

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 528.7:629.78

Л.А. Міхеєнко, О.С. Тимофєєв

МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФУЗНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА НА ОСНОВІ ІНТЕГРУЮЧОЇ СФЕРИ З СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИМИ ДІОДАМИ

By employing the developed numerical method, we analyze the impact of key elements of DV on its metrological characteristics and give recommendations for designing next-generation high-precision IS. We identify main parameters of a spherical surface that affect on formed brightness field. Also, we show that in all cases the position of the element is non-uniformity of the most significant factor of influence on the brightness distribution of the output aperture. Specifically, the impact of fluctuations of other design parameters on the irregularity is much smaller. We also analyze the influence of the parameters of the radiation source on the characteristics of DV. We establish that the source size is less affected by the unevenness of brightness than its position. Finally, we consider prospects for improving the metrological characteristics of the IS by using high-brightness LED of belt type. The integrated brightness of DV may not exceed $950 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ with uneven brightness field better than 0,5 % in the spectral range of 0,4–0,7 microns.

Вступ

Дифузні випромінювачі (ДВ) на основі інтегруючої сфери (ІС) отримали широке застосування в наукових дослідженнях, оптичній радіометрії, при виготовленні оптико-електронної апаратури [1, 2]. Одним із найбільш перспективних напрямів використання ДВ є вимірювання енергетичних характеристик і калібрування прецизійних цифрових відеосистем різного типу [3], однак для цього необхідне істотне збільшення метрологічних характеристик таких випромінювачів. Зазвичай аналітичні методи, що використовуються для аналізу ДВ, дають змогу врахувати в основному їх інтегральні характеристики [4, 5]. Що стосується дослідження впливу мікроструктури ІС і локальних елементів випромінювача, зокрема геометрії джерел випромінювання і їхньої арматури, на метрологічні характеристики ДВ, то тут існують значні труднощі.

Авторами був розроблений оригінальний метод числового аналізу метрологічних характеристик ДВ, що дає можливість врахувати вплив як мікро-, так і макроелементів ІС на характеристики поля яскравості, що формуються випромінювачем [6] з високою точністю.

Постановка задачі

Мета дослідження – виконати за допомогою числового методу аналіз впливу основних елементів ДВ на його метрологічні характеристики і розробити на цій основі рекомендації щодо проектування прецизійних ДВ нового покоління; виявити основні закономірності впли-

ву параметрів поверхні сфери на формоване поле яскравості.

Вплив мікроструктури інтегруючої сфери на вихідне поле яскравості дифузного випромінювача

При аналізі досліджувались чотири основні елементи мікроструктури поверхні ІС, названі нами “яма”, “горб”, “загорожа” і “пляма” (рис. 1) [6] зі змінними параметрами (рис. 2). При цьому покладались такі вихідні параметри.

1. Для інтегруючої сфери: радіус сфери $R = 250 \text{ мм}$; діаметр вихідної апертури $D_b = 100 \text{ мм}$; коефіцієнт відбивання від поверхні ІС $\rho = 99\%$; положення первісного джерела випромінювання відносно вихідної апертури $\beta = 30^\circ$; порядок косинусності первісного джерела $m = 3$; рівень випромінювання первісного джерела $I = 0,5$; кількість розрахункових одиничних променів $n = 100$.

2. Для елемента “горб”: положення елемента $\beta_e = 270^\circ$ (при дослідженні впливу інших параметрів); діапазон значень $90^\circ \leq \beta_e \leq 270^\circ$ (при дослідженні впливу цього параметра); крок кратності параметра $\Delta\beta_e = 45^\circ$ (при дослідженні впливу цього параметра); радіус елемента $r = 15 \text{ мм}$, $5 \text{ мм} \leq r \leq 25 \text{ мм}$, $\Delta r = 5 \text{ мм}$; зміщення центра елемента відносно поверхні ІС $s = 5 \text{ мм}$, $1 \text{ мм} \leq s \leq 9 \text{ мм}$, $s = 2 \text{ мм}$.

3. Для елемента “яма”: положення елемента $\beta_e = 270^\circ$, $90^\circ \leq \beta_e \leq 270^\circ$, $\Delta\beta_e = 45^\circ$; радіус елемента $r = 15 \text{ мм}$, $5 \text{ мм} \leq r \leq 25 \text{ мм}$, $\Delta r = 5 \text{ мм}$; зміщення центра елемента відносно поверхні ІС $s = 5 \text{ мм}$, $1 \text{ мм} \leq s \leq 9 \text{ мм}$, $s = 2 \text{ мм}$.

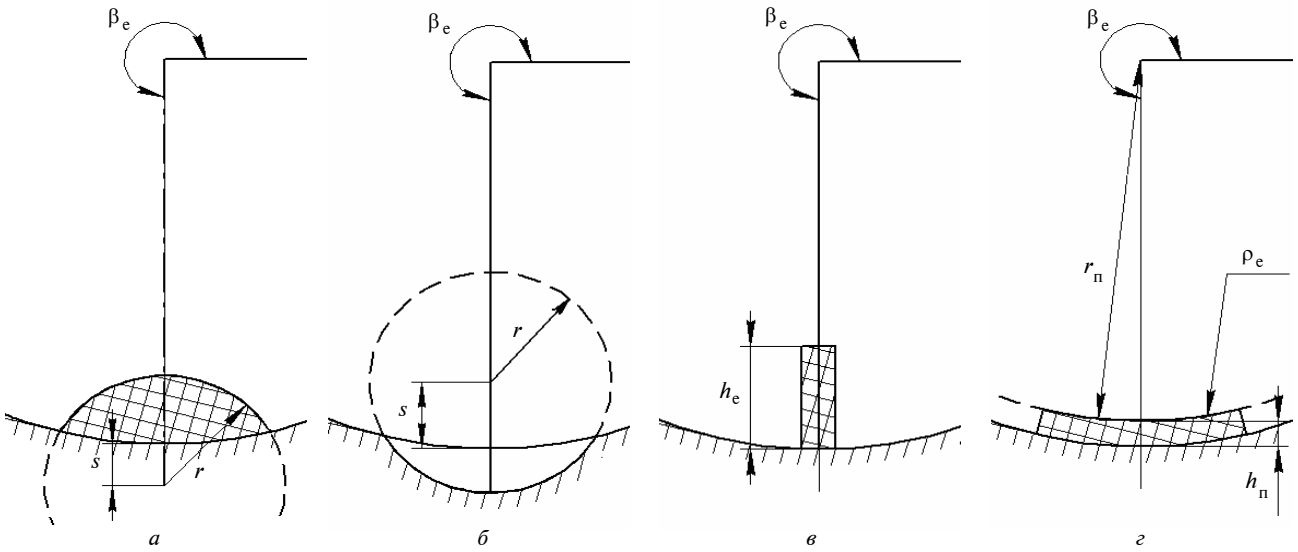


Рис. 1. Основні типи елементів ІС і ДВ: а – “горб”, б – “яма”, в – “загорожа”, з – “пляма”

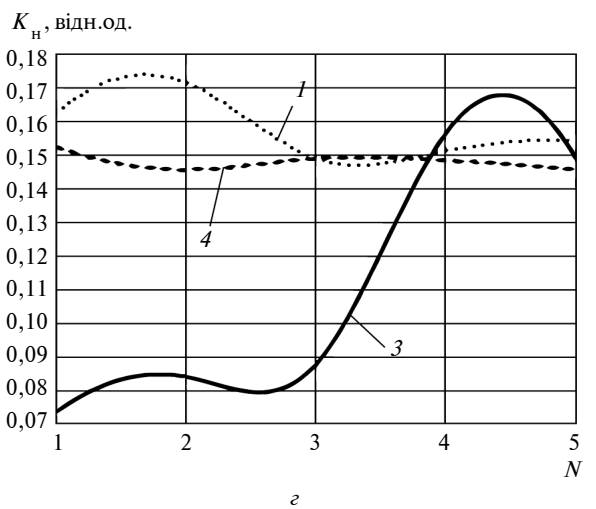
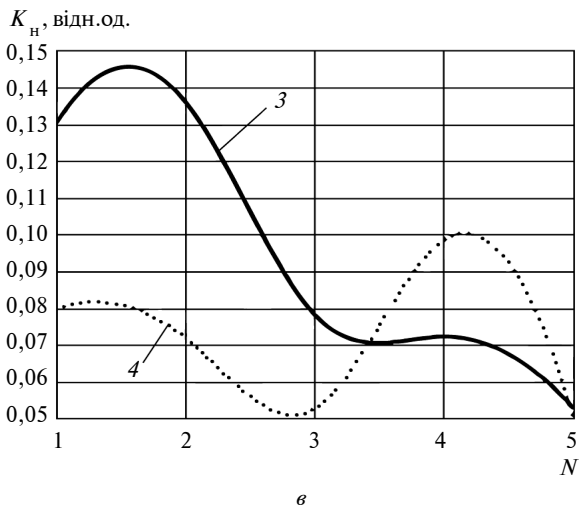
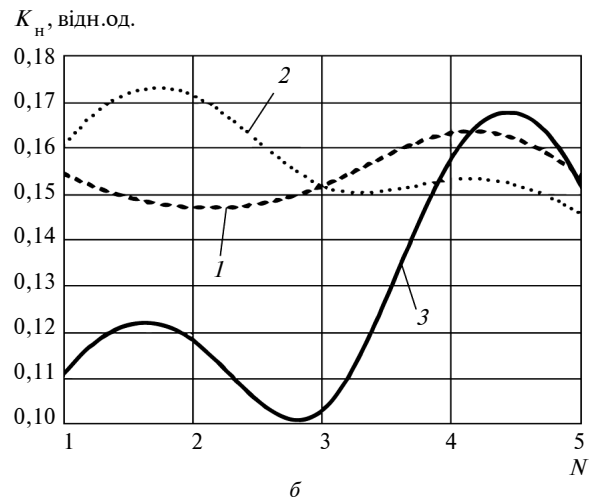
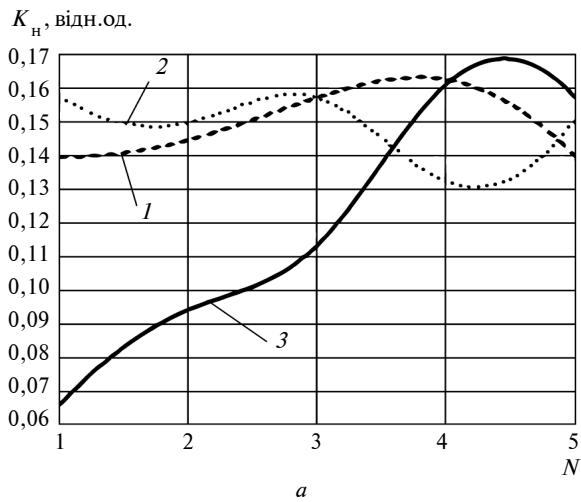


Рис. 2. Відношення нерівномірності яскравості вихідної апертури ДВ при нерівномірності: а – “горб”, б – “яма”, в – “загорожа”, з – “пляма” залежно від: 1 – радіуса елемента, 2 – зміщення центра елемента відносно поверхні, 3 – положення елемента, 4 – висоти елемента

4. Для елемента “загорожа”: положення елемента $\beta_e = 270^\circ$, $90^\circ \leq \beta_e \leq 270^\circ$, $\Delta\beta_e = 45^\circ$; висота елемента $h = 15$ мм, $5 \text{ мм} \leq h \leq 25$ мм, $\Delta h = 5$ мм.

6. Для елемента “пляма”: положення елемента $\beta_e = 270^\circ$, $90^\circ \leq \beta_e \leq 270^\circ$, $\Delta\beta_e = 45^\circ$; висота елемента $h_n = 5$ мм, $1 \text{ мм} \leq h_n \leq 9$ мм, $\Delta h_n = 2$ мм; радіус елемента $r_n = 15$ мм, $1 \text{ мм} \leq r_n \leq 9$ мм, $\Delta r_n = 2$ мм; коефіцієнт відбивання від поверхні елемента $\rho_e = 50\%$.

За методикою, розробленою в [5–7], розраховувався розподіл яскравості у вихідній апертурі ІС перелічених елементів. При цьому на кожному етапі аналізу один із параметрів елемента, серед вказаних в пунктах 1–5, був змінним, а іншим присвоювались середні значення. Зміна параметрів елемента (див. рис. 1, 2) відбувалась у діапазоні кратності $N = 1..5$, де кожна точка розподілу відповідає значенню $k_N = k_{N-1} + \Delta k$.

За критерій оцінки якості вихідного поля яскравості було вирішено взяти відношення нерівномірності яскравості до її середнього значення в межах вихідної апертури ДВ K_H :

$$K_H = (L_{\max} - L_{\min}) / L_{\max},$$

де L_{\max} і L_{\min} – максимальне і мінімальне значення яскравості вихідної апертури відповідно.

Результати розрахунку й аналізу пливу елементів мікроструктури на вихідне поле яскравості подані на рис. 2.

Важливо відмітити таке:

- для всіх типів нерівностей найбільше коливання коефіцієнта нерівномірності яскравості вносить саме зміна положення елемента, при чому для елементів типу “горб”, “яма”, “пляма” при віддаленні нерівності від джерела коефіцієнт значно зростає, у випадку “загорожі” – навпаки зменшується;

- оскільки елементи типу “горб” і “яма” мають майже однакову природу, то розподіли коефіцієнта нерівномірності яскравості в обох випадках схожі;

- збільшення величини радіуса на початку посилює нерівномірність яскравості для елементів типу “горб” і “яма”, а при досягненні деякого порога – знижує, форма цих елементів наближується до плоскої;

- величина зміщення центра елемента для типів нерівностей “яма” і “горб” має зворотні

симетричні розподіли; при значеннях, коли нерівність має найменші поперечні розміри, чітко видно екстремальні точки: для “горба” – мінімум, для “ями” – максимум;

- для нерівності типу “пляма” висота елемента майже не впливає на розподіл яскравості, радіус елемента вносить досить істотну похибку лише при невеликих розмірах, можливо через те, що промені, відбиті від поверхні нерівності, заповнюють лише окрему ділянку вихідної апертури;

- висота елемента в нерівності типу “загорожа” має складну неоднорідну залежність, однак слід враховувати те, що положення елемента не має практичного застосування, зазвичай загорожу розміщують між вихідною апертурою і джерелом випромінювання.

Вплив параметрів і розміщення джерел випромінювання на вихідне поле яскравості дифузного випромінювача

Для моделювання джерела випромінювання були використані розглянуті вище елементи – “горб”, “загорожа” і “пляма” (рис. 3). Змінними параметрами моделі є: висота h_e , діаметр D_e , радіус лінзи r_e і її коефіцієнт відбивання ρ_e . Модель придатна для досить повного описання властивостей галогенних ламп і світловипромінюючих діодів (СВД) як одиночної, так і стрічкової конструкції (рис. 4), які найчастіше використовуються у ДВ. При аналізі враховувались положення джерел випромінювання і їх кількість.

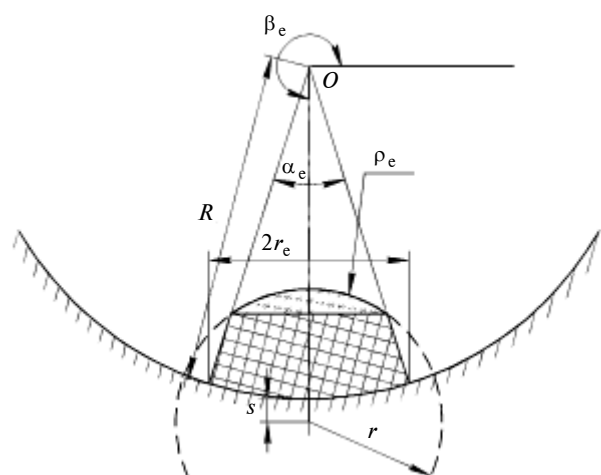


Рис. 3. Модель ДВ

Результати числового моделювання поля яскравості вихідної апертури ДВ для різних па-

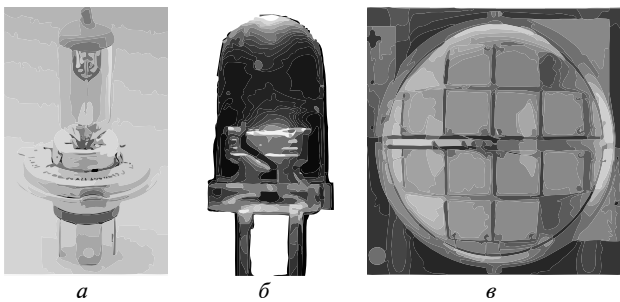


Рис. 4. Первісні джерела, що використовуються у ДВ: *a* – галогенна лампа, *б* – СВД, *в* – стрічкові СВД

раметрів джерела випромінювання подані на рис. 5, дослідження впливу поясів встановлення різних координат первинних джерел на яскравість вихідної апертури – на рис. 6. При цьому покладались такі вихідні параметри: положення елемента $\beta_e = 35^\circ$, $\beta_e = 35^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$, радіус елемента $r = 15$ мм – для стрічкового СВД, $r = 5$ мм – для класичного СВД, $1 \text{ мм} \leq r \leq 9 \text{ мм}$, $\Delta r = 2$ мм, висота елемента для стрічкового СВД $h = 5$ мм, для класичного – $h = 10$ мм, $5 \text{ мм} \leq h \leq 25 \text{ мм}$, $\Delta h = 5$ мм, радіус лінзи $R = 15$ мм, $6 \text{ мм} \leq R \leq 14 \text{ мм}$, $\Delta h = 2$ мм, зміщення центра елемента відносно поверхні ІС $s = 5$ мм, коефіцієнт відбивання від поверхні елемента $\rho_e = 50\%$.

З графіків на рис. 5, 6 важливо відмітити:

- при різних розмірах первісних джерел

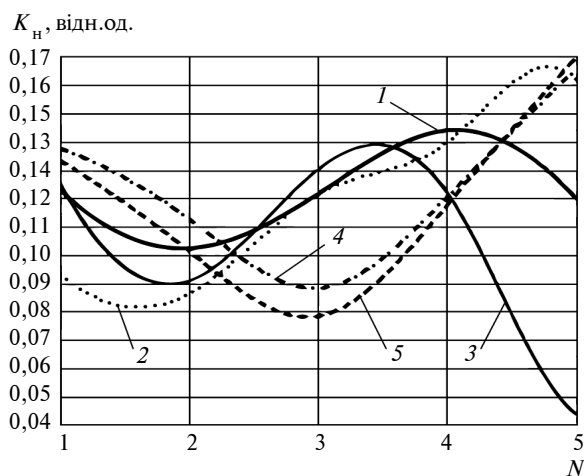


Рис. 5. Вплив на відношення нерівномірності яскравості вихідної апертури ДВ параметрів джерела випромінювання залежно від: *1* – висоти СВД, *2* – радіуса СВД, *3* – радіуса лінзи СВД, *4* – положення стрічкового СВД, *5* – положення звичайного СВД

випромінювання при їх встановленні в однакових місцях коефіцієнт нерівномірності яскравості вихідної апертури ДВ майже не змінюється;

- найкраще місце для встановлення первісних джерел лежить на проміжку $\beta_e \leq 90^\circ$, однак занадто близько до вихідної апертури ДВ їх встановлювати не рекомендується, оскільки можливе потрапляння відбитого випромінювання від елемента безпосередньо у вихідну апертуру;

- при збільшенні радіуса світлодіода монотонно погіршується нерівномірність яскравості вихідної апертури;

- при збільшенні висоти первісного джерела і радіуса кривизни його лінзи коефіцієнт нерівномірності яскравості вихідної апертури ДВ на початку зростає, але при перетині деякого порога починає зменшуватись; це можна пояснити тим, що в деякий момент світлодіод починає відігравати роль загорожі з майже плоскими гранями;

- встановлення поясів світлодіодів близько один до одного на проміжку $\beta_e \leq 90^\circ$ дає можливість істотно знизити нерівномірність випромінювання, при цьому також значно підвищується вихідна яскравість;

- при збільшенні кількості поясів, а особливо при їх довільному розміщенні, неоднорідність яскравості вихідної апертури значно посилюється.

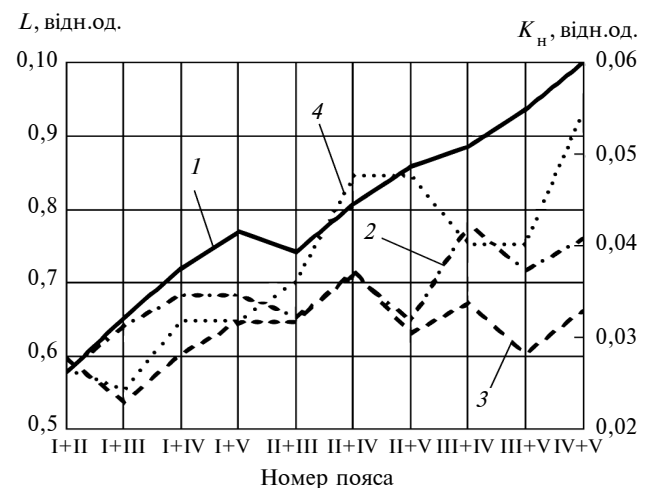


Рис. 6. Вплив поясів встановлення різних координат первинних джерел на яскравість вихідної апертури ДВ для джерела випромінювання (I – пояс встановлений під кутом 35° , II – 45° , III – 90° , IV – 135° , V – 180°): *1* – яскравість вихідної апертури, *2* – відношення нерівномірності яскравості для ІС з $R = 250$ мм, *3* – $R = 500$ мм, *4* – $R = 750$ мм

Оцінка потенційних характеристик дифузного випромінювача при використанні світло-випромінюючих діодів

Теоретичні й експериментальні дослідження ДВ на основі ІС з СВД, виконані в [5, 7], а також в цій роботі, дають змогу оцінити потенційні можливості покращення метрологічних характеристик таких випромінювачів і розробити конкретні рекомендації щодо їх проектування. При цьому найбільший інтерес становлять збільшення інтегральної яскравості ДВ, зменшення неоднорідності формованого поля яскравості і розширення спектрального діапазону.

Для підвищення інтегральної яскравості і зменшення неоднорідності, як показано в [7], найбільш доцільно підвищувати щільність установки джерел випромінювання в ІС при одночасному зменшенні їх габаритів. У цьому плані найбільш перспективною є стрічкова конструкція СВД. У таблиці [8] наведено основні характеристики стрічкових СВД великої потужності видимого діапазону, а на рис. 7 – їх конструктивні параметри.

Протягом останнього десятиліття параметри СВД значно покращились. У контексті проблеми ДВ найбільш важливим параметром СВД є їх максимальна яскравість. На рис. 8

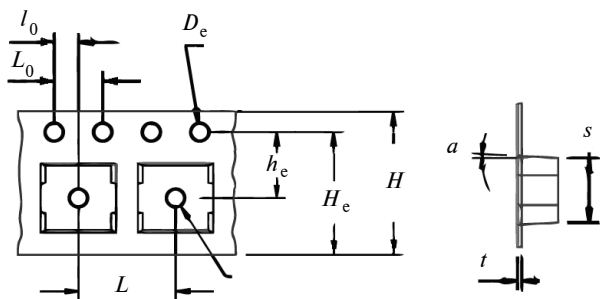


Рис. 7. Основні параметри стрічкових СВД

Таблиця. Основні характеристики СВД великої потужності

Модель СВД	Електричні параметри			Оптичні параметри		Косинусність, <i>m</i>	Кут випромінювання, град	Габарити, мм
	Струм <i>I</i> , мА	Напруга <i>U</i> , В	Потужність <i>P</i> , Вт	Кольорова температура, К	Потік, Лм			
EWJ	1200	4	5	6000	350	1	140	12
LZ4	1000	14	10	5500	700	1	105	10
PWD	1400	15	20	6000	780	1	140	6
CLA	800	8	5	5500	687	3	120	8
CXA	700	7	5	5500	1040	1	115	22
XML	700	7	5	5300	340	1	125	5

показано тенденції розвитку СВД протягом останніх років. Слід зауважити, що для кожного спектрального діапазону яскравість СВД має свої залежності, а саме: для діапазону довжин хвиль ~ 240 нм максимальна яскравість на кінець 2011 р. становила 0,04 мВт/ср, 270–350 нм – 0,3 мВт/ср, 350–400 нм – 3 мВт/ср, 400–800 нм – 1250 Лм, 800–980 нм – 300 мВт/ср, 1000–1650 нм – 3 мВт/ср, 1700–2600 нм – 1,5 мВт/ср, 2700–4800 нм – 20 мВт/ср.

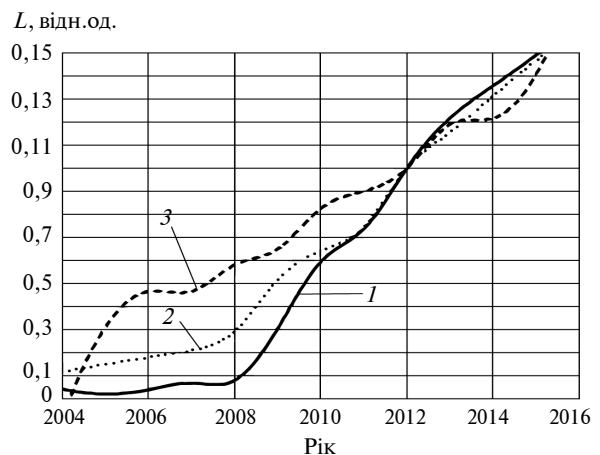


Рис. 8. Тенденції підвищення сили випромінювання СВД: 1 – видимий діапазон, 2 – УФ-діапазон, 3 – ІЧ-діапазон

При аналізі параметрів установки таких СВД були використані рекомендації, розроблені в [7], а саме (рис. 9):

лінійний габарит вузла кріплення джерела на поясі встановлення $W_L = 2\Delta_{дж}$;

діаметр вихідної апертури $D_{вих}$;

радіус сфери $R_{сф}$;

центральный кут вихідного отвору $\alpha_{вих} =$

$$= 2 \arctan \left(\frac{D_{вих}}{2R_{сф}} \right);$$

довжина дуги вихідної апертури $\Delta_{\text{вих}} = R_{\text{сф}} \cdot \alpha_{\text{вих}}$;

центральный кут дуги кріплення $\alpha_{\text{кр}}$. Для підвищення яскравості ДВ, необхідно щоб у ньому встановлювалась якомога більша кількість первинних джерел випромінювання, для цього дуга кріплення має пропорційно збільшуватись. Однак необхідно запобігати потраплянню випромінювання від такого джерела, яке розповсюджується в межах кута $\alpha_{\text{СВД}}$, безпосередньо у вихідний отвір ДВ. У такому випадку слід використовувати співвідношення для визначення центрального кута дуги кріплення $\alpha_{\text{вих}} \leq \alpha_{\text{кр}} \leq 0,5 \cdot \alpha_{\text{СВД}} - \alpha_{\text{вих}}$;

дуга кріплення $\Delta_{\text{кр}} = R_{\text{сф}} \cdot \alpha_{\text{кр}}$;

довжина дуги січної з діаметром поясу встановлення $\Delta_{\text{пв}} = \Delta_{\text{вих}} + 2 \cdot \Delta_{\text{кр}} + 2 \cdot \Delta_{\text{дж}}$;

центральный кут поясу встановлення $\alpha_{\text{пв}} = \frac{\Delta_{\text{пв}}}{R_{\text{сф}}}$;

діаметр поясу встановлення $D_{\text{пв}} = 2 \cdot R_{\text{сф}} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{\text{пв}}}{2}\right)$;

максимально можлива кількість джерел, які можуть розміщуватись при даній упаковці

$$N_{\text{дж}} = \frac{D_{\text{пв}} \cdot \pi}{W_L}$$

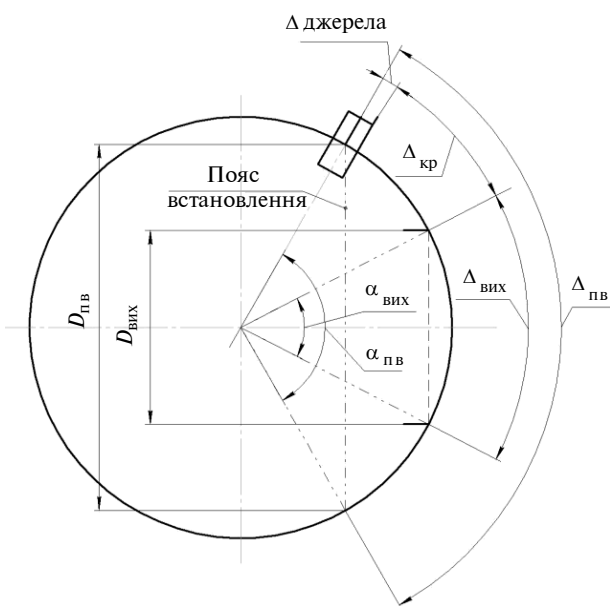


Рис. 9. Розрахункові параметри при визначенні упаковки ІС

Інтегральна яскравість ДВ визначається за формулою [6]

$$L_{\text{вих}}(\lambda) = \frac{I_0 N_{\text{дв}}}{\pi(D_{\text{сф}})^2} \cdot \frac{\cos^{m+1} \theta_{\text{еф}} - 1}{\cos^2 \theta_{\text{еф}} - 1} \times \left[1 + \frac{\rho \sin^2 \theta_{\text{еф}}}{1 - \rho \left(1 - \left(\frac{D_{\text{вих}}}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - \frac{A_{\text{дв}}}{\pi(D_{\text{сф}})^2} - \frac{\rho_{\text{дв}} A_{\text{дв}}}{\pi(D_{\text{сф}})^2} \right)} \right] = \frac{\Phi_{\text{дв}} N_{\text{дв}}}{2(\pi D_{\text{сф}} \sin \theta_{\text{еф}})^2} \times \left[1 + \frac{\rho \sin^2 \theta_{\text{еф}}}{1 - \rho \left(1 - \left(\frac{D_{\text{вих}}}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - \frac{A_{\text{дв}}}{\pi(D_{\text{сф}})^2} - \frac{\rho_{\text{дв}} A_{\text{дв}}}{\pi(D_{\text{сф}})^2} \right)} \right],$$

а величина неоднорідності поля яскравості розраховувалась розробленим числовим методом за наведеною вище методикою.

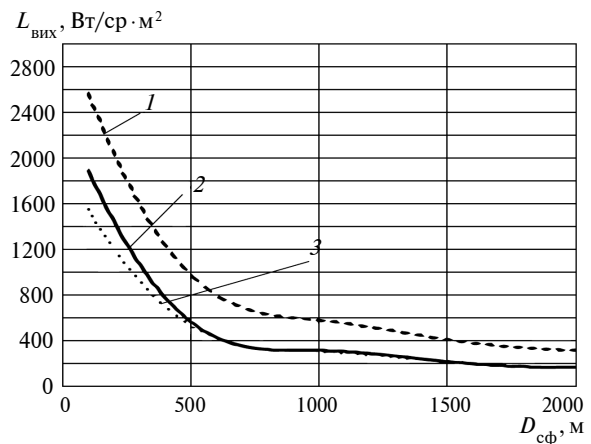


Рис. 10. Залежність яскравості вихідної апертури ДВ від розміру ІС: 1 – сумарна яскравість для двох поясів встановлення, 2 – яскравість для першого (дальнього) поясу встановлення, 3 – яскравість для другого (ближнього) поясу встановлення

На рис. 10 подані залежності вихідної яскравості ДВ від розміру ІС (відносний отвір у всіх випадках покладался рівним $\frac{D_{\text{вих}}}{D_{\text{сф}}} = \frac{1}{5}$). Як

первинні джерела були вибрані стрічкові СВД типу ХМ-Л EZW, пояси встановлення розраховувались з міркувань, щоб відстань між ними

становила не менше $1,3 \cdot W_L$. Розрахунки показали, що інтегральна яскравість ДВ з діаметром ІС 500 мм і вихідною апертурою 100 мм становила не менше 500 Вт/(ср·м²) за використання одиночного пояса стрічкових СВД (130 елементів) і не менше 950 Вт/(ср·м²) з двома поясами таких джерел (253 елементи). При цьому нерівномірність яскравості в межах вихідної апертури не перевищила 0,5 %, а спектральний діапазон ДВ при використанні покриття ІС матеріалом типу "Поліхром-1" [9], визначеним за рівнем 0,9, був не вужче 0,42–0,72 мкм. Отримані результати добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень ДВ, проведеними в [5].

Таким чином, ДВ зі стрічковими СВД забезпечують метрологічні характеристики, цілком достатні для вимірювання енергетичних характеристик і калібрування як сучасних, так і перспективних прецизійних цифрових відеосистем у видимій ділянці спектра.

Висновки

Виконано числовий аналіз впливу мікроструктури ІС на характеристики формованого ДВ поля яскравості. Показано, що в усіх випадках положення елемента нерівномірності є

найбільш суттєвим фактором впливу на розподіл яскравості вихідної апертури, коливання інших конструктивних параметрів впливають на нерівномірність набагато менше.

Проаналізовано вплив параметрів джерела випромінювання на метрологічні характеристики ДВ. Встановлено, що розміри джерела менше впливають на нерівномірність яскравості, ніж положення джерела; при збільшенні радіуса джерела нерівномірність монотонно зростає, висота і радіус лінзи при збільшенні перестають істотно впливати на нерівномірність.

Розглянуто перспективи покращення метрологічних характеристик ДВ при використанні надяскравих СВД стрічкового типу. Показано, що інтегральна яскравість ДВ, яка використовується для калібрування прецизійних радіометричних установок, може перевищувати 950 Вт / (ср·м²) при нерівномірності поля яскравості не більше 0,5 % в спектральному діапазоні 0,4–0,7 мкм.

У подальшому планується проведення експериментальних досліджень для отримання реальних розподілів відношення нерівномірності яскравості для перевірки теоретичних розрахунків. Наступним важливим кроком є отримання подібного алгоритму просторової моделі дифузного випромінювання.

1. Голубь Б.І., Котюк А.Ф., Кузин А.Ю. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 152 с.
2. Comparison of CNES spherical and NASA hemispherical large aperture integrating sources. I. Using a laboratory transfer spectroradiometer / В. Guenther, J. McLean, M. Leroy, P. Henry // Remote sens. of Environ. – 1990. – 31, N 2. – P. 85–95.
3. Міхеєнко Л.А. Енергетичне калібрування оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності // VII Міжнар. наук.-техн. конф. "Приладобудування: стан і перспективи". – К.: НТУУ "КПІ", 2009. – С. 42.
4. Міхеєнко Л.А., Гордієнко Ю.О. Метрологічний аналіз дифузного випромінювача змінної яскравості на основі спряжених інтегруючих сфер // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2009. – № 5. – С. 82–95.
5. Міхеєнко Л.А., Тимофєєв О.С. Числовий метод аналізу поля яскравості дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 5. – С. 120–127.
6. Міхеєнко Л.А., Тимофєєв О.С. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з світловипромінюючими діодами // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 1. – С. 129–135.
7. Міхеєнко Л.А., Тимофєєв О.С. Метрологічний аналіз дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з світловипромінюючими діодами // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 2. – С. 130–137.
8. Матеріали по світловипромінюючих діодах. – <http://www.cree.com/>
9. Спектрофотометрические свойства покрытия из материала "Полихром 1" / С.Г. Гуминецкий, Л.С. Ловинский, Я.П. Марчук и др. // ОМП. – 1990. – № 2. – С. 19–21.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
16 серпня 2011 року