

DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.1.262657

УДК 666.265; 681.7.03; 681.7.04
PACS 61.46.+w; 78.30.-j

Є. В. Беляк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна
e-mail: beliak1312@gmail.com

Оптимізація системи фотореєстрації через застосування покриття на основі наноструктурованих люмінофорів

Розглянуто актуальні підходи, які використовуються при впровадженні та оптимізації сучасних систем фотореєстрації. Проведено аналіз факторів, що призводять до зменшення фоточутливості та порушення колірного балансу фотоматриці. Шляхом застосування фотолюмінесцентного покриття запропоновано зменшити розбіжність між видимим спектром випромінювання, що реєструється системою, та спектром поглинання фотоелектричних перетворювачів елементів фотоматриці. Представлено результати експериментальних досліджень по синтезу відповідного класу люмінофорів покриття, що можуть бути використані в рамках даної методики. Визначено умови оптимізації фотоматриці шляхом модифікації колірної схеми.

Ключові слова: система фотореєстрації, фотоелектричний перетворювач, фоточутливість, колірний баланс, піразолінові барвники, наноструктурований композит, квантовий вихід фотолюмінесценції.

Вступ

Загальносвітовий тренд пов'язаний з глобальною цифровізацією даних призвів до впровадження та широкого розповсюдження засобів цифрової фотореєстрації [1–5]. Таким чином, можна вказати, що тенденції на мініатюризацію та здешевлення відповідних електронних пристроїв, а також розвиток систем передачі, аналізу та збереження цифрових даних [9] передували появі принципово нових підходів при застосуванні засобів цифрової фотореєстрації у багатьох областях промисловості, інфраструктурного проектування, логістики, медицини, суспільних взаємин, академічної науки та військово-промислового комплексу (рис. 1). Передача та збереження великих масивів цифрових даних відповідає появі концепції «Big Data», що через впровадження методів машинного аналізу (зокрема нейроме-

© Є. В. Беляк

режевих алгоритмів глибинного навчання, здатних виділяти високорівневі ознаки) з одного боку суттєво розширює інструментарій дослідника, а з іншого — дозволяє покласти в основу аналізу взаємодію «машина-машина» (Machine-to-Machine Interaction, M2M), що зменшує як навантаження на персонал, так і рівень проблем, що пов'язані з так званним «людським фактором» [1–5].

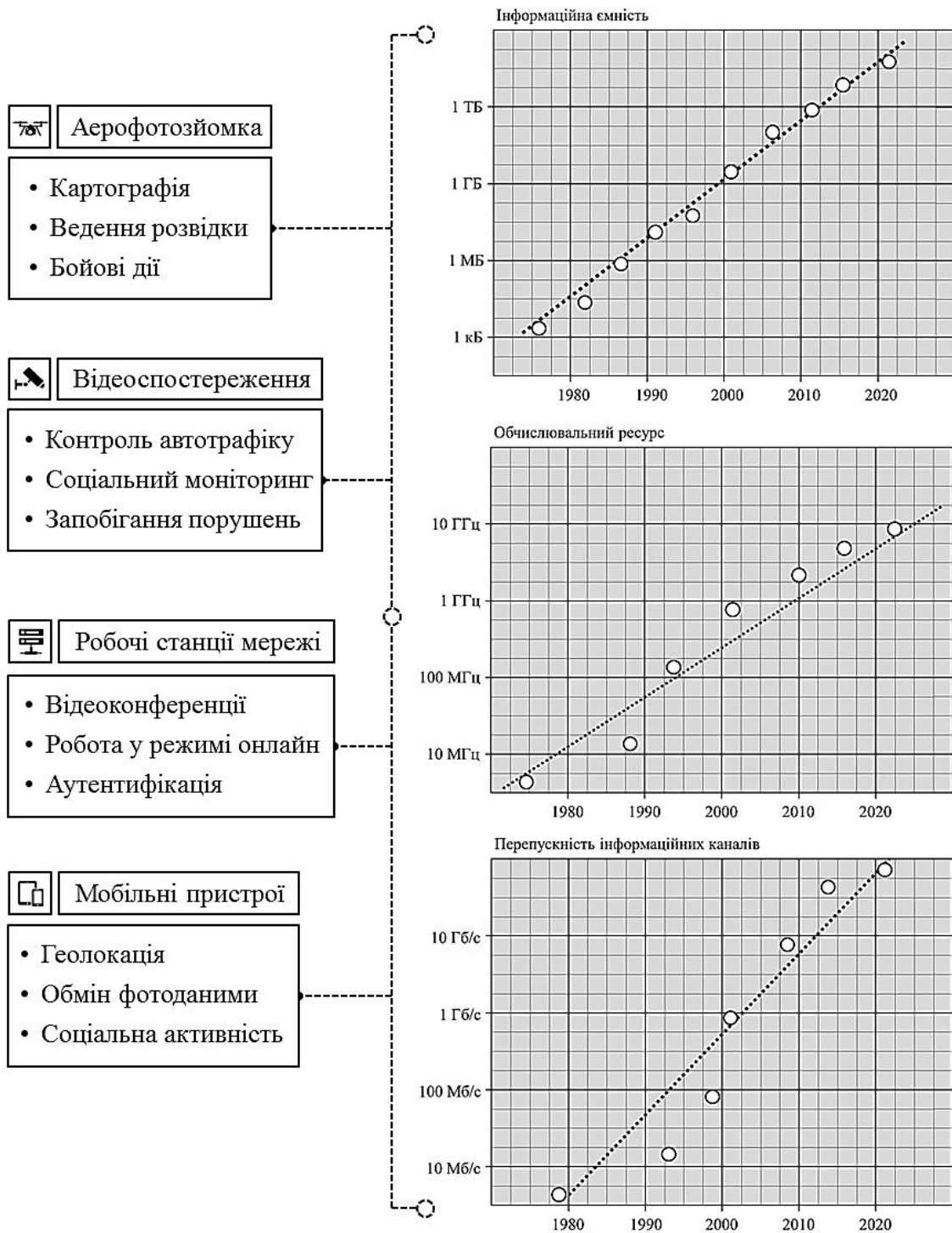


Рис. 1. Тенденції розвитку сучасних систем цифрової фотореєстрації

Аналіз галузей застосування засобів цифрової фотореєстрації дозволяє визначити основні вимоги до організації відповідних електронних пристроїв і систем. Найбільш очевидною галуззю є впровадження оптичного моніторингу, що на сьогоднішній день, завдяки широкому розповсюдженню компактних безпілотних пристроїв (автоматизованих дронів, а також дронів дистанційного керування), надає можливість суттєво розширити можливості картографії, розвідки та координування бойових дій. При цьому, зважаючи на обмеження на максимальний корисний вантаж літального пристрою, важливо зменшити загальну вагу системи фотореєстрації при збереженні показників роздільної здатності та відповідності кольоропередачі, що визначають якість аерофотозйомки. З іншого боку, при впровадженні систем відеоспостереження, що набули актуальності при вирішенні задач координування автомобільного трафіка, соціального моніторингу та запобігання правопорушень, більш важливим є можливість зменшити собівартість пристроїв фотореєстрації при збереженні зазначених цільових показників. Протягом останніх двох десятиріч засоби цифрової зйомки також вбудовуються до комп'ютерних систем, що на час пандемії, військового стану, а також відповідно до сучасних вимог з оптимізації робочого процесу, дозволяє проводити в онлайн-режимі відеоконференції та ідентифікувати на автоматичному рівні користувачів мережевого сервісу за біометричними даними. У мобільних пристроях (смартфонах, планшетах, окулярах доповненої реальності) мініатюризовані засоби цифрової фотореєстрації є також ефективним засобом геолокації, швидкого обміну даними та рекреаційної соціальної активності.

Збільшення якості цифрової фотореєстрації відповідно до зазначених цільових показників вирішується через ускладнення оптичної системи та збільшення фоточутливості елементів фотоматриці, тобто наборів фотоелектричних перетворювачів, що відповідають окремим колірним каналам. Слід зазначити, що ускладнення оптичної системи суттєво обмежується вимогами на мініатюризацію та здешевлення системи фотореєстрації, у той час як фундаментальною проблемою низької ефективності фотоматриці є невідповідність видимого спектра, в межах якого типово відбувається фотореєстрація, та спектра поглинання фотоелектричних перетворювачів, що зазвичай базується на підкладці з полі- та монокристалічного кремнію, які характеризуються поглинанням у інфрачервоному діапазоні та довгохвильовій частині видимого спектра. В рамках даного дослідження для нівелювання зазначеної невідповідності пропонується застосувати підхід, що використовується в рамках вирішення задачі збільшення ККД сонячних батарей, а саме нанесення на поверхню фотоелектричного перетворювача фотолюмінесцентного покриття, матеріал якого характеризується достатнім значенням стоксового зсуву для узгодження спектра сонячного випромінювання та спектра поглинання підкладки на основі полі- та монокристалічного кремнію [6–8]. Особливістю застосування цього підходу по відношенню до збільшення фоточутливості системи фотореєстрації є необхідність синтезувати набір люмінофорів, спектри поглинання яких мають бути узгоджені зі спектрами пропускання світлофільтрів колірних каналів фотоматриці, а стоксів зсув відповідати (у межах допустимої похибки) різниці між піком поглинання фотоелектричного перетворювача та піком пропускання відповідного світлофільтра. Але водночас можна зазначити, що вимоги до стабільності оптичних характеристик фотолюмінесцентного шару за умов трива-

лого та інтенсивного сонячного опромінення в даному випадку суттєво знижуються, що розширює можливості для синтезу відповідного класу люмінофорів.

Отже, метою дослідження є розробка комплексної методики застосування люмінофорів при побудові фотоматриці фотоелектричних перетворювачів, що надає можливість нівелювати розбіжність між спектрами пропускання світлофільтрів колірних каналів і спектром поглинання кремнієвої підкладки. При цьому в ролі цільових показників виступають fotocутливість фотоелементів і колірний баланс, що визначаються відповідно до колірної схеми фотоматриці і оптичних параметрів фотолюмінесцентного покриття та кремнієвої підкладки фотоелектричних перетворювачів.

Аналіз вимог до матеріалу покриття елементів фотоматриці

Для кількісної оцінки цільових показників необхідно провести формалізацію запропонованого підходу та побудувати математичну модель процесу фотореєстрації елементами фотоматриці з шаром люмінофору. Основними елементами моделі є функція поглинання фотоелектричного перетворювача A для підкладок на основі полі- та монокристалічного кремнію (позначення P і M , відповідно) та функції пропускання світлофільтрів T_i , $i \in [1, I]$, де I — кількість колірних каналів. Єдиним аргументом даного набору функцій виступає довжина хвилі випромінювання λ . Очевидно, що виразити зазначені функції в аналітичному вигляді неможливо, тому їх пропонується представити як набори даних, де λ відповідає дискретне значення функції. Введемо наступні позначення:

— мінімальне значення функцій поглинання та пропускання, що є актуальним для аналізу в рамках математичної моделі як A_{\min} і T_{\min} , а також відповідні їм значення довжин хвиль $\lambda_{A\downarrow}$ та $\lambda_{T\downarrow}$;

— максимальне значення функцій поглинання та пропускання, що відповідають основним пікам як A_{\max} і T_{\max} , а також відповідні їм значення довжин хвиль $\lambda_{A\uparrow}$ та $\lambda_{T\uparrow}$;

— діапазони довжин хвиль випромінювання, в рамках яких визначаються функції $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ для кожної із функцій, що визначаються відповідно A_{\min} і T_{\min} ;

— мінімальний крок визначення довжини хвилі $\Delta\lambda$, що визначається відповідно до максимальної кривини функцій $\{A\}$ і $\{T_i\}$ та початкових вимог до точності математичного моделювання;

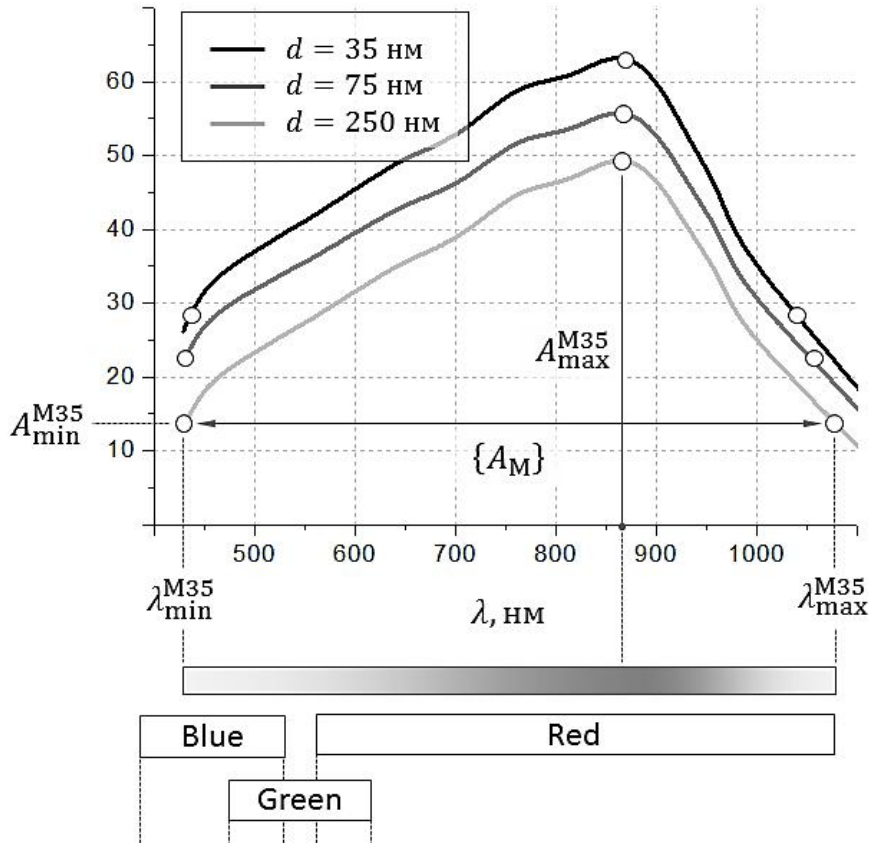
— двовимірні матриці, на основі яких формалізуються набори функцій $\{A\}$ та $\{T_i\}$, що включають у себе три рядки (показники функцій поглинання та пропускання, довжина хвилі випромінювання та товщина кремнієвої підкладки d), а також стовпчики у кількості $((\lambda_{\min} - \lambda_{\max}) / \Delta\lambda)$.

Співвіднесення проміжків $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ і значень $\lambda_{A\downarrow}$ та $\lambda_{T\downarrow}$ дозволяє визначити оптимальні параметри для люмінофорів, що використовуються як покриття фотоелементів, зокрема:

— оптимальні значення піку поглинання люмінофору λ_{LA} та допустимий діапазон значень $[\lambda_{LA\downarrow}, \lambda_{LA\uparrow}]$ відповідно колірних каналів;

— оптимальне значення стоксового зсуву $\Delta\lambda_0$ та допустимий діапазон значень $[\Delta\lambda_{\downarrow}, \Delta\lambda_{\uparrow}]$ відповідно колірних каналів.

Поглинання монокристалічної кремнієвої підкладки, %



Спектри пропускання RGB-каналів

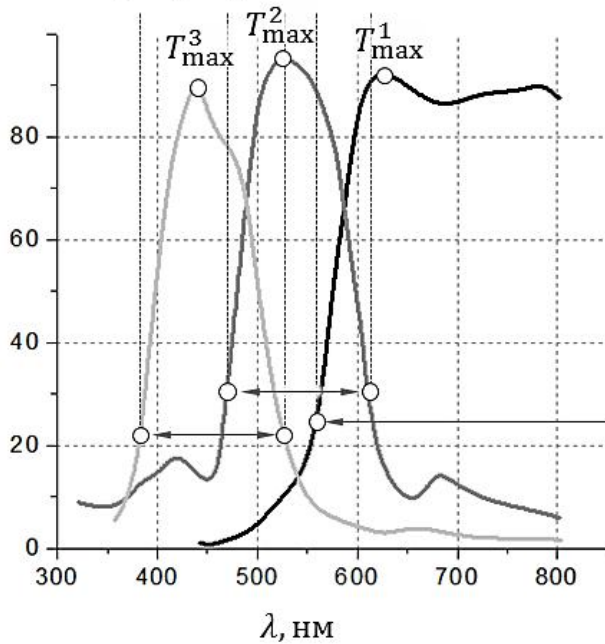
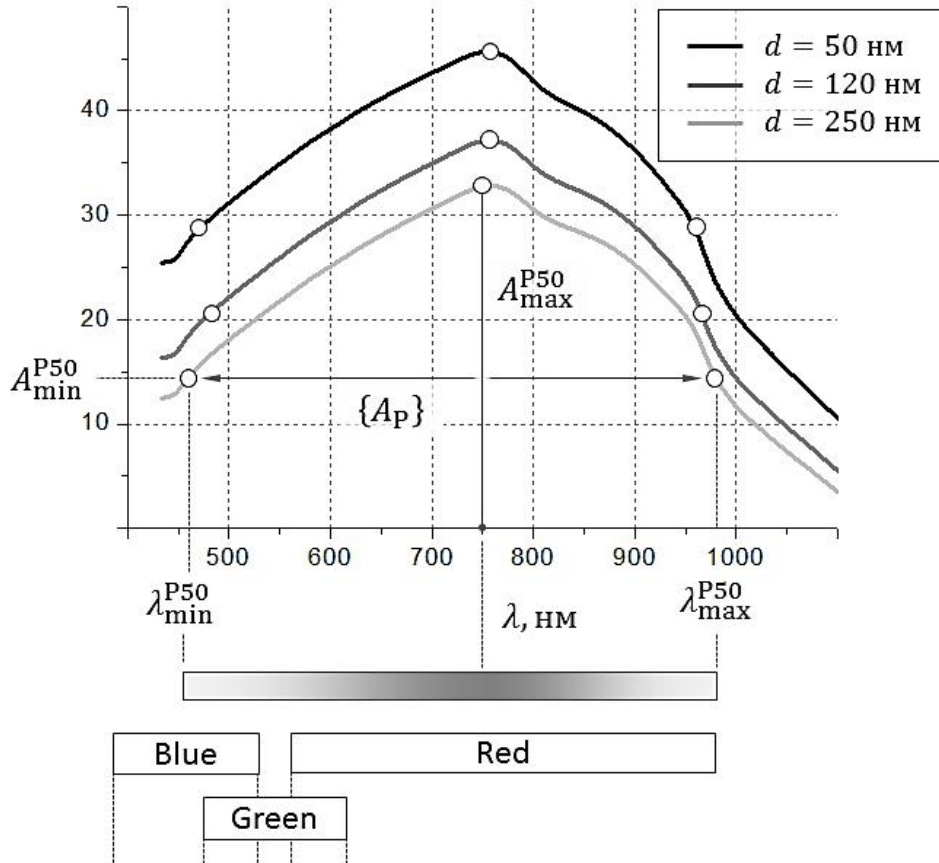


Рис. 2. Співвіднесення спектрів поглинання підкладок фотоматриці на основі монокристалічного кремнію зі спектрами пропускання RGB-світлофільтрів

Поглинання полікристалічної кремнієвої підкладки, %



Спектри пропускання RGB-каналів

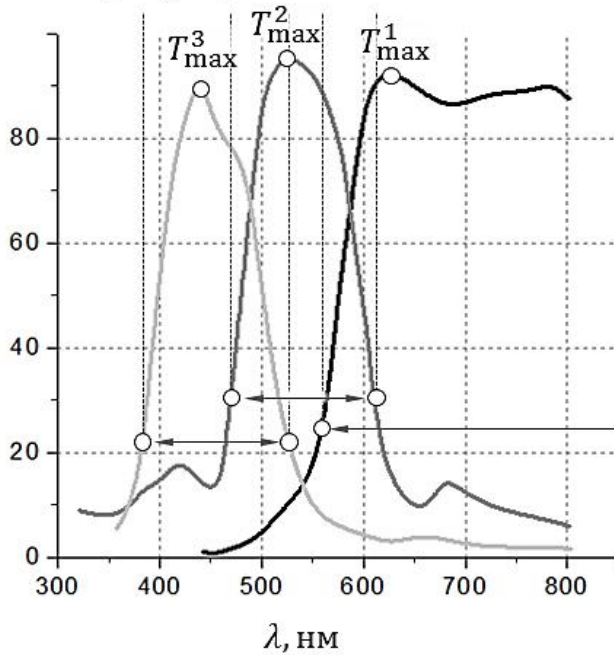


Рис. 3. Співвіднесення спектрів поглинання підкладок фотоматриці на основі полікристалічного кремнію зі спектрами пропускання RGB-світлофільтрів

Співвіднесемо спектри пропускання світлофільтрів колірної схеми RGB (червоний-зелений-синій) зі спектром поглинання елементів фотоматриці на основі монокристалічного кремнію (товщина підкладки $d = 35, 75$ і 250 нм) і полікристалічного кремнію (товщина підкладки $d = 50, 120, 250$ нм), як це показано на рис. 2 та 3, відповідно. Як можна побачити, хоча спектри поглинання частково перетинаються для всіх колірних каналів, пік поглинання лежить поза діапазонами пропускання світлофільтрів, причому коефіцієнт поглинання при переході від червоного колірного каналу до синього зменшується вдвічі. Характерно, що хоча спектр поглинання підкладки полікристалічного кремнію більшою мірою відповідає спектру пропускання світлофільтрів колірної схеми RGB, ефективність відповідних підкладок у півтора рази менше ніж ефективність підкладок на основі монокристалічного кремнію, що видно при співвіднесенні графіків на рис. 2 та 3. Зменшення товщини пластинки також, хоча і частково, збільшує коефіцієнт поглинання для всього спектра, при цьому не змінює саму форму кривої, що не дозволяє вважати такий підхід зі збільшення фоточутливості ефективним.

Це вказує на важливість застосування фотолюмінесцентного покриття з поглинанням у діапазонах $[380 \text{ нм}, 530 \text{ нм}]$ для синього каналу, $[460 \text{ нм}, 610 \text{ нм}]$ для зеленого каналу $[560 \text{ нм}, 800 \text{ нм}]$ та відповідними значеннями стоксового зсуву залежно від типу підкладки: монокристалічна підкладка — $[350 \text{ нм}, 450 \text{ нм}]$, $[320 \text{ нм}, 420 \text{ нм}]$ і $[50 \text{ нм}, 150 \text{ нм}]$; полікристалічна підкладка — $[460 \text{ нм}, 560 \text{ нм}]$, $[430 \text{ нм}, 530 \text{ нм}]$ і $[160 \text{ нм}, 260 \text{ нм}]$.

Синтез матеріалу покриття елементів фотоматриці

Як модельний об'єкт для розрахунків виступили піразолінові фотолюмінесцентні барвники [9–12]. Перевагою даного набору люмінофорів є високий квантовий вихід (quantum yield, QY) фотолюмінесценції $\kappa_{\text{QY}} = 75\text{--}80\%$, поглинанням у ближньому ультрафіолетовому та видимому діапазонах, а також достатньо великою шириною стоксового зсуву $\lambda_{\text{LA}} \in [140 \text{ нм}; 270 \text{ нм}]$. Керування характеристиками люмінофору (спектр поглинання та ширина стоксового зсуву) на етапі синтезу відбувається через вибір базового барвника (базовий піразоліновий барвник або барвник оранжево-червоний) та домішок (поліметилметакрилат у кількості $k_{\text{PM}} \in [0\%, 10\%]$ від загальної маси та полістирол у кількості $k_{\text{PS}} \in [0\%, 10\%]$ від загальної маси). Наноструктурування синтезованого люмінофору через впровадження молекул барвника у субмікронні та нанорозмірні пори білого цеоліту та застосування лазерного термічного відпалу, що характеризується кількістю білого цеоліту $k_{\text{WZ}} \in [5\%, 30\%]$ від загальної маси та часом проведення процедури термічного відпалу, дозволяє збільшити головний пік фотолюмінесценції на 5–11%, але водночас, залежно від часу опромінення зразка $t \in [t_{\text{min}}, t_{\text{max}}]$, призводить до зменшення пропускання люмінофора та часткового знебарвлення, що впливає на цільові показники [10–14].

Цільовий показник фоточутливості для кожного із колірних каналів, таким чином, визначається через інтегрування функцій поглинання люмінофору A_L , фотолюмінесценції P_L та поглинання кремнієвої підкладки A_{Si} (представлені двовимірними матрицями та визначені експериментально з кроком $\Delta\lambda$) чисельними методами у межах $[\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}]$. Для збереження колірного балансу показник фото-

чутливості нормалізується як S_0 по колірному каналу з найменшою фоточутливістю, що здійснюється шляхом зменшення відсотка люмінофору в покритті для колірних каналів з більшою фоточутливістю.

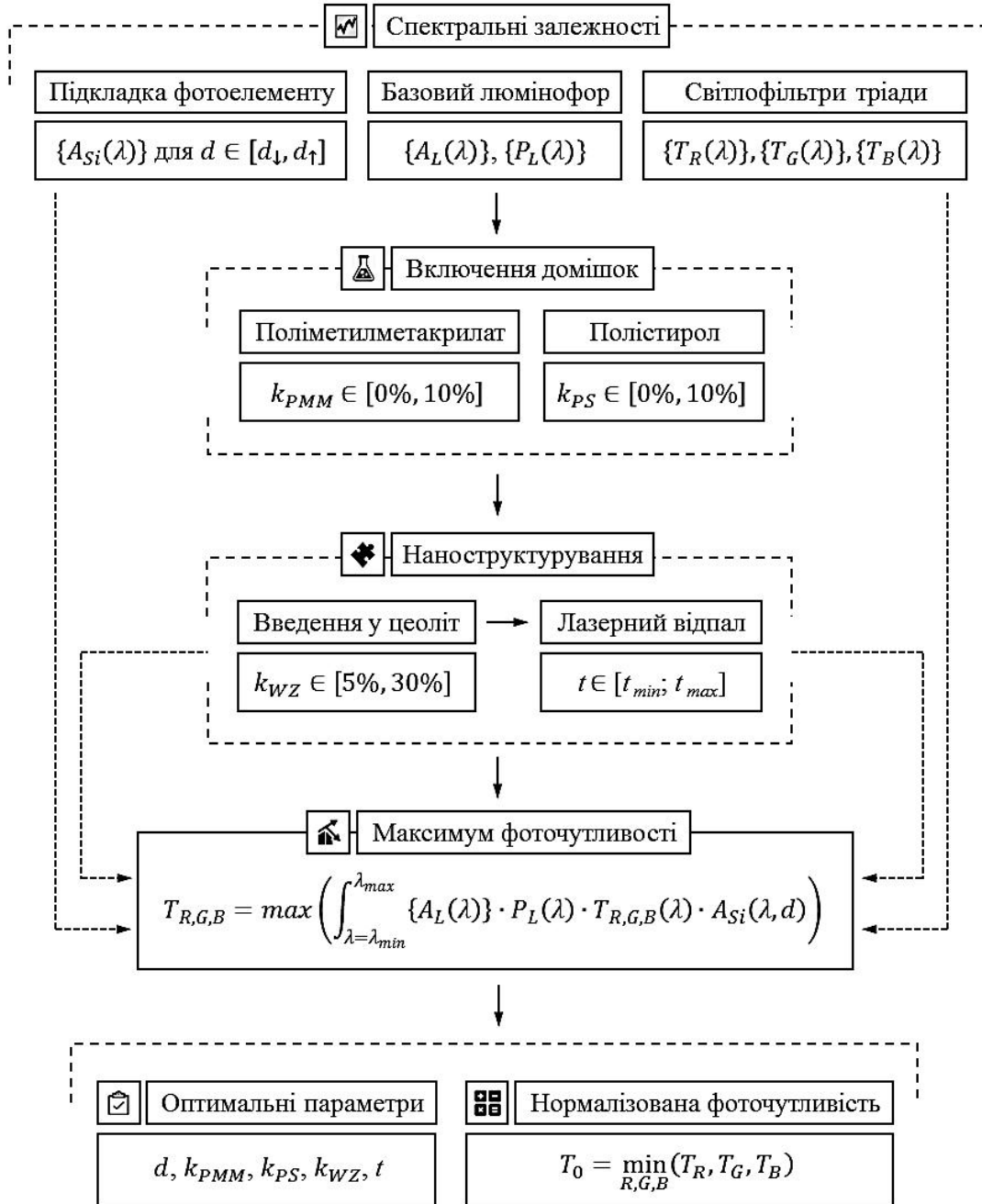


Рис. 4. Методика визначення оптимальних параметрів фотолюмінесцентного шару покриття елементів фотоматриці на основі цільових показників

Загальну схему визначення оптимальних параметрів люмінофору покриття та показника фоточутливості нормалізованого відповідно до колірних каналів показано на рис. 4. На першому етапі визначаються оптичні характеристики крем-

нієвої підкладки (спектр поглинання залежно від типу кремнію та товщини підкладки), спектри пропускання світлофільтрів колірних каналів (червоного, зеленого та синього), а також оптичні характеристики базових фотолюмінесцентних барвників (спектри поглинання та спектри фотолюмінесценції). Далі визначається зміна спектрів поглинання та спектрів фотолюмінесценції внаслідок домішок поліметилметакрилату та полістиролу. Етап наноструктурування люмінофору полягає у визначенні відповідних спектрів після включення молекул барвника до матриці субмікронних пор білого цеоліту та фіксованого часу лазерного відпалу синтезованого люмінофору. У результаті задача пошуку оптимальних характеристик люмінофору зводиться до математичної задачі пошуку глобального максимуму цільової функції фоточутливості фотоелемента. Надалі методика може бути розширена для інших колірних схем, зокрема переходу від тріад до тетрад фотоелементів і включення таких колірних каналів як жовтий, ціановий, маджента, а також білий, що охоплює весь видимий спектр і слугує додатковим способом збільшення фоточутливості фотоматриці.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було розроблено комплексну методику збільшення ефективності роботи системи цифрової фотореєстрації шляхом застосування наноструктурованого фотолюмінесцентного покриття, що дозволяє узгодити спектр поглинання фотоелектричного перетворювача та спектри пропускання світлофільтрів відповідно до заданої колірної схеми.

Зокрема, було запропоновано:

— базовий підхід, що дозволяє збільшити фоточутливість і колірний баланс фотоматриці шляхом нанесення на поверхню фотоелементів шару люмінофору з високим квантовим виходом фотолюмінесценції, а також фіксованим значенням стоксового зсуву та піку поглинання;

— методику синтезу люмінофорів покриття, яка базується на застосуванні органічних піразолінових барвників, уведення домішок поліметилметакрилату та полістиролу, що дозволяє проводити контрольовану зміну спектрів поглинання та фотолюмінесценції, а також наноструктурування люмінофору через включення молекул барвника у субмікронні пори цеоліту;

— методику визначення оптимальних параметрів фотолюмінесцентного шару покриття елементів фотоматриці на основі цільових показників фоточутливості та колірного балансу.

Подяка

Автор висловлює глибоку подяку співробітникам Інституту органічної хімії НАН України за допомогу в аналізі процесів, що відбуваються при наноструктуруванні органічних піразолінових барвників шляхом введення домішок білого цеоліту та застосування процедури лазерного відпалу.

1. Zou J., Li Z., Guo Z. & Hong D. Super-Resolution Reconstruction of Images Based on Microarray Camera. *Computers, Materials & Continua*. 2019. 60(1). P. 163–177.

2. Rowcliffe J.M., Carbone C., Jansen P.A., Kays R. & Kranstauber B. Quantifying the sensitivity of camera traps: an adapted distance sampling approach. *Methods in Ecology and Evolution*. 2011. 2(5). P. 464–476.
3. Ye H.Y.H., Gao, Z.G.Z., Qin, Z.Q.Z., & Wang, Q.W.Q. Near-infrared fundus camera based on polarization switch in stray light elimination. *Chinese Optics Letters*. 2013. 11(3). P. 031702–031705.
4. Prabhakara R.S., Wright C.H.G. & Barrett S.F. Motion Detection: A Biomimetic Vision Sensor Versus a CCD Camera Sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2012. 12(2). P. 298–307.
5. Li L., & Xu L. A Linear Camera Calibration Applying in Servo Mechanical Arm System with One Camera. *Advanced Materials Research*. 2013. **748**. P. 704–707.
6. Kryuchyn A.A., Belyak Ie.V. Development of nanostructured luminophor coating for broadening of solar cell absorption spectrum. *Proc. SPIE: Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion*. 2014. **9178**. P. 91780R–91787R.
7. Belyak Ie.V., Manko D.Yu., & Kryuchyn A.A., Design of Nanostructured Luminophor Coating for a Multi-junction Solar Cell. *Регістрація, зберігання і оброб. даних*. 2013. Т. 15. № 3. P. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2013.15.3.103426>.
8. Debije, M., Verbunt, M. Thirty Years of luminescent solar concentrator research: Solar energy for the built environment. *Advanced Energy Materials*. 2011. No. 2(1). P. 12–35.
9. Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Belyak Ie.V., Lapchuk A.S. Multi-Photon Microscopy and Optical Recording. Kyiv: Akadempriodyka, 2016. 156 p.
10. Petrov V.V., Zichun L., Kryuchyn A.A., Shanoylo S.M., Fu M., Belyak Ie.V. Long-term storage of digital information. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. 148 p.
11. Petrov V.V., Belyak Ie.V., Kryuchyn A.A. & Shikhovets O.V. Analysis of Methods for Creating Media for Long-Term Data Storage. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2020. P. 238–241.
12. Belyak Ie.V., Petrov V.V., Manko D.Yu. & Kryuchyn A.A. Synthesis of recording medium for multilayer photoluminescent disc. *Advances in Materials Science and Applications*. 2014. 3(1). P. 6–12.
13. Anikin P.S. & Belyak, Ie.V. Development of multispectral recording media for multilayer photoluminescent information recording. *Electronics and Information Technologies*. 2019. 12. P. 3–13.
14. Belyak Ie.V., & Butenko L.I. Development of fluorescent multilayer disc structure. *SPIE Proceedings*. 2011. P. 10–15.

Надійшла до редакції 24.04.2022