

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.179>

УДК 620.91:535.37:678.7

С.В. Ніколаєв¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7073-0576>

В.В. Пожар¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2472-0394>

М.І. Дзюбенко^{1,2}, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0577-5227>

К.С. Ніколаєв¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8646-945X>

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
(ROR: <https://ror.org/03v48ps49>), Харків, Україна,

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
(ROR: <https://ror.org/03ftejk10>), Харків, Україна

E-mail: svnikolaev@gmail.com; pozharvv@gmail.com;

toreodors949@gmail.com; dzubenkom1@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНО-ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПОЛІУРЕТАНОВИХ МАТРИЦЯХ, АКТИВОВАНИХ БАРВНИКОМ

Предмет і мета роботи. Предметом дослідження є процеси спектральної трансформації широкопсмугового випромінювання в поліуретанових матрицях, активованих органічним барвником. Метою роботи є оцінка перспектив використання прозорого двокомпонентного поліуретану як матричного матеріалу для люмінесцентних перетворювачів спектра на основі барвників. Задля цього було експериментально досліджено залежність ефективності спектральної трансформації випромінювання від спектральних і оптичних характеристик поліуретанових матриць.

Методи та методологія. Дослідження проводилися на матрицях з товщинами активованого шару 1 та 5 мм і з різним вмістом барвника Родамін 6G. Як тверда основа використовувався двокомпонентний поліуретановий компунд CrystalClear 204. Методика досліджень полягала в застосуванні спектрофотометричних вимірювань для аналізу спектрально-люмінесцентних характеристик активних середовищ матриць і оцінки ефективності спектральної трансформації широкопсмугового випромінювання, яку забезпечують ці матриці. Кількісно ефективність спектральної трансформації визначалася через коефіцієнт трансформації, що дорівнював відношенню інтегральних інтенсивностей випромінювання на вході та виході матриць у спектральному діапазоні люмінесценції.

Результати. Установлено, що матриці з тонким активованим шаром (1 мм) здатні забезпечувати підвищення енергії випромінювання. У цьому випадку має місце оптимальна концентрація барвника, за якої ефективність спектральної трансформації максимальна. При подальшому збільшенні концентрації барвника ефективність спектральної трансформації знижувалась унаслідок впливу ефекту самопоглинання, який притаманний середовищам на молекулах барвників з малим стоксовим зсувом. На відміну від матриць з тонким шаром активованого середовища, фототрансформуюча здатність матриць завтовшки 5 мм виявилася незадовільною. Це пов'язано зі зростанням загального рівня втрат випромінювання в процесі його поширення в середовищі об'ємного зразка. За таких умов ефективність спектральної трансформації знижується до рівня, коли вихідна інтенсивність випромінювання стає меншою за вхідну.

Цитування: Ніколаєв С.В., Пожар В.В., Дзюбенко М.І., Ніколаєв К.С. Спектрально-оптичні характеристики та ефективність люмінесцентного перетворення випромінювання в поліуретанових матрицях, активованих барвником. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 3. С. 179–189. <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.179>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

Висновок. Отримані результати свідчать про доцільність використання тонкоплівкових поліуретанових матриць як основи для люмінесцентних перетворювачів спектра. Водночас для підвищення ефективності об'ємних систем необхідно вирішити проблему втрат випромінювання шляхом покращення оптичної якості полімерного середовища та використання люмінофорів із більшим стоксовим зсувом.

Ключові слова: люмінесцентний перетворювач спектра, поліуретан, Родамін 6G, спектральна трансформація, люмінесцентні сонячні концентратори.

Вступ

Зростання глобального попиту на відновлювані джерела енергії та необхідність зменшення вуглецевих викидів стимулюють інтенсивний розвиток альтернативних фотоелектричних технологій. Традиційні кремнієві сонячні елементи, попри їхню високу ефективність, мають низьку обмежень, пов'язаних із вартістю матеріалів, енергозатратністю виробництва та складністю інтеграції у міське середовище.

Одним із визначальних чинників, що обмежують коефіцієнт корисної дії сучасних фотоелектричних перетворювачів, є спектральні втрати. Їхня природа пов'язана з невідповідністю між спектральним розподілом сонячного випромінювання та спектром поглинання активного шару сонячного елемента. Зокрема, ультрафіолетові фотони часто використовуються неефективно через поверхневу рекомбінацію носіїв заряду, тоді як інфрачервоне випромінювання з енергією, нижчою за ширину забороненої зони напівпровідника, практично не поглинається.

Для кремнієвих сонячних елементів сумарні спектральні втрати можуть перевищувати 55 % енергії падаючого сонячного спектра. Отже, модифікація спектрального складу випромінювання з метою узгодження його з характеристиками поглинання фотоактивного матеріалу є перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності [1–5].

Одним із технологічно доступних методів спектральної модифікації є використання люмінесцентного перетворювача спектра (ЛПС). Принцип його дії полягає у поглинанні фотонів у діапазонах, де квантова ефективність сонячного елемента є низькою, та їх повторному випромінюванні в області енергій, ближчій до ширини забороненої зони напівпровідника. Таким чином, відбувається спектральне «зміщення» випромінювання до діапазону, в якому генерація електрон-діркових пар відбувається з вищою імовірністю.

Конструктивно ЛПС являє собою шар матеріалу з люмінесцентними властивостями, нанесений або безпосередньо на поверхню фотоелектричного елемента, або на поверхню прозорої матриці, в якій за рахунок повного внутрішнього відбиття світло утримується всередині та спрямовується до торцевих поверхонь, де розміщені фотоелектричні перетворювачі. В останньому випадку мова йде про оптичну систему, яка називається планарним плівковим люмінесцентним сонячним концентратором (ЛСК). Його принцип роботи дозволяє ефективно збирати як пряме, так і розсіяне випромінювання без використання механічних систем орієнтації, що робить ЛСК особливо привабливими для будівельно-інтегрованої фотоелектрики та великоформатних напівпрозорих енергогенерувальних поверхонь. Зазначимо, що окрім плівкових, існують ще і об'ємні ЛСК, які являють собою люмінесцентні матриці, в котрих люмінесцентні центри рівномірно розподілені по об'єму. В об'ємних ЛСК поглинання, випромінювання та поширення люмінесцентного світла відбуваються в одному середовищі. Така конфігурація є простою з технологічної точки зору, проте супроводжується значними втратами, пов'язаними з повторним поглинанням люмінесценції, розсіянням і обмеженою керованістю оптичного шляху фотонів [6–12].

Одними з перших і найбільш досліджених люмінофорів для ЛПС і ЛСК стали органічні барвники [13–15]. Вони характеризуються високими коефіцієнтами поглинання та можливістю тонкого налаштування спектральних характеристик, проте водночас є схильними до фотодеградації, чутливими до впливу кисню та екстремальних температур. З цієї причини ефективність і довговічність фототрансформуючого шару значною мірою визначаються властивостями прозорої твердої основи, яка слугує носієм люмінесцентних центрів, а в об'ємних ЛСК одночасно забезпечує хвилевідне поширення світла.

Зазвичай для створення фототрансформуючих покриттів і матриць ЛСК застосовуються

полімерні матеріали [5, 6, 16, 17]. Традиційно для виготовлення об'ємних матриць використовують поліметилметакрилат (РММА) або полікарбонат (РС) через їхню добру оптичну прозорість та технологічність. Однак ці полімери з технологічних міркувань менш придатні для використання як поверхневі фототрансформуючі покриття. До того ж РММА схильний до механічної крихкості та деградації під впливом ультрафіолетового випромінювання, тоді як РС може зазнавати фотожовтіння та утворення внутрішніх напружень за тривалої експлуатації на відкритому повітрі. Це зумовило потребу в пошуку альтернативних полімерних систем. До переліку полімерів, випробуваних як тверда основа, можна віднести епоксидні та акрилатні смоли, силікатні золь-гель-матриці, органо модифіковані силікати (ORMOSIL). Перспективними матеріалами також можна вважати фторполімери, циклоолефінові полімери (COP/COC) та поліуретани (PU) [8, 9, 16–23]. У цьому переліку саме PU викликають особливу увагу, оскільки вони поєднують оптичну прозорість із високою механічною міцністю та широкими можливостями молекулярного дизайну.

Однак на теперішній час прозорі поліуретани залишаються малодослідженим класом матричних матеріалів, що пояснюється радше історичним фокусом на РММА та РС, ніж відсутністю відповідних матеріалів. Про це свідчить досить обмежена кількість наукових робіт, присвячених дослідженням можливості застосування PU для створення матриць ЛПС і ЛСК. До того ж результати цих досліджень мають скоріше академічний, ніж прикладний характер, оскільки при проведенні досліджень у цих роботах використовувались унікальні за складом PU системи, синтезовані в лабораторних умовах. Це значно обмежувало подальше масштабування отриманих результатів, унаслідок чого знижувало їх практичну цінність.

Для вирішення проблеми практичної реалізації можливості створення поліуретанових фототрансформуючих елементів для сонячної енергетики в даній роботі запропоновано в якості поліуретанової основи використовувати промислово виготовлені поліуретанові системи. Така можливість обумовлена тим, що останнім часом прогрес у промисловому виробництві поліуретанів привів до появи прозорих PU ком-

паундів, зокрема двокомпонентних (2К) систем, які спеціально розробляються для лиття, заливання та формування прозорих об'ємних виробів і покриттів. Двокомпонентні поліуретанові системи (2К-PU) дозволяють вводити люмінесцентні барвники, квантові точки або молекулярні комплекси безпосередньо на стадії формування матриці, забезпечуючи їх рівномірний розподіл та знижуючи агрегацію. Це робить дослідження таких систем особливо актуальними в контексті розвитку тонкоплівкових, планарних та архітектурно інтегрованих ЛСК на органічних барвниках. Вочевидь, що на першому етапі досліджень конкретної PU системи особлива увага повинна бути приділена вивченню залежності ефективності спектральної трансформації ширококутового випромінювання від товщини шару активного середовища ЛПС, а також від його спектральних і оптичних характеристик. У цій роботі були проведені відповідні дослідження для матриць, виготовлених з промислового 2К-PU компаунду *CrystalClear 204 (Smooth-On, США)*, активованого барвником Родамін 6G.

1. Матеріали і методи дослідження

Поліуретан *CrystalClear 204* — це 2К-PU система, яка належить до так званих прозорих ливарних компаундів, вироби з яких можуть бути виготовлені шляхом заливання суміші вихідних компонентів в об'ємні форми або на певні поверхні. Така технологія є перспективною для виготовлення матриць ЛСК. Важливою якістю цього PU є оптична прозорість у видимому діапазоні оптичного спектра. Крім того, перевагою цього компаунду є здатність полімеризуватися за кімнатної температури. Це зменшує ризик термічної деградації люмінофорів, введення яких необхідне для створення активних середовищ фототрансформуючих пристроїв. До того ж поліуретану *CrystalClear 204* притаманна досить висока механічна міцність. Наведемо відповідні технічні характеристики, надані виробником:

- твердість по Шору, шкала D — 80 од.;
- модуль пружності: при розтягуванні — 594.6, при стисканні — 303.37 МПа;
- модуль еластичності — 1263.1 МПа;
- показник заломлення — 1.491.

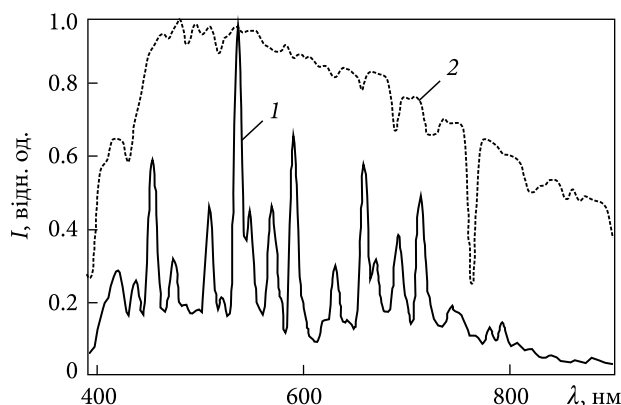


Рис. 1. Спектри випромінювання: 1 — Хе-лампа; 2 — сонячне випромінювання

Зазначимо, що *PU CrystalClear 204* раніше успішно використовувався для виготовлення активних елементів твердотільних лазерів на барвниках і при цьому була продемонстрована можливість введення в цей поліуретан низки барвників різних класів [24].

Як люмінесцентна компонента матриць використовувався барвник Родамін 6G. Він входить до переліку барвників, які добре інтегруються в *PU* середовище, маючи високий квантовий вихід і великий коефіцієнт молярної екстинкції.

Для проведення експериментів були виготовлені два набори *PU* матриць. В один з наборів входило чотири матриці, цілком відлиті з активованого барвником поліуретану, і ще одна матриця, відлита з незабарвленого *PU* компаунду. Вони були виготовлені у формі плоско-паралельних квадратних пластин завтовшки 5 мм за технологією прототипування. Майстер-моделлю для відливних форм слугувала скляна квадратна пластина завтовшки 5 мм, розміром 35 × 35 мм. Активовані зразки відрізнялися концентрацією введенного барвника (0.0125, 0.025, 0.05 і 0.1 мМ). Другий набір складався з п'яти круглих матриць, виготовлених у вигляді триплексів, в яких шар *PU* завтовшки 1 мм через калібровану прокладку був затиснутий між двох тонких скляних пластин. Як і в першому наборі, чотири матриці були виготовлені з різними концентраціями барвника (0.025, 0.05, 0.1 і 0.2 мМ), а один зразок містив лише незабарвлений поліуретан.

З метою характеристики виготовлених матриць були здійснені вимірювання власних спектрів поглинання і люмінесценції барвника в *PU* се-

редовищі, спектрів загальної екстинкції кожної з активованих барвником матриць, а також, окремо, спектрів екстинкції зразків матриць з шаром «чистого» поліуретану.

Усі спектральні дослідження проводилися за допомогою модернізованого спектрометричного комплексу КСВУ-23.

Для дослідження спектральних характеристик Родаміну 6G в *PU* використовувалась матриця з активним шаром завтовшки 1 мм і концентрацією барвника, яка дорівнювала 0.025 мМ. При цьому спектр поглинання вимірювався відносно зразка відповідної товщини, який містив незабарвлений поліуретан, а реєстрація спектра люмінесценції здійснювалась з передньої грані матриці, на яку під кутом $\sim 30^\circ$ спрямовувалось випромінювання лазерного діода ($\lambda = 532$ нм).

Експериментальна процедура досліджень залежності ефективності спектральної трансформації широкопугового випромінювання від концентрації барвника для матриць з різною товщиною шару активного середовища полягала в опроміненні зовнішньої поверхні кожної з матриць частково колімованим широкопуговим випромінюванням і реєстрації спектрального розподілу інтенсивності світла, яке виходило з їх протилежної грані. При цьому розмір ділянки, що опромінювалась, обмежувався діафрагмою діаметром 10 мм, а матриці розташовувались впритул до вхідної апертури монохроматора. Джерелом широкопугового випромінювання слугувала автомобільна лампа з ксеноновим (Хе) наповненням потужністю 35 Вт. Нормований спектр цієї лампи представлений на рис. 1. Для наочності на цьому ж рисунку наведено нормований спектр сонячного випромінювання (АМ 1.5G). Видно, що хоча спектр Хе-лампи має виразну лінійчасту структуру, обвідна крива, яка може бути проведена по максимумах інтенсивності окремих спектральних піків, досить подібна до спектральної кривої сонячного випромінювання.

2. Результати досліджень і їх аналіз

На рис. 2 представлені результати вимірювань спектральних характеристик компонентів активних середовищ матриць, а саме спектри по-

глинання та люмінесценції Родаміну 6G в PU середовищі (рис. 2, а) і спектральні залежності оптичної густини шарів «чистого» поліуретану завтовшки 1 і 5 мм (рис. 2, б). Максимуми наведених на рис. 2, а спектрів поглинання і люмінесценції Родаміну 6G розташовані на довжинах хвиль 533 і 546 нм, відповідно. Тобто смуга поглинання Родаміну 6G є доволі довгохвильовою, а стоксів зсув між спектрами поглинання і люмінесценції — малий. Такі спектральні властивості Родаміну 6G значно обмежують можливості практичного застосування цього барвника для виготовлення активних середовищ ЛПС. Однак використання Родаміну 6G на етапі попередніх досліджень цілком виправдане, враховуючи фотофізичну і хімічну стійкість його молекул, високий квантовий вихід, а також низьку вартість і доступність. При цьому доцільно обмежуватися аналізом випромінювання в межах спектрального діапазону люмінесценції барвника.

Представлені на рис. 2, б спектри оптичної густини зразків, які містять «чистий» поліуретан *CrystalClear* 204, демонструють, що цей компунд є практично прозорим для випромінювання з $\lambda > 400$ нм, але має інтенсивне поглинання в короткохвильовому діапазоні. У зв'язку з цим треба зазначити, що наявність власного поглинання поліуретану в УФ-діапазоні робить недоцільним введення в цей поліуретан барвників, смуги поглинання яких розташовані в діапазоні довжин хвиль $\lambda < 400$ нм. Однак це обмеження не можна вважати принциповим з точки зору можливості використання PU *CrystalClear* 204 для ЛСК і ЛПС, оскільки існують барвники, смуги поглинання яких розташовані в спектральному діапазоні від 400 до 600 нм і які здатні забезпечити ефективну роботу фототрансформатора. Наприклад, барвник *LumogenFRed* 305 вважається еталонним флуорофором для ЛСК і має смугу поглинання в межах від 400 до 600 нм з трьома піками — 440, 530 і 578 нм.

Наведені спектри також дозволяють кількісно оцінити величини оптичної густини шарів PU *CrystalClear* 204 з різною товщиною і демонструють, що шар завтовшки 5 мм має більшу оптичну густину, ніж зразок з шаром 1 мм. При цьому в спектральному діапазоні прозорості поліуретану співвідношення величин оптичної густини об'ємної і тонкої матриць перевищує

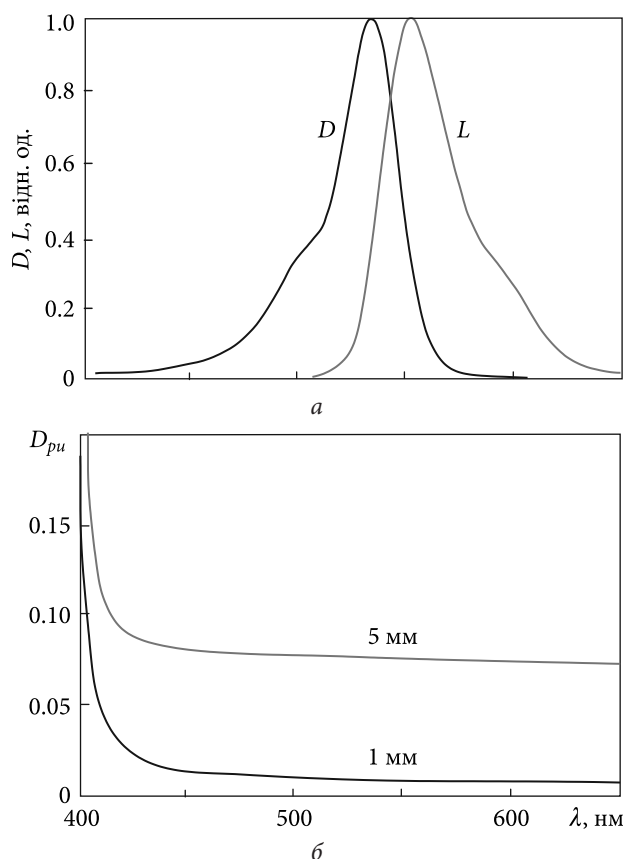


Рис. 2. Спектральні характеристики компонентів активного середовища матриць: а — спектри поглинання (D) і люмінесценції (L) Родаміну 6G в поліуретані; б — спектри оптичної густини шарів незабарвленого поліуретану (D_{pu}) завтовшки 1 і 5 мм

співвідношення їх товщин. Це може бути спричинено наявністю оптичних спотворень середовища об'ємного зразка, оскільки величина оптичної густини шару визначається не тільки поглинанням у молекулярній системі полімеру, а і розсіюванням випромінювання на локальних оптичних неоднорідностях середовища. Зазначимо, що причини виникнення і характер цих неоднорідностей детально досліджені в роботі [24]. У результаті було показано, що в процесі виготовлення об'ємних матриць з PU *CrystalClear* 204 на початковій стадії полімеризації можуть з'явитися оптичні спотворення (так звані «завилькуватості»), характер яких залежить від методу виготовлення зразка і його конфігурації.

Спільною характеристикою спектральних властивостей кожної з виготовлених матриць є спектр оптичної густини її середовища, виміряний відносно повітря. Результати таких ви-

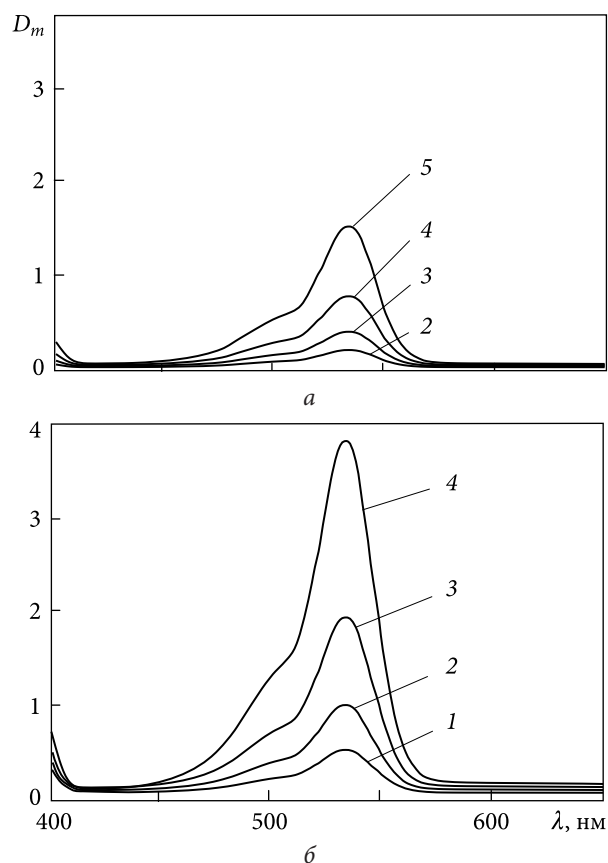


Рис. 3. Спектральні залежності оптичної густини D_m матриць з різною товщиною активного шару (*a* – 1 мм; *б* – 5 мм) для деяких значень концентрації C барвника: 1 – $C=0.0125$ мМ; 2 – $C=0.025$ мМ; 3 – $C=0.05$ мМ; 4 – $C=0.1$ мМ; 5 – $C=0.2$ мМ

мірювань для матриць з товщинами активного шару, які дорівнюють 1 і 5 мм, представлені на рис. 3, *a* і *б*, відповідно. Параметром для кожного сімейства спектральних кривих є концентрація барвника. Згідно з результатами вимірювань, максимальні величини оптичної густини активних середовищ матриць завтовшки 1 мм, залежно від концентрації барвника, становлять 0.21, 0.4, 0.76 і 1.52. Аналогічні величини для зразків завтовшки 5 мм дорівнюють 0.55, 1.0, 1.95 і 3.82. Порівняння цих величин з величинами оптичної густини шарів незабарвленого поліуретану відповідної товщини дозволяють зробити висновок, що в спектральному діапазоні інтенсивного поглинання барвника вплив власної екстинкції PU основи на загальну оптичну густину середовища є малим. Однак у спектральній смузі люмінесценції барвника, де його власна абсорбція різко зменшується, саме оптична густина основи

визначає величину оптичної густини активного середовища. Оскільки ступінь послаблення випромінювання, яке розповсюджується через середовище, залежить від його оптичної густини, то можна стверджувати, що в матрицях більшої товщини втрати випромінювання в спектральній смузі люмінесценції барвника будуть більшими, ніж в тонких матрицях.

Ефективність спектральної трансформації широкопсмугового випромінювання для кожної матриці визначалася за результатами п'яти послідовних вимірювань величин енергій опромінюючого і трансформованого світла в межах спектральної смуги люмінесценції барвника (від 570 до 640 нм). Процедура кожного вимірювання полягала в реєстрації спектрального розподілу інтенсивностей світла на вході і виході кожної з матриць. При цьому сканування спектрів здійснювалось з кроком 1 нм. Надалі, із застосуванням сплайн-апроксимації, набір цих дискретних даних перетворювався в безперервну спектральну криву, за якою шляхом чисельного інтегрування розраховувалася загальна енергія трансформованого світла. За результатами п'яти вимірювань знаходилися середні значення величин енергії випромінювання на вході (E_{in}) і виході (E_{out}) матриць, а також розраховувались абсолютні та відносні похибки цих вимірювань для значення довірчої імовірності $P = 0.95$.

Кількісно ефективність спектральної трансформації широкопсмугового випромінювання для кожної з матриць визначалася через коефіцієнт трансформації $\Delta E = E_{out} / E_{in}$. Результати обчислень подані на рис. 4 у вигляді графіків залежностей коефіцієнту трансформації ΔE від концентрації барвника (C) для матриць з активним шаром 1 і 5 мм. Зазначимо, що наведені на графіках довірчі інтервали розраховувались за методикою оцінки похибки непрямих вимірювань. Ці графіки демонструють, що за однакових концентрацій барвника величина коефіцієнта ΔE для матриць з різною товщиною шару активованого поліуретану суттєво відрізняється.

Для матриць з тонким шаром активного покриття (1 мм) при всіх концентраціях Родаміну 6G спостерігалось значення $\Delta E > 1$. Це вказує на низький рівень втрат випромінювання в спектральній смузі люмінесценції барвника. Отже, такі матриці здатні забезпечувати підвищення

енергії випромінювання. Водночас існує оптимальна концентрація барвника, за якої ефективність перевипромінювання максимальна. В умовах описуваного експерименту найбільша величина $\Delta E = 1.1$ була отримана на матриці з вмістом 0.1 мМ Родаміну 6G. При подальшому збільшенні концентрації барвника в активному середовищі спостерігалось зменшення величини ΔE . Причиною цього є ефект самопоглинання випромінювання в спектральній смузі люмінесценції, який притаманний середовищам на молекулах барвників з малим stokсовим зсувом, таких як Родамін 6G. Цілком очевидно, що втрати інтенсивності випромінювання, спричинені самопоглинанням, зростають при збільшенні оптичної густини барвника, яка пропорційна концентрації його молекул у середовищі. У зв'язку з цим треба зазначити, що наявність втрат випромінювання внаслідок самопоглинання в молекулярній системі барвника є однією з нагальних проблем, яка виникає при створенні ЛСК на органічних молекулах. Значно зменшити ці втрати можна лише шляхом використання барвників з великим stokсовим зсувом [1–3, 6, 13–15].

На відміну від матриць з тонким шаром активного середовища, фототрансформуюча здатність матриць завтовшки 5 мм виявилася незадовільною. Для всіх зразків цих матриць $\Delta E < 1$. Тобто випромінювання, яке розповсюджується через шар активного середовища завтовшки 5 мм, зазнає настільки значних втрат, що його інтенсивність стає меншою за інтенсивність опромінюючого світла. Причинами зростання втрат випромінювання в активних середовищах об'ємних матриць є більша, ніж у тонких матрицях, екстинкція PU основи і більший рівень втрат, викликаних самопоглинанням. Водночас, навіть при найменшій концентрації барвника, втрати випромінювання внаслідок самопоглинання в шарі завтовшки 5 мм виявляються настільки значними, що подальше збільшення концентрації барвника призводить лише до монотонного зниження величини ΔE . Як зазначалося вище, вплив цього ефекту можна знизити тільки шляхом використання барвників з великим stokсовим зсувом.

Разом з тим, негативний результат щодо фототрансформуючої ефективності зразків об'ємних матриць, виготовлених у рамках цього експерименту, не можна вважати достатньою підставою для заперечення принципової можливості створення ефективних об'ємних PU матриць для ЛПС і ЛСК. Для вирішення цього питання потрібні подальші дослідження, особливо щодо здатності об'ємних поліуретанових матриць каналізувати спектрально-трансформоване випромінювання до торцевих поверхонь матриць за рахунок повного внутрішнього відбиття з урахуванням можливого впливу на цю здатність оптичних спотворень середовища. Хоча ця задача не розглядалася в рамках цієї роботи, проте слід навести деякі міркування стосовно характеру впливу оптичних завивкуватостей поліуретанового середовища на здатність матриць каналізувати випромінювання. Можна припустити, що рефракція випромінювання на оптичних завивкуватостях може сприяти збільшенню частки випромінювання, яке утримується всередині матриці, а не залишає її через бокову поверхню. На це вказують вимірювання екстинкції зразків матриць з незабарвленого поліуретану. У такому випадку оптичні неоднорідності можуть виявитися позитивним чинником, який сприяє підвищенню концентрації випромінювання в матриці ЛСК. На користь такого припущення свідчать і результати деяких наукових публікацій, в яких розглянуто можливість підвищення концентруючої здатності об'ємних матриць за рахунок введення в їхнє середовище розсіювальних частинок [25, 26]. Однак таке припущення потребує безпосередньої експериментальної перевірки.

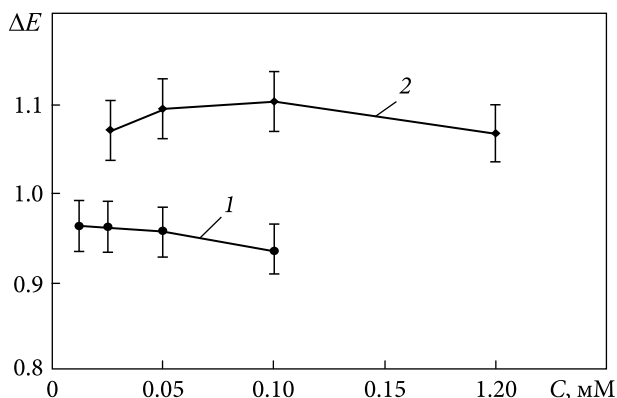


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта ефективності ΔE від концентрації барвника для матриць з різною товщиною активного шару: 1 – 5 мм; 2 – 1 мм

перименту, не можна вважати достатньою підставою для заперечення принципової можливості створення ефективних об'ємних PU матриць для ЛПС і ЛСК. Для вирішення цього питання потрібні подальші дослідження, особливо щодо здатності об'ємних поліуретанових матриць каналізувати спектрально-трансформоване випромінювання до торцевих поверхонь матриць за рахунок повного внутрішнього відбиття з урахуванням можливого впливу на цю здатність оптичних спотворень середовища. Хоча ця задача не розглядалася в рамках цієї роботи, проте слід навести деякі міркування стосовно характеру впливу оптичних завивкуватостей поліуретанового середовища на здатність матриць каналізувати випромінювання. Можна припустити, що рефракція випромінювання на оптичних завивкуватостях може сприяти збільшенню частки випромінювання, яке утримується всередині матриці, а не залишає її через бокову поверхню. На це вказують вимірювання екстинкції зразків матриць з незабарвленого поліуретану. У такому випадку оптичні неоднорідності можуть виявитися позитивним чинником, який сприяє підвищенню концентрації випромінювання в матриці ЛСК. На користь такого припущення свідчать і результати деяких наукових публікацій, в яких розглянуто можливість підвищення концентруючої здатності об'ємних матриць за рахунок введення в їхнє середовище розсіювальних частинок [25, 26]. Однак таке припущення потребує безпосередньої експериментальної перевірки.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що прозорий двокомпонентний поліуретан *CrystalClear* 204 може ефективно використовуватися як матричний матеріал для створення люмінесцентних фототрансформуючих середовищ. Показано, що введення барвника Родамін 6G забезпечує формування активного середовища з вираженими спектральними властивостями, придатними для перетворення широкосмугового випромінювання.

Виявлено, що ефективність спектральної трансформації суттєво залежить як від концентрації люмінесцентного барвника, так і від товщини активного шару. Для тонких матриць (1 мм) встановлено наявність оптимальної концентрації барвника (близько 0.1 мМ), за якої досягається максимальна ефективність перевипромінювання. Водночас перевищення оптимальної

концентрації призводить до зниження ефективності внаслідок самопоглинання люмінесценції.

Показано, що збільшення товщини активного шару до 5 мм призводить до суттєвого зростання оптичних втрат. Це зумовлено як власною екстинкцією поліуретанової матриці, так і підсиленням ефектів самопоглинання барвника. У таких умовах ефективність спектральної трансформації знижується до рівня, за якого вихідна інтенсивність випромінювання стає меншою за вхідну.

Отримані результати свідчать про доцільність використання 2K-PU *CrystalClear* 204 як основи тонкоплівкових поліуретанових матриць для люмінесцентних перетворювачів спектра та планарних люмінесцентних сонячних концентраторів. Водночас для з'ясування принципової можливості створення ефективних об'ємних PU матриць для ЛПС і ЛСК необхідні подальші дослідження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Xiaoyong H., Sanyang H., Wei H., Xiaogang L. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chem. Soc. Rev.* 2013. Vol. 42, Iss. 1. P. 173–201. DOI: 10.1039/C2CS35288E
2. Kulish M.R., Kostylyov V.P., Sachenko A.V., Sokolovskiy I.O., Khomenko D.V., Shkrebtii A.I. Luminescent converter of solar light in toelectrical energy. Review. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron. (SPQEO)*. 2016. Vol. 19, Iss. 3. P. 229–247. DOI: 10.15407/spqeo19.03.229
3. Leitro D., Torres J.P.N., Fernandes J.F.P. Spectral Irradiance Influence on Solar Cells Efficiency. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 5017–5035. DOI: 10.3390/en13195017
4. Ferreira R.A.S., Correia S.F.H., Monguzzi A., Liu X., Meinardi F. Spectral converters for photovoltaics—What's ahead. *Mater. Today*. 2020. Vol. 33. P. 105–121. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.10.002
5. Sibinski M. Review of Luminescence-Based Light Spectrum Modifications Methods and Materials for Photovoltaics Applications. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3112–3132. DOI: 10.3390/ma16083112
6. VanSark W.G.J.H.M., Barnham K.W.J., Slooff L.H., Chatten A.J., Büchtemann A., Meyer A., McCormack S.J., Koole R., Farrell D.J., Bose R., Bende E.E., Burgers A.R., Budel T., Quilitz J., Kennedy M., Meyer T.C., Donegá D.M., Meijerink A., Vanmaekelbergh D. Luminescent Solar Concentrators — A review of recent results. *Opt. Express*. 2008. Vol. 16, Iss. 26. P. 21773–21792. DOI: 10.1364/oe.16.021773
7. Debije M.G., Verbunt P.P.C. Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment. *Adv. Energy Mater.* 2012. Vol. 2. P. 12–35. DOI: 10.1002/aenm.201100554
8. Jo K., Kim H.J. Review of the Fundamental Principles and Performances on Luminescent Solar Concentrators. *Appl. Sci. Conver. Technol.* 2021. Vol. 30, Iss. 1. P. 14–20. DOI: 10.5757/asct.2021.30.1.14
9. Mateen F., Lee N., Lee S.Y., TajUdDin S., Yang W., Shahzad A., Kaliamurthy A.K., Lee J.-J., Hong S.-K. Thin-Film Luminescent Solar Concentrator Based on Intramolecular Charge Transfer Fluorophore and Effect of Polymer Matrix on Device Efficiency. *Polymers*. 2021. Vol. 13. 3770. DOI: 10.3390/polym13213770
10. Richards B.S., Howard I.A. Luminescent solar concentrators for building integrated photovoltaics: opportunities and challenges. *Energy Environ. Sci.* 2023. Vol. 16, Iss. 8. P. 3214–3239. DOI: 10.1039/D3EE00331K
11. Qi N., Kuilin L., Wenqing L., Fucai L., Xiao L. Multifunctional luminescent solar concentrators: Metrics, advanced materials and smart energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2026. Vol. 227. 116557. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116557
12. Hernández Rodríguez M.A., Correia S.F.H., Sá Ferreira R.A., Carlos L.D. A perspective on sustainable luminescent solar concentrators. *J. Appl. Phys.* 2022. Vol. 131. 140901. DOI: 10.1063/5.0089383
13. Ilano J.R.R., Leynes H.C.B., Ibarra E.J.B. Performance Analysis of Luminescent Solar Concentrators: Evaluating the Efficacy of Inorganic and Organic Dyes in Power Conversion Efficiency and Reabsorption Loss. *Proc. 2024 IEEE 16th Int. Conf. on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*. P. 1–6. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:283474626>.

14. Bondi R., Arrigo A., Cela E., Latterini L. Investigations on organic push–pull dyes for luminescent solar concentrator applications. *ACS Appl. Opt. Mater.* 2025. Vol. 4, Iss. 3. P. 775–784. DOI: 10.1021/acsaom.5c00605
15. Bisht P., Pandey K.K. Luminescent transparent wood composite doped with organic dyes for luminescent solar concentrators. *React. Funct. Polym.* 2025. Vol. 211. 106217. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106217
16. Griffini G. Host Matrix Materials for Luminescent Solar Concentrators: Recent Achievements and Forthcoming Challenges. *Front. Mater.* 2019. Vol. 6, article 29. DOI: 10.3389/fmats.2019.00029
17. Li Y., Zhang X., Zhang Y., Dong R. and Luscombe C.K. Review on the Role of Polymers in Luminescent Solar Concentrators. *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 2019. Vol. 57, Iss. 3. P. 201–215. DOI: 10.1002/pola.29192
18. Chundawat T.S., Verma N., Vaya D. Development in Synthesis and Coating Applications of Polyurethane. *J. Chil. Chem. Soc.* 2021. Vol. 66, Iss. 2. DOI: 10.4067/S0717-97072021000205142
19. Minei P., Iasilli G., Giacomo R., Pucci A. Luminescent Solar Concentrators from Waterborne Polymer Coatings. *Coatings.* 2020. Vol. 10. P. 655–667. DOI: 10.3390/coatings10070655
20. Wang Y., Liu Y., Xie G., Chen J., Li P., Zhang Y., Li H. Highly Luminescent and Stable Organic-Inorganic Hybrid Films for Transparent Luminescent Solar Concentrators. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2022. Vol. 14, Iss. 4. P. 5951–5958. DOI: 10.1021/acsaami.1c20698
21. Tatsi E., De Marzi M., Mauri L., Colombo A., Botta C., Turri S., Dragonetti C., Griffini G. Semi-Transparent Luminescent Solar Concentrators Based on Intramolecular Energy Transfer in Polyurethane Matrices. *Macromol. Rapid Commun.* 2024. Vol. 45, Iss. 12. e2300724. DOI: 10.1002/marc.202300724
22. Cao X., Zheng Z., Zhang Y., Tian Y., Ye K., Chao Luo C., Zhang H., Zhang X. High-efficiency plasmonic luminescent solar concentrators based on thiol-ene polymer. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2023. Vol. 260. 119889. DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.119889
23. Zhang Y., Liu J., Li Z., Wei X., Tang H., Wang D., Wang P., Xianhai H., Wang X., Zhang F. Preparation and Application of Uv-Curable Functional Polyurethane Acrylate Coatings with Luminescent Down-Conversion and UvShieldingable. 2025. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5115121>
24. Nikolaiev S.V., Pozhar V.V., Dzyubenko M.I., Nikolaiev K.S. Solid active media for tunable lasers based on dye-doped polyurethanes. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2019. Vol. 78, Iss. 8. P. 725–741. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i8.80
25. Castelletto S., Boretta A. Luminescence solar concentrators: A technology update. *Nano Energy.* 2023. Vol. 109. 108269. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108269
26. Yi Zhang, Zida Zheng, Xiudong Cao, Jie Song, Zhixing Gan, Rui Huang, Xiaowei Zhang. Quantifying Mie Scattering in Luminescent Solar Concentrators for Improved Performance. *ACS Photonics.* 2023. Vol. 10, Iss. 9. P. 3095–3104. DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00465

Стаття надійшла 04.05.2026

REFERENCES

1. Xiaoyong, H., Sanyang, H., Wei, H., Xiaogang, L., 2013. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chem. Soc. Rev.*, **42**(1), pp. 173–201. DOI: 10.1039/C2CS35288E
2. Kulish, M.R., Kostylyov, V.P., Sachenko, A.V., Sokolovskyi, I.O., Khomenko, D.V., Shkrebtii, A.I., 2016. Luminescent converter of sunlight in to electrical energy. Review. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron. (SPQEO)*, **19**(3), pp. 229–247. DOI: 10.15407/spqeo19.03.229
3. Leitro, D., Torres, J.P.N., Fernandes, J.F.P., 2020. Spectral Irradiance Influence on Solar Cells Efficiency. *Energies.*, **13**, pp. 5017–5035. DOI: 10.3390/en13195017
4. Ferreira, R.A.S., Correia, S.F.H., Monguzzi, A., Liu, X., Meinardi, F., 2020. Spectral converters for photovoltaics–What's ahead. *Mater. Today*, **33**, pp. 105–121. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.10.002
5. Sibinski, M., 2023. Review of Luminescence-Based Light Spectrum Modifications Methods and Materials for Photovoltaics Applications. *Materials*, **16**, pp. 3112–3132. DOI: 10.3390/ma16083112
6. VanSark, W.G.J.H.M., Barnham, K.W.J., Slooff, L.H., Chatten, A.J., Büchtemann, A., Meyer, A., McCormack, S.J., Koole, R., Farrell, D.J., Bose, R., Bende, E.E., Burgers, A.R., Budel, T., Quilitz, J., Kennedy, M., Meyer, T.C., Donegá, D.M., Meijerink, A., Vanmaekelbergh, D., 2008. Luminescent Solar Concentrators — A review of recent results. *Opt. Express*, **16**(26), pp. 21773–21792. DOI: 10.1364/oe.16.021773
7. Debije, M.G., Verbunt, P.P.C., 2012. Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment. *Adv. Energy Mater.*, **2**, pp. 12–35. DOI: 10.1002/aenm.201100554
8. Jo, K., Kim, H.J., 2021. Review of the Fundamental Principles and Performances on Luminescent Solar Concentrators. *Appl. Sci. Conver. Technol.*, **30**(1), pp. 14–20. DOI: 10.5757/asct.2021.30.1.14
9. Mateen, F., Lee, N., Lee, S.Y., TajUdDin, S., Yang, W., Shahzad, A., Kalliamurthy, A.K., Lee, J.-J., Hong, S.-K., 2021. Thin-Film Luminescent Solar Concentrator Based on Intramolecular Charge Transfer Fluorophore and Effect of Polymer Matrix on Device Efficiency. *Polymers*, **13**, 3770. DOI: 10.3390/polym13213770

10. Richards, B.S., Howard, I.A., 2023. Luminescent solar concentrators for building integrated photovoltaics: opportunities and challenges. *Energy Environ. Sci.*, **16**(8), pp. 3214–3239. DOI: 10.1039/D3EE00331K
11. Qi, N., Kuilin, L., Wenqing, L., Fucai L., Xiao, L., 2026. Multifunctional luminescent solar concentrators: Metrics, advanced materials and smart energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **227**, 116557. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116557
12. Hernández Rodríguez, M.A., Correia, S.F.H., Sá Ferreira, R.A., Carlos, L.D., 2022. A perspective on sustainable luminescent solar concentrators. *J. Appl. Phys.*, **131**, 140901. DOI: 10.1063/5.0089383
13. Ilano, J.R.R., Leynes, H.C.B., Ibarra, E.J.B., 2024. Performance Analysis of Luminescent Solar Concentrators: Evaluating the Efficacy of Inorganic and Organic Dyes in Power Conversion Efficiency and Reabsorption Loss. In: *Proc. 2024 IEEE 16th Int. Conf. on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, pp. 1–6. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:283474626>
14. Bondi, R., Arrigo, A., Cela, E., Latterini, L., 2025. Investigations on organic push–pull dyes for luminescent solar concentrator applications. *ACS Appl. Opt. Mater.*, **4**(3), pp. 775–784. DOI: 10.1021/acsom.5c00605
15. Bisht, P., Pandey, K.K., 2025. Luminescent transparent wood composite doped with organic dyes for luminescent solar concentrators. *React. Funct. Polym.*, **211**, 106217. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106217
16. Griffini, G., 2019. Host Matrix Materials for Luminescent Solar Concentrators: Recent Achievements and Forthcoming Challenges. *Front. Mater.*, **6**, article 29. DOI: 10.3389/fmats.2019.00029
17. Li, Y., Zhang, X., Zhang, Y., Dong, R. and Luscombe, C.K., 2019. Review on the Role of Polymers in Luminescent Solar Concentrators. *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **57**(3), pp. 201–215. DOI: 10.1002/pola.29192
18. Chundawat, T.S., Verma, N., Vaya, D., 2021. Development in Synthesis and Coating Applications of Polyurethane. *J. Chil. Chem. Soc.*, **66**(2). DOI: 10.4067/S0717-97072021000205142
19. Minei, P., Iasilli, G., Giacomo, R., Pucci, A., 2020. Luminescent Solar Concentrators from Waterborne Polymer Coatings. *Coatings*, **10**, pp. 655–667. DOI: 10.3390/coatings10070655
20. Wang, Y., Liu, Y., Xie, G., Chen, J., Li, P., Zhang, Y., Li, H., 2022. Highly Luminescent and Stable Organic-Inorganic Hybrid Films for Transparent Luminescent Solar Concentrators. *ACS Appl. Mater. Inter.*, **14**(4), pp. 5951–5958. DOI: 10.1021/acsami.1c20698
21. Tatsi, E., De Marzi, M., Mauri, L., Colombo, A., Botta, C., Turri, S., Dragonetti, C., Griffini, G., 2024. Semi-Transparent Luminescent Solar Concentrators Based on Intramolecular Energy Transfer in Polyurethane Matrices. *Macromol. Rapid Commun.*, **45**(12), e2300724. DOI: 10.1002/marc.202300724
22. Cao, X., Zheng, Z., Zhang, Y., Tian, Y., Ye, K., Chao Luo, C., Zhang, H., Zhang, X., 2023. High-efficiency plasmonic luminescent solar concentrators based on thiol-ene polymer. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **260**, 119889. DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.119889
23. Zhang, Y., Liu, J., Li, Z., Wei, X., Tang, H., Wang, D., Wang, P., Xianhai, H., Wang, X., Zhang, F., 2025. Preparation and Application of Uv-Curable Functional Polyurethane Acrylate Coatings with Luminescent Down-Conversion and UvShieldingable. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5115121>
24. Nikolaiev, S.V., Pozhar, V.V., Dzyubenko, M.I., Nikolaiev, K.S., 2019. Solid active media for tunable lasers based on dye-doped polyurethanes. *Telecommunications and Radio Engineering*, **78**(8), pp. 725–741. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i8.80
25. Castelletto, S., Boretti, A., 2023. Luminescence solar concentrators: A technology update. *Nano Energy*, **109**, 108269. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108269
26. Yi, Zhang, Zida, Zheng, Xiudong, Cao, Jie, Song, Zhixing, Gan, Rui, Huang, Xiaowei, Zhang, 2023. Quantifying Mie Scattering in Luminescent Solar Concentrators for Improved Performance. *ACS Photonics*, **10**(9), pp. 3095–3104. DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00465

Received 04.05.2026

S.V. Nikolaiev¹, V.V. Pozhar¹, M.I. Dzyubenko^{1,2}, K.S. Nikolaiev¹

¹ O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
(ROR: <https://ror.org/03v48ps49>), Kharkiv, Ukraine

² V.N. Karazin Kharkiv National University
(ROR: <https://ror.org/03ftejk10>), Kharkiv, Ukraine

OPTICAL-RANGE SPECTRAL CHARACTERISTICS AND CONVERSION EFFICIENCY OF LUMINESCENT RADIATION IN DYE-ACTIVATED POLYURETHANE MATRICES

Subject and Purpose. The study concerns spectral transformations of the broad-band radiation generated in polyurethane matrices doped with the Rhodamine 6G organic dye. The purpose is to identify the effects due to thickness of the active layer and dye concentration therein upon the efficiency of luminescent light conversion, and their possible applicability in luminescent spectral converters and solar concentrators.

Methods and Methodology. The matrices were fabricated, proceeding from a two-component polyurethane mixture Crystal Clear 204 with a variety of dye concentrations. The study involved measurements of absorption spectra, parameters of luminescence, and optical density of the specimens. The transformation efficiency was evaluated by analyzing the spectral distribution of radiation intensity at the input and output of the matrix, followed by numerical integration within the frequency range of luminescence.

Results. As has been found, thinner matrices (e.g., 1 mm thick) demonstrate efficient re-emission of light under the conditions of an optimal dye concentration (about 0.1 mM). Higher concentrations lead to losses in efficiency due to self-absorption of the radiation. Thicker matrices (about 5 mm thick) exhibited significantly lower efficiency due to their increased optical density and higher losses associated with extinction and reabsorption effects.

Conclusion. The polyurethane matrices are promising materials for photo-transformation-based applications, particularly in thin-film configurations. Further optimization of their optical properties and employment of dyes characterized by higher Stokes shifts would be required for application in bulk systems.

Keywords: *luminescence; spectrum converter; polyurethane; Rhodamine 6G; spectral transformation; solar concentrators.*