

УДК 535.21

О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, В.М. Тягур

АХРОМАТИЗАЦІЯ ТА АТЕРМАЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТИВІВ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕХНІКИ

This paper considers the method of temperature influence indemnification to image quality of optical systems working in the infrared range of spectrum for the case of homogeneous temperature distribution through the system. The simultaneous achromatization of focusing knot is possible when passive athermalization is used. Rational problem decision of athermal and achromatic optical system designing is possible when the triplet including specific compositions of optical materials combined with specific mechanical housing materials is utilized. The algorithm proposed allows obtaining athermal and achromatic three-component optical system by selecting necessary combination of materials. In addition, we give some recommendations on how to select the triplet materials based on the dependence diagram of optical and thermophysical materials properties. The method includes the influence of housing material expansion of focusing knot when the ambient temperature changes. We also consider examples of possible combinations of optical and mechanical materials for the infra-red waveband of spectrum of 3–5 and 8–12 μm .

Вступ

Інфрачервона (ІЧ) техніка знаходить усе ширше застосування в народному господарстві, військовій справі, в наукових дослідженнях. Прилади ІЧ-техніки часто експлуатуються в складних умовах навколишнього середовища. В першу чергу це стосується температурного діапазону, який згідно з типовими технічними умовами може становити $\pm 60^\circ$. Зміна температури веде до зміни конструктивних параметрів оптичних елементів, лінійних розмірів механічний деталей несучої конструкції та оптичних характеристик лінз. Це призводить до терморозфокусування, появи додаткових термоаберацій і, як наслідок, погіршення якості зображення [1].

Особливо чутливі до коливань температури фокусувальні вузли ІЧ-техніки. Це обумовлено двома обставинами: обмеженою номенклатурою оптичних матеріалів і тим, що для більшості матеріалів, прозорих в ІЧ-області, значення термооптичної сталої, яка характеризує вплив температури на терморозфокусування, більш ніж на порядок перевищує це значення для матеріалів, прозорих у видимій області спектра. Також значення коефіцієнтів дисперсії Аббе для різних матеріалів, вживаних для виготовлення ІЧ-лінз, можуть варіюватися в діапазоні від $n = 19$ (NaCl) до $n = 860$ (Ge) (значення коефіцієнта дисперсії наведені для спектрального діапазону 8–12 мкм). Слід зазначити, що для більшості ІЧ-матеріалів складно підібрати матеріал несучої конструкції для взаємної компенсації терморозфокусування температурним подовженням корпусу, оскільки

значення термооптичної сталої для більшості оптичних матеріалів цього спектрального діапазону на порядок перевищують значення температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) усіх вживаних у сучасних конструкціях матеріалів корпусу.

Постановка задачі

Одним зі способів зменшення впливу хроматичної аберації і температурних чинників на якість зображення фокусувальних вузлів ІЧ-техніки є створення трикомпонентних об'єктивів з певною комбінацією вживаних матеріалів і оптичних сил окремих компонентів. У цій статті пропонується методика вирішення такого завдання.

Теоретичні положення

У системі N тонких лінз з оптичними силами Φ_i , які перебувають у контакті, і загальної оптичної сили Φ_Σ рівняння теплової компенсації та ахроматизму отримуємо безпосередньо підсумовуванням членів, що відповідають кожному компоненту в системі.

Загальна заломлювальна сила системи дорівнює

$$\sum_{i=1}^N \Phi_i = \Phi_\Sigma. \quad (1)$$

Температурна компенсація можлива при виконанні такої умови [2]:

$$\sum_{i=1}^N V_i \cdot \Phi_i = -\alpha_o \Phi_\Sigma, \quad (2)$$

де V_i – термооптична стала компонента; α_0 – температурний коефіцієнт лінійного розширення оправ.

Умова компенсації хроматизму така [3]:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Phi_i}{v_i} = 0, \quad (3)$$

де v_i – коефіцієнт дисперсії компонента.

Таким чином, для отримання атермально-ахроматичного триплету необхідно об'єднати лінійні рівняння (1)–(3) в систему і вирішити її відносно незалежної змінної Φ_i , при цьому мінімальне необхідне число лінзових елементів $N = 3$.

Варто при цьому пам'ятати, що тонка лінза – це теоретична абстракція, та все ж завдяки такому спрощенню рівняння тонких лінз є загалом простими і корисними. За їх допомогою можна не лише отримати уявлення про завдання атермалізації, але й добру першу апроксимацію оптичної системи для подальшого поліпшення шляхом будь-якого відомого методу оптимізації оптичної системи.

Розділивши обидві сторони рівнянь (1)–(3) на Φ_Σ , отримаємо таку систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \text{Загальна заломлювальна сила} & X_1 + X_2 + X_3 = 1, \\ \text{Температурна компенсація} & V_1 X_1 + V_2 X_2 + V_3 X_3 = -\alpha_0, \\ \text{Ахроматизм} & \frac{1}{v_1} X_1 + \frac{1}{v_2} X_2 + \frac{1}{v_3} X_3 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

У системі рівнянь (4) $X = \Phi / \Phi_\Sigma$, а коефіцієнти 1, 2, і 3 відповідають оптичним матеріалам першого, другого і третього компонентів атермалізованого й ахроматичного триплету. Ця система може тепер бути вирішена відносно незалежних змінних X_1, X_2, X_3 за умови, що детермінант матриці коефіцієнтів буде відмінним від нуля. Для цих трьох оптичних матеріалів це можна перевірити або числовою оцінкою, або скориставшись графоаналітичним методом на основі діаграми $v - V \cdot v$, де площа трикутника, сформована трьома матеріалами, дорівнює половині значення детермінанта.

Для того, щоб забезпечити графоаналітичний метод вибору оптичних матеріалів для трикомпонентного рішення завдання ахрома-

тизації та атермалізації, доцільно ввести незалежні змінні величини залишкової хроматичної аберації кожного компонента оптичної системи:

$$\delta X_1 = \frac{1}{v_1} X_1, \quad \delta X_2 = \frac{1}{v_2} X_2, \quad \delta X_3 = \frac{1}{v_3} X_3. \quad (5)$$

Крім того, необхідно визначити нові величини параметрів, рівних добутку термооптичних сталей на коефіцієнт дисперсії кожного з трьох компонентів триплету:

$$K_1 = V_1 v_1, \quad K_2 = V_2 v_2, \quad K_3 = V_3 v_3. \quad (6)$$

У цьому випадку система лінійних рівнянь (4) буде мати такий вигляд:

$$\begin{cases} v_1 \delta X_1 + v_2 \delta X_2 + v_3 \delta X_3 = 1, \\ K_1 \delta X_1 + K_2 \delta X_2 + K_3 \delta X_3 = -\alpha_0, \\ \delta X_1 + \delta X_2 + \delta X_3 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Ця система рівнянь може бути вирішена відносно змінних $\delta X_1, \delta X_2, \delta X_3$. Детермінант D матриці коефіцієнтів цієї лінійної системи має такий вигляд:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ K_1 & K_2 & K_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_1 - K_3 & K_2 - K_3 \\ v_1 - v_3 & v_2 - v_3 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

На рис. 1 показано декартову систему координат з початком у точці нуль. По осі абсцис відкладається значення коефіцієнта дисперсії Аббе, а по осі ординат – добуток термооптичної сталої матеріалу та коефіцієнта дисперсії Аббе. Ця діаграма належить до ІЧ-області спектра в діапазоні 3–5 мкм і містить оптичні матеріали, вживані в ній. Якщо необхідно вибрати три оптичні матеріали з цієї діаграми для отримання атермалізованого й ахроматичного триплету, то необхідно пам'ятати, що умовою ненульового детермінанта є

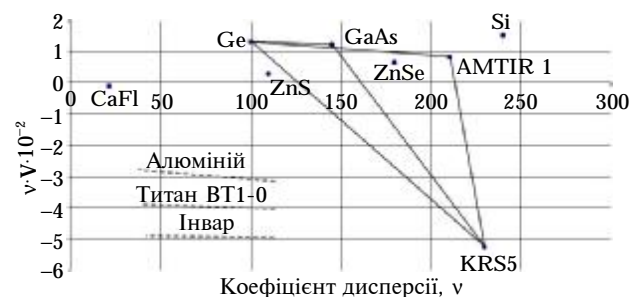


Рис. 1. Діаграма матеріалів ІЧ-діапазону спектра 3–5 мкм

те, що три матеріали не можуть бути розташовані на одній прямій лінії на діаграмі, оскільки площа трикутника, сформованого ними, у цьому випадку дорівнюватиме нулю, а отже, дорівнюватиме нулю і детермінант D системи лінійних рівнянь (7). Нахил пунктирних ліній на діаграмі (див. рис. 1) визначається тепловим коефіцієнтом лінійного розширення α_0 матеріалу несучої конструкції – титан ВТ1-0, алюміній або інвар.

Далі необхідно вибрати три оптичні матеріали, які сформуєть на діаграмі вершини трикутника таким чином, щоб лінія, яка сполучає перший і другий матеріали, мала найменший кут з пунктирною лінією, відповідною ТКЛР матеріалу оправки. При цьому спочатку вибирається матеріал з більшою дисперсією (AMTIR1), а потім матеріал з меншою дисперсією (Ge). Третій матеріал вибирається з міркування максимальної площі отриманого трикутника (KRS5).

Варто також пам'ятати, що коефіцієнт дисперсії Аббе оптичного матеріалу залежить від спектрального діапазону, а термооптична стала, у свою чергу, від діапазону температур. Тому для різних спектральних діапазонів оптимальні комбінації матеріалів триплету, як і їх розташування на діаграмі $v - V \cdot v$, змінюватимуться. Оскільки для кожного оптичного матеріалу береться середнє значення коефіцієнта дисперсії Аббе в його робочому спектральному діапазоні, то чим вузьчий спектральний діапазон роботи оптичної системи, отриманої на основі цієї методики, тим вищою мірою ахроматизації вона володітиме.

Для спектрального діапазону 8–12 мкм діаграму вибору матеріалів триплету наведено на рис. 2.

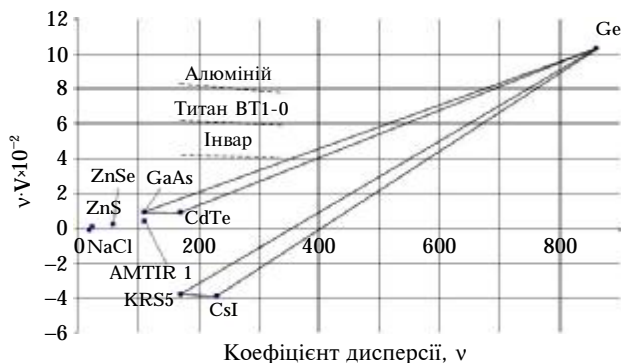


Рис. 2. Діаграма матеріалів ІЧ-діапазону спектра 8–12 мкм

Обговорення результатів досліджень

Умова, до якої завжди прагнуть в оптичному проектуванні – мінімізувати оптичну силу складових елементів в об'єктиві. Аналізуючи рівняння (5)–(8), можна зробити такі висновки:

1) площа трикутника, утвореного трьома оптичними матеріалами, має бути якомога більшою;

2) різниця в коефіцієнтах дисперсії Аббе між матеріалами першого та другого компонентів має бути якомога більшою;

3) лінія, що сполучає матеріали перших двох компонентів, має бути паралельною лінії, яка відповідає ТКЛР матеріалу оправки.

Як впливає з діаграми, показаної на рис. 1, оптимальними комбінаціями оптичних матеріалів триплету для інфрачервоного спектрального діапазону 3–5 мкм із запропонованих матеріалів будуть такі: AMTIR1/Ge/KRS5 з оправою із алюмінію та триплет GaAs/Ge/KRS5 з оправою із титану ВТ1-0.

Як видно з діаграми на рис. 2, оптимальними комбінаціями оптичних матеріалів триплету для інфрачервоного спектрального діапазону 8–12 мкм із запропонованих матеріалів будуть CsI/KRS5/Ge з оправою із алюмінію і триплет CdTe/GaAs/Ge з оправою із інвару. Проте в дальній ІЧ-області підібрати матеріал несучої конструкції атермалізованого й ахроматичного триплету для деяких комбінацій оптичних матеріалів значно складніше, ніж у більш короткохвильових областях спектра.

Таблиця, наведена нижче, містить приклад ахроматичного й атермалізованого триплету інфрачервоного діапазону 8–14 мкм, отриманого на основі викладеної вище методики з вказівкою оптичних сил кожного компонента, відстаней між ними d_i , а також матеріалу деталей кріплення.

Виходячи з викладеної вище методики, алгоритм отримання атермалізованого й ахроматичного триплету з урахуванням температурного розширення матеріалу несучої конструкції міститиме такі етапи.

З урахуванням загальної оптичної сили об'єктива $\Phi_{\Sigma} = 1$, ТКЛР несучої конструкції α_0 , і маючи вибрані з діаграми $v - V \cdot v$ три оптичні матеріали, ми отримуємо для кожного із них з каталогів матеріалів константи n , v , α , V .

Таблиця. Атермальний і ахроматичний інфрачервоний триплет

Матеріал лінз			$\Phi_1, \text{мм}^{-1}$	$\Phi_2, \text{мм}^{-1}$	$\Phi_3, \text{мм}^{-1}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	Матеріал оправы
першої	другої	третьої						
ИКС25	ZnSe	KRS5	1,21033	-0,66166	1,10719	0,202	0,694	Інвар

Далі обчислюються наступні рівняння:

1. Детермінант матриці коефіцієнтів системи лінійних рівнянь:

$$D = (K_1 - K_3)(v_2 - v_3) - (K_2 - K_3)(v_1 - v_3).$$

2. Кут нахилу лінії, яка представляє ТКЛР матеріалу несучої конструкції.

3. Оптичні сили компонентів триплету:

$$\Phi_1 = \Phi_{\Sigma} v_1 \left[(v_2 - v_3) \frac{\omega}{D} + \frac{1}{v_1 - v_2} \right],$$

$$\Phi_2 = -\Phi_{\Sigma} v_2 \left[(v_1 - v_3) \frac{\omega}{D} + \frac{1}{v_1 - v_2} \right],$$

$$\Phi_3 = \Phi_{\Sigma} v_3 (v_1 - v_2) \frac{\omega}{D}.$$

4. Знаючи оптичні сили компонентів і показники заломлення матеріалів, обчислюємо радіуси кривизни оптичних поверхонь.

5. Шляхом оптимізації визначаємо оптимальну товщину оптичних компонентів і відстані між ними, намагаючись отримати найкращі характеристики системи.

Висновки

Завдання проектування ахроматичного й атермалізованого фокусувального вузла для ІЧ-

техніки є багатофакторним і залежить як від характеристик оптичних компонентів, так і від параметрів несучої конструкції.

Рациональне розв'язання цієї задачі можливе при застосуванні триплету, що включає певні композиції оптичних матеріалів у поєднанні з певним механічним матеріалом несучої конструкції.

Вибір матеріалів може бути зроблений на підставі аналізу діаграми $v - V \cdot v$ за умови дотримання вимог, наведених у статті.

У зв'язку із залежністю оптичних характеристик матеріалів триплету від заданого спектрального діапазону від діаграми змінюється, а отже, в кожному спектральному діапазоні для ахроматизації й атермалізації фокусувального вузла необхідно застосовувати різні композиції матеріалів.

Подальша робота в цьому напрямі буде спрямована на вдосконалення методик проектування ахроматичних і атермалізованих інфрачервоних оптичних систем з метою отримання алгоритму, який дасть можливість отримати повний набір конструктивних параметрів оптичної системи без необхідності подальшої оптимізації; мінімізувати аберації оптичної системи; проектувати оптичні системи, що складаються більш ніж із трьох компонентів.

1. Кучеренко О.К., Муравьев А.В. Атермалізація об'єктивів тепловизорів в артилерійських і танкових системах спостереження і прицеливання // Артилерійське і стрелкове озброєння. – 2011. – № 3(40). – С. 28–33.

2. Russell M. Hudyma, "Athermal MWIR objectives", SPIE, vol. 2540, pp. 229–235.
3. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 670 с.