

БАГАТОЕЛЕМЕНТНИЙ ТЕПЛОВІЗОР З ВИСОКОЮ ТЕМПЕРАТУРНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНОЮ ЧАСТОТОЮ КАДРІВ

Ф. Ф. Сизов¹, О. В. Бехтір¹, Є. О. Білевич¹, О. Г. Голенков¹,
Е. Ю. Гордієнко³, М. Т. Грінченко², Ж. В. Гуменюк-Сичевська¹,
С. Є. Духнін², В. В. Забудський¹, П. В. Завадський¹, І. І. Ільницький¹,
С. Л. Кравченко¹, В. М. Крайовий¹, В. П. Рева², С. В. Корінець²,
Л. О. Писаренко², Ю. В. Фоменко³, А. В. Шевчик¹, Г. В. Шустакова³

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

²Інститут мікроприладів НАН України, Київ

³Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

Надійшла до редакції 08.04.05

Резюме: Розглянуто основні характеристики та принципи побудови і функціонування малогабаритного тепловізора на основі багатоеlementного фотоприймального пристрою формату 2×64 з телевізійною частотою кадрів та високою температурною роздільною здатністю, який було створено за науково-технічним інноваційним проектом НАН України "Організація серійного виробництва портативного інфрачервоного тепловізора для медичної діагностики та контролю тепловтрат в промисловості та комунальній сфері".

Ключові слова: фотодіод, багатоеlementний фотоприймальний пристрій, схеми зчитування, тепловізор.

Ф. Ф. Сизов, Е. В. Бехтир, Е. О. Билевич, А. Г. Голенков, Э. Ю. Гордиенко, М. Т. Гринченко, Ж. В. Гуменюк-Сычевская, С. Е. Духнин, В. В. Забудский, П. В. Завадский, И. И. Ильницкий, С. Л. Кравченко, В. М. Краевой, В. П. Рева, С. В. Коринец, Л. А. Писаренко, Ю. В. Фоменко, А. В. Шевчик, Г. В. Шустакова. **МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ТЕПЛОВИЗОР С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ЧАСТОТОЙ КАДРОВ.**

Резюме: Рассмотрены основные характеристики и принципы построения и функционирования малогабаритного тепловизора на основе многоэлементного фотоприемного устройства формата 2×64 с телевизионной частотой кадров и высокой разрешающей способностью по температуре, созданного в рамках инновационного проекта НАН Украины "Организация серийного производства инфракрасного тепловизора для медицинской диагностики и контроля тепловпотерь в промышленности и коммунальной сфере".

Ключевые слова: фотодиод, многоэлементное фотоприемное устройство, схемы считывания, тепловизор.

F. F. Sizov, O. V. Bekhtir, E. O. Bilevych, A. G. Golenkov, E. Yu. Gordienko, M. T. Grinchenko, J. V. Gumenjuk-Sichevska, S. E. Dukhnin, V. V. Zabudsky, P. V. Zavadsky, I. I. Il'nitsky, S. L. Kravchenko, V. M. Krajovy, V. P. Reva, S. V. Korinets, L. O. Pisarenko, Yu. V. Fomenko, A. V. Shevchyk, G. V. Shustakova. **MULTIELEMENT THERMAL IMAGER WITH HIGH TEMPERATURE SENSITIVITY AND TV FRAME FREQUENCY.**

Abstract: Basic characteristics, design principles and functioning of compact thermal imager on the base of 2×64 focal plane array with television frame frequency and high thermal resolution, which was designed and manufactured according to innovation project of NASU "Infrared imager serial production organization for medical diagnostics and control of the heat loss in industry and municipal economy", are considered.

Keywords: photodiode, focal plane array, readout circuit, thermal imager.

ВСТУП

Пристрої технічного зору в областях електромагнітного спектру, де людське око нечутливе до випромінювання, сьогодні є одними із найважливіших у сенсі отримання додаткових джерел інформації про оточуюче середовище. Одним із напрямів, який найбільш стрімко розвивається у цій області є розробка принципів та побудова приладів технічного зору інфрачервоного діапазону спектра (див., напр., [1, 2, 3]).

Мета виконання інноваційного проекту полягала в тому, щоб використовуючи набутий досвід в Інституті фізики напівпровідників НАН України у вивченні властивостей вузькощільних напівпровідників та розробці технологій створення фотодіодних приймачів ІЧ-випромінювання на їх основі, досвід у розробці великих інтегральних схем зчитування інформації з багатоеlementних фотоприймачів ІЧ діапазону спектра (Інститут мікроприладів НАН України) та набутки у розробці конструкцій тепловізійних приладів попереднього покоління (Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України) створити конструкторсько-технологічну документацію та тепловізійний прилад для візуалізації власного інфрачервоного (ІЧ) випромінювання об'єктів без зовнішньої підсвітки у реальному масштабі часу, на основі яких у найближчий термін можна забезпечити в Україні розробку та виготовлення сучасної конкурентоспроможної в світі продук-

ції, необхідної для розв'язання проблем екології, військової техніки, пожежної безпеки, медицини, астрономії і навіть керування автомобільним транспортом [4, 5] тощо, і експорт якої, у відповідності з рішеннями міжнародних комісій, заборонений (або обмежений низькоефективними приладами) для передачі з високорозвинутих у технологічному та технічному плані країн-виробників цієї продукції. У медицині, наприклад, ІЧ-термографія зараз стрімко розвивається у зв'язку з демонстрацією в останній час, саме завдяки удосконаленню ІЧ-систем, великих можливостей цих технологій у ранній діагностиці раку молочної залози, ідентифікації атеросклеротичних бляшок, хвороби коронарних судин, безконтактного виявлення глибини опікових ран, післяопераційної діагностики швів тощо (див., напр., [6, 7, 8]).

Маючи великий науково-технічний потенціал, Україна на даний момент не має власного виробництва лінійчатих та матричних ІЧ фотоприймачів діапазону 3–5 та 8–12 мкм (найбільш ефективних для засобів технічного зору) з великими інтегральними схемами зчитування інформації, що мають граничні характеристики, і тепловізійних приладів на їх основі, що дозволило б створювати тепловізійні системи з високою роздільною просторовою та температурною здатністю для візуалізації власного випромінювання об'єктів без зовнішньої підсвітки в реальному масштабі часу (телевізійний стандарт).

1. СКЛАД ТЕПЛОВІЗОРА

Тепловізор – пристрій, призначений для реєстрації теплового випромінювання у вигляді термозображень (термограм), які можуть відтворюватися на стандартному моніторі або накопичуватися у цифровій формі. На рис. 1 представлено принципову схему поділу на функціональні модулі тепловізора, що розроблений Інститутом фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України у співробітництві з Інститутом мікроприладів НАН України та Фізико-технічним інститу-

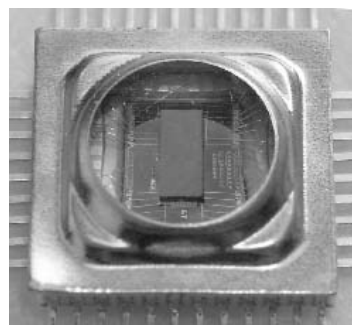


Рис. 2. Фотоприймальний модуль (лінійка фоточутливих елементів, яка згібризована зі схемою зчитування та розміщена у контактному пристрої)

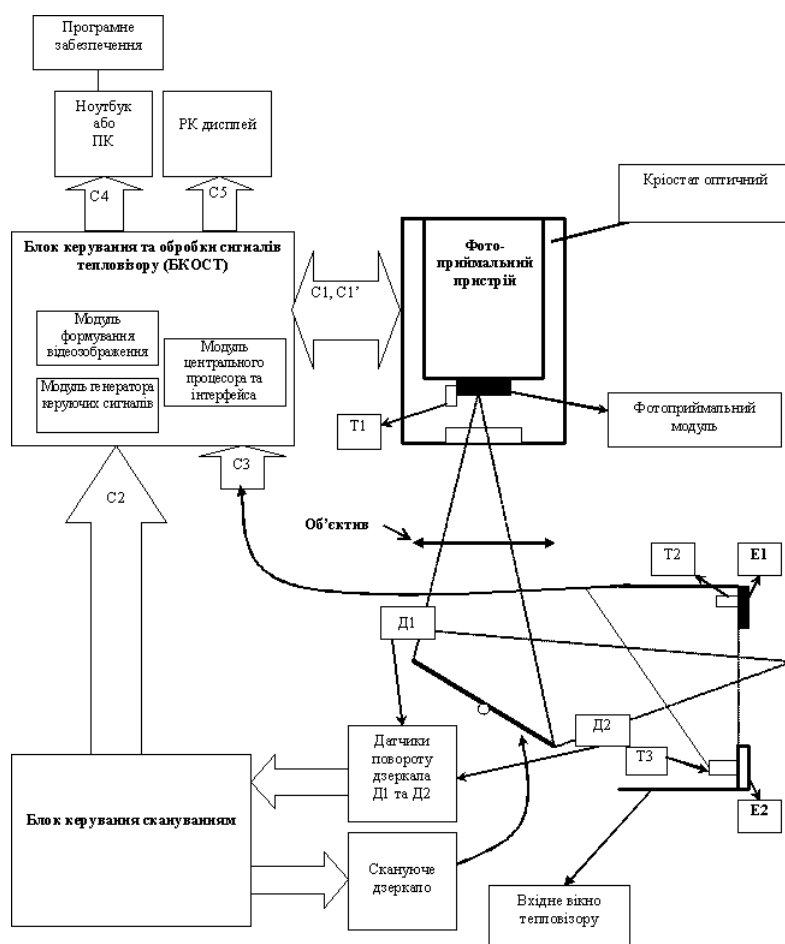


Рис. 1. Принципова схема функціональних модулів тепловізора. Е1, Е2 – температурні еталони для корекції неоднорідності чутливості фотодіодів, Т1, Т2 – датчики температури, Д1, Д2 – датчики початку та закінчення сканування, С1, С1', С2, С3, С4, С5 – сигнали взаємодії БКОСТ та основних компонентів

том низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

Фотоприймальний модуль розташований у вакуумній частині оптичного кріостата, разом складаючи фотоприймальний пристрій (ФПП). Фотоприймальний модуль представляє собою лінійку фоточутливих елементів форматом 2×64 , згібризованих з фокальним процесором (схемою зчитування) для керування режимами роботи та попередньої обробки сигналів, та змонтованих в спеціальний контактний пристрій (див. рис. 2). За рахунок розміщення схеми зчитування в холодній зоні значно зменшується кількість електричних підводів, а значить зменшуються теплопритоки. Крім того, за рахунок безпосередньої близькості між джерелом сигналу та схемами його обробки значно підвищується шумозахищеність фотоприймального пристрою в цілому.

Безпосередньо до контактної пристрою приклеюється охолоджувана діафрагма, що забезпечує формування необхідного кута зору та обмеження фонового випромінювання. Вхідне вікно фотоприймального пристрою виготовлено з оптичного германію з інтерференційним покриттям.

Сигнали з ФПП реєструються блоком керування та обробки сигналів тепловізора



Рис. 3. Зовнішній вигляд розробленого та виготовленого тепловізора

(БКОСТ), який призначений для управління схемою зчитування фотоприймального модулю тепловізора, реєстрації вихідних сигналів, їх обробки та формування відео- і цифрового сигналу. Відеосигнал формує зображення на вмонтованому в корпус тепловізора екрані або на зовнішньому аналоговому моніторі, що підключається через роз'єм ВИДЕО. Цифровий сигнал представляє собою послідовний, в форматі USB 2.0, потік даних, що несуть інформацію про амплітуди вихідних сигналів фотоприймального пристрою.

За допомогою програмного забезпечення можна зробити обробку тепловізійного зображення, в тому числі, виконати корекцію за допомогою просторових, частотних фільтрів та інших алгоритмів, а також застосувати до чорно-білої термограми псевдокольорову палітру.

Строкова розгортка здійснюється за допомогою блоку сканатора зі скануючим дзеркалом.

Температурні еталони E1, E2 забезпечують корекцію сигналів неоднорідних за чутливістю елементів лінійки приймачів випромінювання шляхом порівняння вихідних си-

Таблиця 1. Технічні характеристики тепловізора

Компоновка ФПП	Лінійчатий фотоприймач HgCdTe
Кількість фотодіодних елементів	128 (2×64)
Розмір пікселя	$\varnothing 30$ мкм
Метод охолодження	Рідкий азот, 78 К
Миттєве поле зору: горизонтальне вертикальне	1,5 мрад 1,5 мрад
Поле зору: горизонтальне вертикальне	0,24 рад 0,18 рад
Температурна роздільна здатність ФПП при температурі $T=30^\circ\text{C}$	≤ 80 мК
Відстань до об'єкту	0,5–100 м
Кадрова частота	25 Гц
Спектральний діапазон	2–12 мкм
Живлення	~ 220 В, $=12$ В
Розміри	350×125×180 мм
Вага	3,5 кг
Час роботи без дозаправки азотом	≥ 5 год.

гналів фотоприймального модуля при фокусуванні на холодному та теплому еталону випромінювання. Датчики температури T2 і T3 вимірюють температуру теплового та холодного еталонів E1 та E2, T1 – робочу температуру в криостаті. Датчики початку і закінчення сканування відповідають за синхронізацію кадрової розгортки.

Зовнішній вигляд тепловізора показаний на рис. 3. Основні характеристики приладу приведені в таблиці 1.

2. ФОТОДІОДНА ЛІНІЙКА

На сьогоднішній час основним матеріалом для виготовлення приймачів ІЧ-діапазону є твердий розчин CdHgTe [9]. Висока квантова ефективність приймачів на основі CdHgTe вигідно відрізняє їх від приймачів на основі надграток GaAs/AlGaAs, діодів Шотткі на основі PtSi та гетероструктур GeSi/Si. Це дає можливість використовувати короткі часи накопичення сигналів у схемі зчитування та одержувати зображення з частотою кадрів, значно більшою частоти телевізійного стандарту. При виконанні роботи для отримання

фоточутливих елементів використовувалися епітаксійні плівки CdHgTe, вирощені на монокристалічних підкладках CdZnTe. На епітаксійних плівках CdHgTe розміру 6,0×2,0 мм розміщено 128 фотодіодів (ФД), розташованих в два ряди по 64 елементи в кожному, що дозволяє формувати зображення без зазорів між фоточутливими елементами на відміну від матричних приймачів випромінювання. Форма фотодіодів – коло діаметром 30 мкм, відстань між діодами в ряду – 30 мкм, а між рядами – 60 мкм. Обрана форма діодів забезпечує рівномірність електричного поля по всьому периметру діода. Розташування діодів та відстань між ними узгоджені з розташуванням відповідних контактних площадок на пристрої зчитування, на який монтується кристал фотоприймача за допомогою мікроконтактів – індієвих стовпчиків з діаметром $d \approx 10$ мкм.

3. ПРИСТРІЙ ЗЧИТУВАННЯ

Схема зчитування (велика інтегральна схема), блок схема якої наведена на рис. 4, у складі ФПП повинна забезпечувати необхідні електричні режими роботи КРТ-фотоприймача, а саме:

- подачу регульованої електричної напруги зміщення на фотодіоди;
- зчитування інформації з фотодіодів;
- накопичення, запам'ятовування цієї інформації у вигляді зарядових пакетів, та її попередню обробку.

Малі амплітуди сигналів від КРТ-фотодіодів обумовлюють наявність високих вимог до зворотнього зміщення, що задає робочу точку фотодіодів, як щодо величини пульсацій, так і його рівномірності по 128 інформаційним каналах. Схема зчитування повинна мати малі власні шуми, щоб реалізувати роботу фотоприймального пристрою у режимі, обмеженому флуктуаціями фонового

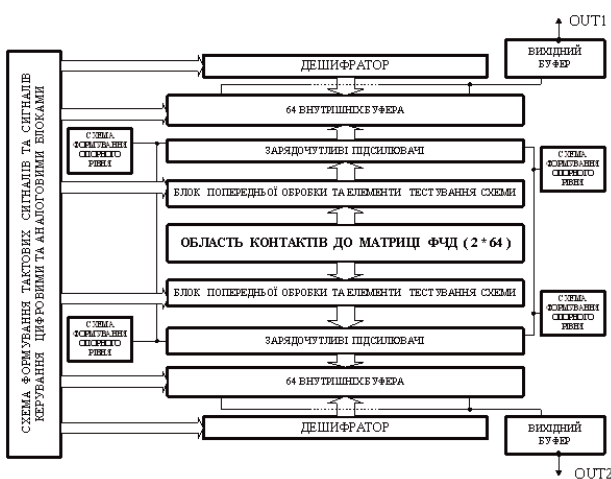


Рис. 4. Блок-схема великої інтегральної схеми зчитування

випромінювання, та високу зарядову ємність для забезпечення високого значення динамічного діапазону. Розроблені та виготовлені кремнієві великі інтегральні схеми (схеми зчитування) повністю відповідають поставленим вимогам [10].

Схему зчитування можна розділити на три частини: частину для фокальної площини, аналогову частину та схему керування. До частини фокальної площини відносяться область контактів до матриці фоточутливих детекторів (ФЧД) та блок попередньої обробки і елементи тестування схеми. До аналогової частини відносяться схеми формування опорного рівня, зарядочутливі підсилювачі, внутрішні буфери, вихідні буфери. До схеми керування відносяться ланцюги формування тактових сигналів керування цифровими та аналоговими блоками, дешифратор.

Центральну частину кристала займає область контактів до матриці фоточутливих діодів (ФЧД). В ній розміщені 128 контактних площадок для підключення ФЧД, а також контактні площадки для підключення спільного виводу матриці ФЧД. Зважаючи на те, що площадки для підключення спільного виводу матриці ФЧД, крім електричного з'єднання служать для механічного контакту кристалу матриці ФЧД з кристалом схеми зчитування, кількість їх рядів збільшена до 3-х з кожної сторони.

Блок попередньої обробки та елементи тестування схеми розміщені безпосередньо біля внутрішніх входних контактних площадок ФЧД. Вони забезпечують тестування мікросхеми і попередню обробку входного сигналу для кожного фоточутливого діода. Цей сигнал подається на схеми зарядочутливих підсилювачів, які формують і зберігають сигнал. Зчитування сигналів від фоточутливих діодів в потрібному порядку і керування роботою аналогових складових забезпечує схема керування, яка виробляє необхідні так-

Таблиця 2. Параметри схем зчитування

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ	
	Спроектовано	Результати вимірювань
Максимальна зарядова ємність, пКл	$\geq 3,0$	$\leq 3,4$
Максимальна частота зчитування, МГц	2,5	2,5
Максимальна амплітуда вихідного сигналу, В	$\geq 3,0$	$\leq 3,5 \pm 0,5$
Нелінійність вихідного сигналу, %	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$
Динамічний діапазон, дБ	≥ 68	≥ 68
Ємність навантаження, пФ	≤ 30	≤ 30
Навантажувальний опір, кОм	≥ 100	≥ 10
Споживана потужність, мВт	≤ 70	≤ 50

туючі напруги. Схема формування опорного рівня забезпечує напругу зміщення для всіх аналогових блоків пристрою зчитування.

Параметри виготовлених зразків схем зчитування наведені у таблиці 2. Вимірювання проводились при нормальних кліматичних умовах, температурі $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$ за спеціально розробленою методикою, що дозволяє на основі вимірювань при $T = 300\text{ K}$ прогнозувати параметри для робочої температури $T = 78\text{ K}$. Дослідження підтвердили, що при робочій температурі (78–80 K) параметри схем зчитування відповідають прогнозованим [11].

Елементами, які забезпечують з'єднання двох чипів, є індієві стовпчики. Для забезпечення якісного та надійного з'єднання розроблена спеціальна металева структура між шарами алюмінію та індію, яка включає в себе контактуючий та бар'єрний шари металів для отримання низького за рівнем опору контактного з'єднання.

Формування площадок цих металів виконувалось за допомогою контактної фотолітографії, у той час коли вся схема виготовлювалась за допомогою проекційної літографії. Це накладало спеціальні вимоги на виготовлення робочих фотошаблонів (6 шт.), які б давали можливість забезпечити мінімальне розсміщення між елементами інтегральної мікросхеми, виготовленої з використанням проекційної фотолітографії, та елементами контактної фотокопії.

4. ГІБРИДИЗАЦІЯ КРТ-ЛІНІЙКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ З КРЕМНІЄВОЮ СХЕМОЮ ЗЧИТУВАННЯ

Фотоприймальний модуль, що складається з КРТ-лінійки фотоприймачів (кадмій-ртутелур) та кремнієвої схеми зчитування, формується за допомогою гібридної технології, заснованої на прецизійному з'єднанні двох функціональних частин в діючий пристрій через взаємні контактні виводи, які є одночасно електричними і механічними. При розташуванні функціональних частин фотоприймального модуля (ФМ) в одній площині з'єднання відбувається за допомогою розпаювання, а при розташуванні частин лицьовими сторонами одна до одної – по так званій "фліп-чип" технології за допомогою індієвих стовпчиків (рис. 5).

При проведенні гібридного з'єднання за "фліп-чип" технологією кристали КРТ-лінійки фотоприймачів та кремнієвої схеми зчитування розташовуються плоскопаралельно, лицьовими сторонами один до одного, а індієві контактні виводи на обох схемах прецизійно суміщені один відносно іншого. При з'єднанні двох кристалів відбувається взаємно пластична деформація індієвих стовпчиків і їх контактна поверхня значно збільшується. Крім того відбувається взаємна дифузія матеріалу (холодне зварювання), що в цілому забезпечує якісний електричний контакт і механічну міцність з'єднань. Для відтворюваності та надійності гібридного з'єд-



Рис. 5. Сформовані за розробленою технологією індієві стовпчики ($\varnothing 11,5$ мкм)

нання індієві стовпчики повинні бути ідентичними за висотою і геометричними розмірами, повинні мати гарну адгезію до нижче розташованого на схемі шару. Індієві стовпчики формуються за допомогою стандартної мікроелектронної технології із використанням ряду фотолітографічних процесів та вакуумного формування металевих шарів. Висота формуємих за вищезгаданою технологією індієвих стовпчиків знаходиться в діапазоні 7–10 мкм.

5. ОПТИЧНИЙ КРІОСТАТ

Для охолодження багатоеlementного фотоприймача CdHgTe до температури рідкого азоту (≈ 78 K) був розроблений та виготовлений оптичний кріостат заливного типу. Заливні кріостати, незважаючи на розробку багатьох видів мікрокріогенних установок на різноманітних фізичних принципах, на сьогоднішній день являються основним засобом охолодження елементів мікроелектроніки. Вони прості в конструкції, надійні та зручні в експлуатації, споживають мінімум енергії і мають переваги у ціновому відношенні.

Теплова ефективність заливних кріостатів визначається параметрами дренажної горловини, пакета екрано-вакуумної теплоізоляції (ЕВТІ) (взаємним розміщенням екранів та теплообміном між ними), а також інтенсивністю променистого, кондуктивного та конвективного теплообміну у горловині та сосуді кріостату.

Труднощі розробки даного кріостату були обумовлені помітним тепловиділенням фотоприймального чіпу (а саме схеми зчитування).

Процес виготовлення кріостата полягав у наступному. З нержавіючої сталі 2Х13 виготовлялася внутрішня склянка, що представляє собою циліндр діаметром 50 мм. У торець одного з днів вварювалася трубка для заливання рідкого азоту. Зовні на вну-

трішню склянку припаювалася виконана з міді підставка спеціальної форми, на яку потім монтувався фотоприймальний модуль. У верхній і нижній торцевих частинах внутрішньої склянки розташовані порожнини з мідної сітки, заповнені сумішшю адсорбентів: палладійованим силікагелем, що попередньо обезводнювався в муфельній печі протягом 8 годин при температурі 100°C, та адсорбентом СКМ-4.

При термоударах у межах $T \sim 80\text{--}300\text{ K}$ і більше всі елементи відчують механічні напруження, тим більші, чим більша різниця між коефіцієнтами температурного розширення матеріалів, з яких вони виготовлені. Узгодження різниць коефіцієнтів температурного розширення здійснювались за допомогою використання спеціального контактного пристрою (рис. 2), наклеєного за допомогою теплопровідного клею на сапфірову підкладку, що в свою чергу через індієвий прошарок припаяна до мідної площадки кріостату.

Після розміщення фотоприймального модуля внутрішня склянка обгорталася кількома десятками шарів шарувато-вакуумної ізоляції. Вона складалася з перфорованого майлара ПЭТФ30 (спеціальна лавсанова плівка, покрита Al зі ступенем чорноти 0,03), що чергувався зі спеціальним синтетичним низькотемпературним папером товщиною 10 мкм (СНТ10). Загорнутий внутрішній стакан розміщався у зовнішній склянці з нержавіючої сталі. Усі вакуумні з'єднання здійснювались за допомогою зварювання. На зовнішній склянці напроти фотоприймального чіпу спеціальним клеєм, що забезпечував вакуумне з'єднання, приклеювалося вхідне германієве вікно з просвітлюючим покриттям, яке є прозорим в діапазоні від 2 мкм. Електричні виводи сигналів здійснювались через спеціальний вакуумний роз'єм. У нижній торець зовнішньої склянки впаювалася трубка $\varnothing 3\text{ мм}$, через яку потім здійсню-

валася відкачка вакуумної частини. Відкачка кріостата проводилася протягом кількох тижнів з використанням форвакуумного і паромасляного насосів до рівня вакууму $10^{-5}\text{--}10^{-6}\text{ мм рт. ст.}$ При необхідності для пошуку мікротріщин використовувався гелієвий тічешукач ПТШ-10. Експерименти показали, що обрана конструкція кріостату дозволяє при кількості хладагенту 200 мл та тепловиділенні на чіпі до 100 мВт працювати без додаткової заливки рідкого азоту понад 4 години.

Кріостат з чутливим елементом кріпився в спеціальний захисний екран на платформі, зовні якого був закріплений ІЧ об'єктив.

6. ОБ'ЄКТИВ

Інфрачервоний (ІЧ) об'єктив призначений для формування зображення об'єктів та фону у площині фотоприймача в заданому спектральному діапазоні (в даному випадку $\lambda = 2 \div 12\text{ мкм}$). На сьогоднішній день в якості ІЧ об'єктивів в основному використовують лінзові системи, які складають до 20 % вартості ІЧ термографічних приладів. Особливістю проектування ІЧ об'єктива є те, що за рахунок великого відносного отвору (оптична система має бути світлосильною, оскільки випромінювання в ІЧ області спектра досить слабке) наявні значні аберації, а при збільшенні кількості лінз зменшується коефіцієнт пропускання оптичного тракту в цілому. Дифракційна межа для оптичних систем ІЧ діапазону приводить до значних розмірів у фокальній площині спостережуваних точкових об'єктів. Так, діаметр кружка Ейрі (дифракційна межа) ІЧ об'єктива з відносним отвором

$\frac{D}{f'} = 1:1$ (де D – світовий діаметр вхідної лінзи, f' – фокусна відстань об'єктива) для довжини хвилі $\lambda = 10\text{ мкм}$ становить:

$$A = 2,44 \cdot \frac{\lambda f'}{D} \cong 25\text{ мкм}.$$

Вихідними даними (визначеними на основі загальних вимог до проектування тепловізійних систем даного класу згідно з умовами експлуатації) для розрахунку конструктивних параметрів даного ІЧ об'єктива були: $f' \cong 20$ мм – фокусна відстань; $D_{\text{св}} \cong 20$ мм – світловий діаметр вхідної апертури; $2\omega \cong 13^\circ$ – повне кутове поле зору в просторі предметів; розмір абераційної плями не більше 45 мкм (для уникнення перехресного засвітлення сусідніх фоточутливих елементів лінійки фотодіодів, які мають діаметр $\varnothing 30$ мкм і розташовані в два ряди у шаховому порядку, див. розд. 2).

Розрахунок ІЧ об'єктива в тонких компонентах проводився на мінімум сферичної аберації. Подальше коригування конструктивних параметрів оптичної системи здійснювалося з урахуванням загального правила виправлення аберацій [12]: при оптимізації розрахованого на мінімум сферичної аберації ІЧ об'єктива, спочатку потрібно випра-

вляти такі аберації, як кривизна поля та астигматизм, а потім спотворення подібні комі, які змінюються пропорційно до квадрата апертури, і, нарешті, зменшувати помилки сферичної аберації на осі шляхом встановлення фотоприймача в площині Гаусса.

Задовільну якість зображення при забезпеченні заданих вихідних вимог на проектування оптичної системи вдалося отримати використавши чотири лінзи із сферичними поверхнями (матеріал лінз – германій ГОСТ 16153-80, просвітлююче покриття – 29И₃₀₀ ОСТ 3-1901-85: сульфід цинку нанесений випаровуванням у вакуумі при температурі 300°C). Розрахункові розміри абераційної плями склали: на осі (в центрі поля зору) $d_0 \approx 38$ мкм, на краю поля зору $d_b \approx 43$ мкм. На рис. 6 подано результати хвильового аналізу розробленого ІЧ об'єктива. Розрахункові дані абераційного та хвильового аналізів дають можливість зробити висновок, що спроектований ІЧ об'єктив дозволяє отримати надійні результати щодо просторової роздільної здатності приладу (тобто забезпечує задовільну якість зображення, сформованого в площині фотоприймача). При цьому розроблена ІЧ оптична система задовольняє вимогам щодо кардинальних величин та енергетичного балансу оптичного тракту, згідно з умовами експлуатації.

7. ПРИСТРІЙ СКАНУВАННЯ

Для даної тепловізійної системи принципом сканування було обране коливання плоского дзеркала у напрямку, перпендикулярному лінійці фоточутливих елементів (для даного випадку – горизонтальне коливання дзеркала при вертикальному розміщенні лінійки фотоприймачів). При цьому за один горизонтальний прохід лінійки реалізується відразу n строк, n миттєвих полів зчитується у паралель, і смуга пропускання відеосигналу у цьому випадку складає:

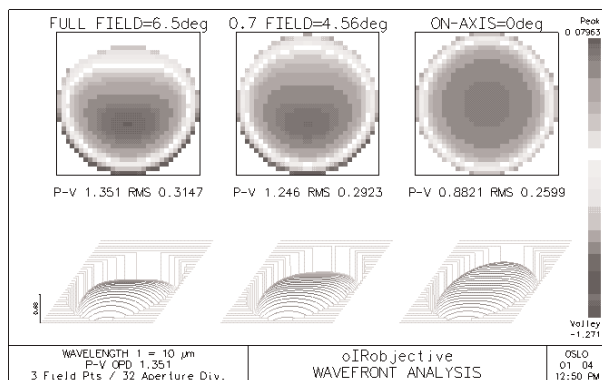


Рис. 6. Результати розрахунків розподілу енергії хвильових фронтів у фокальній площині в центрі та на краю поля зору ($\omega = \pm 6,5^\circ$) для чотирьохлінзового германієвого об'єктива, а також для променів з нахилом ($\pm 0,7 \omega$) в центрі поля зору для довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм (RMS – середньоквадратична похибка відхилення хвильового фронту від сфери, PV – оптична різниця ходу променів). У верхній частині рисунку подано розподіл енергії пучка променів у перерізі, внизу – вигляд хвильових фронтів у ізометрії

$$\Delta v = \frac{1}{2} \frac{N \cdot y \cdot z}{n \cdot dy \cdot dz} \quad \text{або} \quad \Delta v = \frac{N \cdot y \cdot z}{n \cdot dy \cdot dz},$$

де y, z – відповідно максимальні розміри по горизонталі та вертикалі поля, що сканується, dy, dz – відповідні розміри миттєвого поля зору, $y \cdot z / dy \cdot dz$ – кількість пікселів зображення у кадрі, N – кадрова частота, n – кількість строк (кількість елементів у лінійці приймачів) (іноді смугу частот пропускання відеосигналу вибирають вдвічі більше для покращення чутливості системи у перехідному режимі).

У розробленому сканері сканування здійснюється за допомогою коливання плоского дзеркала, яке закріплене на пружині спеціальної форми. Резонансні коливання досягаються шляхом подавання послідовності прямокутних імпульсів до котушок електромагнітної системи, що розміщена під пружиною. В схемі горизонтальної розгортки передбачено датчик положення дзеркала, що представляє собою розташовану під дзеркалом оптичну систему світлодіод-фотодіод з відкритим оптичним каналом. Дзеркало розгортки має спеціальний переривник світлового потоку, розміщений у оптичному каналі таким чином, що при коливаннях дзеркала на виході фотодіоду формується електричний сигнал, пропорційний куту повороту дзеркала. Живлення оптики здійснюється від прецедентного джерела опорної напруги з високою часовою та температурною стабільністю. Сигнал з датчика положення перетворюється у цифрову форму за допомогою 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача і далі обробляється за допомогою електронної схеми блока управління сканером на базі сигнального процесору ADSP-2181, функціональним призначенням якого є вироблення послідовності імпульсів живлення електромагнітів та збудження і підтримка резонансних коливань, регулювання та стабілізація кута відхилення дзеркала, формування сиг-

налів строчної синхронізації зображення. Сигнальний процесор визначає миттєве значення кута відхилення дзеркала, що здійснюється по синусоїдальному закону, та інтегральне значення амплітуди коливань за декілька періодів. На основі цих даних процесор по спеціальному алгоритму виконує зміну скважності імпульсів керування електромагнітами, тим самим здійснюючи стабілізацію розмаху коливань дзеркала на потрібному рівні. Така схема включення та наявність датчика положення дозволяють у широких межах контролювати та підтримувати стабільним необхідний кут відхилення дзеркала при зміні резонансної частоти внаслідок коливань навколишньої температури.

Для даної конструкції резонансна частота, яка визначалася геометрією та жорсткістю пружини, а також розмірами та масою дзеркала, складала $N = 50$ Гц, а зміна резонансної частоти у температурному інтервалі $(0...+40)^\circ\text{C}$ – приблизно $\pm 0,5$ Гц.

По сигналу датчика положення дзеркала виробляються імпульси синхронізації, що використовуються блоком керування та обробки сигналів для зазначення початку та кінця строки.

8. БЛОК КЕРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Блок керування та обробки сигналів складається з наступних модулів: модуль формування напруг ФПП; блок підсилення сигналів ФПП; блок аналого-цифрового перетворювача; модуль цифрової обробки; модуль формування телевізійного сигналу; USB модуль.

Модуль формування напруг виконує функції захисту ланцюгів живлення ФПП від перенавантаження, вимірювання та контролю температури в кріостаті, формування постійних та імпульсних напруг для забезпечення функціонування та управління схемою зчитування.

Блок підсилення сигналів ФПП складається з восьми однакових схем і виконує функцію узгодження рівнів вихідних напруг з вхідним діапазоном модуля АЦП.

В блок аналого-цифрового перетворювача входить вісім 16-ти розрядних АЦП AD7667A з послідовним виходом, сумісним з інтерфейсом SPI. Використання послідовного інтерфейсу дозволяє різко зменшити кількість провідників на печатній платі. Для зменшення взаємовпливу АЦП працюють в режимі "SLAVE". Запуск циклу перетворення відбувається синхронно з тактами роботи ФПП.

Схема модуля формування телевізійного сигналу складається з аналогової та цифрової частин. Цифрова частина модуля розташована в логічній матриці EP1C6Q240 і включає в себе схему зчитування двопортової пам'яті і схеми формування цифрового повного телевізійного сигналу (включно з рівнем чорного та синхроімпульсами). Аналогова частина модуля складається з цифро-аналогового перетворювача AD9762AR і вихідного підсилювача AD25.1.

Для зв'язку з комп'ютером використаний FT8U245AM USB FIFO модуль. Він підтри-

мує протокол USB 2.0 і забезпечує двосторонній зв'язок між модулем цифрової обробки та ПК.

Модуль цифрової обробки зібраний на логічній матриці EP1C6Q240 і виконує функції фазового вирівнювання сигналів ФПП згідно топології, корекцію вольт-ватних характеристик елементів ФПП, апроксимацію дефектних елементів, формування сигналів для відображення на монітор, формування сигналів управління процесів обробки та обміну інформацією з комп'ютером і пультом управління.

Застосування багатоеlementних ФПП в тепловізорах спрощує систему сканування та зменшує час формування кадру в порівнянні з одноelementними приладами або системами з невеликою кількістю чутливих елементів. В той же час багатоеlementні ФПП, як правило, мають недолік, який полягає в тому, що вольт-ватні чутливості кожного елемента різні. На рис. 7 показані типові вольт-ватні чутливості 128 елементів лінійки фотоприймачів. Для того, щоб досягти рівномірного зображення при освітленні різних фотоприймачів лінійки однаковим потоком випромінювання, враховуючи їх різні чутливості, треба домножити вихідні амплітуди сигналів на відповідні коригуючі коефіцієнти. Якщо не застосовувати корекцію вольт-ватних характеристик, то при спостереженні тепловізором з лінійкою фотоelementів рівномірно випромінюючої поверхні на екрані буде спостерігатись спотворене зображення, так зване "полосате поле". Для усунення цього недоліку застосовують різні методи корекцій вольт-ватних характеристик елементів ФПП.

Принцип використовуваної корекції полягає в тому що попередньо визначають коригуючі значення зміщень та коефіцієнтів для кожного елемента ФПП. Потім ці значення подають на суматор та перемножувач в момент приходу сигналів з відповідних елементів ФПП. Для вираховування коригуючих

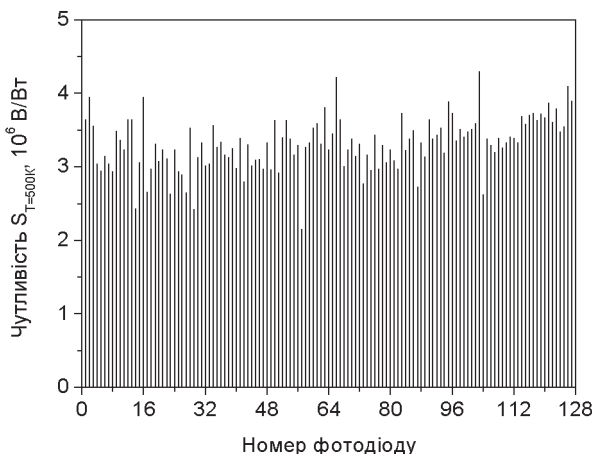


Рис. 7. Вольт-ватні чутливості лінійки фотоприймачів формату 2×64 . Середня чутливість дорівнює $3.3 \cdot 10^6 \pm 10\% \text{ В/Вт}$

коефіцієнтів в поле зору ФПП в різні моменти часу вводять випромінювачі (температурні еталони) з різною інтенсивністю.

Корекція виконується в два етапи. На першому етапі нескориговані дані першого випромінювача поступають на вхід схеми розрахунку зміщення. На другому етапі частково скориговані дані другого випромінювача поступають на вхід схеми розрахунку коефіцієнтів. Амплітуди вихідних сигналів від 128 фоточутливих елементів коригуються за наступною формулою:

$$A_i = (A_i^0 - E_i^1) \cdot K_i' ,$$

де E_i^1 – нескориговані значення амплітуд сигналів випромінювача з меншою інтенсивністю, A_i – скориговані значення амплітуд сигналів фотоприймачів, A_i^0 – нескориговані значення амплітуд сигналів фотоприймачів, K_i' – коригуючий коефіцієнт, що розраховується за допомогою еталонних випромінювачів за наступною формулою:

$$K_i' = \frac{\frac{1}{N} \sum (E_i^2 - E_i^1)}{E_i^2 - E_i^1} ,$$

де E_i^2 – нескориговані значення амплітуд сигналів випромінювача з більшою інтенсивністю, N – кількість фоточутливих елементів ($N = 128$).

Модуль розрахунку коригуючих коефіцієнтів та модуль корекції виконані на програмній логічній матриці (ПЛМ) EP1C6Q240I7 виробництва ALTERA. Зображення, отримані за допомогою розробленого тепловізора, приведені в наступному розділі.

9. ОТРИМАНІ ТЕПЛОВІЗІЙНІ ЗОБРАЖЕННЯ

На рисунках 8, 9, 10 приведені приклади різних тепловізійних зображень в градаціях сірого кольору, що отримані за допомогою створеного приладу. Темний колір відповідає

нижчій температурі досліджуваного об'єкту, а світлий – вищій. При виводі термограм на екран комп'ютера зазвичай чорно-білу палітру перетворюють на псевдокольори для полегшення їх візуального сприйняття опера-



Рис. 8. ІЧ-знімок людини з пістолетом у кишені



Рис. 9. ІЧ зображення краватки під вовняним светром



Рис. 10. ІЧ зображення відбитку руки на обличчі через 1 хвилину після того, як її відняли від обличчя

тором, а також програмними методами підвищують контрастність. На рис. 8 можна побачити чітке зображення пістолету, що прихований в кишені штанів. На рис. 9 зображена верхня частина тіла людини в піджаку, сорочці, вовняному светрі та краватці. За рахунок різної теплопередачі від тіла краватку видно навіть під светром, що говорить про високу температурну чутливість тепловізора. На рис. 10 приведено термограму обличчя людини з відбитком руки на щоці. Знімок було зроблено через 1 хвилину після того, як долоня була віднята від щоки. Приведені знімки дозволяють зробити висновок про досить високу якість термограм, отримуваних за допомогою тепловізора, навіть без додаткової корекції зображень програмними методами. Температурна роздільна здатність створеного приладу при температурі досліджуваного об'єкта 30°C є не гіршою 80 мК, а просторова роздільна здатність на мінімальній фокусній відстані 350 мм дорівнює 0,4 мм, що відповідає закладеному при розробці тепловізійного пристрою миттєвому куту зору 1,5 мрад.

10. ВИСНОВКИ

За останні 15–20 років тепловачення вийшло на якісно новий рівень, що обумовило зріст виробництва та широке впровадження тепловізійної техніки у військові системи та у багато інших галузей господарської діяльності (неопромінююча діагностика деяких онкологічних захворювань, післяопераційна діагностика процесів заживлення, діагностика пожежонебезпечних об'єктів, нафтопроводів і нафтородовищ та ін.). Без тепловізійних приладів неможливо уявити сучасні засоби спостереження та виявлення, що застосовуються у наземних та морських умовах, авіації та космосі, а також у багатьох видах високоточного озброєння, що в значній мірі визначають стратегію і тактику ведення бойових дій. Медичні термографічні прилади

використовуються у розвинених країнах світу та відрізняються від рентгенівських та ультразвукових приладів для виявлення онкологічних захворювань (наприклад, молочної залози – мамографів) тим, що не призводять до опромінення пацієнтів.

Передові держави виділяють на розробку та закупку тепловізійних засобів значні кошти. Так, у 2000 році тільки у державному бюджеті США на такий напрям, як тепловачення було виділено більше \$ 1 млрд, а в усіх країнах з річним бюджетом більше \$ 10 млрд (включаючи США, Японію, Англію, Францію, Німеччину, Індію та Китай) на ці потреби було використано біля \$ 2 млрд. Комерційний світовий ринок ІЧ продукції (перш за все тепловізійних приладів) в 2000 році перевищував \$ 500 млн і за прогнозом фірм **Flow Research** та **Ducker Worldwide** (США) повинен в 2005 році перевищити \$ 800 млн [13].

Маючи великий науково-технічний потенціал, Україна повинна мати власне виробництво як лінійчатих та матричних пасивних ІЧ фотоприймачів діапазону 8–12 мкм на основі напівпровідникових сполук CdHgTe з КМДН схемами зчитування, так і тепловізійних систем на їх основі.

В результаті проведеної роботи було розроблено технологічні, схемотехнічні, апаратні та програмні рішення для багатоелементного тепловізора, створено як окремі його частини, так і вперше в Україні прилад загального призначення в цілому. Розроблено комплект конструкторсько-технологічної документації для промислового дрібносерійного випуску тепловізора. Створений тепловізійний прилад, має високу (< 80 мК) температурну та просторову ($\leq 1,5$ мрад) роздільну здатність, телевізійну частоту кадрів і може знайти застосування у медицині, при моніторингу втрат у нафтопроводах, теплотрасах, контролю тепловтрат у будівельних та промислових спорудах, інших застосуваннях екологічного моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Gerald C. Holst.** Common sense approach to thermal imaging.–SPIE Optical Eng. Press, Bellingham, Washington USA, 2000.–377 p.
2. **Белозеров А. Ф., Омелаев А. И., Филиппов В. Л.** Современные направления применения ИК радиометров и тепловизоров в научных исследованиях и технике // Оптический журнал.–1998.–т. 65.–№ 6.–С. 16–27.
3. **Ушакова М. Б.** Зарубежные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений // Прикладная физика.–2004.–№ 4.–С. 70–78, Прикладная физика.–2004.–№ 5.–С. 64–73.
4. **Fazio G. G.** Infrared array detectors in astrophysics // Infrared Phys. Technol.–1994.–v. 35.–pp. 107–117.
5. **Norton P. R.** Infrared detectors in the next millennium // Proc. SPIE.–1999.–v. 3698.–pp. 652–665.
6. **Pompei F.** Noninvasive temporal artery thermometry: physics, physiology, and clinical accuracy // Proc. SPIE.–2004.–v. 5405.–pp. 61–67.
7. **Абакумов В. Г., Рыбин А. И., Сватош Й. и др.** Системы отображения в медицине.–К.: Юніверс, 2001.–333 с.
8. **Сизов Ф. Ф., Бехтір Р. В., Забудський В. В., Маслов В. П., Чешук В. Є., Кравченко Р. В., Ліпкевич О. В., Єфременко В. Г., Гордієнко Е. Ю., Шустакова Г. В.** Дослідження можливостей дистанційної медичної термографії // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" (Приладобудування).–№ 25.–С. 133–137.
9. **Rogalski A.** Infrared detectors.–Amsterdam, Gordon and Breach Science Publ., 2000.–681 p.
10. **Рева В. П., Сизов Ф. Ф.** Проблемы проектирования и изготовления схем считывания для многоэлементных ИК фотодиодов // Прикладная физика.–2002.–№ 1.–С. 82–100.
11. **Sizov F. F., Reva V. P., Derkach Yu. V., Kononenko Yu. G., Golenkov A. G., Darchuk S. D., Filenko D. A.** IR sensor readout devices with source input // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.–1999.–v. 2.–№ 1.– pp. 102–110.
12. **Джеймс Г. Бейкер.** Структура изображения и данные испытаний // Оценка качества оптического изображения. Юбилейный симпозиум к 50-летию Национального бюро стандартов США (18–20 октября, 1951) / Пер. с англ. О.А. Герасимовой.–М.: Изд-во геодезич. лит-ры, 1959.–С. 129–175.
13. **Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б.** Инфракрасные матрицы и тенденции их развития. Часть I // Прикладная физика.–2003.–№ 1.–С. 105–120, Часть II // Прикладная физика.–2003.–№ 2.–С. 54–69.