

УДК 621.384.3

Колобродов В.Г., докт. техн. наук, професор
Микитенко В.І., докт. техн. наук, доцент
Тимчик Г.С., докт. техн. наук, професор
Колобродов М.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: deanpb@kpi.ua

**ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ
ТЕПЛОВІЗОРІВ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ
ЯВИЩ ТА ДИСТАНЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ**

Робота присвячена обґрунтуванню вибору поляризаційних оптичних елементів для тепловізійних дистанційних спостережень та вимірювань. Виконано порівняльний аналіз основних методів отримання поляризаційних зображень: з допомогою обертання поляризатора, обертання фазової пластинки і з використанням комбінованих матричних приймачів інфрачервоного випромінювання з мікро поляризаторами. Для аналізу використано спрощені математичні моделі перетворення сигналів в основних оптичних елементах поляриметричних тепловізорів – лінійних поляризаторах та фазових (чверть-хвильових) пластинках. Показана перевага дротяних поляризаторів порівняно з поляризаторами на основі відбивання. Також обґрунтовано, що серед різних фізичних ефектів, що викликають фазові затримки - подвійне променезаломлення, повне внутрішнє відбивання і відбивання випромінювання на межі повітря-метал, дифракція на дротяній дифракційній ґратці – найбільш прийнятним є використання останнього ефекту. Бібл. 22, рис. 7.

Ключові слова: поляриметричні тепловізори, вектори Стокса, поляризатор, чверть-хвильова пластинка

Вступ

Термоелектричні явища досить широко використовуються в різних галузях життєдіяльності людини. Однією з актуальних науково-прикладних задач, наприклад, є утилізація відходів тепла з використанням термоелектрики [1]. Повний комплекс засобів технічної реалізації процесів перетворення енергії потребує багато складових, в тому числі – вимірювальних технологій. Для контролю якості термоелектричних перетворювачів енергії створюються комп'ютеризовані методи абсолютних вимірювань з використанням термопар [2].

Більш узагальнений моніторинг фізичних явищ, пов'язаних з тепловими контрастами, можливий з використанням тепловізорів. Класичні тепловізори дозволяють спостерігати тепловий радіаційний контраст енергетичної яскравості (інтенсивності) між об'єктом і фоном [3]. За низького радіаційного контрасту об'єкта спостереження, ефективність використання класичних тепловізорів може бути невисокою. Для підвищення радіаційного контрасту зображень об'єктів на рівномірному тлі в деяких країнах розпочалися дослідження із створення тепловізорів, в яких носієм інформації є поляризаційні властивості інфрачервоного (ІЧ) випромінювання цілі і фону (завади) [4, 5, 6]. Такі поляриметричні тепловізори (ПТ) вимірюють поляризаційні характеристики випромінювання від об'єкта і фону, а саме: інтенсивність, ступінь поляризації та азимут і еліптичність поляризації [7, 8]. Ці характеристики дозволяють вимірювати комплексний показник заломлення, який поєднує в собі оптичні і електричні параметри досліджуваного середовища.

Оптична система ПТ складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, чверть-хвильової пластинки (quarter-wave retarder) і ІЧ об'єктива [9, 10]. Дослідженню такої оптичної системи присвячено ряд монографій і статей [11, 12], де розглядаються поляризаційні елементи (ІЧ поляризатор і чверть-хвильова пластинка), які здійснюють відповідні перетворення оптичного сигналу для отримання поляризаційних параметрів випромінювання від об'єкта спостереження і фону. Також велика увага приділяється калібруванню ПТ [13]. В той же час відсутня інформація про дослідження оптичної системи ПТ з метою обґрунтування вибору інфрачервоного поляризатора і фазової пластинки для покращення експлуатаційних характеристик тепловізора.

Метою цієї роботи є дослідження і обґрунтування вибору інфрачервоного поляризатора і фазової пластинки для узгодження їх параметрів, що дозволить підвищити експлуатаційні характеристики поляриметричних тепловізорів.

Фізико-математична модель оптико-електронної системи поляриметричного тепловізора

Поляризаційні характеристики випромінювання, що змінюються під час розповсюдження і відбивання, можна виразити вектором Стокса, вектором Джонса або матрицею Мюллера [14, 15]. Вектор Стокса був запропонований для дослідження частково поляризованого, а також неполяризованого і повністю поляризованого світла. Чотири параметра вектору Стокса $\vec{S} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ описують інформацію про стан поляризації об'єкта спостереження. Найбільшого розповсюдження отримав метод чотирьох сегментацій модуляції матричного приймача випромінювання (МПВ) поляризаційним станом випромінювання для вимірювання вектору Стокса [4, 5, 9].

На рис. 1 зображена схема, яка пояснює принцип роботи такого ПТ на основі модуляції [10]. Для спрощення дослідження будемо вважати, що розглядається монохроматичне випромінювання. Досліджуване частково поляризоване випромінювання з амплітудою \vec{E}_{pp}

проходить через поляризатор, чверть-хвильову пластину, які можуть змінювати кут поляризації θ і різницю фаз ε між складовими E_x і E_y вектору \vec{E}_{pp} за допомогою механічного обертання, або неперервної періодичної модуляції. Інфрачервоний МПВ формує групу значень інтенсивності вихідного випромінювання, які використовують для отримання чотирьох параметрів вектору Стокса поляризаційного зображення шляхом зміни кутів θ і ε .

Вектори Стокса дозволяють отримати основні параметри поляризації випромінювання: інтенсивність, ступінь поляризації, кут поляризації і еліптичність поляризації.

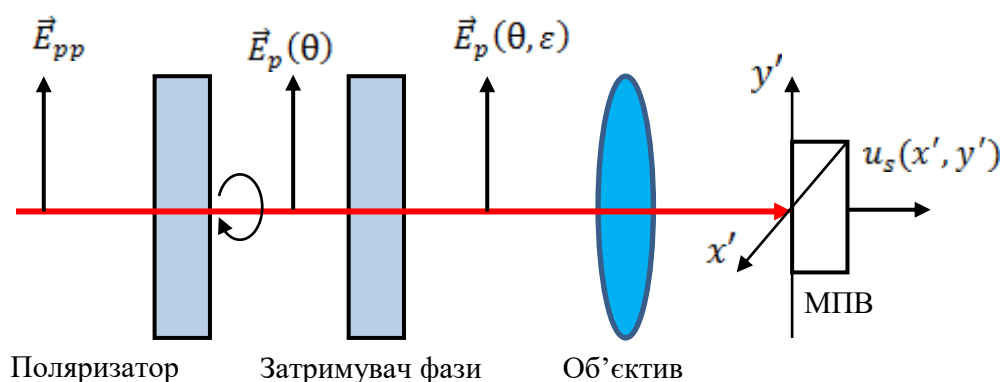


Рис. 1. Принцип роботи поляризаційного тепловізора

Розглянемо оптичну систему ПТ, яка складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, чверть-хвильової пластини і ІЧ об'єктива тепловізора (рис. 2). Нехай на вхід оптичної системи надходить паралельний пучок природнього або частково поляризованого випромінювання з амплітудами \vec{E}_n або \vec{E}_{pp} відповідно. На виході поляризатора формується лінійно поляризоване випромінювання з вектором \vec{E}_{lp} , який орієнтований під кутом θ відносно осі x . Після проходження чверть-хвильової пластинки, оптична вісь якої є паралельною поверхні пластини і утворює кут α з вектором \vec{E}_{lp} (площиною поляризації), в результаті подвійного променезаломлення в пластині утворюються звичайний і незвичайний промені з амплітудами E_0 і E_ε . Ці промені розповсюджуються в одному напрямку і мають на виході із пластинки різницю фаз

$$\Delta\varphi = \varepsilon = k \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda}(n_0 - n_\varepsilon)d, \quad (1)$$

де d – товщина пластини, n_0 і n_ε – показники заломлення для звичайного і незвичайного променів відповідно.

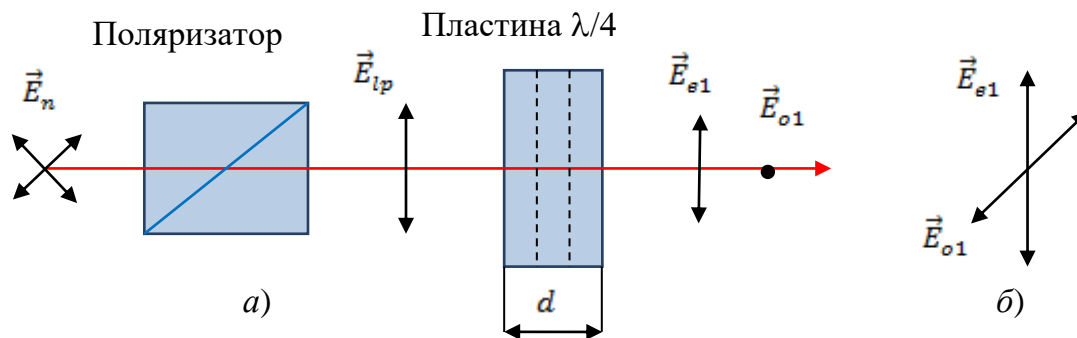
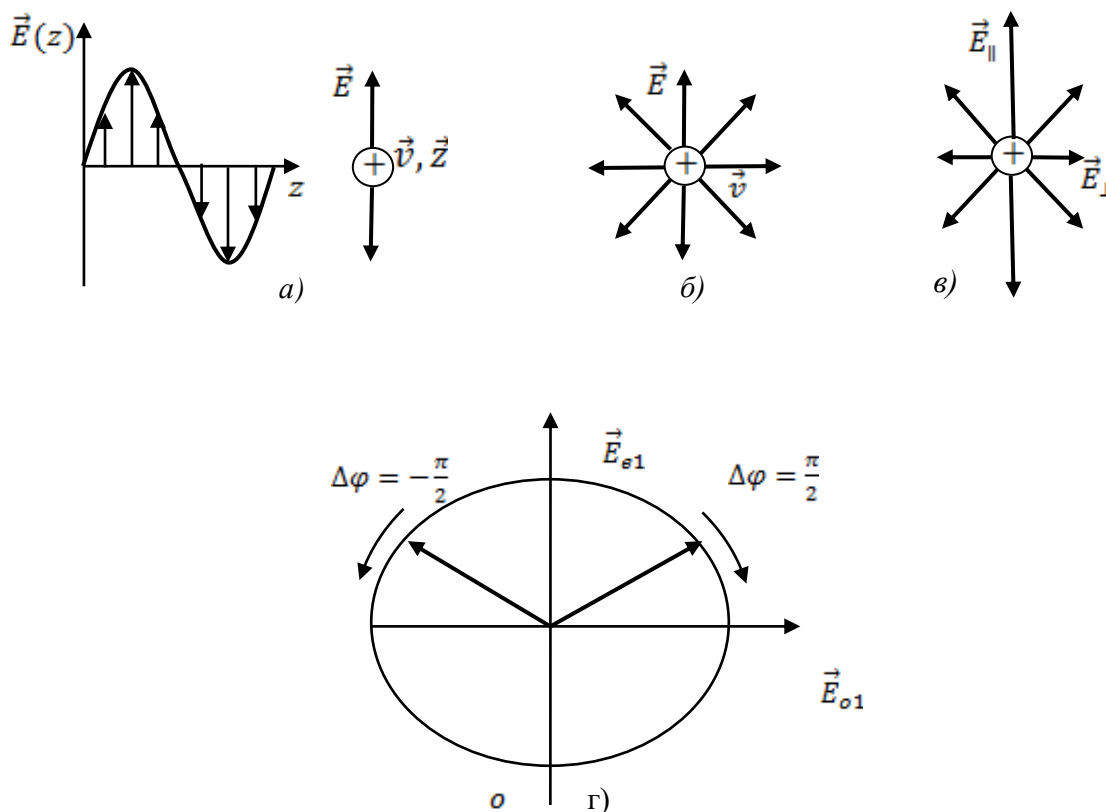


Рис. 2. Схема для дослідження поляризації випромінювання (а) і її векторна модель (б)

В сучасних ПТ використовуються три методи отримання поляризаційного зображення: обертання поляризатора, обертання фазової пластинки і використання МПВ, кожен піксель якої має мікро поляризатор з певною орієнтацією поляризаційної осі [16]. Перший і другий методи мають обмежене використання через наявність механічної системи обертання оптичних елементів і необхідність використання трьох-чотирьох послідовних кадрів. На рис. 3 наведені різні стани поляризації оптичного випромінювання, які можна повністю описати чотирма параметрами Стокса.



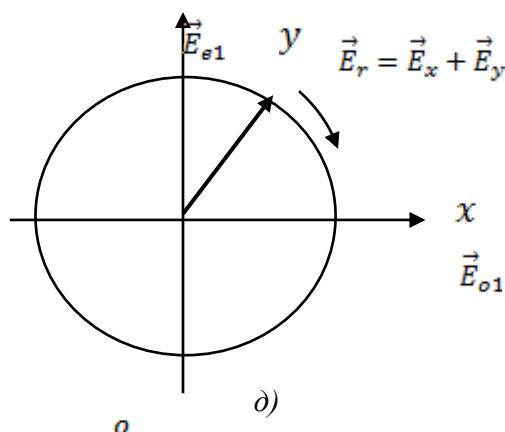


Рис. 3. Стан поляризації випромінювання: а) – лінійно поляризований;
 б) – природній; в) – частково поляризований; г) – еліптично поляризований;
 д) – циркулярно поляризований

Перший параметр Стокса S_0 визначає загальну оптичну інтенсивність. Другий параметр Стокса S_1 визначає перевагу записаного оптичного сигналу для горизонтальної поляризації над вертикальною поляризацією. Третій параметр Стокса S_2 визначає перевагу записаного оптичного сигналу з лінійною поляризацією, що орієнтована вздовж 45° над лінійною поляризацією вздовж 135° , які виміряні відносно горизонтального напрямку. Четвертий параметр Стокса S_3 характеризує перевагу право-кругової поляризації над ліво-круговою поляризацією.

Параметри Стокса можна визначити за допомогою двох ортогональних електричних полів випромінювання E_x і E_y , які визначаються рівняннями

$$E_x(t) = E_{x0} \exp[j2\pi\nu t - \varphi_x] \text{ і } E_y(t) = E_{y0} \exp[j2\pi\nu t - \varphi_y] \quad (2)$$

де E_{x0} , E_{y0} і φ_x , φ_y – постійні амплітуди і початкові фази цих полів відповідно; ν – частота випромінювання. Електричне поле випромінювання, яке пройшло через лінійний поляризатор з віссю поляризації в напрямку θ , і фазову пластинку з затримкою на кут $\varepsilon = \varphi_x - \varphi_y$, визначається рівнянням (3):

$$E_1(\theta, \varepsilon) = E_x \cos\theta + E_y \exp(j\varepsilon) \sin\theta. \quad (3)$$

Розглянемо особливості застосування поляризаторів і фазових пластинок в оптичних системах ПТ.

Поляризатори для ІЧ області спектру

Поляризаційний оптичний елементом є будь-який оптичний елемент, який змінює стан поляризації випромінювання [15]. Поляризатори і фазові пластинки (затримувачі фази, retarder) є поляризаційними оптичними елементами.

Загальні положення

Поляризатор – це оптичний елемент, що призначений для створення поляризованого світла незалежно від властивостей вхідного світла. Бажаний стан поляризованого світла може бути лінійним, круговим або еліптично поляризованим (рис. 3), а оптичний елемент, що призначений для створення одного із цих станів, називається лінійним, круговим або еліптичним поляризатором. В поляризаторах використовуються такі оптичні явища як поглинання, заломлення, відбивання, подвійне променезаломлення і дифракція випромінювання.

Лінійний поляризатор має два параметра пропускання: основний головний коефіцієнт пропускання T_1 і другорядний головний коефіцієнт пропускання T_2 . Параметр T_1 визначається як відношення інтенсивності на виході поляризатора $I_{p, \max}$ до інтенсивності на вході I_0 , коли падаючий промінь лінійно поляризований в азимуту коливань, який забезпечує максимальний коефіцієнт пропускання. Аналогічно параметр T_2 визначається для мінімального коефіцієнта пропускання. Таким чином

$$T_1 = \frac{I_{p, \max}}{I_0}; T_2 = \frac{I_{p, \min}}{I_0}. \quad (4)$$

Відношення $R_t = T_1/T_2$ називають *основним коефіцієнтом пропускання (коефіцієнтом екстинкції)* поляризатора. Для поляризаторів високої якості цей коефіцієнт може досягати 10^5 . Середнє значення основних коефіцієнтів пропускання називають загальним коефіцієнтом пропускання

$$T_t = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (5)$$

Параметр T_t визначається як відношення інтенсивності на виході поляризатора до інтенсивності вхідного неполяризованого променя.

Закон Малюса для ідеального поляризатора має вигляд

$$I_{id}(\theta) = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta. \quad (6)$$

Для реального поляризатора закон Малюса має вигляд

$$I_r(\theta) = I_{90}(I_0 - I_{90})\cos^2\theta. \quad (7)$$

Поляризатори з дротяною сіткою

В ІЧ області спектру широко використовуються поляризатори у вигляді плоскої ґратки, що утворена паралельними дротами (wire grid polarizer, WGP) [15, 16]. Такий поляризатор формує лінійно поляризоване випромінювання в площині, перпендикулярній дротам. Відстань між дротами повинна бути меншою, ніж довжина хвилі. Дротяна ґратка наноситься на підкладку, поверхня якої має анти відбиваюче покриття. Випромінювання, яке є поляризованим паралельно дротам, відбивається. Період ґратки ІЧ поляризаторів зазвичай складає 0.5 мкм і більше.

Оскільки втрати на відбивання і поглинання зменшують коефіцієнт пропускання дротяних ґраток, на підкладку наносять просвітлюючі покриття. Тому його якість і ахроматичність є важливими факторами при виготовленні дротяних ґраток. Комерційні поляризатори на основі дротяних ґраток мають основний коефіцієнт пропускання (20 – 10000) для лінійної поляризації випромінювання в режимі пропускання в спектральному діапазоні від 1.5 мкм до міліметрових довжин хвиль.

Типові технічні характеристики дротяних поляризаторів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики дротяного поляризатора

Параметри при $\lambda = 5$ мкм	Технічні характеристики
Ефективність пропускання, T_1 , %	90
Пропускання небажаного випромінювання, T_2 , %	0.4
Ступінь поляризації, $(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$, %	99
Коефіцієнт екстинкції, T_1/T_2	225

В [17] розглядається ПЧ дротяний поляризатор, який складається із ґратки з періодом 400 нм на фотозатверджуваній плівці товщиною 30 мкм. Ґратка виготовлена із золота з використанням термічного напилення і зняття відбитка з плівки в умовах підвищеної вологості. Поляризатор має поперечне магнітне пропускання більше 75 % в діапазоні довжин хвиль (4 – 5.5) мкм і коефіцієнт екстинкції більше 20 дБ в діапазоні (2.5 – 7.5) мкм. Максимальний коефіцієнт екстинкції більше 28 дБ для довжини хвилі 6.5 мкм. Такий плівковий поляризатор з високим коефіцієнтом пропускання є дешевшим порівняно із звичайними ПЧ поляризаторами.

В [16] описано процес виготовлення дротяного поляризатора для пікселів мікроболометричного МПВ. Дротяна сітка із золота наноситься на підкладку, яка має низькі втрати для довжини хвилі падаючої хвилі, тобто мала уявна і реальна частина показника заломлення n , k [18] повинні мати мінімальні величини. Ідеальне рішення цієї проблеми – механічне розташування золотої сітки в повітрі, що технологічно неможливо. Тому були використані підкладки з різними показниками заломлення (рис. 4).

Проведено чисельне моделювання розповсюдження ТМ і ТЕ полів для різних дротяних мереж (період, товщина металу, матеріали підкладки та довжини хвиль) із використанням теорії дифракційних ґраток [19]. Якщо вектор електричного поля є паралельним до границі поділу двох середовищ, то говорять про ТЕ-поляризацію хвилі. Якщо паралельним границі поділу двох середовищ є вектор магнітного поля, то випромінювання вважають ТМ-поляризованим. Метою цього моделювання є пошук геометричних розмірів ґратки, коли коефіцієнт екстинкції поля ТМ/ТЕ на виході поляризатора перевищує 100:1, значення пропускання ТМ перевищує 80 %.

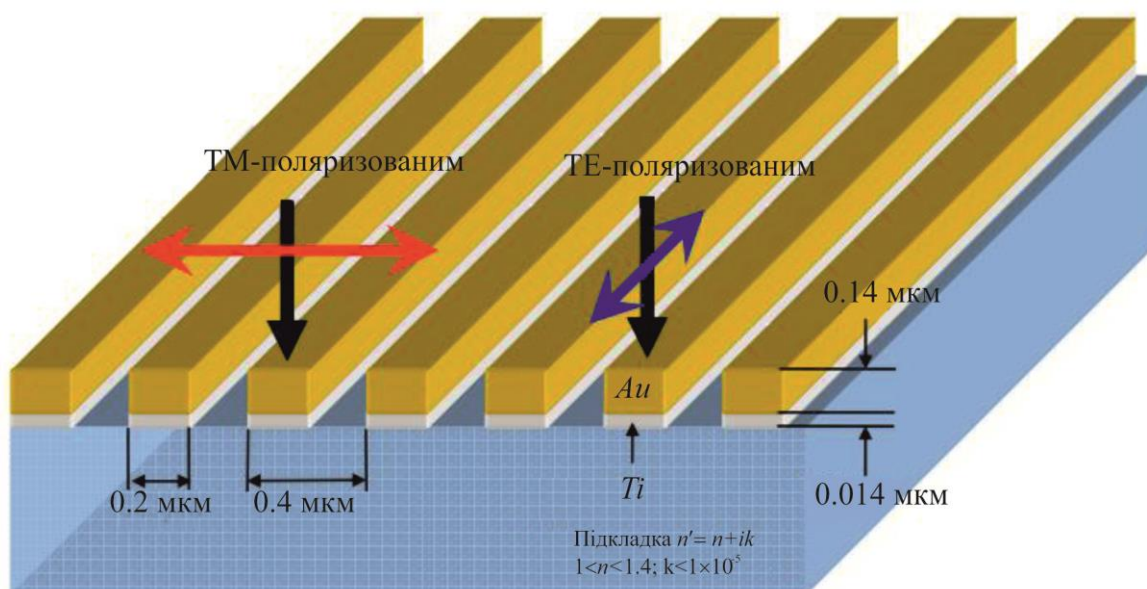


Рис. 4. Ілюстрація поляризатора сітки із золотого дроту на підкладці з низьким значенням показника заломлення для n і k та різними геометричними розмірами [15]

Спрощений варіант оптичної системи ПТ використовує фазову пластинку, що обертається, за якою розташований фіксований лінійний поляризатор, який дозволяє отримати декілька послідовних зображень для визначення параметрів Стокса по усьому полю зору. Альтернативний метод – це поле зору, яке просторово поділено на суперпікселі, в кожному з яких параметри Стокса визначаються одночасно. Кожна комірка суперпікселя має окремий дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації.

Ключовим елементом оптичної системи ПТ є чверть-хвильова пластинка, призначена для відповідного просторового поділу зображення. В таких пластинках можуть використовуватись різні фізичні явища: відбивання під кутом Брюстера, подвійне променезаломлення, дифракція випромінюванні на дротяній ґратці з малим періодом. Такі підхвильові (subwavelength) ґратки мають ефективний показник заломлення, який залежить від поляризації вхідного випромінювання. Цей ефект відомий як подвійне променезаломлення і може бути використаний для створення хвильової пластинки.

В [16] наведені результати виконання проекту в Sandia National Laboratories (Albuquerque, New Mexico, USA) по розробці мікро поляризаційного пристрою для довгохвильового інфрачервоного випромінювання для поляриметричної візуалізації. Інформація про поляризаційний стан випромінювання від об'єкта і фону може допомогти виявити і розпізнати об'єкти, що мають інтерес для різних задач дистанційного зондування та для військових застосувань. У той час як традиційні послідовні поляриметричні зображення створюють сцени з інформацією про поляризацію за допомогою серії зібраних зображень, використання МПВ, кожен піксель якого має поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації, дозволяє за рахунок обробки сигналів з пікселів визначати розподіл в площині зображення усіх чотирьох параметрів Стокса одночасно.

На рис. 5 наведена модель суперпікселя МПВ, який складається із чотирьох комірок, що мають окремі мікро поляризатори з різними орієнтаціями площини поляризації. Орієнтація дротів у кожній комірці є різною, що призводить до того, що кожна комірка утворює поляризатор, оптична вісь якого утворює кути 0° , 45° , 90° і 135° з оптичною віссю ретардера. Таким чином, використання суперпікселя дозволяє в одному кадрі одночасно отримувати сигнали на виході окремих комірок для різних кутів поляризації. Обробка цих сигналів дає змогу розрахувати компоненти вектору Стокса, який визначає поляризаційні характеристики випромінювання об'єкта спостереження [16]:

$$S_0 = 1; S_1 = \{2I(0^\circ, 0) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)];$$

$$S_2 = \{2I(45^\circ, 0) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)];$$

$$S_3 = \{2I(135^\circ, \pi/2) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)].$$

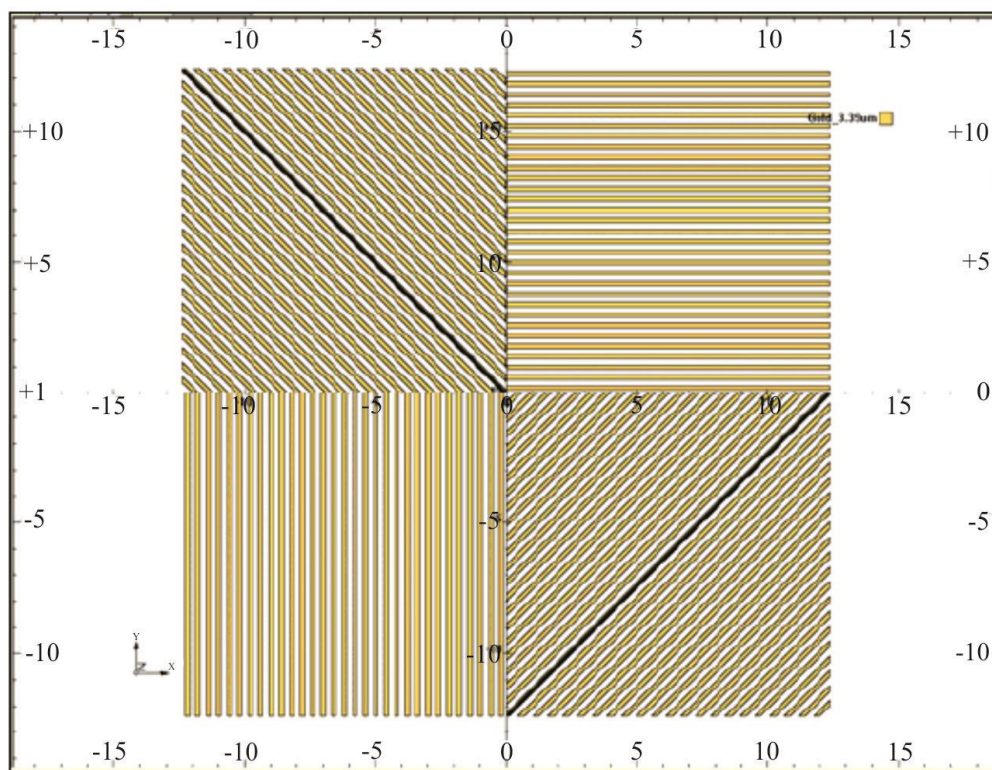


Рис. 5. Модель суперпікселя МБМ

Комерційні поляризатори для ІЧ області спектру постачаються на ринок деякими оптичними фірмами, наприклад, Edmund & Tydex. Такі поляризатори призначені для лінійної поляризації випромінювання в режимі пропускання в спектральному діапазоні від 1,5 мкм до міліметрових довжин хвиль. Вони є різновидністю дифракційних ґраток і нарізуються на кристалічній або полімерній підкладці. Ґратка поляризатора є набором штрихів трикутного профілю. На одну із граней кожного штриха наноситься алюмінієве покриття. В залежності від матеріалу підкладки, поляризатори виготовляють по технології виробництва дифракційних ґраток.

Фірма Edmund Optics поставляє на ринок поляризатори за спеціальною голографічною технікою, завдяки якій відстань між дротами становить мікрометри [20]. Порівняно із звичайними методами, голографічний метод створює тонший інтервал пазів, що оптимізує характеристики для коротких довжин хвиль. Створюються голографічні дротяні поляризатори з фтору барію (BaF_2), селеніду цинку ($ZnSe$), бромі-йодиду талію (KRS-5) та германію (Ge).

В табл. 2 наведені характеристики дротяних поляризаторів, а на рис. 6 зображено зовнішній вигляд поляризатора [20].

Таблиця 2

Технічні характеристики дротяних поляризаторів

Матеріал підкладки	ZnSe	Ge	KRS-5
Спектральний діапазон, мкм	(1.5 – 14)	(8 – 14)	(2 – 30)
Стандартна апертура, мм	D25 × 25	D25 × 25	D34
Розмір оправы для стандартної апертури, мм	D42 × 8	D42 × 8	-
Ефективний коефіцієнт пропускання, T_1	65- 70 % з одностороннім просвітлюючим покриттям 50 % без покриття	>50 % з одностороннім просвітлюючим покриттям	60 %
Пропускання небажаної поляризації, T_2	<0.1 % для 10 мкм	<0.1 % для 10 мкм	-
Ступінь поляризації $(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$	>99 % для 10 мкм	>99 % для 10 мкм	
Фірма виробник	TYDEX	TYDEX	Edmund Optics

Для фізико-математичного моделювання дротяних поляризаторів, період яких є набагато меншим за довжину хвилі, використовується теорія зв'язаних хвиль [16, 19].



а)



б)

Рис. 6. Поляризатор KRS-5 (а) і фазова пластинка (б) фірми Edmund Optics [18]

Чверть-хвильова пластинка

В [16] продемонстрована можливість виготовлення і використання дротяних поляризаторів та дротяних ахроматичних фазових пластинок, які забезпечують необхідні коефіцієнт екстинкції та затримку фази. Результати тестування мікро поляризаційних суперпиксельних масивів вказують на те, що кожен елемент (поляризатор та фазова пластина) виготовляється на власній підкладці, оскільки є занадто чутливими до перехресних впливів. Цей перехресний вплив є наслідком дифракції від періодичних структур мікро поляризаторів та/або мікрохвильових пластин. Дифраговане світло поширюється всередині підкладки до наступного елемента або у

вільний простір. Для зменшення впливу цього явища на температурне і просторове розділення пропонується мікро поляризатори інтегрувати в матричну структуру МПВ під час його виготовлення. Двопроменезаломлюча хвильова пластинка виготовляється на власній підкладці та є сумісною із активною зоною інтегрованої структури «мікро поляризатор – піксель». Хвильова пластинка повинна мати двостороннє просвітлююче покриття. Такий підхід значно ускладнює процес виготовлення оптико-електронної системи ПТ.

Чверть-хвильова пластинка (ретардер) може бути виготовлений у вигляді ромбічної призми або хвильової пластинки. Такі оптичні елементи часто називають компенсаторами, наприклад, компенсатор Бабіне-Солейля (Babinet-Soleil). Ретардери можуть бути розраховані на певну довжину хвилі або для широкої області спектру (ахроматичні компенсатори).

Затримувачі фази на основі одновісних кристалів.

Зміну різниці фаз в компенсаторах можна досягти використанням анізотропних одновісних кристалах, в яких оптична вісь є паралельною граням кристала:

$$\Delta\varphi = \varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o). \quad (8)$$

Оптична різниця ходу обумовлена двома параметрами: товщиною пластинки d і подвійним променезаломленням $(n_e - n_o)$. Для додатних кристалів $n_e > n_o$. Незвичайний промінь з показником заломлення n_e є поляризованим паралельно оптичній осі, а звичайний промінь з показником заломлення n_o є поляризованим перпендикулярно оптичній осі.

Повільна вісь – це напрямок в середовищі, з найбільшим високим показником заломлення n_e , тобто для одновісного додатного середовища це буде його оптична вісь. *Швидка вісь* – це напрямок в середовищі з найменшим показником заломлення n_o .

Найбільш розповсюдженими комерційними затримувачами є чверть-хвильові і пів-хвильові пластинки, які забезпечують рівницю фаз між E_s і E_p компонентами рівну $\pi/2$ і π . Чверть-хвильовий ретардер створює кругову поляризацію, коли азимут лінійно поляризованого падаючого світла утворює кут 45° зі швидкою віссю. Пів-хвильовий ретардер формує лінійно поляризоване світло, площина поляризації якого повернута на кут 2θ , коли азимут частково поляризованого падаючого світла знаходиться під кутом θ відносно швидкої осі.

ІЧ ахроматичний ретардер.

На рис. 7 наведено схему роботи призматичного ретардера, в якому не відбувається відхилення пучка променів [13]. В оптичному елементі відбувається два повних внутрішніх відбивання (ПВВ, total internal reflection) в точках A_1 , B_1 і A_2 , B_2 і відбивання на межі повітря-метал в точках C_1 , C_2 .

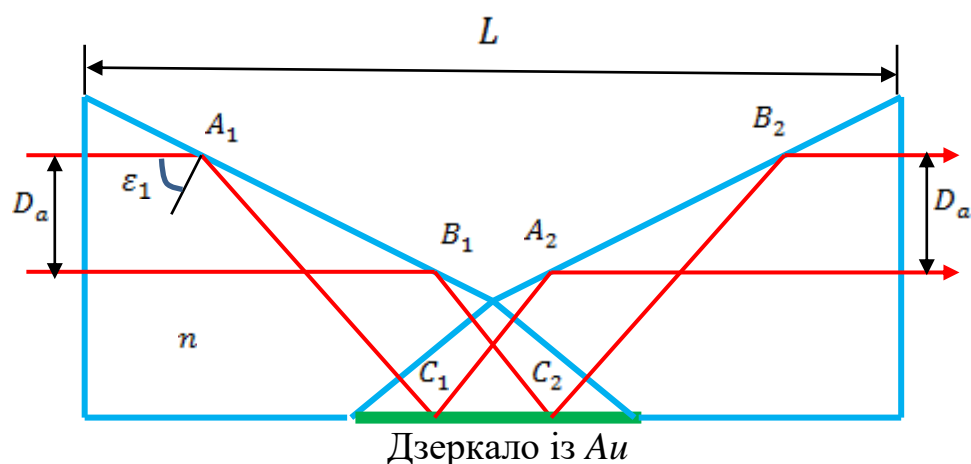


Рис. 7. Інфрачервоний ахроматичний призматичний ретардер

Принцип роботи призми ґрунтується на тому, що між плоскополяризованими компонентами E_s і E_p вхідного випромінювання відбуваються значні фазові зсуви в точках ПВВ. Ці фазові зміни (різниця фаз) розраховуються за формулами [13]

$$\delta_{pr,s} = 2 \arctg \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \varepsilon_1 - 1}}{n \cos \varepsilon_1}, \quad (9)$$

$$\delta_{pr,p} = 2 \arctg \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \varepsilon_1 - 1}}{\cos \varepsilon_1}, \quad (10)$$

де ε_1 – кут падіння, а n – показник заломлення матеріалу призми (рис. 7).

Лінійна затримка, яка пов'язана з ПВВ, є чистим фазовим зсувом між двома компонентами E_s і E_p :

$$\Delta_{pr} = \delta_{pr,p} - \delta_{pr,s}. \quad (11)$$

Крім того, при відбиванні від металу спостерігаються фазові зсуви між компонентами E_s і E_p :

$$\Delta_{met} = \delta_{met,p} - \delta_{met,s}. \quad (12)$$

Тоді повна затримка для двох ПВВ і відбивання від металу дорівнює

$$\Delta\varphi = 2\Delta_{pr} + \Delta_{met}. \quad (13)$$

Показники заломлення оптичних матеріалів, які добре пропускають випромінювання в ІЧ діапазоні спектру, є вищим, ніж показники заломлення для видимого діапазону. Як правило, для ІЧ діапазону вони більше 2.0, а видимого діапазону вони знаходяться в межах (1.4 – 1.7). Більш

високі показники заломлення для ІЧ діапазону призводять до більших фазових затримок між компонентами E_s і E_p для певного кута падіння, ніж для видимого діапазону. Призматичний затримувач для ІЧ випромінювання, який має більше двох ПВВ, буде мати великі розміри, що визиває певні труднощі при його застосуванні.

Призми виготовляють із однорідних матеріалів, в яких відсутнє подвійне променезаломлення. Таким вимогам в ІЧ діапазоні спектру задовольняє селенід цинку, сульфід цинку, германій і арсенід галію. Для виготовлення дзеркальних поверхонь використовують золото, срібло, мідь, алюміній. Перевагу віддають золоту, яке має високий коефіцієнт відбивання в ІЧ діапазоні і значну стійкість до корозії.

Кути падіння на вході і виході двох призм обирались такими, щоб зменшити френелівські втрати на відбивання. В табл. 3 наведені параметри ретардера із селену цинку і золотого дзеркала, який забезпечує зміну оптичної довжини на $\lambda/4$ в діапазоні (8 – 14) мкм. Розрахунок зроблено для довжини хвилі 10 мкм [14].

Таблиця 3

Числові дані ІЧ ахроматичного ретардера

Довжина хвилі λ , мкм	Показник заломлення $ZnSe, n$	Показник заломлення Au, n	Індекс екстинкції Au, k	Загальна фазова затримка δ , град
8	2.418	4.93	57.6	89.91
10	2.407	7.62	71.5	90.02
12	2.394	10.8	85.2	90.04
14	2.378	14.5	98.6	89.98

Використання дрютяної ґратки підхвильової довжини призводить до утворення подвійного променезаломлення, яке забезпечує бажану різницю фаз, а також дисперсію, що допомагає проектувати ахроматичну фазову пластинку [16]. Ефективна теорія середовища моделює підхвильову ґратку як тонку плівку з ефективним показником, що визначається матеріалами ґратки та поляризацією падаючого випромінювання.

Для виробництва комерційних ІЧ ретардерів фірма Edmund Optics використовує дрютяні

гратки, що працюють в нульовому порядку дифракції [20]. Порівняно з фазовими пластинами кількох порядків, пластини нульового порядку забезпечують збільшене пропускання та нижчу чутливість до зміни температури. Ці пластинки виготовляються із фазовою затримкою на $\lambda/4$ або $\lambda/2$ в широких спектральних діапазонах і вони ідеально підходять для різноманітних приладів, які працюють в ІЧ діапазоні.

Характеристики комерційної фазової пластинки наведені в табл. 4, а зовнішній вигляд зображено на рис. 6б.

Таблиця 4

Характеристики фазової пластинки фірми Edmund Optics

Затримка	$\lambda/4$
Спектральний діапазон, мкм	(3 – 9)
Діаметр оправы, мм	25.4
Апертура, мм	10
Товщина, мм	8
Матеріал фазової пластинки	Тіогалат кадмію
Коефіцієнт пропускання	0.5

Рекомендації по вибору ІЧ поляризатора і фазової пластинки

Наведені вище дослідження свідчать про таке:

1. Практичного використання в ПТ заслуговують в першу чергу дротяні поляризатори (ДП), які мають ряд переваг порівняно з поляризаторами на основі закону відбивання Брюстера, а саме:

- мають відносно високий коефіцієнт пропускання;
- формують випромінювання з високим ступенем поляризації;
- мають малі габарити і вагу.

Головними недоліками ДП є: значні хроматичні спотворення (дисперсія); технологічні складності їх виготовлення, що обумовлює їх високу вартість.

2. Фазову пластинку (ретардер) можна виготовити, використовуючи:

- подвійне променезаломлення, що є проблематичним для спектральної області (8 – 14) мкм;
- закон повного внутрішнього відбивання і відбивання випромінювання на межі повітря-метал. Однак така фазова пластинка має великі габаритні розміри, що ускладнює її використання в малогабаритних тепловізорах;
- дифракцію випромінювання на дротяній дифракційній ґратці. Така дифракційна ґратка певної структури забезпечує фазову затримку на 90° в широкому спектральному діапазоні.

3. Перспективним напрямком створення ПТ є використання МБМ, кожен піксель якої має дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації. Чотири сусідні пікселі утворюють суперпіксель, який дає можливість одночасно визначати чотири параметри вектору Стокса без використання оптико-механічної системи сканування. Використання МБМ з мікро поляризаторами має значні переваги:

- відсутність оптико-механічної системи сканування (обертання) поляризатора або фазової пластинки;
- можливість одночасно вимірювати усі параметри Стокса в одному кадрі зображення;
- спрощена електронна система обробки сигналів з пікселів МПВ для визначення параметрів вектору Стокса;
- малі розміри оптичної системи і невелике енергоспоживання ПТ.

Головними недоліками ПТ, які використовують МБМ з мікро поляризаторами є:

- технологічні труднощі виготовлення таких МБМ з мікро поляризаторами і висока вартість таких матриць;
- додаткові спотворення зображення, що обумовлені дифракцією випромінювання після проходження дифракційної ґратки і його поширенням всередині підкладки до наступного елемента.

Висновки

Глибоке розуміння фізичних процесів перетворення інфрачервоного випромінювання в поляриметричному тепловізорі дозволяє провести дослідження оптичної системи тепловізора і обґрунтувати вибір поляризатора і фазової пластинки для ефективного отримання поляризаційних характеристик випромінювання від об'єкта спостереження і фону.

В якості інфрачервоного поляризатора доцільно використовувати комерційні дротяні поляризатори. Для проведення лабораторних досліджень поляризаційних властивостей випромінювання можна використовувати закон відбивання Брюстера від пластинки із германію.

В поляриметричних тепловізорах, що працюють в широкому спектральному діапазоні, в якості інфрачервоної ахроматичної фазової пластинки необхідно використовувати комерційні ретардери на основі дротяної дифракційної ґратки. Для проведення експериментальних досліджень можна використовувати інфрачервоний призматичний ретардер.

Перспективним напрямком створення сучасного поляриметричного тепловізора є використання мікроболометричної матриці, кожен піксель якої має дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації. Чотири сусідні пікселі утворюють суперпіксель, який дає можливість одночасно визначати чотири параметри вектору Стокса без використання оптико-механічної системи сканування.

Подальші дослідження слід направити на розробку математичної моделі ТП, яка дала б змогу розраховувати температурне і просторове розділення, обґрунтувати методи їх підвищення, що є важливим для екологічного моніторингу, моніторингу природних ресурсів, систем теплового спостереження широкого застосування[21, 22].

Література

1. Анатичук Л.І. Критерій ефективності термоелектричних перетворювачів енергії, що використовують теплові відходи // Термоелектрика. – № 4. – 2020. – С.59-63.
2. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Автоматизація та комп'ютеризація процесів вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних та холодильних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 63-70.
3. Vollmer Michael. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – pp. 788.
4. Tooley R. D. Man-made target detection using infrared polarization / R. D. Tooley // Polarization considerations for optical systems II. – International Society for Optics and Photonics, 1990. – Vol 1166. – pp 52-60.
5. Zhang Y. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information / Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu // Journal of Electronic Imaging. – 2017. – Vol 33004. – №. 1.
6. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Sokol B.V. Temperature resolution of computerintegrated polarization thermal imager. Journal of Thermoelectricity, 2020, № 4, p. 22-37.
7. Kaplan Herbert. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment / Herbert Kaplan. – 3rd ed. – SPIE Press (Washington). – 2007. – 236 p.
8. Yang Bin. Polarization Remote Sensing Physical Mechanism, Key Methods and Application / Bin Yang, Taixia Wu, Wei Chen, Yanfei LI, Yuri Knjazihhin and other. – The Internation Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Wuhan, China. – 2017. – Vol XLII-2/W7. – pp 956–960.
9. Gurton K.P. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging / K.P. Gurton, A.J. Yuffa, Videen G.W. // Optical Society of America. – 2014. – Vol 39, No 13. – pp 3857–3859.
10. Gurton K.P. Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging / Kristan P. Gurton and Melvin Felton // OSA. – 2012. – Vol 20. – No 20. –pp 22344 – 22359.
11. Russell A. Chipman. Polarized Light and Optical Systems / A. Chipman Russell, Wai-Sze Tiffany Lam, Young Garam. – Taylor & Francis Group, LLC.– 2019. – 982p.

12. Kolobrodov, V. G. (2020) “Computer Modelling Technologies of Optical System of Polarizing Thermal Imager”, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, (83), pp 69–74. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.69-74.
13. Zunyi Sun, Weiqi Jin, Guoguo Kang, Li Li, Jianguo Yang. A temperature-controlled mid-wave infrared polarization radiation source with adjustable degree of linear polarization. *Measurement*, Volume 196, 15 June 2022, 111210. Doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111210.
14. J. Peterson, G. L. Jensen, J. A. Kristi, and J. A. Shaw, “Polarimetric imaging using continuously spinning polarizer element,” *Proc. SPIE*, 4133, 292-300, 2000.
15. Goldstein D.H. *Polarized Light*. Third edition / Dennis H. Goldstein. – 2011. – CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. – London New York. – 786 p.
16. Kemme Shanalyn A. *Micropolarizing Device for Long Wavelength Infrared Polarization Imaging / Shanalyn A. Kemme, Alvaro A. Cruz-Cabrera, Robert R. Boye, Tony Carter, Sally Samora, Chuck Alford, Joel R. Wendt, Gregory A. Vawter, Jody L. Smith // Sandia National Laboratories*. – Albuquerque, New Mexico (USA). – 2006. – 60 p.
17. Itsunari Yamada. *Infrared wire-grid polarizer with an ultrathin photoimprinted polymer film” / Itsunari Yamada, Tsuyoshi Akiyama // Optical Engineering 58(5), 057104 (2019), doi: 10.1117/1.OE.58.5.057104.*
- 18 Kolobrodov, V.G., Mykytenko, V.I., Tymchyk, G.S. Polarization model of thermal contrast observation objects. *Journal of Thermoelectricity*, 2020, 2020(1), pp. 36–49.
- 19 Born M. *Principles of optics*, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. 7th edition. – 2002 p.
- 20 Wire Grid (Reflective) Polarizers *Електронний ресурс* <https://www.edmundoptics.com/c/wire-grid-reflective-polarizers/1337/> Дата звернення 10.11.2022.
- 21 L. Globa, S. Dovgiy, O. Kopyika and O. Kozlov, “Approach to building uniform information platform for the national automated ecological information and analytical system,” In: *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, 3021, pp. 53–65.
- 22 Globa, L., Dovgiy, S., Kopyika, O. & Kozlov, O. Approach to Uniform Platform Development for the Ecology Digital Environment of Ukraine. *Book: Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems*. 83–100 DOI : 10.1007/978-3-031-16368-5

Надійшли до редакції:08.02.2022

V.G. Kolobrodov, *doc. techn. sciens, professor*
V.I. Mykytenko, *doc. techn. sciences, assist professor*
G.S. Tymchik, *doc. techn. sciens, professor*
M.S. Kolobrodov

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: deanpb@kpi.ua

INCREASING THE SENSITIVITY OF COMPUTER-INTEGRATED THERMAL IMAGERS IN THE STUDY OF THERMOELECTRIC PHENOMENA AND REMOTE OBSERVATIONS

The work is devoted to the substantiation of the choice of optical polarizing elements for thermal imaging remote observations and measurements. A comparative analysis of the main methods of obtaining polarization images was performed, namely using polarizer rotation, phase plate rotation, and using combined infrared matrix receivers with micro polarizers. Simplified mathematical models of signal transformation in the main optical elements of polarimetric thermal imagers – linear polarizers and phase (quarter-wave) plates - were used for the analysis. The advantage of wire polarizers compared to polarizers based on reflection is shown. It is also substantiated that among the various physical effects causing phase delays – birefringence, total internal reflection and reflection of radiation at the air-metal interface, diffraction on a wire diffraction grating – the use of the latter effect is most acceptable. Bibl. 22, Figs. 7.

Key words: polarimetric thermal imagers, Stokes vectors, polarizer, quarter-wave plate.

References

1. Anatyshuk L.I. (2020). Efficiency criterion of thermoelectric energy converters using waste heat. *J. Thermoelectricity*, 4, 59-63.
2. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Automation and computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 63-70.
3. Vollmer Michael and Mollman Klaus-Peter (2018). *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications*. Second Ed. Wiley – VCH, Weinheim, Germany.
4. Tooley R. D. (1990). Man-made target detection using infrared polarization. Polarization considerations for optical systems II. – *International Society for Optics and Photonics*, 1166, 52-60.
5. Zhang Y., Shi Z.G., Qiu T.W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *Journal of Electronic Imaging*, 1 33004, №. 1.
6. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Sokol B.V. (2020). Temperature resolution of

- computer-integrated polarization thermal imager. *J. Thermoelectricity*, 4, 22-37.
7. Kaplan Herbert (2007). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. 3rd ed. SPIE Press (Washington).
 8. Yang Bin, Wu Taixia, Chen Wei, Li Yanfei, Knjazhihin Yuri, et al. (2017). Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Wuhan, China, XLII-2/W7, pp. 956 - 960.
 9. Gurton K.P., Yuffa A.J., Videen G.W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optical Society of America*, 39 (13), 3857–3859.
 10. Gurton K.P., Felton M. (2012). Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging. *OSA*, 20 (20), 22344 – 22359.
 11. Russell A. Chipman, Lam Wai-Sze Tiffany, Garam Young (2019). *Polarized light and optical systems*. Taylor & Francis Group, LLC.
 12. Kolobrodov, V. G. (2020). Computer modeling technologies of optical system of polarizing thermal imager. *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, (83), pp 69–74. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.69-74.
 13. Sun Zunyi, Jin Weiqi, Kang Guoguo, Li Li, Yang Jianguo (2022). A temperature-controlled mid-wave infrared polarization radiation source with adjustable degree of linear polarization. *Measurement*, Volume 196, 111210. Doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111210.
 14. Peterson J., Jensen G. L., Kristi J. A., and Shaw J.A. (2000). Polarimetric imaging using continuously spinning polarizer element. *Proc. SPIE*, 4133, 292-300.
 15. Goldstein D.H. (2011). *Polarized Light*. Third edition. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. London New York.
 16. Kemme Shanalyn A. (2006). Micropolarizing device for long wavelength infrared polarization imaging. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico (USA).
 17. Yamada Itsunari, Akiyama Tsuoshi. (2019). Infrared wire-grid polarizer with an ultrathin photoimprinted polymer film. *Optical Engineering*, 58(5), 057104, doi: 10.1117/1.OE.58.5.057104.
 18. Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I., Tymchyk G.S. (2020). Polarization model of thermal contrast observation objects. *J. Thermoelectricity*, 1, 36–49.
 - 19 Born M., Wolf E. *Principles of optics. 7th ed.* Cambridge University Press.
 - 20 Wire grid (reflective) polarizers. Retrieved from <https://www.edmundoptics.com/c/wire-grid-reflective-polarizers/1337>.
 - 21 Globa L., Dovgiy S., Kopiika O. and Kozlov O. (2021). Approach to building uniform information platform for the national automated ecological information and analytical system, In: *CEUR Workshop Proceedings*, 3021, 53–65.
 - 22 Globa L., Dovgiy S., Kopiika O. and Kozlov O. Approach to uniform platform development for the ecology digital environment of Ukraine. *Book: Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems*. 83–100 DOI: 10.1007/978-3-031-16368-5

Submitted: 08.02.2022