

DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.1.308600

УДК 535.421

А. С. Лапчук<sup>1</sup>, О. В. Пригун<sup>1</sup>, І. В. Горбов<sup>1</sup>,  
Є. М. Морозов<sup>2</sup>, Ю. О. Бородін<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

<sup>2</sup>AIT-Austrian Institute of Technology  
Giefinggasse, 4, 1210 Vienna, Austria  
e-mail: a.lapchuk@gmail.com

## Лазерний RGB-проектор однорідного безспеклового освітлення, що заснований на компактній пасивній системі некогерентного фокусування

*З метою отримання малогабаритної компактної безспеклової пасивної лазерної проєкційної системи, що забезпечує однорідне освітлення, проведено теоретико-математичний аналіз механізмів зменшення суб'єктивних спеклів, який показав, що досягнення цієї мети вимагає одночасного зменшення часової і просторової когерентності лазерного пучка та маніпулювання з його поляризацією. В результаті цього дослідження запропоновано пасивну оптичну схему, що заснована на ефекті некогерентного фокусування лазерного пучка проєктора, яка дозволяє утворити безспеклову прямокутну рівномірно освітлену пляму на шорсткому екрані. Система передбачає деполіаризацію лазерного пучка та наявність оптичного дифракційного елемента (ДОЕ) на основі псевдовипадкової бінарної послідовності, що утворює ефект згладжування. Також передбачено, що ця система може бути утворена з наявних лазерних джерел світла і оптичних елементів. Експериментально верифіковано принцип роботи такої системи.*

**Ключові слова:** спекли, зменшення спеклів, лазерний проєктор, некогерентність, некогерентні системи фокусування, фокуруюча призма, мультиретардна призма.

### Вступ

Застосування лазерів у проєкторах має ряд переваг перед іншими джерелами світла, а саме [1–7]: 1) широке колірне охоплення, що створює максимально насичене і яскраве зображення; 2) енергетична економність та ефективність; 3) компактність; 4) надійність, лазерні проєктори мають тривалий час функціонування, очіку-

© А. С. Лапчук, О. В. Пригун, І. В. Горбов, Є. М. Морозов, Ю. О. Бородін

ваний в інтервалі 20000–50000 годин [8]; 5) використання освітлювальних систем із чотирма і більше лазерів різного кольору дозволяє додатково розширити кольорове охоплення та збільшити оптичну ефективність лазерних проекторів [9–12]. Тому розробкам лазерних проекторів приділяється багато уваги та докладаються значні наукові й фінансові зусилля великих транснаціональних компаній, таких як Epson, Samsung, Sony, LG, Optoma, Formovie.

Проте, не дивлячись на це, лазерні проектори не є домінуючою продукцією та значно поступаються за розповсюдженням світлодіодним проекторам [13, 14] і проекторам з некогерентним люмінесцентним джерелом освітлення, отриманим з лазерного пучка за допомогою люмінофорів [15, 16]. Головною причиною обмеженого застосування когерентного лазерного світла в проекторах є інтерференційні ефекти, а саме: оптичний шум в отриманому зображенні внаслідок виникнення суб'єктивних спеклів (рис. 1) [17–19] та глибоке інтерференційне модулювання розподілу інтенсивності освітлення на площині спостереження, що виникає при замішуванні різних ділянок нерівномірного в перетині гаусового розподілу інтенсивності в лазерному пучку, які використовують для отримання однорідного освітлення (рис. 2) [20–23].

Суб'єктивні спекли — це модуляція інтенсивності в зображенні освітленого екрана у вигляді гранул, що виникає внаслідок інтерференції дифрагованого на шорсткій поверхні екрана світла [17]. Але, з іншого боку, шорсткість екрана та розсіювання є необхідною умовою створення широкого кута спостереження зображення на екрані. Для оцінки рівня спеклових шумів використовують контраст спеклів  $C$  [17]:

$$C = \sigma \cdot \bar{I}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  та  $\bar{I}$  — це стандартне відхилення та середня інтенсивність освітлення в зображенні рівномірно освітленого екрана.

Для оцінки ефективності застосовуваних методів зменшення спеклів використовують коефіцієнт зменшення спеклів  $k$ , який визначається як відношення контрасту спеклів перед застосуванням методу  $C_0$  до контрасту після застосування  $C$ :

$$k = C_0 / C \quad (2)$$

Обидва небажані інтерференційні ефекти спотворення зображення усуваються застосуванням складних і громіздких систем з використанням: матриць з лазерних діодів; електрично та механічно активних оптичних елементів; матриць з мікролінз; багатомодових світловодів тощо.

Усе це може бути застосовано у відносно великих лазерних проекторах [22].

Проектування та створення саме компактних, енергоефективних лазерних проекційних систем високоякісного освітлення, які будуть конкурентно привабливішими, аніж світлодіодні та інші подібні системи, залишається складною проблемою. І особливо складним завданням є створення компактних пасивних лазерних проекційних систем. Пасивних у тому сенсі, що в таких системах відсутня механічна, електронна або інша динамічна дія на лазерний промінь. Нижче розглянуто принципи складності, що виникають при створенні таких систем і нові методи їхнього подолання.

## Проблеми отримання якісного освітлення лазерними проекторами

Вирішення цієї проблеми зі зберіганням усіх переваг лазерних проекційних систем вимагає максимального зменшення когерентності лазерного пучка, а саме: деполаризацію та зменшення часової і просторової когерентності лазерних джерел освітлення.

Якісне зображення вимагає зменшення рівня спеклових шумів нижче чутливості ока людини до суб'єктивних спеклів. При когерентному освітленні шорсткого екрана виникає надзвичайно глибока модуляція зображення і освітлення. Так, для одномодових лазерів контраст спеклів досягає 100 %. Проте на більшості екранів, унаслідок деполаризації розсіяного світла екраном, він зменшується в  $\sqrt{2}$  разів, тобто до 71 %. Око людини фактично не відчуває модуляцію зображення спеклами при рівні контрасту спеклів приблизно від 4 % і менше, а отже, потрібно знизити контраст спеклів у  $(71 \% / 4 \%) \approx 18$  разів [24, 25].

Унаслідок інтерференційної природи спеклові шуми є мультиплікативними, вони створюються оптичною системою з частотним просторовим спектром, що визначається роздільною здатністю ока спостерігача. Апаратне зменшення спеклів у проекторах досягається за допомогою технічних засобів шляхом усереднення багатьох створених ними декорельованих спеклових структур [17]. При однаковій інтенсивності цих створених структур контраст спеклів понижується в  $\sqrt{N}$  разів [17]. Таким чином, для досягнення потрібного рівня необхідно створення  $18^2 \approx 324$  декорельованих спеклових структур.

Декорельовані спеклові структури створюються зменшенням когерентності лазерного пучка, а саме зменшенням поляризаційної, часової і кутової когерентності лазерних пучків. Унаслідок незалежності впливу цих факторів на декореляцію спеклових структур, коефіцієнт зменшення спеклів можна записати як добуток трьох коефіцієнтів зменшення спеклів [17, 26]:

$$k = k_{\omega} \cdot k_{\theta} \cdot k_p \quad (3)$$

де  $k_{\omega}$ ,  $k_{\theta}$ ,  $k_p$  — це коефіцієнти зменшення спеклів, які обумовлені відповідно зменшенням часової, просторової і поляризаційної когерентності лазерного освітлення.

Слід зазначити, що такі фактори впливу на спекли як зменшення часової і просторової когерентності, за певних обставин можуть корелювати одна з одною та призводити до дещо меншого сукупного ефекту зменшення спеклів [27, 28]. Проте цей ефект не є значним, і ми в подальшому не будемо брати його до уваги.

При застосуванні лазерного пучка з декількох лазерних підпучків, що створюють декорельовані спеклові структури, отримується освітлення з пониженим спекловим шумом і коефіцієнтом зменшення спеклів [17], що визначається математичним виразом

$$k = (\sum_{i=1}^N I_i) / \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2} \right), \quad (4)$$

де  $i$  — кількість променів у пучку;  $I_i$  — інтенсивність підпучка  $i$ . Таким чином, при однаковій інтенсивності променів у пучку отримаємо коефіцієнт зменшення спеклів  $k = \sqrt{N}$ .

Повна поляризаційна декореляція (деполяризація) дозволяє створити тільки дві декорельовані спеклові структури і отже дозволяє понизити рівень спеклів тільки на  $\approx 30\%$ . При значній спектральній смузі випромінювання (часова декореляція) при розсіянні на шорсткому екрані розсіяне світло може створити декілька декорельованих спеклових структур внаслідок великої (більше декореляційної довжини пучка світла) різниці оптичного ходу при розсіянні на шорсткості екрану. Різниця оптичного ходу, а отже і число декорельованих спеклових структур пропорційні ширині спектра. Таким чином, коефіцієнт зменшення спеклів унаслідок саме часової некогерентності є пропорційним до кореня квадратного відношення діапазону різниці оптичного ходу світла при розсіянні на шорсткості екрану до декореляційної довжини лазерного випромінювання. Отже він зростає як квадратний корінь від ширини спектральної смуги випромінювання лазера [17]:

$$k_{\omega} = \sqrt{\sqrt{1 + 2 \left( (\cos\theta_i + \cos\theta_r) \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \delta \lambda / \lambda^2 \right)^2}} \approx \sqrt{\sqrt{1 + 2(2\pi \cdot \sigma \cdot \delta \lambda / \lambda^2)^2}} \approx \sqrt{\sqrt{2} \cdot (2\pi \cdot \sigma \cdot \delta \lambda / \lambda^2)} \quad (5)$$

де  $\sigma$  — стандартне відхилення висоти профілю екрану;  $\lambda$  — середня довжина хвилі лазера;  $\delta \lambda$  — ширина смуги випромінювання лазера;  $\theta_i$  і  $\theta_r$  — кути падіння та відбиття світлового променя від поверхні екрану, відповідно.

Відомо, що на якісному екрані ширина спектра  $\Delta \lambda = 10$  нм призводить до зменшення спеклів у 10 разів [17, с. 211]. Таким чином, зменшення спеклів до рівня нижче чутливості ока людини за допомогою лише часової когерентності вимагає розширення спектральної смуги лазерного освітлення до  $\Delta \lambda \sim 50$  нм, що відповідає спектру випромінювання світлодіодів, який нівелює переваги лазерного освітлення для лазерних проекторів і тому не є перспективним для використання в лазерній технології.

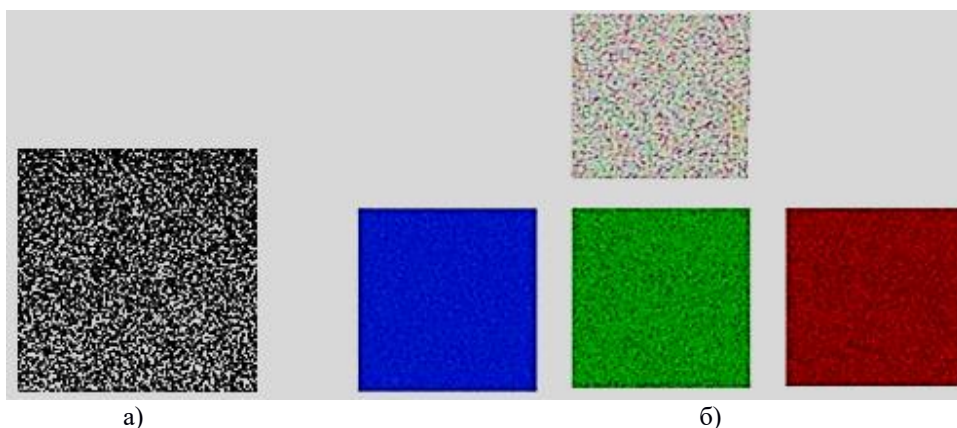


Рис. 1. Суб'єктивні спекли в зображенні на екрані: а) розподіл інтенсивності спеклів; б) спекли в зображеннях на екрані в білому, синьому, зеленому та червоному лазерному освітленні

З урахуванням формули (4) та оптимального для проекторів рівня спеклів впливає, що використання лише кутової декореляції для досягнення прийнятного

оком рівня спеклового шуму вимагає розбиття лазерного пучка на сотні підпучків (>324) навіть у випадку з активним механізмом їхньої декореляції і з додатковим пристроєм отримання однорідного освітлення. При цьому кутову апертуру об'єктива необхідно рівномірно заповнити декорельованими підпучками з відстанню між центрами пучків не меншою за числову апертуру ока, що спостерігає екран, як показано на рис. 3,а.

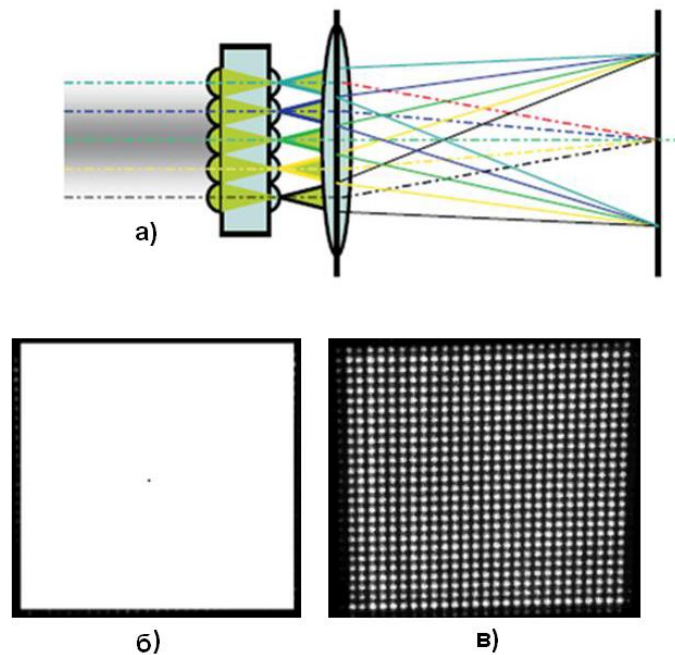


Рис. 2. Оптична система створення однорідного освітлення: а) оптична схема з колімованим пучком світла на вході, яка складається з двох 2D-мікролінзових матриць, розташованих на власній фокусній відстані одна від одної, Фур'є-лінзи та шорсткого екрана; б) світлова пляма при некогерентному освітленні; в) світлова пляма при лазерному когерентному освітленні

Одним із методів розбиття пучка на багато підпучків є використання випадково-фазового оптичного дифузора. Декореляція підпучків відбувається шляхом механічного зміщення цього дифузора [17, 29, 30], проте, такий метод вимагає його швидкого зміщення. Коефіцієнт зменшення спеклів у цьому методі може бути обрхований за формулою [17]

$$k = \sqrt{\frac{N_m \cdot M}{N_m + M}}, \quad (6)$$

де  $M$  — зсув дифузора, нормований на роздільну здатність об'єктива в площині дифузора;  $N_m$  — максимальна кількість декорельованих спеклових структур на ретині ока, що може забезпечити об'єктив проєктора:  $N_m = (NA_{obj}/NA_{eye})^2$ , де  $NA_{obj}$  та  $NA_{eye}$  — це числові апертури ока і об'єктива, що зображення на екрані, відповідно.

Для досягнення цим методом близької до максимальної ефективності зменшення спеклів, використовуючи тільки кутову декореляцію підпучків, потрібна велика швидкість зміщення дифузора, яка залежить від часової роздільної здатності



ока, що дорівнює  $\approx 0,04$  с, і таким чином, швидкість дифузора:  $v \approx 3 \times 4 N_m l / 0,04$ , де  $l$  — це роздільна здатність об'єктива в площині дифузора. Окрім цього, метод зменшення спеклів не вирішує проблеми створення рівномірного освітлення, не виконує поставлене завдання і тому не є оптимальним.

Інший підхід оснований на регулярних спеціально сконструйованих дифракційних оптичних елементах (ДОЕ) [30]. Один із самих оригінальних методів на основі ДОЕ був запропонований Trisnadi [19]. Цей метод використовує набір 2D-бінарних ДОЕ-структур у вигляді квадратних матриць, структура кожної з яких визначається одним стовпцем матриці Адамара. Для отримання максимального ефекту зменшення спеклів із використанням цього методу потрібно послідовно в часі розміщення усіх цих матричних елементів ДОЕ в області одного пікселя зображення протягом часу, не більшим за часову роздільну здатність ока людини. Таке розміщення важко отримати механічним зміщенням ДОЕ, але воно може бути реалізоване електричним перемиканням ДОЕ-структур [31]. Тому необхідне дуже швидке перемикання ДОЕ-структур з частотами 6–18 КГц. До цього часу це є не вирішеною проблемою для компактних пристроїв.

В. Юрловим був запропонований інший ефективний метод зменшення спеклів, що заснований на 1D-ДОЕ бінарній дифракційній ґратці, структура якої базована на псевдовипадкових бінарних послідовностях [32, 33]. Перевага такої періодичної структури ДОЕ в тому, що ефект зменшення спеклів досягається простим лінійним зміщенням ДОЕ. Такі ДОЕ-структури мають перевагу перед рандомними дифузорами, оскільки вимагають зміщення лише на відстань рівну  $N_m \times l$  для отримання оптимального зменшення спеклів. До того ж лінійне зміщення цього ДОЕ забезпечує дещо навіть вищий рівень зменшення спеклів, ніж перемикання між ДОЕ-структурами [32, 34].

Проте 1D-структура не забезпечує необхідний рівень зменшення спеклів, тому що вона використовує тільки один напрямок кутової апертури в напрямку руху, поперечному штрихам її ґратки (рис. 3,з).

Тому в роботах [35, 36] були запропоновані бінарні 2D-періодичні дифракційні структури (2D-ДОЕ) на основі вищезгаданої структури 1D-ДОЕ, запропонованої В. Юрловим. Такі 2D-ДОЕ можуть забезпечити необхідне для лазерних проєкторів зменшення спеклів, оскільки використовують всю 2D-кутову апертуру об'єктива проєктора [35, 36] (рис. 3,в). Запропонований матричний бінарний ДОЕ базуються на періодичній послідовності субматриць із плоских прямокутних областей (найпростіших дифракційних елементів), рядки та стовпці яких базуються на бінарних псевдовипадкових послідовностях. Кожному елементу матриці в таких ДОЕ відповідає один плоский найпростіший дифракційний елемент. Ефект зменшення спеклів тут також досягається за рахунок лінійного зміщення 2D-ДОЕ [37–39] у певному напрямку.

Кількість можливих декорельованих спеклових структур у методах, базованих на бінарних ДОЕ, не перевищує кількості найпростіших елементів всередині області просторової роздільної здатності ока. Як зазначалося вище, субматриця 2D-ДОЕ, у свою чергу, сама є також 2D-ДОЕ і складає період макроматриці основного ДОЕ. Лінійний розмір одного періоду ДОЕ повинен бути не більшим одного пікселя та вмщувати біля  $E = 18$  найпростіших дифракційних елементів бінарної ДОЕ-структури уздовж періоду. При цьому один найпростіший дифракційний елемент ДОЕ не

може бути меншим за роздільну здатність об'єктива в площині ДОЕ  $l \approx 1,5 \text{ мкм}$ , а отже лінійний розмір одного пікселя зображення повинен бути великим ( $\sim 1,5 \times 18 = 27 \text{ мкм}$ ). Тому і поперечний розмір пучка повинен бути широким, щоб освітити необхідну кількість великих пікселів зображення [40]. Це означає, що матриця оптичних модуляторів, яка формує зображення у 1200 лінійних пікселів на екрані, повинна мати значний розмір, який визначається добутком  $l \times E \times 1200$ , тобто  $0,0015 \times 18 \times 1200 = 32,4 \text{ мм}$ . При цьому широкий пучок буде мати великий кут розходження порядку  $2 \times \lambda \times 180 / (l \times \pi) \approx 40^\circ$ . Ці дві перелічені обставини потребують значного розміру діаметра об'єктива і всієї оптичної системи, і ці аспекти впливу ДОЕ на розмір оптичної системи більш детально проаналізовано в [40].

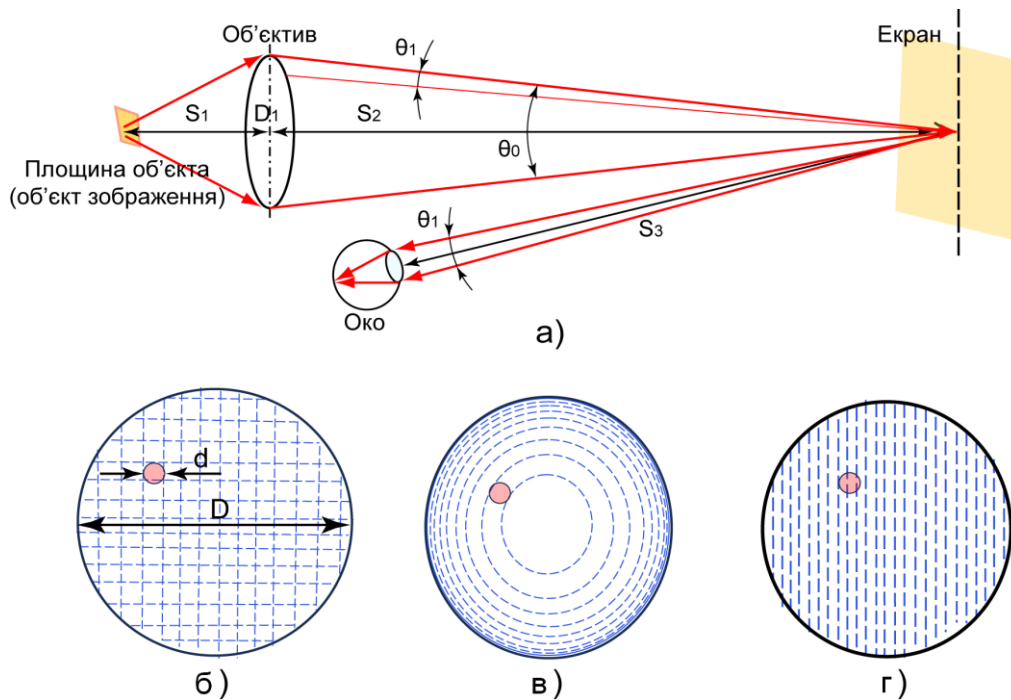


Рис. 3. Принцип кутової декореляції і можливі розподіли декореляційних зон по кутовим апертурам, де рожеве коло відповідає кутовій апертурі ока, а декореляційні кутові зони позначені як області між синіми лініями: а) принципова оптична схема створення зображення проектором, де  $S_1, S_2, S_3$  — відповідно відстані від зображення до об'єктива, від об'єктива до екрана та від екрана до ока;  $D_1$  — діаметр об'єктива;  $\theta_0$  — кутова апертура об'єктива;  $\theta_1$  — кутова апертура ока; б) ідеальний розподіл, де декореляційні зони є рівними апертурі ока і розташовані впритул одна до одної, що забезпечує використання всієї апертури проектора для пригнічення спеклів ( $N \times N$  — декорельованих зон), де  $D$  та  $d$  числові апертури об'єктива та ока відповідно; в) розподіл декореляційних кутових зон після проходження сфокусованого пучка через довге багатомодове оптоволокно; г) розподіл декореляційних кутових зон рухомих 1D-ДОЕ

До того ж метод, що заснований на активному ДОЕ, вимагає швидкого механічного зміщення ДОЕ на значні відстані, щоб отримати потрібний контраст спеклів. Цю швидкість  $V_d$  з урахуванням числа кольорів лазерних пучків  $J$ , частоти зміни кадрів одного кольору  $F_k$ , роздільної здатності об'єктива в площині ДОЕ  $l$  та кількості найпростіших дифракційних елементів в площині однієї субматриці можна визначити виразом

$$V_d = J \times F_k \times l \times E_2 \quad (7)$$

Таким чином, у випадку для RGB-проектора ( $J = 3$ ,  $F_k = 40$  кадрів/сек,  $l = 0,0015$  мм,  $E = 18$ ) швидкість ДОЕ буде:  $V_d \approx 58$  мм/сек.

І нарешті, такий метод зменшення спеклів не вирішує проблему однорідного освітлення області зображення на екрані. Тому потрібна додаткова система отримання однорідного освітлення, в якій також необхідно нівелювати інтерференційні спотворення освітлення.

Кутової декореляції можна досягти не тільки активними оптичними елементами але й використовуючи скінченну декореляційну довжину (або довжину когерентності) лазерних пучків, розбиваючи для цього початковий пучок на декілька підпучків і потім спрямовуючи їх під різними кутами з достатньою для їхньої декореляції різницею оптичних шляхів, як це запропоновано в [41] для двох і трьох лазерних підпучків. Проте це буде ефективним, якщо метод дозволяє отримати значно більшу, ніж 3, кількість декорельованих лазерних підпучків.

У [42] запропоновано інший метод, що використовує скінченність декореляційної довжини променя лазерних діодів із застосуванням довгого багатомодового оптоволокна або ж світловодів з поперечним перетином прямокутної форми. За цим методом для збудження багатомодового режиму на вході оптоволокна фокусується лазерний пучок, або ж в інший спосіб на вході оптоволокна впритул встановлюють ДОЕ або дифузор для збудження багатомодового режиму оптоволокна з певною числовою апертурою.

На основі аналізу зменшення об'єктивних спеклів на вихідному кінці оптоволокна було зроблено припущення про можливе зменшення за допомогою цього методу контрасту суб'єктивних спеклів нижче 1 % при освітленні екрана пучком світла з вихідного кінця довгого (багато десятків метрів) багатомодового оптоволокна з великою числовою апертурою [42].

Проте більш детальні дослідження [43, 44] показали, що декореляція хвилеводних мод довгим багатомодовим оптоволокном є одновимірною, і саме в радіальному напрямку (рис. 3,в), незалежно від форми хвилеводів. Отже і ефект зменшення спеклів у цьому методі є одновимірним, як і у випадку використання одновимірних ДОЕ (рис. 3,з). Тому коефіцієнт зменшення спеклів визначається, як  $\sim \sqrt{(NA_{ob}/NA_{eye})}$ . Це заважає досягти задовільного зменшення спеклів для проектора, тому що для цього необхідно використовувати нереально велику лінзу об'єктива з числовою апертурою більшою за апертуру ока приблизно на два порядки.

Крім того, в цьому методі структура декореляційних зон, утворених після проходження лазерних підпучків крізь оптоволокно, є складною для переведення 1D-декореляційної структури у 2D-декореляційну структуру іншими пасивними елементами, оскільки декореляційні зони, що мають вигляд концентричних кіл, є широкими по центру і швидко звужуються на кутовій периферії (рис. 3,в) [45]. Це робить подальше перетворення 1D-підпучкової декореляційної структури в 2D-декореляційну структуру складною задачею, оскільки у периферійній зоні пучок складається з великої кількості підпучків, які зміщені у часі і заповнюють часовий інтервал на багато декореляційних довжин когерентності. Тому для подальшої декореляції потрібно системою 2D-декореляції додатково створити велику оптичну різницю ходу між підпучками, більшу за максимальну різницю оптичного ходу в кутовій зоні з радіальною довжиною, що дорівнює апертурі ока [45].



Для досягнення того ж ефекту при меншій довжині багатомодового хвилевода запропоновано використовувати для лазерного пучка додатковий активний дифракційний елемент або ж дзеркало, що осцілює на вході в багатомодовий хвилевод. Хоча це і дозволяє дещо зменшити розміри системи та зберегти однорідність освітлення, проте залишаються суттєві, загальні для хвилеводних систем, недоліки, а саме: розміри системи, тим не менш, є значними; вимагається механічно активний оптичний елемент; велика числова апертура лазерного пучка; хвилевод має значні оптичні втрати. Для досягнення потрібного кутового різноманіття на екрані пучок повинен мати значний діаметр, не менший за 20 мм. Це все призведе до громіздкої конструкції.

Запропоновано також оригінальний підхід зменшення спеклів за методом, заснованим на проходженні лазерного пучка через колоїдний розчин [46, 47]. Декореляція підпучків з різними кутами падіння досягається через розсіяння світла на наночастинках, які у рідкому розчині хаотично рухаються внаслідок ефекту броунівського руху, що хаотично міняє фазу розсіяного світла [48, 49]. При глибині колоїдного розчину  $\sim 10$  мм вдасться отримати контраст спеклів нижче 4 % незалежно від декореляційної довжини лазерного пучка [46]. Але в цьому методі виникають проблеми з низькою оптичною ефективністю. Тому в [46] запропонований оригінальний метод збільшення ефективності на основі освітлення колоїдного розчину зануреним у нього багатомодовим хвилеводом і оздоблення бокових стінок посудини покриттям з високим відбиттям. Однак, по-перше, застосування рідин не є бажаним в оптичних приладах, особливо в переносних, по-друге, існує не вирішена проблема довготермінової стабільності колоїдних розчинів з наночастинок [50].

Отже, застосування тільки одного із видів декореляції не є оптимальним, тому що може призводити до громіздких розмірів і не давати потрібного для лазерних проекторів низького рівня спеклів. Тому для досягнення максимальної ефективності та компактності у системах освітлення потрібно використовувати всі три види зменшення когерентності лазерного випромінювання, і при цьому бажано, щоб разом зі зменшенням спеклів досягалося і однорідне освітлення екрана при мінімумі механічного руху чи швидкості перемикання оптичних елементів з можливістю застосовувати мінімальний діаметр об'єктива проектора (мінімальне кутове різноманіття).

Отже, для створення компактного лазерного проектора потрібний підхід, який би максимально врахував усі вимоги до конкурентно здатного лазерного проектора і при цьому використовував методи, що одночасно зменшують спекли і усувають інтерференційні спотворення при створенні однорідного освітлення. Це є можливим, оскільки основою цих двох ефектів є інтерференція когерентного освітлення.

## **Некогерентне фокусування як найбільш компактний метод однорідного освітлення без спеклів**

Для отримання значного ефекту від використання часової декореляції когерентності підпучків лазерного променя потрібні потужні оптично ефективні лазери з якомога більшою в певних межах шириною спектральної смуги випромінювання. Сучасні ефективні лазери забезпечують ширину спектральної смуги не більше 2 нм [50–53]. Тому, щоб отримати відповідне розширення смуги лазерного джерела світ-

ла, пропонується задіяти декілька лазерів, центральні довжини хвиль яких дещо рознесені в області їхнього спектрального діапазону випромінювання. Але, ще крім цього, потрібно об'єднати їхнє випромінювання в один лазерний пучок. Оскільки спектральні смуги цих лазерних діодів повинні бути розташовані дуже близько (для досягнення насиченого кольорового зображення), то використання оптичних інтерференційних фільтрів для об'єднання променів в один є складним. Тому для такого об'єднання пучків найбільш перспективним є використання властивостей поляризації лазерного випромінювання. Однак поляризаційний метод дозволяє легко й ефективно об'єднувати тільки два пучки, тому використання більш ніж двох лазерних діодів одного кольору є проблематичним для компактних лазерних проекторів.

Таким чином, при застосуванні двох лазерних діодів можна отримати ширину спектрів випромінювання 4 нм для кожного окремого кольору у RGB-системі. Ширина 4 нм забезпечить зменшення спеклів методом часової декореляції не більше ніж у 3,1 рази на якісному екрані ( $\sigma > 0,05$  мм). Метод поляризаційної декореляції (деполяризація) дає зменшення спеклів у  $\sqrt{2} \approx 1,4$  разів.

Оскільки ці методи є практично незалежними, то загальне зменшення спеклів двома методами буде у  $3,1 \times \sqrt{2} \approx 4,4$  разів. Таким чином, можна отримати зображення з рівнем контрасту спеклів  $C \approx (70\%/4,4) \approx 15,9\%$ . Але якісне зображення вимагає рівня спеклів нижче 3%. Оскільки кутова різноманітність є також фактично незалежним чинником, то треба, щоб кутова різноманітність забезпечила додаткове зниження спеклів у 5,3 рази, тобто потрібно не менше  $5,3 \times 5,3 \approx 28$  підпучків для застосування кутової декореляції.

Для отримання однорідного освітлення, як правило, застосовують складну систему нарізання лазерного пучка на частини двома 2D-ґратками прямокутних мікролінз і зведення їх в одну однорідно освітлену пляму за допомогою Фур'є-лінзи [22, 23, 54]. Така система освітлення добре працює для некогерентних джерел, проте для лазерного освітлення внаслідок інтерференції підпучків замість однорідного освітлення утворюється двомірний масив малих світлових плям однакової інтенсивності (рис. 2,в), зображення яких ще й до того промодульоване спеклами.

Для уникнення небажаної глибокої інтерференції, що повністю псує лазерне освітлення, і для зменшення спеклів авторами було спочатку запропоновано використовувати 2D-фазову ґратку у вигляді пакетів з прямокутних пластин для часової декореляції утворених підпучків (рис. 8). Але для отримання однорідного освітлення з різних частин лазерного пучка необхідно розділення пучка не менше ніж на 8 частин по кожній координаті і в підсумку на  $8 \times 8 = 64$  підпучки. Отже такий підхід дозволяє досягти рівня контрасту спеклів приблизно  $8,2\%/8 \approx 1\%$ . Проте, це дещо завищена оцінка, оскільки раніше робилося припущення, що всі підпучки повністю деполаризовані і мають однакову інтенсивність. Тим не менш, це не призведе до значної похибки, і слід очікувати, що рівень спеклів буде значно меншим за 3% [55].

На рис. 4 показано оптичну схему, що реалізує подальший удосконалений розвиток запропонованого підходу [56]. Джерело лазерного випромінювання цієї оптичної схеми складається з двох лазерних RGB-модулів 1 та 2, в яких кожен лазерний діод має ширину спектра 2 нм, але центральні спектральні лінії між лазерними діодами одного кольору в цих RGB-модулях відрізняються між собою не менше ніж на 2 нм, що дає сумарну ширину спектра одного кольору 4 нм.

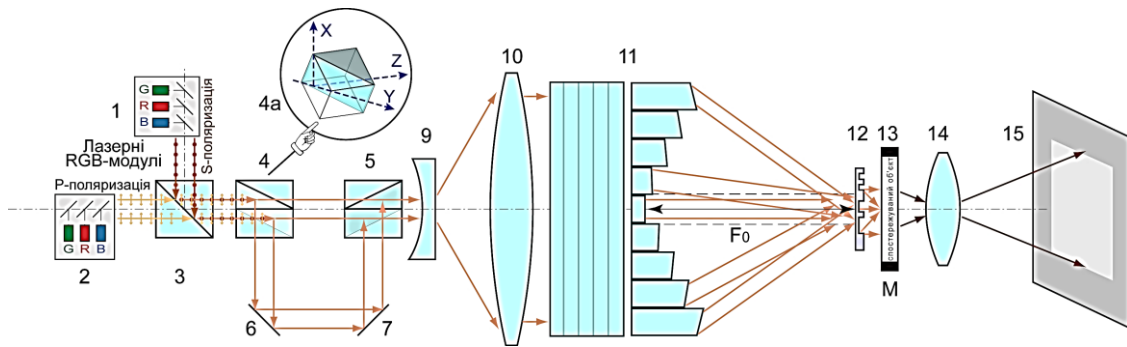


Рис. 4. Оптична схема безпеклової системи лазерного освітлення, що створює однорідно прямокутну світлову пляму: 1, 2 — лазерні RGB-модулі, що мають колімовані лазерні пучки з ортогональною між собою поляризацією, які збігаються з координатами  $Y$  та  $X$  оптичної схеми; 3, 4, 5 — кубічні поляризуючі дільники променя; 6, 7 — відбиваючі дзеркала (reflective mirrors); 9, 10 — лінзи для розширення колімованого лазерного променя; 11 — 2D-система некогерентного фокусування лазерного пучка в прямокутну світлову пляму на основі спеціального пакета призм; 12 — ДОЕ у вигляді 2D-ґратки для покращення якості освітленої плями. Схема може мати додаткову лінзу між ДОЕ і об'єктом зображення для зміни розміру світлової плями до розміру об'єкта зображення; 13 — об'єкт зображення; 14 — лінза об'єктива; 15 — екран

На даний час лазерний RGB-модуль — це вже поширений оптичний пристрій, в якому поєднуються в один лазерний промінь випромінювання від трьох лазерів — Red, Green та Blue кольорів відповідно за допомогою дзеркал з інтерференційним покриттям. Такий пристрій виготовляється багатьма виробниками, тому не варто зупинятися на подробицях його будови, функціонування та модифікацій.

Щоб легше зрозуміти принцип дії схеми, необхідно розглядати схему у тривимірних координатах. Горизонталь як координата  $Y$ , вертикаль як координата  $X$ , а основний напрямок поширення випромінювання та головної оптичної осі схеми як координата  $Z$ .

Випромінювання RGB-модулів 1 та 2 повинно бути колімованим і мати між собою взаємно ортогональну лінійну поляризацію. Поляризація променя модуля 1 паралельна осі  $Y$ , а модуля 2 паралельна осі  $X$ . Для об'єднання двох променів в один застосовано звичайний кубічний поляризаційний дільник променя 3 («Кубик», Polarizing beam-splitter cube). Кубик розташований так, щоб його ребра співпадали з координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  оптичної схеми, а вісь  $Y$  була паралельна та лежала у світлороздільній площині дзеркала кубика. Таким чином, відносно цієї площини світловий пучок модуля 1 має  $S$ -поляризацію (вздовж координати  $Y$ ), а світловий пучок модуля 2 —  $P$ -поляризацію (вздовж координати  $X$ ).

Однак, об'єднаний лазерний світловий пучок складається з двох окремих поляризованих пучків з ортогональною поляризацією. Для того щоб отримати один деполаризований світловий пучок, необхідно зробити світло кожного з двох пучків деполаризованим, розбивши кожен із них на два підпучки з ортогональними поляризаціями і деполаризувати їх. Апаратно така деполаризація досягається за допомогою двох поляризаційних кубиків дільників світлового пучка 4 та 5 (рис. 4). На відміну від кубика 3, кубики 4 та 5 і світлороздільні поверхні їхніх дзеркал повернуті вздовж осі  $Z$  на кут  $45^\circ$ , як це показано на виносці 4,а рис. 4. Таким чином, напрямок лінійної поляризації лазерного модуля 1, що орієнтований вздовж

координати  $X$  пучка та напрямок поляризації лазерного модуля 2, що орієнтований вздовж координати  $Y$ , будуть обидва повернуті на кути  $45^\circ$  та  $-45^\circ$  відносно площини падіння світлороздільних дзеркал кубиків 4 та 5. Це призведе до того, що обидва пучки розіб'ються на два колімованих пучки, що складаються з двох декорельованих, але лінійно поляризованих підпучків від кожного з лазерних модулів.

Поляризаційна декореляція світла від кожного лазерного блоку досягається тим, що нижній розділений кубиком 4 пучок має більшу оптичну довжину шляху, що перевищує довжину декореляції лазерного пучка, коли проходить відстань від кубика 4 через плоскі дзеркала 6 і 7, що відбивають світловий пучок, до кубика 5. Після об'єднання двох пучків поляризаційним кубиком 5 в один колімований пучок отримується повний деполяризований лазерний пучок зі смугою випромінювання 4 нм.

Після деполяризації колімований лазерний пучок використовується для створення рівномірного безспеклового освітлення. Для цього дві лінзи 8 і 9 розширюють колімований лазерний пучок і направляють на 2D-систему некогерентного фокусування 11 (рис. 4). 2D-система — це пакет спеціальних призм, які розкладають промінь на декілька підпучків прямокутної форми в перетині. Кожна окрема призма пакета має оптичну довжину свого підпучка, що відрізняється від оптичної довжини підпучків інших призм принаймні на одну декорельовану довжину отриманого лазерного пучка. Потім призми в пакеті фокусують відповідні їм пучки разом в одній площині в одному й тому місті на фокусній відстані  $F_0$ .

У результаті у фокусі  $F_0$  2D-системи некогерентного фокусування отримується прямокутна, рівномірно освітлена безспеклова пляма. Необхідно зауважити, що не повна декореляція підпучків не призводить до суттєвого погіршення ефективності зменшення спеклів [55]. Так, наприклад, при коефіцієнті декореляції меншим за 0,4 зменшення коефіцієнта  $k$  є не більшим ніж на 15 % [55].

## 2D-система некогерентного фокусування

2D-система некогерентного фокусування — це комбінація двох 1D-систем (рис. 6). 1D-система некогерентного фокусування (СНФ), принцип її дії і схема показані на рис. 5. СНФ — це пакет спеціально розташованих призм, які мають однакові ширину та товщину вздовж координат  $X$  та  $Y$  оптичної схеми, але різну довжину  $S$  уздовж головної оптичної осі, тобто координати  $Z$ , і різний кут нахилу грані  $\alpha$ , з якої виходить світловий пучок. Кожна призма має у поперечному перерізі прямокутник, а в поздовжньому — прямокутну трапецію, основа якої знаходиться на виході, а вершина на виході світлового пучка.

На рис. 5,а показано принцип дії СНФ. Порядок розташування призм за їхніми кутами дещо нагадує класичну призму Френеля з радіусом  $R$  відповідної до неї циліндричної лінзи. Центральна або нульова призма — це прямокутний паралелепіпед, що має кут  $90^\circ$  вихідної грані та довжину  $S_0$ . Призми розбивають лазерний пучок на окремі підпучки та фокусують їх на відстані  $F$  у вигляді прямокутника, в який зводяться усі пучки. Кожна призма, залежно від довжини, вносить свою різницю оптичного ходу відносно інших. Таким чином, на виході СНФ усі пучки мають між собою різницю оптичного шляху, більшу за декореляційну довжину лазерного пучка. Права та ліва частини СНФ від нульової призми не симетричні за довжинами призм. Різниця довжин між відповідними в лівому та правому ряді приз-

мами складає  $h$ . Таким чином, наприклад,  $Sl_3 - Sr_3 = h$ , де індекси  $l$  та  $r$  означають лівий і правий ряд відповідно. Різниця довжин призми між попередньою та наступною призмиами в одному ряді дорівнює  $2h$ .

Для декореляції підпучків, різниця довжин призми повинна бути не меншою за  $h = \lambda^2 / (\delta\lambda \times (n - 1))$ . Для червоного кольору це буде  $0,63^2 / (0,004 \times 0,5) \approx 0,2$  мм. Загальна різниця висот призми буде  $\Delta P = 0,2 \times 63 = 12,6$  мм.

На рис. 5,б показана більш зручна модифікована модель 1D-СНФ, а на рис. 5,в — її тривимірний вигляд. У цьому випадку правило для довжин призми залишається тим же. Однак їхні фокусні відстані  $F$  та кути  $\alpha$  призми уже інші, але такі, що як і раніше, фокусують пучки в одній площині  $M$  у вигляді того самого прямокутника.

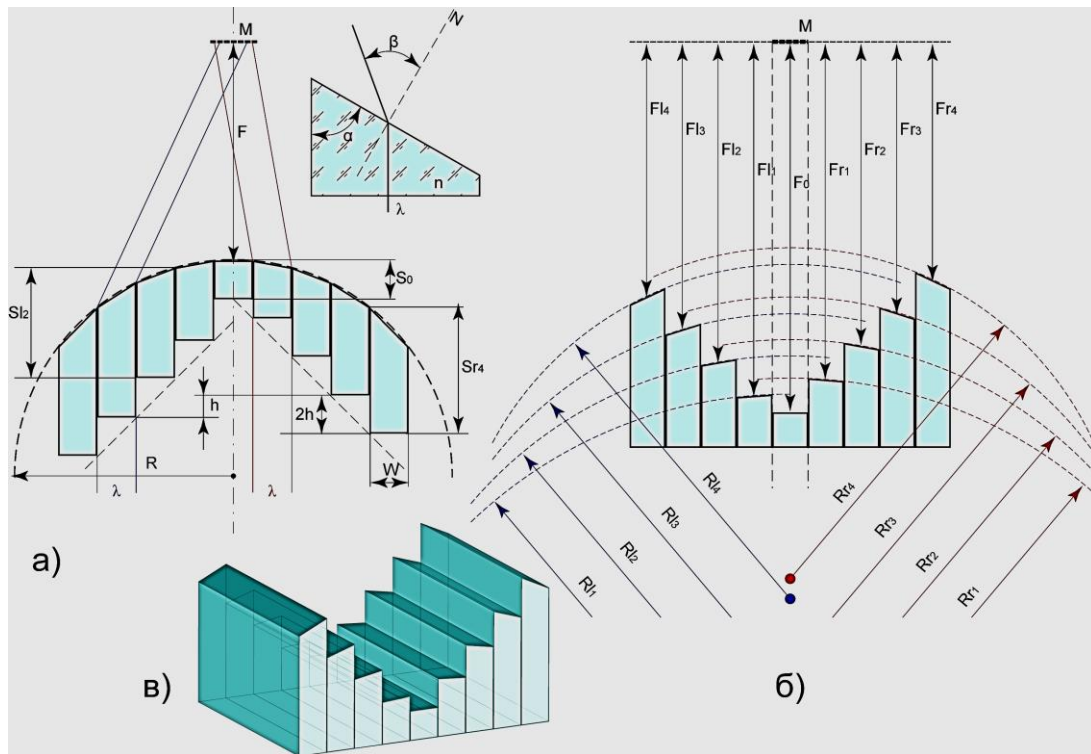


Рис. 5. Принцип дії і структура 1D-системи некогерентного фокусування. а) принцип дії 1D-системи некогерентного фокусування; б) модифікований варіант 1D-системи некогерентного фокусування; в) тривимірний вигляд варіанта (б)

Конструкція системи некогерентного фокусування у вигляді пакета призми повинна відповідати наступним вимогам:

$$\begin{aligned} \delta l &= \lambda^2 / \delta \lambda, \\ h &= \delta l / (n - 1), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\delta l$  — декореляційна довжина, що відповідає необхідній різниці оптичного ходу для ефекту фазової декореляції;  $\delta \lambda$  — спектральна ширина смуги лазерного випромінювання одного кольору;  $h$  — різниця висот відповідних призми  $Sl_i - Sr_i$  (рис. 5,а) яка визначається декореляційною довжиною світлової хвилі;  $n$  — показник заломлення світла матеріалу призми.



Наприклад, для зеленої довжини хвилі  $\lambda = 0,53$  мк і її спектральної ширини 0,004 мк декореляційна довжина буде відповідати  $(0,53^2)/0,004$ , тобто  $\approx 0,07$  мм. Таким чином, різниця висот  $h$  для скляних призм буде  $\approx 0,15$  мм.

Для деполаризації усіх підпучків, що утворені системою призм, різниця оптичного ходу для двох пучків між двома поляризаційно-розділювальними кубиками 4 та 5 (див. рис. 4) повинна бути більшою за найбільшу різницю ходу між двома підпучками, що створені системою призм ( $\sim 6,4$  мм).

Повертаючись до загальної оптичної схеми на рис. 4, для збільшення кутового різноманіття з метою зменшення спеклів і отримання більш однорідного освітлення у фокальній площині 2D-СНФ 11 розміщується 2D-ДООЕ 12, в якій дифракційні елементи розташовані на основі бінарних послідовностей Баркера, що створює широкий спектр дифракційних порядків. Площина в якій розміщений об'єкт зображення або спостереження 13 має бути зміщена на кілька міліметрів щодо фокусної площини СНФ 11, де знаходиться ДООЕ 12. У результаті в проміжку між ДООЕ та об'єктом спостереження, за рахунок різних кутів вхідних підпучків від фокусуєчої системи виникає різниця оптичного ходу між дифракційними порядками цих підпучків, що приводить до додаткової декореляції спеклових структур у створеному на екрані 15 зображенні і до більшої однорідності освітлення [57].

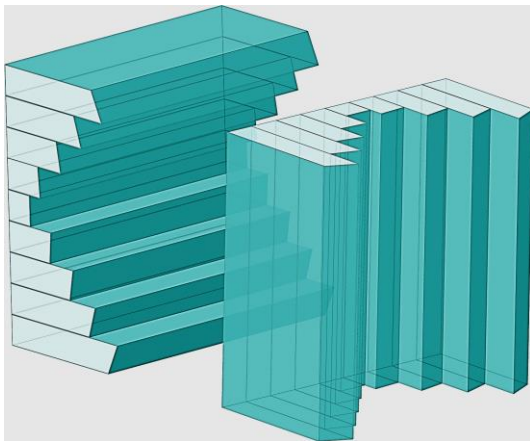


Рис. 6. Варіант 2D-системи некогерентного фокусування, що складається з двох ортогонально орієнтованих 1D-систем некогерентного фокусування

2D-система некогерентного фокусування може бути виготовлена одним компактним модулем як тривимірна матриця зі складною поверхнею у вигляді призм, що виступають над поверхнею зі спеціально обрахованими висотами, кутами нахилу та орієнтацією вихідних граней. Але треба зауважити, що створення одномодульної 2D-системи некогерентного фокусування не є зручною для виготовлення. Проте її можна замінити простішою конструкцією з двох 1D-пакетів призм (рис. 6), кути яких підбираються такими, щоб пучки фокусувалися в одну прямокутну пляму, як це продемонстровано на рис. 4. Це, на жаль, не ідеальний засіб, оскільки підпучок від переднього 1D-пакета призм буде проходити на шляху до фокуса через

різну товщину другого пакета призм, що приведе до зміщених на декілька міліметрів площин фокусування. Але, оскільки в даному випадку нас цікавить сама пляма, а не зображення, це не приведе до суттєвого погіршення отриманого освітлення.

## Експериментальне підтвердження принципу побудови освітлювальної системи

У першу чергу є інтерес з'ясувати ефективність використання найбільш простого та невибагливого до виготовлення варіанту пасивної системи некогерентного фокусування. Тим більше, для дизайну експериментального макета лазерного RGB-проектора однорідного безспеклового освітлення, заснованого на пасивних приз-

мових варіантах СНФ, серед наявної номенклатури оптичних елементів у продажу відсутні необхідні компоненти для призмових пакетів 1D-СНФ, особливо призмові одномодульні 2D-СНФ. До того ж автори мають певні труднощі із виготовленням призмових СНФ.

Але для того, щоби перевірити дієздатність запропонованого методу не обов'язково застосовувати саму складну оптичну схему. Достатньо протестувати принциповий елемент ідеї, в даному випадку — систему некогерентного фокусування лазерного освітлення на основі пакета прямокутних призм, тобто мультиретардердних пластин (МР) різної висоти (див. рис. 7, 8.) для розбиття променя на окремі підпучки і їхньої часової декореляції [57].

У [57] автори опублікували результати експериментів щодо зменшення спеклів із використанням МР як частини СНФ за схемою на рис. 7. У цій схемі пластини МР не фокусують світло, а розбивають лазерний пучок на ряд некогерентних підпучків. Колімований лазерний пучок проходить спочатку через 2D-пакети прямокутних пластин МР, які розділяють промінь на декорельовані підпучки світла. Далі відбувається фокусування підпучків у прямокутну світлову пляму стандартним методом за допомогою двох фокально узгоджених 2D-матриць мікролінз, так званих растрових лінз (РЛ) і Фур'є-лінзи у фокальній площині останньої. У Фур'є-площині розміщується ДОО для додаткової декореляції і підвищення однорідності освітлення. Таким чином, система некогерентного фокусування, яка пропонується у вигляді одного елемента 11 на рис. 4, еквівалентна чотирьом елементам на схемі рис. 7.

Растрова лінза має розмір  $20 \times 20 \text{ мм}^2$  і складається з мікролінз, які мають розмір  $40 \times 40 \text{ мкм}^2$  та фокусну відстань 8 мм. Друга РЛ узгоджена з першою РЛ таким чином, що головна площина кожної мікролінзи другої РЛ співпадає з фокальною площиною мікролінзи першої РЛ. Окрім того, мікролінзи повинні стояти строго одна проти одної, тобто їхні оптичні осі повинні співпадати з допуском по зміщенню не більше 4 мкм.

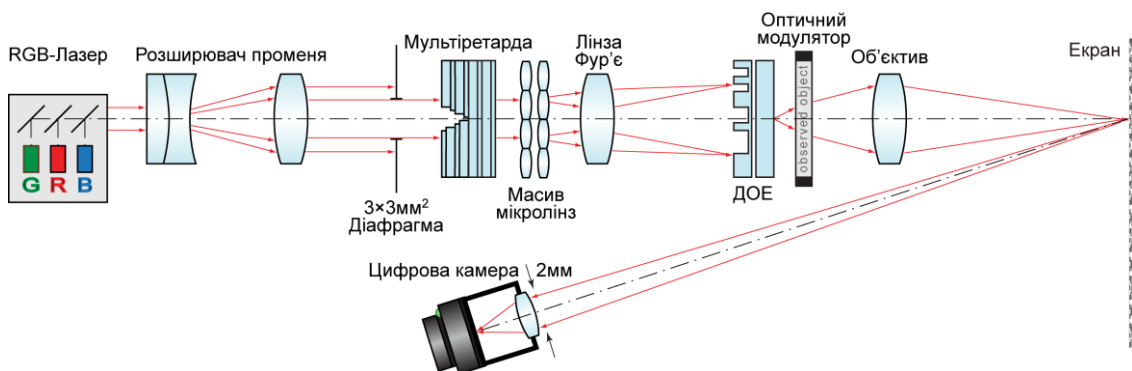


Рис. 7. Оптична схема для дослідження спеклів і світлових плям лазерного проектора на екрані

Конструкція 2D-мультиретардера у вигляді двох ортогонально взаємно орієнтованих пакетів спеціальних прямокутних пластин показана на рис. 8. 2D-мультиретардер у реально існуючому вигляді зображений на рис. 9.

Металева рамка 1 розміром  $24 \times 24 \text{ мм}^2$  застосована для кріплення мультиретардерів. Мультиретардер — це прозорий об'єкт з показником заломлення, більшим

ніж у повітря, має за формою структуру прямокутних сходинок різної висоти, які вносять різну фазову затримку для дискретних ділянок у перетині когерентного лазерного променя. Її протилежна частина асиметрична. Висота ступенів кратна 0,6 мм, горизонтальний крок — 0,4 мм. У нашому випадку — це набір пластин з полікарбонату. Два ортогонально орієнтовані між собою 1D-мультиретардери утворюють на перетині у центрі робочу зону у вигляді квадрата  $3,6 \times 3,6 \text{ мм}^2$ .

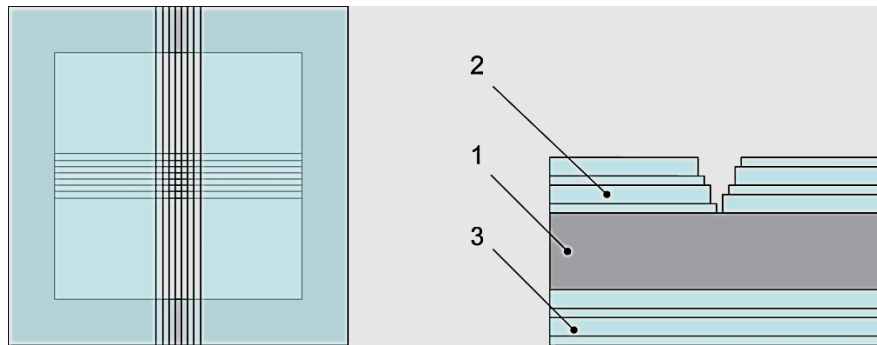


Рис. 8. Конструкція 2D-мультиретардера (multi-retarder) у вигляді двох ортогонально взаємно орієнтованих 1D-мультиретардерів: 1 — металева рамка; 2 — перший мультиретардер; 3 — другий мультиретардер, схрещений з першим

Результат застосування 2D-мультиретардера зображено на рис. 10. Показано плямистий розподіл світла на екрані при застосуванні лише двох РЛ. Такий розподіл вихідної інтенсивності модулюється рівновіддаленими піками у вигляді плямок і виникає через періодичність структури регулярних лінзових масивів РЛ.

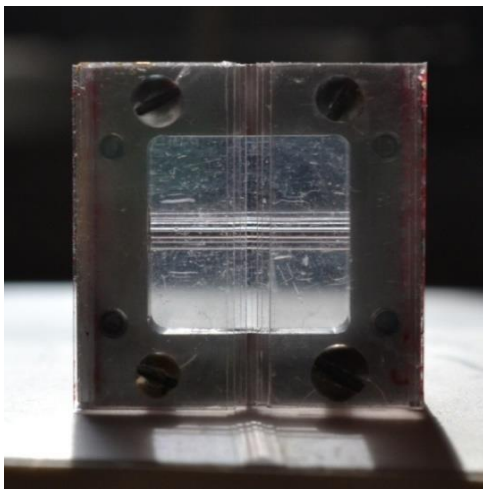


Рис. 9. 2D-мультиретардер на основі двох ортогонально взаємно орієнтованих 1D-структур виготовлених з полікарбонату, що мають робочу зону у центрі  $3,6 \times 3,6 \text{ мм}^2$

Після застосування 2D-мультиретардера, лінзи Фур'є, фокус якої знаходиться в площині ДОЕ або дуже близько розташованого об'єкта освітлення (рис. 7) та нерухомого ДОЕ вдалося уникнути плямистого модулювання вихідної інтенсивності (рис. 10,б-1).

Але повністю зробити гомогенний розподіл не вдалося. Це пояснюється, по-перше, недоліками юстування РЛ поза допусками 4 мкм; по-друге, тим, що мультиретардер складається з пластин полікарбонату з невеликою якістю обробки. Останній фактор не дозволив застосувати більше 6 пластин і охопити весь переріз лазерного променя. В найкращому варіанті мультиретардер повинен

бути виготовлений технологією гарячого тиснення цільним моноблоком оптичної якості.

Для полікарбонату, з якого виготовлені прямокутні пластини МР, товщина одної пластини  $h \approx 0,6 \text{ мм}$  забезпечує декореляцію для підпучків зеленого лазера зі смугою випромінювання 1 нм, що використовувався в експерименті.

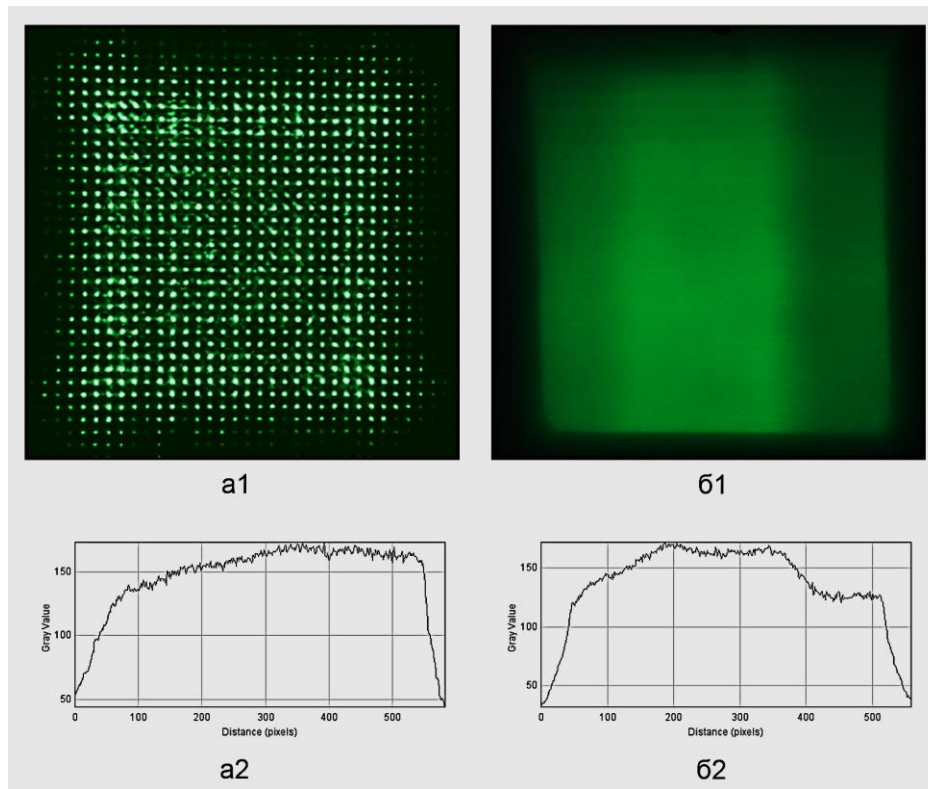


Рис. 10. 2D-розподіл лазерного освітлення на екрані:  
а1) із застосуванням лише двох РЛ; б1) при застосуванні 2D-мультиретардера разом з двома РЛ та лінзи Фур'є, фокус якої знаходиться у площині нерухомого ДОЕ; а2) вертикальний переріз зображення (а1); б2) горизонтальний переріз зображення (б1)

На рис. 11 показано «оптичний рельєф» робочої зони 2D-мультиретардера для зеленого лазера у декореляційних довжинах (товщинах полікарбонатних пластин) за сумарною кількістю пластин. На рис. 11,в зображено тривимірну робочу зону 2D-МР. Цифри червоного кольору на рис. 11,а, 11,в відповідають сумі декореляційних довжин пластин після додавання чергового ступеня в 1D-мультиретардер. На рис. 11,а зображено мапу поперечного розподілу підпучків променя у вигляді матриці, яка утворюється перетином ортогонально орієнтованих між собою пластин двох 1D-МР. Цифрами на матриці позначено оптичну довжину відповідної ділянки променя, яка є сумою декореляційних товщин пластин 2D-МР для зеленого лазера, що знаходяться на шляху відповідного підпучка на цій ділянці.

Що стосується ефективності зменшення спеклів запропонованими компактними призмовими системами некогерентного фокусування (рис. 4) та застосованою у експериментах системою мультиретардерів (рис. 7), то між ними існує несуттєва різниця, яка визначається наступними факторами:

- у МР-системі (рис. 7) задіяний лише один RGB-модуль, в якому лазер кожного кольору має спектральну ширину смуги випромінювання 1 нм;
- не застосована поляризаційна декореляція;
- не всі підпучки є декорельованими, і кількість декорельованих підпучків недостатня для зменшення спеклів до рівня, необхідного для лазерних проекторів.

Справа в тому, що діюча модель була ручного виготовлення і складається з пластин полікарбонату з невеликою якістю обробки, що не дозволило застосувати більше пластин ніж 6 і охопити весь переріз лазерного променя;

— існує сильне послаблення інтенсивності на периферії унаслідок сильного відбивання через проходження світла крізь багато шарів з полікарбонатних пластин МР, і тому ефект зменшення спеклів отриманий меншим, ніж вимагається для отримання якісного зображення.

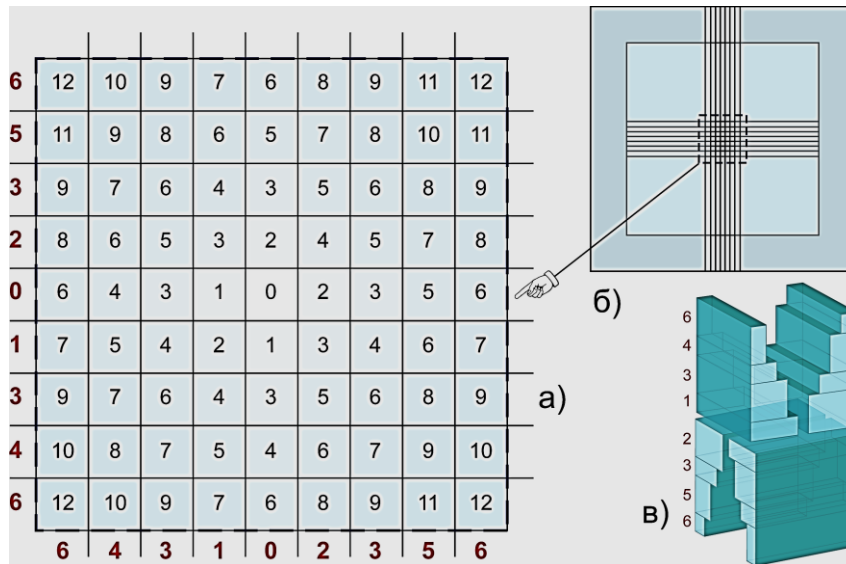


Рис. 11. Оптичний рельєф робочої зони 2D-мультиретардера у декореляційних довжинах:  
 а) розподіл оптичних довжин у перетині світлового пучка; б) робоча зона виділена пунктиром;  
 в) тривимірне зображення робочої зони

Деякі недоліки можна усунути, якщо 2D-мультиретардер буде виготовлений за технологією гарячого тиснення цільним моноблоком оптичної якості.

На рис. 12 показано зображення плям освітлення для кожного кольору лазерного RGB-модуля. Пляма отримана з діафрагмою  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  перед 2D-МР (рис. 7) з розфокусованою лінзою об'єктива на відстані 5 мм від площини нерухомого DOE. Експериментальне вимірювання показало, що в схемі з 2D-мультиретардером, яка повинна мати значно більший рівень спеклів, нами отримано контраст спеклів 17 %, 11 %, 5,3 % для червоного, зеленого та синього лазерів відповідно. Різниця у рівнях спеклів пояснюється різницею в декореляційній довжині цих лазерів, яка становила 0,45, 0,23, 0,21 мм для червоного, зеленого та синього лазерних діодів, а також розподілом інтенсивності всередині смуги випромінювання цих діодів. Звертаємо увагу, що для синього освітлення з найменшою довжиною декореляції, метод, тим не менш, дозволив отримати рівень спеклів, що є близьким до необхідного для лазерних проєкторів синього світла, не дивлячись на те, що параметри є далеко недостатніми для реалізації рівня спеклів менше ніж 3 %. Проте, для зеленого і особливо для червоного освітлення, довжина декореляції яких більша, параметри освітлювальної системи є явно недостатніми для отримання якісного освітлення.



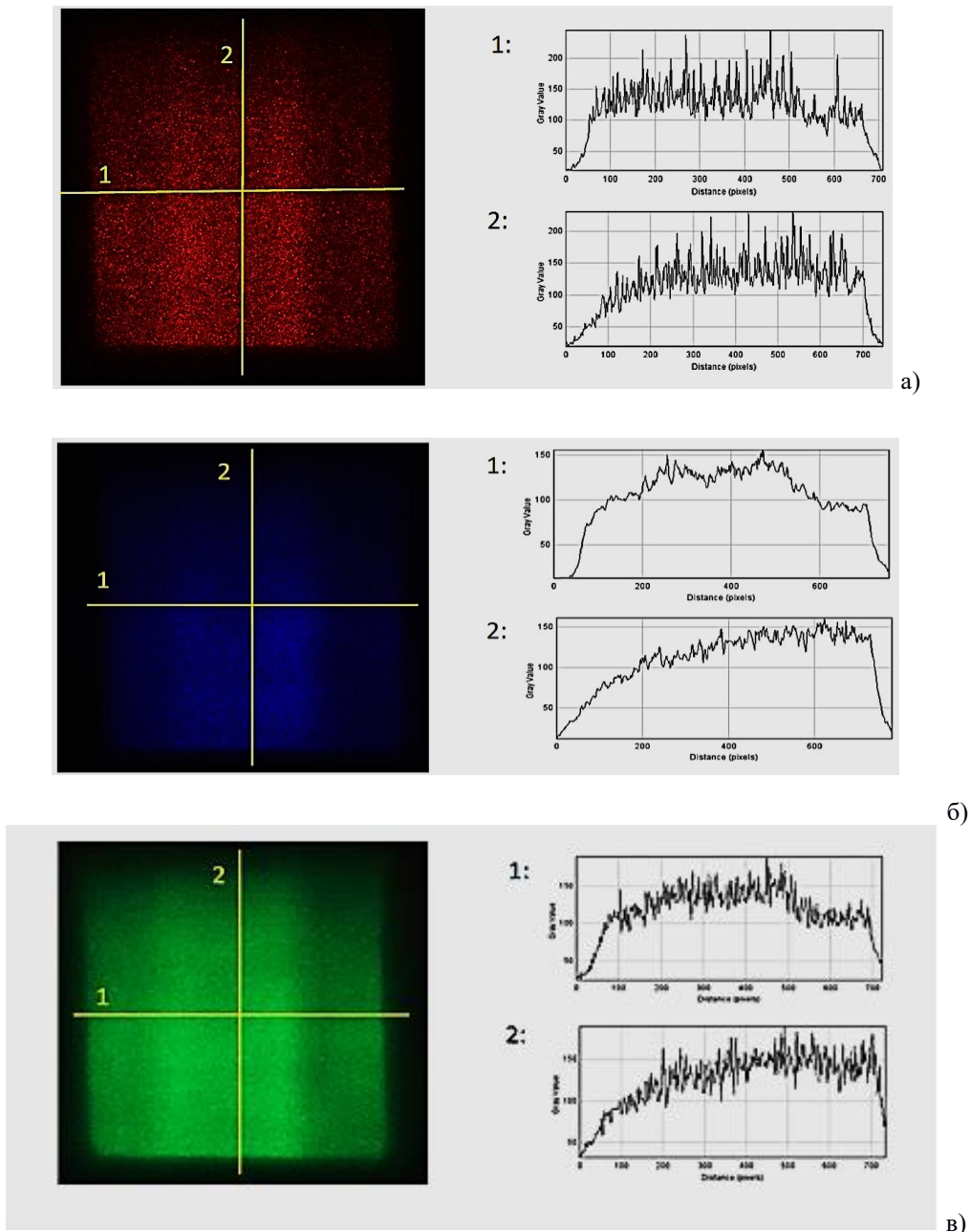


Рис. 12. Розподіл інтенсивності світлової плями RGB-лазерів на екрані при застосуванні схеми з 2D-мультиретардером (лінія 1 — горизонтальний розподіл інтенсивності у центрі плями; лінія 2 — відповідно вертикальний розподіл): а) червоний лазер, час експозиції  $\tau_{exp} = 78$  мс; б) зелений лазер, час експозиції  $\tau_{exp} = 94$  мс; в) синій лазер, час експозиції  $\tau_{exp} = 78$  мс

## Висновки

З метою отримання малогабаритної компактної безпеклової пасивної лазерної проєкційної системи, що забезпечує однорідне освітлення проведено теоретико-математичний аналіз механізмів зменшення суб'єктивних спеклів, який показав, що досягнення цієї мети вимагає одночасного зменшення часової і просторової коге-

рентності лазерного пучка та маніпулювання з його поляризацією. Досягнення оптимальних параметрів вимагає застосування усіх видів декореляції лазерного освітлення та застосування елементів, що одночасно вирішують проблему рівномірного освітлення і зменшення спеклового шуму.

Запропоновано компактні системи однорідного безспеклового освітлення:

— на основі некогерентного фокусування лазерного пучка в прямокутну пляму за допомогою пакета спеціальних декорелюючих призм;

— на основі пакета пластин прямокутної форми різної висоти.

Проведений аналіз оптичної системи некогерентного фокусування дозволив оцінити параметри лазерних RGB-модулів і оптичних елементів для отримання якісного зображення. Аналіз показав, що запропоновані оптичні елементи та оптична схема з наявними лазерними джерелами і оптичною технологією можуть бути реалізованими в лазерних проекторах. Проведено перевірку запропонованого методу на спрощеній схемі, яка підтвердила реальність теоретичних розрахунків.

1. Chellappan K.V., Erden E., and Urey H. Laser-based displays: a review. *Appl. Opt.* 2010. Vol. 49(25). P. F79–F98.
2. Xu Z. Large Colour Gamut Display — The New Generation of Display Technique. *Physics*. 2010. Vol. 39. P. 227–231.
3. Gao W., Xu Z., Bi Y., Yuan Y. Present Development and Tendency of Laser Display Technology. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering: Beijing, China. 2020. Vol. 22. P. 227–231.
4. Smith E., Heckaman R.L., Lang K., Penczek J., Bergquist J. Measuring the color capability of modern display systems. *J Soc Inf Display*. 2020. Vol. 28. P. 548–556.
5. Janssens P., Malfait K. Future prospects of high-end laser projectors. *SPIE Proc.* 2009. Vol. 7232. P. 1–12.
6. Bergquist J. Color Capability of RGB Laser Displays, Frontline Technology. *Journal of the Society for Information Display*. 2024. Vol. 40(1). P. 25–29.
7. Jianying Zhu, Weinan, Yong Bi, Zuyan Xu, and Minyuan Sun. Brightness Prghuiediction of Large Color Gamut Laser Display Devices. *Micromachines*. 2023. Vol. 14(10). P. 1850. <https://doi.org/10.3390/mi14101850>.
8. Moor O. How Long do Laser Projectors Last. URL: <https://gagadget.com/en/230475-how-long-do-laser-projectors-last/> (31/05/2024).
9. Roth S., and Caldwell W. Four primary color projection display. *Dig. Tech. Pap. – Soc. Inf. Disp. Int. Symp.* 2005. Vol. 36(1). P. 1818–1821.
10. Han S., Kim Y., Yoon J., Park I., Jun M., and Jung I. P-186: Luminance Enhancement by Four-Primary-Color (RGBY). SID symposium digest of technical papers. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. 2010. Vol. 41(1). P. 1682–1684.
11. Rodriguez-Pardo C., Sharma G., Feng X., Speigle J., and Sezan I. Optimal gamut volume design for three primary and multiprimary display systems. In *Color Imaging XVII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications*. Proc. SPIE. 2012. Vol. 8292. P. 87–93.
12. Wang Y., Huang B., Hsieh K., and Sheu C. Comparative evaluation of the imaging performance of multi-primary color LCDs with RGBCW and RGBCY pixel units by simulation. *J. Disp. Technol.* 2014. Vol. 10(9). P. 729–736.
13. Teijido J.M., Ludley F., Ripoll O., Ueda S.M., Oshima Y., Yoshida T., Toyota K., Yamamoto K., Nagara T., Kato Y., Wajiki A.O. Compact Three Panel LED Projector Engine for Portable Applications. SID 06 DIGEST, 2006. P. 2011–2014.
14. Anwar A.R., Sajjad M.T., Johar M.A., Hernández-Gutiérrez C.A., Usman M., Łepkowski S.P. Review. Recent Progress in Micro-LED-Based Display Technologies. *Laser Photonics Rev.* 2022. Vol. 16. P. 2100427 (1–20).
15. Hu F., Zhang C., Guo Z., Chen Ch., Li Y. Latest Progress of Laser Phosphor Projection Display. SID 2020 DIGEST. 2020. P. 1234–1239.

16. Yoon Hwa Kim, Noolu S.M. Viswanath, Sanjith Unithrattil, Ha Jun Kim, and Won Bin Im. Review— Phosphor Plates for High-Power LED Applications: Challenges and Opportunities toward Perfect Lighting. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2018. Vol. 7(1). P. R3134–R3147.
17. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts & Company: Englewood, 2007.
18. Kurashige M., Ishida K., Takanokura T., Ohyagi Y., Watanabe M. The evaluation of speckle contrast with variable speckle generator. *Display*. 2011. Vol. 19(9). P. 631–638.
19. Trisnadi J.I. Hadamard speckle contrast reduction. *Opt. Lett.* 2004. **29**(1). P. 11–13.
20. Matteyses A.L., Shaw K., Axelrod D. Effective Elimination of Laser Interference Fringing in Fluorescence Microscopy by Spinning Azimuthal Incidence Angle. *Microscopy Research and Technique*. 2006. Vol. 69. P. 642–647.
21. Chen Ch.-H., Chen Ch.-Ch., Yao P.-H. Microlens Array Homogenizer for Laser Illuminated Projector. *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 364-366. P. 143–147.
22. Zimmermann M., N. Lindlein R., Voelkel K. Microlens Laser Beam Homogenizer – From Theory to Application. *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6663. P. 666302.
23. Wippermann F., Zeitner U.-D., Dannberg P., Brauer A., Sinzinger S. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays. *Opt. Expr.* 2007. Vol. 15(10). P. 6218–6231.
24. Verschaffelt G., Roelandt S., Meuret Y., Van den Broeck W., Kilpi K., Lievens B., Jacobs A., Janssens P., Thienpont H., Verchaffelt G., Roelandt S., Meuret Y., Thienpont H. Speckle disturbance limit in laser-based cinema projection systems. *Scientific reports*. 2015. Vol. 5(1). P. 14105.
25. Roelandt S., Meuret Y., Jacobs A., Willaert K., Janssens P., Thienpont H., Verschaffelt G. Human speckle perception threshold for still images from a laser projection system. *Optics Express*, 2014. Vol. 22(20). P. 23965–23979.
26. Liu Y., Liu Y., Bu P., Jiao M., Xing J., Weng J. Speckle Suppression Method Based on Rotating Double Diffusers. *Acta Optica Sinica*. 2023. Vol. 43(4). P. 0412003.
27. Yamada H., Moriyasu K., Sato H., Hatanaka H. Effect of incidence/observation angles and angular diversity on speckle reduction by wavelength diversity in laser projection systems. *Opt. Express*. 2017. Vol. 25(25). P. 32132–32141.
28. Chen Y., Deng L., Yao B., Yang Y., Zhu L., Li T., Xu L., Gu Ch. Effect of rough screen on speckle suppression by wavelength and angle diversity in laser projection systems. *Displays*. 2024. Vol. 82. P. 102647.
29. Wang L., Tschudi T., Halldorsson T., Petursson P.R. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements. *Appl. Opt.* 1998. Vol. 37. P. 1770–1775.
30. SSHin. Ch., Yoo S.S., Lee S.Y., Park Ch.-Y., Park S.-Y., Kwon J.W., Lee S.-G. Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser. *Displays*. 2006. Vol. 27(3). P. 91–96.
31. Gao W., Tong Zh., Kartashov V., Akram M.N., Che X. Replacing Two-Dimensional Binary Phase Matrix by a Pair of One-Dimensional Dynamic Phase Matrices for Laser Speckle Reduction. *Journal of Display Technology*. 2012. Vol. 8(5). P. 291–295.
32. Yurlov V., Lapchuk A., Yun S., Song J., Yeo I., Yang H., An S. Speckle suppression in scanning laser displays. *Applied Optics*. 2006. Vol. 47(2). P. 179–187.
33. Yurlov V., Lapchuk A., Yun S., Song J., Yeo I., Yang H., An S. Speckle suppression in scanning laser displays: aberration and defocusing of the projection system. *Applied Optics*. 2009. **48**(1). P. 80–90.
34. Lapchuk A., Prygun O., Fu M., Le Z., Xiong Q., Kryuchyn A. Dispersion of speckle suppression efficiency for binary DOE structures: spectral domain and coherent matrix approaches. *Optics express*. 2017. Vol. 25(13). P. 14575–14597.
35. Lapchuk A., Kryuchyn A., Petrov V., Yurlov V., Klymenko V. Full speckle suppression in laser projectors using two Barker code-type diffractive optical elements. *JOSA A*. 2013. Vol. 30(1). P. 22–31.
36. Lapchuk A., Kryuchyn A., Petrov V., Klymenko V. Optimal speckle suppression in laser projectors using a single two-dimensional Barker code diffractive optical element. *JOSA A*. 2013. Vol. 30(2). P. 227–232.
37. Lapchuk A., Yurlov V., Kryuchyn A., Pashkevich G.A., Klymenko V., Bogdan O. Impact of speed, direction, and accuracy of diffractive optical element shift on efficiency of speckle suppression. *Applied Optics*. 2015. Vol. 54 (13). P. 4070–4076.

38. Lapchuk A., Pashkevich G.A., Prygun O.V., Yurlov V., Borodin Y., Kryuchyn A., Korchovyi A.A., Shylo S. Experiment evaluation of speckle suppression efficiency of 2D quasi-spiral M-sequence-based diffractive optical element. *Applied Optics*. 2015. Vol. 54(28). P. E47–E54.
39. Le Z., Lapchuk A., Gorbov I., Guo Y., Prygun O. Theory and experiments based on tracked moving flexible DOE loops for speckle suppression in compact laser projection. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 124. P. 105845.
40. Yurlov V., Lapchuk A., Han K., Kim B.H., Yu N.E. Binary code DOE optimization for speckle suppression in a laser display. *Applied Optics*. 2018. Vol. 57(30). P. 8851–8860.
41. An S., Lapchuk A., Yurlov V., Song J., Park H.W., Jang J., Shin W., Shin W., Kargapol'tsev S., Yun S.-K. Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams. *Optics express*, 2009. Vol. 17(1). P. 92–103.
42. Manni J.G., Goodman J.W. Versatile method for achieving 1 % speckle contrast in large-venue laser projection displays using a stationary multimode optical fiber. *Opt. Express*. 2012. Vol. 20(10). P. 11288–11315.
43. Lapchuk A., Le Z., Guo Y., Dai Y., Liu Z., Xu Q., Lu Z., Kryuchyn A., Gorbov I. Investigation of speckle suppression beyond human eye sensitivity by using a passive multimode fiber and a multimode fiber bundle. *Optics Express*, 2020. Vol. 28(5). P. 6820–6834.
44. Lapchuk A.S., Xu Q., Le Z., Zhou J., Liu Z., Cai D., Prygun O.V., Kryuchyn A.A. Theory of speckle suppression in a laser projector based on a long multimode fiber. *Optics and Laser Technology*, 2021. Vol. 144. P. 107416.
45. Xu Q., Lapchuk A., Le Z., Cai D., Chen X., Li D., Mao H., Kryuchyn A. Spatial dimension expansion of incoherent optical field in a multimode fiber scheme for speckle suppression. *Optics and Lasers in Engineering*. 2023. Vol. 168. P. 107662.
46. Xu M., Gao W., Chen X. Laser Speckle Reduction Using a Motionless Despeckle Element Based on Random Mie Scattering. *Journal of display technology*. 2014. Vol. 10(2). P. 151–156.
47. Redding B., Allen G., Dufresne E.R., Cao H. Low-loss high-speed speckle reduction using a colloidal dispersion. *Applied Optics*. 2013. Vol. 52(6). P. 1168–1172.
48. Pine D.J., Weitz D.A., Chaikin P.M., and Herbolzheimer E. Diffusing-wave spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.* 1988. Vol. 60. P. 1134–1137.
48. Van Rossum M.C.W., Nieuwenhuizen Th.M. Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion. *Rev. Mod. Phys.* 1999. Vol. 71. P. 313–371.
49. López-Zamora L., Martínez-Martínez H.N., González-Calderón J.A. Improvement of the colloidal stability of titanium dioxide particles in water through silicon based coupling agent. *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 217(15). P. 285–290.
50. Laser Diode Source. 635 nm, 1800 mW HHL Fiber-Coupled Laser Diode. URL: <https://www.laserdiodesource.com/shop/635nm-1800mW-high-power-red-laser-diode>, (31/05/2024).
51. Frankfurt Laser Company. FERT-525-4W-FC105. URL: <https://www.gophotonics.com/products/laser-diodes/frankfurt-laser-company/30-12-fert-525-4w-fc105> (31/05/2024).
52. Laser Diode Source. Green Laser Diode Manufactured by Osram, 520 nm, Single Mode, 80mW. URL: <https://www.laserdiodesource.com/shop/green-osram-single-mode-80mw> (31/05/2024).
53. Laser Diode Source. 465nm Laser Diode, 2000mW, Multi-Mode Fiber-Coupled Coaxial Package. URL: <https://www.laserdiodesource.com/shop/465nm-2000mW-MMF-PC-Fiber-Coupled-wvsl> (31/05/2024).
54. Chen Ch.-H., Chen Ch.-Ch., Yao P.-H. Microlens Array Homogenizer for Laser Illuminated Projector. *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 364–366. P. 143–147.
55. Xu Q., Lapchuk A., Le Z., Cai D., Zhou J., Liu Z., Gorbov I., Kryuchyn A. Coherent matrix-based approach for evaluation of first-order speckle intensity statistics and its application for speckle suppression. *IEEE Photonics Journal*. 2022. Vol. 14(3). P. 1–9.
56. Лапчук А.С., Антонов Є.Є., Пригун О.В., Горбов І.В., Крючин А.А. Лазерна система гомогеного освітлення без спеклів на основі мультирельєфної призматичної пластини з дифракційним елементом. Заявка на патент України № а202201431.
57. Lapchuk A., Gorbov I., Prygun A., Morozov Ye. Speckle and interference fringes-free illumination system with a multi-retarder plate. *Optics Express*, 2023. Vol. 31(12). P. 19173–19188.

Надійшла до редакції 01.05.2024