

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Факультет Електроніки
Кафедра мікроелектроніки

РЕФЕРАТ

з дисципліни: «Функціональна електроніка»

Піроелектричні перетворювачі зображення

Виконавець:

Студент 4-го курсу

(підпис)

Лищенко Б. В.

Перевірила:

(підпис)

доц. Обухова Т. Ю.

Зміст

1	Вступ	3
2	Піроелектричний електронно-оптичний перетворювач	5
3	Проблеми створення ПОЕП	9
4	Конструктивно-технологічні особливості ПЕОП	11

Розділ 1

Вступ

Пірометричні методи вимірювання температури охоплюють широкий діапазон температур – від 173 до 6000 К, що включає в себе низькі, середні і високі температури. Ці методи засновані на визначенні параметрів теплового випромінювання об'єкта без порушення його температурного поля. Теплове випромінювання являє собою електромагнітне випромінювання, порушуване тепловим рухом атомів і молекул у твердих, рідких і газоподібних речовинах. При температурах вище 4000 К випромінювання викликається процесами дисоціації й іонізації.

Частіше застосовуються пірометри порівняння, в яких густина випромінювання об'єкта вимірювань порівнюється з випромінюванням еталону в видимій частині спектру. Спектральний пірометр (пірометр порівняння).

Теорія пірометричних методів вимірювання температури заснована на законах, що встановлюють зв'язок між випромінюванням абсолютно чорного тіла (АЧТ) і його температурою. Абсолютно чорним тілом називається тіло, що поглинає все падаюче на нього випромінювання і відповідно здатне при даній температурі випромінювати максимальну енергію. Добрим наближенням до АЧТ є закрита з усіх боків порожнина з малим отвором, площа якого мала в порівнянні з загальною поверхнею порожнини.

Неохолоджувані теплові приймачі хоч і поступаються фотонним і квантовим за своїми граничними параметрами, мають цілу низку характеристик, які роблять їх незамінними в великій області застосувань. Це, зокрема, стосується завдань спостереження та розпізнавання об'єктів на невеликих відстанях (до 2500 м), ІЧ-мікроскопії, медичної та промислової діагностики тощо. Головне перевага тепловізійних систем на багатoelementних теплових приймачах (UFPA) перед

системами з фотонними та квантовими приладами в тому, що для їхньої роботи не потрібно охолодження до кріогенних температур. У НДІ "Платан" вперше у світовій практиці отримано ІЧ-зображення в діапазоні довжин хвиль 8-14 мкм на катодолюмінесцентному екрані ЕОП з піроелектричною мішенню та розроблений прилад нового класу – піроелектричний ЕОП.

Розділ 2

Піроелектричний електронно-оптичний перетворювач

В основі роботи теплових детекторів лежить залежність властивостей матеріалу від зміни температури приймача під дією падаючого випромінювання Основними матеріалами для приймачів UFPA, володіють найкращими комплексними характеристиками, на сьогоднішній день є піроелектричні матеріали, в яких зміна температури визначається зміною поляризації або діелектричної проникності детекторного конденсаторного елемента (сегнетоелектричні цирконати свинцю, ніобати та титанати барію-стронцію, сополімери вініліденфториду (PVDF), циклічні органічні піроелектрики на основі амінодифенілу), а також матеріали для мікроболометрів з великим значенням температурного коефіцієнта опору (ТКС), такі як аморфний кремній (α -Si) та різні модифікації оксидів ванадію (VO_x).

Зіставлення технічних характеристик теплових детекторів (табл.1) [1] та мікроболометрів (табл.2) показує, що гібридні піроелектричні приймачі на основі сегнетоелектричної кераміки та органічного піроелектрика становлять реальну конкуренцію болометрам на VO_x та Si [2, 3]. Крім того, при близьких параметрах систем візуалізації вартість піроелектричних матриць значно нижча за болометри (співвідношення приблизно 4000:20 000 дол.). Порівняльний аналіз розробок ІЧ-систем на мікроболометрах і піроелектричних матрицях показує, що пристрої на основі піроелектричних матриць мають кращі характеристики. Причини цього полягають у наступному.

Таблиця 1. Типові характеристики теплових детекторів

Размер пикселя, мкм ²	Материал датчика	Физический эффект	Чувствительность, В/Вт	Обнаружит. способность, смГц ^{1/2} /Вт
250x250	n+polySi/Al	Термоэлектрический	11	$1,56 \cdot 10^7$
600x600	n+polySi/Al	Термоэлектрический	40—>100	$0,7 \cdot 10^8$ — $>1 \cdot 10^8$
50x50	nSi	Болометрический	4000	$1,2 \cdot 10^9$
120x120	Металлическая пленка	Болометрический	30	$1 \cdot 10^8$
75x75	PVDF	Пироэлектрический	6600	$1,6 \cdot 10^7$
80x80	PST(танталат-свинца-скандия)	Пироэлектрический	2520—>4490	$3,06 \cdot 10^7$ — $>1,58 \cdot 10^8$
1000x1000	Органический пироэлектрик ОП 558Б (МГ 32)	Пироэлектрический	120	$2 \cdot 10^8$

- Піроелектричні приймачі - істинно пасивні пристрої. Відповідно до природи піроелектричного ефекту для реєстрації сигналу від приймача до нього не потрібно прикладати електричну напругу. В результаті відсутня складова шуму сигналу $1/f$, органічно властива мікроболометрів. Таким чином, теоретична межа NETD піроелектричних приймачів у кілька разів нижче, ніж у мікроболометрів.
- Технічний рівень матричних піроприймачів заснований також на унікальній особливості піроприймачів – великий постійний час їх чутливих елементів (ЧЕ) (до 1–10 с).
- Сигнал у піроелектричних приймачах має диференціальний характер. Оскільки піроприймачі реагують лише на зміну температури, вимоги до однорідності щодо чутливості окремих елементів матриці приймача знижуються у десятки разів. Завдяки цьому зменшується так званий фіксований просторовий або геометричний шум. Відповідно, при однакових значеннях NETD, що характеризують тільки чутливість пікселів матриці, у системи на основі піроелектриків спостерігається найкраще в порівнянні з мікроболометричними системами мінімальний дозвіл по різниці температур реальних об'єктах (табл.3).
- З тієї ж причини піроелектричні приймачі не чутливі до фоновому випромінювання, яке для кімнатних температур у робочому ІЧ-діапазоні дуже велике. На відміну від мікроболометрів на VOx і Si, для піроелектриків не

потрібно спеціальної обробки вихідного сигналу для віднімання фону та додаткового калібрування приймача для зміщення його робочої точки з метою підтримки прийняттого динамічного діапазону.

- Існують дані, що показують, що матеріали, що відносяться до класу піроелектриків, зберігають свої піроелектричні властивості при впливах електромагнітних та радіаційних випромінювань. Ця обставина може відіграти вирішальну роль під час створення приладів для спецзастосування.
- Нарешті, через те, що піроелектричний ефект залежить від поляризованості матеріалу, піроприймачі UFPA перспективні для створення нового покоління інтелектуальних сенсорів. Вони можуть стати основою приймачів з перебудовуваною чутливістю, що виконують автоматичну корекцію неоднорідності чутливості, адаптацію до умов застосування та аналогову обробку сигналів.

Теоретична межа порогової чутливості ІЧ-приймального пристрою визначається дробовим шумом потоку фонових фотонів, що падають на фоточутливий елемент у межах його апертурного кута [4], і визначається співвідношенням:

$$NETD_r = \frac{NETD_r \cdot (\lambda)}{b \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sqrt{t_i}}, \quad (2.1)$$

де $NETD_r \cdot (\lambda)$ (l) – питома величина, яка залежить від спектрального діапазону чутливості матриці (для $l = 10-12$ мкм)

$$NETD_r \cdot (\lambda) \approx 10^{-7} \text{ К} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-1/2},$$

b - крок матриці,

β – кут поля зору матриці,

t_i – час накопичення елементі матриці за кадр.

Користуючись цим співвідношенням, можна порахувати, що за $b=15$ мкм, $\beta=27^\circ$ (що відповідає об'єктиву F/1) і $t_i = 1/30$ з теоретичною межею еквівалентною шуму різниці температур для мікроболометрів становить 0,37 мк. Врахування вищерозглянутих особливостей піроприймачів (відсутність дробового шуму, зменшення геометричного шуму, велика постійна часу накопичення та ін) дозволяє оцінити їх теоретичну межу NETD, як мінімум, на порядок краще, ніж

Таблиця 3. Реальні характеристики приймачів UFPA у порівнянні з реальними характеристиками сегнетоелектричних та мікроболометричних детекторів [5]

Характеристики	BST	VO _x
NETD, К	0,08–0,09	0,05–0,07
MRTD, К(расчет)	0,08–0,10	0,12–0,15
MRTD, К (эксперимент)	0,03–0,55	0,07–0,09

у мікроболометрів (тобто 0,04 мК). Вклад власних шумів діелектричних втрат, властивих піроелектричним матеріалам, погіршує це значення в 2–3 (тобто. до значення 0,1 мК) [5].

Таблиця 2. Неохолоджувані мікроболометричні матриці для спектрального діапазону 8-12 мкм

Фирма, страна	Материал матрицы	Формат	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations, США	VO _x	320×240	50	NETD (F/1; 10 мс; 30 Гц) = 20–35 мК	Производится более 1000 матриц в год (марки SB-151, SB-211)
	VO _x	640×480 и 640×512	25	NETD (F/1; 30 Гц)=20 мК; Nor=98 %; P=400 мВт	Разработка (SB-246)
	VO _x	1024×1024	15	NETD=50 мК	Разработка
Raytheon Commercial Infrared, США	a-Si	160×120 (7–14)	46,8	NETD (F/1; <21 мс; 20–60 Гц)=63 мК; Δ<10 %	С электронной термостабилизацией
	BST (титанат бария-стронция)	320×240	50	NETD (F/1; 30 Гц)=80 мК; f=6 МГц; F=30 Гц (тип.) до 90 Гц	С термоэлектрической стабилизацией температуры. Цифровое разрешение 14 бит
BAE Systems Information & Electronic Warfare Systems, США	VO _x	320×240 (7,5–14)	46,25	NETD (F/0,8; 60 Гц)<30–75 мК	Серия SIM300, модуль SIM300H (99 г.). Потребление 2,1 Вт. Производится несколько тысяч матриц в год
	VO _x	640×480 и 640×512	25	NETD (F/1; 30 Гц)=55 мК; Nor=99 %	Разработка
	VO _x	1024×1024	15	NETD=50 мК	
DRS Technologies, США	VO _x	320×240 (8–14)	51	NETD (F/1; 25 мс; 60 Гц)=23–100 мК; D>60 дБ; Na=1; f=5 МГц; Δ<10 %; Nor=98%	Матрица U3000. С термоэлектрической и электронной стабилизацией. Производство ведется
	VO _x	640×480/512	25	NETD=50 мК	Разработка
	VO _x	1024×1024	15	NETD=50 мК	
INO, Канада	V _{ox} YBaCuO	160×120	—	NETD<50 мК	Изготовление тепловизионных модулей для тепловизора
Sofradir, Франция	a-Si	320×240	45	NETD (F/1; 4 мс; 25 Гц)<80 мК; f=5,5–10 МГц; Δ<10 %; Nor>99 %	Потребление 8,5 Вт. С электронной стабилизацией. Произведены сотни матриц
		320×240	35	NETD (F/1; 12 мс; 50 Гц)=35 мК	Начато производство
Mitsubishi Electric, Япония	YBa-CuO	320×240	40	NETD (F/1)=80 мК	Первые образцы
BAE Systems Infrared Ltd, Великобритания	PST	256×128	56	NETD (F/1; 50 Гц)=110 мК; Nor=99,9%; P< 150 мВт	Модуль Wizard с матрицей Merlin. АЦП 8 бит. Производство более 1000 матриц в год.
		384×288	40	NETD (F/1; 50 Гц)=60–140 мК (в будущем 20–30 мК)	Экспериментальные образцы матриц VLA для модульного тепловизора VLADIMIR (STAIRS B)
NEC, Япония	Пирозлектрик	320×240	37	NETD=34–67 мК	—

Розділ 3

Проблеми створення ПОЕП

Широкому освоєнню випуску UFPA на основі піроелектриків перешкоджає комплекс проблем, що виникають під час створення матричних інтегральних теплових приймачів випромінювання. Це технологічність конструкції та сумісність технології отримання теплочутливих детекторних матриць з базовими технологіями мікроелектроніки. Вирішення цих проблем йде декількома шляхами. Створення піроелектричних болометрів передбачає відпрацювання технологічних процесів виготовлення багатoelementних піроприймачів UFPA на основі сегнетоелектричної кераміки або матеріалів з низькими температурами формування піроелектричних плівок та подальшої кристалізації піроелектриків у монолітній конструкції з мультиплексор. Цікаві роботи в цьому напрямку проводять такі фірми як Raytheon Commercial Infrared, BAE Systems (Avionics Group), NEC. У Росії аналогічні розробки невідомі. Іншим напрямом створення ІЧ-приймачів на піроелектриках, в якому в Росії досягнуто помітних успіхів, є розробка піровідиконів (піриконів), що являють собою відікон

із суцільною або дрібноструктурною (мозаїчною) мішенню з піроелектрика (табл.4). Основна особливість піровідикону – відсутність мультиплексора, роль якого виконує електронний пучок, що зчитує. Піровідикони відносяться до електровакуумних фоточутливих приладів ІЧ-діапазону (ІЧ ЕВФП).

Іншим прикладом конструкції багатoelementного ІЧ-приймача служить піроелектричний електронно-оптичний перетворювач (ПЕОП) [6]. Цей прилад може бути віднесений до нового класу приладів перетворення випромінювання діапазону 8-14 мкм для випромінювання видимого діапазону. Дія ПЕОП заснована на нетрадиційному для цього виду фоточутливих приладів у фізичному принципі пе-

Таблица 4. Порівняльні параметри піровидіконів

Параметр	Р 8093 ЕЕВ, Великобритания	ЛИ-492 ЦНИИ "Электрон", Россия	ЛИ -513 ЦНИИ "Электрон", Россия	ЛИ -514 ЦНИИ "Электрон", Россия	Пировидикон НИИ "Платан", Россия
Способ отклонения и фокусировки электронного луча	Электромагнитный и магнитный	Электромагнитный и магнитный	Электромагнитный и магнитный	Электромагнитный и магнитный	Электростатический и магнитный
Входное окно	Германий	Германий	Германий	Германий	Германий
Спектральный рабочий диапазон, мкм	8–14	8–14	8–14	8–14	8–12,5
Материал мишени	Монокристалл ДТГС	ДТГС	ДТГС	ДТГС	Органический пирозлектрик ОП 558Б
Тип мишени	Сплошная	Сплошная	Мозаичная, шаг 25 мкм	Мозаичная, шаг 25 мкм	Сплошная
Размер раstra, мм	18x24	18x24	18x24	18x24	18x24
Стандарт разложения	625 строк, кадр 40 мс	625 строк, кадр 40 мс	625 строк, кадр 40 мс	625 строк, кадр 40 мс	625 строк, кадр 40 мс
Механизм образования тока сигнала	Считывание пирозаряда	Считывание пирозаряда	Считывание пиронапряжения	Считывание пиронапряжения	Считывание пирозаряда
Чувствительность в режиме панорамирования, мкА/Вт	4	4	35	50	4
Чувствительность в режиме обтюрации, мкА/Вт	2,5	2,5	20	25	2,5
Эквивалентная шуму разность температур с объективом D/F=1/1, К	0,5	0,5	0,1	0,08	0,5
Разрешение, телевиз. линий (ТВЛ)/растр	270	300	350	350	300
Глубина модуляции на отметке 200 ТВЛ/растр, %	20	30	50	50	30
Виброустойчивость (ускорение, м/с ²)	10	10	50	60	100

ретворення ІЧ-зображення у видиме – шляхом його попіксельної дискретизації та модуляції однорідного потоку електронів матричним піроелектричним тепловим приймачем випромінювання.

Вплив ІЧ-випромінювання на чутливий елемент індукуює в ньому електричний заряд, пропорційний потоку падаючого випромінювання. Електричне поле наведеного заряду модулює потік електронів, що проходять через отвори у ЧЕ. Для забезпечення функціонування ПЕОП у ньому перед матрицею ЧЕ має бути у будь-який спосіб створено моноенергетичний потік електронів. В іншому ПЕОП не відрізняється від традиційних ЕОП. Таким чином, ПЕОП є об'єднанням в одному приладі піроприймача та електронно-оптичного перетворювача, в якому ІЧ-зображення перетворюється на видиме, що відображається на катодолюмінесцентному екрані ЕОП.

Розділ 4

Конструктивно-технологічні особливості ПЕОП

При опроміненні фотокатода відповідним джерелом підсвічування створюється однорідний просторовий потік фотоелектронів. Цей потік, проходячи через отвори піроелектричної мішені, модулюється відповідно до розподілу потенціалу на поверхні піроелектричного шару, що виникає при проектуванні на ціль реєстрованого теплового випромінювання. Далі модульований потік електронів, як у звичайному ЕОП, потрапляє на пристрій реєстрації електронного зображення (катодолюмінесцентний екран), на якому візуально спостерігається розподіл теплового випромінювання, що реєструється (теплове поле об'єкта). Для зручності спостерігача ПЕОП може додатково комплектуватися оптичним пристроєм перенесення та підсилювальним ЕОП. На рис.4.1 наведено конструкцію зібраних макетних зразків.

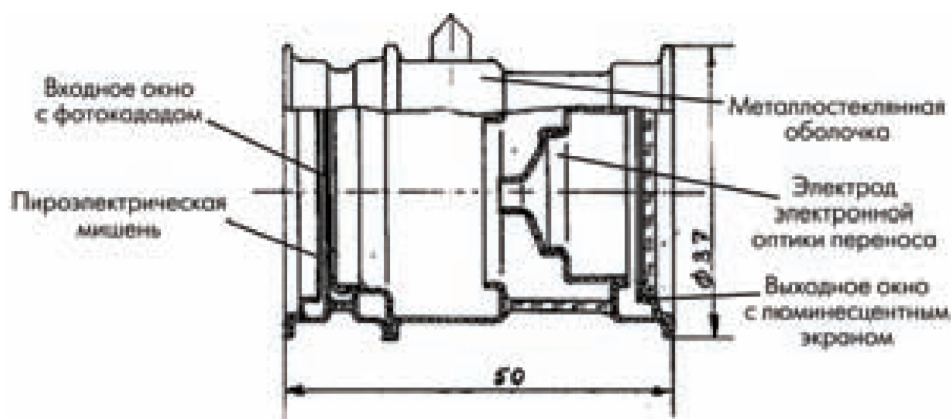


Рис. 4.1: Конструкція виготовлених зразків ПЕОП

Основними елементами ПЕОП, що підлягають конструкторській та технологічній розробці, є функціональні вузли: піроелектрична ціль, катод і вхідне вікно. Катодолюмінесцентний екран, оптика перенесення електронного зображення та підсилювач на мікроканалній пластині повністю використовувалися з існуючих ЕОП. Основним функціональним вузлом ПЕОП, що фактично перетворює ЕОП звичайного діапазону в ЕОП діапазону 8-14 мкм, є піроелектрична ціль.

Основне завдання мішені – перетворення двовимірної теплової зображення (8–14 мкм), спроектованого об'єктивом на поверхню мішені, на електричний двовимірний потенційний рельєф. Мета є і керуючим (модуючим) електродом для рівномірного електронного потоку, що проходить крізь неї. При розробці конструкції такої мішені має бути забезпечене одночасне вирішення двох завдань: ефективне поглинання тепла та забезпечення максимальної глибини модуляції електронного потоку, проходить крізь ціль.

Поставлене завдання вирішувалося в такий спосіб. Піроелектрична мета виконується з наскрізними отворами (1) для проходження електронного потоку. Піроелектричний шар мішені (2) розділений наскрізними отворами на окремі дискретні елементи. Ефективне поглинання тепла забезпечується металевими шарами поглинання (3, 5), нанесеними на несучу діелектричну плівку (4). Металевий електрод (3) одночасно виконує функцію електрода, що управляє. Поглинене тепло перетворюється за допомогою піроелектричного шару на електричний потенційний рельєф на поверхні мішені, що повторює картину розподілу тепла за перерізом теплового потоку. Ефективність теплового перетворення залежить від вибору матеріалу піроелектрика. Глибина модуляції, що проходить крізь Мета електронного потоку визначається значенням електричного потенційного рельєфу та геометрією сітчастого електрода.

Один із основних елементів ПЕОП – джерело електронного потоку, який повинен створювати просторово-однорідний потік електронів, що використовується для перетворення просторового розподілу потенціалів на піроелектричній мішені у видиме зображення на катодолюмінесцентному екран. Джерело електронів може виконуватися не обов'язково за допомогою фотокатода, а може бути будь-якого типу. Важлива вимога до джерела електронів – спосіб збудження електронного потоку та склад активної речовини джерела не повинні впливати на працездатність піроелектричної цілі, в тому числі і в процесі експлуатації ПЕОП. Всім цим вимогам задовольняють кілька типів джерел електронів: фотокатод як еле-

мент, традиційний для ЕОП, та автоемісійний катод як елемент, який може бути використаний в перспективі. Зважаючи на те, що як матеріал фотокатода був обраний паладій, що працює в короткохвильовій частині УФ спектру, як вхідне вікно для макетних зразків приладу використовувалися кристали фтористого магнію, прозорого в УФчастині спектру.

Список використаної літератури

1. Batra, A. Energy harvesting via pyroelectric transducer/ A.Batra, S. Bhattacharjee, A. Chilvery, J. Stephens // Sensors & Transducers – 2012 – Vol.138, №5 – P. 114–121.
2. Siao, An-Shen. A Strip Cell in Pyroelectric Devices /An-Shen Siao, Ching-Kong Chao, and Chun-Ching Hsiao//Sensors – 2016 – Vol. 16, №3 – P.375-388.
3. Siao, An-Shen. Study on Pyroelectric Harvesters with Various Geometry/An-Shen Siao, Ching-Kong Chao, and Chun-Ching Hsiao // Sensors – 2015 – Vol. 15, №8 – P.19633-19648.
4. Batra, A.K. Pyroelectric Materials: Infrared Detectors, Particle Accelerators and Energy Harvester/ A.K. Batra and M. D. Aggarwal – M.: SPIE Press, 2013 – 179 с.
5. Thakre, A. Pyroelectric Energy Conversion and Its Applications — Flexible Energy Harvesters and Sensors/A. Thakre, A. Kumar, Hyun-Cheol Song, Dae-Yong Jeong, Jungho Ryu//Sensors – 2019 – Vol.19, №9 – P.1-25.
6. Cuadras, A. Thermal energy harvesting through pyroelectricity/ A. Cuadras, M. Gasulla, V. Ferrari // Sensors and Actuators A: Physical - 2010 - Vol.158, №1 - P.132– 139.
7. Dalola, S. Pyroelectric effect in PZT thick films for thermal energy harvesting for lowpower sensors/ S. Dalola, V. Ferrari, D. Marioli, // Procedia Engineering. – 2010 – Vol. 5, №24, – P. 585–688.
8. Lang, S. B. Optimization and experimental verification of pyroelectric bimorph radiation detector,/ S. B. Lang, M. Alexe // IEEE Applied Ferroelectrics – 1998 – Vol.11, Aug. 24 – P.195-198.
9. Lang, S. B. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and

pyroelectric polymers / S. B. Lang, S. Muensit // Applied Physics – 2016 -Vol. 85, №2 – P.125–134.