

УДК 621:53.096

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156565

Розробка способу відновлення ефективності плівкових СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au після деградації

Н. В. Дейнеко, П. А. Ковальов, О. М. Семків, І. М. Хмиров, Р. І. Шевченко

Проведено дослідження впливу прямої полярності на вихідні параметри сонячних елементів (СЕ) ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au. Експериментально зафіксовано вплив електричного поля прямої полярності на вихідні параметри і світлові діодні характеристики СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au, у яких відбулася деградація ККД. При витримці затемненого СЕ не менше 120 хвилин в електричному полі, наведеному зовнішньою постійною напругою величиною (0,5–0,9) В, спостерігається зростання ККД. Полярність електричного поля повинна відповідати прямому зміщенню n - r гетеропереходу. Зростання ККД спостерігається лише у тому випадку, якщо при деградації приладової структури не встигли сформуватися дефекти, які за вказаний час витримки призводять до самовідновлюючих електричних мікропробіоїв, що чередуються.

Встановлено що зростання ККД відбувається за рахунок збільшення густин фотоструму, зменшення послідовного та збільшення шунтувального опорів СЕ. Покращення діодних характеристик відбувається завдяки кільком фізичним процесам. При подачі на СЕ напруги прямого зміщення, всередині діодної структури СЕ створюється електричне поле, яке підсилює вбудоване електричне поле тильного p - r + гетероперехода і пригнічує вбудоване електричне поле фронтального n^+ - r гетероперехода. Це відбувається внаслідок того, що діоди включені на зустріч один одному. Величина напруги прямого зміщення не повинна перевищувати висоту потенційного бар'єру гетеропереходу. У цьому випадку на тильному p - r^+ гетеропереході та у прилеглих до нього з обох сторін областях будуть інтенсифіковані процеси пов'язані з транспортом атомів міді. Крім того спостерігається перебудова комплексів точкових дефектів, що містять мідь, та фазові перетвореннями $Cu_{1,4}Te$ в $Cu_{2-x}Te$.

Також під впливом поля, індукованого прямозміщуючою напругою, частки Cu_{Cd} з області збіднення шару CdS почнуть рухатись у абсорбер. Це повинно знизити опір частини шару CdS і привести до зменшення ширини області збіднення з боку абсорбера, тим самим, забезпечити зростання спектральної чутливості СЕ в короткохвильовій і середньохвильовій областях сонячного спектру. Електродифузія додаткової кількості Cu_{Cd} в абсорбер повинна посилювати вищепов'язаний і пов'язаний з цим ефект підвищення спектральної чутливості, а значить і J_{ph} приладів. На основі проведених досліджень був розроблений алгоритм відновлення ефективності СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au і відбраковування деградованих приладових структур в складі працюючого модуля що працює

Ключові слова: телурид кадмію, деградація сонячного елемента, спосіб відновлення, вихідні параметри, світлові діодні характеристики

1. Вступ

Відомо, що в процесі експлуатації сонячних елементів (СЕ) на основі CdTe спостерігається зниження ефективності. Авторами роботи [1] запропоновано два механізми деградації таких сонячних елементів. перший обумовлений генерацією дефектів в області контакту напівпровідників, викликаних надмірними носіями заряду і дефектами напівпровідникових шарів. Другий – збільшенням потенційного бар'єру на тильному омичному контакті. Відповідно до робіт [2, 3], в разі створення тунельного тильного контакту деградація СЕ обумовлена дифузійним і міжфазним взаємодіями нанорозмірного шару міді з базовим шаром [4]. Таким чином, деградація СЕ робить актуальним пошук конструктивно-технологічних рішень, спрямованих на збільшення деградаційної стійкості зазначених приладових структур.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Незважаючи на світовий розвиток геліоенергетики, ефект деградації СЕ під дією світла є характерним для будь-якого фотоперетворювача. Процеси, які визначають механізми деградації СЕ і відповідно способи відновлення ефективності, дослідженні недостатньо. Серед існуючих досліджень найбільшу увагу приділено СЕ другого покоління [5, 6]. Так, наприклад, в роботі [7] було продемонстровано спосіб відновлення СЕ другого покоління за допомогою світла інтенсивність якого менше, ніж інтенсивність початкового джерела світла. Автори робіт [8–10] досліджували специфіку деградації СЕ на основі CdTe. На даний час існує кілька гіпотез, що пропонують різні механізми деградації СЕ на основі CdTe. Одна з перших спроб пояснити механізми деградації полягала в розгляді процесів генерації дефектів під дією світла. Однак ця теорія не змогла пояснити існування стійких до деградації зразків. Найбільш популярними в даний час є теорії електроміграції, головним чином міді з металевих контактів до межі розділу CdTe – CdS. Також розглядаються процеси утворення шунтуючих дефектів. В роботі [11] показано, що можливо формування мережі шунтуючих дефектів у вигляді дендритів, а в роботі [12] акцент зроблений на прекурсорний механізм. Проте, в більшості подібних робіт автори відзначають, що вірогідність реалізації даного деградаційного механізму тим вище, чим тонше шари сонячної батареї. Однак було підтверджено існування виключно стабільних зразків, що не схильні до старіння, крім того, деякі зразки навіть демонстрували збільшення ККД з часом. В роботах [13, 14] розглянуто одну з умов отримання стабільних сонячних елементів на основі CdS/CdTe. Зазначено, що необхідною умовою створення таких СЕ є термообробка CdTe в атмосфері, що містить Cl₂. Зазвичай цю обробку проводять шляхом осадження тонкої плівки CdCl₂ поверх CdTe шляхом нагрівання на повітрі при фіксованій температурі. Однак цей етап є не вигідним в широкомасштабному виробництві. Автори роботи [15] замінили цю обробку,

використовуючи газ (HCF_2Cl), який є стабільним, інертним і нетоксичним при кімнатній температурі і виключає стадію випаровування CdCl_2 , а також процедуру подальшого хімічного травлення.

Враховуючи процеси деградації SE на основі CdTe в процесі експлуатації, необхідно проведення досліджень, направлених на розробку способу відновлення таких приладових структур.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка способу відновлення ефективності плівкових SE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au після деградації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

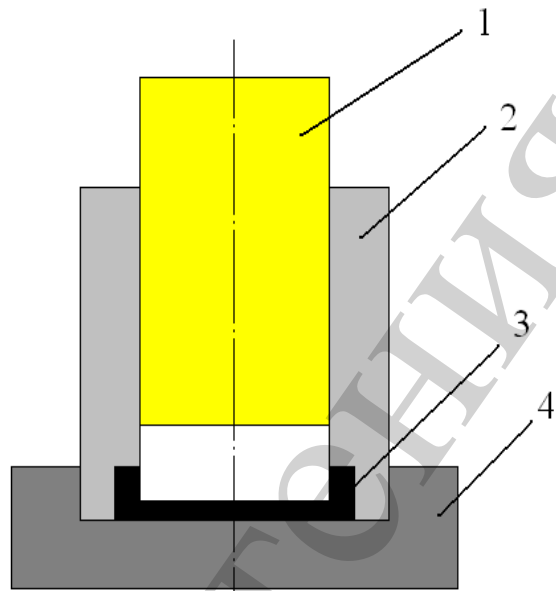
- дослідити зміни вихідних параметрів і світлових діодних характеристик після прискореної деградації SE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au;
- дослідити зміни вихідних параметрів і діодних характеристик SE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au з різними типами n-p гетеропереходів після впливу напруги прямої полярності;
- визначити умови відновлення ефективності плівкових SE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au після деградації.

4. Зразки та методи дослідження вихідних параметрів SE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Досліджувані приладові структури ITO/CdS/CdTe/Cu/Au були отримані методом термічного вакуумного випаровування. Обладнання та умови отримання досліджуваних зразків детально описані в [3]. Нанесення плівок ITO (змішаного оксиду індію-олова) здійснювалося методом нереактивного магнітронного розпилення на постійному струмі за допомогою лабораторної установки ВУП 5 з використанням оригінального матеріалосберігаючого магнітрону. Довжина розрядного проміжку, що представляє собою відстань між магнетроном і підкладкою, становила 70 мм. Споживана потужність магнетрона складала $0,2 \text{ Вт/см}^2$. Температура підкладки (T_p) становила $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Початковий тиск у вакуумній камері становив 3×10^{-5} мм рт. ст., робочий тиск аргоно-повітряної суміші в процесі розпилення – $(2,1-2,6) \times 10^{-2}$ мм рт. ст. Для пресування мішеней ITO, що містить 95 ваг. % оксиду індію та 5 ваг. % оксиду олова був виготовлений спеціальний прес (рис. 1).



a



б

Рис. 1. Оснащення для пресування мішеней ІТО:
a – механічний прес; *б* – пресувальної матриця
 (1 – поршень, 2 – циліндр, 3 – гільза, 4 – підставка)

Необхідно відзначити, що магнетронне розпилення є одним з найбільш перспективних методів отримання всіх прозорих електродів [16, 17]. Це обумовлено високим ступенем точності перенесення складу мішені на підкладку, відтворюваністю і керованістю процесу магнетронного розпилення [18, 19].

Матриця отриманих сонячних елементів представлена на рис. 2. Початкові значення ККД отриманих СЕ становили 9.4–10.4 %. Далі всі СЕ були розміщені в непрозорий пластиковий герметичний бокс з повітряним середовищем, характерним для нетехнологічних приміщень. Через 48 місяців бокс, який перебував весь цей час при температурі 15–25 °С, був розкритий і були проведені комплексні дослідження параметрів СЕ, що зберігалися в ньому. Серед СЕ на матриці, що піддавалися прискореній деградації частина СЕ була зашунтована. Серед придатних до відновлення було обрано 7 зразків СЕ для дослідження впливу напруги прямої полярності. З плавним (П) два зразка (№ 2, № 6), невстановленим (Н) три зразка (№ 8, № 12, № 16) та різким (Р) – два зразка (№ 19, № 20), р-п переходами.

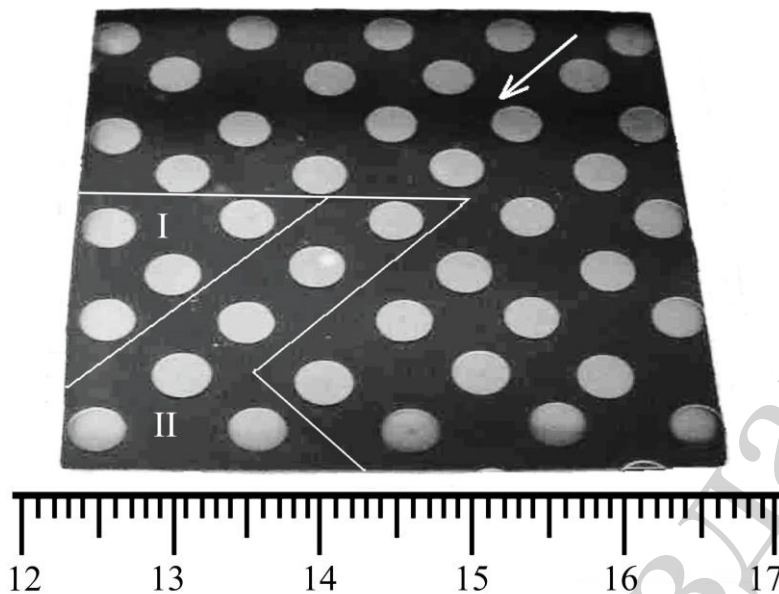


Рис. 2. Матриця досліджених СЕ (стрілкою показано напрямок градієнта товщини плівки міді, пов'язаного з розташуванням джерела міді при термічно вакуумному осадженні тильного електрода): I – ділянка, що належить СЕ з різкими p-р гетеропереходами; II – ділянка, що належить СЕ з плавними p-р гетеропереходами

Вибрані зразки були піддані дії зміщуючої напруги прямої полярності $V_d^{\max} = 675 \pm 5$ мВ з максимальною тривалістю $\tau_{ex} = 2$ години у темновому режимі при кімнатній температурі, після чого були зняті світлові ВАХ. Дослідження світлових ВАХ експериментальних зразків здійснювалось за таких умов: освітленість 1000 Вт/м^2 , сонячний спектр АМ1,5, температура навколишнього середовища $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Обладнання та методи дослідження вихідних параметрів та світлових діод них характеристик експериментальних зразків детально описанні в роботі [20]. Зазначена величина V_d^{\max} обрана, виходячи з умови $V^{\max} < V_d \approx V_{oc}^{\min}$, де V^{\max} – напруга, яка відповідає точці максимальної потужності на світловій ВАХ, а V_{oc}^{\min} – найменша напруга холостого ходу з усієї сукупності значень V_{oc} для досліджених СЕ.

Розробка методу відновлення полягає у визначенні залежності ефективності СЕ від впливу зміщуючої напруги прямої полярності на нього. Відомо, що ефективність будь-якого СЕ розраховується відповідно до формули [21]:

$$\eta = (P_{nm} / P_r) \cdot 100 \% = [P_{nm} / (P_r * S_s)] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

де P_r^* – питомий коефіцієнт поглинання на фотоприймальній поверхні СЕ; S_s – площа фотоприймальної поверхні СЕ.

Оскільки

$$P_{nm} = J_{sc} V_{oc} FF, \quad (2)$$

де J_{sc} – щільність струму короткого замикання, V_{oc} – напруга холостого ходу, FF – фактор заповнення ВАХ, то поряд із співвідношенням (1) використовується наступний вираз

$$\eta = \left[J_{sc} V_{oc} FF / (P_r * S_{sc}) \right] \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Як видно з (3) ефективність ФЕП зростає зі збільшенням кожного з трьох ключових вихідних параметрів СЕ – I_{sc} , V_{oc} і FF .

У свою чергу вираз для визначення V_{oc} має наступний вигляд:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right), \quad (4)$$

де J_{sc} – щільність струму короткого замикання, J_0 – щільність діодного струму насичення, q – заряд електрону; k – постійна Больцмана, T – температура сонячного елемента.

Як видно з (4), напруга холостого ходу залежить від J_{sc} і J_0 . Тому для високого значення V_{oc} необхідні низькі значення J_0 .

Фактор заповнення ВАХ (FF) визначається наступним співвідношенням:

$$FF = \frac{P_{nm}}{J_{sc} V_{oc}}. \quad (5)$$

За відсутності послідовного опору і провідності, що шунтує, вираз для FF може бути представлено

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1}, \quad (6)$$

де

$$v_{oc} = \frac{qV_{oc}}{AkT}. \quad (7)$$

У присутності послідовного опору (R_s) вираз для фактора заповнення світловий ВАХ (FF) перетворюється в такий спосіб

$$FF_s = FF_0 (1 - R_s / R_x), \quad (8)$$

де $R_x = V_{oc}/J_{sc}$ – характеристичний опір. Коли послідовний опір (R_s) і провідність шунта (G) істотні, вираз для фактора заповнення світлової ВАХ (FF_{s+sh}) має вигляд

$$FF_{s+sh} = FF_s \left[1 - \frac{(v_{oc} + 0.72)FF_s}{v_{oc} / (R_x G)} \right]. \quad (9)$$

Відповідно до виразу (9) абсолютно очевидно, що зростанню значенню FF_{s+sh} сприятиме зменшення R_s і G .

Таким чином для розробки методу відновлення ефективності СЕ необхідно встановити зміну вихідних параметрів та світлових діодних характеристик під впливом зміщуючої напруги прямої полярності.

5. Результати дослідження зміни вихідних параметрів і діодних характеристик СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

5.1. Дослідження зміни вихідних параметрів і світлових діодних характеристик після прискореної деградації СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

Параметри р–п гетеропереходів (ГП) досліджених СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au, які поділялися на плавний (П), невизначений (Н) та різкий (Р) залежно від величини потенційного бар'єру та ширини зони збіднення, після 48 місяців зберігання представлені в табл. 1. Вихідні параметри і світлові діодні характеристики, а також рівень деградації по ККД після прискореної деградації, представлені в табл. 2, 3.

Таблиця 1

Параметри n-p гетеропереходів плівкових СЕ після 48 місяців зберігання

СЕ	Тип ГП	Φ_{np} , eВ	$W_{np}(0)$, Мкм	W_{max}/W_{min} , мкм/мкм	N_{np} , 10^{14} см ⁻³	a , 10^{18} см ⁻⁴
2	П	2,4	3,07	2,85–2,20	–	7,5
6	П	1,0	3,06	3,04–1,90	–	2,8
8	Н	0,6	3,07	3,07–1,15	0,5	–
12	Н	0,9	3,06	3,06–2,00	0,9	–
16	Н	1,4	2,92	2,92–2,24	2,2	–
19	Р	1,5	3,08	3,08–2,22	1,8	–
20	Р	1,5	2,93	2,98–2,12	2,0	–

Таблиця 2

Щільність фотоструму, діодні та вихідні параметри СЕ після прискореної деградації

СЕ	J_{ph} , мА/см ²	J_0 , мА/см ²	A , отн. од.	R_s , Ом см ²	R_{sh} , Ом см ²	J_{sc} , мА/см ²	V_{oc} , мВ	FF , отн. од.
2	13,7	$1,6 \cdot 10^{-10}$	1,53	20,5	236	12,6	705	0,46

6	17,2	$9,0 \cdot 10^{-11}$	1,50	10,7	210	16,4	725	0,54
8	6,3	$1,5 \cdot 10^{-12}$	1,34	19,8	893	6,1	758	0,62
12	9,9	$1,7 \cdot 10^{-11}$	1,40	13,6	485	9,7	720	0,60
16	17,1	$1,1 \cdot 10^{-10}$	1,49	12,0	171	16,0	710	0,51
19	15,3	$2,9 \cdot 10^{-10}$	1,66	8,6	316	14,9	749	0,59
20	31,3	$5,5 \cdot 10^{-9}$	1,87	15,9	50	23,6	717	0,35

Таблиця 3

Рівень деградації СЕ по ККД після 48 місяців зберігання

СЕ	2	6	8	12	16	19	20
ККД, %	4,1	6,4	2,9	4,2	5,8	6,6	6,0
Деградація, %	54–60	28–38	67–72	53–59	35–44	26–36	33–42

Як видно із даних, наведених в табл. 3, найбільшій деградації зазнав зразок № 8 з невизначеним р-п гетеропереходом, а також істотної деградації зазнали зразки № 2 з плавним та № 12 з невизначеним гетеропереходами.

5.2. Дослідження зміни вихідних параметрів і діодних характеристик СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au з різними типами р-п гетеропереходів після впливу напруги прямої полярності

Вибрані зразки були піддані дії зміщуючої напруги прямої полярності $V_d^{\max} = 675 \pm 5$ мВ з максимальною тривалістю $\tau_{ex} = 2$ години у темновому режимі при кімнатній температурі, після чого були зняті темнові ВАХ.

На рис. 3–8 показані темнові ВАХ для кожного типу р-п гетеропереходу, виміряні до і після зазначеного впливу, а також залежності прямого струму I_d , що протікав крізь ці ж СЕ при $V_d^{\max} = 0.68$ В, від часу впливу τ_{ex} .

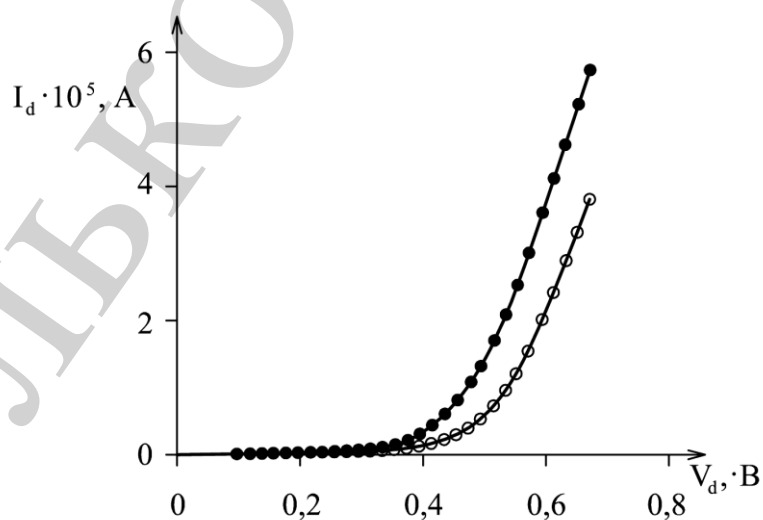


Рис. 3. Статичні темнові вольт-амперні характеристики СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

№ 6: □ – до витримки з максимальною тривалістю $\tau_{ex} = 2$ години при

$V_n = V_d^{\max}$; □ – після витримки

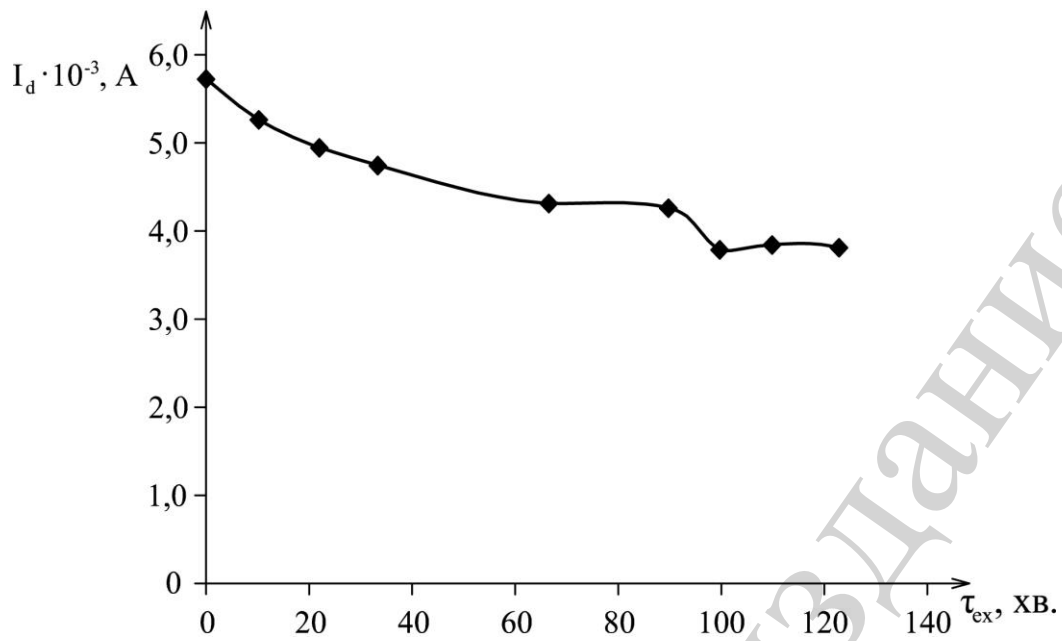


Рис. 4. Залежність прямого струму (I_d), що протікав крізь ці ж СЕ при $V_d^{\max} = 0,68$ В, від часу впливу τ_{ex} для СЕ ІТО/СdS/СdTe/Сu/Аu № 6

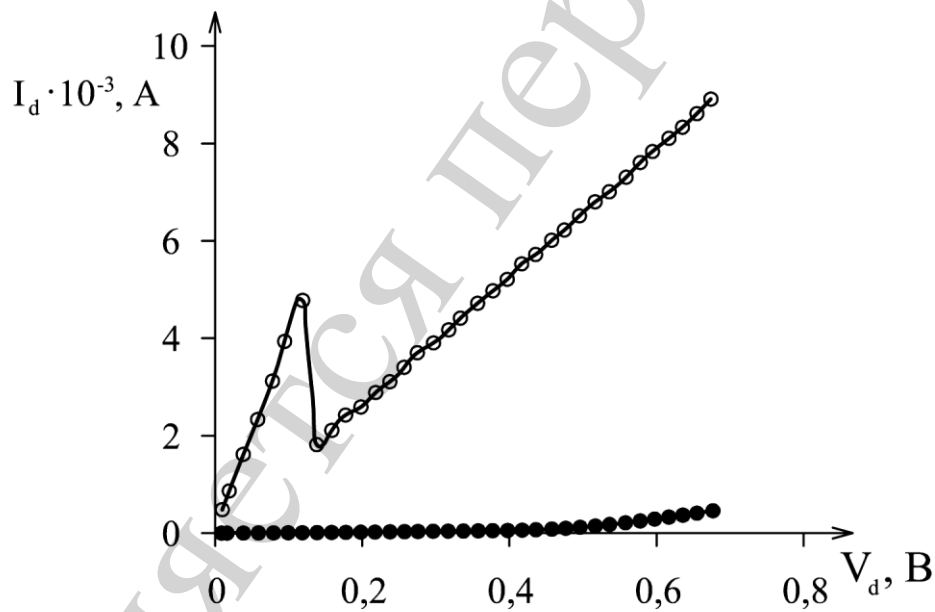


Рис. 5. Статичні темнові вольт-амперні характеристики СЕ ІТО/СdS/СdTe/Сu/Аu № 12: \square – до витримки з максимальною тривалістю $\tau_{ex}=2$ години при $V_n = V_d^{\max}$; \bullet – після витримки

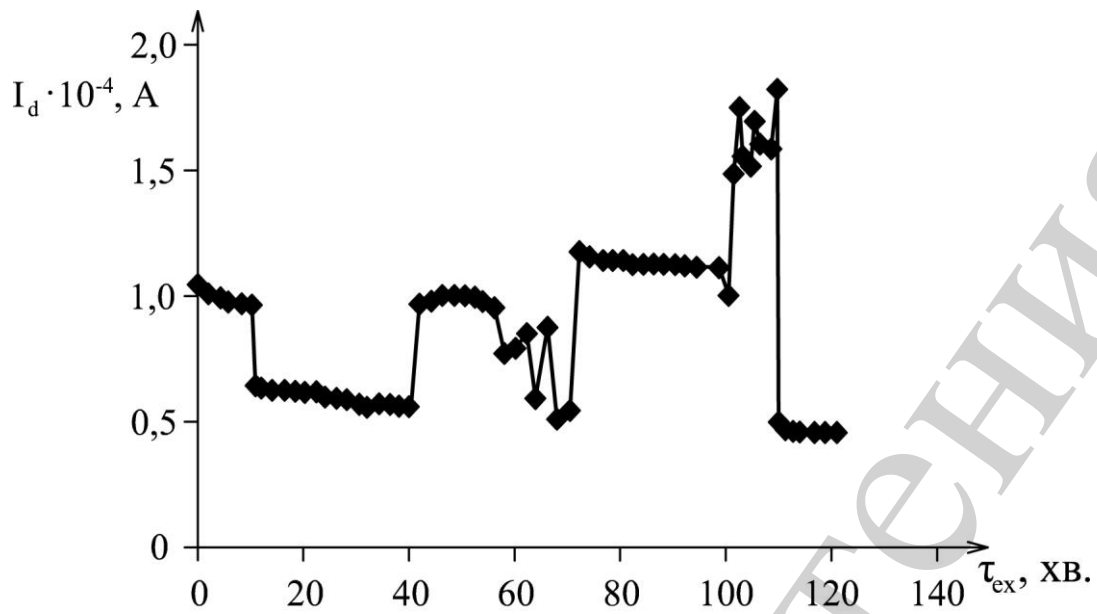


Рис. 6. Залежність прямого струму (I_d), що протікає крізь ці ж СЕ при $V_d^{\max} = 0,68$ В, від часу впливу τ_{ex} для СЕ ІТО/СdS/СdTe/Сu/Аu № 12

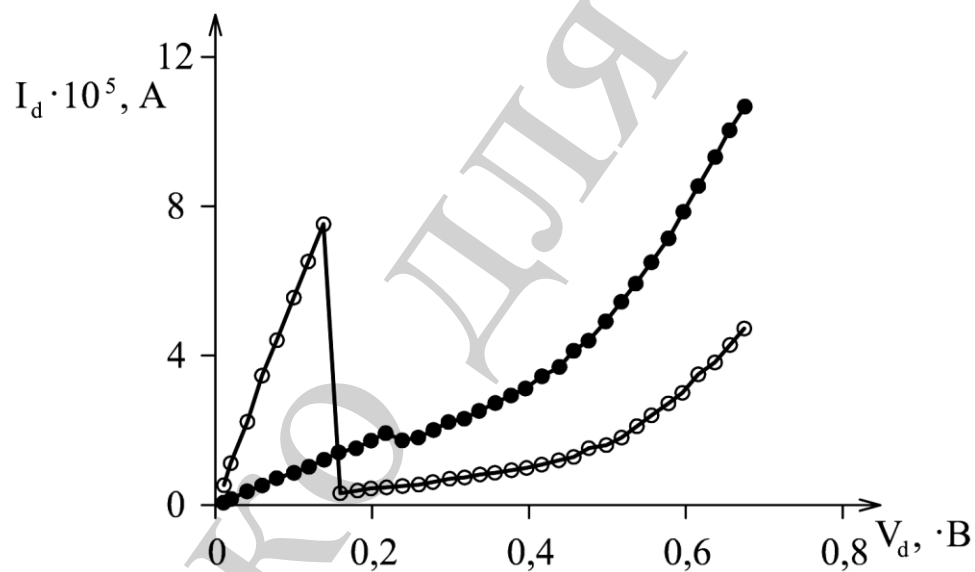


Рис. 7. Статичні темнові вольт-амперні характеристики СЕ ІТО/СdS/СdTe/Сu/Аu № 20: \square – до витримки з максимальною тривалістю $\tau_{ex} = 2$ години при $V_{II} = V_d^{\max}$; \circ – після витримки

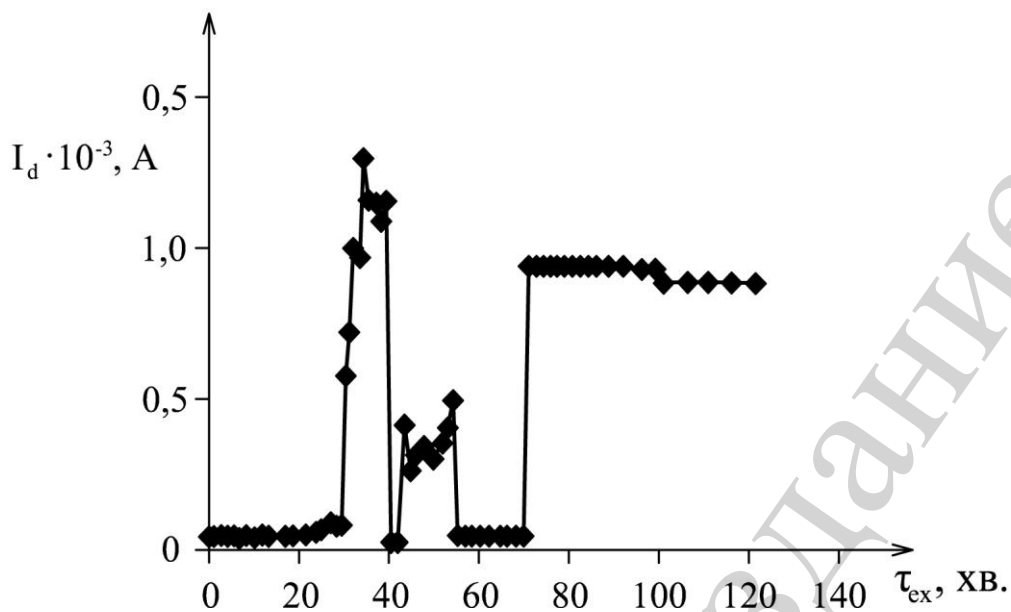


Рис. 8. Залежність прямого струму (I_d), що протікає крізь ці ж СЕ при $V_d^{\max} = 0,68$ В, від часу впливу τ_{ex} для СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au № 20

Величина відносної зміни вихідних параметрів і діодних характеристик СЕ з різними типами n-p гетеропереходів після впливу на затінені СЕ напругою прямої полярності $V_d^{\max} = 0,68$ В з максимальною тривалістю $\tau_{ex}=2$ години при кімнатній температурі наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Зміна вихідних параметрів і доданих характеристик СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au в результаті дії зміщуючого напруги прямої полярності

Номер СЭ_тип ГП	\square КПД_КПД ₀ , %	\square $I_p(\tau_{ex})$ / $I_p(0)$, %	\square J_ϕ / J_ϕ , %	\square FF/FF, %	\square J_0 / J_0 , %	\square R_{it} / R_{it} , %	\square R_{sh} / R_{sh} , %
2/П	31,0	-25,0	28,9	5,8	\square - 100	-25,0	-86,7
6/П	-4,8	139,8	0,07	-5,2	15,6	13,3	-7,5
8/Н	1,7	-27,3	2,2	0,0	-6,9	28,2	151
12/Н	-2,3	-55,7*	-6,4	3,5	192	-10,7	7,2
16/Н	12,2	-33,3	8,4	3,8	817	-25,7	31,0
19/Р	2,3	-19,3	2,4	0,0	841	-22,9	-2,6
20/Р	-81,2	1871	23,8	-52,6	558233	93,7	-82,7

Як видно з табл. 4, для чотирьох СЕ №2, №8, №16 та №19 після впливу напругою прямої полярності спостерігається часткове відновлення ефективності від 1,7 % у випадку СЕ №8 до 31% у випадку СЕ №2. Вказане збільшення ККД мало місце після практично монотонного спаду сили струму I_d через СЕ при незмінному значенні. Ефективність роботи інших СЕ після впливу зменшилась у відносних значеннях від 2,3 % у випадку СЕ № 12 до 81,2 % у

випадку СЕ №20. Цьому сприяла немонотонна зміна $I_{\text{п}}$ зі збільшенням $\tau_{\text{в}}$, на вигляд переважно характерне для конденсаторних структур з самовідновлюючими електричними мікропробоями, що чергуються.

5. 3. Визначення умов відновлення ефективності плівкових СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au після деградації

Після впливу протягом $\tau_{\text{ex}}=2$ години напругою $V_d^{\text{max}} = 0,68$ В ефективність роботи 62,5 % СЕ. Зростання ефективності 47 % досліджених СЕ обумовлений переважно зростанням $J_{\text{ф}}$. У решти 43 % СЕ такої категорії зростання ефективності обумовлений збільшенням $J_{\text{ф}}$ і $R_{\text{ш}}$, а також зниженням $R_{\text{п}}$, що призвело до зростання FF . А у одного з таких СЕ, поряд з перерахованими змінами, підвищення ККД обумовлене також істотним зниженням J_0 .

Наведені результати вказують на можливість підвищення ефективності роботи плівкових СЕ, після деградації шляхом подальшої витримки при помірній температурі під напругою прямого зміщення p-p гетеропереходу $V^{\text{max}} < V_d^{\text{max}} \leq V_{\text{oc}}$ протягом близько 2 годин. Таке відновлення ефективності можливо, якщо в діодній структурі СЕ в процесі деградації не встигли сформуватися дефекти у вигляді електричних пробоїв, що самовідновлюються та чергуються.

Крім того, на підставі аналізу результатів, подібних наведеним на рис. 2–7 і в таблиці 4, можна пояснити ймовірні механізми впливу напруги прямої полярності на фотострум, діодні, і вихідні параметри таких СЕ.

6. Обговорення результатів впливу зміщуючої напруги прямої полярності на СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

При подачі на СЕ напруги $V_d = V_d^{\text{max}}$, створюване електричне поле всередині діодної структури СЕ має посилювати вбудоване електричне поле тильного p-p+ гетеропереходу і частково пригнічувати вбудоване електричне поле фронтального p-p гетеропереходу. У цьому випадку на тильному p-p+ гетеропереході та у прилеглих до нього з обох сторін областях будуть інтенсифіковані процеси, пов'язані з транспортом атомів міді. Крім того, спостерігається перебудова комплексів точкових дефектів, що містять мідь, та фазові перетворення $\text{Cu}_{1,4}\text{Te}$ в Cu_{2-x}Te . Наслідком зазначених процесів повинні стати:

- деяке додаткове зростання складової послідовного опору з боку тильного контакту;
- деяке зниження спектральної чутливості в довгохвильовій області сонячного випромінювання;
- додаткова металізація близько розташованих до p-p + гетеропереходу ділянок стиків поздовжніх кордонів зерен абсорбера.

Разом з тим, з ділянок поздовжніх стиків меж зерен абсорбера з боку p-p гетеропереходу міжвузольна мідь повинна почати рухатися в бік області збідніння шару CdS. Цей процес може призводити до розчинення ланцюжків з атомів міді, які раніше утворилися і частково шунтують гетероперехід з боку

CdTe. Ця обставина може зумовити підвищення шунтуючого опору. Оскільки надходження міді в CdS зі стиків поздовжніх кордонів зерен абсорбера має точковий характер, то можливе при цьому точкове утворення додаткових кількостей фази $\text{Cu}_{2-\delta}\text{S}$, але це не повинно помітно позначатися на величині $J_{\text{ф}}$. Під впливом поля, індукованого зміщуючою напругою прямої полярності, частки Cu_{Cd} з області збідніння шару CdS почнуть переміщатися в абсорбер. Таке переміщення сприятиме зниженню опору шару CdS і може призвести до зменшення ширини області збідніння з боку абсорбера. Це підвищить спектральну чутливість СЕ в короткохвильовій і середньохвильовій областях сонячного спектру. Крім того, не виключена дисоціація під дією зазначеного поля субшару $\text{Cu}_{2-\delta}\text{S}$, що раніше утворився в області n-p гетеропереходу з подальшою електродифузією аніонів сірки в абсорбер, перетворенням катіонів міді, що утворилися в Cu_{Cd} і електродифузією Cu_{Cd} слідом за аніонами сірки. Часткове або повне зникнення зазначеного субшару повинно призводити до зростання $J_{\text{ф}}$. Електродифузія аніонів сірки в абсорбер може інтенсифікувати проростання твердого розчину $\text{CdTe}_{1-y}\text{S}_y$ углиб абсорбера. Електродифузія додаткової кількості Cu_{Cd} в абсорбер повинна посилювати описаний вище і пов'язаний з цим ефект підвищення спектральної чутливості СЕ. Очевидно, що сукупність розглянутих перетворень під впливом V_d^{max} призводить до збільшення ефективності роботи СЕ через збільшення J_{ph} і R_{sh} при зниженні J_0 і R_s , що спостерігається експериментально.

Природно, що в реальних СЕ співвідношення інтенсивностей протікання розглянутих вище процесів не завжди відповідає такому ідеальному поєднанню характеристик зміни J_{ph} , R_{sh} , J_0 і R_s . Мабуть, наприклад, в деяких випадках приплив атомів міді уздовж стиків поздовжніх кордонів зерен абсорбера в область n-p гетеропереходу може переважати над відтоком у CdS. При цьому з очевидністю потужне шунтування, що виникає повинно призводити до виділення Джоулевого тепла в ланцюжку з атомів міді, достатнього для її розриву, що і є однією з причин самовідновлюючих мікропробойів, після чого знову відбувається її утворення далі знову самовідновлюючий мікропробой.

Ще одним цікавим і не описаним в інших роботах ефектом є те що спостерігається при зменшенні V_d до $V_d < 0,2$ В (рис. 3, 5, 7) мимовільне перемикання СЕ з нізкопровідного стану в високопровідний. Даний ефект добре пояснюється посиленням зворотної дії на Cu_i + в області збіднення CdS вбудованого поля n-p гетеропереходу, що сприяє насиченню міддю стиків поздовжніх кордонів зерен абсорбера з боку зазначеного переходу.

На основі проведених досліджень був запропонований спосіб відновлення ККД СЕ після деградації. Спосіб полягає у послідовних операціях, пов'язаних з вимірюваннями темнових та світлових ВАХ і з дією напруги прямої полярності. За допомогою запропонованого способу здійснюється відбраковування потенційно ненадійних СЕ в складі сонячних модулів, подовження терміну і підвищення ефективності роботи потенційно надійних приладів. Цей перелік послідовних операцій над СЕ є наступним. Періодично, з інтервалом 24 години, автоматичне вимірювання світлових ВАХ сонячних елементів, які становлять

сонячний модуль з подальшою аналітичною обробкою для визначення вихідних параметрів і світлових діодних характеристик. При спостереженні зниження вихідних параметрів необхідно провести вимірювання в темний час доби прямої гілки темної ВАХ при напруженні V_d в інтервалі:

$$0 \leq V_d \leq V_d^{act}, \quad (1)$$

де V_d^{act} – діюче значення напруги, при якому відбувається його тривалий вплив на СЕ.

При відсутності аномалій залежності сили струму I_d від V_d здійснюється вихід на $V_d = 0$ з наступною витримкою СЕ під напругою протягом 2 годин і одночасною реєстрацією залежності I_d від тривалості витримки τ_{ex} .

У разі монотонного спадання залежності I_d від τ_{ex} (рис. 3) зазначену операцію продовжувати 2 години, після чого виміряти пряму гілку темної ВАХ СЕ при зниженні напруги від $V_d = V_d^{act}$ до нуля.

Якщо при цьому спостерігається спонтанне перемикавання СЕ з нізкопровідного стану в високопровідний стан, то ККД приладів структури може бути частково відновлено, що автоматично можна проконтролювати по аналітичній обробці світлової ВАХ при денному освітленні.

У разі появи на залежності I_d від τ_{ex} ознак електричних мікропробоїв або початку монотонного зростання I_d зі збільшенням τ_{ex} , відновлення напругою необхідно припинити і замінити відповідний потенційно ненадійний СЕ новим.

При відсутності аномалій залежності сили струму I_d від V_d здійснюється вихід на $V_d = V_d^{act}$ з наступною витримкою СЕ під напругою протягом 2 годин і одночасною реєстрацією залежності I_d від тривалості витримки τ_{ex} .

У разі монотонного спадання залежності I_d від τ_{ex} (рис. 3) зазначену операцію продовжувати 2 години, після чого виміряти пряму гілку темної ВАХ СЕ при зниженні напруги від $V_d = V_d^{act}$ до нуля.

Якщо при цьому спостерігається спонтанне перемикавання СЕ з нізкопровідного стану в високопровідний стан, то ККД приладів структури може бути частково відновлено, що автоматично можна проконтролювати по аналітичній обробці світлової ВАХ при денному освітленні.

У разі появи на залежності I_d від τ_{ex} ознак електричних мікропробоїв або початку монотонного зростання I_d зі збільшенням τ_{ex} , відновлення напругою. V_d^{act} необхідно припинити і замінити відповідний потенційно ненадійний СЕ новим.

6. Висновки

1. Було експериментально зафіксовано вплив електричного поля прямої полярності на вихідні параметри і світлові діодні характеристики СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au, у яких відбулася деградація ККД.

2. Показана можливість підвищення ККД плівкових СЕ ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au після деградації шляхом витримки під напругою прямого зміщення

n-p гетеропереходу, якщо в діодній структурі таких СЕ при деградації не встигли сформуватися дефекти, які за вказаний час витримки здатні призводити до самовідновлюючих електричних мікропробойів, що чергуються.

3. Визначено умови відновлення плівкових СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, засновані на витримці СЕ протягом не менше 120 хвилин в електричному полі, поляриність якого відповідає прямому зсуву n-p гетероперехода СЕ наведеному зовнішньою постійною напругою величиною (0,5–0,9) В. Під впливом електричного поля відбувається інтенсифікація процесів транспорту атомів міді, перебудова комплексів точкових дефектів, що містять мідь та фазове перетворення $\text{Cu}_{1,4}\text{Te}$. Зазначені процеси призводять до зменшення опору шару CdS і електродифузії в базовий шар аніонів сірки і міжвузельних катіонів Cu_{Cd} . Визначено,

Література

1. Nardone M., Albin D. S. Degradation of CdTe Solar Cells: Simulation and Experiment // IEEE Journal of Photovoltaics. 2015. Vol. 5, Issue 3. P. 962–967. doi: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2015.2405763>
2. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride / Khrypunov G., Vambol S., Deyneko N., Sychikova Y. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Issue 5 (84). P. 12–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>
3. Results of studying the Cu/ITO transparent back contacts for solar cells SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO / Deyneko N., Semkiv O., Soshinsky O., Streletc V., Shevchenko R. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4, Issue 5 (94). P. 29–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139867>
4. Deyneko N., Khrypunov G., Semkiv O. Photoelectric Processes in Thin-film Solar Cells Based on CdS/CdTe with Organic Back Contact // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2018. Vol. 10, Issue 2. P. 02029-1–02029-4. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02029](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02029)
5. Деградация солнечных элементов на основе гидрогенизированного аморфного кремния / Мурашев В. Н., Леготин С. А., Краснов А. А., Дудкин А. А., Зезин Д. А. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2013. № 4. С. 39–42. doi: <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2013-4-39-42>
6. Зезин Д. А., Латохин Д. В. Оценка некоторых факторов, влияющих на деградацию солнечных элементов на основе a-Si:H // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сборник трудов VIII Международной конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 26–27.
7. Light Induced Defect Creation Kinetics in Thin Film Protocrystalline Silicon Materials and Their Solar Cells / Wronski C. R., Pearce J. M., Koval R. J., Niu X., Ferlauto A. S., Koh J., Collins R. W. // MRS Proceedings. 2002. Vol. 715. doi: <https://doi.org/10.1557/proc-715-a13.4>
8. Karpov V. G., Shvydka D., Roussillon Y. Physics of CdTe Photovoltaics: from Front to Back // MRS Proceedings. 2005. Vol. 865. doi: <https://doi.org/10.1557/proc-865-f10.1>

9. Cu-related recombination in CdS/CdTe solar cells / Demtsu S. H., Albin D. S., Sites J. R., Metzger W. K., Duda A. // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, Issue 8. P. 2251–2254. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.08.035>
10. Albin D. S. Accelerated stress testing and diagnostic analysis of degradation in CdTe solar cells // *Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems*. 2008. doi: <https://doi.org/10.1117/12.795360>
11. McMahan T. J., Berniard T. J., Albin D. S. Nonlinear shunt paths in thin-film CdTe solar cells // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97, Issue 5. P. 054503. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1856216>
12. Karpov V. G., Shvydka D., Roussillon Y. E2phase transition: Thin-film breakdown and Schottky-barrier suppression // *Physical Review B*. 2004. Vol. 70, Issue 15. doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.155332>
13. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects / Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M. // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85, Issue 8. P. 1580–1608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
14. Achievements and Challenges of CdS/CdTe Solar Cells / Fang Z., Wang X. C., Wu H. C., Zhao C. Z. // *International Journal of Photoenergy*. 2011. Vol. 2011. P. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/297350>
15. A study of the CdTe treatment with a Freon gas such as CHF₂Cl / Mazzamuto S., Vaillant L., Bosio A., Romeo N., Armani N., Salviati G. // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, Issue 20. P. 7079–7083. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.124>
16. Thin films of CdIn₂O₄ as transparent conducting oxides / Mamazza R., Balasubramanian U., Morel D. L., Ferekides C. S. // *Proc. of 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Anaheim, 2002. P. 616–619.
17. Highly transparent and conductive ZnO-In₂O₃ thin films prepared by d.c. magnetron sputtering / Minami T., Kakumu T., Takeda Y., Takata S. // *Thin Solid Films*. 1996. Vol. 290-291. P. 1–5. doi: [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(96\)09094-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(96)09094-3)
18. Pilipenko V. V., Kuprikov V. I., Soznik A. P. Microscopic nucleon-nucleus optical potential with rearrangement effects based on the effective skyrme forces // *International Journal of Modern Physics E*. 2009. Vol. 18, Issue 09. P. 1845–1862. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218301309013907>
19. Jeong W.-J., Park G.-C. Electrical and optical properties of ZnO thin film as a function of deposition parameters // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001. Vol. 65, Issue 1-4. P. 37–45. doi: [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(00\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(00)00075-1)
20. Investigation of the combination of ITO/CdS/CdTe/Cu/Au solar cells in microassembly for electrical supply of field cables / Deyneko N., Semkiv O., Khmyrov I., Khrypynskyy A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, Issue 12 (91). P. 18–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.124575>
21. Enzenroth R. A., Barth K. L., Sampath W. S. Correlation of stability to varied CdCl₂ treatment and related defects in CdS/CdTe PV devices as measured by thermal admittance spectroscopy // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2005. Vol. 66, Issue 11. P. 1883–1886. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2005.09.022>