

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

**ПРОЕКТУВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИЧНИХ
ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ**

Практикум для здобувачів освітньо-наукового ступеня «доктор філософії»
зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
усіх форм навчання

Черкаси
2020

УДК 681.7(076)
П79

*Затверджено вченою радою ФЕТР,
протокол №2 від 12.09.2019 р.,
згідно з рішенням кафедри
приладобудування, мехатроніки та
комп'ютеризованих технологій
протокол №1 від 27.08.2019 р.*

Упорядники: Трембовецька Р.В., к.т.н., доцент,
Гальченко В.Я., д.т.н., професор,
Тичков В.В., к.т.н., доцент,
Бондаренко М.О., д.т.н., доцент

Рецензент: Антонюк В.С., д.т.н., професор

П79 Проектування та метрологічне забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів: Практикум для здобувачів освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка усіх форм навчання [Електронний ресурс] / [Упоряд. : Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В., Бондаренко М.О.] ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2020. – 235 с. – Назва з титульного екрана.

Видання поглиблює знання здобувачів освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» з проектування та метрологічного забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів. Запропоновано послідовність та приклади розв'язку практичних завдань з використанням пакету прикладних програм MathCAD.

УДК 681.7(076)

Навчальне електронне видання
комбінованого використання

ПРОЕКТУВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Практикум для здобувачів освітньо-наукового ступеня «доктор філософії»
зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
усіх форм навчання

Упорядники: **Трембовецька** Руслана Володимирівна,
Гальченко Володимир Якович,
Тичков Володимир Володимирович,
Бондаренко Максим Олексійович

В авторській редакції.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	7
Практичне заняття №1	
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДВОКОМПОНЕНТНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ	9
Практичне заняття №2	
ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ОПТИЧНА СИСТЕМА З ЛАЗЕРОМ	34
Практичне заняття №3	
РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ПОТОКІВ І ОПРОМІНЕНОСТІ НА ВХОДІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДУ	51
Практичне заняття №4	
ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ	68
Практичне заняття №5	
ОФОРМЛЕННЯ КРЕСЛЕНЬ ТИПОВИХ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ	92
Практичне заняття №6 АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕТАЛОННИХ ВИМІРЮВАНЬ РОБОЧИМ ЕТАЛОНОМ ОДИНИЦІ ЕНЕРГІЇ КОРОТКОІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	130
Практичне заняття №7	
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ ЗБІЛЬШЕННЯ	147
Практичне заняття №8	
ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ВІДНОСНОГО РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ЕНЕРГІЇ (ПОТУЖНОСТІ) ВИПРОМІНЮВАННЯ	161
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	181
ДОДАТОК А - Зразок оформлення титульної сторінки	191
ДОДАТОК Б - Технічні характеристики оптичних матеріалів	192
ДОДАТОК В - Технічні характеристики джерел та приймачів випромінювання	208
ДОДАТОК Г – Технічні характеристики деяких моделей технологічних газових лазерів	222
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	235

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

А

AB – розмір предмету

A і A' - спряжені точки

AA' - оптична вісь деякої центрованої системи

a – відстань від передньої головної площини до предмету

a' - відстань від задньої головної площини до зображення

$\alpha'_{F'}$ - положення точки заднього фокусу еквівалентної оптичної системи

В

$B_{\text{поверхні}}$ - яскравість відбитого променю

B_e - енергетична яскравість

Д

D, D' - діаметри вхідної і вихідної зіниці системи відповідно

d - товщина лінзи по оптичній осі

Ф

F - передній головний фокус

F – потужність світлового потоку

$F_{\text{нов. min}}$ - світловий потік відбитий від поверхні

F' - задній фокус системи

f' - задня фокусна відстань

f - передня фокусна відстань

$f'_{\text{об}}$ - фокусна відстань об'єктива телескопічної системи

Е

E_e - енергетична освітленість об'єкту вимірювання

E - модуль пружності

E'_e - освітленість площадки приймача

$E'_{\text{зобр}}$ - освітленість на осі зображення в предметній площині окуляру ендоскопу

$E_{\text{об'єкту}}$ - освітленість об'єкту

Н

H - передня головна площина

H' - задня головна площина

І

I_v - сила світла

I_e - енергетична сила світла джерела

K

K – коефіцієнт підсилення підсилювача
 k – необхідне співвідношення сигнал/шум

L

L - яскравість
 $L_{об'єкту}$ - яскравість об'єкту спостереження

N

n, n' - показник заломлення

P

P_o - потужність випромінювання світловипромінюючого діоду
 p - відстані від вхідної зіниці до предметної площини

R

R_T - темновий опір
 R_0 - диференційний опір

S

S – площа випромінюючої поверхні
 S_I - струмова чутливість
 S_U - вольтова чутливість
 S_1 площа випромінюючої поверхні джерела
 S_2 площа чутливої площадки приймача
 S_λ - спектральна чутливість
 $S_{\max}$ - максимальна спектральна чутливість приймача

U

U_{np} - постійна пряма напруга
 $U_{зв.мах}$ - максимально допустима зворотна постійна напруга
 $U_{мах}$ - максимально допустима напруга
 U_p - робоча напруга
 $U_{жс}$ - напруга джерела живлення

Q

Q - скважність

Y

y – розмір предмету
 y' - розмір зображення

Δ - відносна різниця коефіцієнтів заломлення
 $\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ - відхилення середньої дисперсії
 $\Delta_{HH'}$ - відстань між головними площинами (головними точками)
 Δn_e - Відхилення показника заломлення
 Φ - оптична сила системи
 $\Phi_1, \dots, \Phi_n$ - оптична сила кожного елементу
 Φ_e' - потік випромінювання, що потрапив на площадку приймача
 β - лінійне збільшення оптичної системи
 γ - кутове збільшення оптичної системи
 ε - кут падіння
 ε' - кут відбиття або заломлення
 $\varepsilon(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт випромінювання джерела
 k_λ - коефіцієнта поглинання для різних довжин хвиль
 $\lambda_{\max}$ - довжина хвилі; максимум спектрального розподілу
 ν - частота випромінювання
 ρ - коефіцієнт відбиття
 σ - кут до оптичної осі; апертурний кут променю
 τ_λ - коефіцієнта пропускання
 $\tau_a(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери
 τ_m - коефіцієнт пропускання модулятора (аналізатора).
 τ - інтегральний коефіцієнт пропускання середовищ, розташованих між джерелом випромінювання і приймачем
 ω - кут відхилення
 ω - кутове поле об'єктиву в просторі предметів
 ω_Σ - сумарний кут відхилення променю двома клинцями
 2ω - кутове поле в просторі предметів об'єктива
 $2\omega'$ - кутове поле в просторі зображення окуляра

ВСТУП

Дисципліна «Проектування та метрологічне забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів» включає в себе основи теорії, розрахунку і проектування та конструювання оптичних, оптико-електронних приладів. Знання цих основ дає змогу набуту навички проектування оптичних та оптико-електронних приладів, розробок конструкторської документації деталей, складальних одиниць та приладів. Сучасні оптичні та оптико-електронні прилади пов'язані з передовими інформаційними технологіями та передовими досягненнями науки та техніки.

Оптико-електронний прилад (ОЕП) є складною системою, яка складається із оптичних, механічних та електронних ланок, тому часто його називають оптико-електронною системою (ОЕС).

Різновиди в принципах роботи ланок ОЕП, в способах обробки сигналів, що проходять через неї, а також розмаїття умов експлуатації ОЕП зумовлюють складність та багаторівневність процесу проектування цих приладів і вимагають ретельного аналізу як умов роботи ОЕП, так і стану наявної елементної бази.

Розробка складних систем, яким є ОЕП, проводиться в певній послідовності. Точкою відліку при створенні будь-якої системи є вибір і формулювання мети проектування. Необхідність створення нового виробу визначається як розвитком конкретного напрямку техніки, так і потребами користувачів. Це вимагає попереднього аналізу потреб суспільства та рівня науки і техніки, особливо в таких галузях як оптика, електроніка, програмування, точна механіка.

При цьому основна складність полягає в тому, що розробник на основі аналізу сучасних даних повинен прогнозувати розвиток систем, створенням яких він займається. Обґрунтування вихідних даних вимагає врахування призначення системи, основних видів взаємодії з іншими системами або підсистемами, впливу зовнішніх факторів.

Оптична система є одним із найбільш важливих вузлів ОЕП. В загальному випадку вона слугує: для забезпечення необхідних (світлотехнічних) співвідношень, тобто для забезпечення заданого рівня сигналу (або співвідношення сигнал/шум) на приймачі випромінювання шляхом збирання необхідної кількості енергії, формування раціональної просторової структури пучка променів і його спектрального складу і т.д.; для отримання необхідної якості зображення спостережних об'єктів або полів, що призводить до необхідності забезпечити достатню просторову, часову, спектральну і енергетичну дозвільну здатність; для виділення корисних оптичних сигналів на фоні можливих перешкод і визначення їх характерних ознак, для чого також необхідно забезпечити дозвільну здатність за одним або декільком параметрам оптичного сигналу.

Важливою частиною як приймальної, так і передавальної оптичної системи є об'єкти. В передавальній системі об'єкти формує пучок променів, спрямований на досліджуваний об'єкт або в приймальну оптичну систему. В

приймальній системі об'єктів слугує в першу чергу для збирання енергії випромінювання та перетворення зображення досліджуваного або спостережного об'єкту.

Посібник побудований відповідно до кредитно-модульної системи організації навчального процесу. Змістовий модуль **«Проектування оптичних та оптико-електронних приладів і систем»** містить 5 практичних заняття які спрямовані на опрацювання практичних навичок розрахунку елементів оптичних систем.

Змістовий модуль **«Метрологічне забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів і систем»** містить 3 практичних заняття де виконується енергетичний розрахунок двокомпонентної фотоелектричної оптичної системи та точнісний розрахунок ОЕП

На практичних заняттях детально розглядаються окремі теоретичні положення навчальної дисципліни та формуються у студентів вміння та навички їх практичного застосування шляхом індивідуального виконання завдань. Практичне заняття включає:

- проведення попереднього контролю знань за питаннями, що наводяться до кожної роботи;
- розв'язування завдань з їх обговоренням та встановленням незрозумілих, складних моментів;
- розв'язування індивідуальних завдань, їх перевірку;
- оцінювання кінцевого рівня знань за питаннями, що пропонуються до кожної роботи.

В системі дистанційної освіти ЧДТУ [<http://ias.cdtu.edu.ua/>] є електронна версія конспекту, посібник для виконання практичних робіт. Також наведені тестові завдання для самоконтролю до кожної теми відповідного змістового модулю. Після вивчення відповідного теоретичного лекційного матеріалу студент самостійно проходить тест-самоконтроль, отримує відповідну кількість балів, та аналізує свій рівень знань і може виконувати тестування необмежену кількість разів.

Практичне заняття № 1

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДВОКОМПОНЕНТНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи:

1. Виконати габаритний розрахунок двоконденсентної оптичної системи.
2. Виконати розрахунок ходу променю крізь складну оптичну систему.
3. Виконати розрахунок ходу променю крізь складну оптичну систему матричним методом.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Фотоелектрична система. Основні складові частини. Вимоги до елементів.
2. Двоконденсентна оптична система. Основні параметри.
3. Габаритний розрахунок складної оптичної системи.

2. Теоретичні відомості

2.1 Габаритний розрахунок оптичної системи

Фотоелектричні системи, в яких чутлива площадка приймача розташована в площині зображення джерела, мають недолік, який полягає в тому, що при великих кутових розмірах джерела або при рухомому джерелі, що переміщується в просторі предметів в межах значного кутового поля $2 \cdot \omega$, розмір чутливої площадки приймача повинен бути більшим, що зумовлює нестабільність сигналу внаслідок зміни чутливості по площадці приймача, значні власні шуми і технологічні труднощі виготовлення крупногабаритних приймачів. Надійну роботу фотоелектричної системи забезпечує двоконденсентна система, в якій чутлива площадка приймача розміщується в площині вихідної зіниці системи, де утворюється інтегральне зображення джерела рис. 1.1, 1.2. Об'єктив створює проміжкове зображення джерела в площині аналізатора, який виконує роль польової діафрагми. Конденсор, що розташований за аналізатором, проектує вихідну зіницю об'єктиву в площину чутливої площадки приймача (площина вихідної зіниці системи). Використання конденсора дозволяє зменшити необхідний розмір чутливої площадки приймача, в результаті чого зменшується вплив нерівномірної чутливості по площадці і зменшуються власні шуми приймача.

Світлоенергетичний розрахунок системи з конденсором полягає в знаходженні діаметру вхідної зіниці об'єктиву, який забезпечує надходження на приймач потоку випромінювання, необхідного для отримання заданого сигналу.

Значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D_{1вх}$ вхідної зіниці об'єктиву, визначають за формулою:

$$D \geq 2 \cdot p \cdot \operatorname{tg}(\sigma_A) \quad (1.1)$$

Габаритний розрахунок системи полягає у визначенні фокусних відстаней об'єктиву і конденсора, а також взаємного розташування об'єктиву, конденсора і приймача.

Лінійне збільшення об'єктиву β_1 (при розташуванні джерела випромінювання на кінцевій відстані від системи) знаходиться як відношення діаметру $2y'$ польової діафрагми (аналізатора) – до лінійного поля $2y$ об'єктиву в просторі предметів:

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \quad (1.2)$$

Тоді при відомій відстані a_1 від об'єктиву до джерела випромінювання відстань a'_1 від об'єктиву до площини аналізатора і фокусну відстань об'єктиву f'_1 визначають за формулами:

$$a'_1 = \beta_1 \cdot a_1; \quad f'_1 = \frac{a_1 \cdot \beta_1}{1 - \beta_1} = \frac{a'_1}{1 - \beta_1} \quad (1.3)$$

У випадку віддаленості предмету – $a_1 \rightarrow \infty$ аналізатор розміщують в задній фокальній площині об'єктиву, задню фокусну відстань якого визначають за формулою:

$$f'_1 = \frac{y'}{\operatorname{tg}(\omega)} \quad (1.4)$$

де ω - кутове поле об'єктиву в просторі предметів.

Лінійне збільшення конденсора β_2 визначається із умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи. Лінійне збільшення в зіницях системи:

$$\beta_p = \beta_{p1} \cdot \beta_2 = \frac{D'_{1вх} \cdot D'_{2вх}}{D_{1вх} \cdot D'_{1вх}} = \frac{D'_{2вх}}{D_{1вх}} \quad (1.5)$$

де β_{p1} - лінійне збільшення в зіницях об'єктиву;

$D'_{1вх}$, $D'_{2вх}$ - діаметри вихідних зіниць об'єктиву і всієї системи відповідно.

При $\beta_{p1} = 1$

$$\beta_p = \frac{d_{np}}{D_{1вх}} \quad (1.6)$$

Відстань d між головними площинами конденсора і об'єктиву:

$$d = a'_1 + a_2 \quad (1.7)$$

де a_2 - відстань між площиною аналізатора і головним площинами конденсора, вибирається по можливості малим із умови зменшення світлового діаметру конденсора D_2 .

Фокусну відстань f'_2 визначають з умови забезпечення отримання після конденсора пучка світла, що є паралельним, або пучка, що збігається: $f'_2 \leq e$.

Відстань a'_2 , характеризує положення вихідної зіниці системи (площини розміщення чутливої площадки приймача) відносно головних площин конденсора, тоді задню фокусну відстань f'_2 розраховують за формулами:

$$a'_2 = \beta_2 \cdot a_2; \quad f'_2 = \frac{a_2 \cdot \beta_2}{1 - \beta_2} = \frac{a'_2}{1 - \beta_2} \quad (1.8)$$

Кутове поле конденсора в просторі зображення $2\omega'_k$:

$$\operatorname{tg}(\omega'_k) = \gamma_p \cdot \operatorname{tg}(\omega) \quad (1.9)$$

де γ_p - кутове збільшення в зіницях системи.

Для системи, що розташована в однорідному середовищі, при $\beta_{p1} = 1$:

$$\operatorname{tg}(\omega'_k) = \frac{\operatorname{tg}(\omega)}{\beta_p} = \frac{\operatorname{tg}(\omega)}{\beta_2} = \frac{\operatorname{tg}(\omega) \cdot D_{1ex}}{d_{np}} \quad (1.10)$$

Якщо площина аналізатора знаходиться в суміщених задній фокальній площині об'єктиву і передній фокальній площині конденсора, то:

$$\operatorname{tg}(\omega'_k) = \operatorname{tg}(\omega) \cdot \frac{f'_1}{f'_2} \quad (1.11)$$

Діаметр конденсора D_2 за відсутності він'єтування для краю поля визначається ходом крайнього променя нахилоного пучка (який йде через нижній край вихідної зіниці об'єктиву і верхній край польової діафрагми):

$$D_2 = D_{пд} + 2 \cdot a_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \quad (1.12)$$

$$\text{де } \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{D'_{1ex} + D_{пд}}{2 \cdot a'_1}.$$

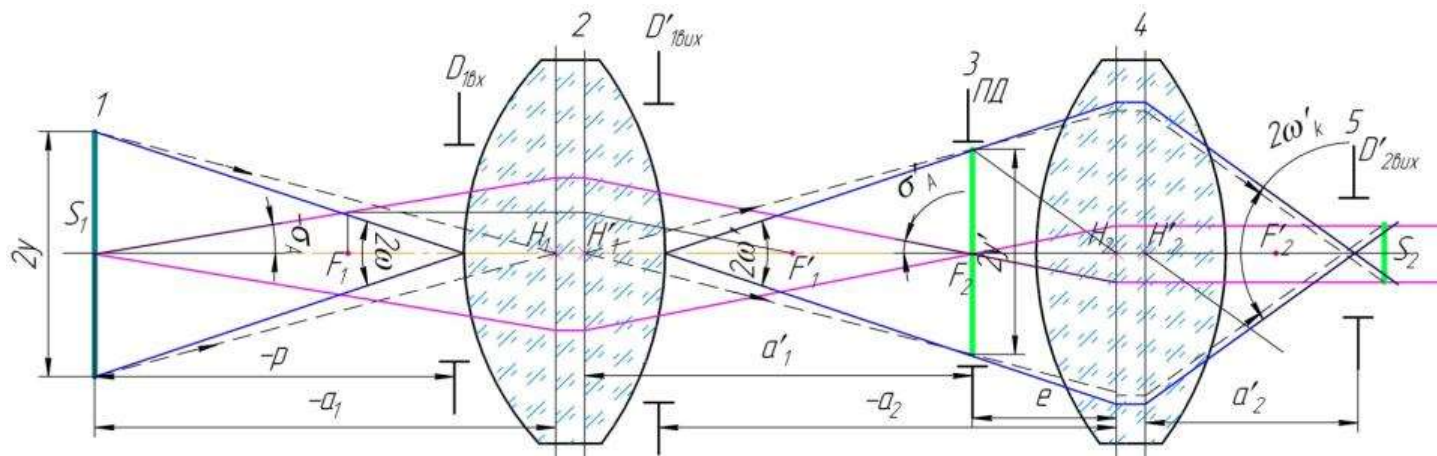


Рисунок 1.1 – Схема оптичної фотоелектричної системи з приймачем випромінювання в вихідній зіниці (польова діафрагма знаходиться на відстані $e = f_2$)

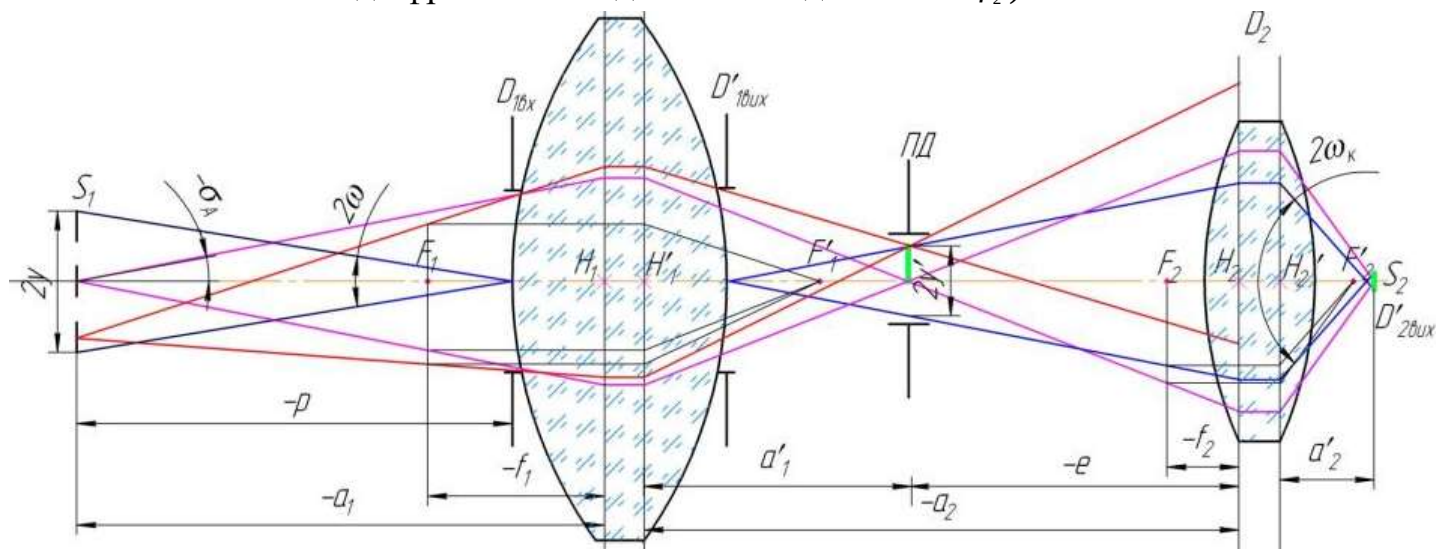


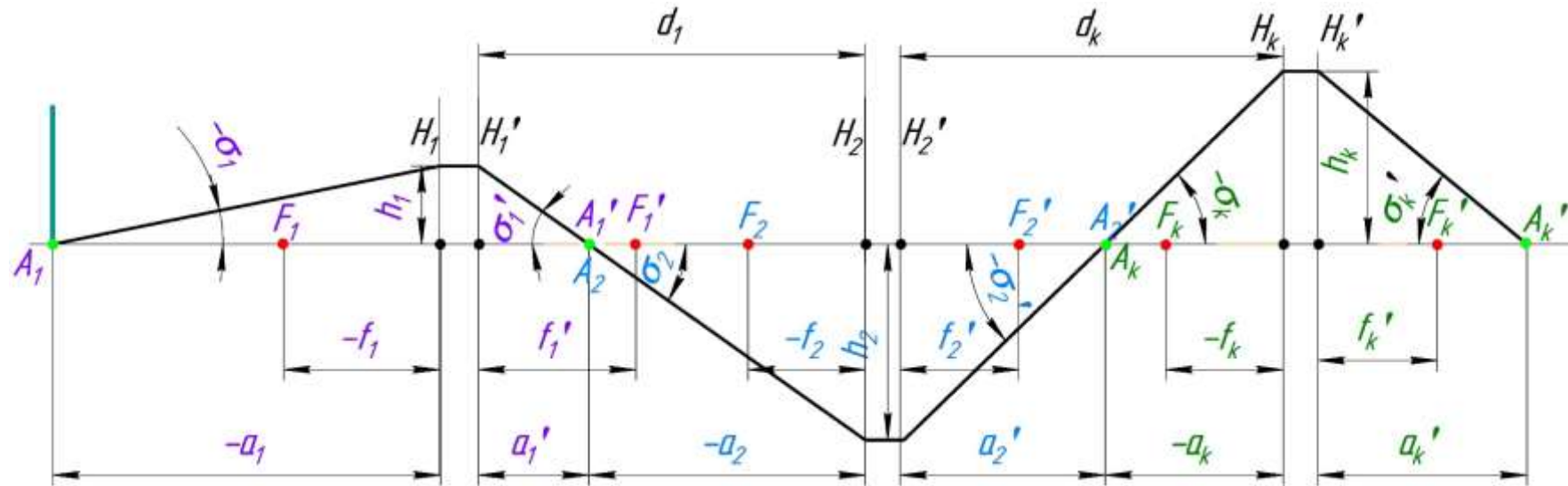
Рисунок 1.2 - Схема оптичної фотоелектричної системи з приймачем випромінювання в вихідній зіниці (польова діафрагма знаходиться на відстані $e > f_2$)

2.2 Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему

Нехай складна система складається із ряду простих систем, заданих положенням фокусу та головних площин, взаємне розташування яких задано відстанями $d_1, d_2, \dots, d_m, \dots, d_{k-1}$, де d_m - відстань між задньою головною площиною попереднього m -го компонента та передньою головною площиною наступного.

Із точки предмету A_1 , що знаходиться на відстані a_1 від передньої головної площини першої системи, проводимо довільний промінь під кутом σ_1 .

Заломлюючись всередині системи, це промінь пройде через точки $A_1' (A_2)$; $A_2' (A_k)$; A_k .



I-ший оптичний елемент Дано: $-a_1, \sigma_1, -f_1 = f'_1$	II-гий оптичний елемент Дано: $-f_2 = f'_2, d_1$	k-тий оптичний елемент Дано: $-f_k = f'_k, d_k$
$a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_1}{a_1 - f_1}$ $tg(\sigma_1) = \left(\frac{h_1}{a_1} \right)$ $\sigma'_1 = \sigma_2 = arctg \left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1} \right) \right)$	$a_2 = a'_1 - d_1, a'_2 = \frac{a_2 \cdot f'_2}{a_2 - f_2}$ $h_2 = h_1 - d_1 \cdot tg(\sigma_2)$ $\sigma_2 = arctg \left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1} \right) \right)$ $\sigma'_2 = \sigma_k = arctg \left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2} \right) \right)$	$a_k = a'_2 - d_k, a'_k = \frac{a_k \cdot f'_k}{a_k - f_k}$ $h_k = h_2 - d_k \cdot tg(\sigma_k)$ $\sigma_k = arctg \left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2} \right) \right)$ $\sigma'_k = arctg \left(-\frac{f_k}{f'_k} \cdot tg(\sigma_k) + \left(\frac{h_k}{f'_k} \right) \right)$

Лінійне збільшення складної системи визначається за формулою: $\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a} \right)_m$.

2.3 Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом

Загальна матриця перетворення має вигляд:

$$M_{\Sigma} = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

3. Виконання завдання

Завдання 3.1 Пошуково-творче. Габаритний розрахунок оптичної системи

Розрахувати фотоелектричну систему з приймачем випромінювання, розташованим в площині вихідної зіниці.

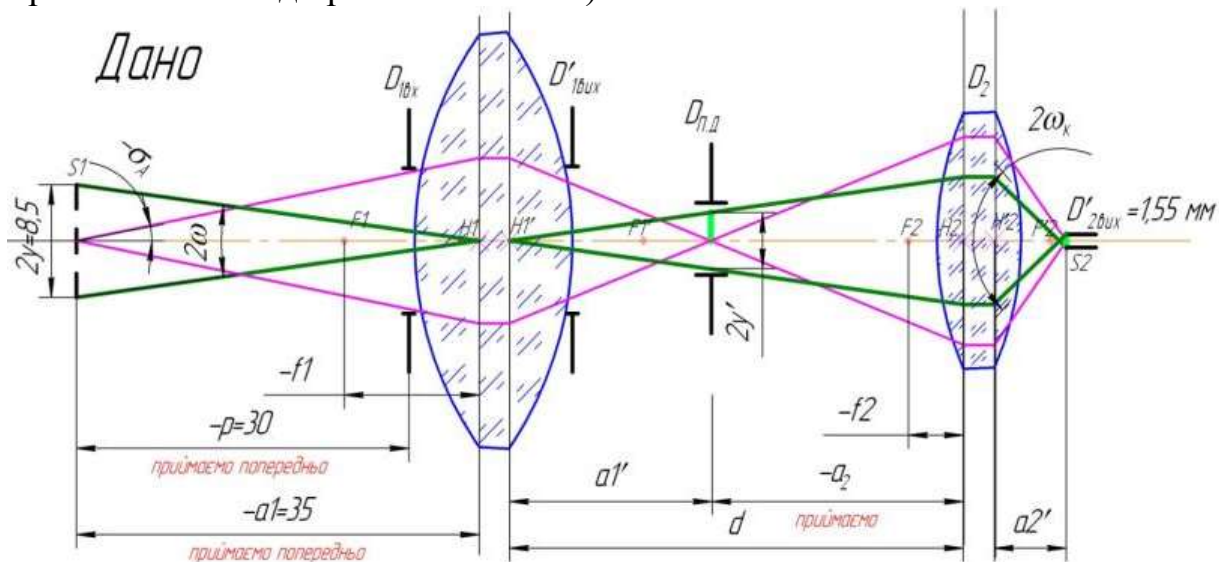
Дано джерело світла:

- Діаметр випромінюючої площадки 8,5 мм;
- Потік випромінювання 750 лм.

Дано приймач випромінювання:

- Діаметр приймальної площадки 1,55 мм;
- Інтегральна спектральна чутливість $S_i = 3.3 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$;
- Мінімально допустимий струм фотоприймача $i_{\min} \geq 0.017 \text{ мкА}$.

*Примітка. Варіанти вихідних даних (тип джерела та приймача випромінювання підібрати самостійно).



Приклад виконання завдання

1. Визначаємо значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D_{1\text{вх}}$ входної зіниці об'єктиву:

$$\sin^2(\sigma_A) \geq \frac{i_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{інт}}} \Rightarrow \sigma_A = \arcsin\left(\sqrt{\frac{i_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{інт}}}}\right) \geq 0,326^\circ$$

приймаємо $\sigma_A = 3,26^\circ$

2. Визначаємо діаметр входної зіниці за формулою:

$$D_{1\text{вх}} \geq 2 \cdot p \cdot \tan(\sigma_A) = 2 \cdot 30 \cdot \tan(3,26) \geq 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,0 \text{ мм}$$

Приймаємо попередньо відстань розташування діафрагми вхідної зіниці
– $p = 30 \text{ мм}$ *

*Примітка. Надалі цю відстань можна змінювати таким чином, щоб досягти поставленої мети тобто сфокусувати все випромінювання в заданий розмір приймача випромінювання (орієнтуючись на значення п.10)

3. Виконуємо габаритний розрахунок. Габаритний розрахунок системи складається в визначенні фокусних відстаней об'єктиву і конденсора, а також взаємного розташування об'єктиву, конденсора і приймача.

Приймаємо:

- розташування джерела випромінювання на кінцевій відстані від системи – $a_1 = 35 \text{ мм}$ *.

*Примітка. Надалі цю відстань можна змінювати таким чином, щоб досягти поставленої мети тобто сфокусувати все випромінювання в заданий розмір приймача випромінювання (орієнтуючись на значення п.10)

- лінійне збільшення об'єктиву $\beta_1 = -0,4$ (*приймається попередньо, і можна змінювати в залежності від необхідного загального лінійного коефіцієнту збільшення $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$).

Визначаємо діаметр польової діафрагми із формули:

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \Rightarrow 2y' = \beta_1 \cdot 2y = 3,4 \text{ мм}$$

$$\text{приймаємо } D_{\text{п.д.}} = 4,0 \text{ мм}$$

4. Тоді при відомій відстані – $a_1 = 35 \text{ мм}$ від об'єктиву до джерела випромінювання відстань a'_1 від об'єктиву до площини аналізатора і фокусну відстань об'єктиву f'_1 визначають за формулами:

$$a'_1 = \beta_1 \cdot a_1 = -0,4 \cdot (-35) = 14 \text{ мм}; \quad f'_1 = \frac{a'_1}{1 - \beta_1} = \frac{14}{1 - (-0,4)} = 10 \text{ мм}$$

5. Лінійне збільшення конденсора β_2 визначається із умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи. Лінійне збільшення в зіницях системи:

$$\beta_p = \beta_{p1} \cdot \beta_2 = \frac{D'_{1\text{вих}} \cdot D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}} \cdot D'_{1\text{вих}}} = \frac{D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}}}$$

де β_{p1} - лінійне збільшення в зіницях об'єктиву;

$D'_{1\text{вих}}$, $D'_{2\text{вих}}$ - діаметри вихідних зіниць об'єктиву і всієї системи відповідно.

При $\beta_{p1} = 1$.

$$\beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{1ex}} = \frac{1,55}{4,0} = -0,3875 \quad \beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{1ex}}$$

6. Відстань d між головними площинами конденсора і об'єктиву:

$$d = a'_1 + a_2 = 14 + 15 = 29 \text{ мм}$$

де a_2 - відстань між площиною аналізатора і головним площинами конденсора, вибирається по можливості малим із умови зменшення світлового діаметру конденсора D_2 .

Фокусну відстань f'_2 визначають із умови, забезпечення отримання паралельного або східного пучка світла після конденсора: $f'_2 \leq a_2$.

7. Відстань a'_2 , характеризує положення вихідної зіниці системи (площини розміщення чутливої площадки приймача) відносно головних площин конденсора, і тоді задню фокусну відстань f'_2 розраховують за формулами:

$$a'_2 = \beta_2 \cdot a_2 = -0,3875 \cdot (-15) = 5,813 \text{ мм};$$

$$f'_2 = \frac{a'_2}{1 - \beta_2} = \frac{5,816}{1 - (-0,3875)} = 4,189 \text{ мм}$$

8. Діаметр конденсора D_2 для краю поля визначається ходом крайнього променя нахилоного пучка, що проходить через нижній край вихідної зіниці об'єктиву і верхній край польової діафрагми:

$$D_2 = D_{пд} + 2 \cdot a_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi) = D_{пд} + 2 \cdot a_2 \cdot \frac{D'_{1ex} + D_{пд}}{2 \cdot a'_1} = 3,5 + 2 \cdot 20 \left(\frac{4,0 + 4,0}{2 \cdot 14} \right) = 13 \text{ мм}$$

$$\text{де } \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{D'_{1ex} + D_{пд}}{2 \cdot a'_1}.$$

9. Кутове поле конденсора в просторі зображення $2\omega'_k$:

$$\operatorname{tg}(\omega'_k) = \gamma_p \cdot \operatorname{tg}(\omega)$$

де γ_p - кутове збільшення в зіницях системи.

Для системи, що розташована в однорідному середовищі, при $\beta_{p1} = 1$:

$$\operatorname{tg}(\omega'_k) = \frac{\operatorname{tg}(\omega)}{\beta_p} = \frac{\operatorname{tg}(\omega)}{\beta_2} = \frac{\operatorname{tg}(\omega) \cdot D_{1ex}}{d_{np}} = \frac{\operatorname{tg}(8.063^\circ) \cdot 4,0}{1.55} = 0,366$$

$$\omega'_k = 20,08^\circ$$

Всі розраховані параметри оптичної системи зображено на рис.5.3.

10. Розмір сфокусованого випромінювання на приймач:

$$d_{cf} = \beta \cdot D_{дж}$$

Оптичний розрахунок

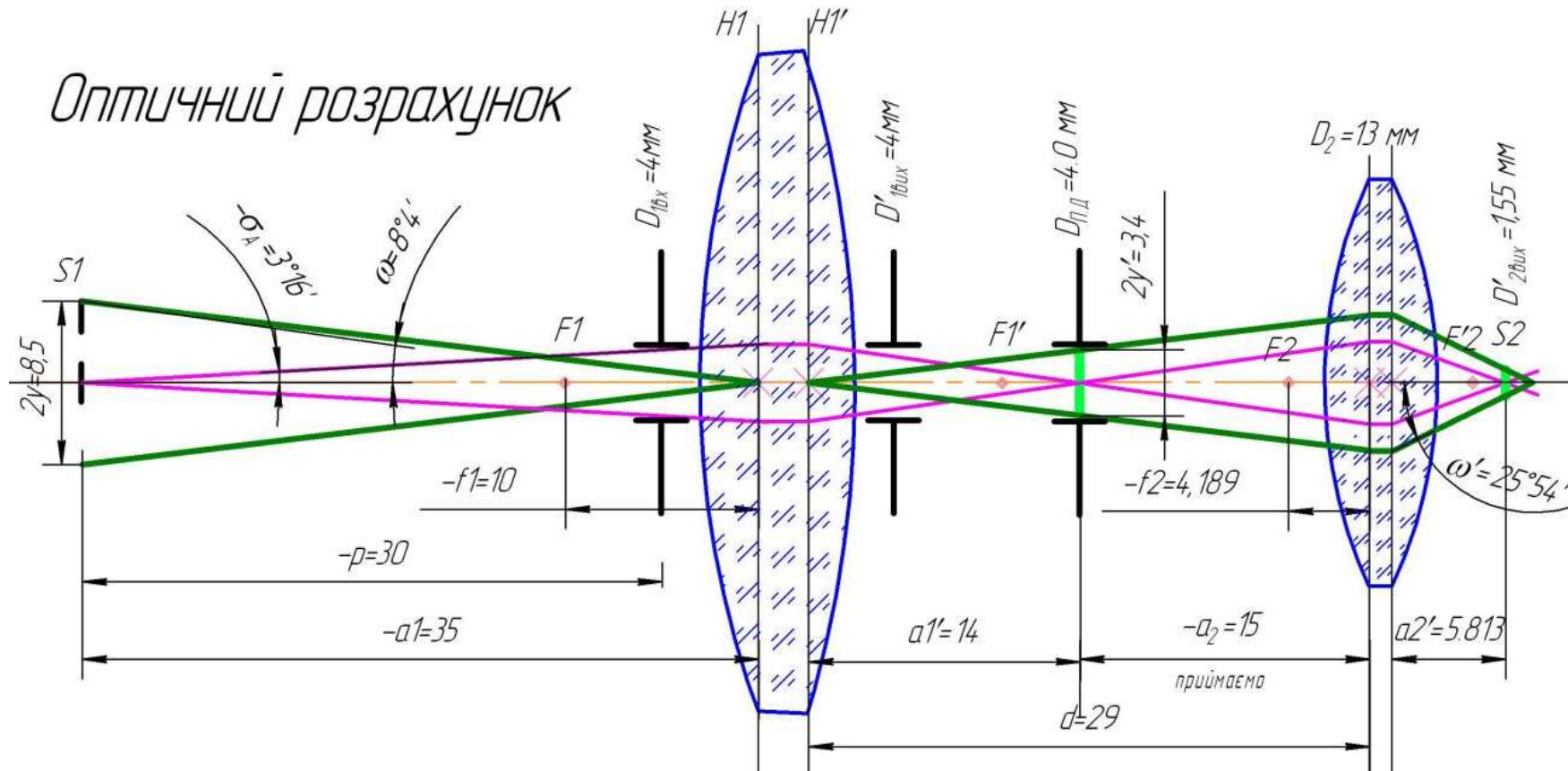


Рисунок 1.3 – Двокомпонентна фотоелектрична оптична система з розрахованими параметрами

File Edit View Insert Format Math Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

Розрахунок фотоелектричної системи з приймачем випромінювання, розташованим в площині вихідного зрачка

Дано джерело світла:

- діаметр випромінюючої площадки, м $Ddgerelo := 8.5 \cdot 10^{-3}$
- потік випромінювання, лм $F := 750$

Дано приймач випромінювання:

- діаметр приймальної площадки, м $dpr := 1.55 \cdot 10^{-3}$
- інтегральна спектральна чутливість, В/лм $Si := 3.3 \cdot 10^{-3}$
- мінімально допустимий струм фотоприймача, А $Imin := 0.018 \cdot 10^{-3}$

1. Визначаємо значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D1v$ х вхідного зрачка об'єктиву

$$\sin^2(\sigma_A) \geq \frac{i_{min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{izm}} \Rightarrow \sigma_A = \arcsin\left(\sqrt{\frac{i_{min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{izm}}}\right)$$

$\omega := 4 \cdot \pi \quad \tau := 0.9 \quad \sigma_A := \left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{Imin}{\tau \cdot \pi \cdot \frac{F \cdot Si}{\omega}}}\right) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \sigma_A = 0.326$

приймаємо $\sigma_A := 3.26$

2. Визначаємо діаметр вхідного зрачка за формулою

$$D_{lex} \geq 2 \cdot p \cdot tg(\sigma_A)$$

попередньо приймаємо $p := 30 \cdot 10^{-3}$

$$D1v := 2 \cdot p \cdot \tan\left(\sigma_A \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad D1v = 3.418 \times 10^{-3} \quad \text{округлюємо до найближчого цілого} \quad D1v := 4 \cdot 10^{-3}$$

3. Приймаємо розташування джерела випромінювання на відстані

Лінійне збільшення об'єктиву $\beta 1 := -0.4$

Визначаємо діаметр польової діафрагми

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \Rightarrow 2y' = \beta_1 \cdot 2y$$

$Dpd := \beta 1 \cdot (-Ddgerelo) \quad Dpd = 3.4 \times 10^{-3}$

округлюємо до найближчого цілого $D_{pd} := 4 \cdot 10^{-3}$

4. Відстань від об'єктиву до площини аналізатора визначається

$$a'_1 = \beta_1 \cdot a_1 \quad aa1 := \beta_1 \cdot a1 \quad aa1 = 0.014$$

Фокусна відстань

$$f'_1 = \frac{a'_1}{1 - \beta_1} \quad ff1 := \frac{aa1}{1 - \beta1} \quad ff1 = 0.01$$

5. Лінійне збільшення конденсора та в зрачках системи

$$\beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{lex}} \quad \beta2 := \frac{-dpr}{D1v} \quad \beta2 = -0.3875$$

6. Відстань a2 між головними площинами конденсора і об'єктиву

$$d = a'_1 + a_2 \quad a2 := -15 \cdot 10^{-3} \quad d := (aa1 - a2) \quad d = 0.029$$

7. Визначаємо відстань, що характеризує положення вихідного зрачка системи відносно головних площин конденсора

$$a'_2 = \beta_2 \cdot a_2 \quad aa2 := \beta2 \cdot (a2) \quad aa2 = 5.813 \times 10^{-3}$$

Тоді задня фокусна відстань

$$f'_2 = \frac{a'_2}{1 - \beta_2} \quad ff2 := \frac{aa2}{1 - \beta2} \quad ff2 = 4.18919 \times 10^{-3}$$

8. Визначаємо діаметр конденсора D2

$$D_2 = D_{\Pi\Gamma} + 2 \cdot a_2 \cdot tg(\varphi) = D_{\Pi\Gamma} + 2 \cdot |a_2| \cdot \frac{D'_{lex} + D_{\Pi\Gamma}}{2 \cdot a'_1}$$

$$D2 := Dpd + 2 \cdot |a2| \cdot \frac{D1v + Dpd}{2 \cdot aa1} \quad D2 = 0.013$$

9. Кутове поле конденсора в просторі зображення

$$tg(\omega'_k) = \frac{tg(\omega)}{\beta_p} = \frac{tg(\omega)}{\beta_2} = \frac{tg(\omega) \cdot D_{lex}}{d_{np}} \quad \beta := \beta2 \cdot \beta1 \quad \beta = 0.155$$

$$\omega := atan\left(\frac{\frac{Ddgerelo}{2}}{p}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \omega = 8.063 \quad \omega_{ok} := \left[\left[atan\left(\frac{\tan\left(\omega \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot D1v}{dpr}\right) \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right]$$

File Edit View Insert Format Math Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

$$\omega_{\text{ок}} := \left[\text{atan} \left(\frac{\tan \left(\omega \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\beta_2} \right) \right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\omega_{\text{ок}} = 20.082$ $\omega_{\text{ок}} = -20.082$

10. Розмір зфокусованого випромінювання на приймач $d_{\phi} = \beta \cdot D_{\text{дж}}$

$df := \beta \cdot D_{\text{джерело}}$

$df = 1.318 \times 10^{-3}$

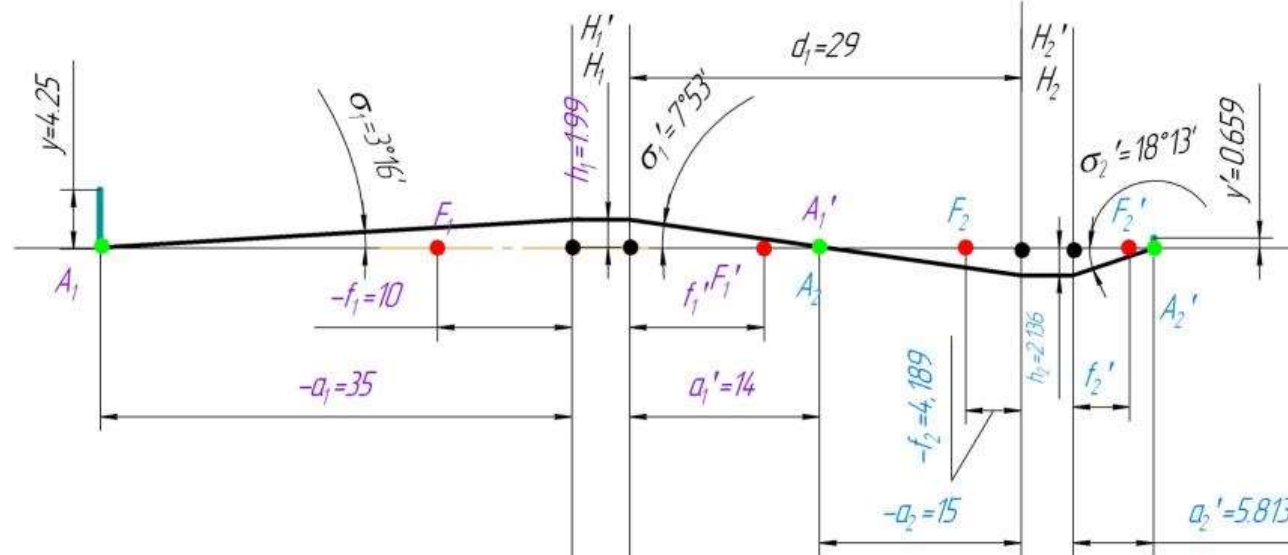
Як видно із розрахунку розмір зфокусованого випромінювання має децю менші розміри ніж сам приймач. Тобто весь потік буде сприйматися приймачем - без втрат

10. Розмір зфокусованого випромінювання на приймач

$$df := \beta \cdot Dd_{\text{gereio}}$$

Як видно із розрахунку розмір зфокусованого випромінювання має децю менші розміри ніж сам приймач. Тобто весь потік буде сприйматися приймачем - без втрат

Завдання 3.2 Розрахунок ходу променів крізь двоконцентнтну оптичну систему



I-ший оптичний елемент	II-гий оптичний елемент
Дано: $-a_1 = 35$ мм, $-\sigma_1 = 3,26^\circ$, $-f_1 = f'_1 = 10$ мм	Дано: $-f_2 = f'_2 = 4,189$ мм, $d_1 = 29$ мм
$\sigma_1 = \arctg\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \Rightarrow h_1 = a_1 \cdot \tg(\sigma_1) = 1,99 \text{ мм}$ $a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_1}{a_1 - f_1} = 14 \text{ мм}$ $\sigma'_1 = \sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot \tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1}\right)\right) = 8,104^\circ$	$a_2 = a'_1 - d_1 = -15 \text{ мм}, a'_2 = \frac{a_2 \cdot f'_2}{a_2 - f_2} = 5,813 \text{ мм}$ $h_2 = h_1 - d_1 \cdot \tg(\sigma_2) = -2,136 \text{ мм}$ $\sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot \tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1}\right)\right) = 8,104^\circ$ $\sigma'_2 = \sigma_k = \arctg\left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot \tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2}\right)\right) = -20,178^\circ$

Визначаємо лінійне збільшення складної системи: $\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a}\right)_m = 0.155$.

Визначаємо розмір зображення $2y' = \beta \cdot 2y = 0,155 \cdot 8,5 = 1,317$ мм.



Розрахунок ходу променів крізь двохкомпонентну оптичну систему

Перший оптичний елемент

Дано :

*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань a_1
- передній апертурний кут
- фокусна відстань

$$\begin{aligned} a_1 &:= -35 \cdot 10^{-3} \\ \sigma_1 &:= -3.26 \\ f_1 &:= -10 \cdot 10^{-3} & f_{f1} &:= 10 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

1. Визначаємо висоту падіння променя на перший оптичний елемент

$$\sigma_1 = \arctg\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \Rightarrow h_1 = a_1 \cdot \tg(\sigma_1) \quad h_1 := a_1 \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad h_1 = 1.994 \times 10^{-3}$$

2. Відстань від об'єктиву до площини аналізатора де буде проміжкове зображення визначається

$$a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_1}{a_1 - f_1} \quad a_{a1} := \frac{a_1 \cdot f_{f1}}{a_1 - f_1} \quad a_{a1} = 0.014$$

3. Визначаємо кут падіння променя на другий оптичний компонент

$$\sigma'_1 = \sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot \tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1}\right)\right)$$

$$\sigma\sigma_1 := \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f_1}{f_{f1}}\right) \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h_1}{f_{f1}}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \sigma\sigma_1 = 8.104$$

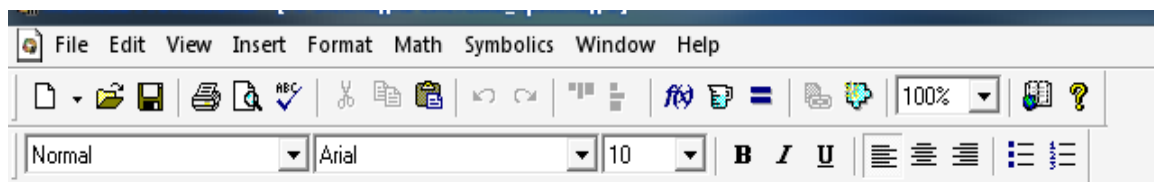
Другий оптичний елемент

Дано :

*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань d_1
- фокусна відстань

$$\begin{aligned} d &:= 29 \cdot 10^{-3} \\ f_2 &:= -4.189 \cdot 10^{-3} & f_{f2} &:= 4.189 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$



4. Визначаємо відстань розташовування попереднього зображення до другого оптичного компоненту

$$a_2 = a'_1 - d_1 \quad a_2 := a_1 - d \quad a_2 = -0.015$$

5. Визначаємо відстань після проходження другого оптичного компоненту

$$a'_2 = \frac{a_2 \cdot f'_2}{a_2 - f_2} \quad aa_2 := \frac{a_2 \cdot ff_2}{a_2 - f_2} \quad aa_2 = 5.812 \times 10^{-3}$$

6. Визначаємо висоту падіння променя на другий оптичний компонент

$$h_2 = h_1 - d_1 \cdot tg(\sigma_2) \quad \sigma_2 := \sigma_1 \quad \sigma_2 = 8.104$$

$$h_2 := h_1 - d \cdot \tan\left(\sigma_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad h_2 = -2.136 \times 10^{-3}$$

8. Визначаємо кут виходу променя із другого оптичного компоненту

$$\sigma'_2 = \sigma_k = \arctg\left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2}\right)\right)$$

$$\sigma\sigma_2 := \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f_2}{ff_2}\right) \cdot \tan\left(\sigma_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h_2}{ff_2}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \sigma\sigma_2 = -20.178$$

9. Визначаємо лінійне збільшення двохкомпонентної оптичної системи

$$\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'_m}{a_m}\right) \quad \beta := \left(\frac{aa_1}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{aa_2}{a_2}\right) \quad \beta = 0.155$$

Тоді розмір зображення

$$y' = \beta \cdot y \quad Ddgerelo := 8.5 \cdot 10^{-3}$$

$$df := \beta \cdot Ddgerelo \quad df = 1.317 \times 10^{-3}$$

+

Завдання 3.3 Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом

1. Записуємо загальну матрицю перетворення для першого компоненту

$$M_1 = \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a'_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_1 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр за допомогою функції



3. Записуємо загальну матрицю перетворення для другого компоненту

$$M_2 = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 = \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_2 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля та виражаємо шуканий параметр (див.п.2)

5. Записуємо загальну матрицю перетворення для перевірки розрахунків

$$M_{\Sigma} = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

6. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_2 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля і виражаємо шуканий параметр (див.п.2)

7. Розв'язуємо отримані матриці. Задаємо вихідні дані для розрахунку

Розмір предмету (джерело випромінювання)	$y_1 = 4.25 \text{ мм}$	*задаємо $\frac{1}{2}$ від діаметру 8,5 мм, оскільки розрахунок ведеться для предмету, о розташований над оптичною віссю
Задня фокусна відстань першого компонента	$ff1 = 10 \text{ мм}$	* ff позначено для зручності, щоб відрізнити передню та задню фокусну відстань. Можливе будь-яке інше зручне для Вас позначення
Задня фокусна відстань другого компонента	$ff2 = 4,189 \text{ мм}$	
Апертурний кут променю	$\sigma_1 = 3,26^\circ$	*значення взято із попереднього розрахунку оптичної системи
Відстань до I-го оптичного компонента	$-a_1 = 35 \text{ мм}$	
Відстань між оптичними елементами	$d = 29 \text{ мм}$	

8. Виводимо результат розрахунку для кожного оптичного елемента та системи в цілому

Зображення предмету

Апертурний кут в області зображення предмету

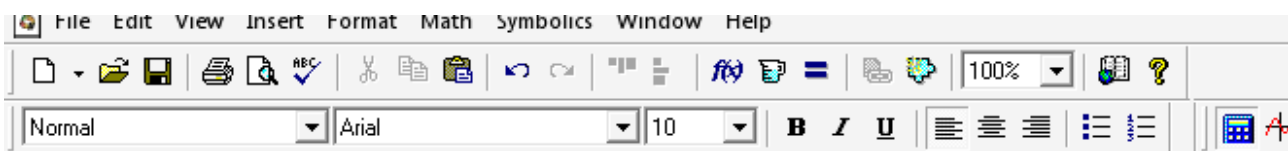
$$\begin{bmatrix} y' \\ \sigma' \end{bmatrix}$$

Лінійне збільшення оптичної системи

Оптична сила системи

Кутове збільшення оптичної системи

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$



Приклад розрахунку складна система матричним методом

1. Записуємо загальну матрицю перетворення для першого компоненту

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{1\text{линзи}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a_1' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & aa1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa1}{ff1} & -\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1 \\ -\frac{1}{ff1} & \frac{1}{ff1} \cdot a1 + 1 \end{bmatrix}$$

2. Розв'язавши матрицю у символному вигляді, визначаємо відстань aa1. Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1$$

Результат виводу формули для знаходження відстані

$$aa1 = \frac{a1}{(a1 + ff1)} \cdot ff1$$

3. Записуємо загальну матрицю перетворення для другого компоненту

$$M_{\Sigma} = \mathfrak{S}_2 \cdot M_{2\text{линзи}} \cdot \mathfrak{S}_1 = \begin{pmatrix} 1 & a_2' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

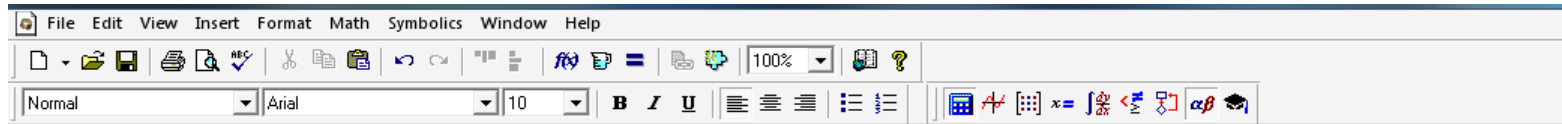
$$\begin{pmatrix} 1 & aa2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} & -\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} & \frac{1}{ff2} \cdot a2 + 1 \end{bmatrix}$$

4. Розв'язавши матрицю у символному вигляді, визначаємо відстань aa2. Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2$$

Результат виводу формули для знаходження відстані

$$aa2 = \frac{a2}{(a2 + ff2)} \cdot ff2$$



5. Записуємо загальну матрицю для перевірки розрахунків

$$M_{\Sigma} = S_2 \cdot M_{2\text{линзи}} \cdot S_1 \cdot M_{1\text{линзи}} \cdot S_0 = \begin{pmatrix} 1 & a_2' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & aa2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} \cdot \left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right] & \left[1 - \frac{aa2}{ff2} \cdot \left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right] \\ -\frac{1}{ff2} - \frac{\left(-\frac{1}{ff2} \right) \cdot d1 + 1}{ff1} & -\left[\frac{1}{ff2} - \frac{\left(-\frac{1}{ff2} \right) \cdot d1 + 1}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \end{bmatrix}$$

6. Розв'язавши матрицю у символічному вигляді, визначаємо відстань aa2. Для цього коефіцієнт B матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left[1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2$$

Результат виводу формули для знаходження відстані

$$aa2 = \frac{(-a1 \cdot ff1 + a1 \cdot d1 + d1 \cdot ff1)}{(-a1 \cdot ff1 + a1 \cdot d1 - a1 \cdot ff2 + d1 \cdot ff1 - ff2 \cdot ff1)} \cdot ff2$$

7. Розв'язуємо отримані матриці для першого та другого компонентів

Дано:

- розмір предмету (джерело випромінювання)

- задня фокусна відстань першого компоненту

- задня фокусна відстань другого компоненту

- апертурний кут променя

- відстань до першого оптичного

компоненту

- відстань між оптичними елементами

$$y1 := 4.25 \cdot 10^{-3}$$

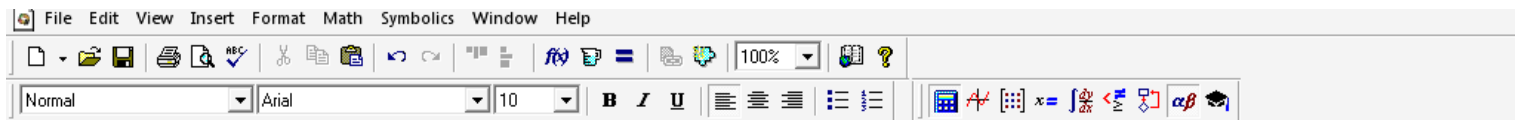
$$ff1 := 10 \cdot 10^{-3}$$

$$ff2 := 4.189 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma1 := -3.26$$

$$a1 := -35 \cdot 10^{-3}$$

$$d1 := 29 \cdot 10^{-3}$$



Результат розрахунку для першого оптичного компоненту

$$aa1 := \frac{a1}{(a1 + ff1)} \cdot ff1 \quad aa1 = 0.014$$

$$\begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa1}{ff1} & -\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1 \\ -\frac{1}{ff1} & \frac{1}{ff1} \cdot a1 + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.4 & 0 \\ -100 & -2.5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy1 \\ \sigma\sigma1 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y1 \\ (\sigma1) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy1 \\ \sigma\sigma1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.7 \times 10^{-3} \\ 7.725 \end{pmatrix}$$

Результат розрахунку для другого оптичного компоненту

$$a2 := aa1 - d1 \quad aa2 := \frac{a2}{(a2 + ff2)} \cdot ff2 \quad aa2 = 5.812 \times 10^{-3} \quad \sigma2 := 7.725$$

$$\begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} & -\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} & \frac{1}{ff2} \cdot a2 + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.387 & 0 \\ -238.72 & -2.581 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} yy1 \\ (\sigma2) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.587 \times 10^{-4} \\ -19.531 \end{pmatrix}$$

Результат розрахунку для двохкомпонентної оптичної системи

$$aa2 := \frac{(a1 \cdot ff1 - a1 \cdot d1 - d1 \cdot ff1)}{(a1 \cdot ff1 - a1 \cdot d1 + a1 \cdot ff2 - d1 \cdot ff1 + ff2 \cdot ff1)} \cdot ff2 \quad aa2 = 5.812 \times 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} & -\left[1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} - \frac{\left(\frac{-1}{ff2} \cdot d1 + 1\right)}{ff1} & -\left[-\frac{1}{ff2} - \frac{\left(\frac{-1}{ff2} \cdot d1 + 1\right)}{ff1} \right] \cdot a1 - \frac{1}{ff2} \cdot d1 + 1 \end{bmatrix}$$

+

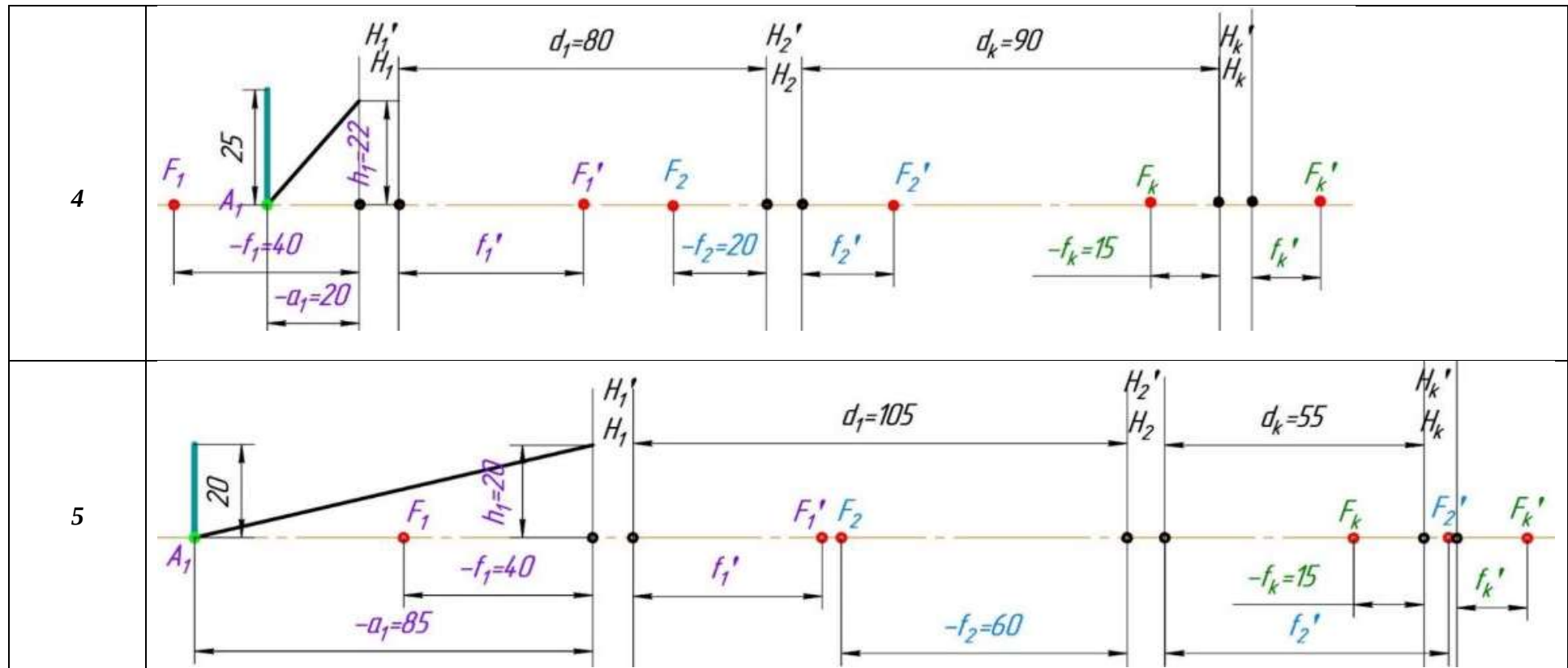
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.155 & 0 \\ 353.569 & 6.452 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y1 \\ (\sigma1) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.587 \times 10^{-4} \\ -19.531 \end{pmatrix}$$

Завдання 3.4 Розрахувати трикомпонентну оптичну систему (класичним методом)

Варіант	
1	Ray diagram for Variant 1. Object height $h_1 = 25$, object distance $-a_1 = -50$, first lens focal length $-f_1 = -40$. Image height $h_1' = 25$. Distance between lenses $d_1 = 100$. Second lens focal length $-f_2 = -20$. Distance to third lens $d_k = 120$. Third lens focal length $-f_k = -15$. Final image height h_k.
2	Ray diagram for Variant 2. Object height $h_1 = 25$, object distance $-a_1 = -60$, first lens focal length $-f_1 = -40$. Image height $h_1' = 22$. Distance between lenses $d_1 = 100$. Second lens focal length $-f_2 = -20$. Distance to third lens $d_k = 120$. Third lens focal length $-f_k = -15$. Final image height h_k.
3	Ray diagram for Variant 3. Object height $h_1 = 25$, object distance $-a_1 = -30$, first lens focal length $-f_1 = -40$. Image height $h_1' = 22$. Distance between lenses $d_1 = 80$. Second lens focal length $-f_2 = -20$. Distance to third lens $d_k = 120$. Third lens focal length $-f_k = -15$. Final image height h_k.



Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Фотоелектрична система. Основні складові частини. Вимоги до елементів.
2. Двокомпонентна оптична система. Основні параметри.
3. Габаритний розрахунок складної оптичної системи.
4. Як визначити фокусні відстані об'єктиву та конденсору складної оптичної системи.
5. Як визначається лінійне збільшення конденсора β_2 за умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи.
6. Пояснити алгоритм розрахунку ходу променю крізь складну оптичну систему.
7. Пояснити розрахунок ходу променю крізь складну оптичну систему матричним методом.
8. Записати загальну матрицю перетворення для двокомпонентної оптичної системи.

Література

1. Гвоздева И.П., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения –М.: Машиностроение, 1976.
2. Справочник конструктора оптико - механических приборов./ В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. Ред.. В.А.Панова, -Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1980. – 742с, ил.
3. Прикладная оптика: Учебн. пособие для приборостроительных специальностей вузов/Л.Г.Бибчук, Ю.В.Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ.ред. Н.П.Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. -312с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебн. пособие: для вузов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башина Г.А. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336с.
6. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов /Н.П. Заказнов, С.И.Кирюшин, В.Н. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448с.

Практичне заняття №2

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ОПТИЧНА СИСТЕМА З ЛАЗЕРОМ

Мета роботи: розрахувати оптичну насадку для фотоелектричної системи для роботи з лазером

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні параметри, що характеризують лазерний пучок у вільному просторі.
2. Особливості світлоенергетичного розрахунку фотоелектричної системи із врахуванням спектральних характеристик.
3. Конфігурація дводзеркальних резонаторів. Умова стійкості резонатора.
4. Діаграма стійкості резонатора.
5. Параметри лазерного пучка в оптичному резонаторі.
6. Основні оптичні системи для фокусування та формування лазерного променя.

2. Теоретичні відомості

Розглянемо особливості розрахунку фотоелектричної системи, яка містить лазер в якості джерела випромінювання. Оптична система складається із передавальної частини, яка містить лазер 1 і афокальну насадку 2, і приймальної частини – об'єктив 3 і фотоприймач 4 [1-5].

Передавальна частина призначена для утворення вузько спрямованого потоку випромінювання з необхідним кутом розходження пучка променів в напрямку об'єкту. Приймальна частина слугує для перетворення відбитого від об'єкту потоку випромінювання в електричний сигнал.

Для зменшення кута розходження лазерних пучків використовують двокомпонентні лінзова або дзеркальні насадки, які складаються із першого від'ємного та другого додатного компонентів рис.2.1.

Основні характеристики афокальної насадки для лазера є [1-5]:

- Кутове збільшення γ ;
- Кутове поле $2 \cdot \omega'$;
- Діаметр вихідної зіниці D (дорівнює діаметру вихідного торця лазера та діаметру перетяжки пучка);
- Положення вхідної зіниці a_p відносно першого компонента (визначається відрізком a_1 від перетяжки лазера до першого компонента);
- Довжина насадки $L = f_1' + f_2'$;
- Довжина хвилі лазерного випромінювання λ .

Кутове збільшення γ розраховують за формулою [1]:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W_0}{2 \cdot W_0'} = \sqrt{\frac{R_e}{R_e'}} \quad (2.1)$$

де R_e - конфокальний параметр резонатора;

R_e' - перетворений конфокальний параметр резонатора;

$2 \cdot \omega'$ - кутове поле, визначається кутом розходження пучків в просторі зображення.

Для забезпечення мінімальної розходження пучка після оптичної системи необхідно сумістити перетяжку пучка, перетвореного першим компонентом, з передньою фокальною площиною другого компонента. Відстань Δ (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокусу першого компонента відносно переднього фокусу другого компонента, визначається [1]:

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'}\right)^2} \quad (2.2)$$

Кутове збільшення γ_Δ розфокусованої системи:

$$\gamma_\Delta = \sqrt{\frac{R_{e1}}{R_{e2}'}} = \frac{R_{e1} \cdot f_1'}{f_2' \cdot \sqrt{4 \cdot z_1^2 + R_{e1}^2}} \quad (2.3)$$

При $\Delta=0$ кутове збільшення афокальної насадки визначається залежністю:

$$\gamma = -\frac{f_1'}{f_2} \quad (2.4)$$

В даному розділі розглянуто перетворення лазерних пучків тільки в гаусовому наближенні. Оптична система вважається ідеальною, якщо вхідний пучок знову перетворюється в гаусів пучок. Це можливо тільки при умові, що оптична система не вносить додаткових викривлень у форму хвильового фронту.

Діаметр освітленого плями на об'єкті:

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p \quad (2.4)$$

де $2 \cdot \omega'$ - кут розходження пучка променів лазера після насадки;

p – відстань до об'єкту.

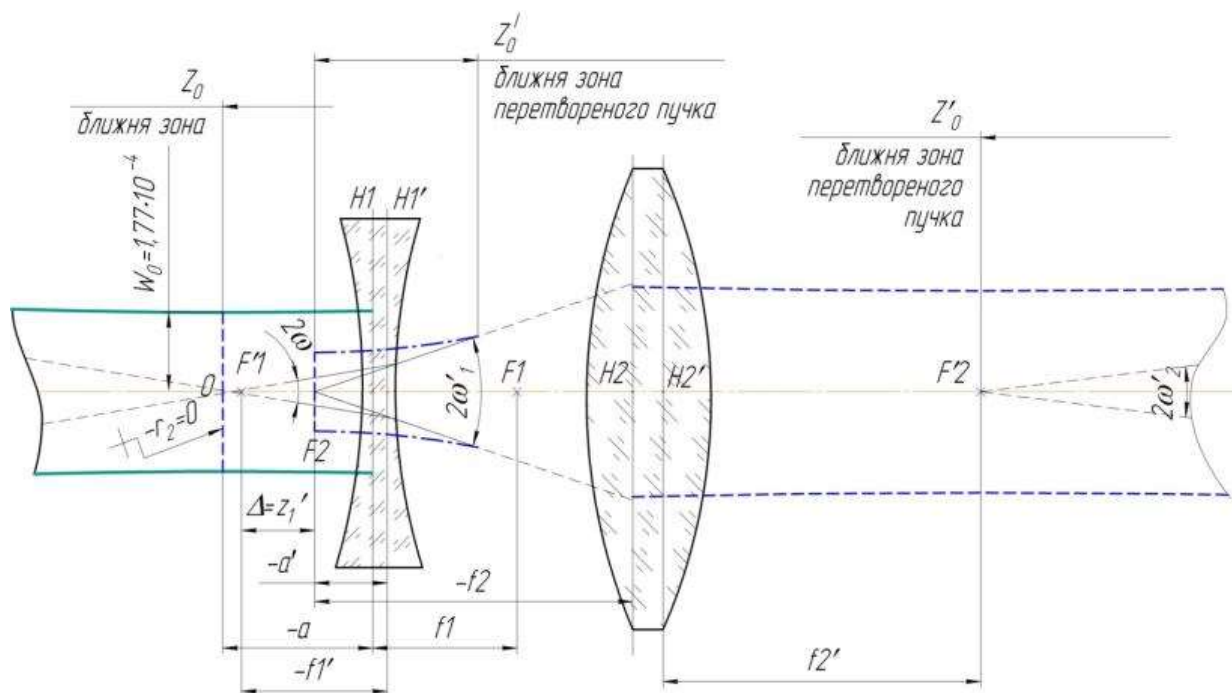


Рисунок 2.1 – Двокомпонентна оптична насадка для лазерного джерела

Енергетична сила світла в напрямку оптичної осі передавальної частини визначається за формулою [1]:

$$I_e = \tau_{O.C1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad (2.5)$$

де Φ_e - потік випромінювання лазера;

$\Omega = \pi \cdot \omega'^2$ - тілесний кут розходження пучка променів після насадки;

$\tau_{O.C1}$ - коефіцієнт пропускання афокальної насадки.

Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини [1]:

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{r^2} \quad (2.6)$$

де τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери на відстані r ;

α - кут між напрямком пучка променів і нормаллю до поверхні об'єкту.

Енергетична яскравість освітленого об'єкту як вторинного джерела випромінювання визначається за формулою [1]:

$$B_e = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi} \quad (2.7)$$

де ρ - коефіцієнт дифузного відбиття поверхні об'єкту.

Енергетична сила світла I'_e , відбитого об'єктом випромінювання, визначається у відповідності з виразом [1]:

$$I'_e = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2 \quad (2.8)$$

де $S_2 = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4}$ - площа освітленої частини поверхні об'єкту.

Потік випромінювання, який поступає від об'єкту на вхідну зіницю об'єктиву приймаючої частини з діаметром D [1]:

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{\text{вх.зр}} \quad (2.9)$$

де $E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{r^2}$ - енергетична освітленість вхідної зіниці об'єктиву;

$S_{\text{вх.зр}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці.

На фотоприймач поступає потік випромінювання [1]:

$$\Phi''_e = \tau_{O.C2} \cdot \Phi'_e \quad (2.10)$$

де $\tau_{O.C2}$ - коефіцієнт пропускання приймаючої частини.

З урахуванням залежностей (2.8) - (2.9) формулу (2.10) можна записати в наступному вигляді [1]:

$$\Phi''_e = \frac{\tau_{O.C1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{O.C2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot \omega'^2 \cdot r^4} \Phi_e \quad (2.11)$$

Для надійної роботи приймальної частини необхідно, щоб значення потоку випромінювання Φ''_e , який поступає на приймач, перевищував значення граничного потоку $\Phi_{e \text{ зр.}} \text{ приймача}$ [1]:

$$\Phi''_e = k \cdot \Phi_{e \text{ зр.}} \quad (2.12)$$

де k – необхідне співвідношення сигнал/шум.

Вирази (2.11) і (2.12) дозволяють визначити діаметр вхідної зіниці приймаючої частини, який забезпечує отримання на приймачі необхідного потоку випромінювання при відомій відстані r від системи до об'єкту [1]:

$$D \geq 2 \cdot \omega' \cdot r^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{e \text{ зр.}}}{\tau_{O.C1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{O.C2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}} \quad (2.13)$$

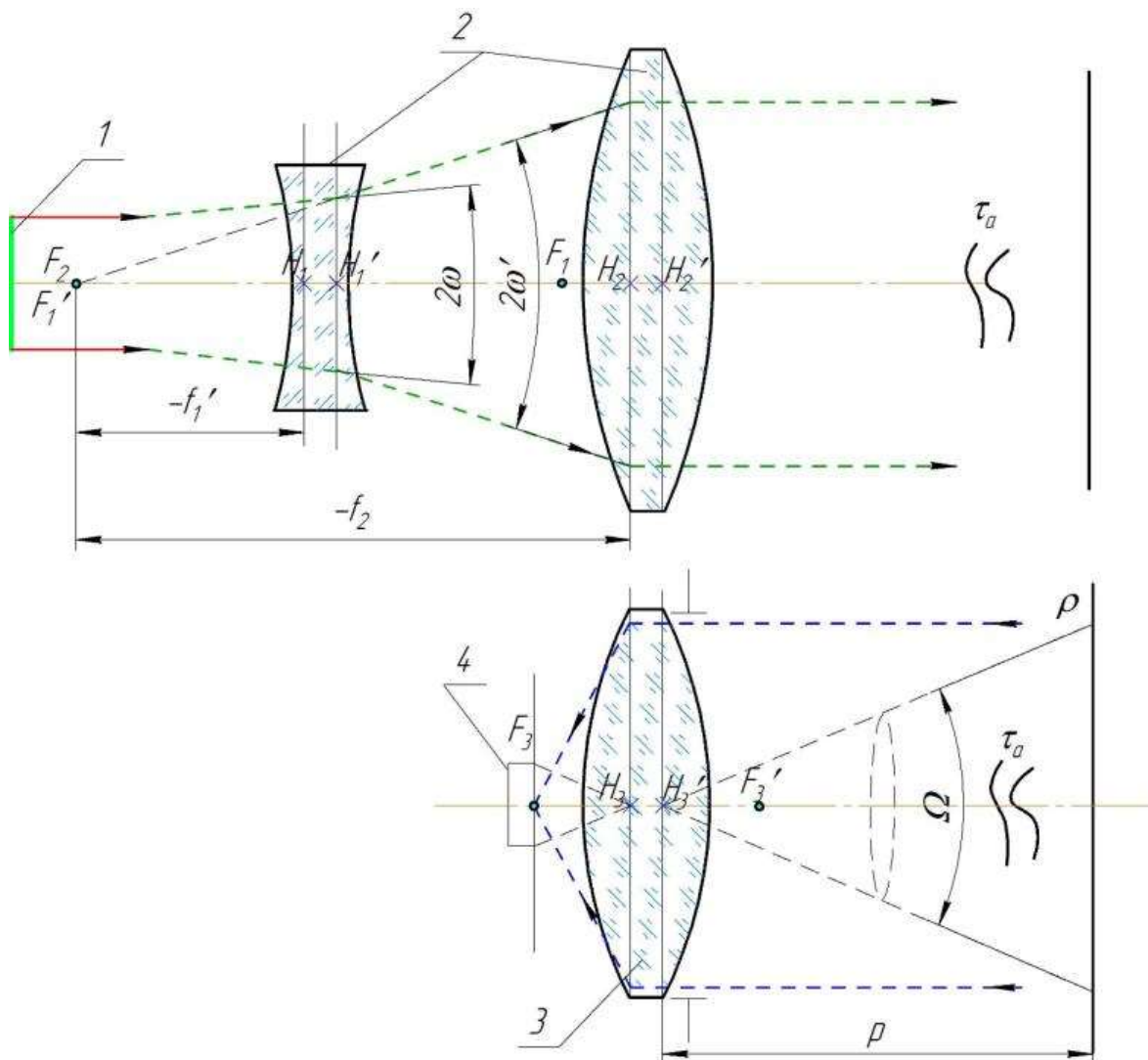


Рисунок 2.2 – Схема оптичної фотоелектричної системи з лазером

3. Виконання роботи

Завдання 3.1 Використовуючи джерело випромінювання лазер розрахувати двохкомпонентну випромінюючу насадку, яка дає на виході паралельний пучок променів.

Дано:

- радіус перетяжки лазерного променю $W_0 = 177.7 \text{ мкм}$;
- конфокальний параметр лазерного променю $Re = -0.31501 \text{ м}$;
- необхідний радіус перетяжки на виході двохкомпонентної насадки

$$W_0' = W_2' = 260.64 \text{ мкм} ;$$

варіант	1	2	3	4	5
Довжина хвилі лазера, мкм	0,63	0,61	0,625	0,595	0,95
Радіус перетяжки лазерного променю, мкм	217,666	192,391	291,506	208,97	222,043
Конфокальний параметр лазерного променю, Re	0,47251	0,38126	0,4843	0,46113	0,52064

Фокусна відстань I-го елементу, менше	0,47251	0,38126	0,4843	0,46113	0,52064
Необхідний радіус перетяжки на виході двокомпонентної насадки, $W_0' = W_2', \text{ мкм}$	294	255	310	275	281

Приклад виконання розрахунку двокомпонентної оптичної насадки

1. Визначаємо кутове та лінійне збільшення в перетяжках за формулою:

$$\gamma_n = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}; \quad \beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0}.$$

2. Визначаємо перетворений (оптичною насадкою) конфокальний параметр резонатора:

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda}.$$

Перевіряємо кутове збільшення за формулою:

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}.$$

3. Приймаємо фокусну відстань першого елементу рівною $f_1' \leq R = 0,35101 \text{ м}$. Приймаємо $f_1' = -0,314899 \text{ м}$.

Задаємо відстань a_1 на якій буде розташовуватися перший оптичний елемент відносно перетяжки лазерного променя. Межу регулювання даної відстані приймаємо $-a_1 = 1,11 \cdot Z_0 = 0,1748 \text{ м}$.

Визначаємо діаметр вхідної зіниці за формулою $D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$ з урахуванням, що розмір променя на передній головній площині першого елементу:

$$W(a_1) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_1}{2 \cdot k \cdot W_0^2} \right)^2 \right]}.$$

4. Визначаємо відстань Δ (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокусу першого компонента відносно переднього фокуса другого компонента за формулою:

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'}\right)^2},$$

де $z_1 = a_1 + f_1'$, $R_{e1} = R_e$.

5. Конфокальний параметр R_{e1}' пучка, перетвореного першим компонентом визначають за формулою:

$$R_{e1}' = \frac{R_{e1}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'}\right)^2}.$$

6. Радіус перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом:

$$W_{10}' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_{e1}'}{\pi}}.$$

7. Визначаємо положення a_1' перетяжки перетвореного пучка першим компонентом із формули:

$$1 - \frac{a_1'}{f_1'} = \frac{1 + \frac{a_1}{f_1'}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f_1'}\right)^2} \Rightarrow a_1'.$$

8. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка :

$$Z_{10}' = \frac{\pi \cdot (W_{10}')^2}{\lambda}.$$

9. Розмір пучка на границі ближньої і дальньої зони:

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_{10}}{k \cdot W_0'^2}\right)^2\right]}.$$

10. Визначаємо фокусну відстань другого компонента із формули:

$$f_2' = \frac{f_1' \cdot R_{e1}}{\gamma_{\Delta} \cdot \sqrt{4 \cdot z_1^2 + R_{e1}^2}}.$$

11. Визначаємо діаметр D_2 другого компонента за формулою:

$$D_2 \geq 2 \cdot W1_0' \cdot \sqrt{1 + \xi_2^2}, \text{ де } \xi_2 = -\frac{2 \cdot f_2'}{R_{e1}}$$

12. Визначаємо положення a_2' перетяжки перетвореного пучка другим компонентом із формули:

$$1 - \frac{a_2'}{f_2'} = \frac{1 + \frac{a_2}{f_2'}}{\left(1 + \frac{a_2}{f_2'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_2'}\right)^2} \Rightarrow a_2'$$

13. Розмір променю на передній головній площині другого елементу:

$$W(a_2) = \sqrt{W1_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_2}{2 \cdot k \cdot W1_0'^2}\right)^2\right]}$$

14. Кут розходження перетвореного пучка:

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}} \Rightarrow \omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}}$$

15. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка :

$$Z2_0' = \frac{\pi \cdot (W2_0')^2}{\lambda}.$$

16. Розмір пучка на границі ближньої і дальньої зони W'_{z_0} :

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}.$$

Енергетичний розрахунок

17. Діаметр освітленої плями на об'єкті:

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p,$$

де $2 \cdot \omega'$ - кут розходження пучка променів лазера після насадки;
 p – відстань до об'єкту.

18. Енергетична сила світла в напрямку оптичної осі передавальної частини визначається за формулою:

$$I_e = \tau_{O.C1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega},$$

де Φ_e - потік випромінювання лазера (*вибираємо лазер із додатку з необхідною довжиною хвилі) для $\lambda=0,63$ мкм підходить лазер ГН, ЛГН. Вибираємо лазер з максимальною потужністю випромінювання ЛГН-118-2В Р=10 мВт;

$\Omega = \pi \cdot \omega'^2$ - тілесний кут розходження пучка променів після насадки;
 $\tau_{O.C1}$ - коефіцієнт пропускання афокальної насадки (0,98-0,99).

19. Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини:

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2},$$

де τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери на відстані p (0,9-0,95);

α - кут між напрямком пучка променів і нормаллю до поверхні об'єкту.

20. Енергетична яскравість освітленого об'єкту як вторинного джерела випромінювання визначається за формулою:

$$B_e = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi},$$

де ρ - коефіцієнт дифузного відбиття поверхні об'єкту (0,5-0,75).

21. Енергетична сила світла I'_e , відбитого об'єктом випромінювання, визначається у відповідності з виразом:

$$I'_e = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2,$$

де $S_2 = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}$ - площа освітленої частини поверхні об'єкту.

22. Потік випромінювання, який поступає від об'єкту на вхідну зіницю об'єктиву приймаючої частини з діаметром D_3 :

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{\text{вх.зр}},$$

де $E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{\rho^2}$ - енергетична освітленість вхідної зіниці об'єктиву;

$S_{\text{вх.зр}} = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4}$ - площа вхідної зіниці;

$D \geq 2 \cdot \omega' \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{e \text{ зр}}}{\tau_{O.C1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{O.C2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}}$ - діаметр вхідної зіниці;

$\Phi_{e \text{ зр.}}$ - граничний потік приймача, приймаємо приймач випромінювання

– фотодіод ФД256 (інтегральна спектральна чутливість $S_I = 6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$, мінімально допустимий струм фотоприймача $i_{\min} \geq 0.005 \text{ мкА}$);

k – необхідне співвідношення сигнал/шум, приймаємо 10.

Тоді на приймач випромінювання поступає потік:

$$\Phi''_e = \tau_{O.C2} \cdot \Phi'_e,$$

де $\tau_{O.C2}$ - коефіцієнт пропускання приймаючої частини.

Приклад 5.2. Фотоелектрична оптична система з лазером

Використовуючи джерело випромінювання із прикладу 3.1 СРС (із всіма необхідними розрахунковими параметрами) розрахувати двокомпонентну випромінюючу насадку, яка дає на виході паралельний пучок променів.

Дано:

- діаметр (радіус) перетяжки лазерного променя	$W_0 := (177.7 \cdot 10^{-6})$	$W_0 = 1.777 \times 10^{-4}$
- конфокальний параметр лазерного променя	$Re := -0.31501$	
- необхідний діаметр (радіус) перетяжки на виході двокомпонентної насадки	$WW_02 := 260.64 \cdot 10^{-6}$	

1. Визначаємо кутове та лінійне збільшення в перетяжках

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W'_0}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_e}{R_e'}}$$

$$\gamma := \frac{W_0}{WW_02} \quad \gamma = 0.6817833$$

$$\beta_n = \frac{2 \cdot W'_0}{2 \cdot W_0}$$

$$\beta := \frac{WW_02}{W_0} \quad \beta = 1.4667417$$

2. Визначаємо перетворений (оптичною насадкою) конфокальний параметр резонатора

$$2 \cdot W'_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda}$$

$$RRe := \frac{(WW_02)^2 \cdot 2\pi}{\lambda} \quad RRe = 0.67751896$$

Перевіряємо значення кутового збільшення

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_e}{R_e'}}$$

$$\gamma := \sqrt{\frac{|Re|}{RRe}} \quad \gamma = 0.68186978$$

3. Приймаємо фокусну відстань першого елемента $f_1' \leq R = 0.35101 \text{ м}$

3. Приймаємо фокусну відстань першого елементу $f_1' \leq R = 0,35101 \text{ м}$
 $R((1-Z_0)) = 0.31501$ $\text{ffl} := -0.314899$

4. Задаємо відстань a_1 на якій буде розташовуватися перший оптичний елемент відносно перетяжки лазерного променя. Межу регулювання даної відстані див.приклад 3.2.
 Приймаємо $a_1 := -1.11 \cdot Z_0$ $a_1 = -0.17483055$

$$W(a_1) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_1}{2 \cdot k \cdot W_0^2} \right)^2 \right]}$$

$$W_{a1} := \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{a_1 \cdot 2}{2 \cdot k \cdot ((W_0))^2} \right)^2 \right]}$$

$$W_{a1} = 2.65524789 \times 10^{-4}$$

$$D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$$

$$D_1 := 2 \cdot W_{a1}$$

$$D_1 = 5.31049577 \times 10^{-4}$$

5. Визначаємо відстань (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокусу першого компоненту відносно переднього фокусу другого компоненту

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2}$$

$$z_1 = a_1 + f_1'$$

$$z_1 := a_1 + \text{ffl}$$

$$z_1 = -0.48972955$$

$$\Delta := \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{\text{ffl}} \right)^2 + \left(\frac{\text{Re}}{2 \cdot \text{ffl}} \right)^2}$$

$$\Delta = -0.18350111$$

6. Конфокальний параметр $\text{Re}1'$ пучка, перетвореного першим компонентом

$$R_{s1}' = \frac{R_{s1}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2}$$

$$\text{RRe}1 := \frac{\text{Re}}{\left(1 + \frac{a_1}{\text{ffl}} \right)^2 + \left(\frac{\text{Re}}{2 \cdot \text{ffl}} \right)^2}$$

$$\text{RRe}1 = -0.11803389$$

7. Діаметр (радіус) перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом

$$W1_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_{s1}'}{\pi}}$$

$$\text{WW}01 := \frac{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot |\text{RRe}1|}{\pi}} \right)}{2}$$

$$\text{WW}01 = 1.08788679 \times 10^{-4}$$

8. Визначаємо положення a_1' перетяжки перетвореного пучка першим компонентом

$$1 - \frac{a_1'}{f_1'} = \frac{1 + \frac{a_1}{f_1'}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2} \Rightarrow a_1'$$

$$aa_1 := \frac{\left[4 \cdot \text{ffl} \cdot a_1 + 4 \cdot (a_1)^2 + \text{Re}^2 \right]}{\left[4 \cdot \text{ffl}^2 + 8 \cdot \text{ffl} \cdot a_1 + 4 \cdot (a_1)^2 + \text{Re}^2 \right]} \cdot \text{ffl}$$

$$aa_1 = -0.13139789$$

9. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

9. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

$$Z1_0' = \frac{\pi \cdot (W1_0')^2}{\lambda} \quad ZZ01 := \frac{\pi \cdot (WW01)^2}{\lambda} \quad ZZ01 = 0.05901695$$

10. Розмір пучка на границі ближньої та дальньої зони визначаємо за загальною формулою

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]} \quad WW := \sqrt{(WW01)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot (ZZ01)}{2k \cdot (WW01)^2} \right)^2 \right]} \quad WW = 1.53850425 \times 10^{-4}$$

11. Визначаємо фокусну відстань другого компоненту

$$f_2' = \frac{f_1' \cdot R_{e1}}{\gamma_{\Delta} \cdot \sqrt{4 \cdot Z_1'^2 + R_{e1}^2}} \quad Re1 := Re \quad ff2 := \frac{ff1 \cdot Re1}{\gamma \cdot \sqrt{4 \cdot z1^2 + Re1^2}} \quad ff2 = 0.14139501$$

12. Визначаємо діаметр D2 другого компоненту

$$D_2 \geq 2 \cdot W1_0' \cdot \sqrt{1 + \xi_2^2} \quad \xi_2 := -\frac{2 \cdot f_2'}{R_{e1}} \quad D2 := 2 \cdot WW01 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{-2 \cdot ff2}{RRe1} \right)^2} \quad D2 = 5.64865245 \times 10^{-4}$$

13. Визначаємо положення a2' перетяжки перетвореного пучка другим компонентом

приймаємо відстань між першим та другим компонентом $d := 10 \cdot 10^{-3}$

$$1 - \frac{a_2'}{f_2'} = \frac{1 + \frac{a_2}{f_2'}}{\left(1 + \frac{a_2}{f_2'} \right)^2 + \left(\frac{R_{e1}'}{2 \cdot f_2'} \right)^2} \Rightarrow a_2' \quad a2 := aa1 - d \quad a2 = -0.14139789$$

$$aa2 := \frac{[4 \cdot ff2 \cdot a2 + 4 \cdot (a2)^2 + RRe1^2]}{[4 \cdot ff2^2 + 8 \cdot ff2 \cdot a2 + 4 \cdot (a2)^2 + RRe1^2]} \cdot ff2 \quad aa2 = 0.14141153$$

14. Розмір променя на передній головній площині другого елементу

$$W(a_2) = \sqrt{W1_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_2}{2 \cdot k \cdot W1_0'^2} \right)^2 \right]} \quad Wa2 := \sqrt{WW01^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{a2 \cdot 2}{2 \cdot k \cdot (WW01)^2} \right)^2 \right]} \quad Wa2 = 2.82437517 \times 10^{-4}$$

15. Кут розходження перетвореного пучка відповідно

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}} \Rightarrow \omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}} \quad \omega\omega := \left[\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot |RRe|}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \omega\omega = 0.04408311$$

File Edit View Insert Format Math Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

16. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

$$ZZ_0 = \frac{\pi \cdot (W_0')^2}{\lambda}$$

$$ZZ_0 := \frac{\pi \cdot (WW_0)^2}{\lambda} \quad ZZ_0 = 0.33875948$$

17. Розмір пучка на границі ближньої та дальньої зони визначаємо за загальною формулою

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}$$

$$WW := \sqrt{(WW_0)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot (ZZ_0)}{2k \cdot (WW_0)^2} \right)^2 \right]} \quad WW = 3.68600623 \times 10^{-4}$$

Енергетичний розрахунок

18. Діаметр освітленої плями на об'єкті

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p$$

приймаємо відстань до об'єкту $p := 200 \cdot 10^{-3}$

$$dp := 2 \cdot \omega \cdot p \quad dp = 0.01763324$$

19. Енергетична сила світла в напрямку оптичної вісі передавальної частини, Вт/ср

$$I_e = \tau_{oc1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega}$$

Fe - потік випромінювання лазера (вибираємо лазер з необхідною довжиною хвилі). Для $\lambda = 0,63$ мкм підходять лазери ГН, ЛГН. Вибираємо лазер з максимальною потужністю випромінювання ЛГН-118-2В, P=10 мВт.

$$\Phi_e := 10 \cdot 10^{-3} \quad \tau_{os} := 0.98$$

$$\Omega = \pi \cdot \omega'^2 \quad \Omega := \pi \cdot \omega \omega'^2 \quad \Omega = 6.10512214 \times 10^{-3}$$

$$I_e := \tau_{os} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad I_e = 1.60520949$$

20. Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини, Вт/м2

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2}$$

$$\tau_a := 0.95 \quad \alpha := 0$$

$$E_e := \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2} \quad E_e = 38.12372538$$

21. Енергетична яскравість освітленого об'єкту, як вторинного джерела випромінювання

$$B_e = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi}$$

$$\rho := 0.75$$

$$\hat{A} \hat{A} := \rho \cdot \frac{E_e}{\pi} \quad \hat{A} \hat{A} = 9.10136902$$

22. Енергетична сила світла I_e' , відбитого об'єктом випромінювання

22. Енергетична сила світла I_e' , відбитого об'єктом випромінювання

$$I_e' = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}$$

$$S_2 := \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad S_2 = 2.44204886 \times 10^{-4}$$

$$\Pi_e := \hat{A} \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2 \quad \Pi_e = 2.22259878 \times 10^{-3}$$

23. Потік випромінювання, який поступає від об'єкту на вхідний зрачок об'єктиву приймальної частини з діаметром D

$$D \geq 2 \cdot \omega \cdot p^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{exp}}{\tau_{oc1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{oc2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}}$$

$$it := 0.005 \cdot 10^{-6} \quad Si := 6 \cdot 10^{-3} \quad V_{max} := 680 \quad k := 10$$

$$F_{egr} := \frac{it}{Si \cdot V_{max}} \quad F_{egr} = 1.2254902 \times 10^{-9}$$

$$D_3 := 2 \cdot \omega \cdot p^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot F_{egr}}{\tau_{oc1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{oc2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot F_e}} \quad D_3 = 5.49205148 \times 10^{-4} \quad D_3 := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{ex.sp} = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \quad \text{площа вхідного зрачка}$$

$$Svzr := \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \quad Svzr = 1.96349541 \times 10^{-5}$$

$$E_e' = \tau_a \cdot \frac{I_e'}{p^2} \quad \text{енергетична освітленість вхідного зрачка об'єктиву}$$

$$EEe := \tau_a \cdot \frac{\Pi_e}{p^2} \quad EEe = 0.05278672$$

$$\Phi_e' = E_e' \cdot S_{ex.sp}$$

$$FFe := EEe \cdot Svzr \quad FFe = 1.03646484 \times 10^{-6}$$

Тоді на фотоприймач поступає потік випромінювання

$$\Phi_e'' = \tau_{oc2} \cdot \Phi_e'$$

$$FFFe := \tau_{oc2} \cdot FFe \quad FFFe = 1.01573555 \times 10^{-6}$$

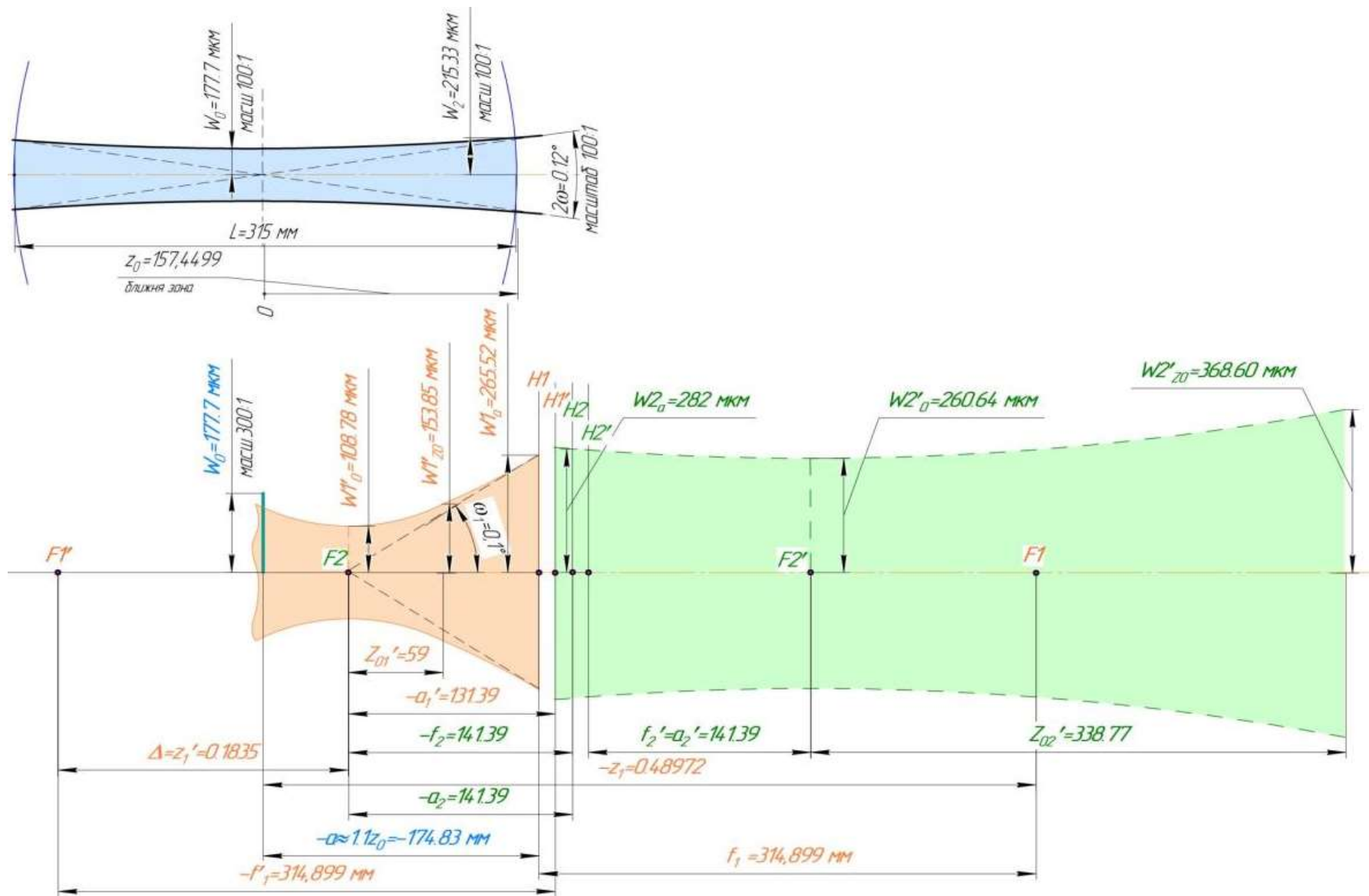


Рисунок 2.3 – Результат розрахунку фотоелектричної системи з лазером

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Класифікація резонаторів.
2. Умова стійкості резонатора. Діаграма стійкості.
3. Навести ескіз резонатора для першої та сьомої конфігурації.
4. Основні параметри гаусового пучка.
5. Поняття «ближньої» та «дальньої» зони дифракції.
6. Зобразити форму гаусового пучка у резонаторі із сферичними дзеркалами.
7. Який конструктивний параметр резонатора впливає на розмір перетяжки пучка та розмір пучка на дзеркалах.
8. Зобразити перетворення лазерного променя від'ємною тонкою лінзою.
9. Зобразити перетворення лазерного променя додатною тонкою лінзою.

Література

1. Прикладная оптика: Учеб. Пособие для приборостроительных специальностей вузов /Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ. Ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
2. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, - 320 с.
3. Звелто О. Принципы лазеров /Пер.под науч. Ред. Т.А.Шмаонова. 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 720 с.
4. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. –М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
5. Ищенко Е.Ф. Открытые оптические резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета. –М.: Сов.радио, 1980. -208 с
6. ДСТУ ISO 11145:2016 Оптика та оптичні прилади. Лазери і лазерна апаратура. Словник термінів та умовні позначки (ISO 11145:2001, IDT).
7. ДСТУ EN ISO 11554:2018 Оптика та оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування потужності, енергії та часових характеристик лазерного пучка (EN ISO 11554:2017, IDT; ISO 11554:2017, IDT)
8. ДСТУ ISO 13694:2009 Оптика й оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування для визначення розподілу густини потужності (енергії) лазерного пучка (ISO 13694:2000, IDT)

Практичне заняття №3

РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ПОТОКІВ І ОПРОМІНЕНOSTІ НА ВХОДІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДУ

Мета роботи: навчитися визначати опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при точковому опромінювачі; при ламбертовому опромінювачі та при роботі активним методом.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні енергетичні та фотометричні величини і співвідношення між ними.
2. Загальна класифікація приймачів випромінювання.
3. Параметри приймачів випромінювання: чутливість, граничні та шумові параметри, інерційність, опір приймача, спектральні параметри.
4. Характеристики приймачів випромінювання: спектральні характеристики, вольтові характеристики, залежність параметрів від потужності випромінювання, частотні характеристики, фонові, температурні, часові і просторові характеристики.

2. Теоретичні відомості

2.1 Узагальнена методика енергетичного розрахунку

Для якісної роботи будь-якого ОЕП важливо забезпечити деякі енергетичні співвідношення між корисним сигналом та шумом.

Метою енергетичного розрахунку зазвичай є визначення співвідношень між корисним сигналом та шумами (перешкодами) та знаходження на основі цих співвідношень найважливіших параметрів ОЕП.

В тій чи іншій формі енергетичний розрахунок виконується практично завжди при розробці ОЕП. Він дозволяє знайти найважливіші габаритні параметри оптичної системи (площу вхідної зіниці, відносний отвір, кутове поле), визначити необхідне значення граничного потоку або виявленої здатності приймача випромінювання, сформулювати вимоги до джерела випромінювання, визначити деякі вимоги до сканувальної системи та електронного тракту ОЕП [1, 2].

До таких та параметрів відносять [1, 2]:

- відношення сигнал/шум в різних точках схеми ОЕП;
- параметри виявлення;
- параметри точності;
- граничні або еквівалентні шуму параметри;
- дальність дії та інші.

Окрему групу складають конструктивні параметри ОЕП:

- діаметр вхідної зіниці;
- фокусна відстань;
- відносний отвір та кутове поле об'єктиву;
- параметри сканувальної системи, джерела та приймача випромінювання та інші, які можуть бути визначені в процесі енергетичного розрахунку.

Загальні етапи узагальненої методики енергетичного

1. Складання робочого (основного енергетичного) рівняння або нерівності, що встановлює в загальному випадку зв'язок між корисним сигналом, перешкодами та шумами [1, 2].

Такими рівняннями можуть бути:

- Співвідношення сигнал/шум на вході ОЕП $\mu_{\text{вх}} = \frac{\Phi_{\text{вх}}}{\Phi_{\text{П.ОЕП}}}$ або на виході

$$\mu_{\text{вх}} = \frac{U_c}{U_{\text{ш}}};$$

- Умова перевищення в задану кількість разів μ різниці між корисним сигналом $\Phi_{\text{вх}}$ та сигналом перешкоди $\Phi_{\text{перешкод}}$ на вході приладу границі чутливості $\Phi_{\text{П.ОЕП}}$ приладу, тобто $\Phi_{\text{вх}} - \Phi_{\text{перешкод}} > \mu \cdot \Phi_{\text{П.ОЕП}}$;

- Перевищення контрасту між корисним сигналом і сигналом від фону деякого граничного значення $K_{\text{п}}$, тобто $\frac{E_c - E_{\text{ф}}}{E_c + E_{\text{ф}}} > K_{\text{п}}$.

2. Представлення вхідних в це рівняння величин корисного сигналу, шумів та перешкод $\Phi_{\text{вх}}, \Phi_{\text{перешк.}}, E_c, E_{\text{ф}}, U_c, U_{\text{ш}}$ у вигляді функції параметрів і характеристик випромінювача, передавальної системи, спостережного об'єкту, середовища розповсюдження та приймальної системи

Доцільно встановити, чи не є яка-небудь із складових шуму явно пануюча над іншими, і врахувати це при приведенні шумів до тієї точки структурної схеми, для якої складено основне енергетичне рівняння.

3. Вибір або розрахунок параметру (величини μ), яке встановлює необхідне для якісної та надійної роботи ОЕП співвідношення між сигналом та шумами.

4. Розв'язання основного енергетичного рівняння (нерівності), в розгорнутому вигляді, відносно одного або декількох параметрів.

5. Вибір або розрахунок інших параметрів ОЕП.

6. Кінцевий (перевірочний) енергетичний розрахунок, що зводиться до перевірки виконання нерівності – основного енергетичного рівняння – після остаточного вибору або визначення всіх величин

Параметри і характеристики, що входять в робоче рівняння *нерівність) ОЕП, можна розділити на три групи [1, 2]:

- незалежні від розробника, наприклад, параметри та характеристики спостережного об'єкту або випромінювача, а також середовища розповсюдження сигналу;
- критерії якості ОЕП та декілька конструктивних, визначених технічним завданням, наприклад, співвідношення сигнал/шум, похибка вимірювання, габаритні розміри, маса, кутове поле об'єктиву;
- конструктивні параметри, якими розробник може варіювати, підбираючи оптимальні поєднання декількох параметрів і характеристик приладу, до них відносять, наприклад, габаритні розміри об'єктиву, параметри приймача або електронного тракту та інші.

З урахуванням цього розділення доцільно на початку енергетичного розрахунку скласти математичну модель проектного ОЕП. Представляючи ОЕП у вигляді багато параметричної системи, можна застосовувати загальні методи оптимізації для вибору таких конструктивних параметрів, які забезпечують задане значення критерію якості всього ОЕП. В достатньо загальному випадку задача оптимізації зводиться до відшукування максимумів та мінімумів окремих параметрів.

2.2 Розрахунок значень потоків і опроміненості на вході оптико-електронного приладу

Значення потоків і опроміненості на вхідній зіниці ОЕП залежить від властивостей випромінювачів, середовища розповсюдження випромінювання, навіть і від параметрів ОЕП. У зв'язку з тим, що на початку проектування приладу параметри ОЕП невідомі, визначення цих величин на першому етапі енергетичного рівняння є попереднім [1, 2].

Розглянемо випадок роботи ОЕП пасивним методом. Для розрахунку розділяємо всі можливі випадки на три групи [1, 2]:

- випромінювач точковий;
- випромінювач має кінцеві видимі розміри, менші кутового поля;
- розміри випромінювача перекривають все кутове поле системи («протяжний» випромінювач).

Основною енергетичною характеристикою точкового випромінювача є сила випромінювання I_e . Для малих тілесних кутів потік $\Delta\Phi_e$ або опроміненість E_e на вхідній зіниці площею $A_{\text{вх}}$ розраховують [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2}; E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{вх}}} = \frac{\tau_c \cdot I_e}{l^2}, \quad (3.1)$$

де $\Delta\Phi_e$ - потік;

E_e - опроміненість;

$A_{\text{вх}}$ - площа вхідної зіниці.

Потік на виході оптичної системи [1, 2]:

$$\Delta\Phi'_e = \tau_c \cdot \tau_o \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot \tau_o \cdot I_e \cdot A_{\text{вх}}}{l^2}, \quad (3.2)$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Розрахунок опроміненості в зображенні випромінювача, тобто на виході оптичної системи, на відміну від розрахунку величини $\Delta\Phi'_e$ достатньо складний, оскільки для визначення закону розподілу потоку в зображенні необхідно враховувати як дифракцію, так і аберації, внесені системою.

Якщо випромінювач є селективним або прийом випромінювання проходить в на деякому спектральному відрізку $\lambda_1 \dots \lambda_2$, то, знаючи вигляд функції $\tau_{c\lambda} = \tau_c(\lambda)$ та $I_{e\lambda} = I_e(\lambda)$, можна визначити значення $\Delta\Phi_e$ і E_e для робочого діапазону довжин хвиль [1, 2]:

$$\Delta\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{A_{\text{вх}}}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot I_{e\lambda} d\lambda. \quad (3.3)$$

Ці формули справедливі тільки для невеликих тілесних кутів $\Delta\Omega \approx \frac{A_{\text{вх}}}{l^2}$, в межах яких сила випромінювання джерела постійна.

Розглянемо випадок, коли випромінювач кінцевої площі займає частину кутового поля оптичної системи. Енергетичною характеристикою такого випромінювача слугує яскравість L_e . На практиці розміри джерела випромінювання значно менші ніж відстань до нього. В цьому випадку використовують відому формулу для визначення потоку, що приходить на вхідну зіницю від елемента з видимою площею ΔA , розташованого на вісі системи [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \int \int_{\sigma\psi} L_{e\sigma} \cdot \sin(\sigma) \cdot \cos(\sigma \cdot \Delta A) \cdot d\psi \cdot d\sigma, \quad (3.4)$$

де $L_{e\sigma}$ - енергетична яскравість елемента (випромінювача) в напрямку σ ;

$\int \int_{\sigma\psi}$ - границі інтегрування по σ складають від $0 \dots \sigma_A$ (σ_A – апертурний кут системи) по ψ дорівнює $0 \dots 2\pi$ - для круглого випромінювача.

При косинусному (ламбертовому) випромінювачі, тобто, наприклад, для чорних та сірих випромінювачів $L_{e\sigma} = L_\sigma = \text{const}$ маємо [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \text{Sin}^2(\sigma_A) \cdot \Delta A, \quad (3.5)$$

На виході оптичної системи:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_0 = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \text{Sin}^2(\sigma_A) \cdot \Delta A. \quad (3.6)$$

Якщо врахувати, що для $l \gg D$:

$$\text{Sin}^2(\sigma_A) \approx \frac{D^2}{4 \cdot l^2}, \quad (3.7)$$

де D – діаметр вхідної зіниці;
 l – відстань до випромінювача.
Тоді отримаємо [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \frac{D^2}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{ex}}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A, \quad (3.8)$$

де $A_{\text{ex}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи.

Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{\Delta A}{l^2}. \quad (3.9)$$

Для невеликих значень тілесного кута $\Delta\Omega_2 \approx \frac{\Delta A}{l^2}$, в межах якого $L_e = \text{const}$

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \Delta\Omega_2. \quad (3.10)$$

Аналогічно попередньому випадку при спектральній селективності випромінювання і пропускання середовища вираз для потоку на виході системи [1, 2]:

$$\Delta\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta A}{4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot \tau_{0\lambda} \cdot E_{e\lambda} d\lambda, \quad (3.11)$$

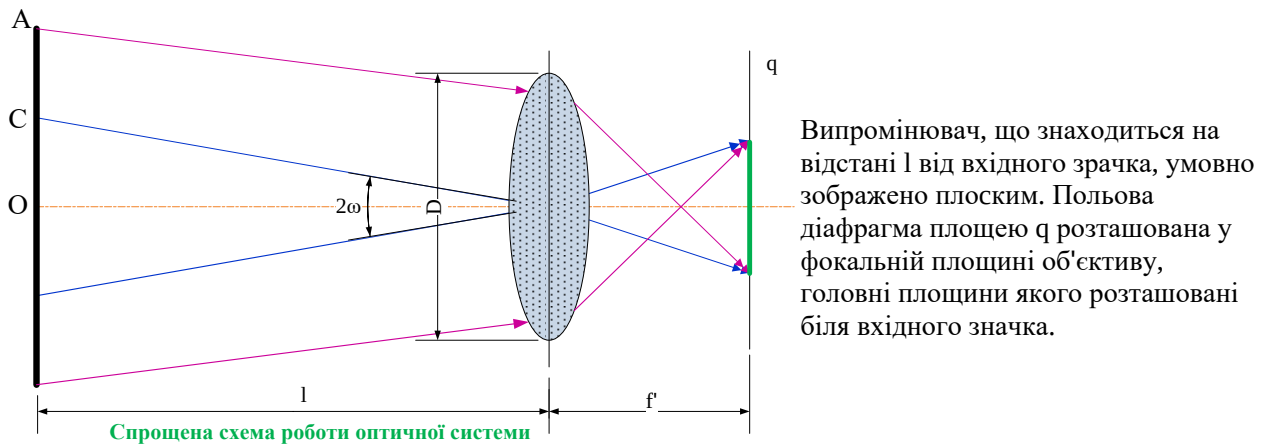
Якщо випромінювач є сірим тілом з коефіцієнтом випромінювання ε_T , то з урахуванням закону Ламберта ($M_{e\lambda} = \pi \cdot L_{e\lambda}$) останній вираз набуває вигляду:

$$\Delta\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\varepsilon_T \cdot D^2 \cdot \Delta A_{\lambda_2}}{4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot \tau_{0\lambda} \cdot M_{e\lambda} d\lambda, \quad (3.12)$$

де $M_{e\lambda}$ - функція Планка.

Для інших умов роботи ОЕП по «площинному» випромінювачу наведені формули необхідно видозмінити.

Розглянемо наступний випадок – випромінювач перевищує розміри кутового поля, тобто перекриває все поле 2ω . Основною енергетичною характеристикою протяжного випромінювача є його яскравість L_e [1, 2].



Якщо в такій схемі виконується умова $CO = l \cdot \operatorname{tg}(\omega) \gg AC = \frac{D}{2}$, що при великій відстані l до випромінювача завжди має місце, то видима площа ΔA випромінюючого протяжного джерела в основному визначається проекцією площі польової діафрагми на площину випромінювача.

Із найпростіших геометричних співвідношень видно [1, 2]:

$$\Delta A = \frac{q \cdot l^2}{f'^2} = \Delta\Omega_{OEP} \cdot l^2, \quad (3.13)$$

де $\Delta\Omega_{OEP} \approx \frac{q}{f'^2}$ - тілесне кутове поле ОЕП.

Підставляємо отримані формули у попередні, отримаємо [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot L_e \cdot q \cdot \frac{A_{ex}}{f'^2} = \tau_c \cdot L_e \cdot \Delta\Omega_{OEP} \cdot A_{ex}; E_e = \frac{\tau_c \cdot L_e \cdot q}{f'^2} \quad (3.14)$$

Для круглого вхідної зіниці:

$$\Delta\Phi'_e = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4} \right) \cdot \left(\frac{D}{f'} \right)^2. \quad (3.15)$$

Тобто очевидна залежність значень потоків та опроміненості від відносного отвору системи.

Наведені формули можна використовувати для знаходження потоків або опроміненості, що створюються як джерелами корисних сигналів, так і джерелами перешкод або випромінюючими фонами. Відповідні конкретним умовам роботи ОЕП їх поєднання складає основу енергетичного рівняння приладу [1, 2].

Розглянемо випадок роботи ОЕП активним методом.

Оскільки джерелом енергії випромінювання, що переносить корисний сигнал, при активному методі є передавальна оптична система, то визначимо потік випромінювання $\Delta\Phi_e$ на вхідній зіниці приймальної частини всією оптико-електронної системи [1, 2].

Передавальна система 1, має яскравість джерела L_e , коефіцієнт пропускання τ_{01} та площу вихідної зіниці $A_{вих}$, яка спрямовує пучок променів на об'єкт 2, що розташований на відстані l_1 від неї. Частина потоку, відбитого від об'єкту 2, потрапляє на вхідну зіницю площею $A_{вх}$ приймального тракту оптико-електронної системи 3, яка розташована на відстані l_2 від об'єкту.

Оскільки в загальному випадку умови проходження пучком шляху l_1 , і l_2 можуть бути різними, позначаємо через τ_{c1} та τ_{c2} відповідні коефіцієнти пропускання середовища на одиницю шляху.

Коефіцієнт пропускання приймальної системи τ_{02} . При великих відстанях l_1 опроміненість в площині об'єкту 2 визначається [1, 2]:

$$E_e = \frac{\tau_{01} \cdot \tau_{c1}^{l_1} \cdot L'_e \cdot A_{вих}}{l_1^2} = \frac{\tau_{c1}^{l_1}}{l_1^2} \cdot I_{e0}, \quad (3.16)$$

де I_{e0} - осева сила випромінювання передавальної системи;

$$L'_e = \left(\frac{n'}{n} \right) \cdot L_e, \quad n', n - \text{показники заломлення оптичних середовищ по}$$

обидві сторони об'єктиву передавальної системи.

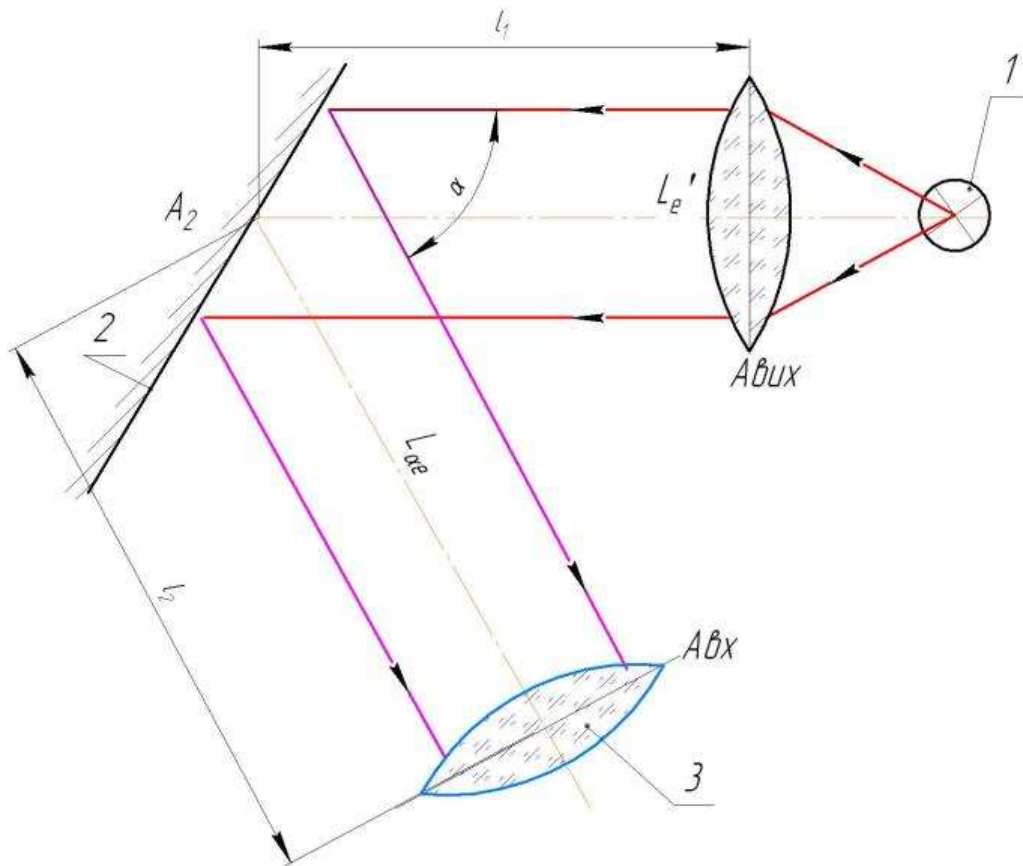


Рисунок 3.1 – До виводу формули

Після відбиття потоку від об'єкт 2 можна розглядати як випромінювач для приймальної системи 3. Яскравість його за напрямком α визначається [1, 2]:

$$L_{e\alpha} = \frac{r_\alpha \cdot E_e}{\pi}, \quad (3.17)$$

де r_α - коефіцієнт яскравості поверхні об'єкту 2 (наприклад, для дифузного ламбертового відбивача цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту відбиття поверхні об'єкту ρ).

Тоді потік, що поступає на вхід приймальної системи від площадкового випромінювача:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c2}^{l2} \cdot L_{e\alpha} \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex}}{l^2}, \quad (3.18)$$

де A_2 - видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту.

З урахуванням всіх складових остаточно отримаємо [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c1}^{l1} \cdot \tau_{c2}^{l2} \cdot \tau_{o1} \cdot L_e' \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex} \cdot A_{вух} \cdot r_\alpha}{\pi \cdot (l_1 \cdot l_2)^2}, \quad (3.19)$$

На виході приймальної системи маємо [1, 2]:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_{o2}, \quad (3.20)$$

Для конкретних умов дані формули дещо видозмінюються, так при

$l_1 = l_2 = l$; $A_{вих} = \frac{\pi \cdot D'^2}{4}$ – *круглій вихідній зіниці*, при дифузному характері відбиття поверхні об'єкту 2, тобто $r_\alpha = \rho$, та $\tau_{c1} = \tau_{c2}$, отримаємо потік [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c1}^{2l} \cdot \tau_{o1} \cdot \rho \cdot L'_e \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex} \cdot D'^2}{4 \cdot (l)^4} \quad (3.21)$$

Вирази для потоків або опроміненості, що створюються перешкодами або фонами, що знаходяться в кутовому полі приймальної системи, визначають аналогічно, як при пасивному методі роботи ОЕП. У сукупності з виразами корисного сигналу, вони слугують для створення основного енергетичного рівняння приладу [1, 2].

При активному методі роботи для покращення енергетичних співвідношень в системі, окрім таких мір, як збільшення яскравості джерела та діаметру вихідної зіниці передавальної системи, досить ефективним є збільшення коефіцієнту r_α . Це можливо у тому випадку, якщо конструктор може змінювати конструкцію об'єкту 2 [1, 2].

Наприклад, в оптико-електронних дальномірах застосовують кутові відбивачі, що встановлюються на об'єкті, відстань до якого вимірюється. Ці відбивачі мають властивість відбивати падаючий на них потік в тому ж напрямку, звідки цей потік прийшов. Таким чином досягається помітне збільшення рівня корисного сигналу, що приходить на вхідну зіницю приймальної системи. Окрім того, можливо зменшити кутове поле приймальної системи, що сприяє зменшенню потоку від фону [1, 2].

3. Виконання роботи

Завдання 3.1

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при точковому опромінювачі АЛ102, $I, \text{мкд}$; $D_{\text{вх}}, \text{мм}$; $l, \text{мм}$. Пропускання середовища 90 %, оптичної системи 95 %.

Варіант	приклад	1	2	3	4	5
$I, \text{мкд}$	0,1					
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	30	24	34	40	45	50
$l, \text{мм}$	50	52	37	60	65	70
$\tau_c, \%$	90	92	95	97	90	90
$\tau_o, \%$	95	94	97	98	98	99
опромінювач	АЛ102	АЛ107	АЛ121	ЗЛ341	ЗЛ360Б	АЛ307Н

Рішення

1. Основною енергетичною характеристикою точкового випромінювача є сила випромінювання I_e . Для малих тілесних кутів потік $\Delta\Phi_e$ або опроміненість E_e на вхідній зіниці площею $A_{\text{вх}}$ розраховують [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2}; \quad E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{вх}}} = \frac{\tau_c \cdot I_e}{l^2},$$

де $\Delta\Phi_e$ - потік, Вт;

E_e - опроміненість $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

$A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи

$$A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (30 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 7,069 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тоді світлотехнічний (фотометричний) потік випромінювання [1, 2]:

$$\Delta F = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2} = \frac{0,9 \cdot 7,069 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ лм}.$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це

можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{\max} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

$$\text{Отримаємо енергетичний потік } \Delta\Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{2,54 \cdot 10^{-5}}{680} = 3,742 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}.$$

2. Освітленість буде [1, 2]:

- світлотехнічна система $E = \frac{\Delta F}{A_{\text{вх}}} = \frac{2,54 \cdot 10^{-5}}{7,06 \cdot 10^{-4}} = 0,036 \text{ лк};$
- енергетична система $E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{вх}}} = \frac{3,74 \cdot 10^{-8}}{7,06 \cdot 10^{-4}} = 5,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

3. Потік на виході оптичної системи:

- світлотехнічна система:

$$\Delta F' = \tau_o \cdot \Delta F = 2,54 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 2,417 \cdot 10^{-5} \text{ лм};$$

- енергетична система:

$$\Delta\Phi_e = \tau_o \cdot \Delta\Phi_e = 3,742 \cdot 10^{-8} \cdot 0,95 = 3,555 \cdot 10^{-8} \text{ Вт},$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи

Розрахунок опроміненості в зображенні випромінювача, тобто на виході оптичної системи, на відміну від розрахунку величини $\Delta\Phi_e'$ достатньо складний, оскільки для визначення закону розподілу потоку в зображенні необхідно враховувати як дифракцію, так і аберації, внесені системою.

Завдання 3.2

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при ламбертовому опромінювачі з видимою площею $\Delta A = 20 \text{ мм}^2$, $L, \text{кд/м}^2$; $D_{\text{вх}}, \text{мм}$; $l, \text{мм}$. Пропускання середовища 92 %, оптичної системи 97 %

Варіант	приклад	1	2	3	4	5
$L, \text{кд/м}^2$	0,05	0,057	0,064	0,1	0,15	0,2
$\Delta A, \text{мм}^2$	20	24	28	25	30	35
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	40	42	35	30	35	40
$l, \text{мм}$	25	34	20	20	25	30
$\tau_c, \%$	92	95	92	93	94	95
$\tau_o, \%$	97	94	95	95	96	97

Рішення

1. Розглянемо випадок, коли випромінювач кінцевої площі займає частину кутового поля оптичної системи. Енергетичною характеристикою такого випромінювача слугує яскравість L_e .

Потік випромінювання на вході визначаємо за формулою [1, 2]:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \frac{D^2}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{A_{ex}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A,$$

де $A_{ex} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи;

D – діаметр вхідної зіниці;

l – відстань до випромінювача.

$$\begin{aligned} \Delta F &= \tau_c \cdot L \cdot \frac{A_{ex}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = 0.92 \cdot 0.05 \cdot \frac{1.257 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \\ &= 4.624 \cdot 10^{-4} \text{ лм} \end{aligned}$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{\max} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

$$\text{Маємо } \Delta\Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{4,624 \cdot 10^{-4}}{680} = 6,801 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$$

2. На виході оптичної системи потік визначаємо за формулою [1, 2]:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_o.$$

Тоді маємо потік на виході оптичної системи [1, 2]:

- світлотехнічна система

$$\Delta F' = \tau_o \cdot \Delta F = 4,624 \cdot 10^{-4} \cdot 0.97 = 4,486 \cdot 10^{-4} \text{ лм};$$

- енергетична система

$$\Delta\Phi_e = \tau_o \cdot \Delta\Phi_e = 6,801 \cdot 10^{-7} \cdot 0.97 = 6,597 \cdot 10^{-7} \text{ Вт},$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи

3. Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

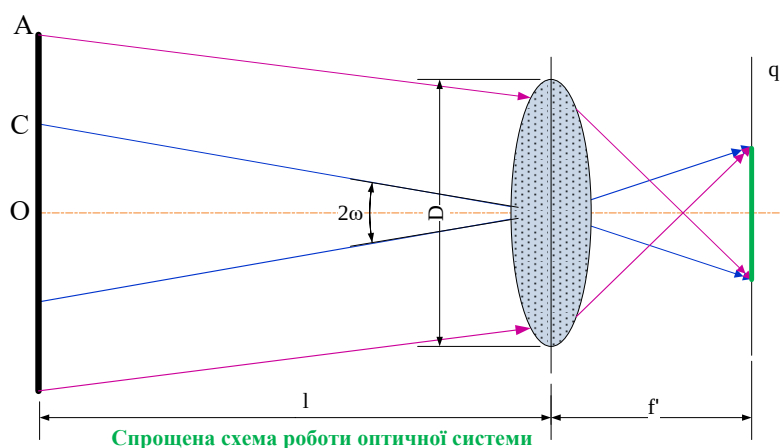
- світлотехнічна система $E = \tau_c \cdot L \cdot \frac{\Delta A}{l^2} = 0,92 \cdot 0,05 \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{(25 \cdot 10^{-3})^2} = 1,472 \text{ лк}$;
- енергетична система

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{\Delta A}{l^2} = 0,92 \cdot 7,353 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{(25 \cdot 10^{-3})^2} = 2,165 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Завдання 3.3

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при ламбертовому опромінювачі (що перевищує розміри кутового поля). Дано: $L, \text{кд/м}^2$; $D_{\text{ex}}, \text{мм}$; $l, \text{мм}$; $f', \text{мм}$; $d, \text{мм}$. Пропускання середовища 90 %, оптичної системи 95 %.

Варіант	приклад	1	2	3	4	5
$L, \text{кд/м}^2$	0,05	0,059	0,067	0,072	0,079	0,083
$f', \text{мм}$	15	25	38	20	30	25
$D_{\text{ex}}, \text{мм}$	35	40	46	30	40	35
$d, \text{мм}$	25	20	25	20	22	25
$l, \text{мм}$	100	105	110	112	123	136
$\tau_c, \%$	90	92	95	90	95	97
$\tau_o, \%$	95	97	98	93	97	95



Випромінювач, що знаходиться на відстані l від вхідного зрачка, умовно зображено плоским. Польова діафрагма площею q розташована у фокальній площині об'єктиву, головні площини якого розташовані біля вхідного зрачка.

Рішення

1. Потік випромінювання на вході визначаємо за формулою [1, 2]:

$$\Delta \Phi_e = \tau_c \cdot L_e \cdot q \cdot \frac{A_{\text{ex}}}{f'^2},$$

де q – площа польової діафрагми;

$$q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

ΔA - видима площа випромінюючого протяжного джерела

$$\Delta A = \frac{q \cdot l^2}{f'^2} = \frac{4,909 \cdot 10^{-4} \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2}{(15 \cdot 10^{-3})^2} = 0,022 \text{ м}^2;$$

$A_{\text{ex}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи;

$$A_{\text{ex}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (35 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 9,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тоді:

$$\Delta F = \tau_c \cdot L \cdot q \cdot \frac{A_{\text{ex}}}{f'^2} = \frac{0,9 \cdot 0,07 \cdot 4,909 \cdot 10^{-3} \cdot 9,621 \cdot 10^{-4}}{(15 \cdot 10^{-3})^2} = 2,592 \cdot 10^{-4} \text{ лм}.$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{\text{max}} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

$$\text{Маємо } \Delta \Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{2,592 \cdot 10^{-4}}{680} = 3,812 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$$

2. На виході оптичної системи потік визначаємо за формулою [1, 2]:

- світлотехнічна система:

$$\Delta F' = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4} \right) \cdot \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = 1,256 \cdot 10^{-4} \text{ лм};$$

- енергетична система

$$\Delta \Phi'_e = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4} \right) \cdot \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = 1,847 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$$

Тобто очевидна залежність значень потоків та опроміненості від відносного отвору системи.

3. Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

• світлотехнічна система $E = \frac{\tau_c \cdot L \cdot q}{f'^2} = 0,137 \text{ лк} ;$

• енергетична система $E_e = \frac{\tau_c \cdot L_e \cdot q}{f'^2} = 2,021 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} .$

Завдання 3.4

Визначити потік випромінювання на вході та виході ОЕП при роботі активним методом

Варіант	приклад	1	2	3	4	5
джерело випромінювання	ОП-11-40	ОП6-25	ОП-12-100	ОП6-15	ОП8-100	ОП13-50
$F, \text{ лм}$	840	Дані із довідника				
діаметр джерела, мм	20	Дані із довідника				
$D_{\text{вих}}, \text{ мм}$	25	Прийняти на 25 % більшим за розмір діаметру джерела				
$d_{\text{вх}}, \text{ мм}$	25					
$l_1, \text{ мм}$	100	110	120	130	120	150
$l_2, \text{ мм}$	150	180	150	180	170	200
$\tau_c, \%$	95	90	95	93	95	97
$\tau_{o1}, \tau_{o2}, \%$	97; 98	95; 97	97; 99	95; 97	96; 99	95; 99

Рішення

Оскільки джерелом енергії випромінювання, що переносить корисний сигнал, при активному методі є передавальна оптична система, то визначимо потік випромінювання $\Delta \Phi_e$ на вхідній зіниці приймальної частини всією оптико-електронної системи:

$$\Delta \Phi_e = \tau_{c1}^{2l} \cdot \tau_{o1} \cdot \rho \cdot L'_e \cdot \frac{A_2 \cdot A_{\text{вх}} \cdot D'^2}{4 \cdot (l)^4},$$

де τ_c - коефіцієнт пропускання середовища розповсюдження випромінювання;

τ_{o1} - коефіцієнт пропускання оптичної системи;

ρ - коефіцієнт дифузного відбиття поверхні об'єкту;

L'_e - енергетична яскравість джерела $L_e = \frac{I_e}{S_{\text{дж}} \cdot \cos(\alpha)} ;$

I_e – енергетична сила світла джерела випромінювання, $\frac{\text{Вт}}{\text{ср}} ;$

S – площа випромінюючої площадки джерела випромінювання, $\text{м}^2 ;$

A_2 – видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту;

$$A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \text{площа вхідної зіниці системи};$$

D' - діаметр вихідної зіниці.

Визначаємо параметри, що входять до цієї формули.

1. Для заданого джерела ОП-11-40 із довідникових даних визначаємо:

• світловий потік випромінювання $F=840$ лм; енергетичний потік

$$\Phi_e = \frac{F}{V_\lambda} = \frac{840}{680} = 1,235 \text{ Вт};$$

• діаметр колби 20 мм.

Тоді, що визначити яскравість $L_e = \frac{I_e}{S_{\text{дж}} \cdot \cos(\alpha)}$ необхідно:

$$I_e = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi} = \frac{1,235}{4 \cdot \pi} = 0,0983 \text{ Вт/ср},$$

$$S_{\text{дж}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{дж}}^2}{4} = 3,142 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Маємо енергетичну яскравість:

$$L_e = \frac{I_e}{S_{\text{дж}} \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,0983}{3,142 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(60^\circ)} = 625,807 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

2. Опроміненість в площині об'єкту 2 визначається:

$$E_e = \frac{\tau_{01} \cdot \tau_{c1}^{l1} \cdot L'_e \cdot A_{\text{вих}}}{l_1^2} = \frac{0,97 \cdot 0,95 \cdot 625,807 \cdot 4,909 \cdot 10^{-4}}{(100 \cdot 10^{-3})^2} = 28,308 \text{ Вт/м}^2$$

Після відбиття потоку від об'єкту 2 можна розглядати як випромінювач для приймальної системи 3. Яскравість його за напрямком α визначається:

$$L_{e\alpha} = \frac{r_\alpha \cdot E_e}{\pi} = \frac{0,3 \cdot 28,308}{\pi} = 2,703 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2,$$

де r_α - коефіцієнт яскравості поверхні об'єкту 2 (наприклад, для дифузного ламбертового відбивача цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту відбиття поверхні об'єкту $\rho=0,3$).

3. Тоді потік, що поступає на вхід приймальної системи від площадкового випромінювача:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c2}^{l_2} \cdot L_{e\alpha} \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex}}{l_2^2} = 0,95 \cdot 2,703 \cdot \frac{1,257 \cdot 10^{-3} \cdot 4,909 \cdot 10^{-4}}{1(50 \cdot 10^{-3})^2} = 7,04 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} .$$

При цьому видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту

$$d_2 = \frac{d_{ex}}{\cos(60^\circ)} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{\cos(60^\circ)} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

$$\text{Тоді площа } A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 1,257 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 .$$

4. На виході приймальної системи маємо:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_{o2} = 7,04 \cdot 10^{-5} \cdot 0,98 = 6,899 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} .$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. В яких одиницях вимірюється енергетична сила світла.
2. В яких одиницях вимірюється світловий потік.
3. В яких одиницях вимірюється енергія випромінювання.
4. В яких одиницях вимірюється енергетична освітленість.
5. В яких одиницях вимірюється яскравість.
6. Енергетична сила світла описується формулою.
7. За якою формулою визначається освітленість об'єкту.
8. Енергетична освітленість визначається за формулою.
9. За якою формулою визначається енергетична яскравість.
10. За якою формулою визначається енергетична яскравість.
11. Визначити коефіцієнт відносної видимості для довжини хвилі $\lambda = 440 \text{ нм}$

Література

1. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. /Ю.Б.Парвулюсов, С.А.Родионов, В.П.Солдатов и др.; Под ред. Ю.Г.Якушенкова. – М.: Логос, 2000. -488 с.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник. Для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. -480 с.
3. А.В.Бахолдин, Г.Э.Романова, Г.И.Цуканова Теория и методы проектирования оптических систем. Учебное пособие под редакцией проф. А.А.Шехонина. – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2011. -104 с.

Практичне заняття №4

ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ

Мета роботи:

1. Ознайомитися із типовим схемами включення приймачів випромінювання та узгоджувальними каскадами фотоприймальних пристроїв;
2. Розрахувати основні параметри фотоприймальних пристроїв при різноманітних схемах включення.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Приймачі оптичного випромінювання. Основні принципи побудови та класифікація.
2. Фоторезистори, принцип дії, електричні та спектральні характеристики.
3. Фотодіоди, принцип дії, конструкції, швидкодія, шуми та інші характеристики.
4. Фотодіоди з р-і-п структурою, діоди Шотки, лавинні фотодіоди та фотодіоди з гетероструктурою. Співставлення параметрів фотодіодів стосовно застосування їх в спеціальних системах.
5. Фототранзистори, принцип дії, устрій, складені фототранзистори, їх характеристики.
6. Приймачі оптичного випромінювання із внутрішнім інтегруванням сигналу.
7. Гібридні структури на основі фотонних приймачів та монолітні структури.

2. Теоретичні відомості

2.1 Попередній вибір приймача випромінювання і його узгодження з оптичною системою і електронним трактом

Основою для вибору важливих параметрів і характеристик приймача випромінювання, а як наслідок і типу приймача, є енергетичний розрахунок ОЕП. Аналіз основного енергетичного рівняння, що описує алгоритм роботи конкретного приладу і представленого у вигляді функції параметрів джерела випромінювання, передавальної оптичної системи, середовища розповсюдження потоку, приймальної оптико-електронної системи, дозволяє вибрати спектральний діапазон роботи ПВ, його виявлену здатність, чутливість, площу чутливого шару, вимоги до постійної часу.

Для пеленгаторів, локаторів, зіркових датчиків необхідно вибирати ті приймачі випромінювання, які забезпечують найбільш високу виявлену здатність і достатню швидкодію, мають малі розміри і масу, добру стійкість до змінних зовнішніх умов.

Для високоточних лабораторних ОЕП доцільно вибрати високостабільні ПВ, які мають високу чутливість і лінійність енергетичної характеристики; для переносних ОЕП – малогабаритні високочутливі ПВ з низькою напругою живлення.

Одночасно із специфікою різних ОЕП необхідно враховувати особливості окремих класів і типів приймачів. Так, якщо ОЕП призначений для роботи в видимій області спектру, можна використовувати фотоелементи, ФЕУ, а також фоторезистори на основі CdS, CdSe. ФЕУ доцільно використовувати у швидкодіючій та імпульсній апаратурі лише при малих потоках випромінювання і при відсутності фонового випромінювання, оскільки засвічування у ФЕУ сильно погіршує еквівалент шуму темного струму. Окрім того, ФЕУ мають порівняно великі габаритні розміри, вимагають застосування стабілізованого високовольтного джерела живлення і досить чутливі до дії електромагнітних та інших зовнішніх полів, а також вібрації.

В малогабаритній швидкодіючій апаратурі іноді доцільно використовувати високочастотні фотодіоди, серед яких найбільше розповсюдження отримали *p-i-n* фотодіоди і особливо лавинні фотодіоди, які мають малу постійну часу $\tau = 10^{-8}$ с. Окрім того, лавинні фотодіоди володіють внутрішнім підсиленням фотоструму, тобто по суті, вони є напівпровідниковими аналогами ФЕУ, з потенційно більш високим відношенням сигнал/шум. Проте на практиці цих переваг не завжди вдається реалізувати внаслідок значної залежності коефіцієнта підсилення лавинних діодів від нестабільності температури і напруги живлення. Для реалізації підсилювальних властивостей лавинних фотодіодів застосовують різноманітні способи їх термостабілізації та стабілізації джерела живлення.

Достатньо широко в якості приймачів випромінювання в ОЕП використовують передавальні телевізійні трубки – дисектор, суперортікон, ортікон. Поряд із перетворенням потоку випромінювання в електричний сигнал вони одночасно виконують функції аналізатора зображення. Ці трубки мають досить високу виявлену здатність і чутливість, низьку постійну часу, але складні конструктивно.

Широко застосовуються в ОЕП також твердотільні аналоги телевізійних передавальних трубок – прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) та прилади із зарядовою інжекцією (ПЗІ). У порівнянні з телевізійними передавальними трубками ПЗЗ та ПЗІ мають менші габаритні розміри і масу і потребують меншої напруги живлення.

Все більше розповсюдження отримують багатоелементні фотодіоди, фоторезисторні та деякі інші лінійки і матриці з повною електричною розв'язкою окремих чутливих елементів, які дозволяють виконати довільну координатну вибірку сигналів з окремих елементів. Поки що вони поступаються ПЗЗ по кількості елементів і просторовій дозвільній здатності, по діапазону амплітуд приймальних сигналів, по габаритам окремих елементів, проте їх перевага (дозвільна вибірка, більш широкий спектральний діапазон) та успіхи технології їх виготовлення роблять ці приймачі досить перспективним для багатьох ОЕП.

Для роботи в ІЧ діапазоні розроблені гібридні мозаїчні приймачі, в яких чутливий шар складається із окремих фотодіодів або фоторезисторів, з'єднаних з ПЗЗ-комірками, з допомогою яких виконується зчитування сигналів.

Розроблюються багатокольорові приймачі, які працюють в декількох спектральних діапазонах.

Параметри деяких сучасних матричних приймачів наведені в таблиці.

Вибір типу багатоелементного приймача випромінювання (БПВ) визначається такими його параметрами:

- Розмір чутливого шару одного елементу, від якого залежить просторова дозвільна здатність БПВ і всього приладу;
- Загальна кількість елементів, визначає загальну площу чутливого шару приймача, а як наслідок, розміри кутового поля ОЕП;
- Чутливість, залежить як від матеріалу, із якого виготовлений приймач, так і від розмірів чутливого шару елементу;
- Однорідність параметрів окремих елементів і, перш за все, їх чутливості;
- Рівень шумів, визначається не тільки складовим шуму, притаманним одноелементним приймачам, але і рядом специфічних складових («геометричний шум», перехресні зв'язки та інш.)

Всі ці параметри тісно пов'язані між собою, а також з параметрами оптичної системи і електронного тракту

Наприклад, чим менші розміри чутливого шару одного елементу, тим менші деталі зображення можуть сприйматися приймачем. Проте зменшення розмірів елементу, тобто площі його чутливого шару, знижує чутливість елемента, оскільки вихідний сигнал збільшується із збільшенням площі чутливого шару. При заданому кутовому полі, розглядуваному БПВ, і постійному відносному отворі об'єктива ОЕП, зменшення розмірів БПВ призводить до збільшення їх кількості, що не завжди доцільно з точки зору технологічних та техніко-економічних факторів. З іншого боку збільшення кількості елементів БПВ із збереженням їх розмірів вимагає збільшення фокусної відстані об'єктива для збереження кутової дозвільної здатності в просторі предметів.

При постійному діаметрі вхідної зіниці об'єктива це призводить до зменшення відносного отвору і, як наслідок, до погіршення світлосили ОЕП, тобто до зменшення чутливості.

Окрім того, при проектуванні ОЕП, призначених для побудови зображення, наприклад в тепловізійних системах, необхідно враховувати ефект накладання (виникнення побічних зображень), виникаючий при просторовій вибірці зображення БПВ з періодом розташування окремих елементів T_e , якщо максимальна просторова частота в спектрі зображення перевищує так звану частоту Найквіста $f = \frac{0.5}{T_e}$.

Узгодження параметрів і характеристик приймача випромінювання і оптичної системи в загальному випадку починається з вибору:

- робочого спектрального діапазону, тобто з оцінки раціональності відповідності спектральних характеристик пропускання оптичної системи і чутливості приймача один до одного,;
- спектрів випромінювання спостережного або виявленого джерела і пропускання середовища на трасі розповсюдження оптичного сигналу від джерела до ОЕП;
- оцінка відповідності або вибір раціональних геометро-оптичних параметрів оптичної системи і приймача. Їх взаємозв'язок витікає із відомих в прикладній оптиці інваріанту Лагранжа-Гельмгольца, дійсного для двох будь-яких перетинів світлової трубки: $n \cdot l \cdot \sin(\sigma) = n' \cdot l' \cdot \sin(\sigma')$, де n, n' - показники заломлення середовища в просторі предметів і зображення; l, l' - поперечний розмір предмета і його зображення; σ, σ' - передній і задній апертурні кути оптичної системи.

Тоді можна встановити зв'язок між діаметром вхідної зіниці об'єктива ОЕП ($D=l$), і його кутовим полем ($2 \cdot \omega = 2 \cdot \sigma$), розміром чутливої площадки приймача l' та граничним кутом падіння σ' променів на цю площадку.

Типові схеми включення приймачів випромінювання в електричну схему показано на рис.4.1.

Електричну схему попереднього підсилювача необхідно розробляти з урахуванням специфічних вимог:

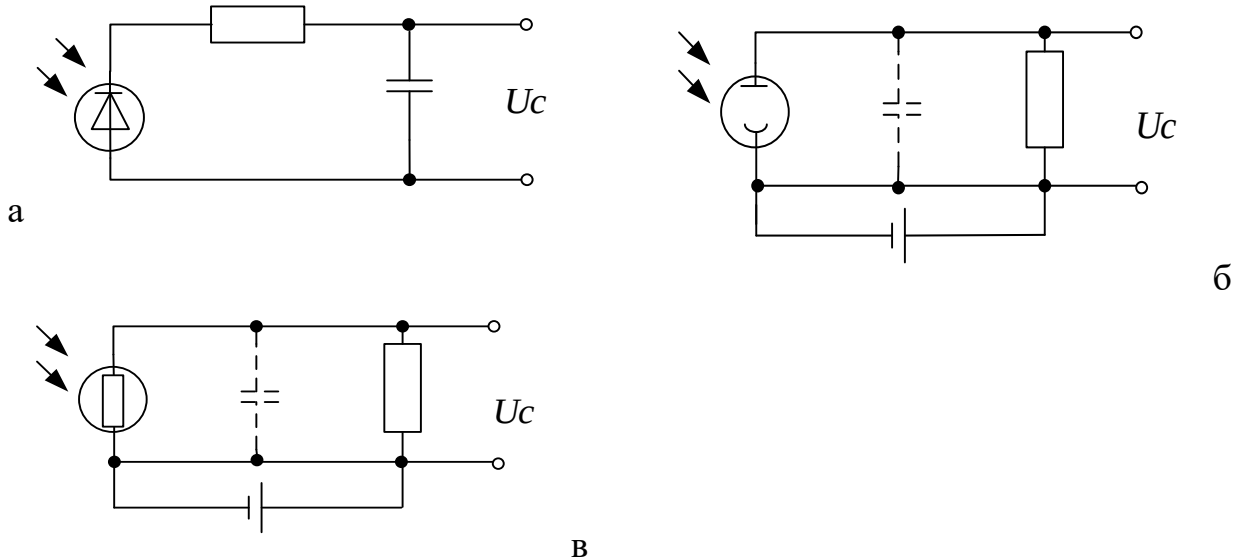
- електрична схема попереднього підсилювача або підсилювача повинна бути простою;
- попередній підсилювач повинен нормально функціонувати при значному розкиді параметрів (до 20-30) елементів в діапазоні температур $\left(-60 \dots +125^{\circ} C \right)$;
- рівень власних шумів, приведений до входу попереднього підсилювача, повинен бути в 3-10 разів нижчий рівня шумів приймача, а вихідний опір не більше 50-150 Ом;
- динамічний діапазон ФПП по напрузі без врахування АРП (автоматичний регулюючий пристрій) повинен бути не менше 60 дБ для імпульсних сигналів і не менше 40 дБ для гармонійних сигналів, щоб забезпечити необхідну кількість градацій передавального сигналу.

Таблиця 4.1 – Типові значення параметрів сучасних матричних приймачів випромінювання

<i>Спектральний діапазон</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Тип фотоматриці</i>	<i>Кількість елементів</i>	<i>Розміри елемента, мкм</i>	<i>Рівень темного (фоновий шум) Електрон/елемент</i>	<i>Неоднорідність чутливості і окремих елементів, %</i>	<i>Робоча температура, К</i>
УФ	Si	ПЗЗ	400x400	10-30	1-5	1	260-300
видимий	Si	ПЗЗ	480x640 2000x2000	10-30	1-5	1	260-300
Середньохвильовий ІЧ (3-5 мкм)	InSb	гібридна	256x256	40-60	80-500	4	55-80
	HgCdTe				100-1000	5	60-120
	PtSi	ПЗЗ	512x512	20-60	80-500	2	50-80
	PtSi		488x640	20-40	20-100	0,25	55-80
Довгохвильовий (8-12 мкм)	HgCdTe	гібридна	256x256	40-60	300-3000	20	40-80
	IrSi, GeSi	ПЗЗ	400x400	20-40	20-100	1	30-60
	болометри	Монолітна гібридна	245x328 240x336	50	30000	20	300
видимий	Si	КМОП	2048x2048 512x512	10-30	2-5	-	260-300
3-5 мкм	JnSb	КМОП	65000-327000	40-60	80-500	-	55-80

2.2 Типові схеми включення приймачів випромінювання

Електричний сигнал U_c , що виробляється в ланцюгу включення, як правило, малий і не придатний для безпосереднього використання в виконавчих пристроях, блоках індикації та реєстрації. Його необхідно підсилити та узгодити з наступним електронним трактом. Ці функції виконує ланцюг зв'язку та підсилювача.



*Примітка Конденсатори показані штриховими лініями, представляють собою власну ємність приймача випромінювання та ємність монтажу ланцюга включення

Рисунок 4.1 - а) приймач-генератор ЕРС (термоелемент, фотодіод в фотогальванічному режимі роботи); б) приймач-генератор струму (ФЕУ, фотоелемент); в) приймач-генератор зміни пору (фоторезистор, болометр)

Узгоджувальні каскади фотоприймальних пристроїв

Узгодження необхідно внаслідок того, що внутрішній опір більшості приймачів випромінювання може бути або досить низьким (одиниці і десятки Ом), або достатньо високим (від сотень кОм до сотень МОм) у порівнянні із вхідним опором підсилювачів, а власна ємність приймачів змінюється від одиниць до декількох сотень пФ, що накладає певні обмеження на вибір параметрів узгоджувальних ланцюгів. Окрім того, для попередження втрат корисної інформації від випромінювача середнє квадратичне значення напруги шумів електронного тракту, що приведено до входу $\tilde{u}_{ш.э.вх}$, повинну бути в декілька разів меншим середньо квадратичного значення напруги шумів приймача випромінювання.

В якості узгоджувальних каскадів (або ланцюгів зв'язку) в ОЕП використовують катодний, емітерний або істоковий повторювач для високоомних приймачів випромінювання рис.4.2 а-в трансформаторний ланцюг для низькоомних приймачів рис.4.2 г та RC-ланцюг рис.4.2 д, якщо вхідний опір попереднього підсилювача $R_{вх}$ і власний опір приймача приблизно однакові.

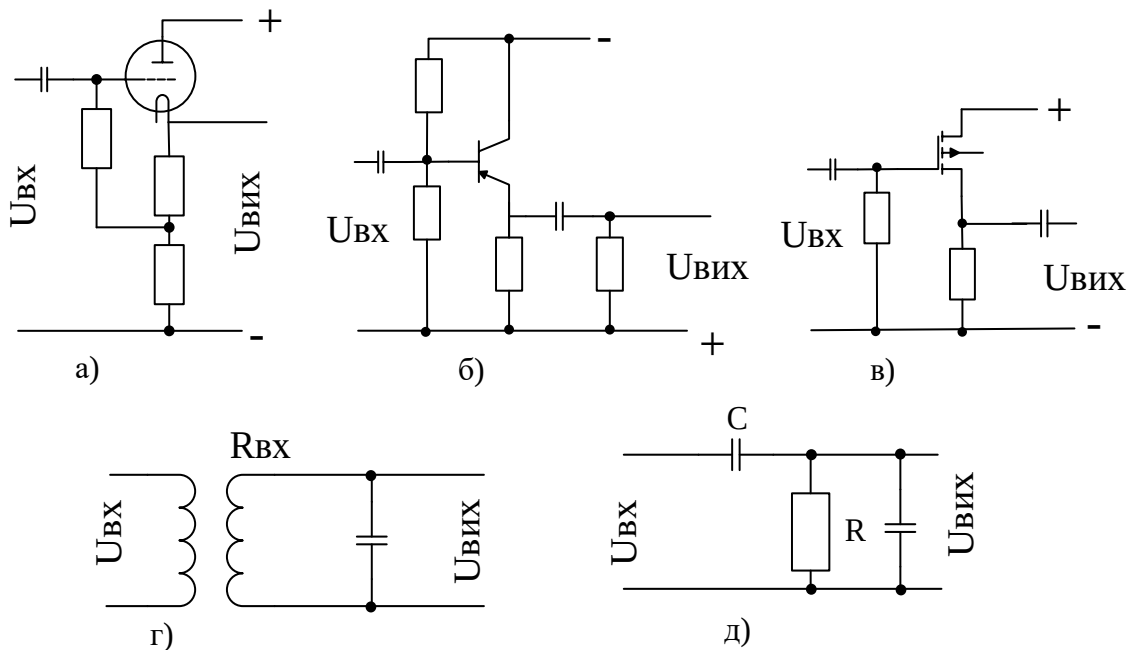


Рисунок 4.2- а, б, в) - катодний, емітерний або істоковий повторювач для високоомних ПВ; г) трансформаторний ланцюг; д) – RC- ланцюг

Для узгодження низькоомних приймачів випромінювання використовують також малощумні транзистори, включені за схемою із загальною базою, або декілька транзисторів, паралельно включених за схемою із загальним емітером, а для деяких приймачів - операційні підсилювачі, які можуть мати як великий, так і малий вхідний опір.

Приймач випромінювання з ланцюгом його включення та узгоджувальним каскадом називають **фотоприймальним пристроєм**. Проте у зв'язку з тим, що в різноманітних ОЕП все більш широко застосовують багатоелементні приймачі випромінювання, які одночасно виконують функції перетворення потоку випромінювання в електричний сигнал і аналізу зображення, під **ФПП необхідно розуміти** вузли, що включають власне приймач випромінювання і елементи, які реалізують певні перетворення сигналу, наприклад, селекцію оптичного сигналу за допомогою багатокольорових фільтрів, попереднє підсилення електричного сигналу, електричне узгодження приймача випромінювання із входом електронного тракту, а також в деяких випадках найпростішу попередню обробку сигналу, наприклад, фільтрацію, запам'ятовування і т.п. Окрім цього, до ФПП можуть бути також включені вузли, що виконують охолодження або термостабілізацію приймача випромінювання, стабілізацію його робочої точки по напрузі живлення, автоматичне регулювання живлення та внутрішню комутацію електричного сигналу (для багатоелементних приймачів випромінювання у вигляді ПЗС)

Енергетичні показники роботи ФПП визначаються вимогами по потужності розсіювання та граничній температурі. Необхідно враховувати, що при підвищенні температури знижуються гранично допустимі напруга і потужність, погіршуються також електричні характеристики, можлива поява

механічних дефектів, тріщин в кристалах, обрив з'єднувальних провідників та металізації, порушення герметичності.

2.3 Фотоприймальні пристрої на фоторезисторах

Електричну схему ФПП (або підсилювача ОЕП) необхідно розробляти із врахуванням великої кількості специфічних вимог, основними із яких для більшості ОЕП є [1]:

- електрична схема попереднього підсилювача або підсилювача повинна бути надпростою;
- попередній підсилювач або підсилювач повинен нормально функціонувати при значному розкиді (до 20-30 %) параметрів елементів в діапазоні температур $-60 \dots +125^\circ \text{C}$;
- рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача, повинен бути в 3 – 10 разів меншим рівня шумів приймача, а вихідний опір повинен бути не більше 50-150 Ом;
- динамічний діапазон ФПП по напрузі без врахування дії АРП (автоматичний регулюючий пристрій) повинен бути не менше 60 дБ для імпульсних сигналів і не менше 40 дБ для гармонійних сигналів, щоб забезпечити необхідне число градацій передаючого сигналу.

Окрім того, операційні підсилювачі, що використовуються в ФПП, повинні мати мінімальний дрейф нуля, а підсилювачі зчитування, повинні мати вузьку область перекидання та мінімальну зону гістерезису.

Узагальнена структурна схема ФПП на основі фоторезистора із підсилювачем показана на рис.4.3.

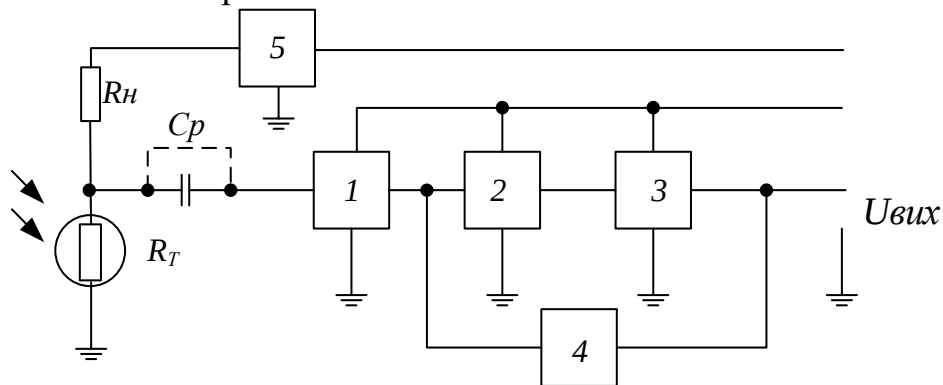


Рисунок 4.3 – Узагальнена структурна схема ФПП на основі фоторезистора
1- узгоджувальний каскад; 2 підсилювач; 3 - вихідний каскад; 4 – блок автоматичного регулювання підсилення; 5 - фільтр

Опір навантаження R_n вибирають рівним темновому опору R_T фоторезистора, що доцільно з точки зору забезпечення максимальної чутливості ФПП. В деяких випадках опір R_n підбирають експериментально, виходячи із умови максимізації співвідношення сигнал/шум.

Розподільчий конденсатор C_p використовується в ФПП, призначених для прийому гармонійних або імпульсних сигналів. В якості роздільного елемента може слугувати і мікромініатюрний трансформатор.

Узгоджувальний каскад 1 (попередній підсилювач) забезпечує оптимальне узгодження фоторезистора з підсилювачем і збільшення амплітуди фотосигналу до значення, достатнього для подальшої обробки.

При виборі принципової схеми узгоджувального каскаду необхідно, щоб його коефіцієнт шуму F був мінімальним. Забезпечити цю вимогу нескладно, оскільки при сучасній технології виготовлення ПВ і електронних компонентів останні мають мінімальні шуми і, окрім того, в електронному тракті легше виконати протишумову корекцію.

За значенням темного опору R_T і середньо квадратичної напруги шумів фоторезисторів, приведених до одиничної смуги частот Δf , узгоджувальні каскади ФПП розділяють на три групи.



Рисунок 4.4 – Класифікація узгоджувальних каскадів

З метою зменшення рівня шумів ФПП можна використовувати охолодження як самого фоторезистора і навантаження, так і інших елементів ФПП до температури $T=6-100 \text{ К}$. В цьому випадку ФПП будують на основі польових транзисторів.

2.4 Фотоприймальні пристрої на фотодіодах

Схеми включення фотодіодів, що працюють в фотодіодному та фотогальванічному режимах показано на рис.4.5. Для підвищення вольтової чутливості фотодіодів необхідно збільшити опір навантаження R_n . При фотодіодному режимі роботи максимальне значення навантаження $R_{n \text{ max}}$

пов'язано з максимальним потоком випромінювання Φ_{max} , який зможе зареєструвати фотодіод, наступним співвідношенням:

$$R_{n\ max} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{max} + I_0}, \quad (4.1)$$

де $U_{зм}$ – робоча напруга живлення фотодіода (напруга зміщення);
 S_I – струмова чутливість;
 I_0 – темновий струм через р – n – перехід.

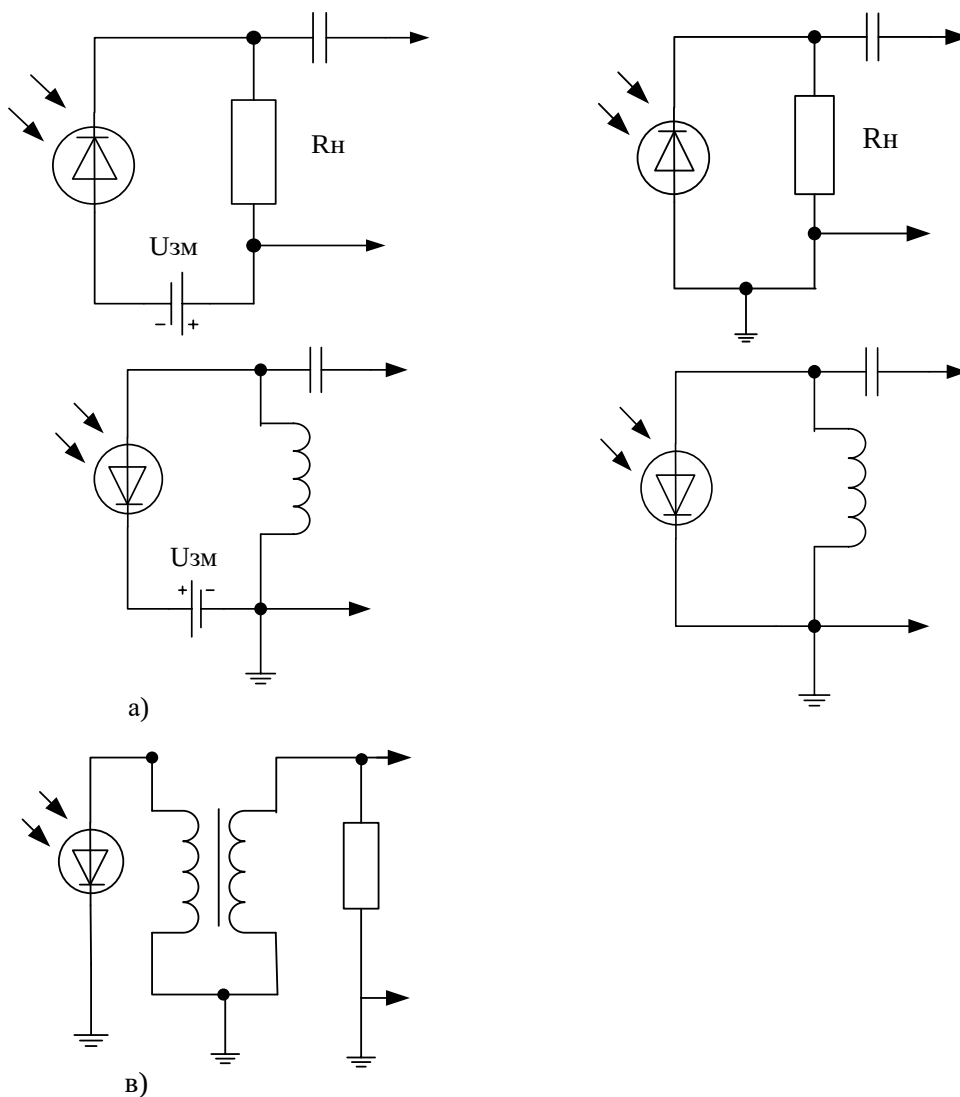


Рисунок 4.5 – Схеми включення фотодіодів: а, б) на активне навантаження; в, г, д) – на реактивне навантаження; б, г, д) фотогальванічний режим; а, в) фотодіодний режим

При цьому точка перетину прямої навантаження з вольт-амперною характеристикою, що відповідає максимальному потоку випромінювання,

повинна знаходитися в області фотодіодного режиму. Максимальна вольтова чутливість в цьому випадку:

$$S_{U \max} = \frac{U_{\text{зм}}}{\Phi_{\max} + \frac{I_0}{S_I}}, \quad (4.2)$$

Якщо фотострум $I_F \gg I_0$, максимальна вольтова чутливість не залежить від параметрів фотодіоду, тобто:

$$S_{U \max} = \frac{U_{\text{зм}}}{\Phi_{\max}} \text{ і } R_n \approx \frac{U_{\text{зм}}}{I_{F \max}}.$$

При $I_F \ll I_0$ ця чутливість тим більша, чим менше значення I_0 , тобто

$$S_{U \max} = \frac{U_{\text{зм}} \cdot S_I}{I_0}.$$

При роботі фотодіода з модульованим сигналом від випромінювача на фоні немодульованої засвітки необхідно, щоб його вольтова чутливість по змінному струму була максимальною, а по постійному (від фону) – мінімальною. Для цього доцільно використовувати трансформаторну або дросельну схему включення фотодіоду, яка дозволяє отримувати великий опір $\tilde{R}_n$ по змінному струму (індуктивний опір) та малий активний опір R_n по постійному струму. При роботі зі різними навантаженнями по постійному та змінному струму величина R_n визначає режим роботи фотодіоду, а $\tilde{R}_n$ - визначає вольтову чутливість. Опір навантаження по постійному струму бажано вибирати набагато меншим, ніж значення $R_{n \max}$ за формулою (4.1).

При фотогальванічному режимі роботи фотодіодів максимальний опір навантаження по постійному струму, що забезпечує лінійність енергетичної характеристики, визначають за формулою:

$$R_{n \max} = \frac{0.2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{F \max}}, \quad (4.3)$$

де $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постійна Больцмана;
 T – абсолютна температура фотодіода, К;
 e – заряд електрона.

Максимальна вольтова чутливість при цьому:

$$S_{U_{max}} = \frac{S_I \cdot k \cdot T / e \cdot I_0}{1 + k \cdot T / e \cdot I_0 \cdot Z_H}, \quad (4.4)$$

де Z_H - повний опір навантаження.

Проте необхідно врахувати, що оскільки опір р-п переходу залежить від I_F , оптимальний опір навантаження в умовах сильної зміни фотоструму підібрати неможливо. Тому для випадку, коли $50 \leq \frac{I_F}{I_0} \leq 10^{10}$, з похибкою не більше 3-4 % опір навантаження можна визначити за формулою:

$$R_H = \frac{0.88 \cdot A \cdot k \cdot T}{e \cdot I_0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right)}{\frac{I_F}{I_0}}, \quad (4.5)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від матеріалу фотодіоду, зазвичай 1 – 4 (для германієвих $A = 1$).

Окрім того необхідно враховувати, що при збільшенні R_H одночасно із збільшенням відношення сигнал/шум збільшується і постійна часу ФПП $\tau_{ФПП}$, що визначається рівністю:

$$\tau_{ФПП} = \sqrt{\tau_{n.в}^2 + \tau_{П}^2 + \tau_{вх}^2}, \quad (4.6)$$

де $\tau_{n.в}$ - постійна часу приймача випромінювання;

$\tau_{П}$ - постійна часу підсилювача;

$\tau_{вх}$ - постійна часу його вхідного ланцюга.

Тому для покращення швидкодії ОЕП використовують схеми ФПП з операційним підсилювачем або ланцюгом корекції постійної часу.

Для прийому синусоїдально модульованого та імпульсного сигналу можна використовувати схеми рис.4.6.

Операційні підсилювачі мають достатньо великий коефіцієнт підсилення (до 100 дБ), широку смугу пропускання (до 100 МГц), високий вхідний опір (до 1000 МОм) та малий вихідний опір.

Частотна характеристика ОП із зворотним зв'язком визначається опором $R_{3,3}$ і досить малою ємністю $C_{3,3}$ ланцюга зворотного зв'язку, і верхня частота частотної характеристики визначається за формулою:

$$f_{\epsilon} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{3,3} \cdot C_{3,3}} \quad (4.7)$$

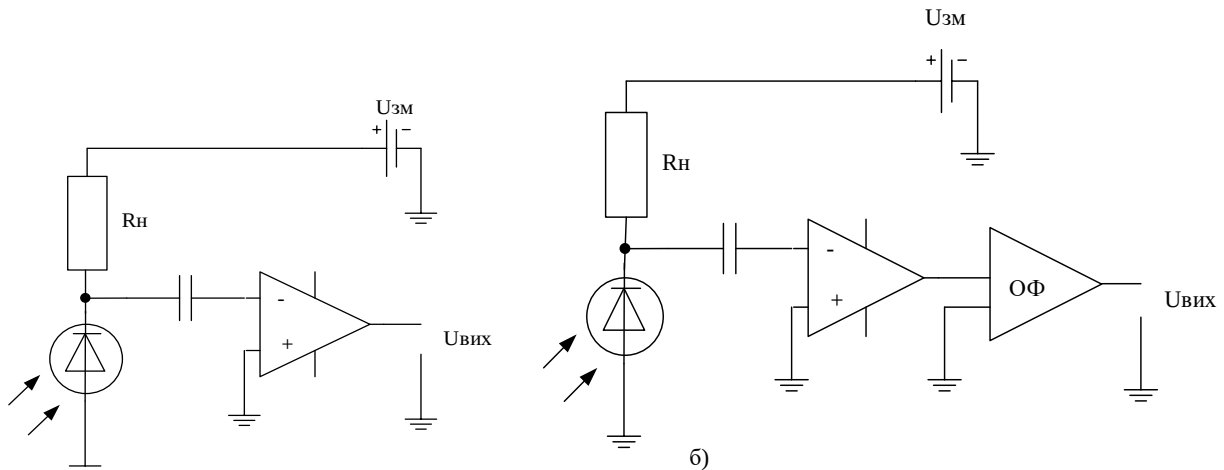


Рисунок 4.6 – Функціональні схеми ФПП з фотодіодами для прийому: а) синусоїдального модульованого сигналу; б) імпульсного сигналу із оптимальним фільтром (ОФ)

Застосовують також схеми з операційними підсилювачами, охопленими від'ємним зворотнім зв'язком по напрузі рис.4.7.

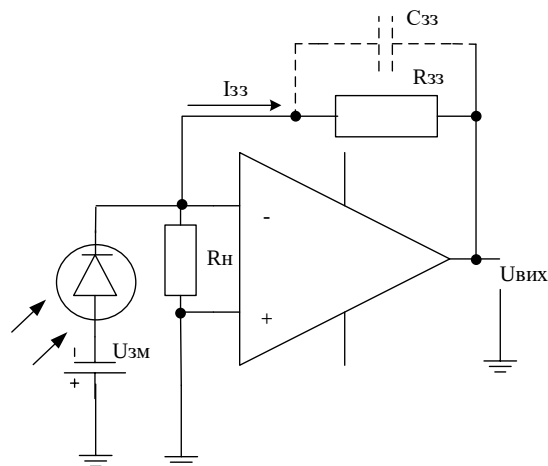


Рисунок 4.7 – Функціональна схема ФПП з фотодіодом, включеним на вході ОП

При великому коефіцієнті підсилення напруга сигналу на виході підсилювача:

$$U_{вих} = S_I \cdot R_{3,3} \cdot \Phi \quad (4.8)$$

Фотоприймальний пристрій на основі ОП має великий динамічний діапазон у порівнянні з ФПП на основі підсилювача з великим вхідним опором, у якого використовується ланцюг корекції для зменшення:

$$\tau_{OP} = R_{ex} \cdot C_{ex}, \quad (4.9)$$

В якості коректувального ланцюга може бути використано, наприклад, диференційний ланцюг, який має великий коефіцієнт передачі на високих частотах і малий коефіцієнт передачі на низьких частотах

Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{ex} = \frac{R_{3.3}}{K_0}, \quad (4.10)$$

де $R_{3.3}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку

Вхідний опір операційного підсилювача при замкнутому зворотному зв'язку є навантаженням фотодіода. При $K_0 = 10^4 \dots 10^5$ цей опір зазвичай не перевищує значення порядку десятків Ом. Використання низькоомного навантаження дозволяє збільшити швидкодію ФПП, оскільки в цьому випадку виключається вплив власної ємності фотодіода. Зменшення навантаження фотодіода також дозволяє зменшити нелінійність енергетичної характеристики всього ФПП.

Перевагами такої схеми ФПП є відсутність необхідності стабілізації коефіцієнта підсилення операційного підсилювача.

Вольтова чутливість ФПП:

- при прийомі постійного потоку випромінювання: $S_U = S_I \cdot R_{3.3}$.
- при прийомі синусоїдального модульованого потоку випромінювання:

$$S_U = \frac{S_I \cdot R_{3.3}}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_m)^2 \cdot R_{3.3}^2 \cdot C_{3.3}^2}}, \quad (4.11)$$

де f_m - частота модуляції потоку випромінювання;

$C_{3.3}$ - ємність в ланцюгу зворотного зв'язку.

Середнє квадратична напруга шуму на виході ФПП визначається за формулою:

$$U_{ш.вих.ФПП} = K_{ФПП} \cdot \sqrt{\overline{U_{ш.ОП}}^2 + (\bar{i}_{ш.ОП}^2 + \bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.3.3}^2) \cdot R_{3.3}^2}, \quad (4.12)$$

де $K_{ФПП}$ - коефіцієнт підсилення по напрузі ФПП;

$\bar{U}_{ш.ОП}$ - середнє – квадратична напруга шуму підсилювача;

$\bar{i}_{ш.ОП}, \bar{i}_{ш.ФД}, \bar{i}_{ш.з.з}$ - середнє квадратичне значення шумових струмів відповідно підсилювача, фотодіода, опору зворотного зв'язку.

Для сучасних ОП спектральні щільності середніх квадратичних значень шумового струму і напруги складають відповідно:

$$\bar{i}_{ш.ОП.f} = (1...2) \cdot 10^{-14} \text{ А} \cdot \Gamma_{\mathcal{U}}^{0,5}, \bar{U}_{ш.ОП.f} = (1...7) \cdot 10^{-8} \text{ В} \cdot \Gamma_{\mathcal{U}}^{0,5}. \quad (4.13)$$

Середнє квадратичне значення шумового струму фотодіода:

- в фотодіодному режимі:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_T \cdot \Delta f}, \quad (4.14)$$

де I_T - темновий струм фотодіода; Δf - ефективні смуга пропускання.

- при фотогальванічному режимі роботи:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{\delta}}}, \quad (4.15)$$

де R_{δ} - динамічний опір незміщеного р-п - переходу

Середнє квадратичне значення шумового струму опору в ланцюгу зворотного зв'язку:

$$\bar{i}_{ш.з.з} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{з.з.}}}. \quad (4.16)$$

На спектральну щільність шуму фотодіода суттєвий вплив виявляє ємність р-п переходу. Вибір операційного підсилювача з мінімально можливими значенням вхідної ємності дозволяє зменшити залежність шуму від ємності фотодіода.

При використанні малошумних операційних підсилювачів домінуючими стають шуми фотодіода і резистора зворотного зв'язку. Тоді середнє квадратичне значення вихідного шуму:

$$\bar{U}_{ш.вих.ФПП} = K_{ФПП} \cdot \sqrt{(\bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2) \cdot R_{з.з.}^2}. \quad (4.17)$$

Відношення сигнал/шум в цьому випадку:

$$\left(\frac{U_c}{\bar{U}_{ш}} \right)_{вих} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{(\bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2)}}. \quad (4.18)$$

У випадку роботи фотодіода в фотогальванічному режимі опір зворотного зв'язку вибирають більшим, ніж еквівалентний опір незміщеного р-п – переходу,

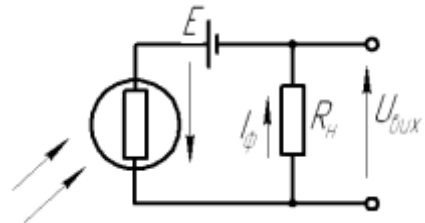
тобто $R_{з.з.} > R_0$. Тому значення $i_{ш.ФД}$ набагато більше середнє квадратичного значення теплового шуму в навантаженні $\bar{i}_{ш.з.з.}$, і вираз для співвідношення сигнал/шум набуває вигляд:

$$\left(\frac{U_c}{U_{ш}} \right)_{вих} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_0}}} \quad (4.19)$$

3. Виконання роботи

Завдання 3.1

Визначити первинний фотострум провідності для елемента ФСК-2, що підключений за схемою.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5
тип фоторезистора	ФСК-2	ФСК-3	СФ2-1	СФ2-2	ФПФ7-7	ФСД-1
U_p, B	50 В	вибрати із будь-яких довідників				
$R_T, МОм$	3,3					
$I_T, мкА$	40					
$\frac{R_T}{R_c}$	10					

Рішення

1. Якщо фоторезистор знаходиться в темноті, то через нього протікає темновий струм:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_n}, \quad (4.20)$$

де E – Е.Р.С. джерела живлення;

R_T - величина електричного опору фоторезистора в темному середовищі, яка називається темновим струмом;

R_n - опір навантаження.

Із даної формули визначаємо необхідний опір навантаження:

$$R_n = \frac{I_T \cdot R_T - E}{I_T} = 2,06 \cdot 10^6 \text{ Ом} .$$

2. При освітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на перехід електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар

збільшується, опір фоторезистора зменшується і через нього протікає світловий струм:

$$I_c = \frac{E}{R_c + R_n}. \quad (4.21)$$

При цьому світловий опір визначаємо із співвідношення $\frac{R_T}{R_c} = 10 \Rightarrow R_c = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, тоді $I_c = \frac{E}{R_c + R_n} = 2,101 \cdot 10^{-5} \text{ А}$.

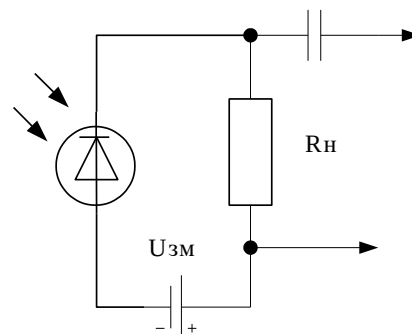
Різниця між світловим і темновим струмом дає значення струму I_ϕ , який отримав назву первинного фотоструму провідності:

$$I_\phi = I_c - I_T = 1,899 \cdot 10^{-5} \text{ А}. \quad (4.22)$$

Коли променевий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційний і змінюється прямо пропорційно величині променевого потоку, який падає на фоторезистор. По мірі збільшення величини променевого потоку збільшується кількість електронів провідності. Рухаючись всередині речовини, електрони стикаються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, які отримали назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення кількості іонізованих атомів загальмовує рух електронів провідності. В результаті цього зміна фотоструму затримується в часу відносно зміни світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

Завдання 3.2

Визначити максимальний опір навантаження та вольтову чутливість для приймача ФДК-24К, що включений за схемою при $\Phi_{\max} = 12 \text{ мВт}$



Варіант	приклад	1	2	3	4	5
тип фотодіоду	ФДК-24К	ФДК-1	ФД-3К	ФД-6К	ФД-7К	ФД-20КП
$U_p, \text{В}$	27	необхідні параметри вибирати із довідника				
$I_T, \text{мкА}$	2,5					
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$	6					
$\Phi_{\max}, \text{мВт}$	12					

Рішення

1. Максимальний опір навантаження визначаємо за формулою:

$$R_{n\max} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{\max} + I_0},$$

де $U_{зм}$ – робоча напруга живлення фотодіода (напруга зміщення);

S_I – струмова чутливість;

I_0 – темновий струм через р – n – перехід.

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 6 \frac{мА}{лм}$

дається в фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати

застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{\max} = 680 \frac{лм}{Вт}$.

Отримаємо потік в світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць:

$$V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 8,16 \text{ лм}.$$

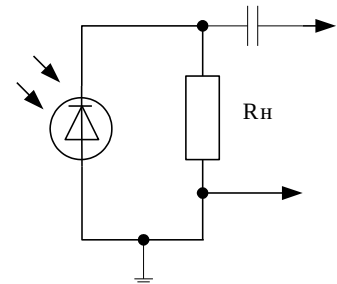
$$\text{Тоді } R_{n\max} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{\max} + I_0} = \frac{27}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,16 + 2,5 \cdot 10^{-6}} = 551,4 \text{ Ом}.$$

2. Максимальна вольтова чутливість в цьому випадку:

$$S_{U\max} = \frac{U_{зм}}{\Phi_{\max} + \frac{I_0}{S_I}} = 3,309 \text{ В/лм}.$$

Завдання 3.3

Визначити максимальний опір навантаження та вольтову чутливість для приймача ФД-1 при $\Phi_{\max}=20$ мВт, що включений за схемою



Варіант	приклад	1	2	3	4	5
тип фотодіоду	ФД-1					
$U_p, В$	20	необхідні параметри вибирати із довідника				
$I_T, мкА$	30					
$S_I, \frac{мА}{лм}$	6					
$\Phi_{\max}, мВт$	20					

Рішення

1. При фотогальванічному режимі роботи фотодіодів максимальний опір навантаження по постійному струму, що забезпечує лінійність енергетичної характеристики, визначають за формулою:

$$R_{н\max} = \frac{0.2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{F\max}},$$

де $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постійна Больцмана;
 T – абсолютна температура фотодіода, К;
 e – заряд електрона.

Щоб скористатися цією формулою необхідно визначити максимальний фотострум: $I_{F\max} = S_I \cdot F$.

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$ дається в фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{\max} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$.

Отримаємо потік в світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць:

$$V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 13,6 \text{ лм}.$$

$$\text{Тоді } R_{н\max} = \frac{0.2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{F\max}} = 0,062 \text{ Ом}.$$

Оскільки відношення $\frac{I_F}{I_0} = 2,72 \cdot 10^3$, то з похибкою не більше 3-4 % опір навантаження можна визначити за формулою:

$$R_n = \frac{0.88 \cdot A \cdot k \cdot T}{e \cdot I_0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right)}{\frac{I_F}{I_0}} = 2,153 \text{ Ом}.$$

2. Максимальна вольтова чутливість при цьому:

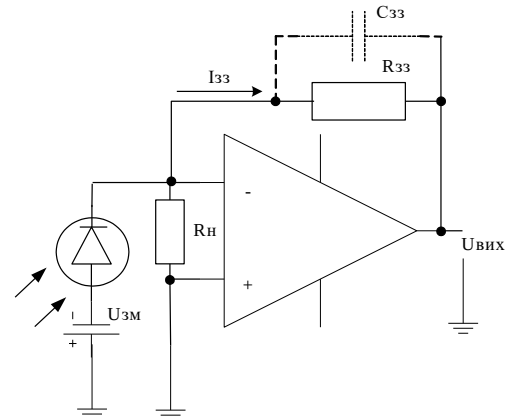
$$S_{U\max} = \frac{S_I \cdot k \cdot T / e \cdot I_0}{1 + k \cdot T / e \cdot I_0 \cdot Z_n} = 0,013 \text{ В/лм},$$

де Z_n - повний опір навантаження.

Проте необхідно врахувати, що оскільки опір р-п переходу залежить від I_F оптимальний опір навантаження в умовах сильної зміни фотоструму підібрати неможливо.

Завдання 3.4

Визначити напругу на виході підсилювача, вольтову чутливість при прийомі синусоїдально – модульованого потоку випромінювання з частотою модуляції f_m , $C_{зз}$ та $\Phi_{\max}$.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5
тип фотодіоду	ФД-8к					
підсилювач	K140УД1А $K = 0,5 \cdot 10^3$, $R_{\text{вх}} = 4 \text{ кОм}$					
U_p, B	20	необхідні параметри вибирати із довідника				
$I_T, \text{мкА}$	30					
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$	8					
$\Phi_{\max}, \text{мВт}$	20					
$C_{зз}, \text{нФ}$	1					
$f_m, \text{Гц}$	10					

Рішення

1. При великому коефіцієнті підсилення напруга сигналу на виході підсилювача:

$$U_{\text{вих}} = S_I \cdot R_{з.з} \cdot \Phi.$$

Для цього необхідно визначити опір зворотного зв'язку. Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{з.з}}{K_0} \Rightarrow R_{з.з} = R_{\text{вх}} \cdot K_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом},$$

де $R_{з.з}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку.

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 8 \frac{мА}{лм}$ дається в фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{max} = 680 \frac{лм}{Вт}$.

Отримаємо потік в світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць:
 $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 13,6 лм$.

Тоді $U_{вих} = S_I \cdot R_{з.з.} \cdot \Phi = 0,218 В$.

2. При прийомі синусоїдального модульованого потоку випромінювання вольтова чутливість визначається за формулою:

$$S_U = \frac{S_I \cdot R_{з.з.}}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_m)^2 \cdot R_{з.з.}^2 \cdot C_{з.з.}^2}} = 0,016 \frac{В}{лм},$$

де f_m - частота модуляції потоку випромінювання;

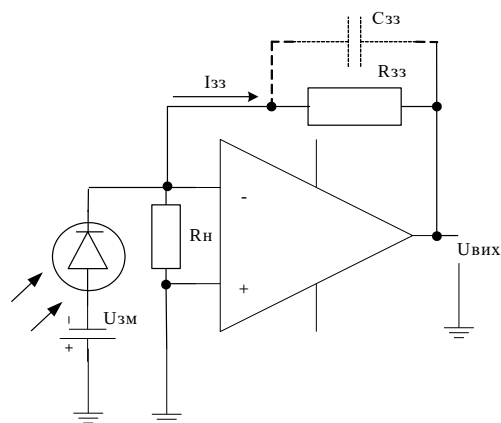
$C_{з.з.}$ - ємність в ланцюгу зворотного зв'язку.

3. Частотна характеристика ОП із зворотним зв'язком визначається опором $R_{з.з.}$ і досить малою ємністю $C_{з.з.}$ ланцюга зворотного зв'язку, і верхня частота частотної характеристики визначається за формулою:

$$f_v = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{з.з.} \cdot C_{з.з.}} = 79,577 Гц.$$

Завдання 3.5

Визначити співвідношення сигнал/шум на виході підсилювача при $\Phi_{max} = 37 мВт$ для смуги пропускання $\Delta f = 100 МГц$.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5
тип фотодіоду	ФД-8к					
підсилювач	К140УД1А $K = 0,5 \cdot 10^3$, $R_{ax} = 4 кОм$					
$U_p, В$	10	необхідні параметри вибирати із довідника				
$I_T, мкА$	0,005					

$S_I, \text{мА/лм}$	8	
$\Phi_{\text{max}}, \text{мВт}$	37	
$\Delta f, \text{МГц}$	100	

Рішення

1. При використанні малошумливих операційних підсилювачів домінуючими стають шуми фотодіода і резистора зворотного зв'язку. Відношення сигнал/шум в цьому випадку:

$$\left(\frac{U_c}{\overline{U}_{ш}} \right)_{\text{вих}} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{(i_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з.}^2)}}.$$

2. Середнє квадратичне значення шумового струму опору в ланцюгу зворотного зв'язку:

$$\bar{i}_{ш.з.з.} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{з.з.}}} = 8.99 \cdot 10^{-10} \text{ А}.$$

Для цього необхідно визначити опір зворотного зв'язку. Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{з.з.}}{K_0} \Rightarrow R_{з.з.} = R_{\text{вх}} \cdot K_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом},$$

де $R_{з.з.}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку

3. Середнє квадратичне значення шумового струму фотодіода:

- в фотодіодному режимі:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_T \cdot \Delta f} = 4,002 \cdot 10^{-10} \text{ А},$$

де I_T - темновий струм фотодіода; Δf - ефективні смуга пропускання.

Підставляємо отримані значення в формулу:

$$\left(\frac{U_c}{\overline{U}_{ш}} \right)_{\text{вих}} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{(i_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з.}^2)}} = 204,4.$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Приймачі оптичного випромінювання. Основні принципи побудови та класифікація.
2. Фоторезистори, принцип дії, електричні та спектральні характеристики.
3. Фотодіоди, принцип дії, конструкції, швидкодія, шуми та інші характеристики.
4. Фотодіоди з р-і-n структурою, діоди Шоттки, лавинні фотодіоди та фотодіоди з гетероструктурою. Співставлення параметрів фотодіодів стосовно застосування їх в спеціальних системах.
5. Фототранзистори, принцип дії, устрій, складені фототранзистори, характеристики.
6. Приймачі оптичного випромінювання із внутрішнім інтегруванням сигналу.
7. Гібридні структури на основі фотонних приймачів та монолітні структури.
8. Якою формулою описується радіаційний шум приймача випромінювання.
9. Якою формулою описується струмовий шум приймача випромінювання.
10. Якою формулою описується тепловий шум приймача випромінювання.
11. Якою формулою описується дисперсія напруги радіаційного шуму на виході приймача.
12. Для оптопари АОР124А визначити: вхідну напругу; максимальний вихідний струм; максимальну напругу ізоляції; вихідний світловий опір та вихідний темновий опір.
13. Для оптопари АОД107А визначити: вхідну напругу при $I_{vx}=10$ мА; максимальний вхідний струм; максимальну вхідну зворотну напругу; вихідний зворотний струм; статичний коефіцієнт передачі.
14. Для оптопари АОТ110А визначити: вхідну напругу при $I_{vx}=25$ мА; вихідну залишкову напругу; струм витікання на виході; максимальний вхідний струм; максимальну вхідну зворотну напругу; максимальний вихідний струм.
15. Для оптоелектронного МОП-реле КР293КП1А визначити: напругу комутації; струм комутації; опір у відкритому стані; робочий вхідний струм; вихідну ємність; напругу ізоляції.
16. Зобразити схематично двох спрямоване реле з однією парою нормально замкнутих контактів.
17. Зобразити схематично реле постійного струму із двома парами контактів.

Література

1. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. И доп. /Ю.Б.Парвулюсов, С.А.Родионов, В.П.Солдатов и др.; Под ред. Ю.Г.Якушенкова. – М.: логос, 2000. -488 с.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник. Для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: логос, 1999. -480 с.
3. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. Источники и приемники излучения. Пособие по решению задач. - СПб: ИТМО, 2006. -85 с.
4. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. Источники и приемники излучения. Методические указания к лабораторным работам. - СПб: ИТМО, 2000. - 124 с.
5. Ишанин Г.Г., Коняхин И.А., Мусяков В.Л. Сборник задач по курсу «Источники и приемники излучения». - СПб: ИТМО, 1998. - 66 с.
6. Г.Г.Ишанин, М.Г.Козлов, К.А.Томский Основы светотехники: Учеб.пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подгот.653700 – Приборостроение (спец. 190100 Приборостроение) и Оптотехника (спец. 190700 – Оптоэлектрон. Приборы и системы) / Г.Г. Ишанин, М.Г.Козлов, К.А. Томский; М-во образования Рос. Федерации, Санкт-Перерб. Гос ун-т кино и телевидени. –СПб.: Береста, 2004. – 2004. – 292 с.
7. ДСТУ ІЕС 60747-1:2009 Прилади напівпровідникові. Частина 1. Загальні положення (ІЕС 60747-1:2006, IDT).
8. ДСТУ 2683-94 Прилади напівпровідникові фотоелектронні. Терміни та визначення.
9. ДСТУ ІЕС 60747-10:2015 (ІЕС 60747-10:1991, IDT) Прилади напівпровідникові. Дискретні прилади та інтегральні схеми. Частина 10. Загальні технічні умови на дискретні прилади та інтегральні схеми.

Практичне заняття №5

ОФОРМЛЕННЯ КРЕСЛЕНЬ ТИПОВИХ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Мета роботи:

1. Ознайомитися із вимогами до матеріалів оптичних деталей та нормованими показниками якості оптичного скла;
2. Навчитися оформлювати таблиці якісних характеристик різноманітних оптичних деталей;
3. Навчитися оформлювати креслення типових оптичних деталей: лінзи, призми, дзеркала.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Характеристики матеріалів оптичних деталей.
2. Властивості та показники якості матеріалів, що використовуються для виготовлення оптичних деталей.
3. Оптичні характеристики матеріалів і нормовані показники якості оптичного скла.
4. Умовні позначення, що застосовуються на кресленнях і схемах оптичних деталей.
5. Технологічні основи проектування оптичних деталей і вузлів. Критерії технологічності.

2. Теоретичні відомості

2.1 Основні технологічні вимоги при конструюванні оптичних деталей

При конструюванні оптичних деталей необхідно враховувати наступні технологічні умови:

1. Конфігурація деталі повинна представляти собою поєднання простих геометричних форм, що дає можливість використання високопродуктивних технологічних методів обробки.

Деталь повинна мати зручну та надійну базу для встановлення та закріплення її в процесі обробки, достатньо жорстку конструкцію. В тих випадках якщо деталь не відповідає цим вимогам, необхідно передбачити спеціальні елементи (технологічні отвори, приливи, фаски), які будуть видалені після обробки.

Робочі поверхні деталей повинні мати правильну геометричну форму, що дозволить отримати задану точність обробки.

Геометричні розміри і розмірні ланцюги деталі повинні бути проставлені раціонально з урахуванням можливості використання конструкторських баз в якості технологічних та вимірювальних.

2. Вид, властивості та якість матеріалу повинна відповідати заданим параметрам деталі або вузла.

3. Вимоги до якості поверхні деталі (точність форми N , ΔN , параметри шорсткості, чистота P) повинні бути обґрунтовані її призначенням і узгоджені з нормованими показниками якості матеріалу: подвійним променезаломленням, безсвільністю та пузирністю, полікристалічністю, поліморфізмом, сторонніми вкрапленнями. Ці вимоги повинні бути узгоджені з фізико-хімічними властивостями матеріалу: відносною твердістю за зшліфуванням, хімічною стійкістю та анізотропією.

4. Вид поверхні і форма її задання (вид рівняння асферичної поверхні, координати точок) повинні бути узгоджені з можливою технологією виготовлення і контролю.

5. Точність взаємного розташування поверхонь (децентровка C , клиноподібність θ , пірамідальність π , відхилення кутів δ_{45°) повинна бути обґрунтована призначенням деталі.

6. Вихідні параметри: дозвільна здатність ϵ , допустимий дифракційний кружок $2du$, викривлення хвильового фронту K , мінімальна фокусність $f_{\min}$, кут відхилення променя ω та інші. – повинні бути обґрунтовані призначенням деталі і узгоджені із заданими показниками якості матеріалу – оптичними параметрами n_e , $n_F - n_C$, однорідністю, подвійним променезаломленням, безсвільністю, пузирністю.

Таблиця 5.1 - Умовні позначення, що застосовуються на кресленнях і схемах

<i>Позначення фізичних величин</i>	
Показники заломлення для ліній C' , F' , e	$n_{C'}, n_{F'}, n_e$
Середня дисперсія	$n_{F'} - n_{C'}$
Коефіцієнт дисперсії	ν_e
Довжина хвилі, що відповідає границі пропускання по спектру	λ_{np}
Довжина хвилі, що відповідає максимуму пропускання по спектру	$\lambda_{\max}$
Дозвільна границя в кутових секундах	ϵ
<i>Позначення елементів оптичних деталей</i>	
Світлова зона	Св.
Світловий діаметр	$Св.\varnothing$
Довжина ходу променю (геометрична)	l
<i>Позначення граничних відхилень</i>	
Граничне відхилення показника заломлення	Δn_e
Граничне відхилення середньої дисперсії	$\Delta(n_{F'} - n_{C'})$
Граничне відхилення стрілки кривизни поверхні деталі від стрілки кривизни поверхні пробного скла, виражене числом інтерференційних кілець або смуг, або допустима сферичність плоскої поверхні в тому ж вимірюванні	N
Граничне відхилення форми поверхні від сфери або площини, виражене числом інтерференційних кілець або смуг (місцеві похибки)	ΔN
Найменша допустима фокусна відстань пластинок або призм, як результат сферичності їх поверхонь, мм	$f_{\min}$
Допустима децентровка кожної поверхні (для лінз), мм	c

Гранична клиновидність пластинки (в хвилинах або секундах) або різнотовщинність, мм	θ
Гранична пірамідальність призми (в хвилинах або секундах)	π
Гранична різниця рівних по номіналу кутів призми (з цифровим індексом кута призми, наприклад δ_{45°)	δ
Клас чистоти полірованих поверхонь	P
Клас точності пробного скла, або граничне відхилення від значення розрахункового радіусу поверхні у відсотках	ΔR

2.2 Вимоги до оформлення креслень оптичних деталей

При зображенні оптичної деталі використовують загальні правила машинобудівного та приладобудівного креслення, проте специфіка призначення і виготовлення оптичних деталей вимагає додаткових відомостей, а також особливі нормативні та технологічні вимоги.

Розглянемо основні вимоги та рекомендації щодо оформлення робочих креслень типових оптичних деталей.

1. *Оптичні деталі (схеми та вузли) необхідно зображати на кресленні по ходу променя, що йде зліва направо.*

2. *При виконанні креслень і схем оптичних виробів застосовують позначення основних величин:*

- Фізичної оптики за ДСТУ 2755-94 Фізична оптика. Терміни, визначення та літерні позначення основних величин
- Основних величин геометричної оптики – за ДСТУ 2756-94 Геометрична оптика. Терміни, визначення та літерні позначення основних величин)
- Елементів оптичних деталей, граничних відхилень фізичних величин та допустимої неточності виготовлення оптичних деталей;
- Шорсткості поверхні;
- Спеціального оптичного покриття, класів чистоти полірованих поверхонь

3. *На кресленнях поверхні оптичної деталі позначають прописними літерами російського алфавіту, які наносять на полчках ліній-виносок.*

Поверхні, до яких пред'являють однакові вимоги по точності і якості виготовлення, допускається позначати однією і тією ж буквою.

4. *В правій верхній частині креслення оптичної деталі розміщують таблицю, що складається із трьох частин рис.5.1:*

- В першій частині відображають вимоги до матеріалу, із якого виготовлена оптична деталь;

- В другій частині – вимоги до виготовлення безпосередньо оптичної деталі;
- В третій частині – її розрахункові параметри.



Рисунок 5.1 - Форма таблиці якісних характеристик оптичної деталі та складальної одиниці

Вимоги до матеріалу деталі
(перша частина таблиці):

Безкольорове оптичне скло [3, стр.47 рис.2.1, 2.2]

- Категорія і клас за номінальним показником заломлення - Δn_e (табл.Б1);
- Категорія і клас по номінальній середній дисперсії $\Delta(n_F' - n_C')$ (табл.Б2);
- Категорія по оптичній однорідності – **однородн.** (табл.Б3);
- Категорія по подвійному променезаломленню – **дв.лучепр.** (табл.Б4);
- Категорія по показнику ослаблення ε_λ - **ослабл.** (табл.Б5);
- Категорія і клас безсвільності – **бессвильн.** (табл.Б6);
- Категорія і клас пузирності – **пузырность** (табл.Б7).

**Призначення допусків на всі вищеперераховані параметри виконуються в залежності від призначення деталі в приладі (об'єктив, окуляр, призма та інші) табл.Б8*

Кольорове оптичне скло [3, стр.55 рис.2.10]

- Категорія по допустимому відхиленню параметрів спектральної кривої показника ослаблення або поглинання K_λ , від значень встановлених для скла кожної марки
 - Категорія по подвійному променезаломленню – **дв.лучепр.** (табл.Б9);
 - Категорія і клас безсвільності – **бессвильн.** (табл.Б9);
 - Категорія і клас пузирності – **пузырность** (табл.Б9).
- *Призначення допусків на всі вищеперераховані параметри виконуються в залежності від їх функціональної задачі, місцезнаходження в системі, перетину пучка, в якому розміщений світлофільтр, умов експлуатації.табл.Б9*

Кварцеве оптичне скло [3]

- Інтегральне пропускання в видимій області спектру (для КВ КВ-Р)
- Пропускання в ІЧ області спектру (для КИ)
- Люмінісценція та пропускання в УФ області спектру (для КУ-1 та КУ-2) (табл.Б11)
- Спектральний показник ослаблення або поглинання
- Радіаційно-оптичну стійкість (для КВ-Р)
- Оптичну однорідність (табл.Б12)
- подвійне променезаломленню – **дв.лучепр.**(табл.Б13)
- Безсвільність та мілкодисперсні неоднорідності – **бессвильн.** (табл.Б15)
- Пузирність – **пузырность** (табл.Б14)
- Включення (табл.Б16)

Полімери [3, стр.52 рис.2.7]

- Показник заломлення
- Оптична однорідність
- Показник ослаблення
- Степінь забруднення сторонніми включеннями

За пропусканням в УФ області спектру встановлюються 4 категорії, які характеризуються показником поглинання при довжинах хвиль 170, 215 240 нм та дві категорії – на ділянці спектру 2600-2800 нм.

Стійкість до дії гама-радіації характеризується величиною $k_{\lambda, \text{см}^{-1}}$, яка при довжинах хвиль 300 і 540 нм після опромінення дозою 10^6 рад, складає відповідно 0,15 та 0,025 і після опромінення дозою 10^8 рад – не більше 0,2 та 0,050.

По люмінесценції, що збуджується УФ випромінюванням встановлюються дві категорії:

- по категорії 1 – люмінесценція не допускається;
- по категорії 2 – інтенсивність люмінесценції не повинна перевищувати інтенсивності контрольного зразка.

Інтегральне світлопропускання в видимій області спектру, характеризується коефіцієнтом світлопоглинання в шарі 1 см, для скла марок КУ-1, КУ-2 та КИ складає 0,1-0,2%.

За включеннями встановлюють 4 категорії, які характеризуються розміром найбільшого включення, що допускається в заготовці скла, та для заготовки кварцового скла масою більше 1 кг – чотири класи, які характеризуються кількістю включень розміром більше 0,5 мм в 1 кг скла заготовки, що випускаються по категоріям 1-4.

Вимоги до виготовлення деталі
(середня частина таблиці):

Друга частина таблиці містить вимоги до виготовлення деталі, в якій, в залежності від типу оптичної деталі вказують:

Загальну N та місцеву ΔN похибки форми робочої

Величина N – **допуск на загальне відхилення форми** робочої поверхні оптичної деталі від еталону (форми поверхні пробного скла), що виражається числом інтерференційних кілець або смуг, які спостерігаються при накладанні пробного скла на поверхню яка перевіряється.

В промисловому вжитку інтерференційну картину називають **кольором**. Цей параметр визначає точність, з якою буде виконаний радіус кривизни сферичної поверхні або відступ від площинності для плоскої поверхні. Граничне відхилення стрілки кривизни $\Delta h = \left(\frac{\lambda}{2} \right) \cdot N$. На практиці дану похибку називають загальною помилкою.

Величина ΔN – **допуск на місцеве (нерегулярне) відхилення форми** робочої поверхні від еталонної (місцеві помилки), виражається числом інтерференційних смуг або кілець. Допуск на місцеві похибки більш суворий, оскільки вони сильніше впливають на якість зображення, що створюється оптичною системою. В більшості випадків поля допусків N та ΔN симетричні відносно номінального значення. При цьому знаки відхилень («плюс» або «мінус») на кресленні не вказується.

Допуск на форму поверхні вибирають в залежності від призначення на основі статистичних даних табл.Б.19.

По точності радіусів вимірювальних поверхонь пробне скло розділено на три класи. Допустимі відхилення радіусів ΔR та площинності плоского пробного скла від номінальних значень наведені в табл.Б20.

Клас точності пробного скла назначають при розрахунку оптичної системи (розрахунок впливу параметрів на аберації). Він повинен бути узгоджений з допуском відхилення форми поверхні N табл.Б18.

Для деталей освітлювальних систем, конденсорів, колективів, колекторів значення допуску ΔR може бути задано у вигляді граничного відхилення (в %) від номінального значення радіусу, наприклад $\Delta R=0,2; 0,5; 1 \%$.

Клас чистоти полірованої поверхні Р

Клас точності пробного скла ΔR або допустиме відхилення R від заданого значення в відсотках

Допуск на дефекти чистоти полірованих робочих поверхонь оптичних деталей виражають в класах чистоти Р, яким обумовлені розміри і кількість дефектів – подряпин, точок, їх скупчення (до них відносять також розкриті пазирі, сліди недополірування, клею, виколювання).

Вимоги оговорені дванадцятьма класами від I до IXa для поверхонь, віддалених від площини зображення, та ще більш суворим класом Р0 із поділом 0-10, 0-20, 0-40 для поверхонь, розташованих в площинах зображення предмету табл.Б21, Б22.

Достатньо складно не допустити появи подряпин та точок на полірованих оптичних поверхнях. Основними причинами їх утворення є забруднення середовища робочого місця технолога оптика, забруднення порошкоподібних шліфувальних та полірувальних матеріалів, пазирність оптичних матеріалів.

В табл.Б23, Б24 представлені рекомендації по призначенню класу чистоти поверхонь оптичних деталей в залежності від їх виду, призначення та матеріалу.

Допустима клиноподібність пластин θ (плоскопаралельні пластини)

Допустима децентровка с (лінзи та дзеркала із криволінійними поверхнями)

Клиновидність пластин, представляє собою непаралельність плоских поверхонь пластин, вимірюють кутом θ . Клиновидність викликає відхилення візирної осі та поперечний хроматизм (кольоровий ореол). Допуск на θ залежить від допуску на кутовий хроматизм за окуляром та геометричних параметрів оптичної системи. Для деталей працюючих в паралельних пучках світла допуск на клиновидність визначають за формулою 5.1[6 стр.32]:

$$\theta_{don} = \frac{\Delta \delta'_{FC}}{n_{F'} - n_{C'}} \cdot \frac{1}{\Gamma_{носл.}}, \quad (5.1)$$

де $\Delta\delta'_{FC}$ - допустима кутова величина хроматизму за окуляром, викликана
 клиноподібністю даної пластини, приймається $\frac{20''}{D'_p}$;

D'_p - діаметр робочої зіниці (при $d_{вих} > d_{3.2}$, $D'_p = d_{3.2}$; а при $d_{вих} < d_{3.2}$, $D'_p = d_{вих}$;

$d_{3.2}$ - діаметр зіниці ока = 2 мм;

$\frac{1}{\Gamma_{посл.}} = \frac{D'_p}{D_n}$ - відношення діаметрів;

D_n - діаметр робочого отвору поверхні деталі.

Децентровка лінзи викликає зміщення зображення відносно геометричної осі лінзи, поперечний хроматизм, кому, астигматизм. На децентровку лінзи назначають допуск s (мм), який визначається із умови допустимого хвильового хроматизму.

При відсутності вимог до децентровки у відповідній графі таблиці ставиться прочерк. В деяких випадках у відповідній графі робиться знак примітки, а нормування параметрів дається текстом під таблицею [3, стр.48 рис.2.3].

Пірамідальність призми π

Похибка кутів призми δ

Будь-яка відбиваюча призма повинна бути еквівалентна плоскопаралельній пластинці. Якщо ж кути виконані із деякою похибкою, то вона стає подібною до клину і викликає додаткове відхилення променя від розрахункового напрямку і вносить хроматизм [6, стр.37]. Допуски на кути відбиваючої призми зазвичай розраховують, розглядаючи клиновидність її розгортки. Клиноподібність розгортки виражається двома складовими – клиноподібністю θ_y , яка виникає в площині головного перетину призми через похибки кутів, та клиноподібністю θ_x яка виникає в площині, що перпендикулярна головному перетину, через пірамідальність призми π .

Допустима клиноподібність розгортки частіше за все визначається по допустимій кутовій хроматичній різниці $\Delta\delta'_{FC}$ в просторі зображення окуляра (в візуальних приладах), яка для невідповідальних приладів приймається рівною $20''$, а для приладів із високою якістю зображення приймають рівною $\frac{20''}{D'_p}$.

Розрахунок допусків на кути призм виконують, враховуючи тип призми та умови її роботи.

Прямокутна призма AP-90°. Якщо призма працює в паралельних пучках перед телескопічною системою із видимим збільшенням Γ_T , то допуск на

різницю гострих кутів δ_{45° розраховують за формулою 5.2 для хроматизму клину:

$$\delta_{45^\circ} = \frac{\Delta \delta'_{FC}}{(n_{F'} - n_{C'}) \cdot \Gamma_T} \quad (5.2)$$

де $(n_{F'} - n_{C'})$ - середня дисперсія скла, із якого виготовлена призма.

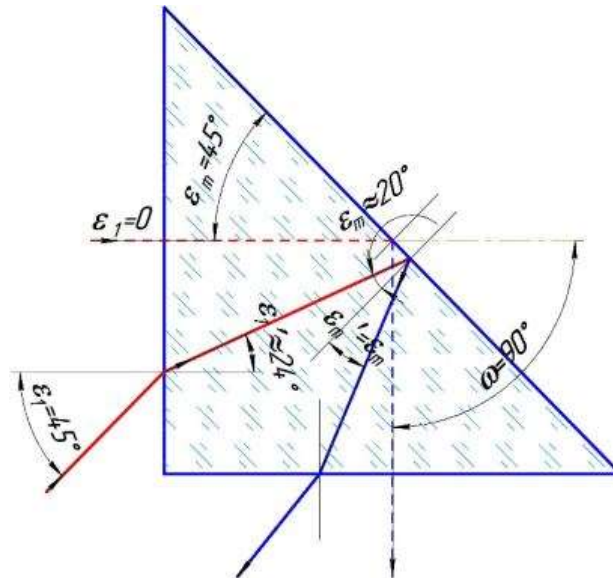


Рисунок 5.2 – Прямокутна призма AP-90°

Допуск на прямий кут $\delta_{90^\circ} = 2 \cdot \delta_{45^\circ}$, проте ця величина не впливає на клиновидність розгортки призми.

Допуск на пірамідальність π , характеризує неперельність ребер робочих граней призми, розраховується за формулою:

$$\pi = \frac{\Delta \delta'_{FC}}{(n_{F'} - n_{C'}) \cdot \Gamma_T \cdot \cos(45^\circ)}$$

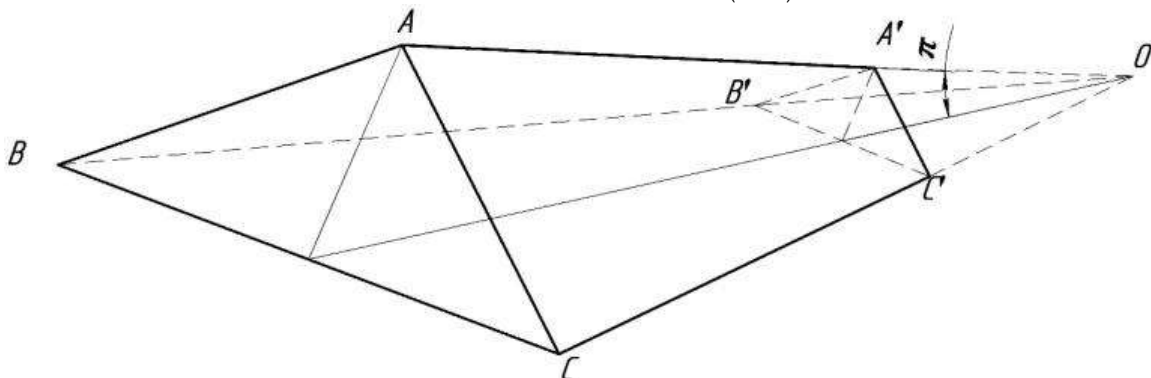


Рисунок 5.3 – Допуск на пірамідальність

Якщо призма працює не в паралельних пучках візуального приладу, наприклад, якщо вона розташована між об'єктивом та окуляром, то допуск на

різницю гострих кутів δ_{45° залежить від повздовжнього положення її вхідної грані і розраховується за формулою 5.3:

$$\delta_{45^\circ} = \frac{\Delta\delta'_{FC} \cdot f'}{(n_{F'} - n_{C'}) \cdot \left(\frac{l}{n} + s'\right)} \quad (5.3)$$

де f' - фокусна відстань оптичної системи, що розташована за призмою;

l – довжина ходу променю в призмі;

n – показник заломлення матеріалу призми;

s' - відстань від вихідної грані призми до площини зображення.

Допуск на пірамідальність такої призми розраховується

$$\pi = \frac{\Delta\delta'_{FC}}{(n_{F'} - n_{C'}) \cdot \left(\frac{l}{n} + s'\right) \cdot \cos(45^\circ)},$$

Панорамічна призма Добе (тобто призма яка має ось повороту. Допуск на різницю гострих кутів δ_{45° розраховується за формулою 5.4:

$$\delta_{45^\circ} = \frac{\Delta\delta'_{FC}}{(n_{F'} - n_{C'}) \cdot \Gamma_T} \cdot Q \quad (5.4)$$

де $\Delta\delta'_{FC}$ - допустима кутова хроматична різниця

Q - коефіцієнт, що враховує вплив кута нахилу вхідної грані до осі пучка.

При куті нахилу вхідної грані 45° визначається за формулою 5.5:

$$Q = \frac{n-1}{\sqrt{2 \cdot n^2 - 1} - 1} \quad (5.5)$$

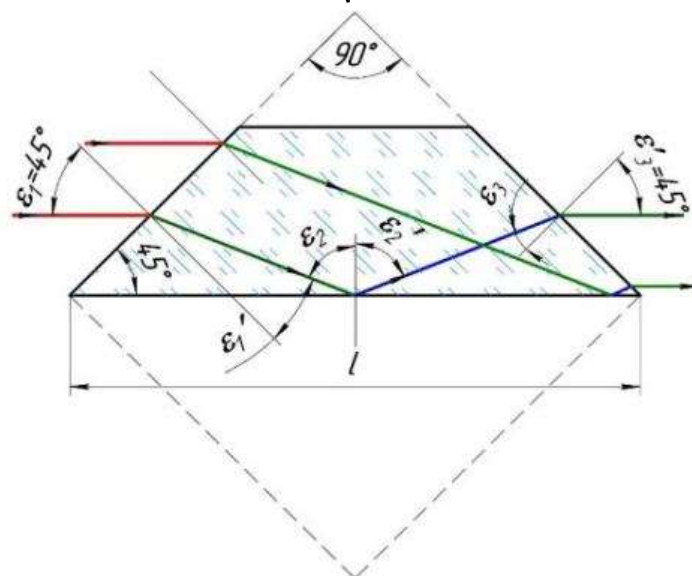


Рисунок 5.4 – Призма Добе

Допуск на пірамідальність призми Добе визначають, виходячи із допустимого кутового відхилення пучка $\Delta\alpha_n$ від осі повороту призми за формулою 5.6:

$$\pi = \frac{\Delta\alpha_n}{n-1} \cdot Q \quad (5.6)$$

де $\Delta\alpha_n$ - кут між віссю обертання призми та відхиленим пучком.

Призма із кришею. Якщо світловий пучок одночасно падає на обидві грані криші, то відхилення кута криші від 90° викликає подвоєння зображення, кутова величина якого в $4 \cdot n$ разів більше похибки кута криші.

Допуск на кут криші призми, встановленої перед телескопічною системою із збільшенням Γ_T визначається за формулою 5.7:

$$\Delta_{k90^\circ} = \frac{\omega}{4 \cdot n \cdot \Gamma_T \cdot \cos(\beta)} \quad (5.7)$$

де ω – допустима кутова величина подвоєння зображення за окуліром телескопічної системи;

β – кут між площиною перпендикулярною до ребра криші та осьовим променем пучка, що падає на кришу (для прямокутної призми $\beta=45^\circ$, для пентапризми та призми Шмідта $\beta=22^\circ30'$).

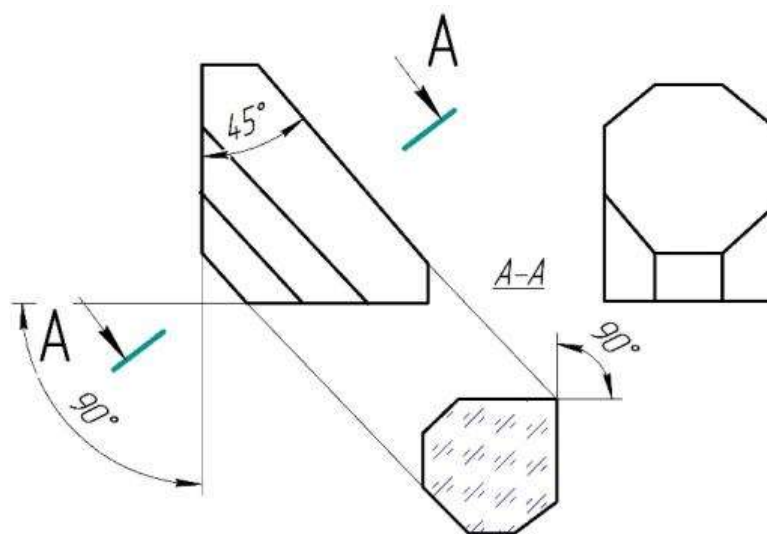


Рисунок 5.5 – Призма із кришею

Якщо призма із кришею встановлюється в пучку візуального приладу що сходиться, то допуск на кут криші визначається за формулою 5.8:

$$\Delta_{k90^\circ} = \frac{\omega \cdot f'}{4 \cdot n \cdot \left(s'_n + \frac{\bar{l}}{n} \right) \cdot \cos(\beta)} \quad (5.8)$$

де ω – допустимий кут подвоєння зображення в просторі зображення візуального приладу (за окуляром);

f' – фокусна відстань системи, що розташована за призмою;

s'_n – відстань від вихідної грані призми до площини зображення;

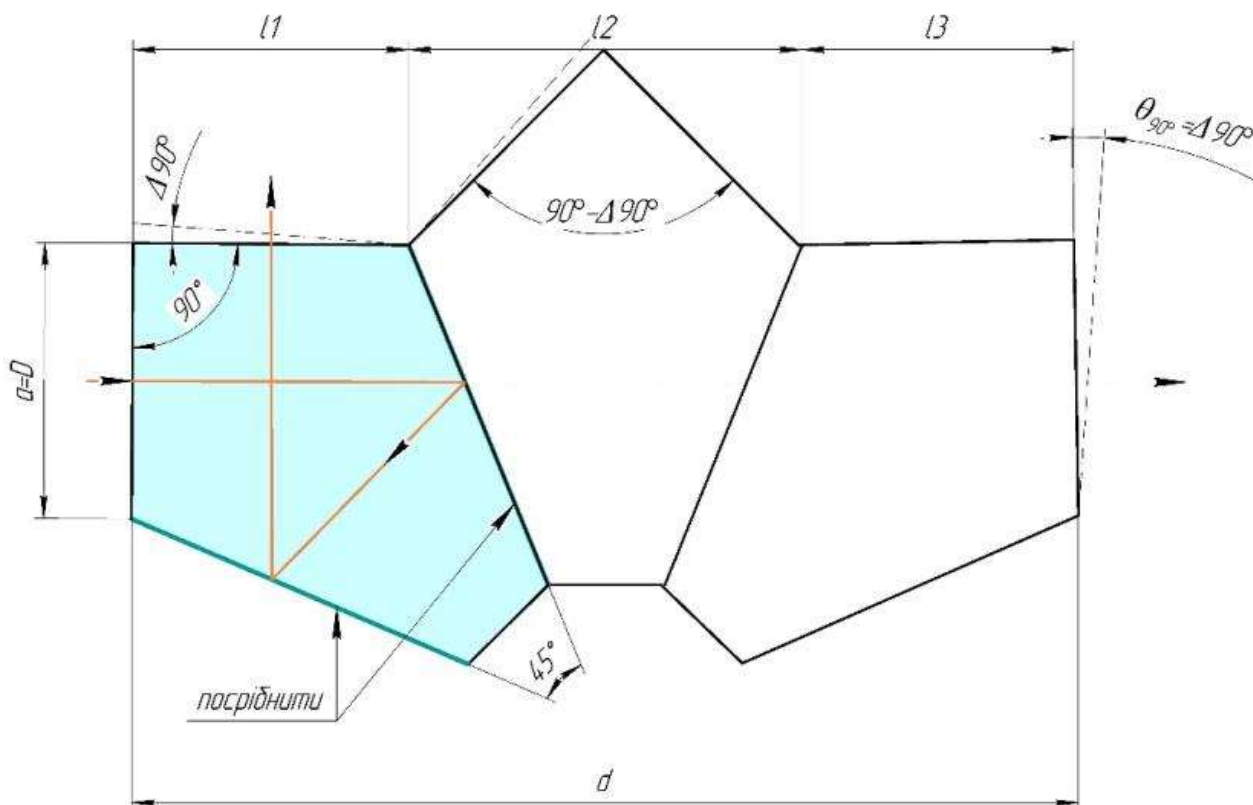
$\bar{l}$ – довжина ходу осьового променя в призмі від точки її перетину з ребром криші до вихідної грані призми;

β – кут між перпендикуляром до грані криші та осьовим променем, падаючим на кришу.

Пентапризма БР-90°. На клиновидність розгортки пентапризми впливають похибки виконання двох кутів $\Delta 90^\circ$ та $\Delta 45^\circ$ рис.5.6.

Із рис.5.6 а видно, що клиновидність θ_{90° , що викликана помилкою кута $\Delta 90^\circ$, чисельно дорівнює самій похибці, тобто $\theta_{90^\circ} = \Delta 90^\circ$. А із рис.5.6 б видно, що клиновидність θ_{45° , що викликана помилкою кута $\Delta 45^\circ$ дорівнює подвоєній величині похибки, тобто $\theta_{45^\circ} = 2 \cdot \Delta 45^\circ$.

$$\Delta 45^\circ = 0, \Delta 90^\circ \neq 0$$



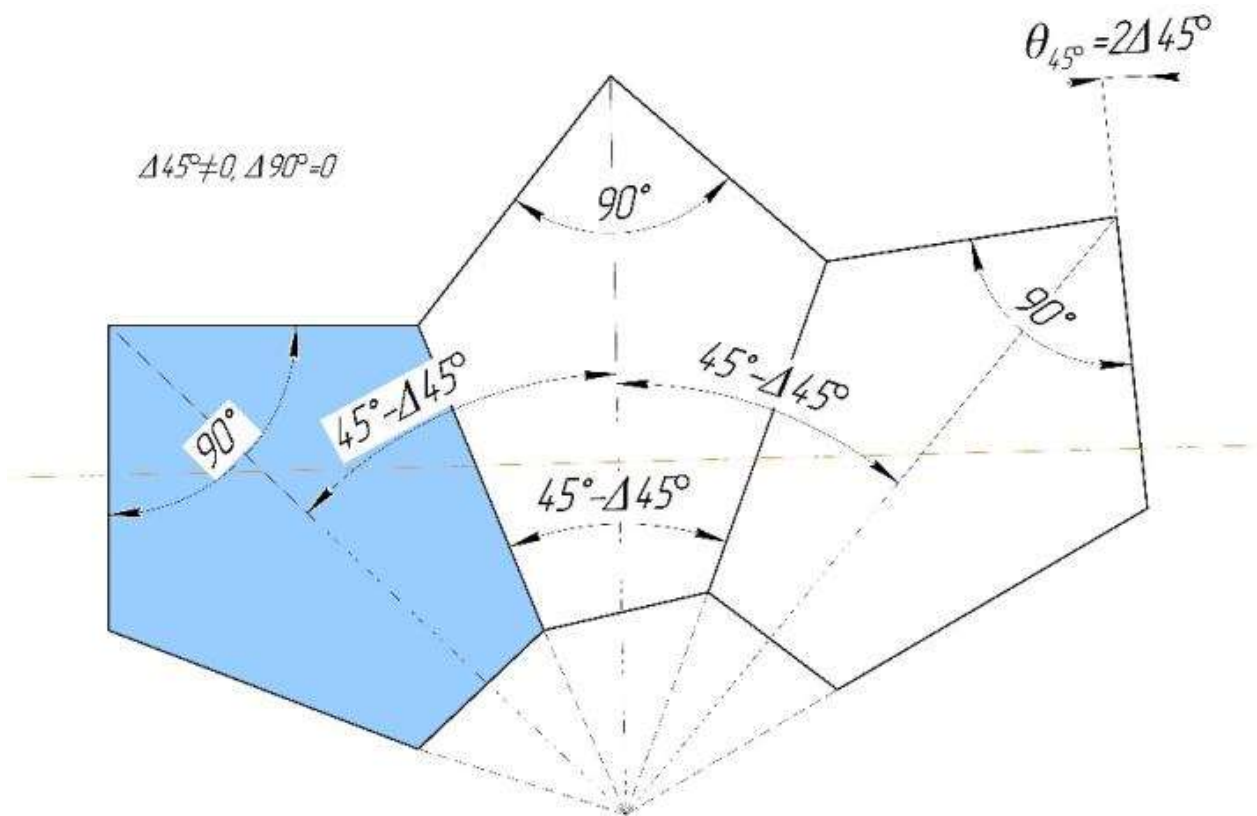


Рисунок 5.6 – Розгортка пентапризми

Таким чином, клиновидність розгортки цієї призми:

$$|\theta| = |\theta_{90^\circ}| + |\theta_{45^\circ}| = |\Delta_{90^\circ}| + 2 \cdot |\Delta_{45^\circ}|$$

Величина допустимої клиновидності θ_{don} визначається 5.9:

$$\theta_{don} = \frac{\Delta \delta'_{FC}}{n_{F'} - n_{C'}} \cdot \frac{1}{\Gamma_T}. \quad (5.9)$$

Граничний кут дозвільної здатності ϵ для відповідальних призм та пластин

Допустима фокусність f_{min} відповідальних деталей, обмежених площинами

При неоднакових значеннях $N, \Delta N, P, C$ для різних поверхонь однієї і тієї ж деталі або різних зон однієї і тієї ж поверхні позначення граничних відхилень дають із літерним індексом, кожне в окремому рядку. Вказані індекси відповідають позначенню поверхні або зони на зображенні деталі.

Розрахункові параметри деталі
(третя частина таблиці):

Опти

- Фокусна відстань f'
- Передній та задній фокальний відрізки S_F, S'_F

*Примітка одну із найбільш важливих подають із граничним відхиленням

- Світловий діаметр $S_{в.д.}$

Оптичні характеристики дзеркал [3, стр.53 рис.2.8]

- Фокусна відстань f'
- Світловий діаметр Св.ø

Оптичні характеристики призм [3, стр.57 рис.2.12-2.13]

- Геометрична довжина ходу променю l
- Світловий діаметр Св.ø (за необхідністю)

5. Зображення деталі

Аналіз зображення деталі проводиться в наступній послідовності:

Орієнтація зображення в полі креслення

Зображення оптичних деталей повинні бути розташовані в полі креслення в робочому положенні за ходом променю, що йде зліва направо [3, стр.50 рис.2.1-2.7].

Кількість проєкцій повинна бути мінімальною, але достатньою для простановки всіх конструктивних параметрів.

В залежності від конструктивних особливостей деталі можуть бути зображені в осьових розрізах та перетинах або без них. Без розрізу, як правило, подають прості позитивні лінзи [3, стр.55 рис.2.1] та призми [3, стр.57 рис.2.12]. З осьовим розрізами виконують більш складні осесиметричні деталі: лінзи із ввігнутими поверхнями, дзеркала із криволінійним поверхнями [3, стр.52 рис.2.7-2.9].

Призми подають в головному перетині або перетині, перпендикулярному до ребра криші [3, стр.55 рис.2.13]. При необхідності показати профіль більш мілкового елемента деталі його виконують у вигляді виноски [3, стр.56 рис.2.11] або на обмеженій ділянці зображення деталі і, як правило, у збільшеному масштабі.

Позначення елемента зображення. Поверхні, до яких пред'являють однакові вимоги, допускається позначати однією і тією ж буквою. Зазвичай в таких випадках позначення поверхонь не проставляють [3, стр.52 рис.2.7, 2.10].

Форма оптичних поверхонь. Вказується вона в залежності від їх кривизни і типу деталі. Числове значення радіусів R сферичних поверхонь лінз і дзеркал проставляється у відповідності із номінальними рядами радіусів за [3, стр.50 рис.2.1-2.9].

Для асферичних поверхонь типу циліндра або тороїда перед знаком R дається її назва, наприклад «Циліндр R101.86» [3, стр.49 рис.2.4]. В інших випадках асферичні поверхні задаються рівнянням, написаним над стрілкою-вказівником до цієї поверхні, а також координатами точок, які зведені в додаткову таблицю [3, стр.50 рис.2.5].

На плоских поверхнях лінз, пластин, клинців, призм $R = \infty$ не вказують [3, стр.55 рис.2.6, 2.8].

Розміри і точність взаємного розташування оптичних поверхонь

Всі розміри (окрім $s, \theta, \pi, \delta_{45^\circ}$, які наводяться в таблиці) проставляються безпосередньо на зображенні деталі. Далі наведені рекомендації з вибору допусків на точність взаємного розташування оптичних поверхонь.

- **Товщина лінзи d по осі.** Передбачається вибір товщин d від'ємних лінз в залежності від їх діаметрів D та точності обробки табл.Б25. Для позитивних лінз товщина по краю вибирається в залежності від їх діаметру табл.Б26.
- **Товщина пластини d .** В залежності від їх призначення і необхідної точності виготовлення d вибирається по відношенню їх товщини до найбільшого розміру l або діаметру пластини табл.Б27.
- **Допуск Δd на товщину лінз d по осі.** Вибирається в залежності від призначення лінзи в приладі та її діаметру табл.Б28.

Товщину і допуск на неї для лінз фотографічних об'єктивів та об'єктивів мікроскопів визначають в процесі розрахунку оптичної системи. Отримані допуски закруглюють до найближчого меншого значення із ряду:

$\pm 0,01; \pm 0,02; \pm 0,03; \pm 0,05; \pm 0,07; \pm 0,1; \pm 0,15; \pm 0,2; \pm 0,3; \pm 0,5; \pm 0,7; \pm 1,0$.

В якості довідникового розміру у всіх лінз вказують товщину t по краю, а для менісків – додатково габаритну товщину d' .

Допуски на товщину плоскопаралельної пластини округлюють у відповідності із вище наведеним рядом.

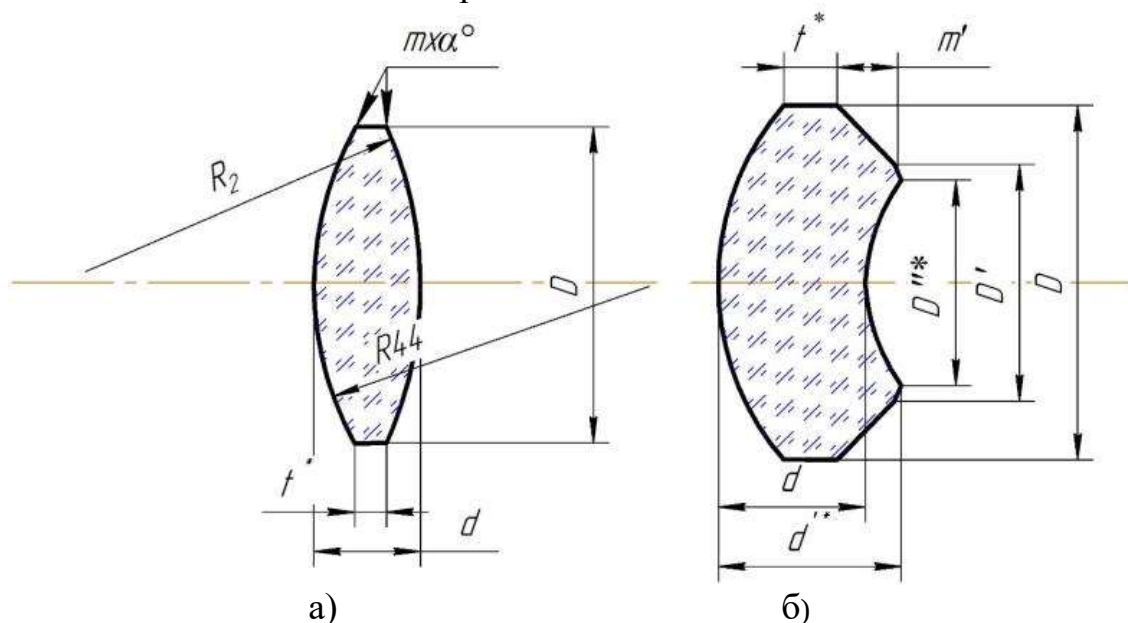


Рисунок 5.7 – Простановка розмірів

Габаритні розміри деталей та точність взаємного розташування неробочих поверхонь

- **Допуски і посадки на діаметри лінз, сіток, світлофільтрів, дзеркал та інших круглих деталей.** Їх вибирають в залежності від точності центрування деталі та умов її з'єднання з оправою, тобто з врахуванням того, чи є деталь центрувальною або нецентрувальною табл.Б29.

В склеєній парі центрувальною вибирається та лінза, що має більшу товщину по краю. Такій лінзі надають і більший діаметр, при цьому центрувальною може бути як позитивна так від'ємна лінза.

- **Допуски на товщину B та розміри a та L прямокутних призм** рис.5.8, зазвичай встановлюють по $h11$, на висоту H – симетричними значеннями в частках міліметра із нормального ряду.

- **Бази.** Позначення баз, точності їх обробки та взаємного розташування за ГОСТ 2308-79 позначають стрілками та символами [3, стр.49 рис.2.4,2.8,2.9].

- **Фаски захисні.** Вони наносяться на гострих краях лінз для усунення виколювання після центрування, для запобігання від висковзування при закріпленні лінз. Ширина фасок t вибирається в залежності від діаметру лінзи. В табл.Б30 наведена рекомендована ширина фасок лінз та заготовок сіток. На кресленні окрім фаски t вказується кут її нахилу α , який вибирається із табл.Б31 в залежності від відношення D/R .

Ширину захисних фасок на ребрах деталей некруглої форми вибирають в залежності від довжини найбільш короткого ребра b деталі табл.Б32.

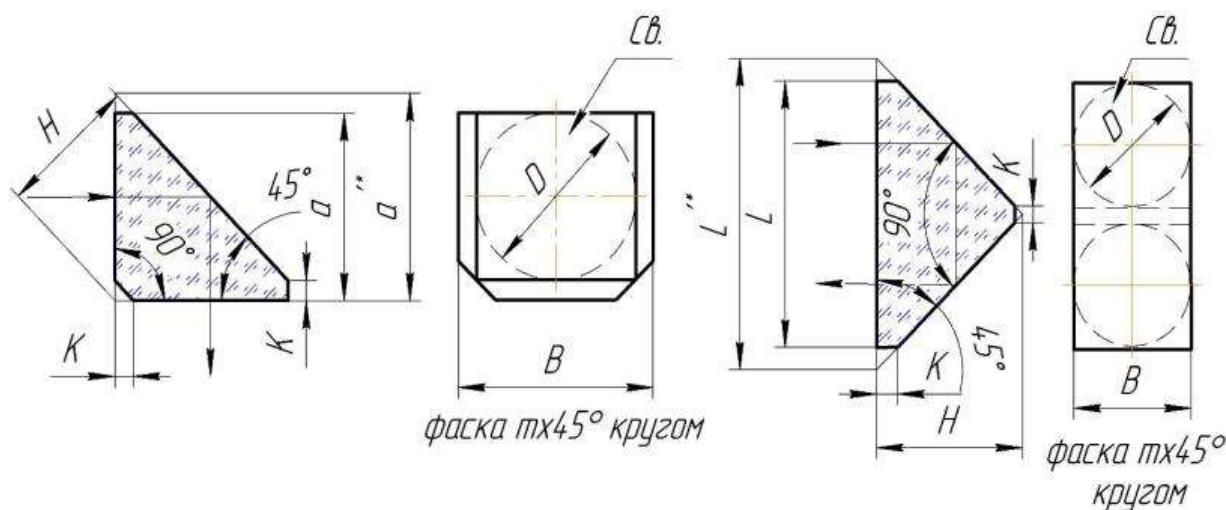


Рисунок 5.8 – Конструктивні елементи призм

- **Фаски конструкторські.** Для зменшення маси, забезпечення умов зручного закріплення в оправі призми і лінзи мають конструкторські фаски, їх розміри не нормують.

- **Додатковий текст.** Інформація, яка не подається в таблиці і на зображенні деталі, розміщується в нижній частині поля креслення.

Шорсткість поверхні

При необхідності на поверхнях або на лініях виносних до поверхонь вказують параметри шорсткості [3, стр.48 рис.2.1-2.13] або символи додаткової обробки, наприклад тип покриття на робочій або місце фарбування неробочої (матової) поверхні.

Допуски на шорсткість поверхонь різні для робочих та неробочих (базових, технологічних, вільних) поверхонь оптичних деталей.

Робочі (оптичні) заломлюючі та відбиваючі поверхні більшості деталей поліруються до висоти нерівностей за параметром $R_z = 0.05 \text{ мкм}$.

Неробочі поверхні можуть мати різні значення шорсткості, які залежать від призначення, властивості матеріалів деталей, методів отримання та обробки (литво, пресування, штамповка, різка, шліфування, полірування, травлення), характеристик зернистості оброблюваного інструменту (абразиву). Найбільш часто шорсткість таких поверхонь, досяжна видаленням шару матеріалу, нормується параметром $R_a = 2,5 \text{ мкм}$.

В тих випадках, коли матеріал деталі (наприклад, берилій, карбід кремнію, титанові та алюмінієві сплави, із яких виготовляють дзеркала космічних телескопів) не дозволяє отримувати оптичні поверхні, на неї наносять конструкційне покриття (скляне, мідне, нікелеве), яке потім оброблюється поліруванням, алмазним точінням, що дозволяє отримати необхідну шорсткість і точність форми поверхні.

Вибір параметрів шорсткості для простановки на робочому кресленні деталі виконується за табл.Б33.

Додаткові вимоги до матеріалу. У деяких градації вимог до матеріалу, що регламентовано нормативною документацією недостатньо. Наприклад, для деталей відповідальних фотооб'єктивів допуски на оптичні константи можуть оговорюватися окремо. Тоді в таблиці навпроти відповідного позначення констант робиться знак примітки, а в вільній частині поля креслення тестом доється посилання. Текстом, що доповнює таблицю, можуть обумовлювати і інші вимоги, наприклад необхідність виготовлення деталей із одного шматка скла або скла із одного плавлення і т.п. Таким же чином можуть обумовлюватися додаткові вимоги або умови контролю деяких показників якості матеріалу.

Додаткові вимоги до виготовлення. В деяких випадках, особливо для крупногабаритних деталей, незалежно від виду матеріалу, із якого вони виготовлені, з'являється необхідність встановлення уточнених вимог до виготовлення. Наприклад, більш детально охарактеризувати граничні значення окремих видів місцевих похибок поверхонь [3, стр.48 рис.2.3], вказати граничні значення їх співвідношень, задати діаметр пробного скла.

Для лінз великих розмірів (зазвичай при $\varnothing > 150 \text{ мм}$) в графі навпроти s або s_A ставлять знак примітки, а допуск на різновтовщинність лінзи по краю вказується текстом в полі креслення [3, стр.48 рис.2.3].

Довідникові та додаткові розміри і параметри. Текст в полі креслення «Размер для справок» зі знаком примітки вказує на те, що даний розмір не підлягає контролю і може бути використаний орієнтовно.

Специфічні особливості конструкції деяких деталей викликають необхідність внесення в поле креслення додаткових параметрів, простановка яких на зображенні деталі ускладнена, наприклад допуск на непаралельність утворюючих поверхонь циліндричної лінзи [3, стр.49 рис.2.4].

У складних деталей, наприклад призм, розміри фасок і їх граничні значення вказуються текстом в полі креслення [3, стр.57 рис.2.12, 2,13],.

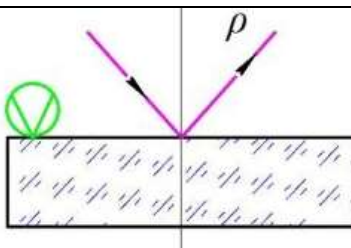
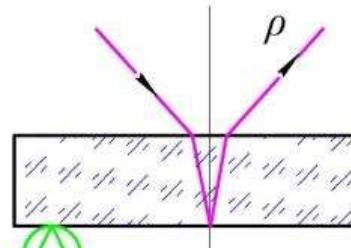
Зафарбовування неробочих поверхонь. Неробочі поверхні крупногабаритних деталей, як правило, зафарбовують чорними матовими емаллями і лаками. Матеріал та місце зафарбовування задаються тестом в полі креслення, а в більш складних випадках додатково вказуються штриховою лінією на зображенні деталі.

Оптичні покриття. В залежності від призначення деталі на неї можуть наноситися різноманітні типи покриття.

- **Типи покриття.** Вибір типу покриття оптичних деталей визначається функціональними вимогами, які пред'являють до них, умовами чистки деталей та експлуатацією приладу, їх формою, виробничими можливостями.

Встановлюються основні характеристики покриття, які визначають оптичні властивості, хімічну, корозійну та біологічну стійкість, механічну і термічну міцність. За функціональним призначенням покриття оптичних деталей розділюються на типи табл.5.2.

Таблиця 5.2– Типи покриття оптичних поверхонь деталей

Тип покриття	Скорочена назва	Умове графічне позначення	Хід променів в оптичній деталі
Відбиваючі не прозорі зовнішні	зеркальн.		
Відбиваючі не прозорі внутрішні	зеркальн		

Світлоподільні	светоделит.	
Просвітлююче	просветл.	
Покриття фільтрів	фільтр.	
Відрізаючий		
Вузькосмуговий		
Смуговий		
Спеціальний		
Захисне прозоре	защитн.	

Струмопровідне	токопров.	
Поляризує	поляриз.	

- Початковий матеріал покриття та способи його нанесення**

Початковий матеріал, що застосовується для утворення окремих шарів покриття, та його умовне позначення наведено в табл.Б34. Способи нанесення окремих шарів покриття та їх умовне позначення наведено в табл.Б35.

Покриття може бути одношаровим та багатошаровим. Умовне позначення окремих типів з урахуванням послідовності їх нанесення будуються за наступною схемою:

1. Умовне графічне позначення типу покриття та скорочене його назва табл.5.2



2. Умовне позначення початкового матеріалу для утворення першого шару табл.Б34



3. Умовне позначення способу нанесення першого шару покриття табл.Б35

Умовне позначення кожного шару відділяється від позначення наступних шарів крапкою.

- Умовне позначення типу покриття**

- ❖ Позначення одношарового покриття:

	- зеркальн. 1И	Покриття дзеркальне, алюмінування випарювання в вакуумі.
	- зеркальн. 25Р	покриття дзеркальне, посріблення хімічне із розчину азотнокислого срібла.
	- просветл. 24И	покриття просвітлює, випарювання фтористого магнію в вакуумі.

- ❖ Позначення двошарового покриття:

 - зеркальн. 1И.29И	Покриття дзеркальне, алюмінування із захисним шаром серністого цинку; обидва шари наносяться випарюванням в вакуумі.
 - зеркальн. 25Р.3Е	покриття дзеркальне, посріблення хімічне із розчину азотнокислого срібла із захисним анодним мідненням.
 - просветл. 44Р.43Р	покриття просвітлююче, двошарове, із розчину етоксітітана та тетраетоксісілана.

❖ Позначення тришарового покриття:

 - зеркальн. 25Р.3Е.75П	покриття дзеркальне, посріблення хімічне із розчину азотнокислого срібла із захисним анодним мідненням та лакуванням бутирально-бакелітовим лаком із наповнювачем.
 - просветл. 15К.14К.12К	покриття просвітлююче, тришарове, катодним розпиленням титану, танталу і кремнію в кисні.

❖ Позначення багатошарового покриття, що складається із великої кількості шарів:

✓ Для парної кількості шарів $(a, b) \times \frac{n}{2}$;

✓ Для непарної кількості шарів $\left[(a, b) \times \frac{(n-1)}{2} \right].a$

де а, b – шари покриття;

n – кількість шарів покриття.

Приклад позначення багатошарового покриття:

 - светоделит. (44Р.43Р)х6.44Р	покриття світлоподільне, 13 шарів, із тетраетоксітітана та тераетоксісілана.
 - поляриз. (90ИЭ.41ИЭ)х5.90ИЭ	покриття поляризаційне, 11 шарів, із двоокису гафнія (90) та двоокису кремнію (41, нанесених випарюванням за допомогою електронного нагрівання.

• **Позначення умов термообробки**

Умови термообробки деталей (прогрівання до 120°C із наступним інерційним охолодженням до кімнатної температури) не вказуються. Більш високотемпературні режими оговорюються окремо. Гранична температура прогрівання деталей залежить від температури відпалювання скла, із якого виготовлена деталь. Наприклад, скло марок ОК1, ТФ3, ТФ8, ОФ10 та СТК3 дозволяється нагрівати до 250°C, а скло інших марок не більше 350°C.

При нанесенні покриття на попередньо нагріту деталь гранична температура вказується у вигляді індексу біля букви, що позначає спосіб нанесення покриття, наприклад

 - просветл. 24И ₃₀₀	покриття просвітлююче, випарювання фтористого магнію в вакуумі. Покриття наноситься на попередньо нагріту деталь, гранична температура 300°C
---	--

При нанесенні покриття на попередньо нагріту а потім охолоджену деталь (глибоке просушування поверхні) гранична температура вказується після умовного графічного позначення типу покриття та скороченої назви, наприклад

 - просветл. 300.44Р.43Р	покриття просвітлююче, двошарове, із розчину етоксітітана та тетраетоксісілана. Покриття наноситься на попередньо нагріту деталь а потім обходжену, гранична температура 300°C
--	--

При термообробці після нанесення покриття гранична температура вказується вкінці умовного позначення, наприклад

 - просветл. 45Р.44Р.43Р.350	покриття просвітлююче, тришарове. Термообробка проводиться при граничній температурі 300°C після нанесення покриття.
--	--

*Значення температури відділяється від іншого тексту крапкою.

• **Позначення величин оптичних характеристик**

Для відбиваючих поверхонь при необхідності вказують:

❖ Граничне значення коефіцієнту інтегрального відбиття ρ_A . Індекс А показує, що для всіх видів дзеркального покриття коефіцієнт відбиття дається для джерела світла типу А (кольорова температура 2856К при куті падіння променю 15°;

❖ Граничне значення коефіцієнту ρ_λ для певної області спектру;

❖ Граничне значення коефіцієнту розсіювання

 - зеркальн. 1И.21Е, $\rho_A = 86 \%$	Покриття дзеркальне зовнішнє. Плівкоутворюючі матеріали (1) алюміній, наноситься випарюванням в вакуумі (И) із наступним нанесенням електролізом (Е) фосфорнокислого амонію (21). Граничне значення коефіцієнту інтегрального відбиття не менше 86 %.
 - зеркальн. 25Р.3Е.75П, $\rho_\lambda = 90 \%$, $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$	Покриття дзеркальне внутрішнє, (25) посріблення азотнокисле, хімічне із розчину (Р), із захисним анодним мідненням (3) електролізом (Е) та лакуванням бутиральнобекелітовим лаком із наповнювачем (75 (що наноситься пульвелізатором (щіткою) (П), граничне значення коефіцієнту спектрального відбиття для довжини хвилі 0,6328 мкм не менше 90 %.

Для світлоподільних прозорих покриттів вказують одну із характеристик:

- Коефіцієнт відбиття ρ із граничними відхиленнями;
- Коефіцієнт пропускання τ із граничними відхиленнями;

- Відношення коефіцієнту відбиття ρ до коефіцієнту пропускання τ із граничними відхиленнями;
- Кут нахилу падаючого пучка світла, якщо він перевищує 15°

 - светоделит. 44Р.43Р.44Р, $\alpha=45^\circ$, $\rho_\lambda/\tau_\lambda = 1 \pm 0,2$, $\lambda=1060$ нм	покриття світлороздільне, тришарове із ефіру етилового ортокремнієвої кислоти (43) та ефіру етилової ортотитанової кислоти (44), нанесених із розчину, кут падіння пучка - 45° , $\rho_\lambda/\tau_\lambda$ - відношення спектрального коефіцієнту відбиття до спектрального коефіцієнту пропускання 1,0 із граничним відхиленням 0,2 для довжини хвилі 1060 нм.
---	--

Для просвітлюючих, відбиваючих, світлороздільних покриттів вказують середню робочу довжину хвилі із граничними відхиленнями, для якої розраховано покриття, якщо вона відрізняється від середньої довжини хвилі для білого світла 550 нм, або ділянку спектру, для якої призначено покриття.

 - просветл. 44Р.43Р, $\lambda = 700 \pm 50$ нм	покриття просвітлююче, двошарове. Середня довжина хвилі 700 нм із граничним відхиленням 50 нм
---	---

• **Особливості позначення покриття-фільтрів.** Для них вказують наступні параметри.

❖ Оптичну щільність D або коефіцієнт пропускання τ із граничним відхиленнями для нетральних фільтрів (сірих)

 - фільтр. 6К, $D = 0.5 \pm 0.05$	покриття фільтруюче, платинове з катодним розпиленням із оптичною щільністю 0,5 та граничним відхиленням 0,05
 - фільтр. 5И, $\tau = 70 \%$	покриття фільтруюче, паладієве випарюванням в вакуумі з коефіцієнтом пропускання 70%

❖ Довжину хвилі $\lambda_{\max}$ із граничними відхиленнями, що відповідає середині смуги пропускання; коефіцієнт пропускання $\tau_{\max}$ для цієї довжини хвилі; напівширину смуги пропускання δ_λ (різниця довжин хвиль $\tau_{\max/2} - \tau_{\min}$) по обидві сторони від смуги пропускання

 - фільтр. 8И.24И.8И, $\lambda = 450 \pm 10$ нм $\tau_{\max} \geq 40 \%$, $\delta_\lambda = 20$ нм, $\tau_{\min} \leq 2 \%$	покриття фільтруюче, тришарове із чергуванням шарів срібло-фтористий магній-срібло, нанесених випарюванням в вакуумі, яке має для вказаної довжини хвилі значення максимального коефіцієнту пропускання 40 % і мінімального
---	---

	коефіцієнту пропускання 2 % по обидві сторони смуги пропускання 20 нм
--	---

Інтерференційні фільтри в залежності від призначення і форми спектральних кривих пропускання розділяються на наступні типи табл.5.2:

❖ Відсікаючі фільтри, що пропускають випромінювання з довжиною хвилі більше встановленої границі;

❖ Вузькосмугові фільтри, що пропускають випромінювання в спектральному діапазоні обмеженому як з боку коротких, так і з боку довгих довжин хвиль. При цьому ширина їх смуги пропускання не перевищує $0,25 \cdot \lambda_{\max}$;

❖ Смугові фільтри, що мають напівширину пропускання більше $0,25 \cdot \lambda_{\max}$;

❖ Спеціальні фільтри, які відрізняються за характеристиками від всіх раніше описаних.

• Для захисного і струмопровідного покриття при необхідності вказують:

- ❖ Допустиме значення коефіцієнту відбиття;
- ❖ Граничні значення температури, механічної міцності і т.п.;
- ❖ Граничні значення коефіцієнту пропускання;
- ❖ Питомий поверхневий опір з допуском

 - токопров. 33Г. При уд.объемн.сопротивл. $4 \cdot 10^3$, $\lambda = 500 \text{ нм}$, $\tau_{\lambda} = 92 \%$	покриття струмопровідне, суміші олово двохлористе та амоній фтористий обробкою в парах або газі.
--	--

- Для поляризуючого покриття при необхідності вказують:
- ❖ Степінь поляризації для заданої області спектру;
- ❖ Допустиму величину поглинання;
- ❖ Термічну міцність.

 - поляриз.(30P.43P)x5.30P. Степ.поляриз. не менее 99 %, $\lambda = 400 \text{ нм}$	покриття поляризуюче з плівко-утворювальних гідралізуючих речовин (Р) з суміші розчинів азотнокислого торію (30) в присутності спиртового розчину ортокремнієвого ефіру (43)
--	--

3. Виконання завдання

Завдання 3.1 Оформлення таблиці якісних характеристик оптичної деталі

1. Оформити таблицю якісних характеристик оптичної деталі (лінзи) із безкольорового оптичного скла. Приклад оформлення рис.5.9.

<i>варіант</i>	<i>Призначення деталі</i>	<i>Матеріал деталі</i>
1	Об'єктив мікроскопу	СТК9
2	Об'єктив телескопічної системи великого збільшення	БФ28
3	Об'єктив аерофотознімальний	ТБФ4
4	Об'єктив фотографічний	Ф102
5	Об'єктив коліматора	ТФ3
6	Об'єктив телевізійний	
7	Обертаючі системи	
8	Колективи	
9	Конденсори	
10	Окуляри та лупи	

2. Оформити таблицю якісних характеристик оптичної деталі (лінзи) із кварцевого оптичного скла. Приклад оформлення рис.5.10.

<i>варіант</i>	<i>Призначення деталі</i>	<i>Умови роботи</i>
1	Об'єктив мікроскопу	працює в вакуумній та УФ частині спектру
2	Об'єктив телескопічної системи великого збільшення	смуга поглинання не важлива
3	Об'єктив аерофотознімальний	працює в області спектру 0,25-2,5 мкм
4	Об'єктив фотографічний	працює в ІЧ області спектру (до 3,5-4 мкм)
5	Об'єктив коліматора	працює в підвищеному радіаційному фоні
6	Об'єктив телевізійний	смуга поглинання не важлива
7	Обертаючі системи	смуга поглинання не важлива
8	Колективи	працює в підвищеному радіаційному фоні
9	Конденсори	працює в вакуумній та УФ частині спектру
10	Окуляри та лупи	працює в області спектру 0,25-2,5 мкм

3. Оформити таблицю якісних характеристик оптичної деталі (світлофільтру) із кольорового оптичного скла. Приклад оформлення рис.5.11.

<i>варіант</i>	<i>Призначення деталі</i>	<i>Матеріал</i>
1	Телескопічні прилади	СЗС7
2	Біологічні мікроскопи: для конденсорів	ФС6
3	Біологічні мікроскопи: для колективів	УФС1
4	Контрольно-вимірювальні прилади	ЖЗС1
5	Пристрої для відтворення джерел світла, корекція	ОС5
6	Кіно – і фотоапаратура	ОС17
7	Аерофотоапарати	ЖС3

4. Оформити таблицю якісних характеристик оптичної деталі (призми) із безколіорового оптичного скла. Приклад оформлення рис.5.12, 5.13.

<i>варіант</i>	<i>Призначення деталі</i>	<i>Матеріал</i>
1	Прими спектральні та рефрактометричні	К8
2	Призми відбиваючі	БК10
3	Деталі поляризаційних приладів	ТК2

5. Оформити таблицю якісних характеристик оптичної деталі (дзеркала).
Приклад оформлення рис.5.14.

<i>варіант</i>	<i>Призначення деталі</i>	<i>Матеріал</i>
1	Дзеркала світлороздільні із внутрішнім відбиттям	ЛК5
2	Дзеркала із зовнішнім відбиттям	ЛК4
3	Дзеркала без отвору	ЛК7
4	Дзеркала з центральним або розвантажувальним отвором	К8
5	Дзеркала світлороздільні із внутрішнім відбиттям	К8

Завдання 3.2 Оформлення креслення типових оптичних деталей: лінзи, призми, дзеркала

1. Оформити креслення деталі – лінзи, призми, дзеркала. *Матеріал деталі взяти із попереднього завдання. Приклад оформлення рис.5.15-5.18.

Лист №		Лист №		Лист №		Лист №		Лист №		Лист №	

$Rz\ 2,5$
 $\sqrt{(\checkmark)}$

креслення
деталі

Δn_e	38
$\Delta(n_p - n_e)$	38
однорідність	3
абсолют.	3
ослаблення	2
бескалькість	38
пухлякості	25
N_{15}	5
ΔN_{15}	0,5
c	0,05
P_s	IV
P_E	V
ΔR_{15}	3
f	4787
σ_p	48,7±0,81
σ_c	-4265
СВ0А	261
СВ05	281

1. $\Delta 2p \pm 0,5\%$

2. Діаметр кружка розсіяння – не більше 0,2 мм

3. σ_{15} – просвітл. 44Р.43Р по ТУ....., $\lambda = 560 \pm 50$ нм

4. Покрытие матовых поверхностей ЭМХС-77 по ТУ.....

5. Размеры со звездочкой – для справок

Изм.	Лист	№ докум.	Лист	Лист	Параболическая линза				
Разраб.									
Упроб.					Стекло БК10 ГОСТ 3514-94				
Техн.контр.									
Исполн.					Лист 1				
Упроб.									

Копировал
Формат А4

Рисунок 5.9 – Приклад оформлення таблиці якісних характеристик оптичної деталі із безкольорового оптичного скла

Дет. познач.

Стор. №

креслення
деталі

Rz 2,5

√(√)

Δn _e	38
Δ(n _p -n _e)	38
однорідність	1
абл.чепр.	2
ослабление	2
бессвильность	Б
пузырность	3А
N _ε	2
ΔN _ε	0,3
N _δ	0,5
ΔN _δ	0,2
P	IV
π	2'
δ _{св.}	1
ε	25'
f _{пр}	-
l	4
св.Ø	5

1. Фаски на ребрах 0,3х45°. Фаски на углах 1х45°.
2. o_д-просветл.44Р.43Р по ТУ....., λ=520±50 нмю
3. Покрытие матовых поверхностей ЭМХС-77 по ТУ.....
4. Размеры со звездочкой - для справок.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Проб.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Призма

Стекло К8 ГОСТ 3514-94

Лит.	Материал	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

Копировал
Формат А4

Рисунок 5.13 – Приклад оформлення таблиці якісних характеристик оптичної деталі призми із кришею із скла К8

Назва деталі
Стор. №

Види і дані
Вид № докум.
Вид № докум.
Вид № докум.
Вид № докум.

креслення
деталі

1. N и ΔN для участка Ø50 мм
2. Разость толщин по краю до 0,1 мм
3. ⊗ – зеркальн. 1M21E по ТУ...
4. Вне светового диаметра допускаются кант без зеркального покрытия и точки от контактов
5. Покрытие матовых поверхностей ЭМХС-77 по ТУ.....
6. Размеры со звездочкой – для справок.

Rz 2,5

√(√)

Δn _z	-
Δ(n _p -n _z)	-
однородность	-
аблупер.	3
ослабление	-
бесцветность	-
пузырность	7Г
N	2
ΔN	0,2
P	VI
ΔP	23
f _{min}	207
св.Ø	150/70

Вид № докум.
Вид № докум.
Вид № докум.
Вид № докум.
Вид № докум.

Зеркало

Стекло ЛК7 ГОСТ 3514-94

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

~X
Копировать
Формат A4

Рисунок 5.14 – Приклад оформлення таблиці якісних характеристик оптичної деталі дзеркала із скла ЛК7

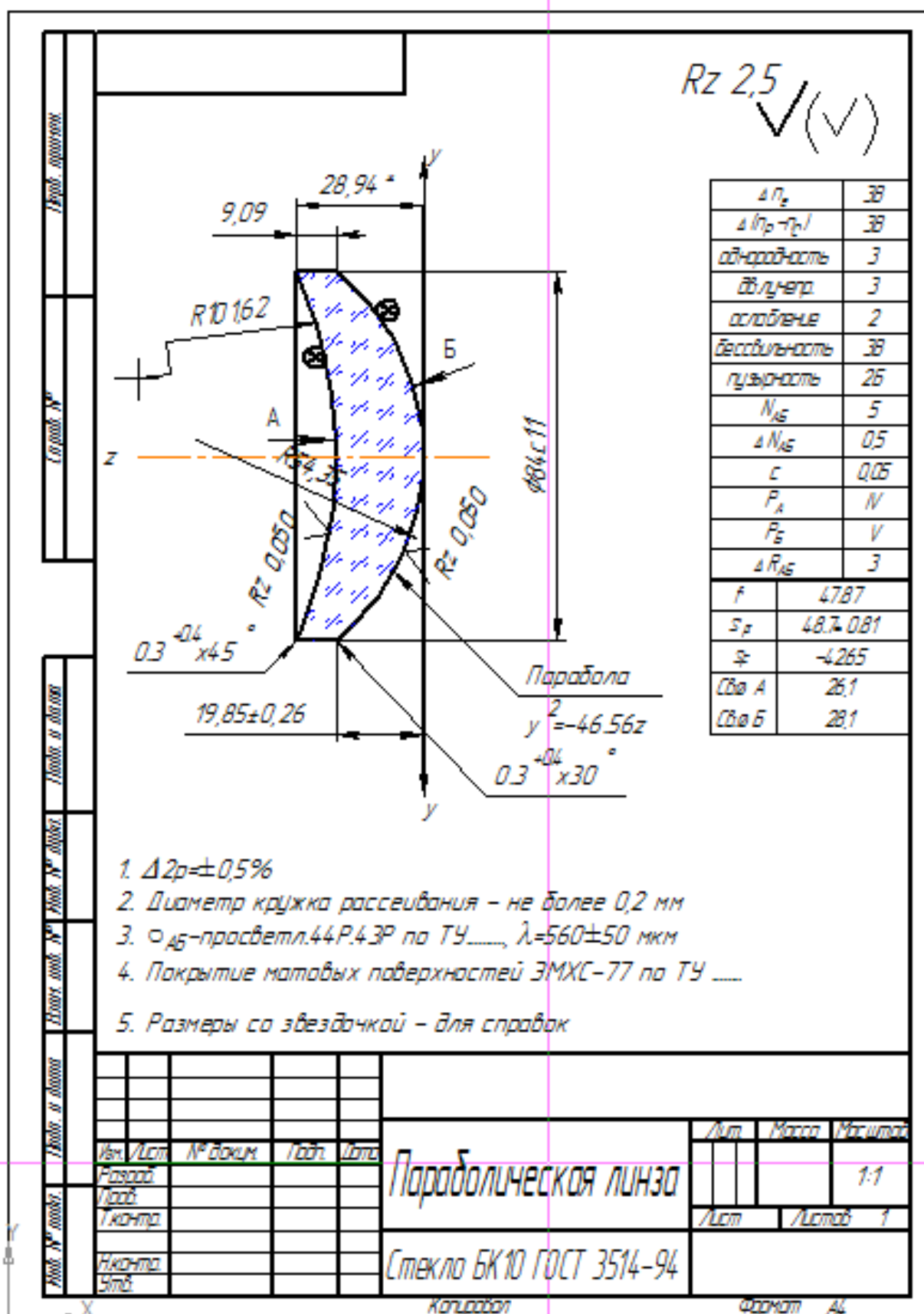


Рисунок 5.15 – Приклад креслення параболічної лінзи із скла БК10

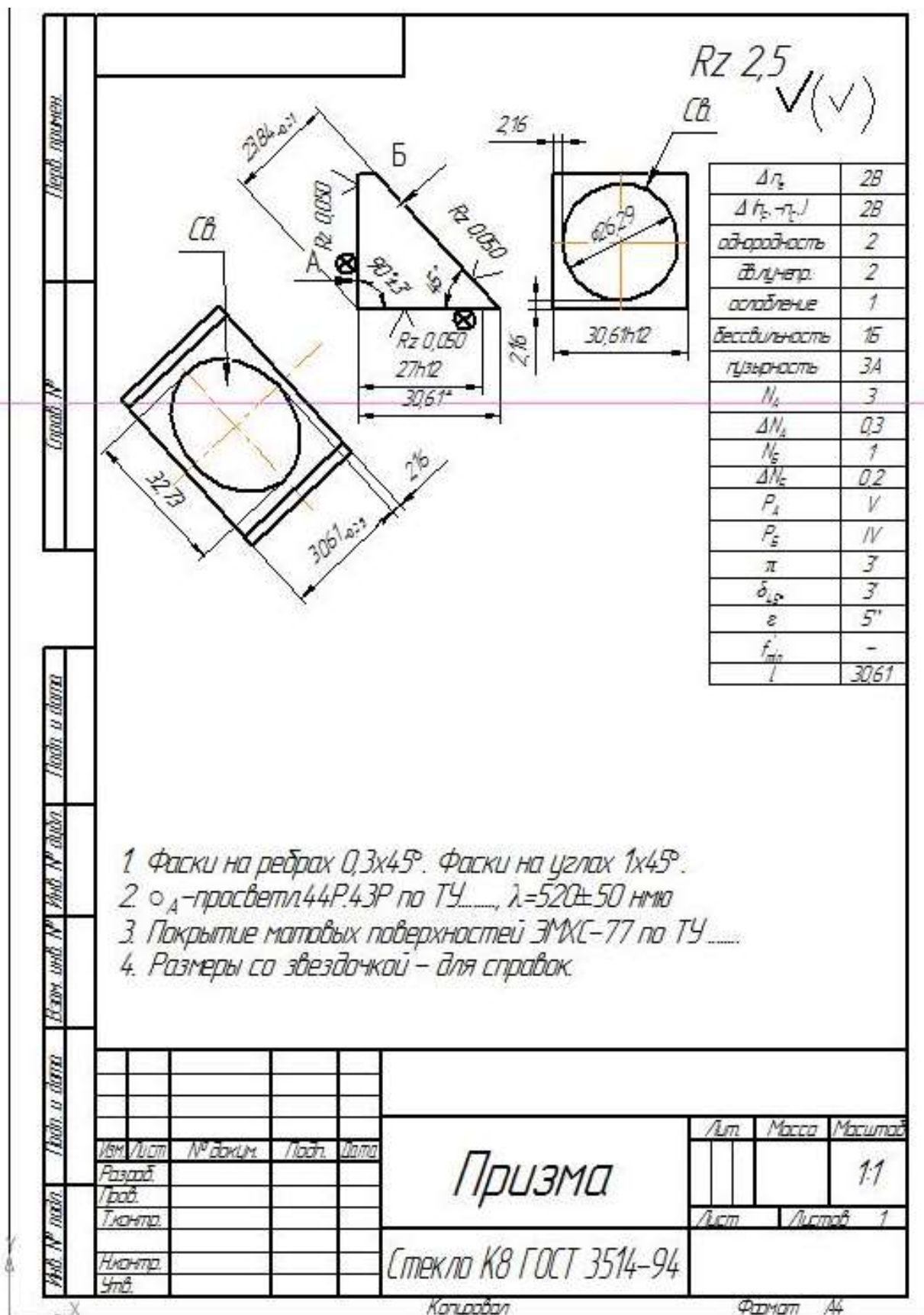


Рисунок 5.16 – Креслення призми із світловими зонами із скла К8

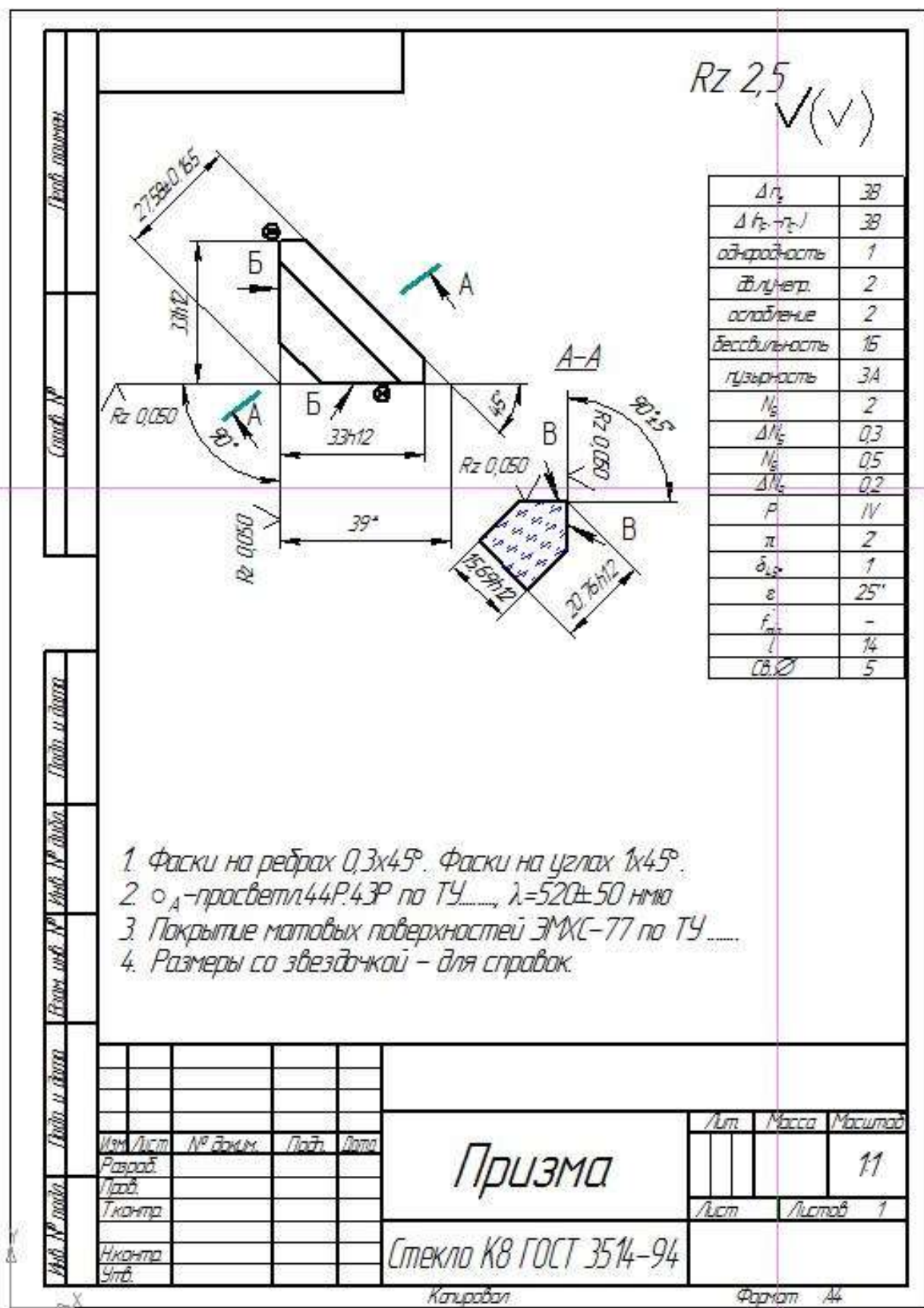


Рисунок 5.17 – Креслення призми із кришею із скла К8

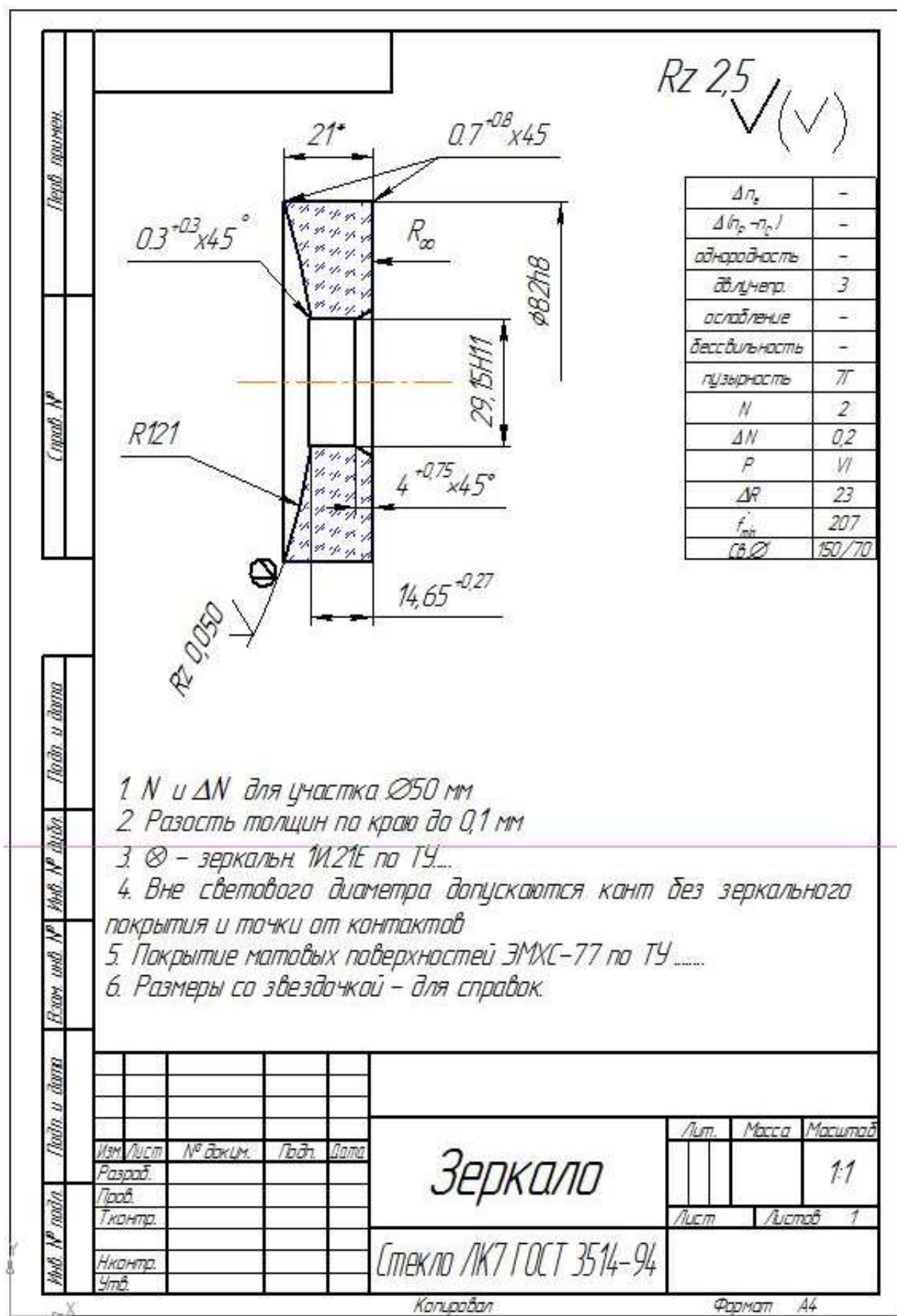


Рисунок 5.18 – Креслення сферичного дзеркала із скла ЛК4

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Основні вимоги до матеріалу оптичних деталей.
2. Властивості та показники якості матеріалів, що використовуються для виготовлення оптичних деталей.
3. Оптичні характеристики матеріалів і нормовані показники якості оптичного скла.
4. Визначення вимог до якості оптичних матеріалів.
5. Класифікація оптичних деталей.
6. Основні технологічні вимоги до оптичної деталі.
7. Вимоги до якості поверхні деталі.
8. Умовні позначення, що застосовуються на кресленнях і схемах.
9. Основні вимоги до робочих креслень оптичних деталей.
10. Таблиця, на кресленні оптичної деталі. Які вимоги в ній відображаються.
11. Вимоги до матеріалу деталі. Безкольорове оптичне скло.
12. Вимоги до матеріалу деталі. Кольорове оптичне скло.
13. Вимоги до матеріалу деталі. Кварцове оптичне скло.
14. Вимоги до матеріалу деталі. Полімери.
15. Вимоги до виготовлення деталі. Допуск на загальне відхилення форми робочої поверхні оптичної деталі від еталону.
16. Вимоги до виготовлення деталі. Допуск на місцеве (нерегулярне) відхилення форми робочої поверхні від еталонної.
17. Вимоги до виготовлення деталі. Клас точності пробного скла.
18. Допуск на дефекти чистоти полірованих робочих поверхонь оптичних деталей.
19. Допустима клиноподібність пластин θ .
20. Допустима децентровка s (лінзи та дзеркала із криволінійними поверхнями).
21. Граничний кут дозвільної здатності ε для відповідальних призм та пластин.
22. Допустима фокусність $f_{\min}$ відповідальних деталей, обмежених площинами.
23. Розрахункові параметри деталі. Оптичні характеристики лінз, дзеркал, призм.
24. Орієнтація зображення в полі креслення.
25. Форма оптичних поверхонь.
26. Розміри і точність взаємного розташування оптичних поверхонь.
27. Габаритні розміри деталей та точність взаємного розташування неробочих поверхонь.
28. Шорсткість поверхні.
29. Оптичні покриття. Вибір типу покриття оптичних деталей.
30. Початковий матеріал покриття та способи його нанесення.
31. Умовне позначення типу покриття.
32. Позначення умов термообробки.

Література

1. Справочник конструктора оптико - механических приборов./ В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. Ред.. В.А.Панова, -Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1080. – 742с, ил.
2. Справочник технолога-оптика /М.А.Окатов, Э.А.Антонов, А.Байгожин и др.: Под ред.М.А.Окатова. -2-е изд.перераб. и доп. – СПб Политехника, 2004. – 679 с.
3. Справочник технолога-оптика: Справочник/ И.Я.Бубис, В.А. Вейденбах, И.И.Духопел и др.; Под общ.ред. С.М.Кузнецова и М.А.Окатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1983. – 414 с., ил.
4. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб.пособие. – СПб: Политехника, 2007. – 579 с.
5. Электронный учебник по дисциплине: «Проектирование оптико-электронных приборов» Авторы:Латыев С.М., Егоров Г.В., Тимощук И.Н. СпбГУ ИТМО, кафедра КиПОП. http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=9.
6. Быков Б.З., Перов В.А. Оформление рабочих чертежей оптических деталей и выбор допусков на оптические детали. – М.: Логос, 2003. – 99 с.
7. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2004 – 95 с.
8. Оптичні схеми і креслення оптичних елементів за міжнародним стандартом ISO 10110. Укл. В.М.Тягур, Ш.Г.Чиж, О.К, Кучеренко – К.: НТУУ «КПІ», 2014, - 82 с.

Змістовий модуль «Метрологічне забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів і систем»

Практичне заняття №6

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕТАЛОННИХ ВИМІРЮВАНЬ РОБОЧИМ ЕТАЛОНОМ ОДИНИЦІ ЕНЕРГІЇ КОРОТКОІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи:

1. Ознайомитися із будовою оптичної та функціональної схеми робочого еталону енергії.
2. Визначити сумарну похибку робочого еталону одиниці енергії (РЕЕ).
3. Визначити похибку передачі розміру одиниці енергії повіряемому (калібруемому) засобу вимірювання.

1. Підготовка до роботи:

1. Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання.
2. Державний спеціальний еталон. Складові частини.
3. Вторинні еталони. Зразкові засоби вимірювальної техніки. Робочі ЗВТ
4. Вторинні та робочі еталони одиниць потужності (РЕП)

2. Теоретичні відомості

2.1 Основи забезпечення єдності вимірювання потужності та енергії лазерного випромінювання

Державна повірочна схему дається в ДСТУ 3539-97 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм. Цей стандарт поширюється на державну повірочну схему для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм і встановлює призначення державного спеціального еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання, комплекс основних засобів вимірювальної техніки, що входять до його складу, основні метрологічні характеристики еталона і порядок передавання розміру одиниці середньої потужності лазерного випромінювання - вата (Вт) та одиниці енергії імпульсного лазерного випромінювання - джоуля (Дж) від державного спеціального еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання за допомогою вторинних еталонів і зразкових засобів вимірювальної техніки робочим засобам вимірювальної техніки із зазначенням похибок та основних методів повірки.

Державний спеціальний еталон

Державний спеціальний еталон призначений для відтворення та зберігання одиниць середньої потужності лазерного випромінювання (Р) та енергії імпульсного лазерного випромінювання (Е) при довжині хвилі 0,5 мкм та передавання розмірів одиниць за допомогою вторинних еталонів і зразкових засобів виміральної техніки робочим засобам виміральної техніки з метою забезпечення єдності вимірювань.

За основу вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12 мкм повинні бути покладені одиниці, що відтворюються державним еталоном.

Державний спеціальний еталон складається із комплексу таких засобів виміральної техніки:

- Стабілізованого по потужності джерела безперервного лазерного випромінювання на довжині хвилі 0,5 мкм;
- Послаблювача лазерного випромінювання;
- Системи вимірювання середньої потужності вимірювання на базі еталонного первинного вимірального перетворювача;
- Системи електричного калібрування вимірника середньої потужності методом заміщення;
- Системи вимірювання відносного рівня середньої потужності випромінювання;
- Системи формування імпульсів тривалістю 1 с;
- Системи термостатування;
- Системи реєстрації та оброблення інформації.

Діапазони значень середньої потужності та енергії лазерного випромінювання, що відтворюються еталоном становлять відповідно, від $1 \cdot 10^{-4}$ до 1 Вт та $1 \cdot 10^{-4}$ до 1 Дж при довжині хвилі 0,5 мкм.

Державний спеціальний еталон забезпечує відтворення одиниці середньої потужності лазерного випромінювання:

<i>Середнє відхилення вимірювань</i>	<i>квадратичне результату</i>	<i>Рівень потужності</i>	<i>Невилучена систематична похибка</i>	<i>Рівень потужності</i>
$S_B = 0.1 \cdot 10^{-2}$		1 Вт	$\theta_B = 0.08 \cdot 10^{-2}$	1 Вт
$S_B = 0.3 \cdot 10^{-2}$		$1 \cdot 10^{-4}$ Вт	$\theta_B = 0.4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$ Вт
для $n=30$ незалежних вимірювань				

Державний спеціальний еталон забезпечує також відтворення одиниці енергії імпульсного лазерного випромінювання:

<i>Середнє відхиленням вимірювань</i>	<i>квадратичне результату</i>	<i>Рівень потужності</i>	<i>Невилучена систематична похибка</i>	<i>Рівень потужності</i>
$S_B = 0.2 \cdot 10^{-2}$		1 Дж	$\theta_B = 0.1 \cdot 10^{-2}$	1 Дж
$S_B = 0.3 \cdot 10^{-2}$		$1 \cdot 10^{-4}$ Дж	$\theta_B = 0.4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$ Дж
для $n=30$ незалежних вимірювань				

Для забезпечення відтворення одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання із зазначеною точністю повинні дотримуватися правила зберігання та застосування еталона, затверджені в установленому порядку.

Державний спеціальний еталон застосовують для передавання розміру одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання робочим еталонам методом прямих вимірювань із:

<i>Середнє відхиленням вимірювань передавання</i>	<i>квадратичне результату у процесі</i>	<i>Рівень потужності</i>	<i>Невилучена систематична похибка</i>	<i>Рівень потужності</i>
$S_{\Sigma B} = 0.15 \cdot 10^{-2}$		1 Вт	$S_{\Sigma B} = 0.2 \cdot 10^{-2}$	1 Дж
$S_{\Sigma B} = 0.3 \cdot 10^{-2}$		$1 \cdot 10^{-4}$ Вт	$S_{\Sigma B} = 0.3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$ Дж

А також зразковим та робочим засобам вимірювальної техніки методом прямих вимірювань із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань у процесі передавання, що не перевищує $S_B = 1 \cdot 10^{-2}$.

Вторинні еталони

Як робочі еталони одиниць середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання застосовують комплекси, що складаються із стабілізованих лазерів безперервного випромінювання на довжині хвилі 0,5 та 10,6 мкм, засобів вимірювальної техніки для вимірювання середньої потужності або енергії в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм, пристроїв, що формують імпульси лазерного випромінювання і систем реєстрації та оброблення інформації.

Середні квадратичні відхилення результатів звірянь робочих еталонів з державним спеціальним еталоном не повинні перевищувати $S_{\Sigma B} = 0,4 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}$.

Робочі еталони одиниць середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання застосовують для перевірки зразкових та робочих засобів вимірювальної техніки методом прямих

вимірювань із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань у процесі передавання $S_{\Sigma B} = 0,4 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}$.

Зразкові засоби вимірювальної техніки

Як зразкові засоби вимірювальної техніки застосовують зразкові засоби вимірювань середньої потужності або енергії (наприклад, ОСИ_СМ, ОСИ-Э), неселективні у діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12 мкм на окремих ділянках діапазону.

Границі допустимої відносної похибки становить $\Delta_B = 1 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$. Зразкові ЗВТ застосовують для перевірки робочих ЗВТ методом безпосереднього звіряння.

Робочі ЗВТ

До робочих ЗВТ належать вимірювачі середньої потужності лазерного випромінювання або енергії імпульсного лазерного випромінювання у діапазонах відповідно, від $1 \cdot 10^{-7}$ до 10^2 Вт та $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^3$ Дж в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм або на фіксованих довжинах хвиль.

Границі допустимої відносної похибки робочих ЗВТ становить $\Delta_B = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 30 \cdot 10^{-2}$.

Вторинні та робочі еталони одиниць потужності (РЕП) будують за уніфікованою структурною та функціональною схемами. В якості прикладу розглянемо РЕП, що складається із трьох основних частин:

- Апаратури вимірювання потужності лазерного випромінювання, яка призначена для отримання розміру одиниці від вторинного еталону (ВЕ) та передачі його далі по повірочній схемі; до її складу входять: еталонний ОЕВП колориметричного типу, оснащений обмоткою заміщення для подачі в нього електричної потужності, та ЗВ електричних сигналів на основі АЦП;

- Апаратури передачі розміру одиниці потужності калібруємим та повіряємим ЗВ; до її складу входять: лазерні пристрої, що генерують випромінювання з довжинами хвиль 0,532 та 0,96-0,98 мкм; оптична система, що включає в себе розвідну та фокусувальну оптику; ОЕВП, що використовуються в якості перетворювачів контрольних ЗВ відносного рівня потужності лазерного випромінювання (надалі, приймачі «свідки»); ослаблювач потужності лазерного випромінювання;

- Системи управління РЕП та обробки результатів вимірювань на основі комп'ютера.

**ДЕРЖАВНА ПОВІРОЧНА СХЕМА ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ
СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ЕНЕРГІЇ ІМПУЛЬСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ ВІД 0,3 ДО 12,0 МКМ**

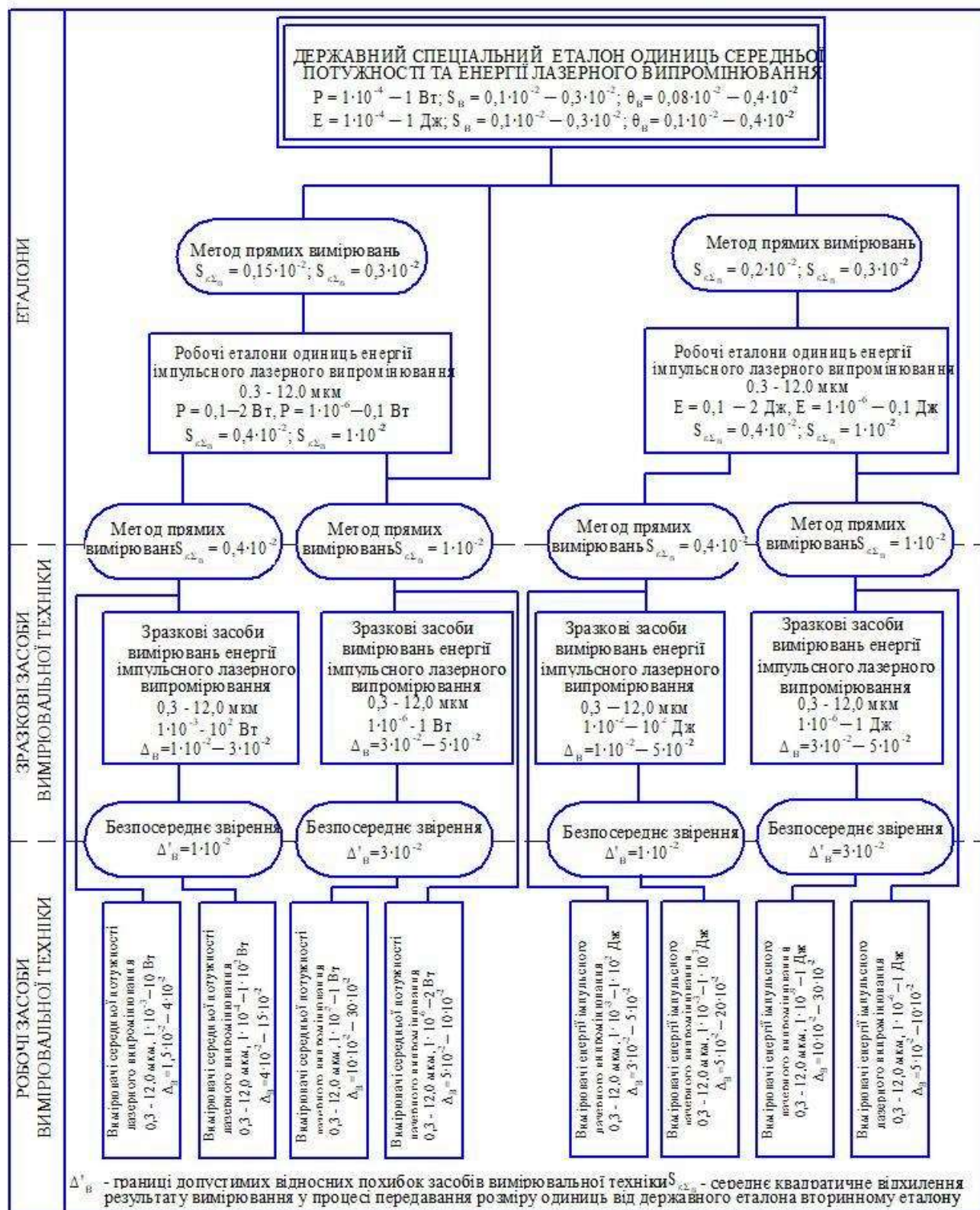


Рисунок 6.1 - Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм [3]

2.2 Аналіз точності результатів еталонних вимірювань робочим еталоном одиниці енергії короткоімпульсного лазерного випромінювання

В якості прикладу виконання та аналізу точності результатів еталонних вимірювань ознайомимося з робочим еталоном одиниці енергії короткоімпульсного лазерного випромінювання.

Робочий еталон одиниці енергії РЕЕ складається із трьох основних частин:

- апаратури вимірювання енергії лазерного випромінювання, яка призначена для отримання розміру одиниці від ВЕ та передачі його далі по повірочній схемі, до складу якої входить еталонний ОЕВП колориметричного типу, конструктивно об'єднаний з платою обробки результатів вимірювань та має обмотку заміщення для подачі на неї електричної енергії;

- апаратури передачі розміру одиниці енергії калібруємим або повіряємим ЗВ; до складу якої входить: твердотільні імпульсні лазерні пристрої ЛТИ-247 та ЛТИ-139, які генерують з довжинами хвиль відповідно 1,064 мкм та 1,54 мкм, а також перетворювач (який подвоює) частоти випромінювання ПЧ1, призначений для отримання другої гармоніки (довжина хвилі 0,532 мкм) випромінювання ЛТИ-247; оптична система, що включає до складу розвідну та фокусуючу оптику; ОЕВП, який використовується в якості перетворювача в контрольному ЗВ відносного рівня енергії лазерного випромінювання надалі приймач – «свідок»; ослаблювачі лазерного випромінювання;

- система управління РЕЕ та обробки результатів вимірювання на основі комп'ютера.

Побудові структурної схеми РЕЕ передував аналіз можливих варіантів оптичних схем, які забезпечили б виконання метрологічних вимог до еталону. Тут також можливий паралельний та послідовний варіанти передачі розміру одиниці енергії від ВЕ до РЕ.

В першому випадку використовується калібрований дільник енергії оптичного випромінювання, а в другому – система вимірювання відносного рівня енергії з використанням світлоподільної пластини та контрольного ЗВ у відповідності із оптичною схемою рис.6.2.

Випромінювання від змінних лазерів 1, 2 або 3 подається на світлоподільну пластину, яка ділить енергію на два канали. В основному каналі за допомогою діафрагми 4 та довгофокусних лінз, що встановлені на лазерах, випромінювання потрапляє у вхідне вікно еталонного ОЕВП енергії випромінювання 9, а у відгалуженому каналі – у вхідне вікно приймача-«свідка» контрольного ЗВ 6.

В процесі повірки (калібровки) ЗВ енергія імпульсу випромінювання лазера в основному каналі вимірюється за допомогою еталонного ОЕВП, після чого на його місце встановлюється повіряємий (калібруємий) ЗВ 10 або 11. Можливі зміни енергії випромінювання від імпульсу до імпульсу лазерів в процесі повірки (калібровки) контролюється за показниками контрольного ЗВ. За результатами вимірювання енергії випромінювання у відгалуженому каналі визначається відповідна поправка для виключення похибки, що зумовлена зміною енергії лазерного випромінювання.

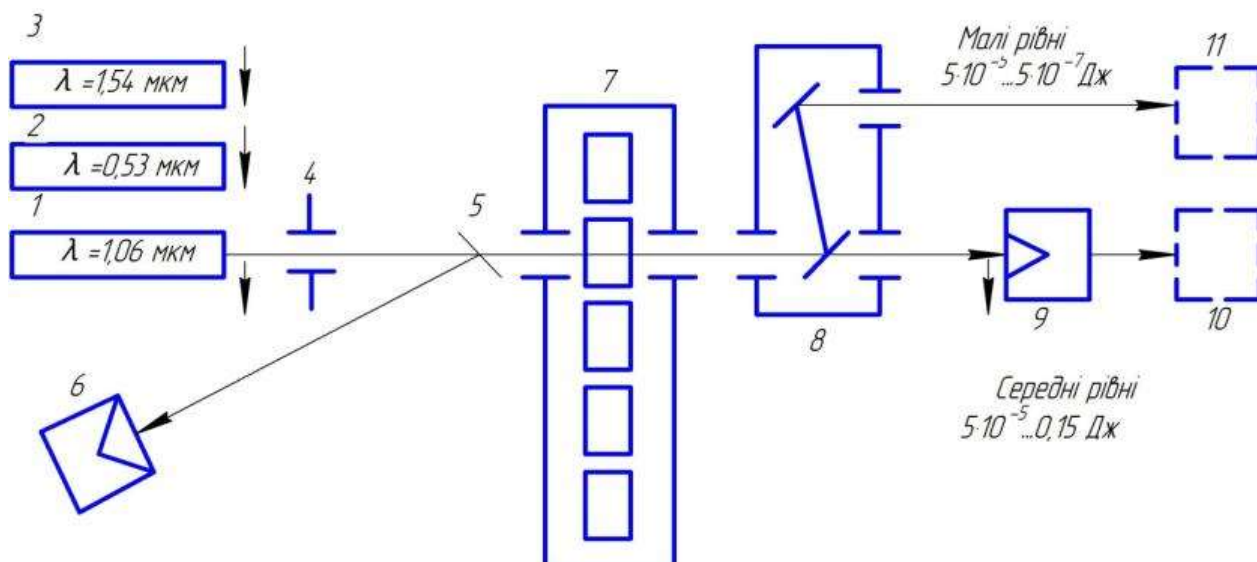


Рисунок 6.2 – Оптична схема РЕЕ з використанням світлоподільної пластини та контрольного засобу вимірювання: 1 – імпульсний лазер ЛТИ-247; 2 – імпульсний лазер ЛТИ-247 та ПЧ-1 (збірка); 3 – імпульсний лазер ЛТИ-139; 4 – діафрагма; 5 – світлоподільна пластинка; 6 – контрольний перетворювач енергії випромінювання ПИ-2; 7 – ослаблювач каналу середніх рівнів енергії; 8 – френелівський ослаблювач для каналу малих рівнів енергії; 9 – еталонний перетворювач енергії випромінювання ПИ-1; 10, 11 – місця для повіряємих (калібруємих) ЗВ енергії для середніх та малих рівнів відповідно

Високі значення щільності імпульсної потужності, що застосовуються в РЕЕ лазерів в даному випадку будуть впливати тільки на зміну оптичних властивостей світлоподільної пластини. Оскільки перед кожним вимірювальним циклом визначається відношення показів в каналах еталонного та контрольного ОЕВП, то ця складова похибки повністю виключається і не вияляє впливу на похибку передачі і процес повірки (калібровки) в цілому.

Алгоритм повірки (калібровки) ЗВ побудований з врахуванням визначення коротстрокової стабільності чутливості (визначається до та після кожної серії вимірювань), який враховує можливі зміни властивостей подільної пластини і може бути визначений з високою точністю ($S_n \leq 0,5\%$). Також можуть бути задіяні заходи технічного характеру у відгалудженому каналі для зменшення складових похибки передачі розміру одиниці енергії, що зумовлені нерівномірною чутливістю контрольного перетворювача та зміною площини поляризації випромінювання імпульсних лазерів. Все це дало підстави для побудови оптичної схеми РЕЕ з використанням світлоподільної пластини та контрольного ЗВ. Функціональна схема РЕЕ наведена на рис.6.3.

При передачі розміру одиниці енергії імпульсного лазерного випромінювання від РЕЕ до ЗВ реалізується принцип послідовного вимірювання енергії імпульсного лазерного випромінювання еталонним ОЕВП ПИ-1, що входить до складу РЕЕ, та перетворювачем випромінювання повіряємого (калібруємого) ЗВ енергії, в результаті чого визначається його чутливість або калібрувальне число.

Перетворювач ПИ-1 отримує розмір одиниці енергії від ВЕ у вигляді коефіцієнту K_e еквівалентності дії енергії імпульсного лазерного випромінювання Q_0 на довжині хвилі 0,5 мкм та еквівалентної енергії заміщення електричного імпульсу Q_e , що підводиться до обмотки електричного нагрівача ПИ-1 і викликає сигнал на виході ПИ-1, рівний сигналу під дією Q_0 , цим і забезпечується необхідна точність вимірювання енергії імпульсного лазерного випромінювання.

Перетворювача ПИ-1 зберігає розмір одиниці енергії протягом міжповірного інтервалу, чий складає 12 місяців, за допомогою системи калібровки по електричній енергії, що входить до складу РЕЕ.

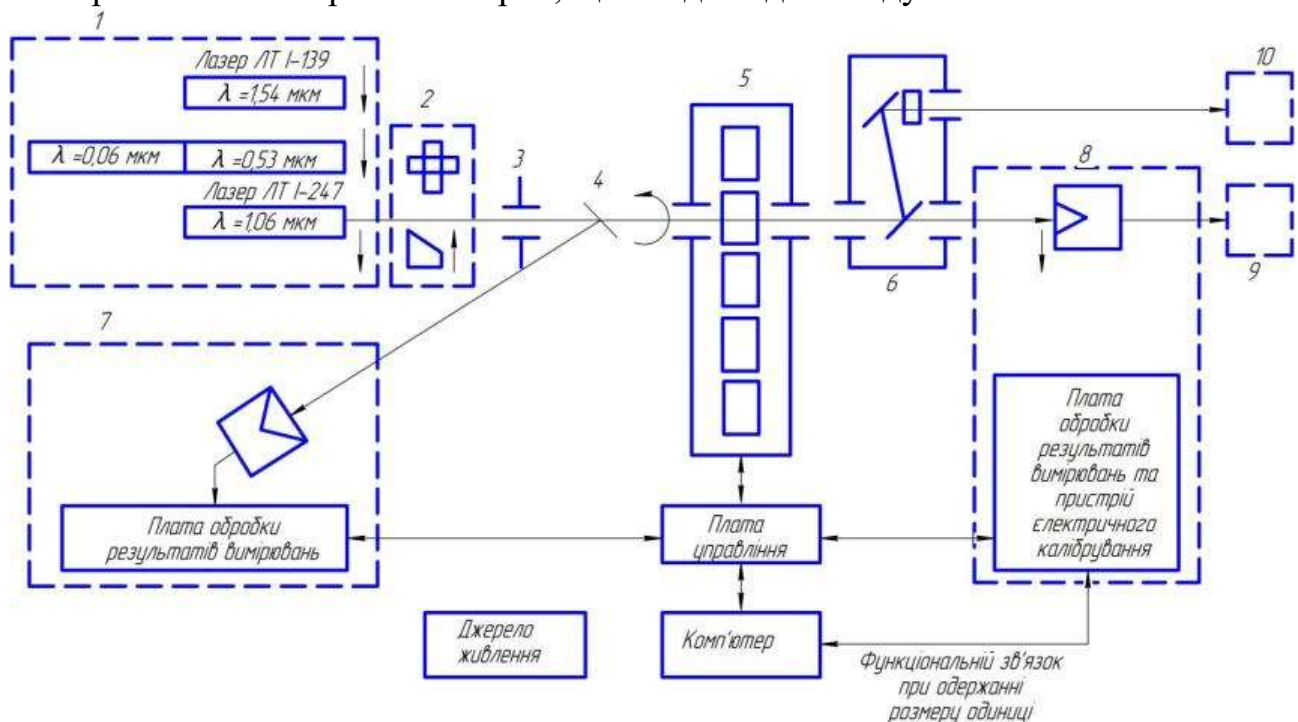


Рисунок 6.3 – Функціональна схема РЕЕ: 1 – джерело випромінювання; 2 – пристрій для юстировки повіряємих (калібруємих) ЗВ; 3 – діафрагма; 4 – світлоподільна пластина; 5 – ослаблювач каналу середнього рівня енергії; 6 – френелевський ослаблювач каналу малих рівнів енергії; 7 – контрольний перетворювач енергії випромінювання ПИ-2; 8 – еталонний перетворювач енергії випромінювання ПИ-1; 9, 10- повіряємі (калібруємі) ЗВ середніх і малих рівнів відповідно

Розмір одиниці енергії передається ЗВ енергії апаратурою передачі РЕЕ, о якої входять імпульсні твердотільні лазерні пристрої з довжиною хвилі 0,53, 1,064 та 1,54 мкм.

Для виключення похибок, що зумовлені можливою зміною енергії лазерного випромінювання під час передачі розміру одиниці, до складу апаратури передачі входить засіб контролю відносної зміни енергії імпульсного лазерного випромінювання – контрольний перетворювач енергії

випромінювання ПИ-2, за допомогою якого враховується можлива її нестабільність від імпульсу до імпульсу за час передачі.

Енергія імпульсного лазерного випромінювання Q_0 на вході ПИ-1 визначається методом порівняння вихідних сигналів ПИ-1 під дією енергії імпульсу лазерного випромінювання і енергії електричного імпульсу (U_{o0} U_{e0} відповідно).

Одночасно із вимірюванням U_{o0} виконуються вимірювання вихідного сигналу перетворювача ПИ-2 U_{k1} .

Після встановлення перетворювача повіряемого (калібруемого) ЗВ в оптичний тракт еталона замість ПИ-1 в момент передачі розміру одиниці енергії t_2 вимірюються показання повіряемого (калібруемого) ЗВ Q_n і сигнал на виході перетворювача ПИ-2 U_{k2}

Енергія Q_{02} імпульсного лазерного випромінювання на вході повіряемого (калібруемого) ЗВ визначається за формулою 6.1:

$$Q_{02} = Q_{01} \cdot \frac{U_{k2}}{U_{k1}} \quad (6.1)$$

де $Q_{01} = \frac{U_{o0}}{K_e \cdot S_{np.OE}}$ - енергія в момент часу t_1

$S_{np.OE}$ - чутливість ПИ-1

За значеннями Q_{02} та Q_n визначається чутливість повіряемого (калібруемого) ЗВ та його калібровочне число.

3. Виконання роботи

Завдання 3.1 Визначити сумарну похибку робочого еталону одиниці енергії РЕЕ

Чутливість еталонного ОЕВП ПИ-1 слугує одним із важливих параметрів, що впливає на точність відтворення та зберігання розміру одиниці енергії лазерного випромінювання.

Сумарна похибка характеризується похибками відтворення і передачі розміру одиниці.

Оскільки основний вклад в сумарну похибку самого РЕЕ вносить саме ОЕВП ПИ-1, то його похибка описується наступним виразом [1]:

$$S_{ПИ-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\theta_0^2 + \theta_{xy}^2 + \theta_\lambda^2 + \theta_\tau^2 + \theta_H^2 + \theta_T^2 + \theta_e^2} \quad (6.2)$$

де θ_0 - невиключена систематична похибка (НСП), що зумовлена рівнем вимірюваної потужності;

θ_{xy} - НСП, зумовлена зонною залежністю чутливості;

θ_λ - НСП, зумовлена селективністю приймальної порожнини ПИ-1 на довжинах хвиль 0,53; 1,064 та 1,54 мкм;

θ_T - НСП, зумовлена зміною температури в нормальних умовах експлуатації $(20 \pm 2)^\circ C$;

θ_{II} -НСП електронного пристрою ПИ-1;

θ_τ - НСП, зумовлена відмінністю значень щільності імпульсної потужності при різних значеннях тривалості імпульсів;

θ_e - НСП, зумовлена похибками електронної вимірювальної апаратури.

Розглядаємо невиключену систематична похибка (НСП), що зумовлена рівнем вимірюваної потужності (6.3) [1]:

$$\theta_0 = \frac{2 \cdot (S_{np.e.max} - S_{np.e.min})}{(S_{np.e.max} + S_{np.e.min})} \cdot 100 \% \quad (6.3)$$

де $S_{np.e.max}$, $S_{np.e.min}$ - відповідно, максимальна і мінімальна чутливість ПИ-1 по електричній енергії, що подається в обмотку заміщення $\frac{B}{Дж}$.

Складова θ_0 визначена при наступних параметрах:

- діапазон вимірювання енергії електричного імпульсу $Q_e = 3, 80, 150 \text{ мДж}$;
- тривалість електричного імпульсу $\tau_e = 1 \text{ с}$.

Точка динамічного діапазону	Q_e , мДж	U_{e1} , мВ	$\bar{Q}_e$, мДж	$\bar{U}_{e1}$, мВ	$S_{np.e}$ $\frac{B}{Дж}$	θ_0 , %
1	3,345 3,341 3,342	0,02199 0,022 0,02198				визначити
2	83,854 83,856 83,858	0,5480 0,5479 0,5479				визначити
3	168,872 168,873 168,871	1,1026 1,1028 1,1029				визначити

Похибка що, зумовлена зонною залежністю чутливості θ_{xy} (6.4) [1]:

$$\theta_{xy} = \frac{S_{np.max} - S_{np0}}{S_{np0}} \cdot 100 \% \quad (6.4)$$

де $S_{np.max}$, S_{np0} - значення відношення $\frac{U_k}{Q_0}$, $S_{np0} = 0,2225 \text{ В/Дж}$;

U_k - покази ЗВ з перетворювачем ПИ-2, мВ;

Q_0 - значення енергії виміряне за допомогою перетворювача ПИ-1.

Значення θ_{xy} визначалось для трьох положень ПИ-1 відносно осі пучка випромінювання.

Положення ПИ-1	Дано		Знайти
	$Q_0, \text{мДж}$	$S_{np}, \text{В/Дж}$	$\theta_{xy}, \%$
1	157,91	0,2229	визначити
2	154,80	0,2214	
3	157,31	0,2241	

Визначення значень коефіцієнту поглинання приймального елемента ПИ-1 на довжинах хвиль 0,5; 1,064; 1,54 мкм дозволило оцінити складову сумарної похибки θ_λ що, зумовлена селективністю приймальної порожнини ПИ-1. Воно проводиться у відповідності із вказівками «Методики определения коэффициента поглощения приемных элементов конического типа с использованием метода двух сфер» [1]:

$$\theta_\lambda = \frac{2 \cdot (\alpha_{max} - \alpha_{min})}{(\alpha_{max} + \alpha_{min})} \cdot 100 \% \quad (6.5)$$

де α – коефіцієнт поглинання приймального елемента ПИ-1.

Коефіцієнт поглинання на довжині хвилі 0,5 мкм перетворювача випромінювання ПИ-1

№ вим.	$U_0, \text{мВ}$	$U_1, \text{мВ}$	$U_{e2}, \text{мВ}$	$U_2, \text{мВ}$	μ	ρ	α	$\bar{\alpha}$	θ_λ
1	5	68	0,007	0,1078	0,0016	0,0021	0,9984	визначити	визначити
2				0,0889	0,0013		0,9987		
3				0,1645	0,0025		0,9975		
4				0,1582	0,0024		0,9976		
5				0,1708	0,0025		0,9974		

Коефіцієнт поглинання на довжині хвилі 1,06 мкм перетворювача випромінювання ПИ-1 [1]

№ вим.	$U_0, мВ$	$U_1, мВ$	$U_{e2}, мВ$	$U_2, мВ$	μ	ρ	α	$\bar{\alpha}$	θ_λ
1	12	103	0,0096	0,3281	0,0035	0,0032	0,9965	визначити	визначити
2				0,3463	0,0037		0,9963		
3				0,2862	0,0026		0,9974		
4				0,2826	0,0030		0,9970		
5				0,3006	0,0032		0,9968		

Коефіцієнт поглинання на довжині хвилі 1,54 мкм перетворювача випромінювання ПИ-1 [1]

№ вим.	$U_0, мВ$	$U_1, мВ$	$U_{e2}, мВ$	$U_2, мВ$	μ	ρ	α	$\bar{\alpha}$	θ_λ
1	9	87	0,0079	0,3121	0,0039	0,0042	0,9961	визначити	визначити
2				0,3511	0,0044		0,9956		
3				0,2965	0,0037		0,9963		
4				0,3823	0,0048		0,9952		
5				0,3355	0,0042		0,9958		

В результаті вимірювань встановлено, що значення коефіцієнту поглинання приймального елемента ПИ-1 на довжині хвилі 0,5 мкм $\alpha_{0,5}=0,9979$; на довжині хвилі 1,064 мкм $\alpha_{1,064}=0,9968$; на довжині хвилі 1,54 мкм $\alpha_{1,54}=0,9958$. Як наслідок, значення $\theta_\lambda \leq 0,1 \%$

Похибка що, зумовлена зміною температури в нормальних умовах експлуатації визначається за формулою [1]:

$$\theta_T = \frac{2 \cdot (S_{np.e.T1} - S_{np.e.T2})}{(S_{np.e.T1} + S_{np.e.T2}) \cdot (T_2 - T_1)} \cdot 100 \% \quad (6.6)$$

де $S_{np.e.T1}$, $S_{np.e.T2}$ - значення чутливості ПИ-1 до електричної енергії, яка подається в обмотку заміщення, при температурах $T_1=18$ С та $T_2=22$ С відповідно, $B/Дж$. Складова θ_T визначалась при значеннях енергії електричного імпульсу порядку 80 мДж.

$T, ^\circ C$	$Q_0, мДж$	$S_{np}, B/Дж$	$\theta_T, \%$
18	82,42	6,528	визначити
20		6,528	
22		6,516	

Похибка θ_H електронного пристрою ПИ-1 визначається за формулою [1]:

$$\theta_H = \sqrt{\theta_{АЦП}^2 + \theta_y^2} - \text{визначити} \quad (6.7)$$

де $\theta_y \leq 0,1\%$ - значення взято із каталогу на підсилювач INA118;

$\theta_{АЦП} \leq 0,05\%$ - максимальне значення НСП застосованого АЦП AD7714.

Оцінка θ_τ що, зумовлена відмінністю значень щільності імпульсної потужності при різних значеннях тривалості імпульсів проводилась на ВЕ в наступній послідовності:

- визначення коефіцієнту еквівалентності для ПИ-1 на ВЕ при тривалості імпульсу порядку 1 с із співвідношення (6.8)[1]:

$$K_e = \frac{S_{np.e}}{S_{np.o}} \quad (6.8)$$

де $S_{np.e}$, - чутливість ПИ-1 до електричної енергії;

$S_{np.o}$ - чутливість ПИ-1 до оптичної енергії.

- Опромінення приймального елемента ПИ-1 на довжині хвилі 1,064 мкм при енергії імпульсу порядку 150-170 мДж та тривалості імпульсу $5 - 10 \cdot 10^{-9}$ с. Кількість імпульсів в серії – 20, час між імпульсами 3-5 хв.

- Повторне проведення вимірювань K_e після опромінення.

Значення θ_τ визначається із співвідношення (6.9):

$$\theta_\tau = \frac{2 \cdot (K_{e1} - K_{e2})}{K_{e1} + K_{e2}} \cdot 100\% - \text{визначити} \quad (6.10)$$

де $K_{e1} = 0,9802$ - коефіцієнт еквівалентності ПИ_1 до опромінення;

$K_{e1} = 0,9779$ - - коефіцієнт еквівалентності ПИ_1 після опромінення.

Похибка θ_e що, зумовлена похибками електронної вимірювальної апаратури, по суті, визначається похибкою вимірювання опору обмотки електричного заміщення ПИ-1. Енергія, що подається в обмотку визначається [1]:

$$Q = \left(\frac{U}{R_{em}} \right)^2 \cdot R_z \cdot \tau_{i.e}$$

де U – падіння напруги на зразковому опорі, мВ;

R_{em} - значення еталонного опору, Ом;

R_z - значення опору обмотки заміщення, Ом;

$\tau_{i.e}$ - тривалість електричного імпульсу, який формується пристроєм електричної калібровки, с.

$$\text{Тоді } \theta_e = \sqrt{\theta_{\text{АЦП}}^2 + 2 \cdot \theta_R^2}$$

де $\theta_{\text{АЦП}} \leq 0,05 \%$ - максимальне значення НСП застосованого АЦП AD7714;

$\theta_R \leq 0,1 \%$ - похибка мультиметра В7-46 при вимірюванні опору (взято із паспорту на ЗВ).

В результаті маємо:

$$\theta_e = \sqrt{\theta_{\text{АЦП}}^2 + 2 \cdot \theta_R^2} - \text{визначити}$$

Проведені вимірювання і розрахунки показують, що сумарна похибка ПИ-1 [1]:

$$S_{\text{ПИ}-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\theta_0^2 + \theta_{xy}^2 + \theta_\lambda^2 + \theta_\tau^2 + \theta_{II}^2 + \theta_T^2 + \theta_e^2} - \text{визначити}$$

Тоді значення сумарної похибки еталону [1]:

$$S_{\Sigma PEE} = \sqrt{S_{BE}^2 + S_{PBE}^2 + S_{\text{ПИ}-1}^2}$$

де S_{BE} - похибка відтворення одиниці ВЕ, виражена у вигляді СКВ $S_{BE} \leq 0,15 \%$;

S_{PBE} - похибка передачі розміру одиниці енергії робочому еталону, виражена у вигляді СКВ $S_{PBE} \leq 0,15 \%$

Тоді маємо:

$$S_{\Sigma PEE} = \sqrt{S_{BE}^2 + S_{PBE}^2 + S_{\text{ПИ}-1}^2} - \text{визначити.}$$

Завдання 3.2 Визначити похибку передачі розміру одиниці енергії повіряємому (калібруємому) ЗВ

Похибка передачі розміру одиниці енергії повіряємому (калібруємому) ЗВ оцінювалась за результатами вимірювання відношення вихідного сигналу U_{ki} перетворювача ПИ-2 і вихідного сигналу перетворювача ПИ-1, пропорційного енергії Q_{e1} .

В якості джерел використовувались лазерні пристрої ЛТИ-247, ПЧ-1 та ЛТИ-139. Вимірювання відношення $\frac{U_{ki}}{Q_{e1}}$ проводилися серіями із усередненням

по 5 відліками. Інтервал між імпульсами складав 5 хв. В кожній серії визначалось середнє значення $\frac{U_{ki}}{Q_{e1}}$ вимірюваних сигналів.

Похибка передачі визначається із співвідношення [1]:

$$S_n = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (6.11)$$

де σ_1, σ_2 - значення СКВ показань ПИ-1, ПИ-2, які визначаються за час передачі розміру одиниці енергії $t = 1 \text{ год}$ [1]

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{1}{\bar{S}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{S}_{np} - S_{np.i})^2}{n \cdot (n-1)}} \cdot 100\%$$

де $S_{np.i}$ - i - те значення відношення $\frac{U_{ki}}{Q_{e1}}$.

варіант	Дано			Знайти		
	U_{ki} для ПИ-1 U_{ki} для ПИ-2	Q_{e1} , мДж	λ , мкм	σ_1	σ_2	S_n
1	$U1 = \begin{pmatrix} 1.017924 \\ 1.001226 \\ 0.996543 \\ 1.00071 \\ 1.010701 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.994949 \\ 0.999001 \\ 0.997706 \\ 0.997819 \\ 0.992613 \end{pmatrix}$	153,97	1,06			
	$U1 = \begin{pmatrix} 0.403566 \\ 0.406706 \\ 0.407338 \\ 0.413131 \\ 0.406636 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.412109 \\ 0.406393 \\ 0.409258 \\ 0.413459 \\ 0.407156 \end{pmatrix}$	62,68	1,06			
	$U1 = \begin{pmatrix} 0.045221 \\ 0.044636 \\ 0.045286 \\ 0.04459 \\ 0.044771 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.0451 \\ 0.044252 \\ 0.0446 \\ 0.044816 \\ 0.04519 \end{pmatrix}$	6,82	1,06			
	$U1 = \begin{pmatrix} 0.271129 \\ 0.26981 \\ 0.272004 \\ 0.270401 \\ 0.270864 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.270555 \\ 0.269406 \\ 0.271299 \\ 0.271157 \\ 0.271952 \end{pmatrix}$	41,42	0,53			
2	$U1 = \begin{pmatrix} 0.019057 \\ 0.019029 \\ 0.018916 \\ 0.018971 \\ 0.019055 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.019018 \\ 0.019064 \\ 0.018947 \\ 0.019102 \\ 0.019125 \end{pmatrix}$	2,9	0,53			

$U1 = \begin{pmatrix} 0.692211 \\ 0.689506 \\ 0.693422 \\ 0.694102 \\ 0.691925 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.698712 \\ 0.702475 \\ 0.69118 \\ 0.694591 \\ 0.700837 \end{pmatrix}$	106,2	1,54			
$U1 = \begin{pmatrix} 0.361698 \\ 0.391698 \\ 0.358203 \\ 0.358148 \\ 0.359733 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 0.361565 \\ 0.358418 \\ 0.364541 \\ 0.361446 \\ 0.35865 \end{pmatrix}$	54,96	1,54			
$U1 = \begin{pmatrix} 3.286544 \\ 3.27917 \\ 3.276695 \\ 3.286695 \\ 3.276138 \end{pmatrix} U2 = \begin{pmatrix} 3.274946 \\ 3.263409 \\ 3.224628 \\ 3.254381 \\ 3.20366 \end{pmatrix}$	502	1,54			

Визначити експериментальне значення S_n та зробити висновок про співпадіння або ні із теоретичним значенням.

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Який стандарт забезпечує єдність вимірювання середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12 мкм.

2. Яке буде значення невилученої систематичної похибки при відтворенні одиниці середньої потужності лазерного випромінювання (1 Вт) Державним спеціальним еталоном.

3. Яке буде значення невилученої систематичної похибки при відтворенні одиниці енергії імпульсного лазерного випромінювання (1 Дж) Державним спеціальним еталоном.

4. Яке буде значення СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці енергії імпульсного лазерного випромінювання (1 Дж) Державним спеціальним еталоном.

5. Яке буде значення невилученої систематичної похибки при передаванні розміру одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання робочим еталоном методом прямих вимірювань при (1 Вт) Державним спеціальним еталоном.

Література

1. Голубь Б.И., Котюк А.Ф., Кузин А.Ю. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений. – М.: Горячая линия – Телеком. 2006. – 151с.: ил.

2. ДСТУ 3193-2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням.

3. ДСТУ 3539-97 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм.

4. ДЕТУ 11-02-15 Відтворення та зберігання одиниць середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання великих рівнів при довжині хвилі 10,6 мкм.

5. ДЕТУ 11-04-97 Відтворення та зберігання одиниць середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання.

Практичне заняття № 7

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ ЗБІЛЬШЕННЯ

Мета роботи: оцінити точність вимірювання фокусної відстані оптичної системи методом збільшення

1. Підготовка до роботи

1. Схема пристрою для вимірювання f' методом збільшення при прямому ході променів.
2. Схема пристрою для вимірювання f' методом збільшення при зворотному ході променів.
3. Схема вимірювання фокусної відстані від'ємних лінз.
4. Схема вимірювання фокусної відстані методом Аббе.

2. Теоретичні відомості

2.1 Метод збільшення

Цей метод заснований на визначенні лінійного збільшення та розрахунку f'

Вимірювання лінійного збільшення виконується за двома схемами. В першій схемі рис.7 а тест-об'єкт 3, розташований в фокальній площині об'єктиву 4 коліматора та освітлений за допомогою джерела світла 1 через конденсор 2, проектується досліджуванним об'єктивом 5 в його фокальну площину. Зображення тест – об'єкту (сітка з вертикальними штрихами) розглядають за допомогою мікроскопу 6 та вимірюють відстань y' між вибраними штрихами сітки окуляр-мікрометром, який встановлений на мікроскопі. Апертурний кут мікроскопу 6 повинен бути не меншим за апертурний кут досліджуваного об'єктиву.

У другій схемі рис.7 б тест-об'єкт 3, освітлений джерелом 1 через конденсор 2, розташований в фокальній площині досліджуваного об'єктиву 4. Його зображення розглядають та вимірюють за допомогою зорової труби 5 з окуляр-мікрометром. При цьому відстань y між штрихами в площині предмету, фокусна відстань f'_k об'єктиву коліматора в першій схемі та фокусна відстань f'_T об'єктиву зорової труби для другої схеми повинні бути відомі з максимальною точністю. Тоді фокусна відстань досліджуваного об'єктиву [1, 2]:

- для першої схеми:

$$f' = \frac{y'}{y} \cdot f'_k \quad (7.1)$$

- для другої схеми:

$$f' = \frac{y}{y'} \cdot f'_T \quad (7.2)$$

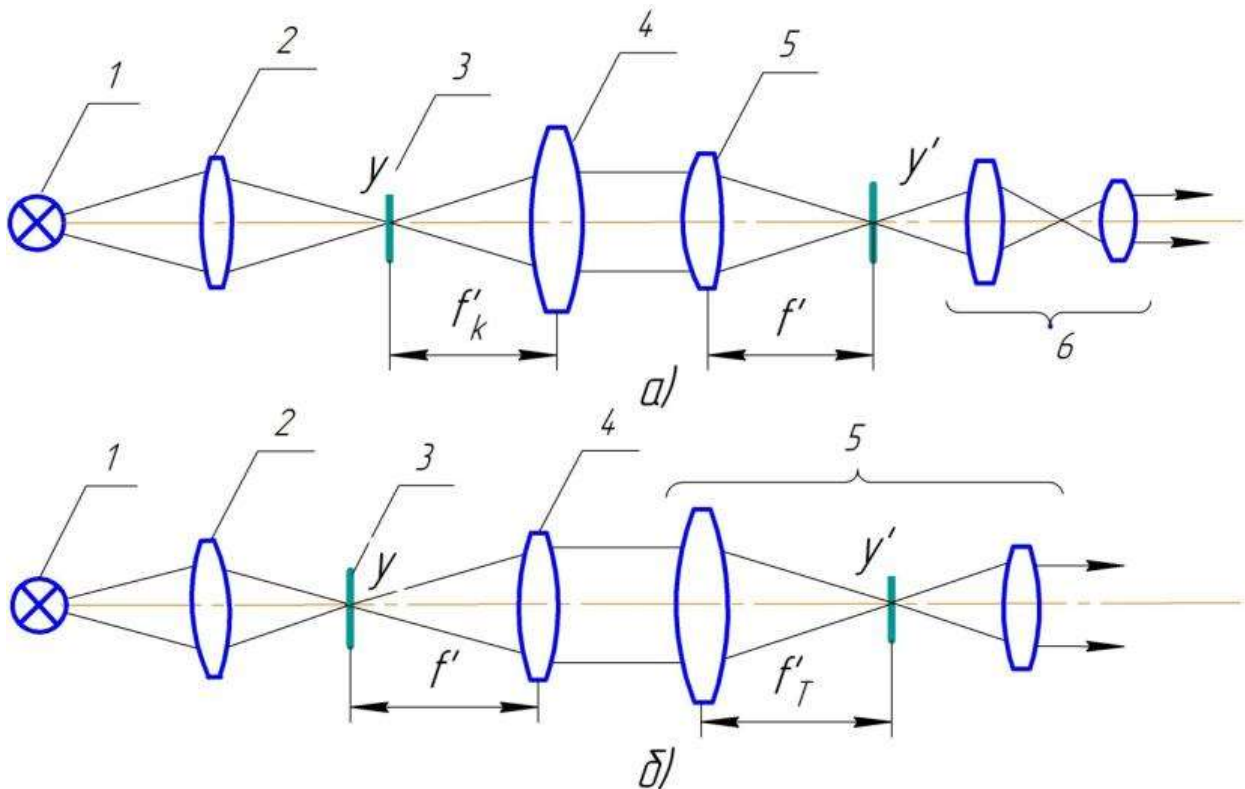


Рисунок 7.1 – Схеми пристрою для вимірювання f' методом збільшення при ході променів: а) прямому; б) зворотному

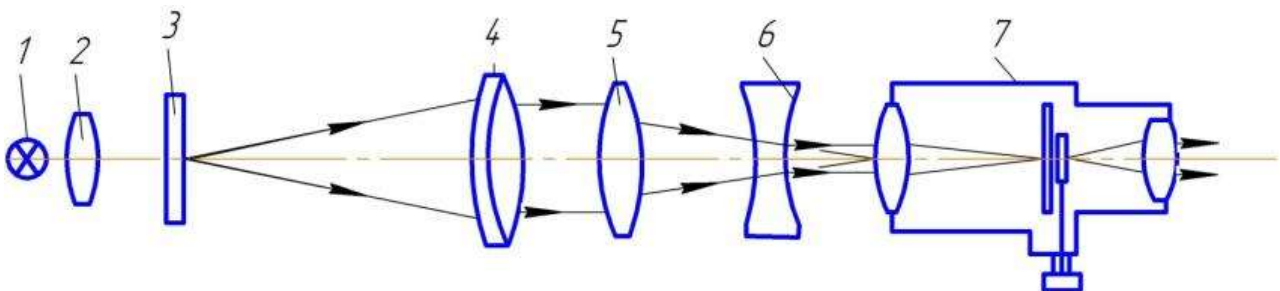


Рисунок 7.2 – Схема вимірювання фокусної відстані від'ємних лінз

Для визначення похибки методу визначаємо відносну похибку визначення фокусної відстані, для цього прологарифмуємо та продиференціюємо вираз (7.1) [2]:

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta f'_k}{f'_k} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta y'}{y'} \quad (7.3)$$

Із врахуванням граничних похибок вимірювання f'_k та y [2]:

$$\frac{\Delta f'_k}{f'_k} = 0,2 \% \text{ та } \frac{\Delta y}{y} = 0,02 \%$$

Із врахуванням інструментальних похибок окуляр-мікрометра, похибок шкали, наведення перехрестя окуляр-мікрометра на зображення штрихів сітки та інших $\frac{\Delta y'}{y'} = 0,1 \dots 0,3 \%$ вимірюваної величини. Тоді відносна похибка при вимірюванні фокусної відстані методом збільшення буде складати 0,3-0,6 %.

Методом збільшення можна визначити фокусну відстань від'ємних лінз та оптичних систем. Для цього від'ємну систему або лінзу 6 (рис.7.2) необхідно доповнити позитивною системою 5 з великою фокусною відстанню. Додаткова позитивна система 5 та вимірювана від'ємна лінза 6 в сукупності складають трубку Галілея. Джерело світла 1 за допомогою конденсора 2 освітлює тест-об'єкт 3 (шкала з вертикальними штрихами), по якому визначають розмір предмету y . Предмет, розташований в фокальній площині об'єктиву 4 коліматора, зображується трубкою Галілея в фокальній площині об'єктиву зорової труби 7. Зображення предмету y' вимірюють за допомогою окуляр мікрометра зорової труби.

Для визначення фокусної відстані від'ємної системи виконують два вимірювання розміру предмету: y'' - з трубкою Галілея та y' - без трубки Галілея. Тоді збільшення трубки визначається:

$$\Gamma_T = \frac{y'}{y''} \quad (7.4)$$

Одночасно збільшення $\Gamma_T = \frac{f'_n}{f'}$, де f'_n - фокусна відстань додаткової позитивної системи; f' - вимірювана фокусна відстань від'ємної системи. Звідси маємо, що:

$$f' = \frac{y'' \cdot f'_n}{y'} \quad (7.5)$$

де y' та f'_n - постійні установки, які можуть бути виміряні з мінімальною похибкою. Похибка вимірювань від'ємних систем досягає 0,6 %.

З великою точністю фокусна відстань можна виміряти методами Аббе та кутових вимірювань.

2.2 Метод Аббе

Метод заснований на визначенні збільшення для декількох (не менше двох) положень предмету, розташованого перпендикулярно до оптичної осі досліджуваної системи [2].

Принцип вимірювання фокусної відстані цим методом полягає в наступному (рис.7.3 а). Нехай y_1 та y_2 - два предмета, що розташовані на відстанях z_1 та z_2 від переднього фокусу досліджуваної системи, а y'_1 та y'_2 - їх зображення. Тоді:

$$z_1 = f' \cdot \frac{y_1}{y'_1} = f' \cdot \gamma_1; \quad z_2 = f' \cdot \frac{y_2}{y'_2} = f' \cdot \gamma_2$$

$$\text{де } \gamma_1 = \frac{1}{\beta_1} = \frac{y_1}{y'_1}; \quad \gamma_2 = \frac{1}{\beta_2} = \frac{y_2}{y'_2} \quad - \text{кутове збільшення в спряжених}$$

площинах.

Із наведених співвідношень отримаємо:

$$f' = \frac{z_2 - z_1}{\gamma_2 - \gamma_1} = \frac{a}{\frac{y_2}{y'_2} - \frac{y_1}{y'_1}}$$

де $a = z_2 - z_1$.

Вимірювання f' методом Аббе виконують на інструментальному мікроскопі або спеціальному приладі – фокометрі Аббе. Вимірювання не залежать від точності фокусування на зображення предмету, оскільки схема має телецентричний хід променів (після досліджуваної системи головні промені вихідних пучків йдуть паралельно до оптичної осі).

Фокометр Аббе складається із мікроскопу 1 рис. а, столика 3 для встановлення контрольованого об'єктиву 2 та скляної шкали 4. В приладі скляна шкала переміщується вертикально, паралельно до оптичної осі досліджуваної системи. Столик із контрольованим об'єктом переміщується горизонтально відносно мікроскопу і його положення фіксується за горизонтальною шкалою.

Перед вимірюваннями оптичну ось мікроскопу 1 суміщають із оптичною віссю контрольованого об'єктиву 2. Контрольований об'єктив встановлюють так, щоб оптична вісь мікроскопу проходила через середину шкали. Для цього без контрольованого об'єктиву розглядають через мікроскоп один із штрихів скляної шкали 4, суміщаючи її з предметною площиною мікроскопу. Потім встановлюють контрольований об'єктив на предметний столик, опускаючи шкали до того положення, при якому розглядуваний штрих виявиться в початково встановленому положенні відносно перехрестя сітки мікроскопу.

Вимірювання виконують суміщенням столика із контрольованим об'єктивом в одну та іншу сторону від середнього положення шкали.

Розмір предмету y_1 визначається різницею за скляною шкалою 4, а розмір зображення y'_1 за шкалою переміщення столика в горизонтальному напрямку. Перший відлік знімають в положенні І контрольованого об'єктиву (рис.7.3 б), коли мікроскоп сфокусований на зображенні A' штриха А, другий відлік знімають в симетричному відносно оптичної осі положенні ІІ, коли мікроскоп сфокусований на зображенні B' штриха В скляної шкали, розташоване в тому ж місці, що і A' .

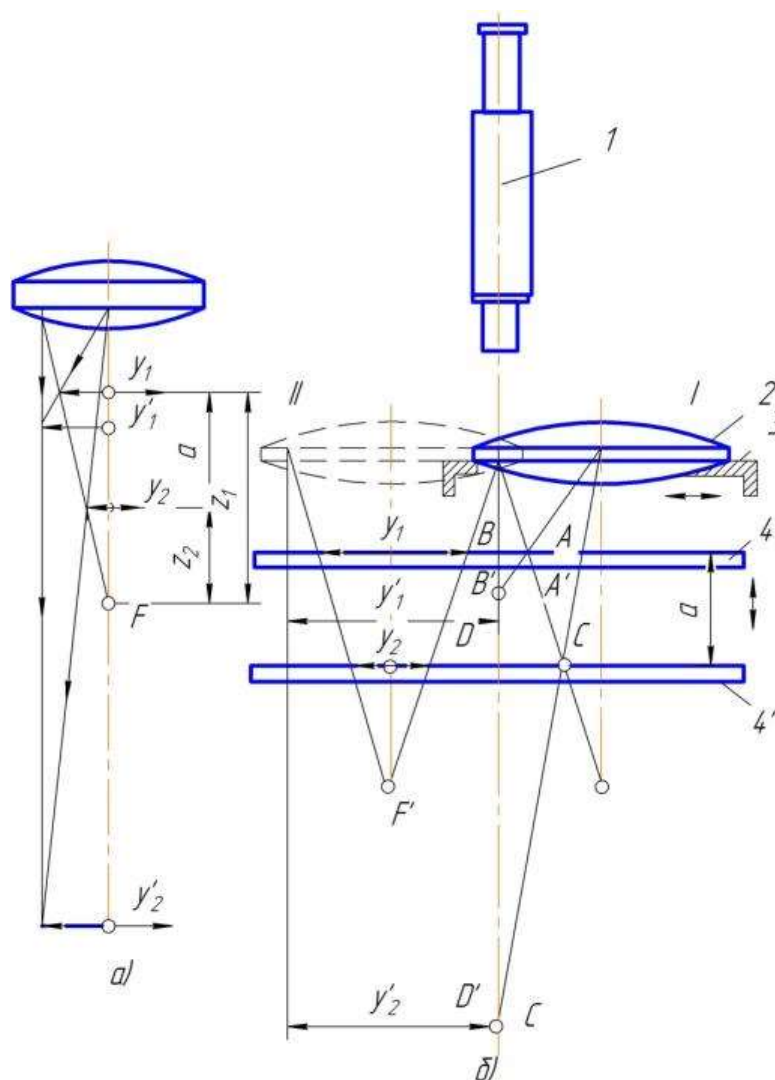


Рисунок 7.3 Схема вимірювання фокусної відстані методом Аббе: а) для розрахунку; б) для вимірювання

Значення відрізка АВ позначаємо q_1 , тоді розмір предмету:

$$y_1 = y'_1 - q_1$$

Повернувши досліджуваний об'єктив в положення І, зміщуємо скляну шкалу в положення $4'$ та фокусуємо на неї мікроскоп, розглядаючи зображення

C' штриха C . Знову змістивши досліджуваний об'єктив в положення Π , спостерігаємо зображення D' штриха D . Значення відрізка CD позначаємо q_2 . Розмір зображення y'_2 буде рівний значенню переміщення столу, а розмір предмету $y_2 = y'_2 - q_2$. Розраховуємо фокусну відстань контрольованого об'єктиву за формулою [2]:

$$f' = \frac{a}{\left(\frac{y'_2 - q_2}{y'_2}\right) - \left(\frac{y'_1 - q_1}{y'_1}\right)} = \frac{a}{\left(\frac{q_1}{y'_1}\right) - \left(\frac{q_2}{y'_2}\right)} \quad (7.6)$$

Якщо при зміщенні скляної шкали в обох положеннях контрольований об'єктив переміщувати на одну і ту ж відстань, то $y'_1 = y'_2 = y$, тоді:

$$f' = \frac{a \cdot y'}{q_1 - q_2}$$

За даною формулою визначають фокусну відстань для певної зони контрольованого об'єктиву. Повторивши аналогічні вимірювання для різних зон, знаходять залежність f' від зони. Побудувавши графік залежності та екстраполюючи його до $y' = 0$, можна визначити фокусну відстань для параксимальної області.

Для визначення похибки методу прологарифмуємо та диференціюємо формулу 7.6 [2]:

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta y'}{y'} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta q_1}{q_1 - q_2} + \frac{\Delta q_2}{q_1 - q_2} \quad (7.7)$$

Похибка при визначенні f' цим методом в основному виникає внаслідок похибки вимірювання зображення y' , оскільки значення переміщення a скляної шкали та відстань між штрихами можна виміряти із високою точністю.

Похибка вимірювання y' залежить від якості зображення контрольованого об'єктиву, розміру зображення та інструментальних похибок відлікового пристрою.

Загальна похибка вимірювання фокусної відстані методом Аббе складає 0,2-0,5 %. Фокусна відстань оптичних систем із великими діаметрами значка входу може бути виміряна зі значно меншою похибкою. Цим методом вимірюють фокусні відстані об'єктивів коліматорів, що мають великі діаметри зіниць входу.

3. Виконання завдання

Завдання 3.1 Оцінити точність непрямих вимірювань фокусної відстані оптичної системи методом збільшення

Значення фокусної відстані оптичної системи розраховується за формулою:

$$f' = \frac{y'}{y} \cdot f'_k \quad (7.8)$$

В результаті вимірів отримані значенні величин y , y' , f'_k

Визначити значення фокусної відстані, точність цього значення, степінь впливу первинних похибок, визначити довірчий інтервал з імовірністю 0,68; 0,95; 0,99.

Таблиця – Вихідні дані до роботи

Варіант	Величина предмету y	Величина зображення y'	Фокусна відстань об'єктиву коліматора f'_k	Ймовірність P , %
приклад	20.07 19.95 20.03 19.90 20.05	-38.21 -38.38 -38.19 -38.35 -38.37	52.19 52.62 52.45 52.71 52.56	
1	$y = \begin{pmatrix} 21.737 \\ 21.592 \\ 21.716 \\ 21.429 \\ 20.989 \\ 22.026 \\ 21.928 \end{pmatrix}$	$y' = \begin{pmatrix} 39.306 \\ 40.205 \\ 39.445 \\ 39.542 \\ 39.474 \\ 39.504 \\ 39.37 \end{pmatrix}$	$f'_k = \begin{pmatrix} 54.426 \\ 55.038 \\ 54.584 \\ 55.383 \\ 54.9 \\ 54.646 \\ 54.602 \end{pmatrix}$	56; 75; 95
2	$y = \begin{pmatrix} 24.715 \\ 24.558 \\ 24.692 \\ 24.382 \\ 23.904 \\ 25.028 \\ 24.922 \end{pmatrix}$	$y' = \begin{pmatrix} 41.306 \\ 42.205 \\ 41.445 \\ 41.542 \\ 41.474 \\ 41.504 \\ 41.37 \end{pmatrix}$	$f'_k = \begin{pmatrix} 56.426 \\ 57.038 \\ 56.584 \\ 57.383 \\ 56.9 \\ 56.646 \\ 56.602 \end{pmatrix}$	65; 80; 99

3	$y = \begin{pmatrix} 22.222 \\ 22.986 \\ 23.024 \\ 23.199 \\ 23.369 \\ 23.179 \\ 22.487 \\ 21.789 \end{pmatrix}$	$y' = \begin{pmatrix} 38.475 \\ 38.086 \\ 37.396 \\ 37.444 \\ 37.473 \\ 38.167 \\ 37.759 \\ 38.781 \end{pmatrix}$	$fk' = \begin{pmatrix} 54.85 \\ 55.926 \\ 56.248 \\ 56.879 \\ 55.263 \\ 55.769 \\ 56.286 \\ 56.112 \end{pmatrix}$	60;82; 95
4	$y = \begin{pmatrix} 21.147 \\ 21.39 \\ 21.617 \\ 21.699 \\ 21.673 \\ 21.195 \\ 20.48 \\ 21.349 \end{pmatrix}$	$y' = \begin{pmatrix} 36.91 \\ 36.482 \\ 38.269 \\ 36.258 \\ 35.984 \\ 37.232 \\ 36.143 \\ 36.753 \end{pmatrix}$	$fk' = \begin{pmatrix} 54.525 \\ 53.659 \\ 53.454 \\ 53.479 \\ 54.658 \\ 53.386 \\ 53.249 \\ 54.375 \end{pmatrix}$	67;85;97
5	$y = \begin{pmatrix} 22.213 \\ 21.683 \\ 21.768 \\ 23.096 \\ 22.165 \\ 23.773 \\ 20.672 \\ 22.067 \\ 22.357 \end{pmatrix}$	$y' = \begin{pmatrix} 38.221 \\ 37.465 \\ 35.712 \\ 35.971 \\ 38.797 \\ 37.55 \\ 36.998 \\ 36.366 \\ 36.237 \end{pmatrix}$	$fk' = \begin{pmatrix} 52.777 \\ 53.21 \\ 54.837 \\ 54.709 \\ 54.57 \\ 53.204 \\ 53.69 \\ 55.205 \\ 54.018 \end{pmatrix}$	70;85;98

Рішення

1. Розраховуємо середнє значення вимірюваних величин за формулою:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (7.9)$$

Тоді для вимірюваних величин маємо:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}; \bar{y}' = \sum_{i=1}^n \frac{y'_i}{n}; \bar{f}'_k = \sum_{i=1}^n \frac{f_{ki}}{n}$$

2. Визначити середнє квадратичне відхилення вимірюваних величин за формулою [1]:

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7.10)$$

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}; S_{y'} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y'_i - \bar{y}')^2}{n-1}}; S_{f'_k} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_{ki} - \bar{f}'_k)^2}{n-1}}.$$

3. Визначити середнє квадратичне відхилення середнє арифметичної за формулою [1]:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (7.11)$$

$$S_{\bar{y}} = \frac{S_y}{\sqrt{n}}; S_{\bar{y}'} = \frac{S_{y'}}{\sqrt{n}}; S_{\bar{f}'_k} = \frac{S_{f'_k}}{\sqrt{n}}.$$

4. Визначити значення фокусної відстані системи за формулою [1]:

$$\bar{f} = \frac{y'}{y} \cdot \bar{f}'_k \quad (7.12)$$

5. Визначити $\sigma_{\bar{f}}$ за формулою [1]:

$$S_{\bar{f}}^2 = \left(\frac{d\bar{f}}{dy} \right)^2 \cdot S_{\bar{y}}^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{dy'} \right)^2 \cdot S_{\bar{y}'}^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{df'_k} \right)^2 \cdot S_{\bar{f}'_k}^2 \quad (7.13)$$

Попередньо вираховуємо частинну похідну за формулами [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{f}}{dy} &= -\frac{y'}{y^2} \cdot \bar{f}'_k & \frac{d\bar{f}}{dy} &= -\frac{\bar{y}'}{\bar{y}^2} \cdot \bar{f}'_k \\ \frac{d\bar{f}}{dy'} &= -\frac{f'_k}{y} & \frac{d\bar{f}}{dy'} &= -\frac{\bar{f}'_k}{\bar{y}} \end{aligned}$$

$$\frac{df}{df_k'} = -\frac{y'}{y}$$

$$\frac{d\bar{f}}{df_k'} = \frac{y'}{y}$$

6. Визначити ступінь впливу первинних похибок [1]:

$$K_y = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{dy} \right|^2 \cdot S_{\bar{y}} \cdot 100\%, \quad K_{y'} = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{dy'} \right|^2 \cdot S_{\bar{y}'} \cdot 100\%$$

$$K_{f_k'} = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{df_k'} \right|^2 \cdot S_{\bar{f}_k} \cdot 100\%$$

Як видно із розрахунків найбільшу роль при визначенні $\bar{f}$ має первинна похибка $K_{f_k'} = 43,64\%$, в основному за рахунок малої точності вимірювання f_k' . Значне підвищення точності визначення фокусної відстані системи можна досягти за рахунок збільшення точності вимірювань f_k' та y .

7. Визначити довірчий інтервал при довірчій ймовірності

	<i>Коефіцієнт нормованого відхилення</i>	<i>Інтегральна функція нормованого нормального розподілу</i>	<i>Довірча ймовірність</i>	<i>Довірчі границі випадкової похибки</i> $\Delta_P = t_P \cdot \sigma_{\bar{f}}$
$\pm 1 \cdot \sigma_{\bar{f}}$	$t_P = \pm 1$	$\Phi(t_P) = 0.8413$	$P\{-t_P < t_P < +t_P\} = 2 \cdot \Phi(t_P) - 1 =$ $= 0.6826 = 68.26\%$	0,259637 мм
$\pm 2 \cdot \sigma_{\bar{f}}$	$t_P = \pm 2$	$\Phi(t_P) = 0.9773$	$P\{-t_P < t_P < +t_P\} = 2 \cdot \Phi(t_P) - 1 =$ $= 0.9546 = 95.46\%$	0.519611 мм
$\pm 3 \cdot \sigma_{\bar{f}}$	$t_P = \pm 3$	$\Phi(t_P) = 0.99865$	$P\{-t_P < t_P < +t_P\} = 2 \cdot \Phi(t_P) - 1 =$ $= 0.9973 = 99.73\%$	0,779 мм

Результат вимірювання записати у формі $f = \bar{f} \pm \Delta_P, P = \%$

$$f = (-100,549 \pm 0,2596) \text{ мм}, P = 68,26 \%$$

$$f = (-100,549 \pm 0,5196) \text{ мм}, P = 95,46 \%$$

$$f = (-100,549 \pm 0,779) \text{ мм}, P = 99,73 \%$$

Оцінка точності непрямих вимірювань

Завдання. Оцінити точність непрямих вимірювань фокусної відстані оптичної системи методом збільшення

Вихідні дані

Величина предмету y

$$i := 1..5 \quad n := 5$$

$$y_i :=$$

20.07
19.95
20.03
19.9
20.05

$$y'_i :=$$

-38.21
-38.38
-38.19
-38.35
-38.37

$$fk'_i :=$$

52.19
52.62
52.45
52.71
52.56

Величина зображення y'

Фокусна відстань об'єктиву коліматора fk'

1. Розраховуємо середнє значення вимірюваних величин за формулою:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

$$y_{sr} := \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad y_{sr} = 20$$

$$y'_{sr} := \frac{\sum_{i=1}^n y'_i}{n} \quad y'_{sr} = -38.3$$

$$fk'_{sr} := \frac{\sum_{i=1}^n fk'_i}{n} \quad fk'_{sr} = 52.506$$

2. Визначити середнє квадратичне відхилення вимірюваних величин за формулою:

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$S_y := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{sr})^2}{n-1}} \quad S_y = 0.072$$

$$S_{y'} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y'_{sr})^2}{n-1}}$$

$$S_{y'} = 0.092$$

$$S_{fk'} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (fk'_i - fk'_{sr})^2}{n-1}}$$

$$S_{fk'} = 0.2$$

3. Визначити середнє квадратичне відхилення середнє арифметичної за формулою:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

$$S_{ysr} := \frac{S_y}{\sqrt{n}}$$

$$S_{ysr} = 0.032249$$

$$S_{y'sr} := \frac{S_{y'}}{\sqrt{n}}$$

$$S_{y'sr} = 0.041231$$

$$S_{fk'sr} := \frac{S_{fk'}}{\sqrt{n}}$$

$$S_{fk'sr} = 0.089588$$

4. Визначити значення фокусної відстані системи за формулою:

$$\bar{f} = \frac{y'}{y} \cdot \bar{f}'_k$$

$$f_{sr} := \left(\frac{y'sr}{ysr} \right) \cdot fk'sr$$

$$f_{sr} = -100.549$$

5. Визначити $\sigma_{\bar{f}}$ за формулою:

$$S_{\bar{f}}^2 = \left(\frac{d\bar{f}}{dy} \right)^2 \cdot S_y^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{dy'} \right)^2 \cdot S_{y'}^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{df'_k} \right)^2 \cdot S_{f'_k}^2$$

Попередньо вираховуємо власну похідну за формулами

$$\frac{d\bar{f}}{dy} = -\frac{y'}{y^2} \cdot \bar{f}'_k$$

$$dfdy := -\left(\frac{y'sr}{ysr^2} \right) \cdot fk'sr$$

$$dfdy = 5.027$$

$$\frac{d\bar{f}}{dy'} = -\frac{\bar{f}'_k}{y}$$

$$dfdy' := -\left(\frac{fk'sr}{ysr} \right)$$

$$dfdy' = -2.625$$

$$\frac{d\bar{f}}{df'_k} = \frac{y'}{y}$$

$$dfdfk' := \left(\frac{y'sr}{ysr} \right)$$

$$dfdfk' = -1.915$$

$$S_{fsr} := \sqrt{(dfdy)^2 \cdot S_{ysr}^2 + (dfdy')^2 \cdot S_{y'sr}^2 + (dfdfk')^2 \cdot S_{fk'sr}^2}$$

$$S_{fsr} = 0.259685$$

6. Визначити ступінь впливу первинних похибок

$$K_y = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{dy} \right|^2 \cdot S_y$$

$$K_y := \left(\frac{1}{S_{fsr}^2} \right) \cdot (|dfdy|)^2 \cdot S_{ysr}^2 \cdot 100$$

$$K_y = 38.979$$

$$K_{y'} = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{dy'} \right|^2 \cdot S_{y'} \cdot 100\%$$

$$K_{y'} := \left(\frac{1}{S_{fsr}^2} \right) \cdot (|dfdy'|)^2 \cdot S_{y'sr}^2 \cdot 100$$

$$K_{y'} = 17.375$$

$$K_{f'_k} = \frac{1}{S_{\bar{f}}^2} \cdot \left| \frac{d\bar{f}}{df'_k} \right|^2 \cdot S_{f'_k} \cdot 100\%$$

$$K_{fk'} := \left(\frac{1}{S_{fsr}^2} \right) \cdot (|dfdfk'|)^2 \cdot S_{fk'sr}^2 \cdot 100$$

$$K_{fk'} = 43.646$$

7. Визначити довірчий інтервал при довірчій ймовірності

$$\Delta_P = t_P \cdot \sigma_{\bar{f}} =$$

$$tp1 := qnorm\left[\frac{(0.6826 + 1)}{2}, 0, 1\right]$$

$$tp1 = 1$$

$$\Delta p1 := tp1 \cdot Sfsr$$

$$\Delta p1 = 0.259637$$

$$tp2 := qnorm\left[\frac{(0.9546 + 1)}{2}, 0, 1\right]$$

$$tp2 = 2.001$$

$$\Delta p2 := tp2 \cdot Sfsr$$

$$\Delta p2 = 0.519611$$

$$tp3 := qnorm\left[\frac{(0.9973 + 1)}{2}, 0, 1\right]$$

$$tp3 = 3$$

$$\Delta p3 := tp3 \cdot Sfsr$$

$$\Delta p3 = 0.779$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Який параметр найбільше впливає на визначення $\bar{f}$.
2. Інтегральна функція нормованого нормального розподілу, як визначити.
3. Довірча ймовірність. Наведіть формулу.
4. Похибка при визначенні f' методом Аббе.
5. Схеми пристрою для вимірювання f' методом збільшення в прямому ході променів.
6. Схеми пристрою для вимірювання f' методом збільшення в зворотному ході променів.

Література

1. Оптичні вимірювання: Метрологічна обробка результатів вимірювання: Метод. Вказівки до самостійної роботи студентів напряму підготовки 6.051004 «Оптехніка» /Уклад.: Л.А.Міхеєнко, М.С. Рибалко. –К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 38 с.
2. Электронный учебник по дисциплине: «Проектирование оптико-электронных приборов» Авторы:Латыев С.М., Егоров Г.В., Тимощук И.Н. СпбГУ ИТМО, кафедра КиПОП. http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=9
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов. /В.А.Панов, М.Я.Кругер, В.В.Кулагин и др.; Под общ. Ред. В.А.Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
4. Кириловский В.К. Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений. Учебное пособие. СПб. ГИТМО(ТУ). 2003. – 47 с.

Практичне заняття №8

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ВІДНОСНОГО РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ЕНЕРГІЇ (ПОТУЖНОСТІ) ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи:

1. Проаналізувати розширену невизначеність при вимірюванні відносного розподілу щільності енергії (ВРЩЕ) однократним вимірюванням в одній точці.
2. Проаналізувати розширену невизначеність при вимірюванні ВРЩЕ однократним вимірюванням в одній точці.

1. Підготовка до роботи

1. Метод А вимірювання відносного розподілу щільності енергії.
2. Схема розташування засобів вимірювання та допоміжних пристроїв.
3. Основні складові частини, що входять до комплексу вимірювання відносного розподілу щільності енергії.
4. Вимірювання ВРЩЕ методом Б.

2. Теоретичні відомості

2.1 Класифікація невизначеностей вимірювання

Невизначеність (непевності) вимірювання можна систематизувати за наступними ознаками [4]:

- За способами оцінювання;
- За формами подання

Метою поділу на тип А та В є показ двох різних способів оцінювання компонентів невизначеності, і він використовується тільки для зручності обговорення. Обидва типи оцінювання базуються на розподілах ймовірностей, і компоненти невизначеності кожного типу кількісно визначаються дисперсією або стандартним відхиленням.

За типом А оцінюються невизначеності, що підлягають повторним вимірюванням, до яких можна застосувати статистичні методи.

За типом В оцінюються невизначеності, до яких статистичні методи застосувати неможливо. В таких випадках використовують інші відомі способи.

Що стосується систематизації невизначеностей за формами подання, то вони поділяються:

- Стандартні;
- Комбіновані;
- Розширені;
- Відносні стандартні;
- Відносні комбіновані;
- Відносні розширені.

Стандартна невизначеність u - невизначеність (непевність), що виражається як стандартне середньоквадратичне відхилення (СКВ).

Сумарна стандартна невизначеність (комбінована) u_c - невизначеність (непевність), що отримується шляхом підсумовування всіх складових стандартних невизначеностей, пов'язаних з вимірюваною величиною.

Розширена невизначеність U - інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які з достатнім обґрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині.

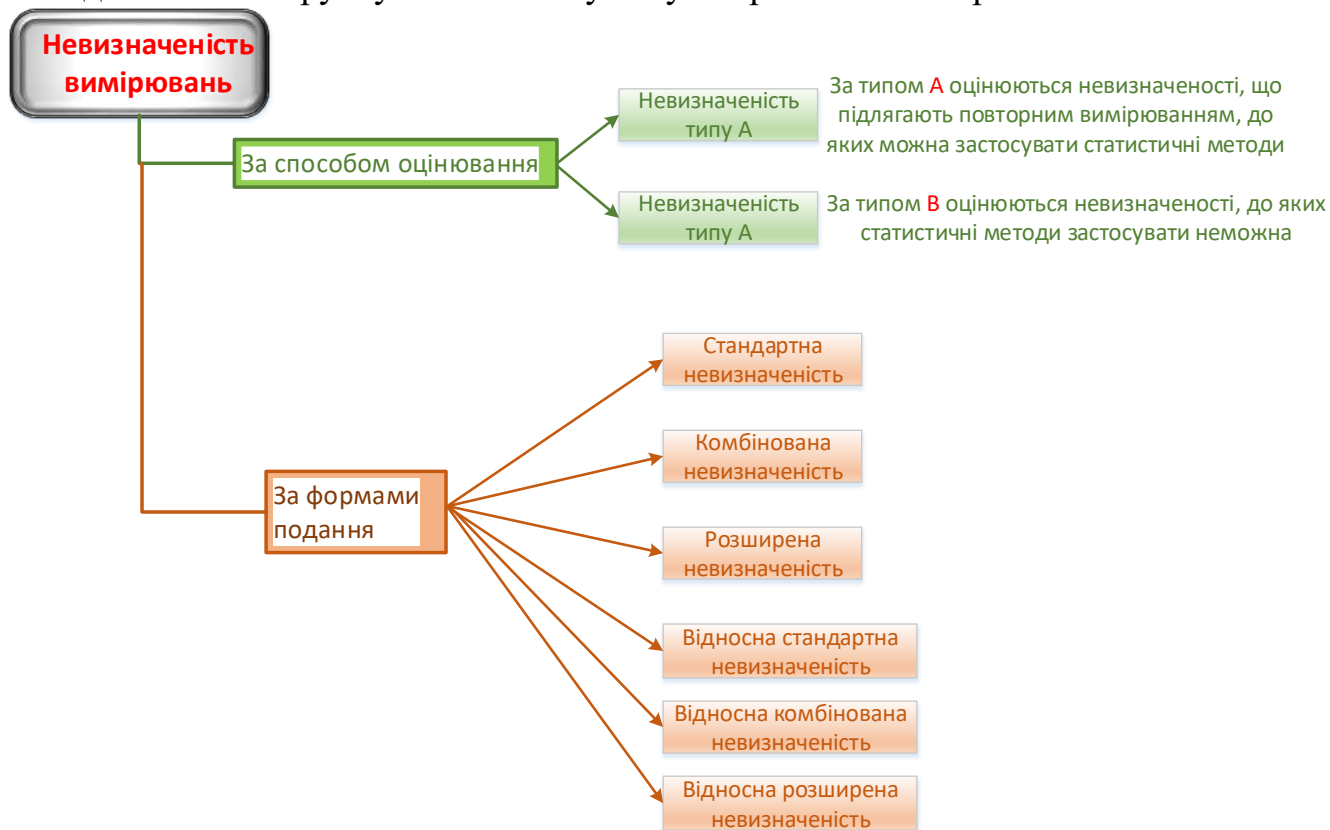


Рисунок 8.1 – Класифікація невизначеності вимірювання

Відносна стандартна невизначеність – відношення стандартної невизначеності до оцінки вимірюваної величини.

Відносна комбінована невизначеність – відношення комбінованої невизначеності до оцінки вихідної величини.

Відносна розширена невизначеність – відношення розширеної невизначеності до оцінки вихідної величини.

Оцінка невизначеності, що характеризує точність методу вимірювання називається апріорною, її визначають [4]:

- Під час розроблення методики вимірювання з метою регламентування приписаної невизначеності в усіх, передбачених методикою, умовах вимірювання;
- За відсутності методики або приписаного значення невизначеності – перед вимірюванням, для оцінки можливої невизначеності.

На підставі усієї наявної інформації про причини і джерела невизначеностей обчислюють окремі складові невизначеності за типом В, комбіновану невизначеність та розширену невизначеність. Підґрунтям апіорного оцінювання невизначеності є теорія ймовірності, яка дозволяє досліджувати і описувати закони розподілу випадкових величин.

Оцінка невизначеності для конкретних результатів вимірювання є апостеріорною, її визначають безпосередньо після вимірювання, за конкретних умов, за певною методикою із застосуванням конкретних типів засобів вимірювальної техніки. Підґрунтям апостеріорного оцінювання невизначеності є методи математичної статистики, які можна використати для оцінки міри розсіювання результатів багатократних спостережень.

2.2 Оцінювання стандартної невизначеності за типом А

Оцінювання компонентів невизначеності за типом А засновано на розподілах частот. Тому для оцінювання стандартної невизначеності за типом А необхідно провести n незалежних спостережень вимірюваної величини x в умовах повторюваності [4].

У більшості випадків найкращою доступною оцінкою математичного сподівання чи очікуваного значення μ_x величини x , що змінюється випадковим чином, є середнє арифметичне значення із n спостережень:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (8.1)$$

Стандартну невизначеність одиничного вимірювання i -ї вхідної величини розраховують за формулою [4]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.2)$$

Найкраща оцінка $\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{n}$ дисперсії середнього значення є $u_A^2(\bar{x}) = \frac{u_A^2}{n}$.

Із урахуванням даних виразів експериментальне стандартне відхилення середнього значення розраховують за формулою [4]:

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.3)$$

Для зменшення стандартної невизначеності результату вимірювання доцільно виконувати вимірювання з багатократними спостереженнями.

2.2 Оцінювання стандартної невизначеності за типом В

Для оцінювання x_i вхідної величини X_i , яка не була отримана в результаті повторних спостережень, пов'язані з ними оцінена дисперсія $u^2(x_i)$ або стандартна невизначеність $u(x_i)$ визначаються на базі наукового судження, що базується на всій доступній інформації про можливу змінність X_i . Тобто, стандартну невизначеність типу В одержують з передбачуваної функції щільності вірогідності, основаної на ступені впевненості в тому, що подія обов'язково відбудеться [4].

Фонд інформації може містити:

- Дані про вигляд розподілу ймовірностей;
- Невизначеності констант і довідникових даних;
- Специфікацію виробника; дані, що наводяться у свідченнях про перевірку, калібрування чи в інших сертифікатах;
- Дані отримані в результаті досвіду, або загальні знання про поведінку і властивості відповідних матеріалів та засобів вимірювальної техніки.

Правильне використання фонду доступної інформації для оцінювання стандартної невизначеності за типом В потребує інтуїції, заснованої на досвіді та загальних знаннях, і є майстерністю, яка приходить з практикою. Слід визнати, що оцінка стандартної невизначеності за типом В може бути такою ж надійною, як і оцінка за типом А, особливо у вимірювальній ситуації, коли оцінювання за типом А ґрунтується на невеликій кількості статистично незалежних спостережень.

Найбільш розповсюджений спосіб формалізації неповного знання про значення величини полягає в прийнятті (постулаті) рівномірного закону розподілу можливих значень цієї величини у заданих (нижній та верхній) границях b_{i-} b_{i+} . При цьому стандартну невизначеність, що розраховується по типу В визначають за формулою:

- для рівномірного розподілу [4]:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}} \quad (8.4)$$

А для симетричних границь $(\pm b_i)$ – за формулою [4]:

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}} \quad (8.5)$$

- для трикутного закону [4]:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{\sqrt{24}} \quad (8.6)$$

- для трапецієвидного закону[4]:

$$u_B(x_i) = \frac{[b_{i+} - b_{i-}] \cdot \sqrt{1 + \beta^2}}{\sqrt{24}} \quad (8.7)$$

де β – параметр, який визначається наступним співвідношенням [4]:

$$\beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (8.8)$$

де $\lambda_1 = \frac{|(b_{1+} - b_{1-}) - (b_{2+} - b_{2-})|}{2}$, $\lambda_2 = \frac{b_{+} - b_{-}}{2}$; $b_{+} = b_{1+} + b_{2+}$; $b_{-} = b_{1-} + b_{2-}$

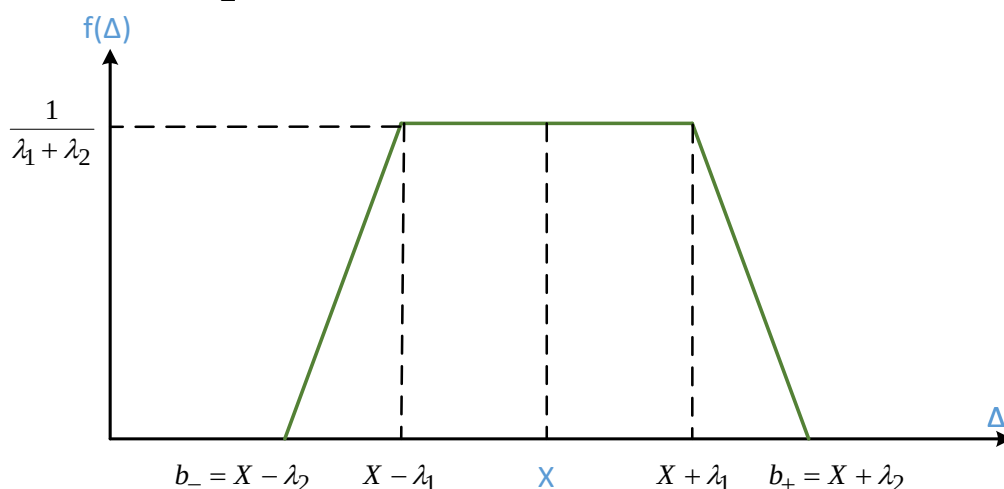


Рисунок 8.2 – Трапецієвидна функція розподілу ймовірності [4]

При зміні β від 0 до 1 трапецієвидний розподіл змінюється від трикутного до рівномірного.

- для експоненціального закону [4]:

$$u_B(x_i) = \sqrt{\frac{(b_{+} - x) \cdot (x - b_{-}) - (b_{+} - 2 \cdot x + b_{-})}{\lambda}} \quad (8.9)$$

де x – сподіване значення;

λ – параметр розподілу.

- для арксинусного закону [4]:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{\sqrt{8}} \quad (8.10)$$

- нормального закону [4]:

$$u_B(x_i) = \frac{U_p}{k_p} \quad (8.11)$$

де U_p - заданий інтервал з відомим рівнем довіри P (або розширена невизначеність);

k_p - коефіцієнт охоплення, який для нормального закону розподілу дорівнює [4]:

Довірчий рівень	Коефіцієнт охоплення k_p
0,9	1,64
0,95	1,96
0,99	2,58
0,9973	3

2.3 Оцінювання сумарної стандартної невизначеності (комбінована невизначеність) при некорельованих вхідних величинах

Стандартна невизначеність оцінки y вимірюваної величини Y і отже, результату вимірювання, утворюється шляхом відповідного підсумовування стандартних невизначеностей вхідних оцінок $x_1, x_2, \dots, x_n$. Така стандартна невизначеність оцінки y позначається $u_c(y)$ і називається **комбінованою**.

Результати вимірювань вважають *некорельованими*, коли всі вхідні величини є незалежними.

Комбінована невизначеність $u_c(y)$ є додатним квадратним коренем із комбінованої дисперсії $u_c^2(y)$, яка розраховується за формулою [4]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (8.12)$$

де f - відома функціональна залежність, що з'єднує параметри, знайдені експериментально шляхом застосування прямих вимірювань з шуканою величиною y , яка вимірюється непрямыми методом;

$u(x_i)$ - стандартна невизначеність (типу А або В) для кожного параметру, вимірюваного прямим методом;

$c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$ - частинні похідні називають коефіцієнтами чутливості, які показують, як вихідна оцінка y змінюється зі зміною вхідної оцінки x_i .

Комбінована невизначеність $u_c(y)$ є оціненим стандартним відхиленням і характеризує розкид значень, які можуть бути з достатньою підставою приписані вимірюваній величині Y .

Рівняння (8.12) отримують в результаті апроксимації рівняння вимірювання рядом Тейлора першого порядку і воно є **законом розподілу невизначеності**.

Таблиця 8.1 –Комбіновані невизначеності для рівнянь вимірювання різного виду [4]

<i>Рівняння вимірювання</i>	<i>Комбінована невизначеність</i>
$Y = X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_N$	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)}$
$Y = C_1 \cdot X_1 \pm C_2 \cdot X_2 \pm \dots \pm C_N \cdot X_N$	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N C_i^2 \cdot u^2(x_i)}$
$Y = \prod_{i=1}^N X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_N$	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}}$
$Y = \frac{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}{X_5 \cdot X_6 \cdot X_7 \cdot X_8}$	
$Y = X_1 / X_2 / \dots / X_N$	
$Y = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 + \dots + X_{N-2} \cdot X_{N-1} \cdot X_N$	$u_c^2(y) = (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2 \cdot (u_B^2(x_1) + u_B^2(x_2) + u_B^2(x_3)) + (x_4 \cdot x_5 \cdot x_6)^2 \cdot (u_B^2(x_4) + u_B^2(x_5) + u_B^2(x_6)) + \dots$
$Y = X^m$	$u_c(y) = m \cdot x^{m-1} \cdot u(x)$
$Y = \ln\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = \ln(X_1) - \ln(X_2)$	$u_c(y) = \sqrt{\frac{u^2(x_1)}{x_1^2} + \frac{u^2(x_2)}{x_2^2}}$
$Y = \ln(X_1 \cdot X_2) = \ln(X_1) + \ln(X_2)$	
$Y = (X_1 \pm X_2) \cdot (X_3 \pm X_4)$	$u_c(y) = \sqrt{\frac{u^2(x_1) + u^2(x_2)}{(x_1 + x_2)^2} + \frac{u^2(x_3) + u^2(x_4)}{(x_3 + x_4)^2}}$
$Y = \frac{(X_1 \pm X_2)}{(X_3 \pm X_4)}$	

2.4 Розширена невизначеність

Рекомендація INC-1 (1980) робочої групи з упорядкування звіту щодо невизначеності, що на сьогоднішній день є фактично стандартом вираження якості вимірювань у міжнародній практиці та Рекомендація 1 (МК-1981) «Оцінка експериментальних невизначеностей» та Рекомендація 1 (1986) «Оцінка невизначеностей у роботах, проведених МКМВ», підтримують використання комбінованої невизначеності $u_c(y)$ як параметр для кількісного вираження невизначеності результату вимірювання.

Хоча комбінована невизначеність $u_c(y)$ може повсюдно використовуватися для вираження невизначеності результату вимірювання, проте у окремих випадках: у торгівлі, промисловості і регулювальних актах, а також коли справа стосується здоров'я і безпеки, доцільно додатково вказувати

інтервальну міру невизначеності, що визначає інтервал для результату вимірювання.

Додаткова міра невизначеності, що відповідає інтервальній оцінці невизначеності, називається *розширеною невизначеністю* і позначається U .

Розширену невизначеність одержують шляхом множення комбінованої невизначеності $u_c(y)$ на коефіцієнт охоплення k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8.14)$$

При виборі значення коефіцієнту охоплення k необхідно враховувати:

- необхідний рівень вірогідності;
- будь-яку інформацію про передбачуваний розподіл;
- інформацію про кількість дослідів, які були проведені для оцінювання випадкових ефектів.

В загальному випадку коефіцієнт охоплення k вибирається у відповідності із формулою:

$$k = t_p(v_{eff}) \quad (8.15)$$

де $t_p(v_{eff})$ - квантиль розподілу Стюдента з ефективним числом степенів свободи v_{eff} і довірчою ймовірністю (рівнем довіри) p .

Ефективне число степенів свободи визначається за формулою Велча-Саттерстейта:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4} \quad (8.16)$$

де v_i - число степенів свободи при розрахунку невизначеності оцінки i -ї вхідної величини, при цьому:

$v_i = n - 1$ - для розрахунку невизначеності за типом А;

$v_i = \infty$ - для розрахунку невизначеності за типом В.

В багатьох практичних випадках при розрахунку невизначеностей результат вимірювання роблять передбачення про нормальність закону розподілу можливих значень вимірюваної величини і приймають:

Довірчий рівень p	Коефіцієнт охоплення k
0,9	1,64
~0,95	2
~0,99	3

При передбаченні про рівномірний закон розподілу приймають

Довірчий рівень p	Коефіцієнт охоплення k
$\sim 0,95$	1,65
$\sim 0,99$	1,71

Враховуючи те, що відносна величина – це відношення двох однорідних фізичних величин, то **відносною невизначеністю** називають відношення стандартної, комбінованої або розширеної невизначеності до оцінки вимірюваної величини. Вирази для визначення відносної стандартної, відносної комбінованої та відносної розширеної невизначеності мають вигляд:

$$\tilde{u}_{A(B)} = \frac{u_{A(B)}(x)}{|x|}, \text{ при } |x| \neq 0; \quad \tilde{u}_c = \frac{u_c(y)}{|y|}, \text{ при } |y| \neq 0; \quad \tilde{U} = \frac{U}{|y|}, \text{ при } |y| \neq 0 \quad (8.17)$$

Зазначені вище відносні невизначеності можуть виражатися не тільки у відносних величинах, але й у відсотках.

2.5 Методи вимірювання відносного розподілу щільності енергії (потужності) випромінювання

Регламентується ДСТУ ISO 13694:2009 Оптика й оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування для визначення розподілу густини потужності (енергії) лазерного пучка

Вимірювання відносного розподілу щільності енергії (ВРЩЕ) засновано на послідовному перетворенні енергії (потужності) випромінювання в різноманітних точках поперечного перетину лазерного пучка при скануванні вимірювального перетворювача перпендикулярно напрямку розповсюдження випромінювання.

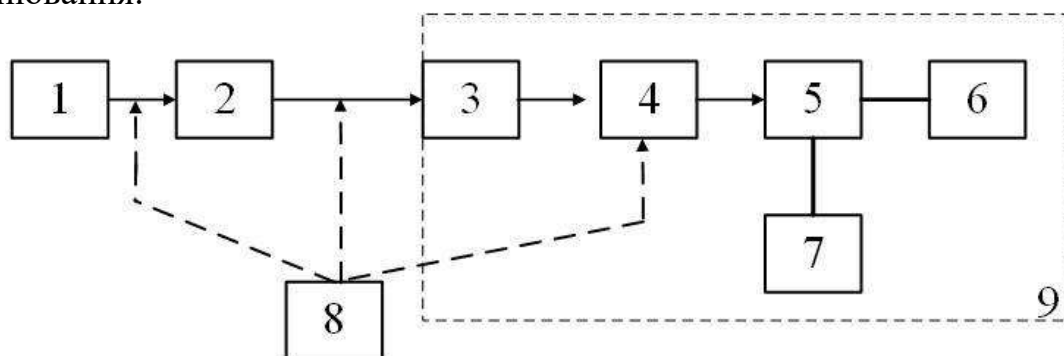


Рисунок 8.3 – Схема розташування засобів вимірювання та допоміжних пристроїв: 1. – лазер; 2 – ослаблювач; 3 – оптична система; 4 – апертурна діафрагма; 5 – вимірювальний перетворювач; 6 – вимірювальний прилад; 7 – пристрій сканування; 8 – пристрій юстировки; 9 – засіб вимірювання ВРЩЕ

Ослаблювач повинен забезпечувати пропускання енергії (потужності) лазерного випромінювання, що її величина знаходилась в межах енергетичного

діапазону застосованого вимірювального перетворювача. Нерівномірність коефіцієнту ослаблення ослаблювача повинна бути в межах $\pm 5\%$. Якщо енергія (потужність) лазерного випромінювання не перевищує верхньої межі енергетичного діапазону вимірювального перетворювача, ослаблювач не застосовують.

Оптична система повинна забезпечувати перенесення зображення поля в заданому перетині пучка лазерного випромінювання на площину апертури вимірювального перетворювача. В якості оптичної схеми можуть застосовуватися лінзи, дзеркала та інші допоміжні пристрої.

Апертурна діафрагма повинна бути жорстко з'єднана з вимірювальним перетворювачем так, щоб її отвір знаходився в центральній частині його приймальної площадки. Діаметр або розмір більшої сторони отвору діафрагми повинен бути не більше 0,1 діаметру пучка лазерного випромінювання.

Вимірювальний перетворювач повинен забезпечити перетворення лазерного випромінювання в електричний сигнал та задовольняти наступним вимогам:

- Спектральний діапазон повинен охоплювати спектр лазерного випромінювання;
- Динамічний діапазон повинен бути не менше 20;
- Нелінійність характеристики перетворення повинна бути не більше 7 %.

Час наростання перехідної характеристики вимірювального перетворювача, що застосовується для вимірювання ВРЩЕ лазерів імпульсного режиму, повинен в 3 рази перевищувати тривалість імпульсу лазерного випромінювання.

Пристрій сканування повинен забезпечувати плавне або дискретне переміщення вимірювального перетворювача перпендикулярно напрямку розповсюдження лазерного випромінювання та вимірювання координати контрольованої точки перетину пучка лазерного випромінювання із похибкою в межах $\pm 4\%$.

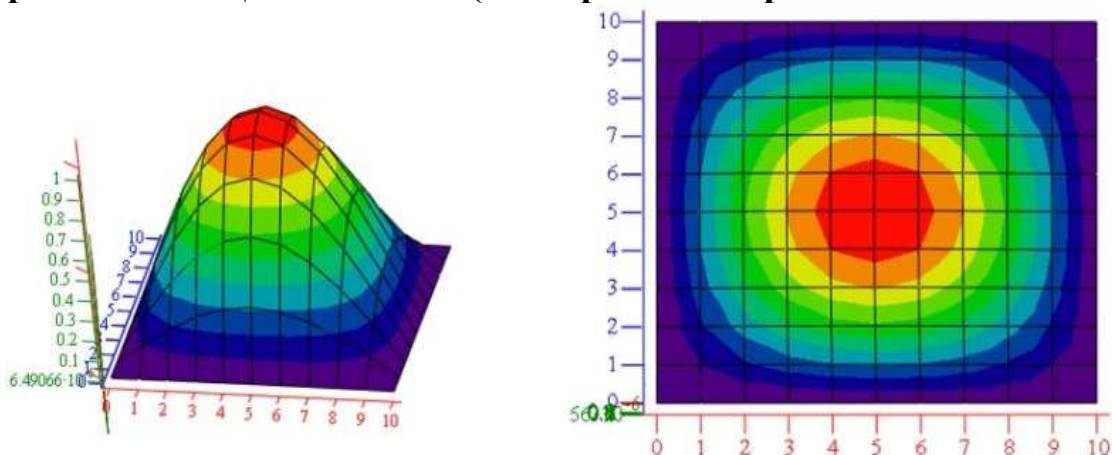
Вимірювальний прилад повинен забезпечити вимірювання електричного сигналу, у всьому діапазоні значень енергії (потужності) лазерного випромінювання по перетину пучка із похибкою в межах $\pm 5\%$. В якості вимірювального приладу рекомендується застосовувати осцилографи, самописці, вольтметри та інші.

Пристрій юстировки повинен забезпечувати потрапляння лазерного випромінювання в центральну частину приймальних площадок ослаблювача, оптичної системи та вимірювального перетворювача перпендикулярно до вхідної поверхні.

В якості засобів юстировки рекомендується застосовувати візуалізатори, газові лазери неперервного режиму роботи в видимій області спектру із розходженням не більше 10'.

3. Виконання роботи

Завдання 3.1 Виконати аналіз розширеної невизначеності при вимірюванні ВРЩЕ методом А (однократне вимірювання в одній точці)



E00

E00

	$6,491 \cdot 10^{-6}$	$7,922 \cdot 10^{-4}$	$1,501 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	(-5)
	$7,922 \cdot 10^{-4}$	0,097	0,183	0,252	0,296	0,311	(-4)
	$1,501 \cdot 10^{-3}$	0,183	0,347	0,477	0,56	0,589	(-3)
	$2,063 \cdot 10^{-3}$	0,252	0,477	0,655	0,77	0,81	(-2)
	$2,423 \cdot 10^{-3}$	0,296	0,56	0,77	0,905	0,951	(-1)
$M =$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	0,311	0,589	0,81	0,951	1	(0)
	$2,423 \cdot 10^{-3}$	0,296	0,56	0,77	0,905	0,951	(1)
	$2,063 \cdot 10^{-3}$	0,252	0,477	0,655	0,77	0,81	(2)
	$1,501 \cdot 10^{-3}$	0,183	0,347	0,477	0,56	0,589	(3)
	$7,922 \cdot 10^{-4}$	0,097	0,183	0,252	0,296	0,311	(4)
	$6,491 \cdot 10^{-6}$	$7,922 \cdot 10^{-4}$	$1,501 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	(5)
	(-5)	(-4)	(-3)	(-2)	(-1)	(0)	

Приклад виконання завдання

1. Складаємо специфікацію вимірювання:

- Аналіз умов вимірювання

Вимірювання проводилися в лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища, що не перевищує нормальних значень.

- Аналіз технічних характеристик приладу

Ослаблювач – похибка, що зумовлена нерівномірністю коефіцієнту ослаблення ослаблювача $\pm 5\%$.

Оптична система – похибка, що вноситься оптичною системою $\pm 5\%$.

Вимірювальний перетворювач – похибка, що зумовлена нелінійністю характеристики перетворення вимірювального перетворювача $\pm 7\%$.

Матричний перетворювач МКТ-1 розміром чутливої площадки (45x45) мм, з розміром одного елементу (5x5) мм.

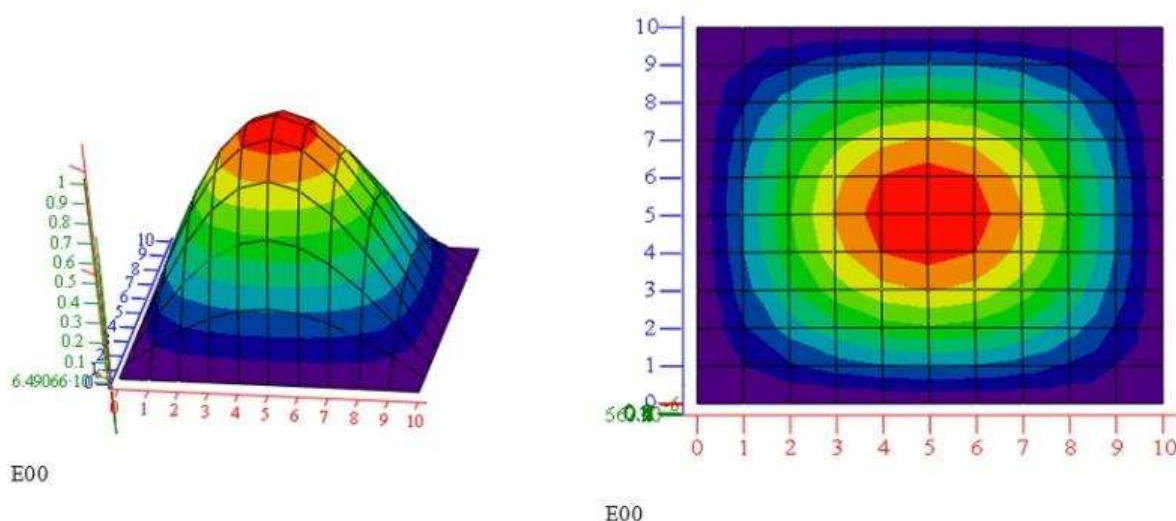
Вимірювальний прилад В7-28 – похибка вимірювального приладу ± 5 (2) %.

Скануючий пристрій – похибка, що зумовлена неточністю визначення координати контрольованої точки перетину пучка $\pm 4\%$.

Збільшення візирного мікроскопу $30\times$ підбираємо таким чином, щоб максимально збільшити розмір лазерного пучка до розміру чутливої площадки матричного перетворювача.

Апертурна діафрагма – похибка, що зумовлена неточністю розмірів апертурної діафрагми $\pm 2\%$.

Лазер – похибка, що зумовлена нестабільністю енергії (потужності) лазерного випромінювання за час вимірювання $\pm 10\%$. Діаметр лазерного пучка складає 1,5 мм.



2. Визначаємо сумарну стандартну невизначеність вимірювання:

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_{CB}^2(y)} \quad (8.18)$$

де $u_{CB}(y)$ - комбінована невизначеність за типом В;

$u_A(y)$ - стандартна невизначеність за типом А.

3. Розраховуємо комбіновану невизначеність типу В:

$$u_{CB}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (8.19)$$

• Складова невизначеності результату, що зумовлена нерівномірністю коефіцієнту ослаблення ослаблювача оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка ослаблювача $\pm 5\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.20)$$

Наприклад, для координати $(-5; 0)$, маємо:

$$\Delta_0 = \frac{5\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 1.274 \cdot 10^{-4} \quad (8.21)$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання, в загальному вигляді дорівнює:

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}} \quad (8.22)$$

$$\text{Тоді } u_B(\delta_{\text{осл.}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 7.355 \cdot 10^{-5}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена оптичною системою оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка оптичної системи $\pm 5\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%}$$

Наприклад, для координати $(-5; 0)$, маємо:

$$\Delta_0 = \frac{5\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 1.274 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{\text{О.С.}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 7.355 \cdot 10^{-5}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена нелінійністю характеристики перетворення вимірювального перетворювача оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка нелінійності характеристики перетворення вимірювального перетворювача $\pm 7\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.23)$$

Наприклад, для координати (-5; 0), маємо:

$$\Delta_0 = \frac{7\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 1,783 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{B.П.}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 1,03 \cdot 10^{-4}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена похибкою вимірювального приладу оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка вимірювального приладу $\pm 2\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.24)$$

Наприклад, для координати (-5; 0), маємо:

$$\Delta_0 = \frac{2\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 5,095 \cdot 10^{-5}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{вим.прил}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 2,942 \cdot 10^{-5}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена похибкою неточності визначення координати контрольованої точки перетину пучка оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка неточності визначення координати контрольованої точки перетину пучка $\pm 4\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.25)$$

Наприклад, для координати (-5; 0), маємо:

$$\Delta_0 = \frac{4\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 1,019 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{\text{коорд.}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 5,884 \cdot 10^{-5}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена кінцевістю розміру апертурної діафрагми оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка від кінцевості розміру апертурної діафрагми $\pm 2\%$ тоді абсолютна похибка отриманого результату буде:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.26)$$

Наприклад, для координати $(-5; 0)$, маємо:

$$\Delta_0 = \frac{2\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 5,095 \cdot 10^{-5}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{\text{А.Д.}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 2,942 \cdot 10^{-5}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена нестабільністю енергії (потужності) лазерного випромінювання за час вимірювання оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка через нестабільністю енергії (потужності) лазерного випромінювання за час вимірювання оцінюється $\pm 10\%$:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.27)$$

Наприклад, для координати $(-5; 0)$, маємо:

$$\Delta_0 = \frac{10\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 2,548 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{\text{нест.ЛВ}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 1,471 \cdot 10^{-4}.$$

- Складова невизначеності результату, що зумовлена апроксимацією при побудові графічних залежностей розподілу $E_{00i,j}$, значення оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень в певних границях.

Відносна похибка через апроксимацію при побудові графічних залежностей розподілу складає $\pm 10\%$:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_0}{X} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta_0 = \frac{\delta \cdot X}{100\%} \quad (8.28)$$

Наприклад, для координати $(-5; 0)$, маємо:

$$\Delta_0 = \frac{10\% \cdot 2,548 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 2,548 \cdot 10^{-4}$$

Таким чином невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання складає:

$$u_B(\delta_{\text{апрокс.}}) = \frac{|\Delta_0|}{\sqrt{3}} = 1,471 \cdot 10^{-4}.$$

Тоді із врахування всіх складових, що встановлені в п.3 маємо:

$$u_{cB}(E) = \sqrt{u^2(\delta_{\text{осл.}}) + u^2(\delta_{\text{O.C.}}) + u^2(\delta_{\text{B.П.}}) + u^2(\delta_{\text{вим.прил.}}) + u^2(\delta_{\text{коорд}}) + u^2(\delta_{\text{A.Д.}}) + u^2(\delta_{\text{нест.Л.В.}}) + u^2(\delta_{\text{апрокс}})} = 2,643534 \cdot 10^{-4}$$

4. Визначаємо розширену невизначеність

При рівні довіри $P = 0,95$, допускаючи, що можливі результати вимірювання розподілені за нормальним законом, визначаємо розширену невизначеність:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8.29)$$

де $k = 1,96$ див. тема 1 п. «Розширена невизначеність».

Визначаємо сумарну стандартну невизначеність вимірювання:

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_{cB}^2(y)} \quad (8.30)$$

де $u_{cB}(y)$ - комбінована невизначеність за типом В;

$u_A(y)$ - стандартна невизначеність за типом А (для однократного вимірювання дана складова відсутня);

$$u_c(E) = \sqrt{u_A^2(E) + u_{cB}^2(E)} = \sqrt{(2,644 \cdot 10^{-4})^2} = 2,643534 \cdot 10^{-4}$$

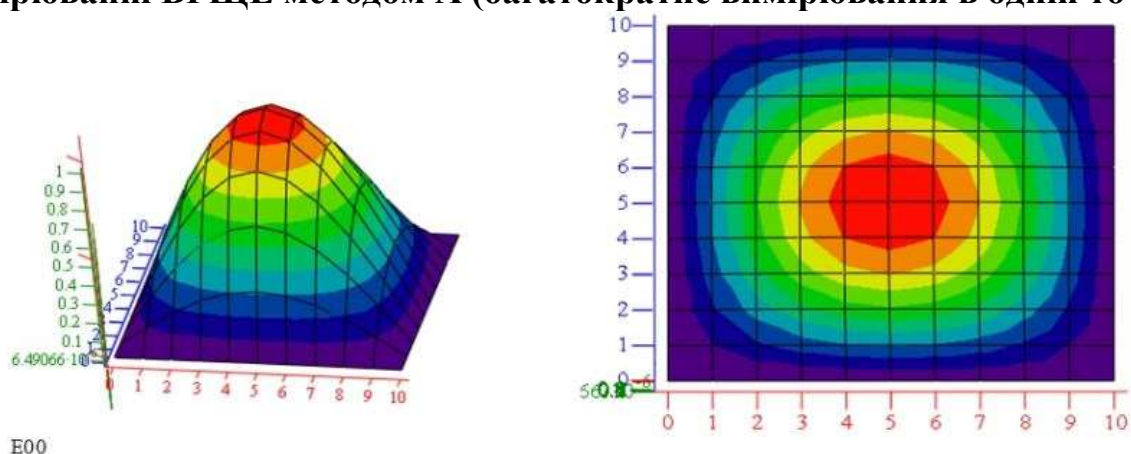
Тоді

$$U = k \cdot u_c(E) = 1,96 \cdot 2,643534 \cdot 10^{-4} = 5,18132 \cdot 10^{-4}.$$

5. Записуємо результат вимірювання відносного розподілу щільності енергії (потужності) в поперечному перетині лазерного пучка для координати (-5;0)

$$E_{-5;0} = (2,548 \cdot 10^{-3} \pm 5,18132 \cdot 10^{-4}) B, P = 95 \%$$

Завдання 3.2 Виконати аналіз розширеної невизначеності при вимірюванні ВРЩЕ методом А (багатократне вимірювання в одній точці)



E00

E00

	$6,491 \cdot 10^{-6}$	$7,922 \cdot 10^{-4}$	$1,501 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	(-5)
	$7,922 \cdot 10^{-4}$	0,097	0,183	0,252	0,296	0,311	(-4)
	$1,501 \cdot 10^{-3}$	0,183	0,347	0,477	0,56	0,589	(-3)
	$2,063 \cdot 10^{-3}$	0,252	0,477	0,655	0,77	0,81	(-2)
	$2,423 \cdot 10^{-3}$	0,296	0,56	0,77	0,905	0,951	(-1)
$M =$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	0,311	0,589	0,81	0,951	1	(0)
	$2,423 \cdot 10^{-3}$	0,296	0,56	0,77	0,905	0,951	(1)
	$2,063 \cdot 10^{-3}$	0,252	0,477	0,655	0,77	0,81	(2)
	$1,501 \cdot 10^{-3}$	0,183	0,347	0,477	0,56	0,589	(3)
	$7,922 \cdot 10^{-4}$	0,097	0,183	0,252	0,296	0,311	(4)
	$6,491 \cdot 10^{-6}$	$7,922 \cdot 10^{-4}$	$1,501 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,548 \cdot 10^{-3}$	(5)
	(-5)	(-4)	(-3)	(-2)	(-1)	(0)	

Рисунок 8.4 - Приклад виконання завдання

Для точки $(-5; 0)$ виконано 5 вимірювань із інтервалом 5 с. Результати наступні

$$E0_i :=$$

$2.554908 \cdot 10^{-4}$
2.472442×10^{-4}
2.617667×10^{-4}
2.529813×10^{-4}
2.483559×10^{-4}

1. Обчислити оцінку значення вимірюваної величини:

$$\bar{E}00 = \frac{\sum_{i=1}^n E00_i}{n} = 2.532 \cdot 10^{-4} \text{ В}.$$

2. Оцінити стандартну невизначеність результату вимірювання:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.31)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (E00_i - \bar{E}00)^2} = 5.865 \cdot 10^{-6} \text{ В}$$

3. Перевірити мінімальний та максимальний результат на наявність грубої похибки. Для цього розраховуються співвідношення:

$$\nu_1 = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{u_A}; \nu_2 = \frac{\bar{x} - x_{\max}}{u_A} \quad (8.32)$$

$$\nu_1 = \frac{\bar{E}00 - E00_{\min}}{u_A} = \frac{2.532 \cdot 10^{-4} - 2.472442 \cdot 10^{-4}}{5.865 \cdot 10^{-6}} = 1.01$$

$$\nu_2 = \nu_1 = \frac{\bar{E}00 - E00_{\max}}{u_A} = \frac{2.532 \cdot 10^{-4} - 2.617667 \cdot 10^{-4}}{5.865 \cdot 10^{-6}} = -1.466$$

Задаємо довірчий рівень $\alpha = 95\%$ та розраховуємо надійність $q = 1 - \alpha = 1 - 0,95 = 0,05$ і, залежно від кількості проведених вимірювань n вибирають допустиме значення $\nu_{0,05;5} = 1,869$ табл.додаток Б37.

Оскільки розраховані значення ν_1 та ν_2 менші за допустиме значення $\nu_{0,05;5} = 1,869$, гіпотезу про наявність аномальних результатів в ряді спостережень відкидаємо, тобто результати не містять грубої похибки.

4. Оцінити стандартну невизначеність середнього арифметичного:

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.33)$$

$$u_A(\bar{E}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = 2.623124 \cdot 10^{-6} \text{ В.}$$

5. Визначити розширену невизначеність.

При рівні довіри $P = 0,95$, допускаючи, що можливі результати вимірювання розподілені за нормальним законом, визначаємо розширену невизначеність:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8.34)$$

де $k = 1.96$ див. тема 1 п. «Розширена невизначеність».

Визначити сумарну стандартну невизначеність вимірювання:

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_{cB}^2(y)} \quad (8.35)$$

де $u_{cB}(y)$ - комбінована невизначеність за типом В (значення взяти із попереднього розрахунку);

$u_A(y)$ - стандартна невизначеність за типом А;

$$u_c(E) = \sqrt{u_A^2(\bar{E}) + u_{cB}^2(E)} = \sqrt{(2,623124 \cdot 10^{-6})^2 + (2,643534 \cdot 10^{-4})^2} = 2,643664 \cdot 10^{-4}$$

Тоді

$$U = k \cdot u_c(E) = 1,96 \cdot 2,643664 \cdot 10^{-4} = 5,181581 \cdot 10^{-4}.$$

6. Записати результат вимірювання відносного розподілу щільності енергії (потужності) в поперечному перетині лазерного пучка для координати $(-5;0)$

$$E_{-5;0} = (2,531678 \cdot 10^{-3} \pm 5,181581 \cdot 10^{-4}) \text{ В, } P = 95 \%$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Як складається специфікація вимірювання.
2. За якою формулою визначається сумарна стандартна невизначеність вимірювання. Які складові до неї входять.
3. Як визначається комбінована невизначеність типу В. Назвіть складові, що входять до формули. Проаналізуйте їх.
4. Дайте визначення розширеної невизначеності. За якою формулою вона визначається.

5. Яка форма запису результату вимірювання відносного розподілу щільності енергії.
6. Як перевірити результати на наявність грубої похибки.

Література

1. Голубь Б.И., Котюк А.Ф., Кузин А.Ю. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений. – М.: Горячая линия – Телеком. 2006. – 151с.: ил.
2. ДСТУ EN 60825-2:2015 Безопасность лазерных изделий. Часть 2. Безопасность волоконно-оптических систем передачи (EN 60825-2:2004, IDT). С изменениями № 1:2015, 2:2015.
3. ДСТУ ISO 13694:2009. Оптика й оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування для визначення розподілу густини потужності (енергії) лазерного пучка.
4. Васілевський О.М. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник / О.М.Васілевський, В.Ю.Кучерук, Є.Т.Володарський. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 230 с.
5. Походун А.И. Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 112 с.
6. РМГ 43-2001 Применение "руководства по выражению неопределенности измерений".
7. Guide to expression of uncertainty in measurement: First edition. – ISO. Switzerland, 1993.
8. Evaluation of measurement data – An introduction to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» and related documents : JCGM 104:2009. – Sevres : JCGM, 2009. – 20 p.
9. Руководство по выражению неопределенности измерения. Государственное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им.Д.И.Менделеева. Первая редакция Международная организация по стандартизации, 1983 ISBN 92-67-10186-9 http://temperatures.ru/pages/osnovnye_normativnye_dokumenty.

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

А

Апертура (лат. – отвір) – це поняття, яке в геометричній оптиці визначає розмір пучка променів.

Апертурна діафрагма – діафрагма, що обмежує пучок променів, які виходять із осьової точки предмету (обмежує числову апертуру і світлосилу приладу).

Апертурний кут в просторі предмету – кут між оптичною віссю і променем, який виходить із осьової точки предмету і проходить через край апертурної діафрагми – σ_A .

Апертурний кут в просторі зображення – кут між оптичною віссю і променем, який проходить через осьову точку зображення і край апертурної діафрагми σ'_A .

Афокальні або телескопічні системи – це системи із двох або більше компонентів, оптична сила яких рівна нулю. Такі системи призначені для спостереження віддалених об'єктів.

Б

Безсвільність – наявність прозорих включень, що відрізняються за показником заломлення від оточуючої маси скла.

В

Відносний показник заломлення - відношення $\frac{n'}{n}$ для заданої пари середовищ.

Відносний отвір - абсолютне значення відношення діаметру вхідної зіниці до задньої фокусної відстані системи D/f' .

Виньстуюча діафрагма - будь-яка діафрагма, окрім апертурної і польової, яка обмежує пучки променів, що йдуть із поза осьових точок предмету.

Випромінювання - процес випускання електромагнітних хвиль матеріальним тілом.

Вихідна зіниця – зображення вхідної зіниці, яке дається всією оптичною системою в просторі зображення.

Верхній промінь поза осьового пучка – це промінь, що проходить через верхній край апертурної діафрагми та відповідні йому спряжені точки вхідної та вихідної зіниці.

Вольтова чутливість S_U - характеризує значення сигналу в вольтах, віднесене до одиниці падаючого потоку випромінювання. Струмову і вольтову чутливість називають **інтегральною**, якщо вона характеризує чутливість до інтегрального потоку випромінювання.

Вентильний режим роботи – режим при якому фотодіод закорочений опором навантаження R_n без використання додаткового джерела зміщення.

Вхідна зіниця – зображення діафрагми, яке видно із центру предмету під найменшим кутом.

Г

Гаусів пучок – це пучок у якого амплітуда напруженості поля максимальна на вісі пучка і експоненційно зменшується до краю у відповідності з гладкою функцією Гауса.

Головні площини - дві спряжені площини, що розташовані перпендикулярно до оптичної вісі, для яких лінійне збільшення ± 1 .

Головні точки системи - точки перетину головних площин з оптичною віссю.

Головний промінь – це промінь, що йде із поза осьової точки предмету і проходить через центр апертурної діафрагми.

Гранична чутливість $R_{\text{гп}}$ - визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал дорівнює шуму.

Д

Діафрагма – це металевий екран із круглим отвором. На оптичних схемах діафрагми можуть бути задані явно – діафрагма є самостійним елементом, або неявно – роль діафрагми виконує край або оправа лінзи.

Динамічний діапазон лінійності характеризує область значення променевого потоку Φ (від Φ_{min} до Φ_{max}), в якій енергетична характеристика лінійна: $\Delta = 10 \lg \frac{\Phi_{\text{max}}}{\Phi_{\text{min}}}$.

Довжина хвилі відсікання - мінімальна довжина хвилі (або частота), нижче якої світло не буде розповсюджуватися в даному світлопроводі.

Довжина хвилі – відстань між двома найближчими точками хвилі, що знаходяться в однаковій фазі.

Дисперсійна, або диспергуюча призма – це призма дія яких заснована на явищах заломлення і дисперсії немонохроматичного випромінювання.

Дисперсія світла - залежність показника заломлення від довжини падаючого випромінювання.

Дисперсія оптичного середовища (матеріалу) - різниця показників заломлення для двох крайніх значень довжини хвилі $n_F - n_C$.

Дифракція світла - огинання світловою хвилею границь непрозорих тіл з утворенням інтерференційного перерозподілу енергії по різних напрямках.

Диференційний опір R_0 – відношення малих приростів напруги на приладі і струму через нього.

Дихроїзм – це явище коли поглинання світла сильно залежить від напрямку електричного вектору в світловій хвилі.

E

Енергетичний потік випромінювання Φ_e - називають середню потужність випромінювання в одиницю часу.

Енергетична сила світла - представляє собою потік випромінювання джерела, що приходить на одиницю тілесного кута, в межах якого випромінювання розповсюджується.

Енергетична світність - називається поверхнева щільність потоку випромінювання, що випускається з даної поверхні.

Енергетична яскравість - виражається відношенням енергетичної сили світла елемента випромінюючої поверхні до площі проекції цього елемента на площину, перпендикулярну напрямку спостереження.

Енергетична (світлова) характеристика - відображає залежність фотовідповіді приладу від інтенсивності збуджуючого потоку випромінювання (ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристика). Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної або спектральної чутливості приладу від інтенсивності опромінення.

З

Задня головна площина H' - визначається перетином променів, що проходять паралельно осі в просторі предметів з їх продовженням після заломлення через систему.

Задній фокус оптичної системи - точка F' на оптичній вісі в просторі зображення, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі предметів.

Задня фокальна площина оптичної системи - площина, яка проходить через задній фокус і перпендикулярна до оптичної вісі.

Задня фокусна відстань – відстань від задньої головної площини до заднього фокуса F' ($H'F' = f'$).

Задній вершинний фокальний відрізок – відрізок від вершини задньої поверхні до заднього фокуса ($O'F' = S'_{F'}$).

Закон відбиття - падаючий промінь, нормаль до відбитої поверхні в точці падіння і відбитий промінь лежать в одній площині, а кути падаючого і відбитого променів з нормаллю рівні по абсолютній величині, але протилежні по знаку.

Закон заломлення - падаючий промінь, нормаль до поверхні розділу в точці падіння і заломлений промінь лежать в одній площині, і добуток показника заломлення середовища на $\sin(\varepsilon)$, залишається постійним при переході променю із одного середовища в інше $n \cdot \sin(\varepsilon) = n' \cdot \sin(\varepsilon')$.

Закон Бугера-Ламберта-Бера описує ослаблення потоку монохроматичного випромінювання, що пройшло крізь шар речовини товщиною l .

Заломлююча призма - оптична деталь, що обмежена двома заломлюючими непаралельними площинами.

Заломлюючим ребром призми називається лінія перетину заломлюючих площин (ребро двогранного кута).

I

Інжекційний лазер (напівпровідниковий лазер) - в якому генерація когерентного випромінювання виконується в результаті інжекції носіїв заряду через електронно-дірковий перехід.

Інерційність приладу - характеризують постійні часу збільшення τ_z і спаду $\tau_{сп}$ фотовідгуку при імпульсі випромінювання. При синусоїдальній модуляції світлового потоку швидкодію приладів характеризують граничною частотою, на якій фотовідгук зменшується до рівня 0,7 стаціонарного значення.

Інфрачервоне випромінювання – це спектр електромагнітних коливань з довжиною хвилі від 400 мкм до 760 нм.

К

Кардинальні елементи оптичної системи - фокуси, фокальні площині, головні площини, головні точки та фокусні відстані.

Коефіцієнт призми c – це відношення довжини ходу променю d в призмі до максимального діаметру D пучка променів.

Когерентний промінь – це такі пучки променів, у яких різниця фаз коливань за час, достатній для спостереження, зберігається постійною.

Когерентне джерело випромінювання – це таке джерело, яке випромінює синфазні світлові хвилі.

Когерентність – поняття, що має певні фазові відношення (тобто постійні в часі або змінні із суворо певним законом) між світловими хвилями або хвилями іншого випромінювання.

Коефіцієнт видимості (або світлова віддача випромінювання для даної довжини хвилі) - відношення світлового потоку, виміряного в лм, до потоку, виміряного в Вт.

Коефіцієнт пропускання τ - відношення потоку, що пройшов до падаючого потоку $\tau = \frac{F_\tau}{F}$.

Коефіцієнт відбивання ρ - відношення відбитого потоку до падаючого потоку $\rho = \frac{F_\rho}{F}$

Коефіцієнт поглинання α - відношення поглиненого потоку до падаючого потоку $\alpha = \frac{F_\alpha}{F}$

Концентрична лінза – лінза, у якої центри кривизни поверхонь співпадають.

Короткохвильова (довгохвильова) границя спектральної чутливості – найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якій монохроматична чутливість приладу дорівнює 0,1 від її максимального значення.

Кут падіння ε - кут між падаючим променем AO і нормаллю NO .

Кут відбиття ε' - кут між відбитим променем OA' і нормаллю NO .

Кутове збільшення оптичної системи - називається відношення тангенсів кутів, утворених спряженими променями з оптичною віссю.

Кут відхилення ω - кут між початковим напрямком променю і променем, що вийшов із оптичної деталі.

Кутова дисперсія - характеризує зміну кута відхилення паралельного пучка світла диспергуючим елементом при зміні довжині хвилі $\beta = \frac{d\omega}{d\lambda}$.

Кут $\theta_{\max}$ (числова апертура NA (Numerical Aperture)) – це максимально можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним.

Кутова дисперсія - залежність кута відхилення від довжини хвилі.

Кутовим полем 2ω оптичної системи в просторі предметів називають подвійний між оптичною віссю та променем в просторі предметів, що проходить через центр апертурної діафрагми та край польової діафрагми. Іншими словами, кутове поле 2ω це кут між головними променями в просторі предметів.

Л

Лазер (оптичний квантовий генератор) – пристрій, який генерує когерентні електромагнітні хвилі за рахунок примусового випускання або примусового розсіювання світла активним середовищем, що знаходиться в оптичному резонаторі.

Лінза - оптична деталь, обмежена двома заломлюючими поверхнями.

Лінійним полем 2γ оптичної системи в просторі предметів - називають найбільший розмір зображуваної частини площини предмету, розташованого на кінцевій відстані.

М

Максимально допустимий постійний прямий струм $I_{\text{пр.мах}}$ – максимальне значення постійного прямого струму, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода.

Максимально допустима зворотна постійна напруга $U_{\text{зв.мах}}$ – максимальне значення постійної напруги, що прикладена до діоду, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода.

Максимум спектрального розподілу $\lambda_{\text{мах}}$ – довжина хвилі світлового випромінення, що відповідає максимуму спектральної характеристики випромінення світлодіода.

Максимум спектральної характеристики чутливості – довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості приладу.

Максимально допустима напруга $U_{\text{мах}}$ – значення постійної напруги, при якій відхилення параметрів приладу не перевищують встановлених меж.

Меніск – це лінза з радіусами кривизни одного знаку.

Монохроматичне випромінювання – випромінювання однієї якої не будь довжини хвилі або випромінювання в досить вузькому інтервалі довжин хвиль $\lambda + d\lambda$.

Мода – це одна із складових світла, що розповсюджується в волокні, яка відповідає певному типу електромагнітних коливань.

H

Нижній промінь поза осевого пучка – це промінь, що проходить через нижній край апертурної діафрагми та відповідні спряжені точки вхідної та вихідної зіниці.

O

Оптико-електронними називають прилади, в яких інформація про досліджуваній або спостережний об'єкт переноситься оптичним випромінюванням (міститься в оптичному сигналі), а її первинна обробка супроводжується перетворенням цього випромінювання (оптичного сигналу) в електричну енергію (електричний сигнал).

Оптична система - називається сукупність оптичних деталей (лінз, призм, дзеркал і т.д), що призначені для формування пучків світлових промінів. Оптична система призначена для формування зображення шляхом перерозподілу в просторі електромагнітного поля, що виходить із джерела (предмету).

Оптичне середовище - це прозорі однорідні середовища із точним значенням показника заломлення.

Оптична поверхня – це гладка регулярна поверхня точно відомої форми.

Опорна площа (ОП) – це деяка довільно вибрана площа, перпендикулярна до оптичної вісі.

Оптична сила системи - відношення показника заломлення середовища до відповідного фокусної відстані.

Оптичний клин – деталь, яка має дві плоскі заломлюючі поверхні, двогранний кут θ між якими (кут заломлення клину $\theta < 6^\circ$) не перевищує декількох градусів.

P

Передня головна площа H - визначається аналогічно як задня головна площа, якщо провести паралельно вісі промінь в зворотному напрямку (зі сторони простору зображення).

Передній фокус оптичної системи - точка F на оптичній вісі в просторі предметів, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі зображення.

Передня фокальна площа - площа, перпендикулярна до оптичної вісі, яка проходить через передній фокус.

Передня фокусна відстань – відстань від передньої головної площини до переднього фокуса ($HF = -f$).

Передній вершинний фокальний відрізок – відрізок від вершини передньої поверхні до переднього фокуса ($OF = -S_F$).

Питоме використання випромінювання - величина, зворотна коефіцієнту видності.

Польова діафрагма – діафрагма, що розташована в площині предмету або в одній із спряжених площин, і обмежує розмір лінійного поля оптичної системи в просторі зображення.

Постійна пряма напруга U_{np} – значення напруги на світлодіоді при протіканні постійного прямого струму.

Потужність розсіювання - потужність, що виділяється при проходженні фотоструму; вона визначає розігрівання приладу.

Показник заломлення n_λ - відношення швидкості розповсюдження світла довжиною хвилі λ в вакуумі до швидкості розповсюдження в матеріалі.

Поле оптичної системи – одна із основних характеристик системи – оцінюється в лінійній (або кутовій) мірі в залежності від того, де розташований предмет відносно системи – на кінцевій відстані або в нескінченності.

Польова діафрагма – діафрагма, що розташована в площині предмету або в одній із спряжених площин, і обмежує розмір лінійного поля оптичної системи в просторі зображення.

Плоскопаралельна пластинка - це оптична деталь, обмежена двома паралельними площинами.

Приймач випромінювання – це пристрій, що слугує для сприйняття енергії випромінювання і перетворення її в енергію інших видів з метою наступної реєстрації результату цього перетворення.

Приймач випромінювання - пристрій, що слугує для сприйняття енергії випромінювання і перетворення її в енергію інших видів з метою наступної реєстрації результату цього перетворення.

P

Робоча напруга U_p - постійна напруга, що прикладена до приладу, при якому забезпечені номінальні параметри при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах.

C

Світлосила оптичної системи H - величина, що характеризує освітленість зображення, що дається оптичною системою.

Світловий потік F - потужність випромінювання, що сприймається оком.

Світлодіод - випромінюючий напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом, який призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії і енергію некогерентного світлового випромінювання.

Світлолікування (фототерапія) – використання з лікувальною і профілактичною метою електромагнітних коливань оптичного діапазону

(світла), які включають інфрачервоне, видиме і ультрафіолетове випромінювання.

Світлофільтр – це шар (зазвичай плоскопаралельний) якого-небудь середовища, що має вибіркове пропускання світла.

Світлова характеристика $I_v = f(I_{np})$ - залежність сили світла від прямого струму.

Світлопровід – гнучкий «кабель», який підводить пучок світла від джерела (освітлювача) до телескопу, розрізняються по довжині, діаметру конекторів, стандартам з'єднання із телескопом та освітлювачем, можливістю застосування автоклавів.

Середня дисперсія $n_F' - n_C'$ - значення показника заломлення для різних довжин хвиль, що зумовлюють дисперсійні властивості матеріалу.

Спектральна крива пропускання - графік функції, що характеризує розподіл світлового потоку за довжинами хвиль.

Спектральна характеристика – виражає залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі. Довжина хвилі випромінюючого світла визначається різницею енергій двох енергетичних рівнів, між якими проходить перехід електронів на випромінюючому етапі процесу рекомбінації і визначається вихідним матеріалом і легуючими домішками.

Спектральна характеристика чутливості відображає реакцію фотоприладу на дію випромінювання з різною довжиною хвилі. Ця характеристика визначає спектральну область використання приладу, його спектральну та інтегральну чутливість.

Струмова чутливість S_I (А/лм або А/Вт) визначає значення фотоструму, що створюється одиничним потоком випромінювання.

Сферичним дзеркалом називається частина відполірованої сферичної поверхні.

T

Теплове джерело - це джерело електромагнітного випромінювання, що випускається нагрітим тілом за рахунок підвищення внутрішньої енергії.

Темновий струм I_S – струм, що проходить через прилад при вказаній напрузі при відсутності потоку випромінювання в межах спектральної чутливості.

Темновий опір R_T - опір приладу при відсутності падаючого на нього випромінювання в межах його спектральної чутливості.

Температурні характеристики визначають залежність параметрів приладу (темновий струм, темновий опір, чутливість) від температури оточуючого середовища. Робочий температурний інтервал вказують в паспорті приладу.

Температура спікання t_{cn} - температура, при якій проходить термічне спікання двох зразків оптичного матеріалу (скла) розміром 20x20x10 мм, вкладених один на один полірованими поверхнями та нагрітих із швидкістю $2 \frac{^{\circ}C}{xв}$

Тілесний кут – частина простору, що обмежена конічною поверхнею. Чисельно тілесний кут дорівнює відношенню площі поверхні, що вирізана на сфері конусом з вершиною в центрі сфери, до квадрату радіуса.

У

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання – це спектр електромагнітних коливань в діапазоні від 180 до 400 нм.

Ф

Фокальні площини системи – площини, проведені перпендикулярно головній оптичній осі через точки F та F' .

Фотоелектрична оптична система - це система, в якій для реєстрації випромінювання джерела використовується фотоелектричний приймач, а концентрація випромінювання на приймач виконується оптичною системою.

Фотометрія - розділ фізичної оптики, що вивчає поняття і методи визначення світлового потоку, сили світла, освітленості, світимості, яскравості, а також коефіцієнтів світлопропускання, відбиття, поглинання, світлорозсіювання, тобто основних фотометричних величин.

Фотодіод – один із видів напівпровідникових приймачів світла, принцип дії якого заснований на зміні струму через р-п перехід при освітленні його світлом з довжиною хвилі, що відповідає області власного поглинання напівпровідникового матеріалу діода.

Фотометри - це прилади для вимірювання потоку випромінювання від середовищ, що випускають або поглинають випромінювання.

Фотопровідність – це зміна провідності напівпровідників під дією випромінювання.

Фоторезистор - напівпровідниковий прилад, принцип дії якого заснований на явищі фотопровідності.

Фотогальванічний ефект – це утворення фото Е.Р.С. при освітленні напівпровідникових систем.

Фотодіодний режим - якщо на фотодіод подається від'ємне зовнішнє зміщення $U_{зм}$.

Ц

Центрована оптична система – це оптична система, яка має вісь симетрії (оптичну вісь) та зберігає свої властивості при обертанні навколо цієї вісі.

Ч

Часова когерентність – стан в якому світлові хвилі є монохроматичними, тобто протягом свого періоду хвилі проходять задану точку в просторі за однаковий час

Частотні характеристики описують залежність чутливості від частоти модуляції випромінювання або тривалості імпульсів і характеризують інерційність приладу.

Чутливість відеокамери – визначає здатність камери бачити в темноті. Цей параметр задається в люксах і визначає мінімальний рівень освітленості, при якій камера буде працювати.

Ш

Швидкість світла - швидкість розповсюдження електромагнітного випромінення в вакуумі є фундаментальною фізичною постійною.

Шум – будь-яке небажане збурення або паразитний сигнал.

Я

Яскравість L – величина, рівна відношенню сили світла до площі освітленої поверхні. Вимірюється в канделах на квадратний метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) при заданому значенні прямого струму через діод.

Яскравісна характеристика $L = f(I_{np})$ - залежність яскравості від прямого струму.

ДОДАТОК А
Зразок оформлення титульної сторінки

Міністерство освіти і науки України
Черкаський державний технологічний університет
Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Звіт

з практичних робіт
з дисципліни

“Проектування та метрологічне забезпечення оптичних та оптико-електронних приладів”

Перевірів

(посада)

(П.І.П)

(підпис)

Виконав:

студент _____

(П.І.П)

групи _____

(підпис)

Черкаси 2020

ДОДАТОК Б - Технічні характеристики оптичних матеріалів

Таблиця Б1 – Категорії і класи однорідності партії безкольорового оптичного скла за показником заломлення [1-3]

<i>Категорія по показнику заломлення</i>	<i>Граничне відхилення показника заломлення</i> $\pm n_e \cdot 10^{-4}$	<i>Клас однорідності по показнику заломлення</i>	<i>Найбільша різниця показників заломлення</i> $\pm n_e \cdot 10^{-4}$
1	2	А	0,2
2	3	Б	0,5
3	5	В	1,0
4	10	Г	В межах категорії
5	20		

Таблиця Б2 – Категорії та класи однорідності партії заготовок безкольорового оптичного скла за середньою дисперсією [1-3]

<i>Категорія по середній дисперсії</i>	<i>Граничне відхилення середньої дисперсії</i> $\pm \Delta(n_{F'} - n_{C'}) \cdot 10^{-5}$	<i>Клас однорідності по середній дисперсії</i>	<i>Найбільша різниця показників заломлення</i> $\pm n_e \cdot 10^{-4}$
1	2	В	1,0
2	3	Г	В межах категорії
3	5		
4	10		
5	20		

Таблиця Б3 – Категорії безкольорового оптичного скла по оптичній однорідності для заготовок не більше 150 мм [1-3]

<i>Категорія оптичної однорідності</i>	<i>Відношення кутів $\frac{\varphi}{\varphi_0}$, не більше</i>
1	1,0
2	1,0
3	1,1
4	1,2
5	1,5

Для розмірів заготовок більше 150 мм встановлюють п'ять категорій по оптичній однорідності, що характеризуються поєднанням параметрів K_ϕ (зумовленого неохорідністю показника заломлення, що виникає в процесі віджигання скла), ΔK (зумовленого асиметричним відносно вісі заготовки розташуванням неоднорідностей показника заломлення, що виникає в процесі віджигання скла), K_x (зумовленого неоднорідністю показника заломлення, що виникає в процесі варки та розділки скломаси).

Таблиця Б4 - Категорії оптичного безкольорового скла по подвійному променезаломленню [1-3]

Категорія скла	Подвійне променезаломлення, $\frac{n_M}{c_M}$, не більше, при оптичному коефіцієнті напруження $B \cdot 10^{-12}$, Па ⁻¹			Примітка
	До 2	Від 2 до 2,8	Понад 2,8	
1	1,5	2	3	-
2	4	6	8	-
3	7	10	13	В заготовках деталей поляризаційних приладів при огляді в поляризованому світлі в робочому напрямку не повинні виявлятися просвітлені ділянки
4	10	15	20	-
5	35	50	65	-
6	80	80	80	Для кристалів та полікристалевих матеріалів

Таблиця Б5 – Категорії безкольорового оптичного скла і коефіцієнт пропускання по показнику ослаблення [1-3]

Категорія	Показник ослаблення, μ_A , см ⁻¹	Коефіцієнт пропускання скла в шарі 1 см, τ_A	Коефіцієнт внутрішнього пропускання для товщини 10 см τ_{iA} не менше
1	0,0002-0,0004	0,9995-0,9990	0,991
2	0,0005-0,0009	0,999-0,998	0,980
3	0,0010-0,0017	0,998-0,996	0,962
4	0,0018-0,0025	0,996-0,994	0,944
5	0,0026-0,0035	0,994-0,992	0,925
6	0,0036-0,0045	0,992-0,990	0,902
7	0,0046-0,0065	0,990-0,985	0,861
8	0,0066-0,0130	0,985-0,970	0,741

Таблиця Б6 – Категорії і класи безкольорового оптичного скла по безсвільності [1-3]

Категорія	Характеристика безсвільності	Переважна область застосування
1	Не допускаються світлі, виявляемі при огляді на установках, градуйованих по контрольному зразку 1-ї категорії або по зразку порівняння для ІЧ-області	Оптичне скло всіх типів в заготовках діаметром або з найбільшою стороною не більше 500 мм
2	Не допускаються світлі, виявляемі при огляді на установках, градуйованих по контрольному зразку 2-ї категорії або по зразку порівняння для ІЧ-області	
3	Не допускаються видимі в прохідному світлі потоки світлей; допускаються одиночні та вузлові світлі	Безкольорове скло в заготовках діаметром або з найбільшою стороною понад 500 мм; кольорове скло та скло з особливими оптичними властивостями в заготовках будь-яких розмірів

3a	Не допускаються видимі в прохідному світлі потоки світлей, одиночні та вузлові світлі, викривляючі розглядуваний крізь скло об'єкт, заданий технічними вимогами на скло заготовки	Оптичне скло всіх типів в заготовках будь-яких розмірів для деталей спостережних приладів
4	Допускаються світлі, що залишилися після переміщення по встановленому технологічному режиму для скла конкретної марки	Безкольорове скло в заготовках діаметром або з найбільшою стороною понад 500 мм; кольорове скло та скло з особливими оптичними властивостями в заготовках будь-яких розмірів
Клас	Кількість напрямів огляду	
А	Два взаємно перпендикулярних	
Б	Один	

Таблиця Б7 – Категорії, групи та класи безкольорового оптичного скла по пухирності [1-3]

<i>Категорія</i>	<i>Діаметр пухиря, мм, не більше</i>	<i>Група</i>	<i>Сумарна площа, мм², перетинів пухирів в 100 см³</i>
1	Не допускається		
1a	0,05		До 0,029 вкл.
2	0,1	11↑	Понад 0,029 до 0,125
3	0,2	12	>>0.125 >> 0.250
4	0,3	13	>>0.25 >> 0.5
5	0,5	14	>>0.5 >> 1.0
6	0,7	15	>>1.0 >> 2.0
7	1,0	16	>>2.0 >> 3.0
8	2,0	17	
9	3,0		
10	5,0		
<i>Клас</i>	<i>Середня кількість пухирів діаметром понад 0,03 мм в 1 кг, не більше</i>	<i>Клас</i>	<i>Середня кількість пухирів в 100 см³</i>
А	3	21	До 1,0 вкл.
Б	10	22	>> 1.0 >> 2.5
В	30	23	>> 2.5 >> 6.3
Г	100	24	>> 6.3 >> 16.0
Д	300	25	>> 16.0 >> 40.0
Е	1000	26	>> 40.0 >> 80.0
Ж	3000	27	>> 80.0 >> 150.0
		28	>> 150.0

Таблиця Б8 - Вимоги до якості оптичних матеріалів [1-3]

<i>Оптичні деталі (складальні одиниці)</i>	<i>Рекомендовані категорії та класи скла для показників якості</i>						
	<i>Оптичні постійні</i>	<i>Однорідність</i>	<i>Подвійне променезаломлення</i>	<i>Безсвільність</i>	<i>Пузирність</i>		<i>Показник ослаблення</i>
Об'єктиви мікроскопів	1А-3В	1	1	1А	13;24-14;25	4В-5Г	3;4
Об'єктиви телескопічних систем великого збільш.	2А-3Б	2	3	1	15;26-16;26	6Г-7Д	4;5
Об'єктиви телескопічних систем малого збільшення	2А-3Б	3	3	1	15;25-16;21	6Г-7А	4;5
Об'єктиви аерофотознімальні	1А-3Б	3	3	1А	15;24-16;25	6В-7Г	4;5
Об'єктиви фотографічні	2А-3Б	3	3	1	14;24-15;25	5В-6Г	4;5
Об'єктиви кінознімальні та проекційні	1А-3Б	3	3	1	14;24-15;25	5В-6Г	4;5
Об'єктиви коліматорів	1А-3Б	1	1	1А,Б	15;25-16;26	6Г-7Д	4;5
Об'єктиви тіньових приладів	2А-3Б	2	3	1А,Б	15;25-16;26	6Г-7Д	5;6
Об'єктиви телевізійні	1А-3Б	3	3	1	14;24-15;25	5В-6Г	4;5
Об'єктиви УФ – та ІЧ - області	2А-3Б	1;2	3	1	13;24-14;25	4В-5Г	1;3
Об'єктиви астрономічні	1А-3Б	1;2	3	1	15;25-16;26	6Г-7Д	4;5
Обертаючі системи	3Б	3	3	1	15;25-16;26	6Г-7Д	1;2
Колективи	5Г	3	3	1	11;21-12;21	2А-3А	2;5
Окуляри та лупи	4Г	3;4	3	2-3А,Б	11;21-12;22	2А-3Б	5;6
Конденсори	5Г	4	3	3А,Б	15;25-16;27	6Г-7Д	5;6
Деталі поляризаційних приладів	4Г	1-4	2	1А	14;24-15;25	5В-6Г	2;3
Прими спектральні та рефрактометричні	3Б-4Г	1	1	1А	14;24-15;25	5В-6Г	1-4
Призми відбиваючі	5Г	1-3	3	1-3А	12;21-15;25	3А-6Г	1-3
Пластини інтерферометрів	5Г	1-3	1-3	1А	15;25-16;26	6Г-8Д	3-5
Компенсатори	4Б	1-3	1-3	1	15;25-16;26	6Г-7Д	3;4
Сітки, шкали, растри	5Б	3;4	3-5	1	11;21	1А	5;6
Оглядове скло	5Б	3;4	3-5	1	15;25-16;26	6Г-7Д	6
Дзеркала світлороздільні із внутрішнім відбиттям	5Б	1-3	1-3	1	13;24-15;25	4В-6Г	4
Дзеркала із зовнішнім відбиттям	5Б	1-3	1-3	1	14;24-16;26	5В-7Д	4
Дзеркала без отвору	-	-	3-5	-	15;25-16;26	5В-7Д	4
Дзеркала з центральним або розвантажувальним отвором	-	-	3-4	-	16;25-17;28	8Г-10Е	-
Дзеркало позаосьове	-	-	1	-	15;25-16;26	6Г-7Д	-

Таблиця Б9 – Показники якості кольорового оптичного скла [1-3]

<i>Область застосування світлофільтрів</i>	<i>Категорії якості кольорового оптичного скла</i>			
	<i>Показник спектрального ослаблення або поглинання</i>	<i>Подвійне променезаломлення</i>	<i>Безсвільність</i>	<i>Пузирність</i>
Телескопічні прилади	2	3	2	2А-4В
Біологічні мікроскопи: для конденсорів для колективів	2	3	3	4В
	2	3	4	5Г
Контрольно-вимірювальні прилади	2	3	2-3	2А-4В
Пристрої для відтворення джерел світла, корекція	1-2	2-3	2-3	4-5В
Кіно – і фотоапаратура	2-3	4	2	4-5В
Аерофотоапарати	2	2-3	2	2В

Таблиця Б10 – Спектральні характеристики кварцового скла [1-3]

<i>Марка скла</i>	<i>Спектральна характеристика</i>	<i>Основне призначення</i>
КУ-1	Скло, прозоре в УФ області спектру, без помітних смуг поглинання в інтервалі довжин хвиль 170-250 нм нелюмінісцентне	Захисне скло, призми спектрофотометрів та інші оптичні деталі, що працюють в вакуумній та УФ частині спектру
КУ-2	Скло, прозоре в УФ області спектру, із помітною смугою поглинання в інтервалі довжин хвиль 170-250 нм	Оптичні деталі, для яких смуги поглинання не важливі
КВ	Скло, прозоре в видимій області спектру, не вільне від смуг поглинання в УФ області спектру і від смуги поглинання при 2720 нм	Оптичні деталі, що працюють в області спектру 0,25-2,5 мкм; деталі, що вимагають низького коефіцієнту розширення або високої термостійкості
КВ-Р	Скло із тими ж властивостями, що й КВ, стійке до гама-радіації.	Захисне скло та інші оптичні деталі, що працюють в ІЧ області спектру (до 3,5-4 мкм)
КИ	Скло, прозоре в ІЧ області спектру, без помітної смуги поглинання при 2720 нм	

Таблиця Б11 – Категорії скла, що характеризуються показником поглинання [1-3]

<i>Категорія</i>	<i>Показник поглинання k_{λ}, см⁻¹ не більше</i>			
	<i>при довжинах хвиль, λ, нм</i>			<i>на ділянці спектру 2600-2800 нм</i>
	<i>170</i>	<i>215</i>	<i>240</i>	
1	0,3	0,05	0,05	0,05
2	не нормується	0,1	0,05	0,1
3	не нормується	0,15	0,10	-
4	не нормується	0,25	0,27	-

Таблиця Б12 – Допустимі відхилення по оптичній однорідності [1-3]

<i>Категорія</i>	<i>Найбільше відношення φ/φ_0</i>	<i>Якість дифракційного зображення точки</i>
1	1	Без дефектів для заготовки довжиною ходу променю не більше 20 мм
1a	1	Допускаються дефекти
2	1	Не нормується
3	1,1	
4	1,2	
5	1,5	

Таблиця Б13 – Подвійне променезаломлення в залежності від категорії оптичної однорідності для заготовок всіх марок скла (окрім КИ) [1-3]

<i>Категорія</i>	<i>Різниця ходу, нм/см, не більше</i>	<i>Категорія оптичної однорідності</i>
I	30	1; 1a; 2
II	50	3-5
III	70	не нормується

Таблиця Б14 - Категорії і розміри пузирів [1-3]

<i>Категорія</i>	<i>Найбільший розмір пузиря, мм</i>
I	0,1
II	0,2
III	0,5
IV	1,0
V	2,0
VI	3,0

Таблиця Б15 - Категорії кварцевого скла по безсвільності [1-3]

<i>Категорія скла</i>	<i>Характеристика безсвільності</i>
I	не допускаються потоки ниткоподібних свілей, що перевищують по оптичній дії контрольну свіль I категорії та інші свілі (скупчення мілкозернистої неоднорідності), навколо яких виявляється подвійне променезаломлення, в 1.5 рази перевищує променезаломлення заготовки
II	Не допускаються потоки ниткоподібних свілей, що перевищують по оптичній дії контрольну свіль 2 категорії та інші свілі (скупчення мілкозернистої неоднорідності), навколо яких виявляється подвійне променезаломлення, в 1.5 рази перевищує променезаломлення заготовки. Не допускаються одиночні ниткоподібні більш грубі свілі, якщо їх кількість перевищує 10 шт. на 1 кг скла, а загальна протяжність один діаметр або діагональ заготовки

Таблиця Б16 - Категорії кварцевого скла по мілкозернистій неоднорідності [1-3]

<i>Категорії скла</i>	<i>Характеристики мілкозернистої неоднорідності</i>
1	Не допускається мілкозерниста неоднорідність грубіша ніж в контрольному зразку, встановленому для 1-ї категорії
2	Не допускається мілкозерниста неоднорідність грубіша ніж в контрольному зразку, встановленому для 2-ї категорії
3	Не допускається мілкозерниста неоднорідність грубіша ніж в контрольному зразку, встановленому для 3-ї категорії

Таблиця Б17 - Категорії і класи кварцового скла по включенням [1-3]

<i>Категорії</i>	<i>Розмір включення, мм не більше</i>		
	<i>непрозорих кристалів</i>	<i>напівпрозорих</i>	<i>прозорих</i>
1	0,5	2,0	5,0
2	2,0	5,0	10,0
3	3,0	8,0	15,0
4	6,0	не нормується	не нормується

<i>Клас</i>	<i>Розмір включення, мм не більше</i>		
	<i>непрозорих кристалів</i>	<i>напівпрозорих</i>	<i>прозорих</i>
а	4	4	4
б	8	8	8
в	12	12	12
г	16	не нормується	не нормується

Таблиця Б18 - Групи включень [1-3]

<i>Група за включеннями</i>	<i>Діаметр ділянки, мм</i>	<i>Діаметр включень, мм</i>	<i>Кількість включень, шт. не більше</i>	<i>Відстань між включеннями, мм не менше</i>
0	5	До 0,01 >0.01 до 0,02 >0.02	Не враховується 3 Не допускається	1
1	10	До 0,05 >0.05 до 0,1 >0.1 до 0,3 >0.3	Не враховується 3 1 Не допускається	5
2	15	До 0,1 >0.1 до 0,3 >0.3 до 0,5 >0.5	Не враховується 3 1 Не допускається	5
3	15	До 0,1 >0.1 до 0,5 >0.3 до 0,7 >0.7	Не враховується 4 2 Не допускається	5

Таблиця Б19 - Класи чистоти та група по включенням в залежності від типу деталі [1-3]

<i>Тип деталей</i>	<i>Призначення деталі як елементу оптичної системи</i>	<i>Клас чистоти поверхні</i>	<i>Група по включенням</i>
-	Деталі, що знаходяться в фокальній площині і розглядаються під збільшенням не менше 5 ^x	IV	0
В	Растри, лінзи Френеля (при розташуванні їх в площині зображення або поблизу неї)	IV	1
Г	Лупи, окуляри, деталі фотоапаратів, біноклів та інших приладів широкого вжитку	IV-VII	1-2
Д	Деталі освітлювальних систем. Захисне скло, екрани	V-VII	2-3
Е		VI-VII	2-3

Таблиця Б20 - Допуски на відхилення точності форми плоских та сферичних поверхонь оптичних деталей [4, 5]

<i>Деталі</i>	<i>N</i>	<i>ΔN</i>	<i>Клас точності пробного скла</i>
Високоякісні об'єктиви коліматорів, дзеркала точних приладів	0,1-0,5	0,05-0,1	1
Дзеркала середньої точності	1-2	0,1-0,2	1-2
Дзеркала невідповідальних систем (освітлювальних)	5	0,5	3
Об'єктиви телескопічних систем	2-3	0,2-0,5	2-3
Фотооб'єктиви: Аерофотознімальні звичайні	1-2 2-3	0,1-0,2 0,2-0,5	1-2 2-3
Мікрооб'єктиви: До $10^x \cdot 0,25$ Від $10^x \cdot 0,25$ до $40^x \cdot 0,65$ Від $40^x \cdot 0,65$ і більше	2-3 1-2 0,5-1,0	0,2-0,5 0,1-0,2 0,05-0,1	2-3 1-2 1
Окуляри	3-5	0,5-0,8	3
Призми*: Відбиваючі поверхні Заломлюючі поверхні	0,5-1,0 2-4	0,1-0,30,5- 1,0	3 3
Захисне скло	1-3	0,2-0,3	3
Сітка	10-20	1,0-2,0	-
Світлофільтри (перед об'єктивом)	1-2	0,3-0,5	3
Світлофільтри (за окуляром і перед ним)	3-5	0,5-0,8	-
*Більш жорсткий допуск береться для поверхонь призм, розташованих перед об'єктивом та працюючих при великих збільшеннях $\Gamma > 6^x$; середній допуск – при тому ж розташуванні поверхонь призм, але при слабких збільшеннях $\Gamma < 6^x$ та для поверхонь призм, розташованих після об'єктиву. Менш жорсткий допуск береться для поверхонь призм, розташованих поблизу площини зображення.			

Таблиця Б21 - Класи точності пробного скла [4, 5]

<i>Клас точності пробного скла</i>	<i>ΔR сферичного скла в залежності від R, мм</i>						<i>ΔR плоского скла</i>
	<i>Номінальне значення, мкм</i>			<i>Відносне значення, %</i>			<i>Допустиме відхилення від площинності в інтерференційних смугах</i>
	Від 0,5 До 2	>2 До 10	>10 До 37,5	>37,5 До 250	>250 До 1000	>1000 До 40000	
1	0,5	1,0	2,0	0,01	0,02	0,02/1000	0,05
2	1,0	3,0	5,0	0,03	0,05	0,05/1000	0,07
3	2,0	10,0	15,0	0,1	0,15	0,15/1000	0,1

Таблиця Б22 - Нульові класи чистоти поверхонь оптичних деталей [4, 5]

Клас чистоти	Зона	Подряпини		Діаметр точок, мм, не більше	Число точок, не більше, при світловому діаметрі		
		Ширина, мм, не більше	Сумарна довжина від світлового діаметру, мм, не більше		Від 5 до 20	Від 20 до 60	Від 60
0-10	Середня	0,002	0,2	0,004	1	3	5
	крайня	0,004	0,3	0,006	3	6	10
0-20	Середня	0,004	0,2	0,010	1	3	5
	крайня	0,006	0,3	0,015	3	6	10
0-40	Середня	0,006	0,2	0,015	1	3	5
	крайня	0,008	0,3	0,025	3	6	10

Таблиця Б23 – Класи чистоти поверхонь оптичних деталей [4, 5]

Клас чистоти	Подряпини		Крапки		Скупчення дефектів	
	Ширина, мм не більше	Сумарна довжина, мм, не більше	Діаметр, мм, не більше	Кількість, не більше	Діаметр обмеженої ділянки, мм	Сумарна площа подряпин і точок, мм ² , не більше
I	0.004	2,0xO ₀	0.02	0,5xO ₀	1.0	0.004
II	0.066		0.05		1.2	0.006
III	0.01		0.1		2.0	0.020
IV	0.02		0.3		5.0	0.10
V	0.04		0.5		10.0	0.40
VI	0.06		0.7		25.0	3.0
VII	0,10				50.0	10.0
VIII	0,20				0,4xO ₀	Не нормується
VIIIa	0,30	1,5xO ₀				
IX		2,0xO ₀				
IXa	0,40	1,5xO ₀		0,3xO ₀		

Таблиця Б24 – Рекомендовані класи чистоти поверхонь оптичних деталей в залежності від їх виду та призначення [4, 5]

Клас чистоти, Р	Вид і призначення оптичних деталей
0-10, 0-20	Сітки та колективи в приладах із фокусною відстанню окуляра та наступною оптичною системою від 10 до 15 мм; шкали і лімби, розглядувані під збільшенням більше 25 ^x ; підложки дифракційних решіток
0-20	Сітки та колективи в приладах із фокусною відстанню окуляра та наступною оптичною системою від 15 до 55 мм; шкали і лімби, розглядувані під збільшенням від 25 ^x до 10 ^x
0-40	Сітки та колективи в приладах із фокусною відстанню окуляра та наступною оптичною системою більше 25 мм; шкали і лімби, розглядувані під збільшенням менше 10 ^x ; підложки растрів і деталі, що знаходяться в площині зображення фотоелектричних систем, що працюють в ІЧ області спектру
I	Перша лінза ширококутових окулярів; перша лінза мікрооб'єктивів із збільшенням більше 10 ^x

II	Призми, колективи, перша лінза ширококутових окулярів та інші деталі, розташовані поблизу від площини дійсного зображення оптичної системи; лінзи мікрооб'єктивів
III	Лінзи окулярів телескопічних приладів, мікроскопів та вимірювальних лабораторних приладів; окулярні призми; вирівнювальне скло фотоапаратів; лінзи обтікачів та лінзи об'єктивів, що працюють в ІЧ-області спектру в умовах сонячного засвічування; пластини кільця; призми, що застосовуються в якості оптико-механічних затворів і дзеркал відбивачів; плоско-паралельні пластини, що застосовуються в якості компенсаторів світлоподільних пластин, селекторів; підложки для діелектричних дзеркал в світловій зоні для твердотільних лазерів та приладів на основі лазерів
IV	Лінзи окулярів, об'єктивів та обертальних систем в телескопічних приладах; призми і пластини в паралельних і східних пучках променів телескопічних приладів; лупи; лінзи конденсорів і об'єктивів, що працюють в ІЧ області при відсутності сонячного засвічування; вирівнює скло фотографічних апаратів; підложки для інтерференційних фільтрів; захисне скло для електронно-променевих трубок
V	Лінзи об'єктивів, окулярів та обертових систем; головні призми; призми в паралельних пучках та захисне скло в телескопічних приладах; лінзи і дзеркала фотографічних, кінознімальних та проекційних об'єктивів діаметром від 20 до 50 мм; лінзи конденсорів і об'єктивів, що працюють в ІЧ – області при відсутності сонячного засвічування; активні елементи (торцева поверхня); циліндричні двоканальні відбивачі (зовнішня і внутрішня поверхні), що застосовуються в лазерах.
VI	Лінзи об'єктивів та обертаючих систем телескопічних приладів; лінзи і дзеркала фотографічних, кінознімальних, проекційних об'єктивів діаметром від 50 до 100 мм.
VII	Лінзи і дзеркала фотографічних, кінознімальних та астрономічних об'єктивів діаметром від 100 до 300 мм; оглядове скло розміром до 300 мм.
VIII IX	Лінзи і дзеркала фотографічних і астрономічних об'єктивів діаметром від 300 до 500 мм; оглядове скло розміром від 300 до 500 мм
VIIIa IXa	Лінзи і дзеркала фотографічних і астрономічних об'єктивів діаметром більше 500 мм; оглядове скло розміром більше 500 мм

Таблиця Б25 - Рекомендовані класи чистоти поверхні оптичних деталей із різних матеріалів [4, 5]

<i>Клас чистоти</i>	<i>Матеріал деталі</i>	<i>Діаметр деталі, мм, не більше</i>
0-10, 0-20, 0-40, I-IV	Оптичне скло груп хімічної стійкості А, Б, «с»	150
V-IXa		Не обмежується
III-IV	Оптичне скло групи «д» по та груп В	100
V-IXa		Не обмежується
IV-VII	Фториди	250
IV-VII	Гігроскопічні, пластичні кристали	250
IV-IXa	Тверді кристали (корунд , гранати)	150
IV-IXa	Напівпровідникові кристали	100
V-IXa	Полімери	250
V-IXa	Метали	Не обмежується

III-VII	Волоконо-оптичні вироби	100
IV-VII	Оптична кераміка	200
IV-V	Оптичні сітали	100
VI-IXa		Не обмежується
Примітка. Допустимість дефектів на поверхні деталей із структурою яка з'являється в процесі обробки (метали, волоконно-оптичні вироби та інш.) повинна бути встановлена на кресленні оптичних деталей		

Таблиця Б26 – Товщини від'ємних лінз [4, 5]

Форма лінз	D, мм	Товщина d, мм, при допуску на місцеву похибку ΔN смуг			
		До 0,3	>0,3 до 0,5	>0,5 до 2,0	>2,0
Подвійно- ввігнуті	До 50	0,15D	0,12D	0,12D	0,10D
	> 50-120	0,12D	0,12D	0,10D	0,08D
	120-260	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D
	260-500	0,10D	0,08D	0,08D	0,08D
Випукло- ввігнуті	До 50	0,12D	0,12D	0,10D	0,10D
	> 50-120	0,12D	0,10D	0,08D	0,08D
	120-260	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D
	260-500	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D

Таблиця Б27 - Товщина позитивних лінз [4, 5]

D	d	D	d	D	d
До 6	1,0	30-50	2,0	180-260	5,0
6-10	1,2	50-80	2,5	260-360	6,0
10-18	1,5	80-120	3,0	360-500	7,0
18-30	1,8	120-180	4,0		

Таблиця Б28 – Товщина пластини [4, 5]

Точність виготовлення	Товщина	Застосування
Висока $N \leq 0.1; \Delta N \leq 0.05$	$d \geq \left(\frac{1}{5} \dots \frac{1}{7}\right) \cdot l$	Дзеркала інтерферометрів астрономічних та вимірювальних приладів, кінцеві відбивачі дальномірів
Середня $N \geq 0.1; \Delta N \geq 0.05$	$d \geq \left(\frac{1}{8} \dots \frac{1}{10}\right) \cdot l$	Захисне скло та світлофільтри візуальних приладів
Низька $N \geq 10; \Delta N \geq 2$	$d \geq \left(\frac{1}{15} \dots \frac{1}{25}\right) \cdot l$	Сітки і дзеркала освітлювальних систем

Таблиця Б29 – Допуск на товщину лінзи [4, 5]

Призначення лінзи	D	Δd
	мм	
Обертаючі системи і об'єктиви телескопічних систем	До 50	±0,3
	Від 50 до 100	±0,3
	Більше 100	±1,0
Колективи	До 20	±0,3
	Від 20 до 50	±0,5
	Більше 50	±1,0
Окуляри, лупи, конденсори	До 10	±0,2
	Від 10 до 20	±0,3
	Від 20	±0,6

Таблиця Б30 – Допуски і посадки на діаметри лінз, сіток, світлофільтрів та інших круглих деталей [4, 5]

Допуск на децентрування, мм	Поля допусків лінз		Призначення деталі
	центруюча	нецентруюча	
Підвищеної точності – до 0,05	$g6, f7$	$d11$	Лінзи світлосильних фотооб'єктивів
Середньої точності – від 0,05 до 0,1	$h8, e9$	$d9, c11$	Лінзи мікрооб'єктивів. Лінзи телескопічних приладів, сітки та шкали середньої точності
Зниженої точності Більше 0,1	$c11$	-	Конденсорні лінзи, світлофільтри, дзеркала, захисне скло
$g6$ - без покриття фасочним лаком; $f7$ - із покриттям фасочним лаком			

Таблиця Б31 – Ширина фасок t та заготовок сіток в залежності від діаметру D [4, 5]

Діаметр деталі, мм	Ширина фаски, мм		
	Несклеювана сторона	Склеювана сторона	Для закріплення завальцовкою
До 6 (вкл.)	0,1 ^{+0,1}	0,1 ^{+0,1}	0,1 ^{+0,2}
Від 6 до 10	0,2 ^{+0,1}		0,3 ^{+0,2}
Від 10 до 18	0,3 ^{+0,3}	0,2 ^{+0,1}	0,4 ^{+0,2}
Від 18 до 30			0,5 ^{+0,3}
Від 30 до 50	0,5 ^{+0,5}		0,7 ^{+0,5}
Від 50 до 80		0,3 ^{+0,3}	1,0 ^{+0,5}
Від 80 до 120			-
Від 120 до 180	-		
Від 180 до 260	-		

Таблиця Б32 – Кути нахилу фасок α в залежності від відношення D/R [4, 5]

Відношення діаметру до радіусу поверхні D/R	Кут нахилу фаски α , °, на поверхні		
	випуклій	ввігнутій	плоскій
До 0,6 (вкл.)	45	45	45
Від 0,6 до 1,5	30	60	
Більше 1,5	-	90	

Таблиця Б33 – Розміри фасок (мм) на ребрах і кутах некруглих деталей [4, 5]

Довжина ребра, мм	Розмір фаски для кутів		Довжина ребра, мм	Розмір фаски для кутів	
	двогранних	тригранних		двогранних	тригранних
До 6 (вкл.)	$0,1^{+0,2}$	$0,3^{+0,3}$	Від 50 до 80	$0,7^{+0,8}$	$2,5^{+0,8}$
Від 6 до 10	$0,2^{+0,3}$	$0,5^{+0,3}$	Від 80 до 120	$0,8^{+0,9}$	$3,0^{+1,2}$
Від 10 до 18	$0,3^{+0,4}$	$1,0^{+0,4}$	Від 120 до 150	$1,0^{+1,0}$	$3,5^{+1,5}$
Від 18 до 30	$0,4^{+0,5}$	$1,5^{+0,5}$	Понад 150	$1,2^{+1,2}$	$4,0^{+2,0}$
Від 30 до 50	$0,5^{+0,6}$	$2,0^{+0,6}$			

Таблиця Б34 - Параметри шорсткості поверхонь оптичних деталей [1-2]

<i>Числове значення параметрів шорсткості</i>		<i>Умовне позначення шорсткості</i>	<i>Базова довжина, l, мм</i>	<i>Інструмент для обробки</i>	<i>Характеристика обробленої поверхні</i>
<i>R_a</i>	<i>R_z</i>				
-	320-160		25	Твердосплавний інструмент	Поверхні литих, полірованих і точених заготовок
-	160-40		25	Алмазний інструмент зернистістю від 250/200 до 400/315 на металевій зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від 16 до 25	Грубо оброблені поверхні після розпилювання, свердління, точіння та шліфування
-	40-20		25	Алмазний інструмент зернистістю від 160/125 до 200/160 на металевій зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від 10 до 16	-//-
-	20-10		8,0	Алмазний інструмент зернистістю від 80/63 до 125/100 на металевій зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від 4 до 8	Поверхні, оброблені на операції грубого шліфування, свердлування і розпилювання. Обробка бокових поверхонь призм і пластин
2,5-1,25	-		8,0	Алмазний інструмент зернистістю від 50/40 до 63/50 на металевій зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від M28 до M40	Поверхні, оброблені на операції середнього шліфування і центрування. Обробка бокових поверхонь призм і пластин, нанесення фасок
0,63-0,32	-		8,0	Алмазний інструмент зернистістю від 20/24 до 28/20 на металевій зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від M10 до M14	Поверхні, оброблені на операції тонкого шліфування і центрування
0,32-0,16			2,5	Алмазний інструмент зернистістю від 14/10 до 10/7 на металевій зв'язці і від 63/50 до 20/14 на органічній зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від M5 до M7	Поверхні, оброблені на операції тонкого шліфування
0,16-0,02			2,5	Алмазний інструмент зернистістю від 10/7 до 20/14 на органічній зв'язці. Абразивний порошок з номером зернистості від M5 – M3	-//-

-	0,100-0,050		0,8	Полірувальні порошки на волокнистому, смоляному або металевому полірувальнику. Алмазний інструмент на органічній зв'язці	Поверхні, оброблені на операції полірування із незначними слідами недополірування (шорсткості, видні неозброєним оком).
-	0,050-0,025		0,5	Полірувальні порошки на волокнистому, смоляному або металевому полірувальнику. Алмазний інструмент на органічній зв'язці	Поверхні, оброблені на операції полірування.
-	0,050-0,025	$R_z 0.05$	0,8	Полірувальні порошки на смоляному, синтетичному або металевому полірувальнику. Алмазний інструмент на органічній зв'язці	Поверхні, оброблені на операції полірування.

Таблиця Б35 – Початкові матеріали для нанесення оптичного покриття [1-3]

<i>Матеріал</i>	<i>Умовне позначення</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Умовне позначення</i>
Алюміній	1	Цинк селеністий	39
Золото	2	Сурми триокис	40
Мідь	3	Кремнію двоокис	41
Нікель	4	Сірка	42
Паладій	5	Тетраетоксисилан	43
Платина	6	Тетраетоксититан	44
Родій	7	Тетраетоксилан і тетраетоксититан (суміш)	45
Срібло	8	Хлорокис цирконію	46
Хром	9	Тетраетоксититан з епоксидною діановою смолою	47
Срібло із міддю (сплав)	10	Мідь серніста (сульфід закисної міді)	48
Кадмій	11	Алюміній хлористий	49
Кремній	12	Літій фтористий	50
Ніобій	13	Гафнію хлорокис	51
Тантал	14	Титан чотирьоххлористий	52
Титан	15	Татраметоксисилан	53
Германій	16	Фосформа п'ятиокис	54
Телур	17	Спирт лауриловий	55
Стронцій фтористий	18	Барій фтористий	56
Гафній	19	Цирконію двоокис	57
Скандій	20	Олова двоокис	58
Амоній фосфорнокислий	21	Індій	59
Калій хромат і біхромат	22	Ніобій п'ятихлорний	60
Криоліт	23	Кислота азотна	61
Магній фтористий	24	Кислота соляна	62
Срібло азотнокисле	25	Кислота оцтова	63
		Ртуть оцтовокисла	65
Олово двохлористе	26	Деметилдихлорсилан	66
Сурма трисерніста	27	Диметилдіетоксисилан	67
Олово двохлорне і вісмут трихлорний	28	Диметилдіетоксисилан	68
Цинк серністий	29	Індію окис	69
Торій азотнокислий	30	Вінілтрихлорсилан та оцтова ртуть	70
Кремнію моноокис	31	Лак бакелітовий прозорий	71
Цинку окис	32	Лак бакелітовий з наповнювачем (алюмінієвий пил, слюда, сажа та інші)	72
Олово двохлорне і амоній фтористий (суміш)	33	Цирконій	36
Вольфрам шестихромистий	34	Свинець фтористий	37
Амонію окис	35	Хромовий агідрид із фосфорною кислотою та кремнефтористим натрієм	38

Таблиця Б36 – Способи нанесення оптичного покриття [1-3]

<i>Спосіб нанесення покриття</i>	<i>Умовне позначення</i>	<i>Спосіб нанесення покриття</i>	<i>Умовне позначення</i>
Із розчину	Р	Катодним високочастотним розпиленням	Кв/ч
Випарюванням в вакуумі	И	Обробкою з нагрівом в розплаві	Н
Випарювання за допомогою електронного нагріву	ИЭ	Кісточкою, пульверизатором або центрифугою	П
Травленням	Т	Обробкою в парах або газах	Г
Електролізом	Е	Катодним розпиленням	К

Таблиця Б37 – Значення ν_{α} при різних кількостях вимірювань n

n	$q = 1 - \alpha$			
	0.1	0,05	0,025	0,01
3	1,406	1,412	1,414	1,414
4	1,645	1,689	1,710	1,723
5	1,731	1,869	1,917	1,955
6	1,894	1,996	2,067	2,130
7	1,974	2,093	2,182	2,265
8	2,041	2,172	2,273	2,374
9	2,097	2,237	2,349	2,464
10	2,146	2,294	2,414	2,540
11	2,190	2,383	2,470	2,606
12	2,229	2,387	2,519	2,663
13	2,264	2,426	2,562	2,714

n	$q = 1 - \alpha$			
	0.1	0,05	0,025	0,01
14	2,297	2,461	2,602	2,759
15	2,326	2,493	2,638	2,808
16	2,354	2,523	2,670	2,837
17	2,380	2,551	2,701	2,871
18	2,404	2,557	2,728	2,903
19	2,426	2,600	2,754	2,932
20	2,447	2,623	2,778	2,959
21	2,467	2,644	2,801	2,984
22	2,486	2,664	2,823	3,008
23	2,504	2,683	2,843	3,030
24	2,520	2,701	2,862	3,051
25	2,537	2,717	2,880	3,071

ДОДАТОК В - Технічні характеристики джерел та приймачів випромінювання

Таблиця В1 – Основні параметри кремнієвих фотодіодів

Тип фотодіода	Розмір чутливого елемента, мм	Основні параметри								
		$\Delta\lambda$, мкм	$\lambda_{\max}$, мкм	U_R , В	I_T , мкА Не більше	$S_{I_{\text{int}}}$, мА/лм (мкА/лм)	τ , с	$K_{\text{фс}}$, %	Опір ізоляції між корпусом і виводом, МОм	Маса, г
ФДК-1	Ø1	0,5-1,1	0,8-0,9	20	3	3	10^{-5}	-	-	0,3
ФДК-1В	Ø1			20	3	3			-	0,3
ФД-3К	Ø1,13			15	0,5	3	$4 \cdot 10^{-6}$		100	0,8
ФД-6К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,82-0,86	20	1	$1,4 \cdot 10^{-2}$	10^{-5}		100	1,6
ФД-7К	Ø10			27	5	$4,7 \cdot 10^{-1}$			50	10
ФД-8К	2x2	0,5-1,12	0,85-0,92	20	1	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$		200	1
ФД-9К	4,4x4,4 А6о 5,6x5,6			10	10	3	$1,3 \cdot 10^{-5}$		100	1,6
ФД-10К	1,9x1,9			20	1	$4,4(0,7 \cdot 10^{-2})$	10^{-5}			2,0
ФД-10КП	Ø5			10	0,005	3	$6 \cdot 10^{-9}$			1,0
ФД-11К	Ø2,5			10	0,2	5	$5 \cdot 10^{-6}$			3,0
ФД-17К	Ø10			15	10	$4,7 \cdot 10^{-1}$	10^{-5}			10
ФД-18К	Ø10	0,47-1,1	0,85-0,92	27	5	6				10
ФД-19КК	1x1(4)	0,5-1,1	0,75-0,8	3	0,1	4,2 (група А) 3,8 (група Б)	$3 \cdot 10^{-6}$	2	50	1,2
ФД-20КП	2x2(4)	0,5-1,1	0,85-0,92	7	0,1	4	$5 \cdot 10^{-6}$	2	100	4
ФД-20-30К	1,5x1,5(2)	0,5-1,1	0,85-0,95	5	0,1	0,3 А/Вт при $\lambda=0,9$ мкм	$1,8 \cdot 10^{-6}$	3	200	0,65
ФД-20-31К	Ø1,4	0,47-1,17	0,78-0,82	20	0,1	4,0 (група А) 3,8 (група Б)	10^{-5}	-	100	0,8
ФД-20-32К	2x1,35(2)	0,45-1,06	0,78-0,92	3	0,1	4	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,5		2

ФД-20-33К	0,3x1,4 0,4x1,4 по 2 элемента	0,45-1,9	0,72-1,0	5	0,05	4,5 (0,25 А/Вт) при $\lambda=0,9$ мкм	$1,2 \cdot 10^{-7}$	10		2
ФД-21-КП	Ø1,55	0,4-1,1	0,72-0,85	10	0,017	3,3	$6 \cdot 10^{-9}$	-		1
ФД-22-КП	1x1(4)	0,45-1,1	0,75-0,9	7	0,05	4,4	10^{-6}	2		2
ФД-23К	1,9x1,9	0,5-1,12	0,8-0,85	20	0,1	$4,4(7 \cdot 10^{-3})$	10^{-5}	-		2,0
ФД-24К	Ø10	0,47-1,12	0,75-0,85	27	2,5	$6(4,7 \cdot 10^{-1})$		-		10
ФД-25К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,9	20	1	$4 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	-	200	1
ФД-26К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,95	20	3		$1,2 \cdot 10^{-5}$	-		1
ФД-27К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,95	20	1	$7,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-5}	-	100	1
ФД-28КП	1,24x1,24	0,4-1,1	0,72-0,85	4	0,02	3,5 (0,2 А/Вт) при $\lambda=0,63$ мкм	$1,6 \cdot 10^{-7}$	-		5
ФД-К-142	Ø13,7	0,3-1,1	0,72-0,85	120	1,5	10	$8 \cdot 10^{-8}$	5	200	21
ФДК-155	Ø5	0,4-1,1	0,75-0,85	10	10	3,5	10^{-5}		100	2
ФД-252	Ø0,6	0,4-1,1	0,76-0,88	24	0,01	0,35 А/Вт при $\lambda=0,63$ мкм	$5 \cdot 10^{-9}$		1000	3
ФД-246	12x0,3(12) Та 0,3x0,4 (64)	0,5-1,1	0,75-0,9	0,2	1	3,5	10^{-5}	5	100	15
ФД-252-0,1	Ø0,3	0,4-1,1	0,78-0,88	24	0,01	0,35 А/Вт при $\lambda=0,63$ мкм	$2 \cdot 10^{-9}$	-	1000	3
ФД-256	Ø1,37	0,4-1,1	0,75-0,9	10	0,005	6 (0,6 А/Вт) при $\lambda=0,9$ мкм		-	-	1
ФД-265А	1,4x1,4	0,4x1,1	0,75-0,9	4	0,1	$(7,5 \cdot 10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-6}$	-	100	1
ФД-265Б				0	1	$6 \cdot 10^{-3}$		-		1

Таблиця В2 – Основні параметри германієвих фотодіодів

Тип фотодіода	Діаметр чутливого елемента, мм	Діапазон спектральної характеристики, $\Delta\lambda$, мкм	Максимальна спектральна характеристика, $\lambda_{\max}$, мкм	Робоча напруга U_p , В	Темновий струм I_T , мкА Не більше	Струмове інтегральна чутливість $S_{I_{\text{int}}}$, мА/лм (мкА/лм)	Постійна часу τ , с	Опір ізоляції між корпусом і виводом, МОм	Маса, г
ФД-1	5	0,4-1,9	1,5-1,6	20	30	6,6	$2 \cdot 10^{-6}$	-	1,0
ФД-2	1,3	0,4-1,8	1,5-1,6	30	25	6,6		-	0,8
ФД-3	2,45	0,4-1,8	1,5-1,6	10	10	5,0	$5 \cdot 10^{-6}$	100	1,0
ФД-3А	2,45			10	10	6,5		50	0,8
ФД-4Г	2,45		1,5-1,55	20	30	6		50	0,5
ФД-5Г	2,5	0,3-1,8	1,5-1,55	15	8	7		100	1,6
ФД-6Г	2,45	0,4-1,8	1,5-1,55	10	13	7		100	1,0
ФД-7Г	2,5	0,3-1,8	1,5-1,55	10	8	10		100	1,6
ФД-10Г-А	1,13	0,5-1,8	1,5-1,55	10	10	17	$0,12 \cdot 10^{-6}$	100	2,5
ФД-10Г-Б	1,13			10	20	8		100	2,5

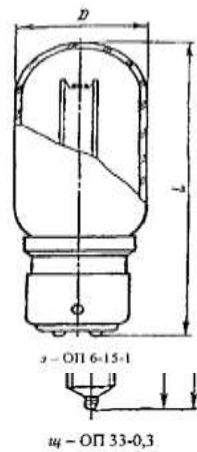
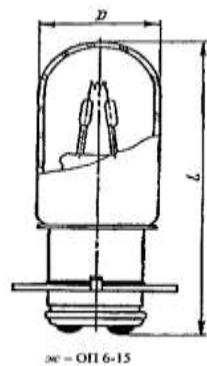
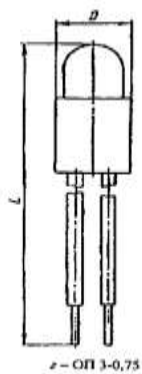
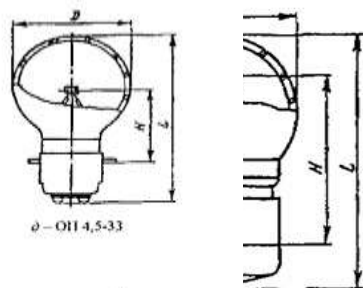
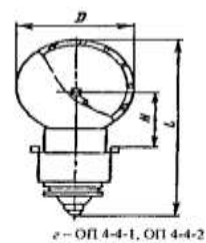
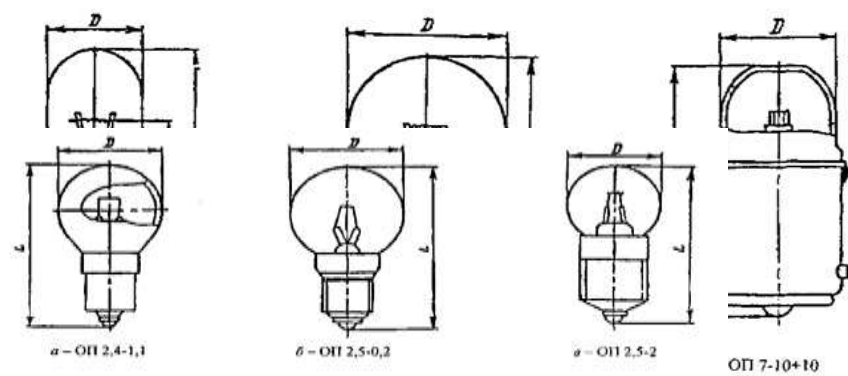
Таблиця В3 – Основні параметри фотодіодів на основі антимоніда індію

Тип фотодіода	Розмір чутливого елемента, мм	Основні параметри							
		$\Delta\lambda$, мкм	$\lambda_{\max}$, мкм	U_p , В	Опір ізоляції між корпусом і виводом, кОм	$S_{U_{\text{int}}}$, В/Вт	$S_{I_{\text{int}}}$, А/Вт	τ , с	Маса, г
ФДО-117	0,15x0,15	Від 3,5-4,5 До 5,2-5,5	4,5-5,2	0,002	10	-	0,01 при (373К)	$5 \cdot 10^{-6}$	800
ФДО-119	0,7x0,4						0,02 при (373 К)		
ФДО-257	Від 0,13x0,13 До 0,17x0,17	3,9-5,6	4,5-5,8		50	20000 при (373 К)	-		
ФД-268	0,15x0,15	4,1-5,2	4,5-5,2		500	-	0,08 при (373 К)		

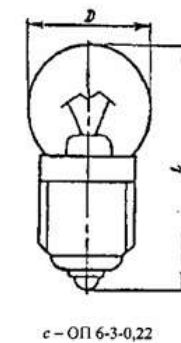
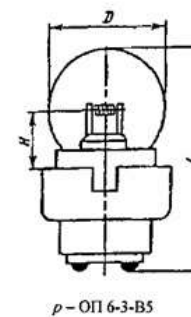
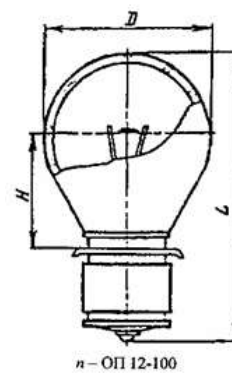
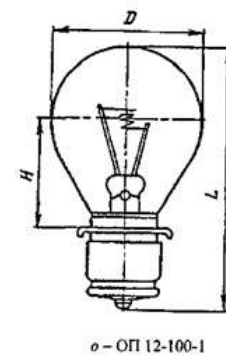
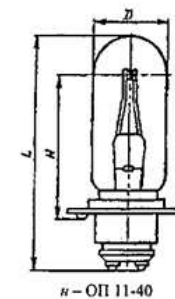
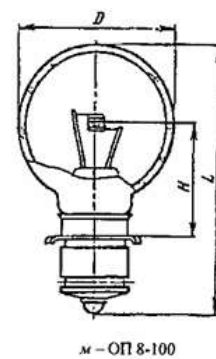
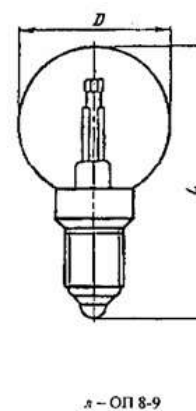
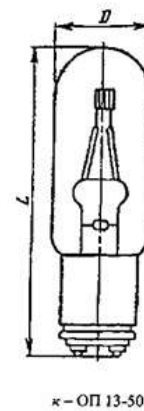
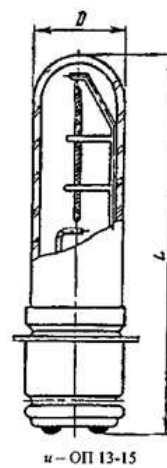
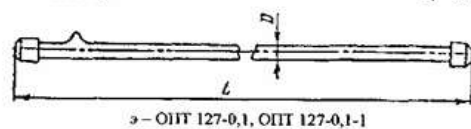
Таблиця В4 – Основні світлові та електричні параметри і розміри ламп розжарювання для оптичних приладів [6]

Тип лампи	Напруга, В	Потужність, Вт	Світловий потік, лм	$\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$ Світловіддача	Розміри ламп і тіла накали, мм					рисунок
					Діаметр колби, D	Довжина лампи, L	Висота світлового центру, Н	Ширина (діаметр) тіла накали, а	Висота тіла накали, b	
ОП2,4-1,1	2,4	1,1А	28	-	18	33	-	-	-	а
ОП2,5-0,2	2,5	0,2	4	-	18	33	-	-	-	б
ОП3-0,25	3	0,25	3,2	-	4,6	14	11,5	0,23	2,3-0,6	е
ОП3-0,5	3	0,5	7	-	5,2	66	11	-	-	
ОП4-4-1	4	4	40	10	18	34	10,5	1,6x1,6	1,6	г
ОП4-4-2	4	4	40	-	18	34		1,2	1,2	г
ОП4,4-33	4,5	33	600		41	68	29			д
ОП6-3-В5	6	3	-		18	33	18,5			р
ОП6-3	6	3	18							
ОП6-15	6	15	225		19	55	37			ж
ОП6-15-1	6	15	180		21	56	43			з
ОП6-25	6	25	312	12,5	26	47	28	2,4	1,9	к
ОП6,3-0,22	6	0,22	8,5		12	24				с
ОП6,8-11,5	6,3	11,5	125		21	56	31			т
ОП7-10+10	7	0,5	40		13	31	18			ф
ОП8-0,6	8	0,6	57		15,5	28	-			ч
ОП8-3,2	8	3,2	29		12	24	-			ш
ОП8-9	8	9,0	84		18	33	14,6			л

ОП8-100	8	100	1600		60	110	44			М
ОП11-40	11	40	840		20	57	35			Н
ОП12-100-1	12	100	2500		51	88	35			О
ОП12-100	12	100	2500		51	88	-			П
ОП13-15	13	15	63		15	58	14,5			Н
ОП13-50	13	50	1500		20	57	-			К
ОПМТ26-15	26	15	142		20	42	23			Ч
ОП33-0,3	33	0,3	130		26	90	55			Ш
ОПТ127-0,1	127	0,1	75		5,4	224	-			Э
ОПТ127-0,1-1	127	0,1	75		5,4	165	-			Э



и - ОП 8-3,2



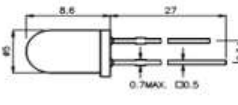
Таблиця В5 – Оптоелектронні компоненти [7]

Назва	Матеріал	Довжина хвилі, мкм	Лінза	Потужність випромінювання (20/50 мА) мВт/срад	Кут випр-я, $\theta^{1/2}$	Типорозмір
ІЧ діоди для поверхонь монтажу						
KP-3216F3C	GaAs	940	Прозора	1,2	120	1206
KP-32165F4C	GaA/As	880	Прозора	1	120	1206
KM2520F3C03	GaAs	940	Прозора	6	20	Ø2 мм, gull wing
KM25205F3C03	GaA/As	880	Прозора	4	20	Ø2 мм, gull wing
L-34F3C	GaAs	940	Прозора	10/20	50	Ø3x5 мм
L-34F3BT	GaAs	940	блакитна прозора	10/20	50	Ø3x5 мм
L-34SF4C	GaA/As	880	Прозора	4/20	50	Ø3x5 мм
L-34SF4BT	GaA/As	880	блакитна прозора	4/20	50	Ø3x5 мм
L-34SF6C	GaA/As	860	Прозора	15/40	50°	Ø3x5 мм
L-34SF6BT	GaA/As	860	блакитна прозора	15/40	50	Ø3x5 мм
L-34SF7C	GaA/As	850	Прозора	18/45	50	Ø3x5 мм
L-34SF7BT	GaA/As	850	блакитна прозора	18/45	50	Ø3x5 мм
L-53F3BT	GaAs	940	блакитна прозора	20/30	30	Ø5x8.6 мм
L-53F3C	GaAs	940	Прозора	20/30	30	Ø5x8.6 мм
L-53SF4C	GaA/As	880	Прозора	20/30	30	Ø5x8.6 мм
L-53SF6C	GaA/As	860	Прозора	40/100	30	Ø5x8.6 мм
L-53SF7C	GaA/As	850	Прозора	40/100	30	Ø5x8.6 мм
L-53SF7BT	GaA/As	850	блакитна прозора	40/100	30	Ø5x8.6 мм

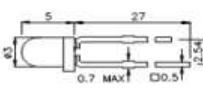
СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНЬ

KP 1608 F3 C
 1 2 3 4

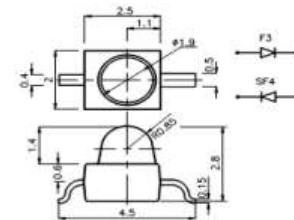
- Тип
- Размер. Д х Ш, мм
4455=4,4 х 5,7
- Длина волны, материала
F3 - 940 нм, GaAs
SF4 - 880 нм, GaAlAs
SF6 - 860 нм, GaAlAs
SF7 - 850 нм, GaAlAs
- Тип линзы
BT - голубая прозрачная
C - бесцветная



L-53
Ø = 5 мм



L-34
Ø = 3 мм



KM-2520
Ø = 2 мм

Надяскраві світлодіоди 5 мм

Колір світіння	Домінантна довжина хвилі, λ, нм	Назва	Технологія	Кут випр-я 2Ø1/2°	Сила світла І _v (мКд) типове значення	S
Червоний	618	TLCR5100	AllnGaP на GaAS	18	12000	50
	622	TLCR5200	AllnGaP на GaAS	30	4000	
	622	TLCR5800	AllnGaP на GaAS	8	20000	
	625	TLCS5100	AllnGaP на GaAS	18	7500	
	625	TLCS5110	AllnGaP на GaAS	18	20000	

	625	TLCS5210	AlInGaP на GaAS	30	6200	
	625	TLCS5810	AlInGaP на GaAS	8	30000	
Помаранчевый	505	TLCO5100	AlInGaP на GaAS	18	12000	50
Желтый	590	TLCY5100	AlInGaP на GaAS	18	7500	50
		TLCY5101	AlInGaP на GaAS	18	10000	
		TLCY5200	AlInGaP на GaAS	30	4000	
		TLCY5200	AlInGaP на GaAS	30	4000	
Зеленый	572	TLCPG5100	AlInGaP на GaAS	18	3500	30
	555	TLCPG5100	AlInGaP на GaAS	18	1300	
	523	TLCPG5100	InGaN на SiC	18	5000	30
	525	TLCPG5200	InGaN на SiC	30	2000	
	525	TLCPG5800	InGaN на SiC	8	7000	
Сине-зеленый	505	TLCB5100	InGaN на SiC	18	5000	30
	505	TLCB5800	InGaN на SiC	8	7000	
Синий	470	TLCB5100	InGaN на SiC	18	1500	30
		TLCB5200	InGaN на SiC	30	700	
		TLCB5800	InGaN на SiC	8	2500	
Белый	x=0,33 y=0,33	TLCW5100	InGaN/YAG на SiC	18	4000	30

Основные характеристики при: $t=25^{\circ}\text{C}$

Исполнение корпуса: прозрачный, бесцветный

СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ

TLC	R 5	1	00	
1	2	3	4	5

1. Тип TLC

2. Цвет

R- красный
Y- желтый
TG - зеленый
B - синий
W - белый

3. Серия

5 - корпус $\varnothing 5\text{мм}$,
бесцветный
прозрачный

4. Угол излучения

1 - $2\theta 1/2^{\circ} = 18^{\circ}$
2 - угол излучения
 $2\theta 1/2^{\circ} = 30^{\circ}$
8 - угол излучения
 $2\theta 1/2^{\circ} = 8^{\circ}$

5. Бин яркости 00-99



СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Диоды, излучающие в видимом диапазоне ($\lambda \sim 0,45-0,68$ мкм), широко применяются для визуального отображения информации и подразделяются на единичные, шкальные, мнемонические и знаковые индикаторы.

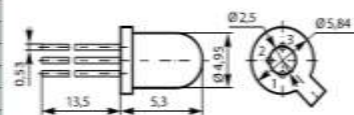
Основными преимуществами светодиодов по сравнению с другими индикаторами являются экономичность, высокое быстродействие, идеальная совместимость с управляющими микросхемами, широкий диапазон рабочих температур ($-60...+70$ °C).

Выпускаются диоды с различным цветом излучения, а также имеющие 2 и 3 цвета. В зависимости от угла излучения светодиоды делятся на приборы рассеянного или направленного типа излучения.

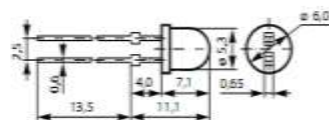
Разработаны и производятся светодиоды повышенной яркости для применения в устройствах с высокими требованиями к интенсивности излучения, в том числе в дорожных и железнодорожных светофорах.

Наим-е	Цвет свечения	Длина волны, нм	Сила света, мкд	Пост. пр. ток, мА	Пост. пр. напр., макс., В	Пост. обр. напр., макс., В	Пост. пр. ток, макс., мА	Имп. пр. ток, макс., мА	тл. мс	Сважон., Q	Тип корпуса
АЛ102АМ	Крас.	660-740	0.13	5	2.8	2	20	60	2	10	КИ1-1
АЛ102БМ	Крас.	660-740	2	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ1-1
АЛ102ВМ	Зел.	552-572	0.45	20	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
АЛ102ПМ	Крас.	660-740	0.4	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ1-1
АЛ102ДМ	Зел.	552-572	0.6	5	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
АЛ307АМ	Крас.	650-675	0.15	10	2	2	22	100	2	10	КИ2-2
АЛ307БМ	Крас.	650-675	0.9	10	2	2	22	100	2	10	КИ2-2
АЛ307ВМ	Зел.	552-572	0.4	20	2.8	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307ПМ	Зел.	552-572	1.5	20	2.8	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307ДМ	Желт.	672-713	0.4	10	2.5	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307ЕМ	Желт.	672-713	1.5	10	2.5	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307ЖМ	Желт.	672-713	6	10	2.5	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307КМ	Крас.	650-675	2	10	2	2	22	100	2	10	КИ2-2
АЛ307ЛМ	Крас.	650-675	6	10	2	2	22	100	2	10	КИ2-2
АЛ307НМ	Зел.	552-572	6	20	2.8	2	22	60	2	10	КИ2-2
АЛ307ПМ	Зел.	552-572	12	20	2.8	2	23	60	2	10	КИ2-2
АЛ310А	Крас.	660-675	0.6	10	2	4	12				КИ1-2
ЗЛЗ36Б	Крас.	650-675	20	10	2	2	20	100	2	10	КИ2-3
ЗЛЗ36Ж	Желт.	555-565	15	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
ЗЛЗ36И	Зел.	554-573	20	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
ЗЛЗ36К	Крас.	650-675	40	10	2	2	20	100	2	10	КИ2-3
АЛЗ36А	Крас.	655-680	6	10	2	2	20	100	2	10	КИ2-3
АЛЗ36Б	Крас.	655-680	20	10	2	2	20	100	2	10	КИ2-3
АЛЗ36В	Зел.	554-572	10	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
АЛЗ36Д	Желт.	675-702	4	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
АЛЗ36Е	Желт.	675-702	10	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
АЛЗ36Ж	Желт.	675-702	15	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
АЛЗ36И	Зел.	554-572	20	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
АЛЗ36К	Крас.	655-680	40	10	2	2	20	100	2	10	КИ2-3
АЛЗ36Н	Зел.	554-572	50	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ2-3
ЗЛЗ41А	Крас.	660-750	0.15	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41Б	Крас.	660-750	0.5	10	2.8	2	20	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41В	Зел.	559-579	0.15	10	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41Г	Зел.	559-579	0.5	10	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41Д	Желт.	680-717	0.15	10	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41Е	Желт.	680-717	0.5	10	2.8	2	22	60	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41И	Крас.	655-680	3	10	2	2	30	100	2	10	КИ1-1
ЗЛЗ41К	Крас.	655-680	0.7	10	2	2	30	100	2	10	КИ1-1
КИПД05А-К	Крас.	655-680	0.2	5	1.8	6	6	20	2	10	КИ-15
КИПД05Б-Л	Зел.	555-573	0.1	5	2.5	6	6	20	2	10	КИ-14
КИПД05В-Ж	Желт.	690-710	0.1	5	2.5	6	6	20	2	10	КИ-14
КИПД14А-К	Крас.	650-675	1	5	2.5	3	20	100	2	10	КИ4-1-2
КИПД14А1-К	Крас.	650-675	1	2	2	3	20	100	1	10	КИ4-1-2
КИПД14Б-К	Крас.	650-675	2.5	5	2.5	3	20	100	2	10	КИ4-1-2
КИПД14В-Л	Зел.	550-575	0.5	5	2.5	3	20	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД14Г-Л	Зел.	550-575	1	5	2.5	3	20	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД14Д-Л	Зел.	550-575	1.5	5	2.5	3	20	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД14Е-Ж	Желт.	580-595				3	20	100	2	10	КИ4-1-2
КИПД14И-Ж	Желт.	580-595				3	20	100	2	10	КИ4-1-2
КИПД18А-М	Крас.	610-640	1	10	2.4		20	60	1	10	КИ2-3
	Зел.	563-567			2.8	3					10
КИПД19А-М	Крас.	650-670	2	10	2.2		20	100	1	10	КИ2-3
	Зел.	565-569			2.8	3		60			10
КИПД19Б-М	Крас.	650-670	4	10	2.2		20	100	1	10	КИ2-3
	Зел.	565-569			2.8	3		60			10
КИПД23А-К	Крас.	640-690	0.2	2	2		20	100	1	10	КИ1-1
КИПД24А-К	Крас.	-	1	5	2.5	3	20	100	1	10	КИ4-1-2
КИПД24Б-К	Крас.	-	2.5	5	2.5	3	20	100	1	10	КИ4-1-2
КИПД24А-Л	Зел.	-	1	10	3	3	18	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД24Б-Л	Зел.	-	2.5	10	3	3	18	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД24А-Ж	Желт.	-	1	10	3	3	18	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД24Б-Ж	Желт.	-	2.5	10	3	3	18	60	1	10	КИ4-1-2
КИПД36А1-К	Крас.	-	10	20	2	2	30	100	1	10	КИ5-23
КИПД36Б1-К	Крас.	-	15	20	2	2	30	100	1	10	КИ5-23
КИПД36В1-Л	Зел.	-	7	20	2.8	2	30	100	1	10	КИ5-23
КИПД36Г1-Ж	Желт.	-	10	30	3	2	30	100	1	10	КИ5-23

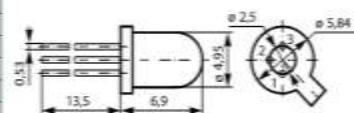
ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ



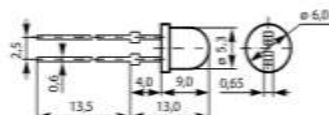
КИ1-1



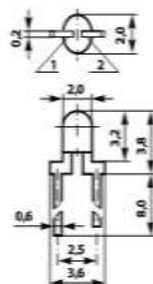
КИ2-2



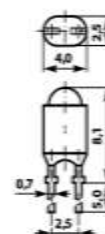
КИ1-2



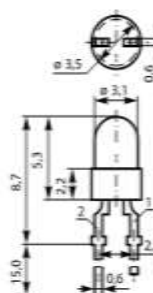
КИ2-3



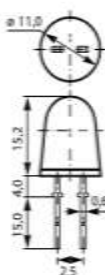
КИ-15



КДИ-14



КИ4-1-2



КИ5-23

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА



ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ

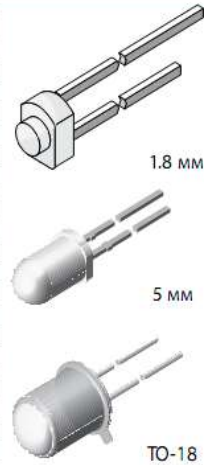
TS	A	L	4	4	00
1	2	3	4	5	6

1. Тип: излучающий диод ИК диапазона
2. Серия
H - высокоэффективные 860 нм
A - мощные 940 нм
3. Длина волны и технология изготовления
A - 860 нм, GaAlAs
L - 940 нм, GaAlAs/GaAs

4. Исполнение корпуса
3 - 3 мм
4 - 3 мм
5 - 5 мм
6.7 - 5 мм
5. Порядковый номер разработки
6. Бин яркости

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наименование	Макс. длина волны, нм	Тип корпуса	Мощность изл., мВт/град	Угол излучения, $\theta_{1/2}^\circ$	Время срабатывания, нс
TSAL4400					
TSAL5100					
TSAL5300	940	5 мм	45	22	800
TSAL6100	940	5 мм	130	10	800
TSAL6200	940	5 мм	60	17	800
TSFF5200	870	5 мм	160	10	10
TSFF5210	870	5 мм	180	10	15
TSFF5400	870	5 мм	60	22	10
TSFF5410	870	5 мм	70	22	15
TSHF5200	870	5 мм	100	10	30
TSHF5210	890	5 мм	140	10	30
TSHF5400	870	5 мм	40	22	30
TSHF5410	890	5 мм	65	22	30
TSHG6200	850	5 мм	160	10	20
TSHG6400	850	5 мм	70	22	20
TSHG8200	830	5 мм	160	10	20
TSML1000 / 1020 / 1030 / 1040	950	1.9 мм	7	12	800
TSTA7100	875	TO-18	50	5	300
TSTA7300	875	TO-18	20	12	300
TSTA7500	875	TO-18	6	30	300

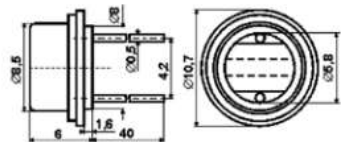


ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фоторезисторы обладают свойством менять свое активное сопротивление под действием падающего на них света. Фоторезисторы имеют высокую чувствительность к излучению в широком диапазоне - от инфракрасной до рентгеновской области спектра, при этом сопротивление их меняется на несколько порядков.

ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ

Наим-е	Размеры чувств. элемента, мм	Рабочее напряжение, В	Темновое сопротивление, МОм	Темновой ток, мкА	Общий ток (E=200лк), мА	Отношение темн. сопро-я к световому, отн.ед.	Макс. мощность излучения, мВт
ФР-765	Ø5.8	20	2	10	1	100	350



ИК ФОТОПРИЕМНИКИ

СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ

TSOP	17	36
1	2	3

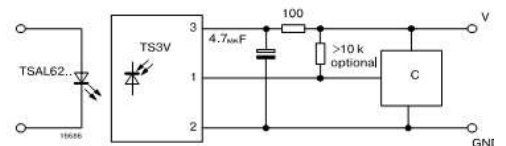
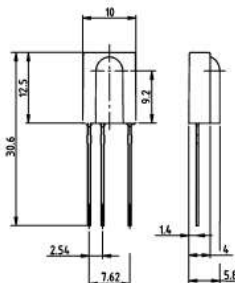
1. ИК фотоприемник Vishay
2. Серия
3. Несущая частота, кГц

ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ

ТИПОВАЯ СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наимен-е	Несущая частота, кГц	Напр-е питания, В	Скорость перед. данных, бит/с	Потребл. ток, мА
TSOP1730 (TSOP31230)	30	4.5 - 5.0	2400	5.0
TSOP1733	33			
TSOP1736 (TSOP31236)	36			
TSOP1737	36.7			
TSOP1738 (TSOP31238)	38			
TSOP1740	40			
TSOP1756	56			



Таблиця В6 - Фотометричні та електричні параметри світловипромінюючих діодів із спрямованим випромінюванням

Тип приладу	Конструкція	Колір світіння та довжина хвилі, мкм	Сила світла I_v , мкд			Постійна пряма напруга, U_{np} , В	Постійний пр. струм I_{np} , мА
			мін.	тип.	Макс		
АЛ102А	металоскляний корпус	червоний 0,69	0,04	0,1	0,15	2,8	5
АЛ102Б		червоний 0,69	0,1	0,2	0,25	2,8	10
АЛ102В		зелений 0,56	0,25	0,3	0,5	2,8	20
АЛ102Г		червоний 0,69	0,2	0,25	0,5	2,8	10
АЛ102Д		зелений 0,56	0,4	0,75	1,5	2,8	20
ЗЛ102А		червоний 0,69	0,02			3,0	5
ЗЛ102Б		червоний 0,69	0,10			3,0	10
ЗЛ102В		зелений 0,56	0,25			2,8	20
ЗЛ102Г		червоний 0,69	0,06			3,0	10
ЗЛ102Д		червоний 0,69	0,20			3,0	10
ЗЛ341А	металоскляний корпус	червоний 0,69-0,71	0,15			2,8	20
ЗЛ341Б		червоний 0,69-0,71	0,5				20
ЗЛ341В		зелений 0,55-0,56	0,15				22
ЗЛ341Г		зелений 0,55-0,56	0,5				22
ЗЛ341Д		жовтий 0,68-0,7 0,55-0,56	0,15				22
ЗЛ341Е		жовтий 0,68-0,7; 0,55-0,56	0,5				22
АЛ360А	металоскляний корпус	зелений 0,55-0,56	0,3			1,7	20
АЛ360Б							
ЗЛ360А			0,6				
ЗЛ360Б							
ИПД04А-1К	металоскляний корпус	червоний 0,7	15			2	30
ИПД04Б-1К			10				
КЛД901А	металоскляний корпус	синій 0,466	0,15			12	6

Таблиця В7 – Світловипромінюючі діоди з розсіяним випромінювання

Тип приладу	Конструкція	Колір світіння та довжина хвилі, мкм	Сила світла I_v , мкд	Постійна пряма напруга, U_{np} , В	Постійний прямий струм I_{np} , мА
АЛ307А	пластмасовий корпус	червоний 0,665	0,15	2	20
АЛ307Б		червоний 0,665	0,9		
АЛ307В		зелений 0,567	0,4	2,8	22
АЛ307Г		зелений 0,567	1,5		
АЛ307Д		жовтий 0,56; 0,7	0,4	2,5	
АЛ307Е			1,5		
АЛ307Ж			3,5		
АЛ307К		червоний 0,665	2	2	20
АЛ307Н		зелений 0,567	6	2,8	22
АЛ316А		пластмасовий з лінзою	червоний 0,67	0,8	2
ЗЛ316А	0,25				
КИПД01А	пластмасовий	зелений 0,55-0,56	0,8	7	12
КИПД01Б			0,6		
КИПД02А		червоний 0,7	0,4	2,8	20
КИПД02Б			0,9		
КИПД02В		зелений 0,55	0,25	2,5	
КИПД02Г			0,5		
КИПД02Д		жовтий 0,63	0,25		
КИПД02Е			0,65		
КИПД05А	пластмасовий	червоний 0,7	0,2	1,8	6
КИПД05Б		зелений 0,55	0,1	2,5	
КИПД05В		жовтий 0,63			

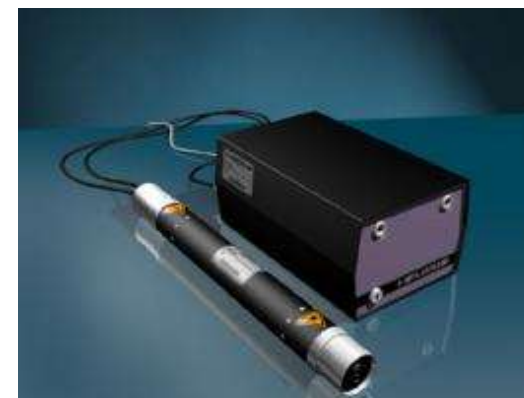
Таблиця В8 – Параметри арсенід галієвих світловипромінюючих діодів інфрачервоного спектру

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ												
Тип приладу	максимум спектрального розподілу, мкм	Потужність випромінювання, мВт			Пост. пр. напр., макс., В	Пост. зв. напр., макс., В	Пост. прямий струм, макс., мА	Імпульсний прямий струм, мкс.,мА	t_v , мкс	Скважність, Q	Тип корпусу	
Випромінюючі діоди ІЧ-діапазону в металоскляному корпусі												
АЛ106А	0,92-0,935	0,2			1,7		100				металоскляний	
АЛ106Б		0,4										
АЛ106В		0,6										
АЛ106Г		1,0										
АЛ106Д		1,5										
АЛ119А	0,93-0,96	40			3,0	2,0	300					
ЗЛ119А												
АЛ120А	0,88	0,8			2,0	1,0	55	200	40			
ЗЛ120А												
АЛ120Б		1,0										
ЗЛ120Б												
АЛ124А	0,86	4			2	2	110	1000	15	3		
ЗЛ124А												
ЗЛ130А	0,95	350 при $I_{np} = 3\text{ А}$ 200 при $I_{np} = 2\text{ А}$			3,0	1,0	3000				металоке рамічний	
ЗЛ136А	0,81	0,6			2,0	5,0	60	80	20		метало скляний	
АЛ137А		0,22			3,0							
ЗЛ137А		0,5			2,4							
ЗЛ138А		0,4										
АЛ402А	0,69-0,7	0,05	10	при $I_{np} = 3\text{ А}$ $\tau_i = 50\text{ нс}$	-	-	12	3100	50	2000	метало скляний	
АЛ402Б		0,025	5									
АЛ402В		0,015	3									
Випромінюючі діоди ІЧ-діапазону в пластмасовому корпусі												

АЛ107А	0,94-0,96	6,0	1,8	2	100	600	50	36	пластмасовий		
ЗЛ107А			2	6		1000	50	20			
АЛ107Б		10,0	1,8	2		600	50	36			
ЗЛ107Б			2	6		1000	50	20			
АЛ108А	0,94	1,5	1,35	2,0	110	10000	20	200			
ЗЛ108А		2,0	1,6			2000	20	60			
АЛ108АМ						10000	20	200			
ЗЛ108А1											
АЛ115А	0,9-1,0	10	2,0	4,0	50						
ЗЛ115А											
АЛ118А	0,85-0,875	2	1,7	2	50	500	50	20			
ЗЛ118А	0,82-0,9										
ЗЛ129А	0,83-0,89	1,3 при $I_{np} = 50 \text{ мА}$ 5,0 при $I_{np} = 200 \text{ мА}$	2	1	100	250	32	4			
Діоди ІЧ-діапазону для оптичних ліній											
АЛ132А	1,26	10 мкВт	2,0	1,0	50	1000	15		металевий		
ЗЛ132А											
ЗЛ135А	0,82-0,9	150 мкВт	2,0	2,0	100	500	100	5			
Безкорпусні випромінюючі діоди ІЧ-діапазону											
АЛ103А	0,95	1,0	1,6	2,0	52				безкорпусні		
ЗЛ103А											
АЛ103Б		0,6		2,0							
ЗЛ103Б											
АЛ109А	0,94	0,2	1,2	22							
АЛ109А-1		0,4	1,7								
ЗЛ127А-1	0,75	0,06	2,0	4,0	15	100	10	20			
ЗЛ127А-5											
ЗЛ128А-1	0,86	1,0	1,8	2,0	25						
АЛ136А-5	0,82	0,6	1,9	5,0	60	80	20				
ЗЛ136А-5			2,0								

ДОДАТОК Г – Технічні характеристики деяких моделей технологічних газових лазерів

Атомарні лазері неперервної дії (He-Ne). На сьогодні випускається приблизно 50 типів гелій-неонових лазерів з потужністю випромінювання від 0,5 до 100 мВт, які працюють в багатомодовому, одномодовому і одночастотному режимах і використовуються в пристроях голографії, інтерферометрах, контрольно-вимірковій техніці, медичній апаратурі.



Лазери серії ГН – це газові лазері неперервного режиму роботи і випромінюванням в червоній області спектру на довжині хвилі 0,63 мкм. Дані лазері можуть бути використані в контрольно-вимірковій техніці, поліграфії, голографії, медичній техніці в якості джерел когерентного монохроматичного випромінювання [8].

Таблиця Г1 - Моделі видимого діапазону ГН-0.5, ГН-1, ГН-2П, ГН-2П-1, ГН-3, ГН-3-1, ГН-5, ГН-5П, ГН-5М, ГН-10М

Параметри	ГН-0,5	ГН-1	ГН-2П	ГН-2П-1	ГН-3	ГН-3-1	ГН-5	ГН-5П	ГН-5М	ГН-10М
Потужність випромінювання, мВт не менше	0,5	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	5,0	5,0	5,0	8,0
Спектральний склад	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM _{mn}	TEM _{mn}
Поляризація, не менше	1:1	1:1	100:1	100:1	1:1	1:1	1:1	100:1	1:1	1:1
Діаметр пучка, мм, не більше	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	2.0	2.0

Розходження випромінення, мрад, не більше	2.0	2.0	1.5	1.9	1.5	1.9	1.2	1.2	3.8	4.3
Вживана потужність, Вт, не більше	10	10	15	15	15	15	25	25	20	25
Габарити випромінювача, мм, не більше	Ø30x145		Ø35x255	Ø35x280	Ø35x255	Ø35x280	Ø35x350			
Габарити джерела живлення, мм, не більше	150x60x170 (110x35x85*)									

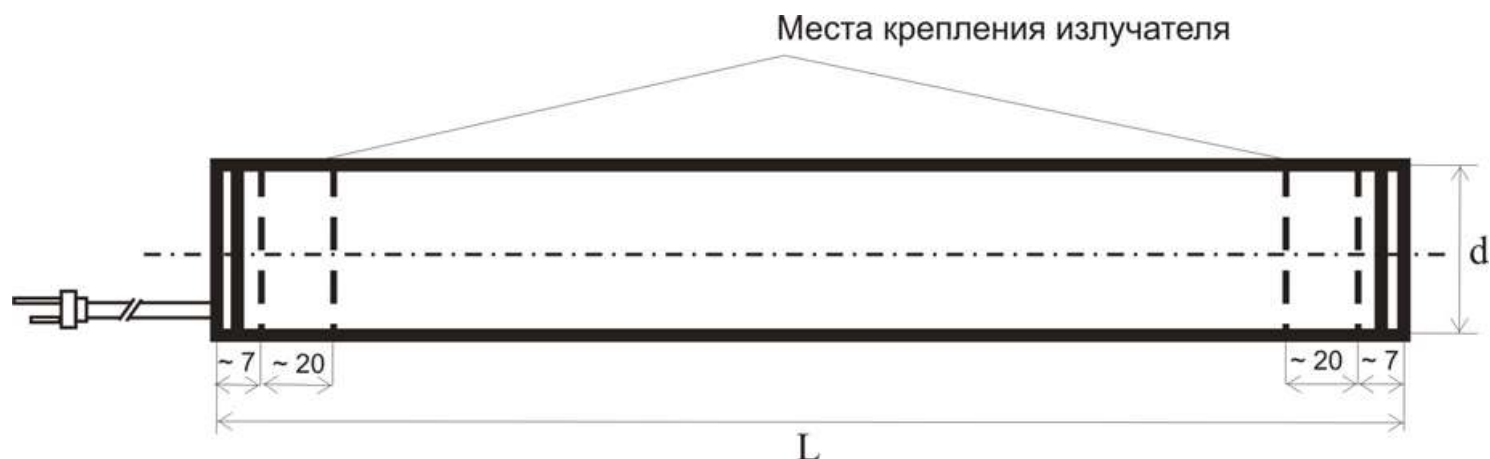


Рисунок Г1– Габаритне креслення випромінювача моделі ГН-0.5, ГН-1, ГН-2П, ГН-2П-1, ГН-3, ГН-3-1, ГН-5, ГН-5П, ГН-5М, ГН-10М

Це газові лазери непереривного режиму роботи і випромінюванням в червоній області спектру на довжині хвилі 0,63 мкм, одномодові (TEM₀₀) і багатомодові TEM_{mn} з потужністю випромінення від 15 мВт до 80 мВт з поляризованим і неполяризованим випромінюванням.



В основу конструкції випромінювача лазера закладено коаксіальний активний елемент з холодним катодом. Термостійкі дзеркала в активному елементі встановлені методом твердого запаювання, що дозволяє в технологію його виготовлення закласти прогресивні високотемпературні процеси. Все це забезпечує високу надійність, довговічність і стабільні вихідні параметри лазера в цілому [8]

Таблиця Г2 - Моделі видимого діапазону ГН-15, ГН-15-1, ГН-25, ГН-25-1, ГН-40, ГН-50, ГН-60, ГН-70, ГН-80

Параметри	ГН-15	ГН-15-1	ГН-25	ГН-25-1	ГН-40	ГН-50	ГН-60	ГН-70	ГН-80
Потужність випромінення, мВт не менше	15.0	15.0	25.0	25.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
Спектральний склад	TEM ₀₀				TEM _{mn}				
Поляризація, не менше	1:1	100:1	1:1	100:1	1:1				
Діаметр пучка, мм, не більше	1,5				3,0	7,0			
Розходження випромінення, мрад, не більше	1,2				2,5	3,0			
Вживана потужність, Вт, не більше	65		80			150			
Габарити випромінювача, мм, не більше	Ø56x685		Ø56x875			Ø52x1350		Ø52x1480	
Габарити джерела живлення, мм, не більше	100x65x330								

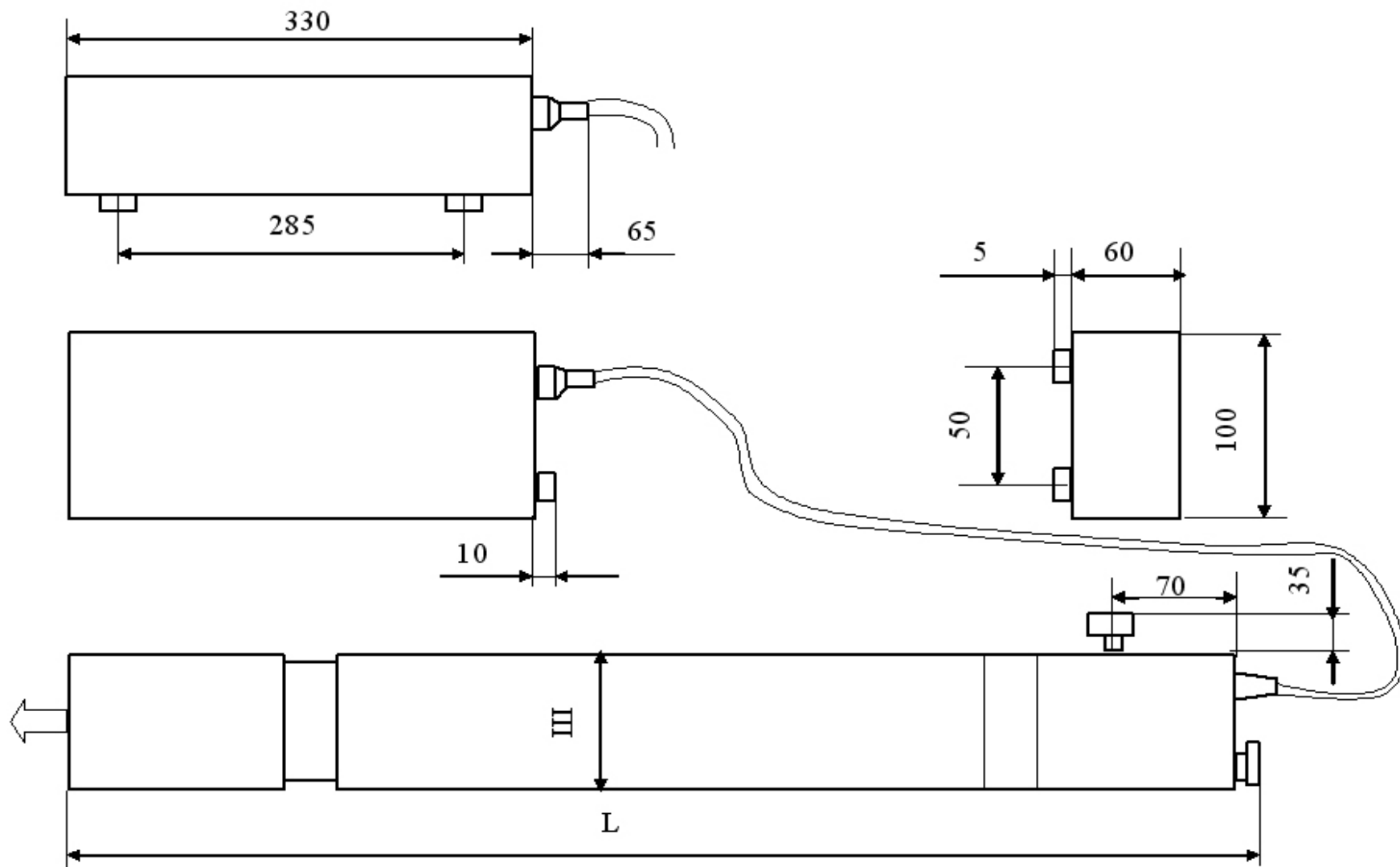


Рисунок Г2 – Габаритне креслення випромінювача моделі ГН-15, ГН-15-1, ГН-25, ГН-25-1, ГН-40, ГН-50, ГН-60, ГН-70, ГН-80



Це газові лазери неперервного режиму роботи і випромінюванням в червоній області спектру на довжині хвилі 0,63 мкм, одномодові (TEM₀₀) і багатомодові TEM_{mn} з потужністю випромінювання від 15 мВт до 80 мВт з поляризованим і неполяризованим випромінюванням. Габаритне креслення відповідає рис.Г2 [8]

Таблиця Г3 - Моделі видимого діапазону ЛГН-225А, ЛГН-226А, ЛГН-223, ЛГН-223-1, ЛГН-115, ЛГН-118

Параметри	ЛГН-225А	ЛГН-226А	ЛГН-223	ЛГН-223-1	ЛГН-115	ЛГН-118
Потужність випромінювання, мВт не менше	2.0	1.5	10	10	15	25
Спектральний склад	TEM ₀₀				TEM _{mn}	
Поляризація, не менше	1:1	100:1	1:1	100:1	1:1	
Діаметр пучка, мм, не більше	0,6		1,0		2,5	
Розходження випромінювання, мрад, не більше	1,5		1,3		3,0	
Вживана потужність, Вт, не більше	15		55			65
Габарити випромінювача, мм, не більше	Ø30x196		Ø44x485		Ø44x500	Ø44x685
Габарити джерела живлення, мм, не більше	150x60x170 (110x35x85*)		100x65x330			

Це атомарний неперервного режиму роботи, призначений для використання в якості джерела світлового випромінювання з високою часовою когерентністю у пристроях голографії, для проведення наукових досліджень [8]

Таблиця Г4 - Лазер моделі ЛГН-220, ЛГН-220SF, ЛГН-220М

<i>Параметри</i>	<i>ЛГН-220</i>	<i>ЛГН-220SF</i>	<i>ЛГН-220М</i>
Довжина хвилі, мкм	0.63		
Спектральний склад	одномодовий (TEM00)	одночастотний	багатомодовий (TEMmn)
Потужність випромінювання, мВт, не менше:	70	40	100
Поляризація	500:1		
Діаметр пучка, мм, не більше	2.5		
Розходження, мрад, не більше	1	1	1.5
Відносна нестабільність потужності випромінювання за 8 годин, %, не більше	5	-	-
Вживана потужність, Вт, не більше	350		
Габарити випромінювача, мм, не більше	1965×225×220		

Це гелій-неонові лазери неперервного режиму роботи з інфрачервоному діапазоні оптичного спектру на довжинах хвиль 1,15 мкм; 3,39 мкм; 5.4 мкм, багатомодові з потужність випромінювання від 1,5 до 23 мВт з поляризованим і неполяризованим випромінювання.

Лазери демонструють всі переваги низькоінтенсивного, високо спрямованого монохроматичного випромінювання на спектральних лініях, які співпадають з лініями поглинання ряду екологічних шкідливих викидів промислових підприємств, а саме метану, окислу азоту та інш. Таке спів падіння ліній дозволяє на основі цих лазерів розроблювати високоефективні газоаналізатори і аналізатори наявності витоку цих газів.

До складу лазеру входить випромінювач і джерело живлення. В основу конструкції випромінювача покладено коаксіальний активний елемент, який одночасно є і тримачем дзеркал резонатора. Коаксіальний активний елемент має великий запас робочого газу в баластному об'ємі, що забезпечує високу довговічність лазеру в цілому [8].

Таблиця Г5- Моделі інфрачервоного діапазону серії ГНИК-3

Параметри	ГНИК-3-1	ГНИК-3-2	ГНИК-3-2А	ГНИК-3-3	ГНИК-3-3А	ГНИК-3-4	ГНИК-3-4А	ГНИК-3-К
Довжина хвилі, мкм	3.3922	3.3922	3.3912	3.3922	3.3912	3.3922	3.3912	3.5
Потужність випромінення, мВт, не менше	3.0	9.0	4.0	14.0	7.0	23.0	10.0	12.0
Спектральний склад	TEMmn							
Поляризація	1:1 / 100:1		100:1	1:1 / 100:1	100:1	1:1 / 100:1	100:1	
Діаметр пучка, мм, не більше	2.5	3.0		3.5		4.5		2.5
Розходження випромінення, мрад, не більше	3.0	3.0		3.5		4.5		3.0
Вживана потужність, Вт, не більше	40	65		110		120		65
Габарити випромінювача, мм, не більше	Ø45x500	Ø56x685		Ø56x930		Ø56x1250		Ø55x930
Габарити джерела живлення, мм, не більше	100x65x330			152x110x340				100x65x330

Це гелій-неоновий трьох хвильовий лазер, який може працювати як в режимі роздільного випромінювання на довжинах хвиль 0,63 мкм, 1,15 мкм та 3,39 мкм, так і в режимі одночасного випромінювання в ІЧ – діапазоні на довжинах хвиль 1,15 мкм і 3,39 мкм. Вибір режиму випромінювання виконується за допомогою регульовального гвинта зі сторони заднього торця випромінювача, або обертанням випромінювача навколо своєї осі на кут 10-15° і встановленням відповідних оптичних фільтрів в блоці фільтрів, який розташований на вихідному торці випромінювача.

Таблиця Г6- Багатохвильовий лазер моделі ЛГН-118-3В

<i>Параметри</i>	<i>ЛГН-118-2В</i>
Довжина хвилі, мкм	0063 / 1,15/ 3,39
Потужність випромінювання, мВт, не менше:	10,0 / 5,0 / 5,0
Спектральний склад	TEM _{mn}
Поляризація	100:1
Діаметр пучка, мм, не більше	3.0 / 3.5 / 4,0
Розходження, мрад, не більше	3.5 / 4.0 / 4,0
Вживана потужність, Вт, не більше	80
Габарити випромінювача, мм, не більше	Ø56x930
Габарити джерела живлення, мм, не більше	100x65x330

Принцип роботи три хвильового лазера засновано на фізичному явищі конкуренції випромінювання 0,63 мкм і 3,39 мкм з використанням трьох дзеркального резонатора. Характеристики дзеркал оптимізовані на генерування в трьох дзеркальному резонаторі випромінювання на лініях 0,63 мкм, 1,15 мкм і 3,39 мкм з достатньо високою вихідною потужністю

Конструктивно випромінювач лазера складається із коаксіального металеву скляного активного елемента з холодним катодом, який

встановлений в циліндричному металевому корпусі. Три дзеркала, що утворюють два резонатора через перехідні фланці і втулки жорстко, за допомогою твердої запайки, закріплені на оболонці активного елемента. Тверда запайка вузлів активного елемента і дзеркал забезпечують стійку юстировку резонатора і високу довговічність лазера. Використання загальних дзеркал в конструкції лазера, їх відносну нерухомість в процесі переведення лазера із одного режиму в інший дозволяє з високою точністю сумістити і зберегти протягом всього терміну експлуатації лазера траєкторію пучків випромінювання на виході випромінювача [8].

Це гелій-неоновий лазер неперервного режиму роботи двох частотні стабілізовані призначені для використання в складі лазерних інтерферометрів, які використовуються в різноманітних галузях науки і техніки, в тому числі в координатних системах прецизійного оптико-механічного обладнання для виробництва виробів електронної техніки [8].

Таблиця Г7 - Стабілізовані моделі ЛГН-212-1, ЛГН-212-1М

Параметри	ЛГН-212-1	ЛГН-212-1М (-/003/009)	ЛГН-212-1М-А (-/003/009)	ЛГН-212-1М-В (-/003/009)	ЛГН-212-1М-С (-/003/009)	ЛГН-212-1М-Д (/003/009)
Довжина хвилі, мкм	0,63					
Спектральний склад	Двочастотний					
Різниця ортогонально поляризованих компонент лазерного випромінення, МГц	1,5–2,2	1,5–2,2	2,0–2,4	2,4–3,0	3,0–3,4	3,4–4,0
Потужність випромінення, мВт, не менше	0,2					
Діаметр пучка, мм, не більше	5–7	5–7 / 3–5 / 7–9				
Розходження, мрад, не більше	0,5					
Відносна нестабільність потужності випромінення за 8 годин, %, не більше	10	2				
Відносна нестабільність оптичної частоти, не більше	1×10^{-8}					
Вживана потужність, Вт, не більше	30					
Габарити, мм, не більше	392×182×133	358,6×132×128,3				

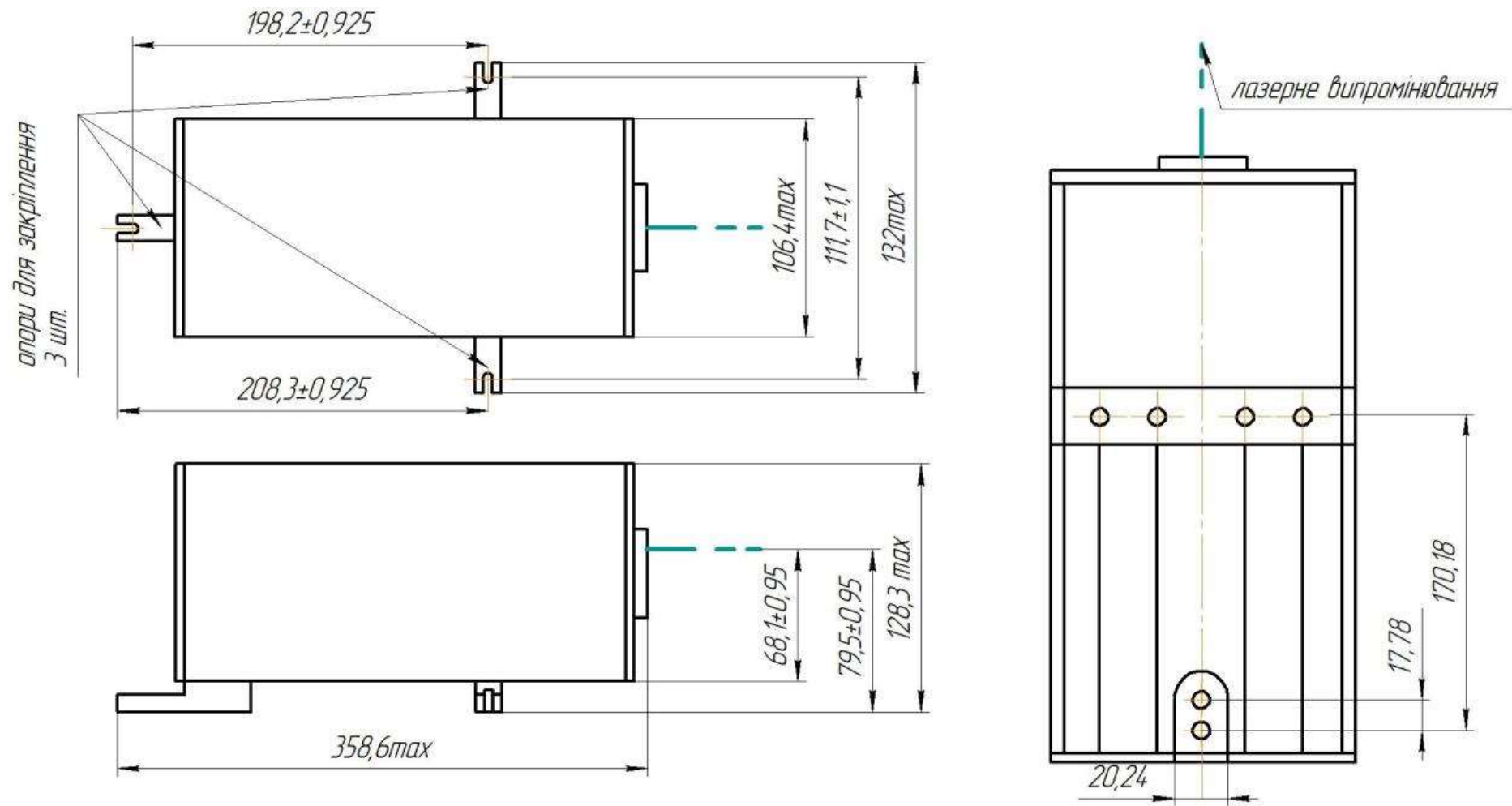


Рисунок ГЗ – Габаритне креслення випромінювача моделі ЛГН-212-1М

Це газові гелій-неонові лазери неперервного режиму роботи, що працюють на двох ортогонально поляризованих одночастотних складових випромінювання, призначені для використання в якості джерел когерентного випромінювання в інтерферометрії, оптичній локації, волоконному зв'язку, технологічних і лабораторних установках. Режим роботи: І –

ортогонально поляризовані одночастотні складові розділені в просторі (ЛГН -303), II – ортогонально поляризовані одно частотні складові суміщені в просторі (ЛГН-303-1), III – на виході лазера тільки одна високочастотна складова з вертикальним вектором поляризації (ЛГН – 303) [8]

Таблиця Г8 - Стабілізовані моделі ЛГН-303, ЛГН-303-1

Параметри	ЛГН-303	ЛГН-303-1
Довжина хвилі, мкм	0.63	
Спектральний склад	одночастотний	двочастотний (різниця між двома ортогонально поляризованими компонентами лазерного випромінювання 640 МГц) (двопроменевий або однопроменевий)
Потужність випромінювання, мВт, не менше	1.0	
Діаметр пучка, мм, не більше	0.8	
Розходження, мрад, не більше	2.5	
Відносна нестабільність потужності випромінювання за 8 годин, % на більше	2	
Відносна нестабільність оптичної частоти не більше	1×10^{-8}	
Вживана потужність, Вт, не більше	30	
Габарити випромінювача, мм, не більше	$\varnothing 36 \times 330$	
Габарити джерела живлення, мм, не більше	$225 \times 132 \times 102$	

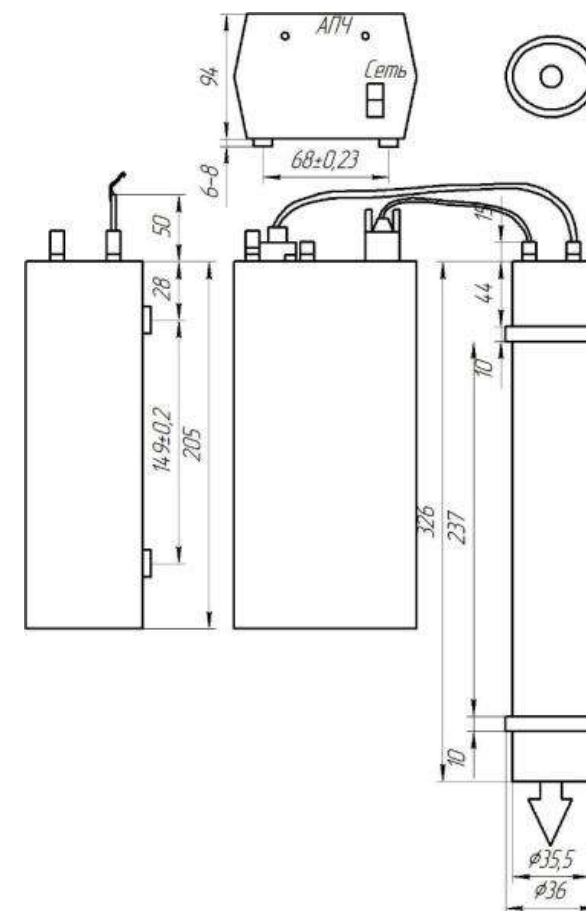


Рисунок Г4 – Габаритне креслення випромінювача моделі ЛГН-303, ЛГН-303-1

Це гелій-кадмієві лазери неперервного режиму роботи, які випромінюють в видимому діапазоні оптичного спектру на довжині хвилі 0,442, багатомодові і одномодові з потужністю випромінення від 10 мВт до 25 мВт з поляризованим і неполяризованим випромінення.

Конструктивною особливістю лазерів є неюстирований активний елемент. Дзеркала жорстко закріплюються безпосередньо до розрядної трубки, що дозволило відмовитися від механічного тримача оптики і зробити конструкція випромінювача більш компактною і легкою.

Розрядний канал активного елемента газового лазера захищено коаксіальною оболонкою, вздовж якої організовано керований повітряний потік. Нагрівач кадмію знаходиться всередині розрядної трубки He-Cd лазера, максимально наближений до кадмію і також захищений від зовнішніх потоків оболонкою роз'яреної трубки. Висока стабільність генерації лазера на парах кадмію забезпечується автоматичним управлінням температурою стінки зовнішньої оболонки шляхом зміни повітряного потоку в залежності від температури оточуючого середовища [8]

Таблиця Г8 - Моделі УФ та фіолетової області спектру ГККЛ 0.442 мкм

<i>Параметри</i>	<i>ГККЛ-10В</i>	<i>ГККЛ-20В</i>	<i>ГККЛ-25В</i>
Довжина хвилі, мкм	0.442		
Потужність випромінення (типова), мВт	10	20	25
Спектральний склад	ТЕМ ₀₀	ТЕМ _{mn}	ТЕМ ₀₀
Поляризація	100:1	1:1	100:1
Діаметр пучка, мм, не більше	1.5	1.8	1.5
Розходження випромінення, мрад, не більше	1.3	2.5	1.3
Вживана потужність, Вт, не більше	350		500
Габарити випромінювача, мм, не більше	600x115x140		865x115x140
Габарити джерела живлення, мм, не більше	365x380x150		

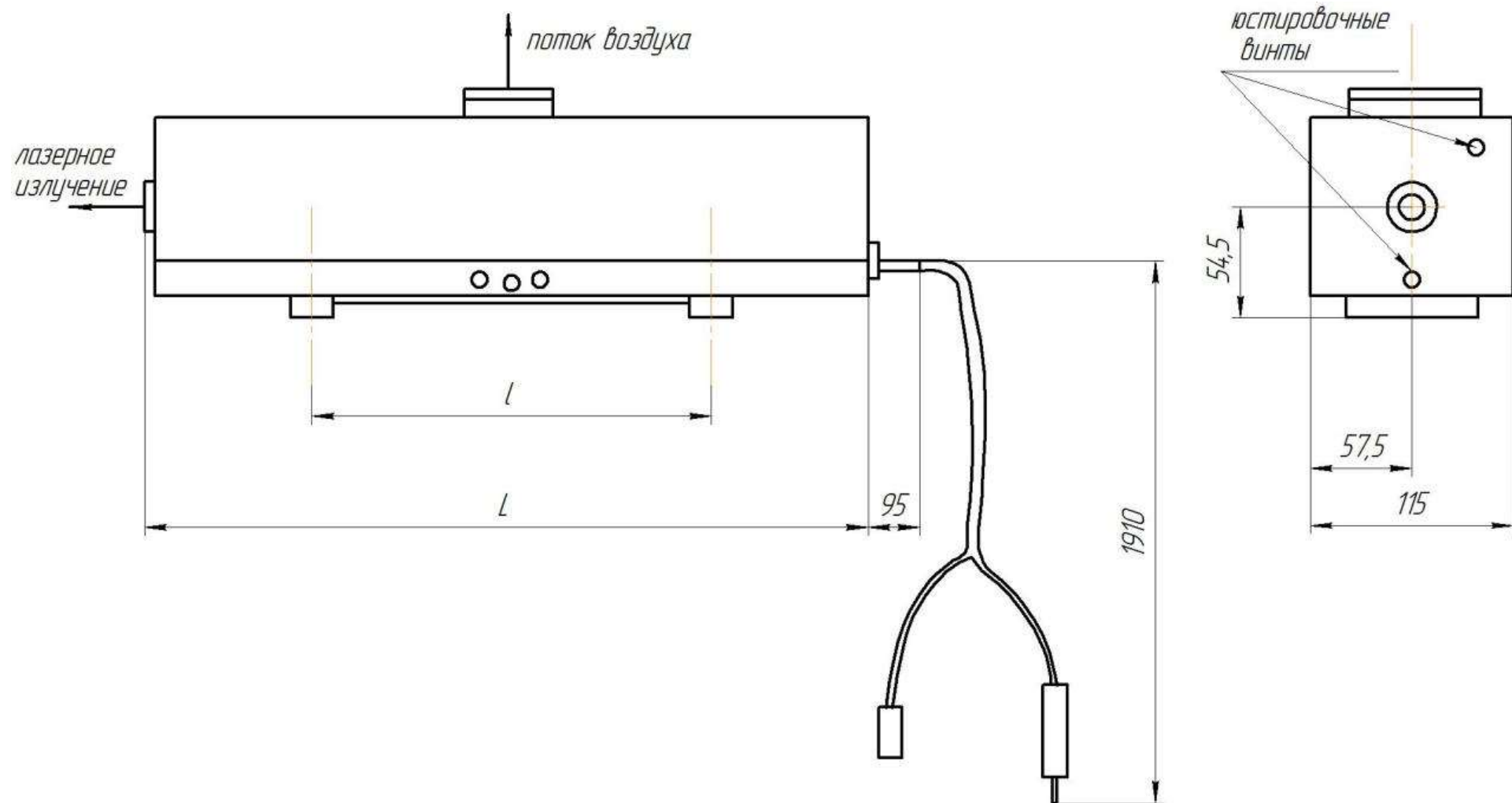


Рисунок Г5 – Габаритне креслення випромінювача моделі ГККЛ 0,442 мкм

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочник технолога-оптика: Справочник / И.Я. Бубис, В.А. Вейденбах, И.И. Духопел и др.; Под общ.ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1983 . -414 с.
2. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожин и др.: Под ред. М.А. Окатова. -2-е изд.перераб. и доп. – СПб Политехника, 2004. – 679 с.
3. Справочник конструктора опτικο-механических приборов. / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. Ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
4. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб.пособие. – СПб: Политехника, 2007. – 579 с.
5. Электронный учебник по дисциплине: «Проектирование опτικο-электронных приборов» Авторы: Латыев С.М., Егоров Г.В., Тимошук И.Н. СпбГУ ИТМО, кафедра КиПОП. http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=9.
6. mail@electrospb.ru
7. www.platan.ru
8. <http://www.laser-compact.ru/index.html>