

УДК 535.21

*Р.Д. Новіков, студент гр.ПО-62М, В.Г. Колобродов, д.т.н., проф.
КПІ ім.Горія Сікорського*

АТЕРМАЛІЗАЦІЯ ТА АХРОМАТИЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

Анотація. У роботі проведена адаптація відомого методу атермалізації та ахроматизації рефракційних оптичних систем у світлі сучасних досягнень у галузі дифракційних оптичних елементів. Продемонстровано актуальність підходу для проектування систем для роботи в інфрачервоному діапазоні за суворих температурних умов.

Ключові слова: дифракційний елемент, атермалізація, ахроматизація, інфрачервоні оптичні системи, термооптична стала, хроматизм.

ВСТУП

Інфрачервона (ІЧ) техніка – стратегічна галузь національної оптичної промисловості. ІЧ оптичні системи (ОС) знаходять широке застосування у ракетобудуванні, військовій промисловості, медицині, сільському господарстві, тому покращення їхньої якості – одне із пріоритетних завдань сучасного приладобудування. Зазвичай ІЧ системи експлуатуються у складних умовах навколишнього середовища. В першу чергу це стосується температурного діапазону, який згідно із типовими технічними умовами може становити ± 60 °. Зміна температури викликає зміну оптичних характеристик матеріалів та конструктивних параметрів системи, що спричинені лінійним розширенням. Це в свою чергу викликає терморозфокусування та появу додаткових аберацій, що призводить до значного погіршення якості на краях температурного діапазону.

Відомо кілька підходів до компенсації теплових впливів. Найбільшими перевагами серед них відрізняється пасивна оптична термокомпенсація. Її сенс полягає у підборі такої композиції оптичних матеріалів та матеріалів корпусів і оправ, щоб сумарна зміна оптичної сили системи зі зміною температури була мінімальною. Однак для ІЧ діапазону задача підбору атермальних комбінацій ускладнюється через відносно невелику номенклатуру матеріалів, значні відмінності їх дисперсійних характеристик та теплових властивостей, у порівнянні із матеріалом корпусу.

ОГЛЯД ВИХІДНОГО МЕТОДУ

Із розвитком теорії та технології виготовлення дифракційних оптичних елементів (ДОЕ) та поверхонь, з'явилася можливість створювати рефракційно-дифракційні, так звані гібридні системи. Виготовлені із відомих матеріалів для ІЧ діапазону, ДОЕ мають аналогічні до рефракційних за фізичним змістом, але відмінні за величиною параметри. У роботі пропонується розширення одного із відомих методів атермалізації та ахроматизації оптичних систем із врахуванням ДОЕ. Надаються методики синтезу двох- та трьохкомпонентних систем.

Згідно із оригінальним методом атермалізації та ахроматизації ІЧ ОС [1], задача полягає у виборі матеріалів, розрахунку оптичних сил компонентів і подальшому підборі шляхом оптимізації їх товщин. Розрахунок здійснюється

для моделі тонких лінз, відстань між окремими компонентами вважається нехтовно малою. Для вирішення цього завдання формують систему рівнянь, які по суті є умовами, що повинні виконуватися для досягнення атермалізації та ахроматизації системи. В неї входять умова масштабу, умова виправлення хроматизму положення та умова атермалізації, яка виражена із використанням термооптичних сталих. Аналіз цих умов дозволяє стверджувати, що завдання вирішується із трьохкомпонентною ОС, величини оптичних сил компонентів якої є розв'язками системи:

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 1 \\ \Phi_1 / \nu_1 + \Phi_2 / \nu_2 + \Phi_3 / \nu_3 = 0, \\ \Phi_1 V_{t1} + \Phi_2 V_{t2} + \Phi_3 V_{t3} = -\alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

де ν_1, ν_2, ν_3 – коефіцієнти дисперсії матеріалів оптичних компонентів, V_{t1}, V_{t2}, V_{t3} – його термооптична стала, а α_0 – температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалу оправки.

Для зручності систему перетворюють, вводячи нормовану оптичну силу компонента X , залишковий хроматизм δX , що є часткою нормованої оптичної сили компонента та коефіцієнта дисперсії матеріалу. Також добуток термооптичної сталої та коефіцієнта дисперсії оптичного матеріалу позначають через K . Після вищевказаних перетворень система рівнянь (1) має вигляд:

$$\begin{cases} \nu_1 \cdot \delta X_1 + \nu_2 \cdot \delta X_2 + \nu_3 \cdot \delta X_3 = 1 \\ \delta X_1 + \delta X_2 + \delta X_3 = 0 \\ K_1 \cdot \delta X_1 + K_2 \cdot \delta X_2 + K_3 \cdot \delta X_3 = -\alpha_0 \end{cases} \quad (2)$$

Ця система рівнянь може бути вирішена відносно змінних $\delta X_1, \delta X_2, \delta X_3$. Оригінальний метод [1] використовує графічне представлення властивостей матеріалів на діаграмі $\nu - V \cdot \nu$ для підбору композиції матеріалів трьохкомпонентної системи із ненульовим детермінантом, щоб виконати її подальший аналіз. Через нелінійні властивості термооптичних сталих, для кожного температурного та спектрального діапазонів необхідно формувати окрему діаграму.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хроматизм та температурні властивості ДОО характеризуються аналогічними за фізичним змістом величинами [2,3]. Отже, можна використовувати системи (1), (2) не тільки для вирішення задач розробки атермалізованих та ахроматизованих трьохкомпонентних ІЧ ОС, а і для проектування двохкомпонентних систем, які складаються із одного рефракційного та одного гібридного компонентів, а також трьохкомпонентних систем із двох рефракційних та одного суто дифракційного компонента. Термооптична стала ДОО:

$$V_{td} = -\frac{1}{n_0} \beta_\lambda - 2\alpha, \quad (4)$$

де β_λ – температурний коефіцієнт приросту показника заломлення матеріалу для довжини хвилі випромінювання λ , α – ТКРЛ оптичного матеріалу, n_0 – показник заломлення матеріалу на центральній хвилі діапазону. Термооптична стала суто рефракційних компонентів визначається як:

$$V_{tr} = \frac{\beta_\lambda}{n_0 - 1} - \alpha \quad (5)$$

Коефіцієнт дисперсії рефракційних компонентів:

$$v_r = \frac{n_0 - 1}{n_2 - n_1}, \quad (6)$$

де n_1 та n_2 - показники заломлення матеріалу для довшої та коротшої довжин хвиль λ_1 та λ_2 відповідно. Коефіцієнт дисперсії ДОО:

$$v_d = \frac{\lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (7)$$

де λ_0 - довжина хвилі випромінювання середини діапазону.

Аналіз виразів (4)-(7) показує, що термооптичні сталі та коефіцієнти дисперсії рефракційних копонентів і ДОО в загальному випадку відрізняються знаком. Також було встановлено, що термооптичні сталі рефракційних компонентів в середньому на кілька порядків більші, за сталі ДОО. Тож на існуючій діаграмі $v - V \cdot v$ ДОО будуть репрезентовані масивом близьких до нулявої позначки точок, що лежать на одній вертикалі.

Це надає нові можливості для синтезу систем за методом [1], що будуть особливо цінними у спектральному діапазоні 8-14 мкм. Оновлені діаграми матеріалів для гібридних систем матимуть незначні відмінності будови, які зумовлені природою ДОО. Зокрема, для систем із гібридним компонентом, відбуватиметься вибір не трьох точок на діаграмі, а точки і лінії, яка репрезентує рефракційно-дифракційний компонент. Також зростає вага обраного спектрального діапазону, через хроматичні властивості ДОО.

На Рис.1 показано діаграму $v - V \cdot v$ для діапазону 8-14 мкм, що містить оптичні матеріали, які в ній використовуються. Дифракційні компоненти, виконані з кожного матеріалу репрезентовані точкою ДОО. Лінії поєднують найбільш перспективні комбінації для дослідження: Ge-ДОО/Ge/ZnS та Ge ДОО/Ge/ИКС25. Також можливий синтез аналогічних трьохкомпонентних систем, де одним виступає суто дифракційний компонент із будь-якого оптичного матеріалу.

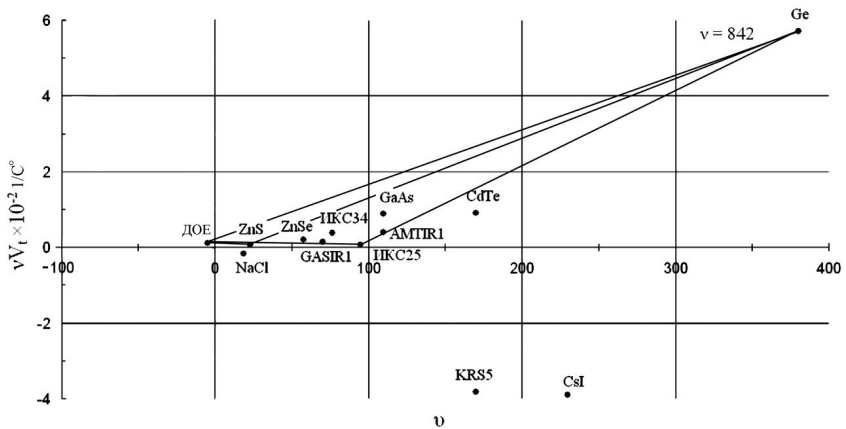


Рисунок 1. Діаграма матеріалів ІЧ-діапазону 8-14 мкм

ВИСНОВКИ

Завдання проектування ахроматичної та атермалізованої ОС ІЧ діапазону є комплексним і залежить як від характеристик оптичних компонентів, так і від параметрів несучої конструкції. Нелінійний характер залежності параметрів матеріалів зумовлює різний вибір композицій для різних умов роботи ОС.

Використання дифракційних поверхонь розширює можливості проектування атермалізованих та ахроматизованих систем, при незмінній номенклатурі матеріалів і використанні традиційних методів.

Через специфіку ДОО точки, які на діаграмі відповідають дифракційним поверхням і елементам, формують скупчення, тому надання переваги одному із матеріалів для синтезу трьохкомпонентної системи із одним компонентом, що має оптичну силу виключно дифракційної природи, несуттєво вплине на якість системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучеренко, О.К. Атермалізація та ахроматизація об'єктів інфрачервоної техніки/ О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, В.М. Тягур // Наукові вісті «НТУУ КПІ». – 2015. - №5. С.114-117.
2. Dong Jianing «Optical Design and Athermalization Analysis of Infrared Dual Band Refractive-Diffractive Telephoto Objective», Proc. of SPIE Vol. 10250 (2017).
3. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С. Дифракційна теорія оптичних систем: монографія / Київ: НТУУ КПІ, 2011. - 140 с.