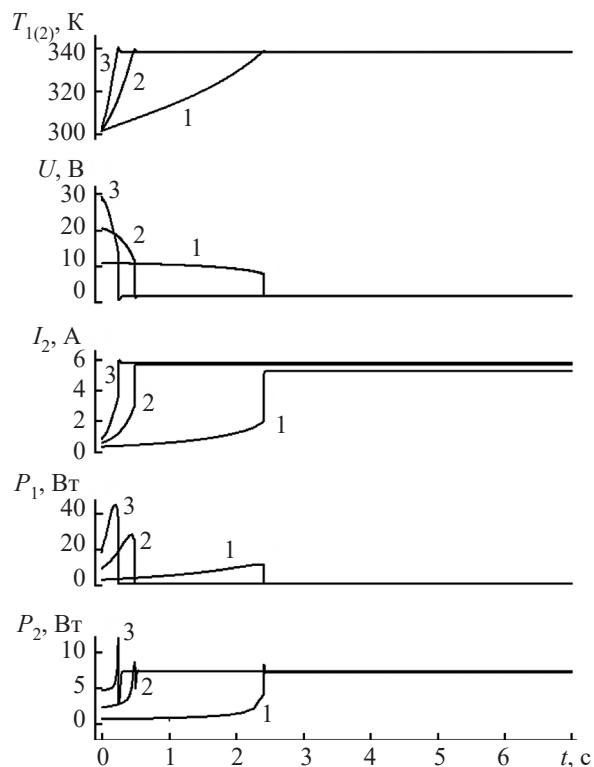


Рис. 3. Кінетичні залежності температури, падіння напруги, струму та потужності розсіювання області локального перегріву затіненого зворотнорозміщеного СЕ (індекс 1) і терморезисторного шару (індекс 2) структури при прикладенні постійної напруги, яка створюється послідовним з'єднанням 20 (1), 40 (2) та 60 (3) освітлених СЕ

тронний $p-n$ -перехід СЕ зміщено у зворотному напрямку, показано на **рис. 3**. Для чисельних експериментів приймалися типові величини $RT_{dis} = 10$ К/Вт, $RT_{con} = 0,1$ К/Вт і наведені вище значення фізичних параметрів матеріалів компонентів досліджуваної структури. За температури $T_0 = 300$ К опори $r_{sh} \approx R_1$ та R_2 дорівнюють, відповідно, 50 та 1,8 кОм, а при $T > T_{tr} = 340$ К їх значення, згідно з виразами (1) і (5), складають 5,0 та 0,13 Ом.

Як видно з рис. 3, кінетичні залежності температури $T_{1,2}(t)$ і струму $I(t)$ досліджуваної структури різко зростають на початкових ділянках, що корелює з спостереженнями для зворотнозміщених СЕ в передпробійному режимі [33]. Цьому відповідає зростання потужності розсіювання як для СЕ $P_1(t)$, так і для терморезисторного шару $P_2(t)$. Збільшення температури призводить до зниження падіння напруги U на структурі через зменшення її електричного опору і перерозподілу загальної напруги, що відповідає схемі на рис. 2. У результаті досягається стабільний стан з постійними параметрами — температурою структури, близькою до температури ФПМН терморезисторного шару, значеннями струму й потужності розсіювання терморезисторного шару. При цьому падіння напруги й потужність розсіювання на СЕ будуть незначними. Таким чином буде реалізовано тепловий і електричний захист СЕ.

Зі збільшенням діючої напруги U , тобто зі зростанням у ланцюзі кількості СЕ n , зменшується час спрацьовування розглянутого захисту та збільшується пік потужності через те, що величина електричної енергії, необхідної для нагрівання структури до критичної температури, залишається однією і тією ж.

Вплив параметрів терморезисторного шару

Як впливає з фізичних основ розглянутого способу захисту від електротеплових перевантажень СЕ, основними параметрами, що підбираються, є тепловий опір розсіювання до навколишнього середовища RT_{dis} і електричний опір шару терморезистора, зокрема низькотемпературне його значення R_{IT} . При цьому слід взяти до уваги, що стрибкоподібну зміну величини опору при фазовому переході, яка визначається конкретною технологією виготовлення, можна вважати фіксованою.

Як впливає величина параметра R_{IT} на кінетику процесу обмеження зворотної напруги для структури СЕ з терморезисторним шаром можна побачити з **рис. 4, а**.

Зменшення значень низькотемпературного опору терморезисторного шару R_{IT} призводить до зменшення часу спрацьовування розглянутого пристрою (криві 1, 2). Проте ця тенденція спостерігається до значень R_{IT} відповідних стану «холодного» опору зворотнозміщеного СЕ r_{sh} ($r_{sh} = R_1(T_0)$). При $R_{IT} \ll r_{sh}$ кількості розсіюваної потужності недостатньо для виникнення істотного перегріву СЕ (криві 3, 4).

Важливим, регульованим в певних межах, параметром є тепловий опір розсіювання зовнішніх поверхонь структури до навколишнього середовища RT_{dis} . Як видно з рис. 4, б, величина цього опору також істотно впливає на час спрацьовування захисного терморезисторного шару. Збільшення RT_{dis} до певних меж призводить до зростання швидкодії захисту. Криві 4 свідчать, що при дуже інтенсивному тепловідведенні (невеликих RT_{dis}) потужності розсіюван-

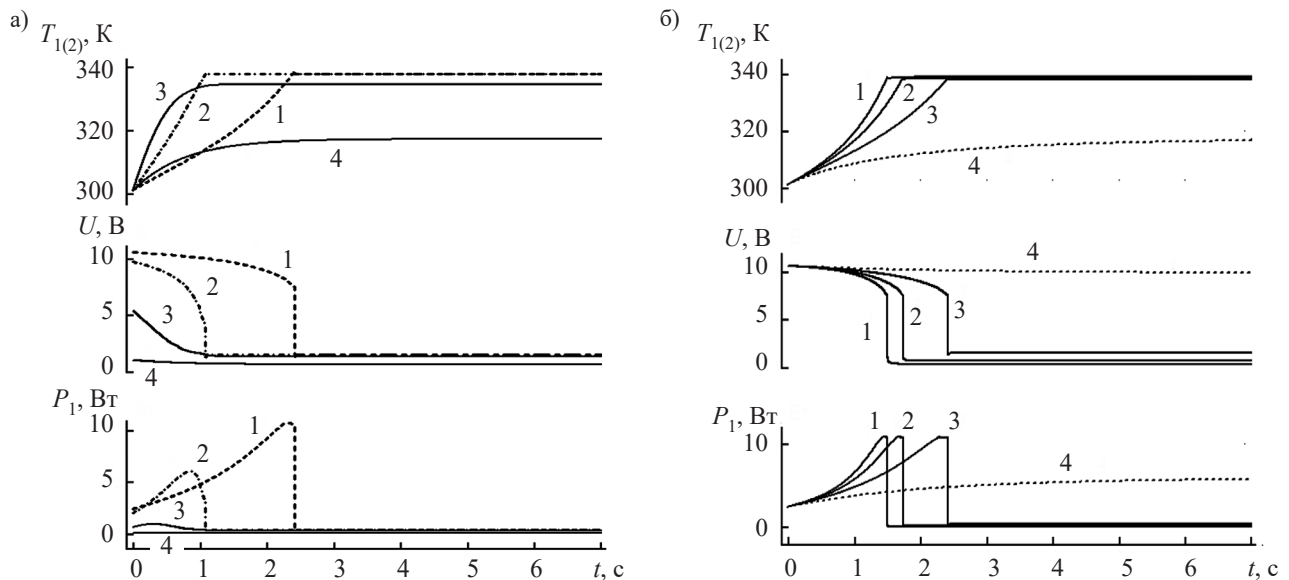


Рис. 4. Кінетичні залежності температури, падіння напруги та потужності розсіювання для області локального перегріву затіненого зворотнозміщеного СЕ (індекс 1) і терморезисторного шару (індекс 2) досліджуваної структури при прикладенні постійної напруги, яка створюється послідовним з'єднанням 20 освітлених СЕ, за різних значень R_{IT} (а) та RT_{dis} (б):

а) R_{IT} , Ом: 1 — 1860; 2 — 186; 3 — 18,6; 4 — 1,86 ($R_{IT} \gg r_s$, $RT_{dis} = 10$ К/Вт, $R_1(T_0) = 50$ Ом)

б) RT_{dis} , К/Вт: 1 — 50; 2 — 20; 3 — 10; 4 — 5

ня недостатньо для нагрівання СЕ до температури ФПМН в терморезисторному шарі й прикладувана до СЕ напруга не змінюється.

Висновки

Результати моделювання процесу обмеження зворотної напруги, проведеного з використанням типових параметрів фотоелементів на основі монокристалічного кремнію і терморезисторних шарів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» з діоксиду ванадію, що знаходяться в тепловому контакті, дозволили встановити такі закономірності.

Базовими умовами застосування матеріалів з ФПМН для захисту сонячних елементів від електричних перегрівів є істотне перевищення опору терморезисторного шару в «холодному» стані (при $T < T_{tr}$) опору освітленого прямозміщеного фотоелектричного елемента, і незначна його величина у «нагрітому» (при $T \geq T_{tr}$) в порівнянні з опорами зворотозміщеного СЕ та джерела живлення, створюваного освітленими СЕ модуля.

Струм і температура на зворотозміщеному фотоелектричному елементі обмежуються і стабілізуються, а падіння напруги різко зменшується з моменту, коли температура терморезисторного шару досягає значень, близьких температурі його переходу в низькопровідний стан.

Зі збільшенням напруги фотогенерації зменшується час спрацьовування аналізованої схеми захисту від перенапруги і збільшується максимальний струм через досліджувану структуру.

Для розглянутих структур з терморезисторними шарами з меншими значеннями «холодного» опору і з однаковими іншими параметрами спостерігається зменшення часу спрацьовування й амплітуди струму розігріву СЕ. При зменшенні тепловтрат СЕ з електричним захистом на основі шарів терморезистора з ФПМН на дисипацію в навколишнє середовище також має місце збільшення її швидкодії.

Наведені результати можна розглядати як обґрунтування перспективи описуваного підходу для захисту від електротеплових переважань фотоелектричних елементів у сонячних модулях. Разом з тим, однак, необхідно зазначити наступне. Максимальна температура експлуатації найпоширеніших кремнієвих фотоелектричних елементів лежить в межах 60—85°C [34, 35]. Якщо терморезисторний шар виконати з чистого діоксиду ванадію (температура ФПМН 68°C), може виникнути ситуація спрацьовування захисту освітленого СЕ при його розігріві сонячним випромінюванням. У зв'язку з цим для фотоелектричних сонячних елементів, максимальна температура експлуатації яких перевищує 68°C, важливим є підбір і створення терморезисторних матеріалів з більш високою температурою фазового переходу.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Köntges M., Kurtz S., Packard C. et al. *Review of failures of photovoltaic modules*. IEA PVPS Task 13, 2014, 132 p.
2. Humaid V., Kumar M., Gupta R. Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading. *Solar Energy*, 2020, vol. 208, pp. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.087>
3. Han H., Dong X., Li B. et al. Degradation analysis of crystalline silicon photovoltaic modules exposed over 30 years in hot-humid climate in China. *Solar Energy*, 2018, vol. 170, pp. 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.027>
4. Oh W., Choi H., Seo K. W. et al. Evaluation based on performance and failure of PV system in 10 years field-aged 1 MW PV power plant. *Microelectronics Reliability*, 2020, vol. 114, p. 113763. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113763>
5. Karimi M., Samet H., Ghanbari T., Moshksar E. A current based approach for hotspot detection in photovoltaic strings. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 9, p. e12517. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12517>
6. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, no. 5, pp. 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
7. 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>
8. Sanchez Pacheco F. J. *Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization*. Doctoral thesis, Universidad de Málaga, Málaga, España, 2015.
9. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of varistor-positron 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>
10. 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*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 425–438. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
11. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Application of a polymer nanocomposite with carbon filler to limit overvoltages in a photovoltaic element. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2020, vol. 10, no. 5, p. 2050020. <https://doi.org/10.1142/S2010135X20500204>
12. Тонкошкур О. Перспективи застосування обмежувачів потужності на основі матеріалів з фазовим переходом метал-напівпровідник у фотоелектричних системах сонячних електростанцій. *Матеріали ІХ МНПК «Інформаційно-аналітичне забезпечення прийняття управлінських рішень щодо енергетичних та соціально-економічних проблем України»*, Україна, Дніпро, 2021, с. 102–104. <https://doi.org/10.46489/iazpur-08>
13. Nordquist C. D., Leonhardt D., Custer J. O. et al. Power handling of vanadium dioxide metal-insulator transition RF limiters. *Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*. USA, MI, Ann Arbor, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457150>
14. Андреев В. Н., Климов В. А. Фазовый переход металл-диэлектрик в тонких пленках диоксида ванадия, легированного железом. *Физика твердого тела*, 2018, т. 60, № 12, pp. 2425–2428. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.12.46734.142>
15. Zhong X., LeClair P., Sarker S. K., Gupta A. Metal-insulator transition in epitaxial VO₂ thin films on TiO₂ (100). *Physical Review B*, 2012, vol. 86, no. 9, p. 094114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.094114>

16. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Velichko, A. A. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review. *Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 24–43. <http://dx.doi.org/10.15393/j8.art.2013.3002>
17. Pan K., Wang W., Shin E. et al. Vanadium oxide thin-film variable resistor-based RF switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 9, pp. 2959–2965. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2451993>
18. Soltani M., Kaye A. B. Properties and applications of thermochromic vanadium dioxide smart coatings. In book: *Intelligent Coatings for Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 461–490. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411467-8.00013-1>
19. Li L., Wang W., Shin E. et al. Design of tunable shunt and series interdigital capacitors based on vanadium dioxide thin film. *Proceedings of 2017 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. USA, OH, Dayton, 2017, pp. 279–283. <https://doi.org/10.1109/NAECON.2017.8268785>
20. Givernaud J., Crunteanu A., Orlianges J. C. et al. Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, vol. 58, no. 9, pp. 2352–2361. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2057172>
21. 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>
22. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. *Фазовый переход металл-полупроводник и его применение*. Ленинград, Наука, 1979, 183 с.
23. Shao Z., Cao X., Luo H., Jin P. Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials. *NPG Asia Materials*, 2018, vol. 10, no. 7, pp. 581–605. <https://doi.org/10.1038/s41427-018-0061-2>
24. Тутов Е. А., Крюков П. И., Зломанов В. П. Особенности проводимости поликристаллического диоксида ванадия на переменном токе. *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2014, т. 16, № 2, с. 220–224.
25. Березина О. Я., Аргюхин Д. В., Величко А. А. и др. Фазовый переход металл-полупроводник в легированных и легированных пленках диоксида ванадия. *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2009, т. 11, № 3, с. 194–197.
26. Ивон А. И., Колбунов В. Р., Черненко И. М. Керамика из диоксида ванадия. *Неорганические материалы*, 1996, т. 32, № 5, с. 624–626.
27. Тонкошкур О. С., Накашидзе Л. В. Проблемы надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей. *Відновлювана енергетика*, 2018, no. 3, pp. 21–30.
28. Tilli M., Haapalinn A. Properties of Silicon. In book: *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. Eds. by Tilli M. et al., Elsevier, 2020, pp. 3–18.
29. Lechner M. D. Polymers. In book: *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Eds. by Martienssen W., Warlimont H., Springer, Berlin, 2005, pp. 477–522.
30. Черняев В. С., Щетников Е. Н., Швейкин Г. П., Гельд П. В. Теплоемкость кубической монооксида и оксикарида ванадия. *Известия АН СССР, Неорганические материалы*, 1968, т. 4, № 12, с. 2117–2123.
31. Chirvase D., Chiguvare Z., Knipper M. et al. Temperature dependent characteristics of poly (3 hexylthiophene)-fullerene based heterojunction organic solar cells. *Journal of applied physics*, 2003, vol. 93, no. 6, pp. 3376–3383. <https://doi.org/10.1063/1.1545162>
32. Musembi R. J., Rusu M., Mwabora J. M. et al. Intensity and temperature dependent characterization of eta solar cell. *Physica Status Solidi (A)*, 2008, vol. 205, no. 7, pp. 1713–1718. <https://doi.org/10.1002/pssa.200723466>
33. Иванченко А. В., Тонкошкур А. С. 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>
34. Гудкова А. В., Губин С. В., Белоконов В. И. Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2012, № 57, с. 187–196.
35. Шкляр В. И., Дубровская В. В., Карпенко Д. С. Использование энергии Солнца фотоэлектрическими системами. *Відновлювана енергетика*, 2014, № 3, с. 39–48.

Дата надходження рукопису
до редакції 05.07 2021 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2021.3-4.57
UDC 621.31

A. S. TONKOSHKUR, A. V. IVANCHENKO

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

USING A LAYER BASED ON MATERIALS WITH A METAL TO SEMICONDUCTOR PHASE TRANSITION FOR ELECTROTHERMAL PROTECTION OF SOLAR CELLS

One of the main problems in ensuring the reliability of solar electrical power sources is local overheating, when hot spots form in photovoltaic cells of solar arrays. It is currently considered that these negative phenomena are caused, among other things, by overvoltage in the electrical circuits of solar arrays. This leads to the appearance of defective elements and a significant decrease in the functionality of the entire power generation system up to its complete failure.

This study considers the possible ways to increase the reliability of solar arrays by using thermistor thermocontacting layers for preventing overvoltage events and overheating.

The authors use simulation to study electrical characteristics of a photovoltaic cell in thermal contact with an additional layer based on thermistor materials with a metal to semiconductor phase transition. Vanadium dioxide with a phase transition temperature of ~340 K is considered to be a promising material for this purpose. During the phase transition, electrical resistance sharply decreases from the values characteristic of dielectrics to the values associated with metal conductors.

It is shown that such thermistor layers can be used for protecting solar cells from electrical overheating under the following basic conditions:

- the layer's resistance in the «cold» state significantly exceeds that of the lightened forward-biased solar cell;
- the layer's resistance in the «heated» state is sufficiently low compared to those of the reverse-biased photovoltaic cell and of the power source.

The current and temperature of the reverse-biased photovoltaic cell are limited and stabilized, and the voltage drop sharply decreases from the moment when the temperature of the thermistor layer reaches the values close to the temperature of its transition to the low-conductivity state.

The obtained results substantiate the potential of the described approach to protect photovoltaic cells of solar modules against electric thermal overloads.

Keywords: solar cell, thermistor, phase transition, overvoltage, local overheating.

REFERENCES

1. Köntges M., Kurtz S., Packard C. et al. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. IEA PVPS Task 13, 2014, 132 p.
2. Humaid V., Kumar M., Gupta R. Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading. *Solar Energy*, 2020, vol. 208, pp. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.087>
3. Han H., Dong X., Li B. et al. Degradation analysis of crystalline silicon photovoltaic modules exposed over 30 years in hot-humid climate in China. *Solar Energy*, 2018, vol. 170, pp. 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.027>
4. Oh W., Choi H., Seo K. W. et al. Evaluation based on performance and failure of PV system in 10 years field-aged 1 MW PV power plant. *Microelectronics Reliability*, 2020, vol. 114, p. 113763. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113763>
5. Karimi M., Samet H., Ghanbari T., Moshksar E. A current based approach for hotspot detection in photovoltaic strings. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 9, p. e12517. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12517>
6. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, no. 5, pp. 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
7. Daliotto 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>
8. Sanchez Pacheco F. J. *Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization*. Doctoral thesis, Universidad de Málaga, Málaga, España, 2015.
9. 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>
10. 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*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 425–438. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
11. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Application of a polymer nanocomposite with carbon filler to limit overvoltages in a photovoltaic element. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2020, vol. 10, no. 5, p. 2050020. <https://doi.org/10.1142/S2010135X20500204>
12. Tonkoshkur A. [Prospects for the use of power limiters based on materials with a metal-semiconductor phase transition in photovoltaic systems of solar power plants]. *Materials of the IX International Scientific and Practical Conference "Information and Analytical Support for Making Management Decisions on Energy and Socio-Economic Problems of Ukraine"*, Ukraine, Dnipro, 2021, pp. 102–104. <https://doi.org/10.46489/iazpur-08> (Ukr)
13. Nordquist C. D., Leonhardt D., Custer J. O. et al. Power handling of vanadium dioxide metal-insulator transition RF limiters. *Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*. USA, MI, Ann Arbor, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457150>
14. Andreev V.N., Klimov V.A. Metal–insulator phase transition in iron-doped vanadium dioxide thin films. *Physics of the Solid State*, 2018, vol. 60, no. 12, pp. 2604–2607. <https://doi.org/10.1134/S1063783418120028>
15. Zhong X., LeClair P., Sarker S. K., Gupta A. Metal-insulator transition in epitaxial VO₂ thin films on TiO₂ (100). *Physical Review B*, 2012, vol. 86, no. 9, p. 094114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.094114>
16. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Velichko, A. A. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review. *Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 24–43. <http://dx.doi.org/10.15393/j8.art.2013.3002>
17. Pan K., Wang W., Shin E. et al. Vanadium oxide thin-film variable resistor-based RF switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 9, pp. 2959–2965. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2451993>
18. Soltani M., Kaye A. B. Properties and applications of thermochromic vanadium dioxide smart coatings. In book: *Intelligent Coatings for Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 461–490. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411467-8.00013-1>
19. Li L., Wang W., Shin E. et al. Design of tunable shunt and series interdigital capacitors based on vanadium dioxide thin film. *Proceedings of 2017 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. USA, OH, Dayton, 2017, pp. 279–283. <https://doi.org/10.1109/NAECON.2017.8268785>
20. Givernaud J., Crunteanu A., Orlianges J. C. et al. Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, vol. 58, no. 9, pp. 2352–2361. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2057172>
21. 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>
22. Bugaev A. A., Zakharchenia B. P., Chudnovskii, F. A. *The Metal-Semiconductor Phase Transition and its Application*. Leningrad, Nauka, 1979, 183 p. (Rus)

23. Shao Z., Cao X., Luo H., Jin P. Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials. *NPG Asia Materials*, 2018, vol. 10, no. 7, pp. 581–605. <https://doi.org/10.1038/s41427-018-0061-2>
24. Tutov E. A., Kryukov P. I., Zlomanov V. P. Features of conductivity of polycrystalline vanadium dioxide on alternating current. *Condensed Matter and Interphases*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 220–224. (Rus)
25. Berezina O. Y., Artyukhin D. V., Velichko A. A et al. Metal-semiconductor phase transition in undoper and doped vanadium dioxide films. *Condensed Matter and Interphases*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 194–197. (Rus)
26. Ivon A. I., Kolbunov V. R., Chernenko I. M. Vanadium dioxide ceramics. *Inorganic Materials*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 555–557.
27. Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V. [Problems of reliability of photoelectric components of solar batteries]. *Vidnovluvana Energetika*, 2018, no. 3, pp. 21–30. (Ukr)
28. Tilli M., Haapalinna A. Properties of Silicon. In book: *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. Eds. by Tilli M. et al., Elsevier, 2020, pp. 3–18.
29. Lechner M. D. Polymers. In book: *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Eds. by Martienssen W., Warlimont H., Springer, Berlin, 2005, pp. 477–522.
30. Chernyaev V.S., Shchetnikov E.N., Shveikin G.P., Gel'd P.V. [Heat capacity of cubic monoxide and vanadium oxycarbide] *Izvestiya AN SSSR, Neorganicheskiye Materialy*, 1968, vol. 4, no. 12, pp. 2117–2123. (Rus)
31. Chirvase D., Chiguvare Z., Knipper M. et al. Temperature dependent characteristics of poly (3 hexylthiophene)-fullerene based heterojunction organic solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, no. 6, pp. 3376–3383. <https://doi.org/10.1063/1.1545162>
32. Musembi R. J., Rusu M., Mwabora J. M. et al. Intensity and temperature dependent characterization of eta solar cell. *Physica Status Solidi (A)*, 2008, vol. 205, no. 7, pp. 1713–1718. <https://doi.org/10.1002/pssa.200723466>
33. 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. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19>
34. Gudkova A. V., Gubin S. V., Belokon' V. I. [Thermal stabilization of solar cells for current-voltage characteristics measurement with the pulsed light source]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2012, no. 57, pp. 187–196. (Rus)
35. Shklyar V. I., Dubrovskaya V. V., Karpenko D. S. [Using of Solar Energy by Photovoltaic Systems]. *Vidnovluvana Energetika*, 2014, no. 3, pp. 39–48. (Rus)

Опис статті для цитування:

Тонкошкур О. С., Іванченко О. В. Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 3–4, с. 57–64. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>

Cite the article as:

Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Using a layer based on materials with a metal to semiconductor phase transition for electrothermal protection of solar cells. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 57–64. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Бондаренко Олександр Федорович, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Глушеченко Едуард Миколайович, канд. техн. наук, начальник відділу, НПП «Сатурн», м. Київ

Должиков Володимир Васильович, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедри, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

Добровольський Юрій Георгійович, докт. техн. наук, доцент, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці

Колісник Костянтин Васильович, канд. техн. наук, доцент, НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Плаксін Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділу, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, м. Дніпро

Садченко Андрій Валерійович, канд. техн. наук, доцент, Державний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Ткачук Андрій Іванович, канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський державний педагогічний університет ім. В. Винниченка, м. Кропивницький