

УДК 535.2: 681.7

В.А. ШИШКІН, В.М. БОРОВИЦЬКИЙ, Л.А. МІХЕЄНКО

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ДИFUЗНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРУЮЧОЇ СФЕРИ

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна*

Анотація. У статті виконано критичний аналіз і класифікацію сучасних дифузних випромінювачів на базі інтегруючої сфери, призначених для калібрування та валідації цифрових відеосистем і оптико-електронних приладів. Показано, що за спільного фізичного принципу дії — багаторазового дифузного розсіювання та просторового усереднення випромінювання — конструктивні реалізації таких систем суттєво відрізняються архітектурою та функціональними можливостями. Основну увагу приділено способам введення світла, конфігурації апертур, впливу конструкційних елементів на світлове тіло та застосуванню допоміжних і каскадних інтегруючих сфер для розширення динамічного діапазону. Окремо розглянуто спектрально та яскравісно керовані системи на основі багатоканальних світлодіодних модулів. Метою роботи є систематизація конструкцій інтегруючих сфер та оцінка їхньої придатності для різних метрологічних задач з урахуванням вимог до однорідності, спектральної стабільності та відтворюваності вимірювань.

Ключові слова: інтегруюча сфера, дифузний випромінювач, конструкційна класифікація, спектрально керовані джерела

Abstract. This paper presents a critical analysis and classification of modern integrating sphere based diffuse light sources used for calibration and validation of digital video systems and optoelectronic instruments. Although these systems share a common physical principle multiple diffuse scattering and spatial averaging of radiation, their structural architectures and functional capabilities differ significantly. Emphasis is placed on light injection methods, aperture configuration, internal optical cleanliness, and the use of auxiliary or cascaded integrating spheres to extend the dynamic range. Special attention is given to spectrally and luminance-controlled systems based on multichannel LED modules. The aim of this work is to systematize integrating sphere designs and evaluate their suitability for specific metrological tasks with respect to luminance uniformity, spectral stability, and measurement repeatability.

Keywords: integrating sphere, diffuse light source, structural classification, spectrally controlled sources

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-51-1-259-269

1. ВСТУП

Сучасні цифрові відео системи потребують калібрування а також валідації компонентів, а саме заявлених характеристик від виробника. Такі задачі частково вирішуються за допомогою джерел оптичного випромінювання з високою рівномірністю розподілу яскравості у площині вихідної апертури. Забезпечити високу рівномірність здатні дифузні випромінювачі (ДВ) на базі інтегруючої сфери (ІС), що активно вдосконалюються. Змінюються та поєднуються типи джерел випромінювання, конструкційні особливості, принципи керування джерелами за допомогою програмного забезпечення, оптимізація програмним забезпеченням автокалібрування спектру та стабілізації потоку. Систем велика кількість і спеціалістам суміжних інженерних спеціальностей не завжди легко розділити прилади за призначенням особливо враховуючи великий набір конструкційних та інших параметрів, які впливають на точність, можливості системи та відповідно вартість.

Метою даної статті критичний аналіз та класифікація конструкцій дифузних випромінювачів на базі інтегруючої сфери.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

2. ОПИС ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИЛАДУ

Досліджуваний прилад належить до класу джерел випромінювання на основі ІС, які широко застосовуються у фотометрії та радіометрії, зокрема для калібрування та оцінки сенсорів та камер, спектро радіометрів та інших оптичних вимірювальних систем.

Такі прилади також використовують для визначення коефіцієнтів відбиття, пропускання та поглинання матеріалів. Джерела цього типу є однорідними світловими еталонами, що забезпечують рівномірну яскравість по всій випромінювальній поверхні та формують майже ідеальне Ламбертове випромінювання в усіх напрямках. Принцип роботи базується на інтегруючій сфері — порожнистій сферичній структурі з високівідбивною внутрішньою поверхнею, вкритою дифузним відбивним шаром, який розсіює майже 100% падаючого світла та забезпечує багатократні дифузні відбиття. Завдяки цьому внутрішнє поле випромінювання осереднюється та виходить через порт із мінімальними кутовими та просторовими неоднорідностями.

Ламбертове покриття ІС підпорядковується косинусному закону Ламберта: яскравість ідеалізованого дифузного емітера пропорційний косинусу кута спостереження відносно нормалі. Це забезпечує стабільну та передбачувану кутову діаграму випромінювання, що є критично важливою для метрологічних задач. Завдяки багаторазовому дифузному розсіюванню ІС створює ідеально рівномірне джерело яскравості, у якому будь-які просторові особливості вхідного випромінювання практично повністю згладжуються. У застосуванні як еталонів яскравості лампи розташовують зовні сфери та спрямовують всередину, що усуває напрямні ефекти та забезпечує високу стабільність вихідного сигналу.

Ефективність інтенсивності та рівномірності випромінювання в інтегруючих сферах залежить від низки факторів: діаметра сфери, кількості та розташування портів, конфігурації бленд, внутрішніх включень, а головне — від якості Ламбертівського покриття. Завдяки своїм властивостям ІС застосовують у широкому спектрі задач: для формування рівномірних джерел світла, фотометрії ламп і світлодіодів (СВД), вимірювання лазерної потужності, дослідження спектрального потоку СВД, визначення відбивання та пропускання матеріалів, а також у конструкції косинусних приймачів.

Найчастіше в таких системах використовуються галогенні лампи, оскільки вони забезпечують безперервний спектр без емісійних ліній і стабільну роботу при живленні від регульованого джерела струму. Також використовують СВД та газорозрядні лампи. Світлодіоди можуть використовуватися як моноспектральні джерела (наприклад, 365 nm, 450 nm, 530 nm, 630 nm), так і як ширококутові комбінації з кількох світлодіодів для імітації складніших спектральних розподілів. Газорозрядні лампи застосовуються в джерелах світла на базі ІС у тих випадках, коли необхідний широкий спектральний діапазон, особливо в УФ-області, або значна світлова потужність. Дейтерієві лампи використовують як еталонні джерела ультрафіолетового випромінювання, тоді як ксенонові дугові лампи служать потужними широкоспектральними джерелами для калібрування спектро радіометрів, гіперспектральних систем та фотометричних вимірювань. У той же час для задач, що потребують максимальної стабільності, високої рівномірності та мінімального шуму, перевага зазвичай надається галогенним або СВД. У сукупності такі технічні характеристики роблять ІС еталонним і надзвичайно стабільним джерелом випромінювання для метрологічних лабораторій, калібрувальних комплексів та експериментальних оптичних досліджень.

3. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

Враховуючи описані принципи формування однорідного поля випромінювання, а також ключові метрологічні вимоги до ІС — стабільність, рівномірність, спектральну відтворюваність та Ламбертівський характер випромінювання — стає очевидним, що конструктивні особливості таких приладів відіграють визначальну роль у їхніх функціональних можливостях. Різні виробники реалізують ІС зі специфічними архітектурними рішеннями, які забезпечують оптимізацію приладів під конкретні вимірювальні задачі: від високодинамічних джерел для тестування камер до еталонних сферичних стандартів спектрального випромінювання. Тому на наступному етапі доцільно перейти до систематизації та класифікації інтегруючих світлових джерел за їхніми конструктивними ознаками — включаючи тип розташування джерела світла, спосіб керування інтенсивністю, матеріал і властивості покриття, геометрію портів, а також призначення й метрологічні можливості. Така класифікація дозволить чітко визначити місце кожного типу приладів у сучасних оптичних вимірюваннях і обґрунтувати вибір конкретних конструкцій для спеціалізованих дослідницьких та калібрувальних задач.

Почнемо з першого типу конструкції яку визначимо як таку в якій джерела світла знаходяться в середині сфери і мають додаткові конструкційні елементи для екранування прямих променів що можуть

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

потрапити у вихідну апертуру. Саме таку конструкцію було створено та досліджено Ducharme A. [2] Важливим результатом дослідження є те, що будь-які внутрішні конструкційні елементи ІС — бленди, кріплення, дифузори, оптичні екрани, нерівномірності покриття — мають критичний вплив на однорідність випромінювання. Оскільки ІС формує поле яскравості шляхом багаторазових дифузних відбиттів, будь-який елемент, що порушує геометричну симетрію або локально змінює відбивні властивості внутрішньої поверхні, створює просторові артефакти, які неминуче проявляються у вихідному порті. Було досягнуто рівномірності в межах $> 94\%$, але серед переваг конструкції — низька собівартість, простота виготовлення та гнучкість у введенні світлового потоку. У статті наголошено, що навіть незначні відмінності у товщині або структурі дифузного покриття внутрішньої поверхні проявляються як локальні “плями” у полі яскравості. Основними недоліками є низький коефіцієнт пропускання через недостатню відбивну здатність бюджетних матеріалів, зростання поглинання при багаторазових відбиттях, складність точного встановлення елементів усередині сфери та обмеження на розміри портів, що є критично необхідними для досягнення високої однорідності.

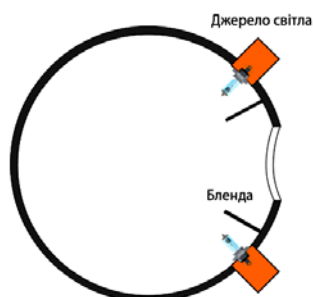


Рисунок 1 – Випромінювач з джерелами світла, що розміщені в сфері, з конструкційними елементами такими як кріплення, екрани та бленди в середині сфери

Тобто, з урахуванням наведених зауважень, логічно виділити оптимізований клас конструкцій, у яких ІС не містить жодних внутрішніх конструкційних елементів і, відповідно, реалізує максимальні інтегровальні властивості без геометричних та оптичних спотворень. Саме до такого підходу апелюють ранні патентні рішення, зокрема US 4,310,246 (Blazek V.) [3], де запропоновано або заповнення сфери оптично однорідним середовищем, або використання суцільної прозорої сфери з дифузно сформованою поверхнею, що дозволяє повністю усунути внутрішні екрани та кріплення. Подібні ідеї простежуються й у US 4,583,860 (Butner C.) [9], де всі механічні та функціональні елементи винесені за межі інтегруючого об'єму, а внутрішня поверхня сфери залишається геометрично чистою, що є критично важливим для точних радіометричних вимірювань.

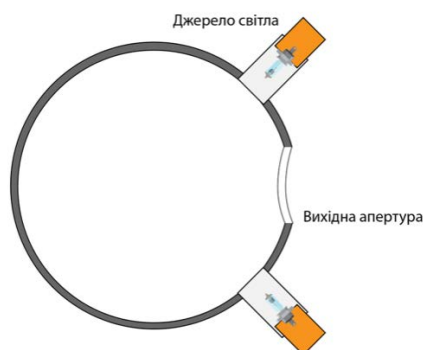


Рисунок 2 – Випромінювач з джерелами світла, що розміщені на сфері, без жодних конструкційних елементів типу екранів та бленд всередині сфери, завдяки чому відсутні спотворення світлового тіла

Розглянуті джерела випромінювання на базі ІС (Таблиці 1 – 3) демонструють різні технічні підходи та області оптимального застосування залежно від типу джерела світла, рівня яскравості, однорідності та метрологічних характеристик. Системи широкого динамічного діапазону, такі як LabSphere Helios Plus D, забезпечують надзвичайно широкий діапазон яскравості (до $50\,000\text{ кд/м}^2$) та динамічний діапазон понад 1×10^8 , що робить їх придатними для калібрування HDR-сенсорів та випробувань камер. Натомість Gigahertz Optik ISS-30-VA орієнтований на високу рівномірність поля —

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

до ± 0.25 % по площі — і стабільні фотометричні параметри, що є критичним для спектрального калібрування та валідації гіперспектральних систем.

Таблиця 1 - Порівняння приладів вірогідно маючих джерела в середині сфери з діафрагмами і екранами та без жодних конструкційних елементів в сфері

	ISV410	USRL-D12L-NANS-P	ISS-30-VA	SRS8	SRS12
Виробник	HGH	LabSphere	Gigahertz Optik GmbH	Bentham	Bentham
Тип джерела світла	Галогенна лампа	Вольфрамово-галогенна лампа з решіткою + змінний атенуатор.	Вольфрамово-галогенна (LH-100F-UV) дифузне джерело + змінна апертура.	Кварцово-галогенна лампа з піскоструминною обробкою.	Кварцово-галогенна лампа з піскоструминною обробкою.
Кольорова температура	2856 K \pm 100 K	3000K +/-50K	2960 K	3400 K	3360 K
Спектральний діапазон	300 - 2500 нм	250 - 2500 нм	300 – 1100 нм (стандартний), 400–2500 нм (опціональний)	250 – 2500 нм	300-1400 нм
Максимальна яскравість	25000 кд/м ²	50000 кд/м ²	3500 кд/м ²	24000 кд/м ²	24600 кд/м ²
Динамічний діапазон	2 500 000	115 000 000	-	-	-
Вихідна просторова рівномірність	> 98%	> 98%	> 98%	-	-
Покриття	Teflon	Spectralon®	Barium sulfate	Barium sulfate	Barium sulfate
Діаметр сфери	12 дюймів → 304.8 мм	11.5 дюймів → 292.1 мм	300 мм → 11.8 дюймів	200 мм → 7.8 дюймів	300 мм → 11.8 дюймів
Діаметр вихідної апертури	4 дюйми → 101.6 мм	4 дюйми → 101.6 мм	100 мм → 3.9 дюйми	52 мм → 2.0 дюйми	100 мм → 3.9 дюйми
Відносний отвір R_A/R_S	0.33	0.34	0.33	0.26	0.33

Стандарти типу Bentham SRS8 та SRS12, побудовані на кварц-галогенних лампах у високоякісних BaSO₄-покритих сферах, служать як еталони для калібрування спектрального випромінювання з трасуванням до NMI (PTB), забезпечуючи стабільне й відтворюване випромінювання для метрологічних лабораторій. Системи SBIR VSX вирізняються надзвичайно широким регулюванням яскравості та високою повторюваністю, що робить їх ефективними для калібрування приладів нічного бачення, телефотомірів та датчиків з високими вимогами до точності. У підсумку, хоча всі ці системи використовують ІС як основу для формування рівномірного випромінювання, їхні конструктивні та фотометричні особливості орієнтують кожен прилад на свою нішу — від високоточної спектродіометрії до тестування камер і сенсорів у надширокому діапазоні рівнів світла.

Логічним продовженням ідеї покращення рівномірності стає наступний клас, в якому ми зберігаємо максимальні інтегруючі властивості сфери, де світловий потік вводиться в сферу виключно ззовні, без розміщення джерел усередині. Так, у US 5,251,004 (Doiron D.)[12] показано, що навіть у випадку волоконних джерел з дифузними наконечниками коректне введення світла через спеціальні оптичні порти дозволяє зберегти інтегруючу симетрію без внутрішніх бленд чи перегородок. Аналогічний принцип використано в US 6,422,413 B1 (Weber W.)[13], де багатоканальні приймальні порти інтегровані у сферу таким чином, що внутрішній об'єм залишається вільним від будь-яких додаткових тіл, а керування режимами вимірювання здійснюється геометрією портів, а не внутрішніми елементами.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 2 - Порівняння приладів вірогідно маючих джерела в середині сфери з діафрагмами і екранами та без жодних конструкційних елементів в сфері

	The Infinity VSX Series	UIS-LS	LDN 500	LS300	JF-300mm
Виробник	SBIR	StellarNet	Instrument Systems	Opsytec	GOPTICA
Тип джерела світла	Tungsten halogen light source	Tungsten halogen light source	Halogen incandescent bulb	Halogen lamps	Halogen lamps
Кольорова температура	2856 K	~ 2800 K	3000 K	3100 K	-
Спектральний діапазон	400 - 2400 нм	300 - 1100 нм	380 – 780 нм	BaSO ₄ : 300 - 2400 нм, PTFE: 200 - 2500 нм	250 - 2500 нм
Максимальна яскравість	4282 кд/м ²	2000 кд/м ² з лампою 10Вт	2200 кд/м ²	12000 кд/м ²	-
Динамічний діапазон	2 500 000	-	-	-	-
Вихідна просторова рівномірність	> 98%	> 99%	> 98%	> 99.5%	> 98%
Покриття	-	Stellarreflect®	Barium sulfate	Barium sulfate or PTFE	PTFE
Діаметр сфери	11.5 дюймів → 292.1 мм	6 дюймів → 152.4 мм	500 мм → 19.6 дюймів	300 мм → 11.8 дюймів	300 мм → 11.8 дюймів
Діаметр вихідної апертури	4 дюйми → 101.6 мм	2 дюйми → 50.8 мм	100 мм → 3.9 дюйми	50 мм → 1.9 дюйми	-
Відносний отвір R_A/R_S	0.34	0.33	0.2	0.16	-

Таблиця 3 – Порівняння приладів вірогідно маючих джерела в середині сфери з діафрагмами і екранами та без жодних конструкційних елементів в сфері

	HGISLA300C98N001	JYFIOS	JYFIOS150L	JYFIOSD300
Виробник	СІС	Jing Yi	Jing Yi	Jing Yi
Тип джерела світла	Галогенна лампа	Галогенна лампа /LED/Xenon	LED	Галогенна лампа
Кольорова температура	2856 K ± 50 K	-	5100 K	-
Спектральний діапазон	200 - 2500 нм	200 - 2500 нм	200 - 2500 нм	200 - 2500 нм
Максимальна яскравість	-	-	~ 955 кд/м ²	-
Вихідна просторова рівномірність	> 95%	> 98%	> 98%	> 99%
Покриття	-	Barium sulfate or PTFE	Barium sulfate or PTFE	PTFE
Діаметр сфери	300 мм → 11.8 дюймів	150 мм → 5.9 дюймів	150 мм → 5.9 дюймів	300 мм → 11.8 дюймів
Діаметр вихідної апертури	80 мм → 3.1 дюйми	50 мм → 1.9 дюйми	50 мм → 1.9 дюйми	70 мм → 2.7 дюйми
Відносний отвір R_A/R_S	0.26	0.33	0.33	0.23

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

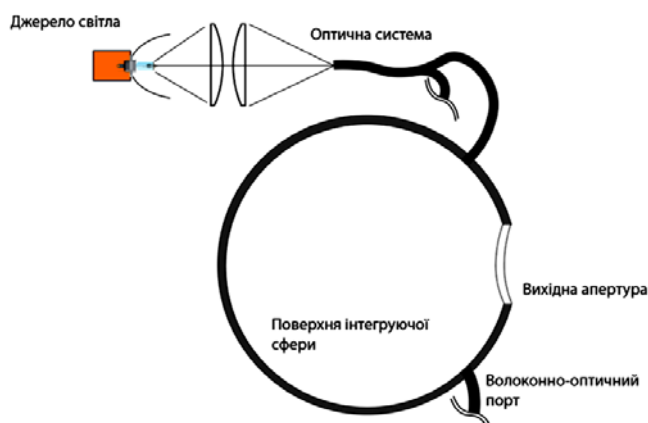


Рисунок 3 – Випромінювач з джерелами світла, що повністю винесені за межі ІС, а введення випромінювання здійснюється за допомогою зовнішньої оптичної системи

Таблиця 4 - Порівняння приладів маючих джерела ззовні та з введенням випромінювання за допомогою зовнішньої оптичної системи

	ULS300	4P3	Polymer IS
Виробник	Bentham	ThorLabs	Artifex
Тип джерела світла	Кварцово-галогенна лампа з піскоструминною обробкою.	-	-
Кольорова температура	3300 K ± 20 K	-	-
Спектральний діапазон	350 – 800 нм	250 - 2500 нм	250 - 2500 нм
Максимальна яскравість	14500 кд/м ²	-	-
Вихідна просторова рівномірність	99.95%	-	>99%
Покриття	Barium sulfate	PTFE	PTFE
Діаметр сфери	300 мм → 11.8 дюймів	100 мм → 3.9 дюйми	100 мм → 3.9 дюйми
Діаметр вихідної апертури	100 мм → 3.9 дюйми	1 або 2 дюйми → 25 або 50.8 mm	1 дюйм → 25 mm
Відносний отвір R_A/R_S	0.33	0.25 або 0.5	0.25

В готових комерційних системах подібного типу світло вводиться через SMA/FC волоконні порти або через оптичний модуль, як це реалізовано, наприклад, у полімерних інтегруючих сферах Artifex, які можуть оснащуватися волоконними входами SMA/FC, або у конструкціях Thorlabs, де додаткові порти дозволяють підключати світловоди чи зовнішні модулі освітлення.

Найбільш розвинений приклад такого підходу демонструє Bentham ULS300 (Таблиця 4), у якому стабілізоване галогенне джерело та еліпсоїдальний відбивач спрямовують потік у восьмиканальний волоконний пучок, який рівномірно освітлює протилежну до апертури напівсферу, що забезпечує виняткову просторову однорідність, оскільки внутрішній простір сфери залишається повністю чистим від елементів, а саме випромінювання підготовлене та введено симетрично. Основними проблемами в реалізації цієї конструкції можуть стати втрати випромінювання при проходженні через оптичну систему, точність формування зображення джерела світла в потрібній площині або ж формування вторинного джерела з необхідною індикатрисою та спектральним складом.

До окремого й технічно складного класу випромінювачів на базі ІС належать системи, у яких основна (вторинна) ІС працює спільно з однією або кількома додатковими (первинними) ІС, що виконують функцію стабілізованих джерел інтегрованого світлового потоку. Концептуальні основи такого підходу закладені в низці патентних рішень, зокрема в роботах, де регулювання яскравості

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

здійснюється не шляхом зміни режимів живлення джерел, а через геометричне керування передачею потоку між інтегруючими об'ємами. У таких системах випромінювання від первинних сфер передається до вторинної через калібровані діафрагми змінної площі, які задають керований коефіцієнт ослаблення та дозволяють точно встановлювати вихідну яскравість без порушення інтегровальних властивостей сфери.

Цей принцип описаний у патенті UA 78609 C2 [12], де показано, що використання поглинаючої діафрагми між ІС дозволяє регулювати яскравість без зміни ефективної площі високовідбивних поверхонь, усуваючи систематичну похибку, притаманну класичним двосферним схемам з відбивними апертурами. Подальший розвиток ідеї представлено в патенті UA 58152 U [11], де замість однієї первинної сфери використовується множина первинних ІС малого діаметра, рівномірно розташованих навколо вторинної. Така архітектура дозволяє масштабувати світловий потік і динамічний діапазон без локального перевантаження джерел і без погіршення просторової однорідності.

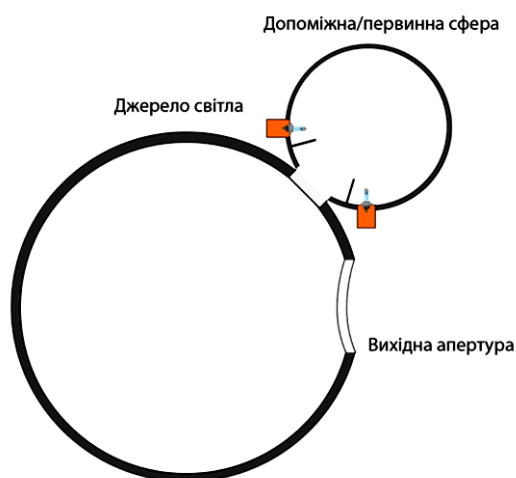


Рис.4 Випромінювач з джерелами світла, що освітлюють додаткову (первинну) сферу, яка в свою чергу освітлює головну сферу системи

Як показано у роботі Міхеєнко Л.А. та Боровицького В.М. [1], яка узагальнює та експериментально підтверджує ці патентні підходи, вторинна ІС не містить власних джерел світла, що є принципово важливим для досягнення максимальної рівномірності в площині вихідної апертури. Регулювання вихідного рівня здійснюється безперервно шляхом зміни площі діафрагм між первинними та вторинною сферами, причому спектральні характеристики та просторовий розподіл випромінювання залишаються незмінними у всьому робочому діапазоні. Для робочого прототипу експериментально досягнуто однорідність розподілу яскравості у вихідній апертурі 99,8 %, що суттєво перевищує показники класичних односферних систем при широкому динамічному діапазоні.

Розглянуті принципи, формалізовані в патентних рішеннях, реалізовані й у сучасних промислових приладах. Зокрема, у системах CI Systems SR-300N багатосферна архітектура інтегрується з коліматором і підтримує стандартні та low-light конфігурації з рівномірністю понад 98 %. У приладах SR300 (IRS) використовується основна та допоміжна ІС для формування наднизьких рівнів випромінювання з точним керуванням за допомогою вбудованих детекторів і фільтрових коліс (Таблиці 5, 6).

У випадку Gigahertz-Optik ISS-100-LT додаткова ІС виконує функцію високоефективної світлопоглинальної пастки, що забезпечує усунення паразитних відбиттів й відповідає вимогам вимірювання veiling glare за ISO 9358. Дуже цікавим варіантом є конструкція Gooch & Housego Optronics Laboratories OL 467-8, де дві ІС з'єднані послідовно, а апертурна система між ними задає керований коефіцієнт ослаблення, що дозволяє отримувати наднизькі рівні яскравості з високою точністю та стабільністю. Використання додаткової ІС дозволяє забезпечити надширокий діапазон яскравості, поліпшену стабільність випромінювання, гнучке керування рівнем сигналу та мінімізацію паразитних оптичних ефектів, роблячи такі системи незамінними для калібрування чутливих детекторів, нічних і SWIR-камер, а також для метрологічних задач, де потрібна висока точність при дуже низьких рівнях світла.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 5 – Порівняння приладів, які використовують додаткову (первинну) сферу

	USLR-L12F-NBNL-P	SPHERE SOURCE F 30/15	TLCS-300	JFIOSW
Виробник	Labsphere	SSL Resource Ltd	Photometric Solutions International	Jing Yi
Тип джерела світла	Галогенна лампа	LED або Галогенна лампа	LED або Галогенна лампа	Галогенна лампа
Кольорова температура	2856 К	-	-	-
Спектральний діапазон	350 – 2400 нм	400 – 2200 нм	-	250 – 2500 нм
Максимальна яскравість	4700 кд/м ²	5000 кд/м ²	-	-
Динамічний діапазон	1.00E+10	-	-	-
Вихідна просторова рівномірність	>98%	>97.5%	-	>99%
Покриття	Spectrafect®	-	-	Barium sulfate або PTFE
Діаметр основної сфери	12 дюймів → 304.8 мм	300 мм → 11.8 дюймів	300 мм → 11.8 дюймів	200 мм → 7.8 дюймів
Діаметр додаткової сфери	4 дюйми → 101.6 мм	150 мм → 5.9 дюйми	-	84 мм → 3.3 дюйми
Діаметр вихідної апертури	4 дюйми → 101.6 мм	100 мм → 3.9 дюйми	-	40 мм → 1.5 дюйми
Відносний отвір R_A/R_S	0.33	0.33	-	0.2
Ключові конструктивні особливості	Ultra-low-light; два детектори SD-L1, SD-S1	Можливі джерела LED / Halogen	Можливі джерела LED / Halogen	-

Окремо маємо виділити випромінювачі, які використовують масиви світлодіодів, а саме спектрально та яскравісно керовані випромінювачі. Вони поєднують інтегруючу сферу або велику дифузну апертуру з багатоканальними світлодіодними джерелами та електронними системами керування. Така архітектура безпосередньо зафіксована в патентних рішеннях, де інтегруюча камера або сфера використовується як просторово-спектральний «змішувач», а формування вихідних параметрів здійснюється шляхом керування режимами роботи світлодіодних каналів. Основною ознакою цих приладів є можливість точного та відтворюваного встановлення спектрального розподілу, корельованої колірної температури (CCT), яскравості та просторової однорідності випромінювання. У патенті US 7,521,667 (Rains J.)[5] така відтворюваність досягається за рахунок поєднання СВД масиву з інтегруючою камерою та системою сенсорів зворотного зв'язку, що дозволяє реалізувати концепцію «віртуального Ламбертового джерела» зі стабільними фотометричними та колориметричними параметрами (Таблиця 7).

Таблиця 6 – Порівняння приладів, які використовують додаткову (первинну) сферу

	OL 426-S	OL 467-8	SR300-L-2
Виробник	Optronic Laboratories	Optronic Laboratories	IRS
Тип джерела світла	Галогенна лампа	Галогенна лампа	Галогенна лампа
Кольорова температура	2950 К	2950 К	2856 К
Спектральний діапазон	350 – 1100 нм	350 – 1100 нм	440 – 1900 нм
Максимальна яскравість	350 кд/м ²	-	34.3 кд/м ²
Вихідна просторова рівномірність	>98%	>99.5%	>98%
Покриття	-	-	Barium sulfate
Діаметр основної сфери	12 дюймів → 304.8 мм	8 дюймів → 203.2 мм	12 дюймів → 304.8 мм
Діаметр додаткової сфери	-	6 дюймів → 152.4 мм	4 дюйми → 101.6 мм

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Продовження таблиці 6 – Порівняння приладів, які використовують додаткову (первинну) сферу

	OL 426-S	OL 467-8	SR300-L-2
Діаметр вихідної апертури	3 дюйми → 75.2 мм	2 дюйми → 50.8 мм	4 дюйми → 101.6 мм
Відносний отвір R_A/R_S	0.24	0.25	0.33
Ключові конструктивні особливості	-	Каскад двох сфер; апертурний тунель; подвійний моніторинг	Дві сфери у low-light; фільтрове колесо 8 позицій; вбудовані детектори

Таблиця 7 – Порівняння приладів, які використовують масиви СВД

	Spectra-CT	Spectral LED RS-9-2
Виробник	Labsphere	Gamma Scientific
Тип джерела світла	LED масив багатоканальний	34 LED канали
ССТ-діапазон	2800–7500 К	1800–40 000 К
Спектральний діапазон	-	360 – 1000 нм
Максимальна яскравість	25000 кд/м ²	18500 кд/м ²
Вихідна просторова рівномірність	>98%	≥95%
Покриття	Spectrafect®	-
Діаметр сфери	12 дюймів → 304.8 мм	500 mm → 19.6 дюймів
Діаметр вихідної апертури	4 дюйми → 101.6 мм	150 mm → 5.9 дюйми
Відносний отвір R_A/R_S	0.33	0.3
Ключові конструктивні особливості	Можливість інтеграції в АСУ, API, швидке керування	34 спектральні канали, точне формування спектра, ISO 17025

ВИСНОВКИ

Для формування випромінювання можуть використовуватися десятки дискретних СВД каналів, широкосмугові СВД модулі або комбіновані СВД масиви, що дозволяє синтезувати стандартизовані СІЕ зразки випромінювання, складні спектральні профілі або спектри, завантажені користувачем. Такий підхід докладно описаний у патенті US 2003/0185004 (Vogel J.) [8], де спектральний розподіл випромінювання формується алгоритмічно шляхом керування великою кількістю СВД каналів із використанням фотодіодного зворотного зв'язку та PWM-керування, тоді як інтегруюча камера забезпечує збереження просторової однорідності на вихідній апертурі.

У патенті US 7,710,559 (Imura K.) [6] описано випромінювач на базі ІС та набору монохроматичних світлодіодів, призначений для спектрального калібрування оптичних систем. Тут багатоканальний СВД масив використовується для формування контрольованого та відтворюваного спектрального складу, а ІС — для забезпечення еталонної просторової однорідності.

Типовими представниками цього класу в комерційному виконанні є платформи Labsphere Spectra-CT та Gamma Scientific Spectral LED RS-серії, а також інші спектрально керовані системи, що поєднують СВД модулі з ІС. Ці прилади концептуально реалізують патентно закріплені підходи: багатоканальне СВД випромінювання формується та стабілізується на рівні джерел і алгоритмів керування, тоді як ІС забезпечує відтворюване, стабільне й просторово однорідне випромінювання з заданими спектральними параметрами.

Класифікація сучасних приладів, побудованих на основі ІС, демонструє суттєву еволюцію архітектур та функціональних можливостей цих систем. Незважаючи на спільний принцип дії — багаторазове дифузне розсіювання та усереднення випромінювання — різні конструктивні реалізації орієнтовані на вирішення специфічних метрологічних задач і відрізняються за способом введення світла, рівнем керованості, спектральним діапазоном, динамічними можливостями та ступенем внутрішньої

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

оптичної “чистоти”. У традиційних приладах із внутрішнім розташуванням джерела світла головною перевагою є компактність та можливість отримання високої яскравості, однак наявність конструктивних елементів в середині сфери — ламп, кріплень, бленд — створює ризик утворення просторових артефактів і зниження однорідності. У приладах з зовнішнім введенням світла через оптичну систему (лінзову або волоконну) внутрішній об’єм сфери залишається вільним від елементів, що забезпечує максимально можливу рівномірність випромінювання та високий ступінь повторюваності вимірювань. Для задач формування наднизьких рівнів випромінювання та розширення динамічного діапазону застосовуються системи з допоміжними або каскадними ІС, які дозволяють керувати рівнем випромінювання на декілька порядків без зміни його спектральних характеристик. Окремим, найтехнологічнішим класом є спектрально та яскравісно керовані еталонні джерела на основі багатоканальних СВД модулів. Вони забезпечують формування довільних спектральних розподілів, діапазон ССТ від кількох тисяч до десятків тисяч кельвінів, надширокий діапазон яскравостей та просторову однорідність до 98–99%. Такі системи фактично поєднують можливості ІС з функціями спектрального синтезатора та фотометричного еталона, що робить їх унікальними у застосуванні для калібрування камер, сенсорів, спектрометрів та фотометричних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Mikheenko, L., & Borovytsky, V. (2011). Precise uniform light source based on optically connected integrating spheres for optical instrument calibration. *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XIX*, Proceedings of SPIE, Vol. 8154, Article 815419. <https://doi.org/10.1117/12.892757>
2. Ducharme, A., Daniels, A., Grann, E., & Boreman, G. (1997). Design of an integrating sphere as a uniform illumination source. *IEEE Transactions on Education*, 40(2). <https://ieeexplore.ieee.org/document/572326>
3. Blazek, V. (1982). Photometer sphere. *United States Patent* US 4,310,246. Published January 12, 1982.
4. Anderson, K., Archenhold, G., Baldwin, K., & Neal, A. (2002). Non-imaging light source for uniform illumination applications. *United States Patent* US 6,422,718 B1. Published July 23, 2002.
5. Rains, J. Jr., et al. (2009). Intelligent solid state lighting. *United States Patent* US 7,521,667 B2. Published April 21, 2009.
6. Imura, K. (2010). Calibration reference light source and calibration system using the same. *United States Patent* US 7,710,559 B2. Published May 4, 2010.
7. Ninan, S., et al. (2018). Uniformly lit light guides. *United States Patent* US 9,927,568 B2. Published March 27, 2018.
8. Vogel, J., et al. (2003). Illuminator and method of making same. *United States Patent Application* US 2003/0185004 A1. Published October 2, 2003.
9. Butner, C. L. (1986). Optical multiple sample vacuum integrating sphere. *United States Patent* US 4,583,860. Published April 22, 1986.
10. Mikheenko, L. A., & Hordiienko, Yu. O. (2011). Variable luminance emitter based on optically connected integrating spheres. *Utility Model Patent of Ukraine* UA 58152 U. Published April 11, 2011.
11. Mikheenko, L. A., Kolobrodov, V. H., Mykytenko, V. I., Petrushchenko, L. A., & Haivoronska, H. O. (2007). Diffuse light source. *Patent of Ukraine* UA 78609 C2. Published April 10, 2007.
12. Doiron, D. R., Paspas, P. M., & Dunn, J. B. (1993). Integrating sphere power meter. *United States Patent* US 5,251,004. Published October 5, 1993.
13. Weber, W. L., Van Aken, H. R., Palumbo, P. A., & Corrado, J. (2002). Multi-channel integrating sphere. *United States Patent* US 6,424,413 B1. Published July 23, 2002.
14. Mack, J. A., Todd, M. N., & Rock, D. F. (2010). Large-angle uniform radiance source. *International Patent Application* WO 2010/104512. Published September 16, 2010.
15. Labsphere, Inc. (2017). *Integrating Sphere: Theory and Applications*. Technical Guide PB-16011-000 Rev.00.
16. Labsphere. (2025). Imaging, sensing & remote sensor calibration solutions. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.labsphere.com/product-category/image-sensor-remote-sensing-systems/>
17. Gigahertz-Optik GmbH. (2025). Uniform light sources, luminance standards. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/products/cat/uniform-light-sources/>
18. SBIR. (2025). Infinity VSX series integrating sphere: Visible light source. Retrieved March 11, 2025, from <https://sbir.com/visible-light-source-integrating-sphere/>
19. Bentham Instruments. (2025). Luminance and calibration standards. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.bentham.co.uk/products/components/calibration-standards/>

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

20. StellarNet. (2025). Uniform illumination sphere light source. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.stellarnet.us/light-sources/uniform-illumination-sphere-light-source/>
21. HGH Infrared. (2025). ISV integrating sphere calibration sources. Retrieved March 11, 2025, from <https://hgh-infrared.com/eot/products/integrating-sphere-sources/>
22. Opsytec. (2025). Luminance and radiance standard based on an integrating sphere. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.opsytec.com/products/integrating-spheres/luminance-radiance-standard>
23. Instrument Systems. (2025). Integrating spheres and photodiodes. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.instrumentsystems.com/en/products/integrating-spheres>
24. GOPTICA. (2025). Uniform light source integrating sphere. Retrieved March 11, 2025, from https://goptica.com/WebShop_en/ProductList.aspx?pid=68
25. CIIC. (2025). Integrating sphere uniform light sources. Retrieved March 11, 2025, from http://zgskis.com/En_Pr_index_gci_76.html
26. OPTOSKY. (2025). Integrating sphere light source. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.optosky.net/ATST150LS.html>
27. Jing Yi Optical. (2025). Integrating sphere uniform light sources. Retrieved March 11, 2025, from https://www.gzjygd.com/en/product_233.html
28. Thorlabs. (2025). Modular multi-port integrating spheres. Retrieved March 11, 2025, from https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=13414
29. Artifex Engineering. (2025). Gold and polymer integrating spheres. Retrieved March 11, 2025, from <https://artifex-engineering.com/measuring-instruments/integrating-spheres/>
30. SSL Resource Ltd. (2025). Light source systems catalog. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.sslresource.com/standard-sources/>
31. CI Systems. (2025). Integrating sphere. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.ci-systems.com/integrating-sphere>
32. Photometric Solutions International. (2025). Light sources and calibration standards. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.photometricsolutions.com/products/light-sources/>
33. ОПТЕ-Е-МА Engineering GmbH. (2025). Optical calibration lamps. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.opteema.com/en/products/calibration-lamps/>
34. IR System Co. (2025). Integrating sphere SR300. Retrieved March 11, 2025, from <https://www.irsystem.com/product/sr300/>
35. Gamma Scientific. (2025). Tunable light sources. Retrieved March 11, 2025, from <https://gamma-sci.com/products/spectralled/>

Дата надходження: 21.01.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*

ШИШКІН ВІКТОР АРТУРОВИЧ – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна,
e-mail: delacroix1212@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8687-5243>

БОРОВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ – д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна,
e-mail: vborovytsky@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0006-1935-2390>

МІХЕЄНКО ЛЕОНІД АНДРІЙОВИЧ - д.т.н., професор
e-mail: MLAOOEP@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7905-9133>

Viktor SHYSHKIN, Volodymyr BOROVYTSKY, Leonid MIKHEENKO
CRITICAL ANALYSIS OF UNIFORM INTEGRATING SPHERE LIGHT SOURCE DESIGNS
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"