

© Кондратьєва І.В.¹, Кобаса І.М.¹, Кропельницька Ю.В.², 2016¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича²Буковинський державний медичний університет

СЕНСИФІЛІЗОВАНІ БАРВНИКАМИ СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ TiO₂

Показана можливість створення фотоелектрохімічних сонячних елементів на основі гетероструктур TiO₂/Б/ПЕПК та визначена ефективність їх дії. Як барвник-сенсифілізатор обрано хіноліновий моно- та бісціаніновий барвники. Створено фотоелектрохімічні комірки Гретцеля шляхом нанесення активного шару гетероструктури на провідне скло з використанням як рідкого, так і желеподібного йодид-вмісного електроліту.

Ключові слова: фотоелектрохімічні сонячні елементи, TiO₂, барвник-сенсифілізатор, комірка Гретцеля, коефіцієнт корисної дії, гетероструктура.

Вступ

Сонячна енергетика має значний потенціал і перспективи використання для забезпечення людства екологічно чистою енергією. Однак менше 1 % виробленої у світі електроенергії – „сонячного” походження. Фотоелектрохімічні редокс-системи на основі нанодисперсних широкозонних оксидних напівпровідникових матеріалів, сенсифілізованих барвниками різних типів, володіють значним економічним потенціалом і можуть стати комерційно-вигідним способом перетворення енергії сонячного випромінювання [1].

Одним із перспективних типів фотоелектрохімічних сонячних елементів є так звані комірки Гретцеля [2-5], які виготовляються з дешевих матеріалів і не вимагають складної апаратури під час їх створення. На даний час переважають технології виробництва фотоелектрохімічних перетворювачів (ФЕП), які використовують кристалічний кремній [6-8], що забезпечують коефіцієнт корисної дії (ККД) 15–20 % [8]. Однак істотний недолік сонячних фотоелементів даного типу – висока вартість, викликана необхідністю використання напівпровідникового кремнію високої чистоти. Альтернатива фотоелементам на основі монокристалічного кремнію – фотоелементи виготовлені у вигляді тонких плівок таких матеріалів, як аморфний кремій (aSi:H) [9], кадмій телурид [10], купрум й індій диселенід (Cu(InGa)Se₂) [11], галій арсенід (GaAs) [12] й інші, нанесені на різні підкладки [5, 7, 8].

Серед сонячних елементів особливе місце посідають ФЕП, що використовують органічні матеріали та фулерени. Зокрема, ККД елементів на основі титан(IV) оксиду, покритого органічним барвником, досить високий –

~11 %. Основа сонячних елементів даного типу – широкозонний напівпровідник, зазвичай, TiO₂, покритий моношаром органічного барвника, як правило – цис-(NCS)₂біс(4,4'-дикарбокси-2,2'біпіридин)-рутением (II) [13, 14]. Авторами [15] створена ефективна фотоелектрохімічна сонячна комірка з ККД більше, ніж 7 % на основі нанокристалічного TiO₂, металкомплексного барвника рутенію і йодидного електроліту. Сонячні фотоелектрохімічні елементи (СФЕ) такого типу одержали назву комірок, сенсифілізованих органічним барвником (DSSC), або комірок Гретцеля. У комірки випромінювання поглинається барвником, закріпленим на поверхні наночастинок TiO₂, молекули якого інжектують електрони в зону провідності титан(IV) оксиду, які потім передаються в зовнішнє електричне коло. Електроліт, що містить йодид-іони, відновлює окиснені молекули барвника. На даний час ККД СФЕ такого типу перевищує 11 %.

Отже, виготовлення економічно доцільних, екологічно безпечних фотоелектрохімічних перетворювачів енергії сонячного випромінювання з доступних і недорогих матеріалів, а також використання простих конструкцій – актуальне завдання.

Мета роботи – створення сенсифілізованих барвниками СФЕ на основі TiO₂ та визначення ефективності їх дії в реальних експлуатаційних умовах.

Методика експерименту

Гетероструктури (ГС), що складаються з барвника (Б) та напівпровідника (Б/TiO₂), готували шляхом обробки суспензії титан(IV) оксиду спиртовим розчином барвника при кімнатній температурі, після чого суміш залишали до повного випаровування розчин-

ника. Для того, щоб одержані матеріали можна було використати в середовищах, які добре розчиняють барвник, вони захищалися плівкою поліепоксипропілкарбазолу (ПЕПК), яка наносилася із бензенових розчинів цього полімера. Синтез ГС $\text{TiO}_2/\text{Б}/\text{ПЕПК}$ з різним вмістом барвника-сенсibilізатора виконано за методикою, описаною в [16, 17]. Як потенційно можливого ефективного барвника-сенсibilізатора обрано такі барвники: хіноліновий бісціаніновий – $\text{C}_{41}\text{H}_{39}\text{N}_4\text{O}_2\text{Br}$ (а), хінолоновий моноціаніновий – $\text{C}_{32}\text{H}_{28}\text{N}_3\text{O}_2\text{Br}$ (б) та барвник стирилового ряду з ізатиновим фрагментом – $\text{C}_{27}\text{H}_{26}\text{ClN}_3\text{O}_3$ (в). Барвники були синтезовані на кафедрі органічної і фізичної хімії та екології хімічних виробництв Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Графічні формули барвників подані на рис. 1.

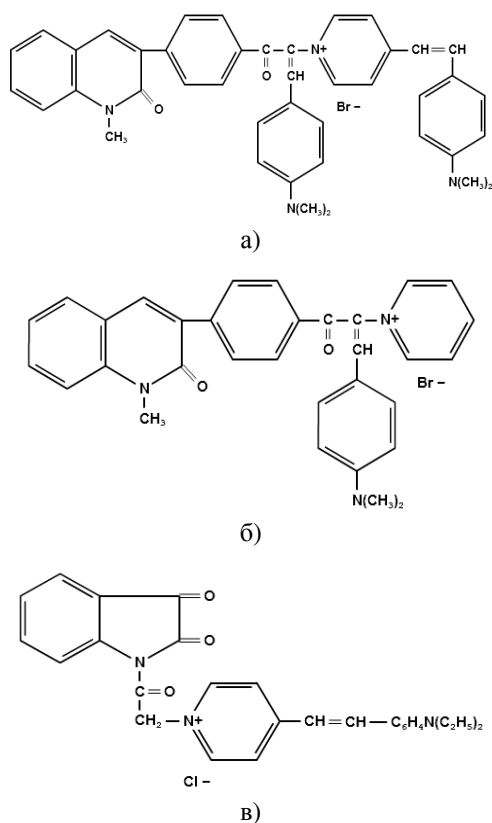


Рис. 1. Графічні формули барвників-сенсibilізаторів:

- а) хінолоновий бісціаніновий барвник,
 б) хінолоновий моноціаніновий барвник,
 в) барвник стирилового ряду з ізатиновим фрагментом

Фотокаталітичну активність (ФКА) ГС визначали у реакції відновлення метиленового блакитного (МБ) до лейкоформи. Як відновник використано 38 % розчин формаль-

дегіду. Реакційні суміші, що містять МБ і ГС, опромінювали в умовах, що забезпечують відсутність кисню під час енергійного перемішування до повного знебарвлення розчину метиленового блакитного. Як джерело світла обрано ртутну лампу високого тиску ДРТ-1000 та лампу розжарювання потужністю 500 Вт [18, 19].

Методика створення світлочутливих фотоелементів (комірок Гретцеля) на основі гетероструктур $\text{TiO}_2/\text{Б}/\text{ПЕПК}$. Найпростіший фотоелектрохімічний елемент має „сендвічну структуру” й складається з двох електродів та йодид-вмісного електроліту. Обидва електроди – катод та анод – провідні скляні пластини. Під анодним електродом (верхня частина елемента) створювали шар синтезованої ГС $\text{TiO}_2/\text{Б}/\text{ПЕПК}$, яка слугує постачальником збуджених світлом електронів. Нижче шару ГС між електродами вносили йодид-вмісний електроліт, як донор електронів для барвника-сенсibilізатора, а далі – нижче шару електроліту – наносили шар графітового покриття на катодний електрод. Таке покриття разом із катодом слугує для збору електронів та каталізу окисно-відновної реакції. Сонячну комірку створювали згідно з методикою [20].

Поетапна технологія створення сонячних комірок Гретцеля (рис. 2)

1. Підготовка зразка

На одну частину очищеного електропровідного скла (рис. 2 а) площею $5 \times 5 \text{ см}^2$ (1) наносили шар графітового покриття (2). Графітове покриття може бути дво- або одношарове. У першому випадку, на скельце спочатку наносили шар графіту. Другим шаром слугувала кіптява, нанесена від свічки на вже сформований шар графіту (3).

2. Приготування розчину електроліту

Як рідкий електроліт використано кристалічний калій йодид та безводний металевий йод (ч.д.а.). Для цього 0,5 М розчин калій йодиду змішували з 0,05 М розчином йоду у безводному розчині етиленгліколю.

Створення нижнього шару желеподібного електроліту. Для створення желеподібного електроліту використано агар-агар – рослинний замітник желатину, який, на відміну від останнього, – інертний та хімічно стабільний. Суміш приготовленого рідкого електроліту з додаванням агар-агару нагрівали на водяній

бані при постійному перемішуванні. Потім суміш знімали та переносили у форму для застигання (рис. 2 б). Утворений желеподібний шар витримували за кімнатної температури, а згодом у холодильнику протягом 24 год до повного застигання.

Для ліпшої стабільності основних компонентів сонячної комірки була створена спеціальна двошарова желеподібна структура (рис. 2 в), яка вміщувала в себе шар ГС $\text{TiO}_2/\text{Б/ПЕПК}$ та електроліт. Така структура забезпечувала більшу стабільність зв'язаних в ній компонентів, запобігала витіканню рідини та деградації компонентів. Площа двошарової структури дорівнювала $5 \times 4 \text{ см}^2$.

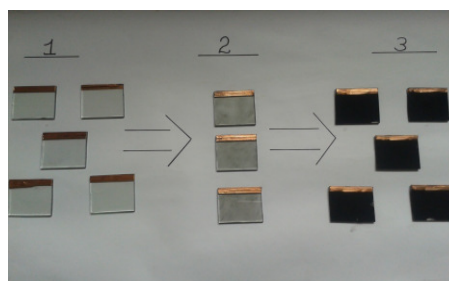
Створення верхнього шару покриття „електроліт–гетероструктура”. Процес створення верхнього шару покриття „електроліт–гетероструктура” подібний до процесу одержання нижнього шару. Відмінність полягала лише в тому, що до розчину перед нагріванням додавали 10 мг ГС $\text{TiO}_2/\text{Б/ПЕПК}$. Створено фотоелектрохімічні елементи з використанням $\text{TiO}_2/\text{Б/ПЕПК}$ та світлочутливого TiO_2 без барвника-сенсibilізатора (для порівняння). Барвник на титан(IV) оксид наносили шляхом занурення провідного скла, на поверхні якого заздалегідь було нанесено тонку плівку нанодисперсного TiO_2 .

3. Створення сонячних комірок Гретцеля

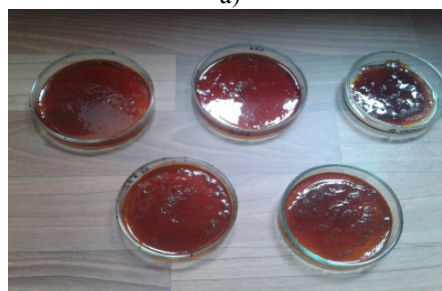
Створення сонячних комірок Гретцеля з желеподібним електролітом. Шар отриманого желеподібного електроліту наносили на графітове покриття. Закривали іншим скельцем зверху, герметизували і стискали біндерами. Накладати шари інгредієнтів на скельця необхідно так, щоб мінімум один сантиметр кожного скельця був вільний від них і виходив за межі структури. Створений елемент (рис. 2 г) перевіряли на герметичність і поміщали в холодильник.

Створення сонячних комірок Гретцеля з рідким електролітом. Провідні пластинки покривали водною суспензією світлочутливого TiO_2 . Далі на цю ж пластинку наносили барвник-сенсibilізатор, шляхом змочування її в етанольному розчині барвника-сенсibilізатора визначеної концентрації. Таку ж саму операцію проводили з синтезованими гетероструктурами $\text{TiO}_2/\text{Б/ПЕПК}$. На покриті графітом пластинки наносили йодид-вмістний електроліт. Скляні пластини ущільнювали за допомогою затискачів. Потім додавали

розчин електроліту, який поступово втягувався в комірку під дією капілярних сил. Повторювали цей процес до тих пір, поки вся комірка не буде насичена розчином електроліту.



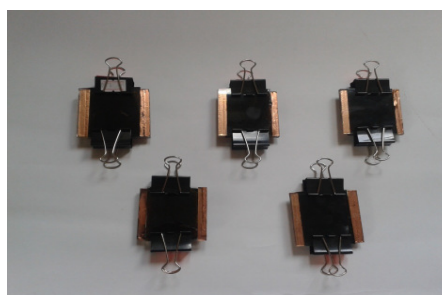
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Поетапна технологія створення фотоелектрохімічних комірок Гретцеля: а) нанесення графітового покриття на електропровідне скло; б) приготування желеподібного електроліту; в) двошарова желеподібна структура; г) створені фотоелектрохімічні комірки Гретцеля.

Потужність джерела світла вимірювали люксометром марки СЕМ DT-1307, яка дорівнювала 181 Вт/м^2 ; струм та напругу створених елементів вимірювали з використанням мультиметру.

Результати та їх обговорення

Аналіз отриманих результатів (табл. 1) показує, що в синтезованих гетероструктурах фотокаталітичні процеси відновлення метиленового блакитного індукуються при дії світла, яке поглинається барвником-сенсифілізатором. Однак залежності фотокаталітичної активності від вмісту останнього істотно відрізняються. У випадку дії світла з $\lambda > 400 \text{ нм}$ на гетероструктуру відбувається фотозбудження барвника-сенсифілізатора. В усіх випадках спостерігаємо, що фотокаталітична активність гетероструктур спочатку збільшується, а потім знижується.

Відновлення метиленового блакитного при дії випромінювання з $\lambda > 400 \text{ нм}$ на $\text{TiO}_2/\text{Б}/\text{ПЕПК}$ починається з поглинання світла барвником-сенсифілізатором. Збільшення ФКА зі зростанням вмісту Б в гетероструктурах (табл. 1, досліди 1–3) – закономірне, оскільки призводить до збільшення кількості збуджених молекул, які приймають участь у фотокаталітичному процесі. Причини ж погіршення ефективності дії цих матеріалів при нанесенні на напівпровідник великої кількості барвника (досліди 4, 5) можна пояснити послабленням взаємодії барвника з напівпровідником, яке призводить до зменшення імовірності захоплення електронів зоною провідності, і внаслідок погіршення ефективності функціонування фотокаталізаторів-гетероструктур. Цей висновок повністю підтверджено експериментально.

Зовсім інша залежність ФКА від кількісного складу ГС спостерігається у випадку опромінення їх УФ-світлом, яке поглинається в основному TiO_2 . Виявилось, що найвища активність притаманна вихідному не модифікованому зразку, а при нанесенні барвника і збільшенні його вмісту вона монотонно спадає.

З огляду результатів аналізу ФКА ГС з'ясовано (табл. 1), що найліпшими фотокаталітичними властивостями володіють гетероструктури з хіноліновим бісціаніновим барвником, а ГС зі стириловим барвником виявилися найменш фотокаталітично активними, незважаючи на те, що характер зміни фотокаталітичної активності гетероструктур під впливом світла з $\lambda > 400 \text{ нм}$ – однаковий. Це можна пояснити можливо тим, що спектри бісціанінів містять по дві інтенсивні смуги поглинання, які охоплюють майже всю видиму область, і цим створюється потенційна можливість використання їх у фотокаталітичному процесі квантів світла широкого енергетичного діапазону.

Гетероструктури зі стириловим барвником, які володіють низькою фотокаталітичною активністю, у подальшому не використовували для створення комірок Гретцеля.

Виготовлено ряд сонячних комірок за різними технологіями нанесення активного шару гетероструктури на провідне скло з використанням як рідкого, так і желеподібного йодид-вмісного електроліту.

Результати вимірювання ефективності комірок Гретцеля з використанням двошарової желеподібної структури та рідкого електроліту подані в табл. 2 і 3.

Процес формування рідкого йодид-вмісного електроліту відрізнявся від процесу створення елементів на основі желеподібного

Таблиця 1

Фотокаталітична активність ГС $\text{TiO}_2/\text{Б}/\text{ПЕПК}$ при різному вмісті барвника та дії світла різних спектральних ділянок

№ п/п	Вміст барвника в ГС, мг/г	ФКА, $\text{мг/мл}\cdot\text{хв}\cdot\text{м}^2$					
		$\lambda = 310\text{--}400 \text{ нм}$			$\lambda > 400 \text{ нм}$		
		Б1	Б2	Б3	Б1	Б2	Б3
1	0,02	$9,3\cdot 10^{-2}$	$7,3\cdot 10^{-2}$	$5,3\cdot 10^{-2}$	$6,0\cdot 10^{-2}$	$3,0\cdot 10^{-2}$	$1,0\cdot 10^{-3}$
2	0,1	$4,0\cdot 10^{-2}$	$2,5\cdot 10^{-2}$	$2,0\cdot 10^{-2}$	$5,6\cdot 10^{-1}$	$1,6\cdot 10^{-1}$	$1,6\cdot 10^{-2}$
3	0,2	$2,7\cdot 10^{-2}$	$1,5\cdot 10^{-2}$	$1,1\cdot 10^{-2}$	$7,0\cdot 10^{-1}$	$3,4\cdot 10^{-1}$	$3,0\cdot 10^{-2}$
4	1,0	$6,6\cdot 10^{-3}$	$4,6\cdot 10^{-3}$	$2,6\cdot 10^{-3}$	$3,9\cdot 10^{-1}$	$1,6\cdot 10^{-1}$	$1,9\cdot 10^{-2}$
5	2,0	$5,4\cdot 10^{-3}$	$3,4\cdot 10^{-3}$	$1,2\cdot 10^{-3}$	$8,3\cdot 10^{-3}$	$2,3\cdot 10^{-3}$	$6,3\cdot 10^{-4}$

* – ФКА TiO_2 , який не містить барвника-сенсифілізатора дорівнює $9,8\cdot 10^{-2} \text{ мг/мл}\cdot\text{хв}\cdot\text{м}^2$

Таблиця 2
Ефективність фотоелектрохімічних комірок
Гретцеля на основі "гетероструктур
TiO₂/B1(B2)/ПЕПК – желеподібний електроліт"

Вміст барвника в ГС, мг/г	TiO ₂ /B1/ПЕПК	TiO ₂ /B2/ПЕПК	ККД TiO ₂ – B1, %	ККД TiO ₂ – B2, %
	ККД, %	ККД, %		
0,02	0,2	0,1		
0,1	0,7	0,2		
0,2	2,5	2,1	0,2	0,1
1,0	1,5	0,5		
2,0	0,8	0,5		

Таблиця 3
Ефективність фотоелектрохімічних комірок
Гретцеля на основі "гетероструктур
TiO₂/B1(B2)/ПЕПК – рідкий електроліт"

Вміст барвника в ГС, мг/г	TiO ₂ /B1/ПЕПК	TiO ₂ /B2/ПЕПК	ККД TiO ₂ – B1, %	ККД TiO ₂ – B2, %
	ККД, %	ККД, %		
0,02	0,8	0,4		
0,1	1,5	0,6		
0,2	2,7	1,2	1,0	0,5
1,0	1,4	1,0		
2,0	0,8	0,3		

електроліту. Причинами цього були велика текучість рідкого електроліту та імовірність витікання з комірки. Після створення контр-електроду згідно зі способом, аналогічним використаному для желеподібних електролітних елементів, останній з'єднувався зі скельцем, покритим ГС і герметизувався. Герметизація відбувалася так, щоб один бік комірки залишався вільним від герметика для заливання в елемент електроліту. Комірки спроектовані так, що в них вміщувалося 2 мл електроліту, після додавання якого конструкція повністю герметизувалася.

Як видно з результатів табл. 2 і 3, ККД створених фотоелектрохімічних елементів на основі ГС TiO₂ з барвником-сенсibiliзатором знаходяться в межах 0,1÷2,7 %. Найбільшими значеннями ККД володіють комірки на основі гетероструктур, що містять 0,2 мг/г барвника-

сенсibiliзатора. Отримані результати підтверджують кореляцію між ФКА синтезованих ГС у реакції відновлення МБ та ефективністю їх дії під час створення сонячних елементів. Установлено, що при вмісті барвника у ГС, що дорівнює 0,2 мг/г фотокаталітична активність та ефективність дії – максимальні.

Висновки

Одержано нові світлочутливі гетероструктури, що містять напівпровідник і барвник-сенсibiliзатор. На прикладі реакції відновлення метиленового блакитного вивчена їх фотокаталітична активність залежно від якісного і кількісного складу. Показана можливість застосування синтезованих ГС TiO₂/Б/ПЕПК для створення фотоелектрохімічних комірок Гретцеля. Установлено, що ефективність фотокаталітичної дії створених сонячних елементів з використанням рідкого йодид-вмісного електроліту вища у порівнянні з желеподібним.

Висловлюємо щире подяку д.х.н., проф. Ягодинцю П.І. та к.х.н. Руснак (Єленіч) О.В. за надані для дослідження барвники.

Список літератури

- O'Regan B. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films / B. O'Regan, M. Grätzel // *Nature*. – 1991. – Vol. 353, № 6346. – P. 737–740.
- Grätzel M. Dye-sensitized solar cells / M. Grätzel // *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. – 2003. – Vol. 4. – P. 145–153.
- Jayaweera P.V.V. Why Grätzel's cell works so well / P.V.V. Jayaweera, A.G.U. Perera, K. Tennakone // *Journal of Inorganica Chimica Acta*. – 2008. – Vol. 361, № 3. – P. 707–711.
- Parisi M. L. The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach / M. L. Parisi, S. Maranghi, R. Basosi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 124–138.
- Titanium dioxide/graphene anode for enhanced charge-transfer in dye-sensitized solar cell / Liming Liu, Baoqing Zeng, Qi Meng, Zhifang Zhang [et al.] // *Journal of Synthetic Metals*. – 2016. – Vol. 222, Part B. – P. 219–223.
- Green M.A. Crystalline and thin film silicon

- solar cells: state of the art and future potential / M.A. Green // *Solar Energy*. – 2003. – Vol. 74. – P. 181–198.
7. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку / Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, М.О. Галушак, О.С. Криницький, Г.Д. Матеїк // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2012. – Т. 13, №1. – С. 7–20.
 8. Goetzberger A. Solar cells: past, present, future / A. Goetzberger, J. Luther, G. Willere // *Solar Energy Material and Solar Cells*. – 2002. – Vol. 74, № 2. – P. 1–11.
 9. Role of i-aSi:H Layers in aSi:H/cSi Heterojunction Solar Cells / Yutaka Hayashi, Debin Li, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita // *Journal of Photovoltaics*. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 1149–1155.
 10. Thin films CdS/CdTe solar cells with different activation processes baselayer / G.S. Khrypunov, T.N. Shelest, T.N. Li [et al.] // *Semiconductor Physics, Quantum electronics and optoelectronics*. – 2011. – Vol. 14, № 1. – P. 122–126.
 11. Highly efficient Cu(In,Ga)Se₂ solar cells grown on flexible polymer films / A. Chirilă, S. Buecheler, F. Pianezzi, P. Bloesch [et al.] // *Nature Materials*. – 2011. – Vol. 10. – P. 857–861.
 12. Improvement in separation rate of epitaxial lift-off by hydrophilic solvent for GaAs solar cell applications / F.L. Wu, S.L. Ou, R.H. Horng, Y.C. Kao // *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*. – 2014. – Vol. 112. – P. 233–240.
 13. Алферов Ж.И. Тенденции и перспективи развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // *Фізика і техніка напівпровідників*. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 937–948.
 14. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии / Ю.Е. Николаенко, Н.М. Вакив, С.И. Круковский [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – № 3. – С. 21–30.
 15. Малюков С.П. Исследование спектра поглощения красителя эозина для применения в солнечных элементах на основе TiO₂ / С.П. Малюков, А.В. Саенко // *Известия ЮФУ*. – 2011. – № 4. – С. 235–240.
 16. Kobasa I. M. Dark and photochemical reactions between cyanine dye with two conjugated chromophores and titanium dioxide / I. M. Kobasa, I.V. Kondrat'eva // *Theoretical and Experimental Chemistry*. – 2008. – Vol. 44, №2. – P. 80–83.
 17. Kobasa I. M. Sensitizing of Semiconducting Photocatalysts by Cyanine Pigment with Two Conjugated Chromophores / I. M. Kobasa, I.V. Kondratyeva // *Polish J. Chem.* – 2008. – Vol. 82. – P. 1639–1648.
 18. Nataliia B. Husiak, Igor M. Kobasa, Stefan S. Kurek. New dyes for dye-sensitised solar cells and photocatalysis. Verifying thermodynamic requirements for electron transfer // *Functional Materials Letters*. – 2014. – Vol.7, №3. – P.1450030-1–1450030-4.
 19. Kobasa I., Kondratyeva I., Husyak N. Spectral and photocatalytic properties of heterostructures with bisquinocyanine dye and ZnO, ZrO₂ and SiO₂ // *Functional Materials Letters*. – 2010. – Vol.3, №4. – P.233–236.
 20. Electron Transport in the Nanostructured TiO₂ – Electrolyte System Studied with Time-Resolved Photocurrents / A. Solbrand, H. Lindstrom, A. Hagfeldt, S. E. Lindquist // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 1997. – Vol. 101, № 14. – P. 2514–2518.

Summary

Kondratyeva I.V., Kobasa I.M., Kropelnytska Yu.V.

DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS BASED ON TiO₂

The article shows the possibility of creating a light-sensitive cells based on heterostructures TiO₂/D/P. We have determined the efficiency of the actions of synthesized heterostructures. As dye-sensitizer there were selected quinoline mono- and quinoline biscyanine dyes. Grätzel solar cell we have made with different technologies causing the active layer heterostructures leading glass using both liquid and gel iodine-containing electrolyte.

Keywords: solar cells, TiO₂, dye-sensitizer, Gratzel's cell, coefficient of efficiency, heterostructure.