

Проведено аналіз сучасного стану матричних фотоперетворювачів, подано приклади в застосуванні матричних елементів у світлотехнічних вимірюваннях.

УДК 621.383.7

Я.М. Осадца, асп.
Р.Й. Ріпецький, канд. техн. наук
Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МАТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СВІТЛА З ЦИФРОВИМ ПРЕДСТАВЛЕННЯМ СИГНАЛУ

Вступ. Оптико-електронні перетворювачі (ОЕП) зображень можна умовно розділити на три групи: дискретні, лінійні та матричні. Дискретними є пристрої, які працюють від єдиного джерела випромінювання і здатні виконувати функції або спостереження за цим джерелом, коли вихідний сигнал містить інформацію про відхилення цього джерела відносно певного положення або координування джерела, коли у вихідному сигналі також закладена інформація про величину зміщення. Пристроями даного класу не проводиться сканування оптичного поля, де знаходиться об'єкт.

Лінійні фотоперетворювачі, на відміну від дискретних здатні проводити сканування оптичного поля, де знаходиться об'єкт, проте лише відносно однієї координати. Тому їх ще також називають однокоординатними.

Для отримання двовимірного зображення лінійним ОЕП потрібно вздовж другої осі, перпендикулярної напрямкові перенесення створювати механічне переміщення (сканування): зсовувати зображення перпендикулярно реєстру або реєстр рухати відносно зображення. Швидкість руху електронного променя повинна бути синхронною зі швидкістю виведення зарядних пакетів з реєстра, а швидкість зміни кадрів – із швидкістю механічного руху [1]. Також лінійні фотоперетворювачі можуть використовуватись з метою отримання копій для предметів, які не дуже швидко рухаються. Це зумовлено тим, що механічне сканування дає розширення 10 – 50 ліній при не дуже швидкій розгортці [2]. Основна перевага лінійних ОЕП – простота, недолік – розмазування зображення при зчитуванні, внаслідок додавання до рядка носіїв при зчитуванні наступного рядка.

Двовимірне зображення можна отримати без механічного сканування. Для цього потрібно використати набір з лінійних ОЕП, створивши тим самим двокоординатний фотоперетворювач – двовимірну матрицю фоточутливих елементів.

Оскільки сучасні матричні перетворювачі світла мають досить різні розміри пікселя (від 2,2 до 9,2 мікрон), що дає змогу отримати розширення ОЕП від 1,31 до 16,6 мегапікселів [5], точність технології виготовлення знаходиться на рівні десятих мікрон, напруга живлення 3,3 – 5 В, коефіцієнт чутливості в перспективі наближується до 100 % дає можливість ефективно використовувати матричні фотоперетворювачі в цифровій фото та відеотехніці, телескопах наземного та бортового базування, в медицині [1, 3] та в фотометрії [3, 10, 11]. Саме тому, **актуальним** є широке впровадження матричних фотоперетворювачів в вимірювальну техніку. **Метою** даної роботи є створення приладів на базі оптоелектронних перетворювачів для дослідження світлового поля з використанням сучасних комп'ютерних технологій.

Аналіз сучасного стану матричних фотоперетворювачів. В залежності від типу фоточутливих елементів матричні фотоперетворювачі можна розділити на матриці з пристроями із зарядним зв'язком (ПЗЗ-матриці), матричні пристрої на основі комплементарної структури метал-оксид-напівпровідник (КМОН-матриці).

ПЗЗ-матриці. Основною ідеєю ПЗЗ є накопичення зарядів в конденсаторах типу метал-оксид-напівпровідник (МОН-конденсаторах) і передача накопичених зарядів до пристрою, що проводить вимірювання кожного з них. Саме тому з фізичної точки зору фоточутливі ПЗЗ (ФПЗЗ) цікаві ще й тим, що електричний сигнал в них представлений не струмом чи напругою, а електричним зарядом [1]. В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. Поглинання кремнієм фотона приводить до генерації пари електрона і дірки. Пара розтягується електростатичним полем в області пікселя, причому дірка витісняється в глибину кремнію. Електрони, як неосновні носії заряду накопичуватимуться в потенційній ямі під електродом і, в зв'язку з тим, що дірок в збідненій області немає, електрони можуть зберігатися там достатньо довго. Якщо носій генерований поблизу збідненої області, то він може попасти під сусідній електрод при умові, що потенціал одного електрода буде зменшуватись, а іншого збільшуватись. Так заряди переміщуються вздовж зсувного регістра вимірюються на його виході. Таким чином на виході горизонтального зсувного регістра формується сигнал, що надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Матричні ФПЗЗ по способу організації формування сигналу розділяють на матриці з перенесенням кадру, стрічково-кадрові матриці та матриці зі стрічковою адресацією [1,8].

Матриці з перенесенням кадру містять в собі щільно розміщені вертикальні регістри перенесення і горизонтальний вихідний регістр. По вертикалі матриця розділена на секції накопичення і пам'яті. Під час зворотного ходу по кадру інформація переноситься із секції накопичення в секцію пам'яті, а потім постстроково виводиться горизонтальним регістром протягом наступного півкадру.

В полікремнієвих затворах відбувається сильне поглинання випромінювання з довжиною хвилі меншою за 500 нм, що приводить до втрати інформації про синій компонент колірності. Для підвищення чутливості в синій області спектру здійснюється освітлення із внутрішньої сторони підкладки, а підкладка при цьому сточується до товщини 20 мкм. Також для вирішення даної проблеми використовується ПЗЗ-структура з вузьким каналом. Полікремневі затвори складаються з широкої частини, під якою знаходиться інформаційний заряд вузької бар'єрної частини, ширина каналу якої 3 мкм. Під впливом ефекту вузького каналу порогова напруга на 4 – 5 В більша, ніж в частині, що зберігає, завдяки чому є можливим двофазне керування пристроєм. Причому дана форма затворів приводить до того, що в кожній комірці залишається область, яка є незакритою полікремнієм, а отже чутливою до синьої частини спектру. При площі фоточутливого вікна, вільного від полікремнію, яка займає 27 % площі комірки, чутливість матриці при довжині 450 нм складає 40 % від максимальної чутливості [8].

Кольорове зображення отримують шляхом формування на скляній підкладці смужкових фільтрів червоного, зеленого і голубого кольорів. Підкладка наклеюється на матрицю таким чином, щоб кожний вертикальний регістр був закритий смужкою свого кольору. З метою послаблення змішування кольорів стоп-канали ПЗЗ закриваються напівпрозорим екраном. Якщо інформація швидко переноситься з секції накопичення в секцію пам'яті, то виникає паразитне свічення зображення, що приводить до спотворення інформації. Для запобігання цьому зменшують площу пристрою або підвищують частоту перенесення зображення.

В стрічково кадрюваних матрицях відбувається чергування між вертикальними фоточутливими областями та екранованими від світла регістрами зчитування. Область накопичення є ніби розрізаною на вертикальні стовбці, між якими знаходяться зсувні регістри. Хоча фоточутливою є та частина площі, що не зайнята зсувними регістрами, зображення проектується на весь кристал. Накопичені у фотокомірках зарядні пакети одночасно переносяться в сусідні елементи регістрів зчитування. Протягом часу накопи-

чення наступного кадру чи півкадру зарядні пакети виносяться у вихідний пристрій через горизонтальний вихідний регістр.

На відміну від матриць з накопиченням кадру, де фотокоміркою може бути лише МОН-накопичувач, в стрічково-кадрових матрицях в якості фотокомірок можна використовувати як МОН-накопичувач, фотодіод, фоторезистор. Використання діодних фотокомірок дозволяє покращити чутливість в синій області спектру. Оскільки в стрічково-кадрових матрицях половина площі зайнята вертикальними регістрами, то виникає проблема збільшення заряду. Тому використовується режим накопичення поля, коли при звичайному робочому режимі матриці парні фотокомірки зчитуються в одному півкадрі, а непарні – в іншому. При використанні фотодіодної матриці підвищення фоточутливості здійснюють шляхом формування на поверхні приладу масиву напівпрозорих лінз, які фокусують світло на діоди, в результаті чого ефективна апертура зростає на 80 %. Кольорові фільтри наносяться безпосередньо на поверхню матриці.

В матрицях зі стрічковою адресацією області накопичування і зчитування є розміщеними, а матриці призначені для роботи в малокадровому режимі, коли можна застосовувати фотозатвор або зробити час накопичення набагато більшим за час зчитування. Матриці являють собою комбінацію накопичувачів на основі МОН-транзисторів з горизонтальним вихідним ПЗЗ-регістром. Зчитування двокоординатного масиву відбувається построчно у вихідний зсувний регістр та у вихідний пристрій. При такій організації необхідно забезпечити зчитування малого заряду з вертикальної шини великої ємності в комірку горизонтального регістра. Тому між фоточутливою матрицею та регістром вводять спеціальний узгоджувальний пристрій, який в значній степені визначає якість роботи пристрою. До матриць зі стрічковою адресацією відносять ФПЗЗ з тимчасовою затримкою та накопиченням (ТЗН), використання яких дозволяє різко збільшити відношення сигнал – шум, і як наслідок реалізувати високу чутливість. Використання тимчасової затримки і накопичення дозволяє різко поліпшити відношення сигнал-шум матриць і, отже, реалізувати високу чутливість. Одна з основних переваг матриць з ТЗН – можливість гібридної збірки їх в суперлінійки, число елементів яких досягає десятків тисяч [1].

Характеристики ФПЗЗ – інтегральних мікросхем: ефективний квантовий вихід порядку 0,7; інтегральна чутливість порядку 1 А/Вт^{-1} в спектральному діапазоні 0,4–0,8 мкм; високе відношення сигнал – шум, наближене до 1000; швидкість зняття оптичної інформації понад 10^6 байт за секунду – забезпечують потреби до давачів в пристроях цифрового перетворення зображень в інформаційних системах. [4] Сьогодні серійне виробництво ПЗЗ-матриць здійснюється декількома фірмами: Texas Instruments, Thompson, Loral Fairchild, Ford Aerospace, SONY, Panasonic, Samsung, Philips, Hitachi Kodak. ПЗЗ хорошої якості сучасної розробки випускає, наприклад, фірма Philips. Такими матрицями оснащені телекамери серії LTC 03, LTC 04. Так телекамера LTC 0350 забезпечена автоматичним електронним затвором 1/50 — 1/100000 с, працюючим з форматом матриці 1/3 дюйма і розміром 752×582 пікселів. [9].

КМОН-матриці. Довгий час ПЗЗ-матриці були практично єдиним масовим видом цифрових фотоперетворювачів. Реалізація технології Active Pixel Sensors в 1993 році і подальший розвиток технологій привели в результаті до того, що в 1998 році були розроблені матричні фоточутливі прилади на основі комплементарної структури типу метал-оксид-напівпровідник (КМОН-матриці) і стали практично альтернативою ПЗЗ-матриць.

Як і в матричних ПЗЗ, світлочутливим пікселем в КМОН-сенсорі може бути з'єднана область МОН-ємності, що виникає при подачі на фазний електрод збіднювальної напруги, або ж з'єднана область зворотньоозміщеного фотодіода. Світлочутливий елемент другого типу переважає, хоча б з тієї точки зору, що фотодіодна структура має

суттєво вищий коефіцієнт збору світлового потоку через відсутність шарів полікремнію, поглинаючого світловий потік.

На відміну від технології ПЗЗ, КМОН технологія дозволяє достатньо простими засобами організувати фотоприймач, що містить дуже велике число пікселів – десятки мільйонів, і має дуже велику площу кристала. Це пояснюється тим, що при збільшенні розміру кристала ПЗЗ-перетворювача ймовірність захопити фатальний дефект швидко зростає. В КМОН сенсорі такий дефект викличе пошкодження лише єдиного пікселя, коли в матричних ПЗЗ такий дефект дуже часто приводить до непрацездатності всього перетворювача в цілому.

Наявність великого числа транзисторів в кожному пікселі приводить до зниження коефіцієнта використання світлового потоку в КМОН сенсорах, проте застосування добре відпрацьованої в матричних ПЗЗ з стрічковою адресацією технології мікролінз, розташованих над фотодіодом дозволяє добитися дуже високих значень коефіцієнта збору, що наближаються в перспективі до 100%. У вже існуючих КМОН сенсорах з активним пікселем коефіцієнт перетворення заряду в напругу може складати сотні мкВ на електрон в порівнянні з десятками мкВ на електрон в кращих фотоприймачах на ПЗЗ, що забезпечує зменшення смуги обробки частот сигналу, а отже і зниження власного шуму. Проте, неможливість створення мегапіксельного масиву малошумних транзисторів призводить до того, що шуми КМОН фотоприймачів поки перевищують шуми ПЗЗ перетворювачів і тому при рівності часу накопичення і розмірів світлочутливих елементів чутливість КМОН-матриць поступається чутливості матричних ПЗЗ. Характеристики спектральної чутливості в цілому є ідентичними з характеристиками матричних ПЗЗ і визначаються типом і особливостями застосованого кремнієвого світлочутливого елемента – МОН-ємності або фотодіода.

На даний час випускаються фото та телекамери, які використовують матричні КМОН-фотоприймачі фірмами Sony, Sharp, Panasonic, Samsung, Micron, Philips, Canon, Kodak, Nikon та інші, які мають кількість ефективних пікселів від 1296×985 (Sony IMX006) до 4992×3328 (Canon EOS 1DsII) з розмірами пікселя від 1,75×1,75 мкм (Micron MT9E001) до 9,12×9,12 мкм (Foveon F7X3-C9110) [5].

Використання матричних елементів у вимірюваннях параметрів світлового поля. Матричні елементи на даний час знайшли широке застосування в сучасних вимірювальних системах. Так, яскравомір LMK-98-3 з ПЗЗ-матрицею Sony ICX 285AL, разом з програмним забезпеченням LMK2000 використовується в методиці динамічного вимірювання яскравості на дорогах та в тунелях [11]. Як наслідок в 2006 р. ООО «ВНИСИ» разом з ГУП «Моссвет» було створено мобільну світлотехнічну вимірювальну лабораторію для моніторингу світлотехнічних характеристик зовнішнього освітлення, де в якості вимірювального пристрою є яскравомір LMK-98-3 [10]. Також матричні фотоперетворювачі Sony ICX 285AL використані в камері PCO Sensicam Long Exposure для фотометрії ближнього поля. За допомогою фотометра «ProMetric 1400» та комп'ютерних програм «Radiant Imaging ProMetric» і «Road LumiMeter» здійснюється інтелектуальне керування дорожнім освітленням в залежності від погодних умов [3].

Висновки. 1. Проведено аналіз структури та конструктивних особливостей матричних фотоперетворювачів.

2. Відмічено основні недоліки та переваги матричних елементів при використанні їх у вимірювальній техніці.

3. Наведено приклади в застосуванні матричних елементів при динамічному вимірюванні параметрів світлового поля на дорогах і в тунелях.

Література

1. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.: ил.

2. Основы физики микроэлектронных систем метал-диэлектрик-полупроводник. Литовченко В.Г., Горбань А.П. К., «Наук. думка», 1978. 316 с.
3. П. Буленгез, С. Каре, М. Перродо, Б. Пиранда. Новый метод фотометрии ближнего поля. – ж. «Светотехника» № 2, 2008.
4. Егорова С.Д., Колесник В.А. Оптико-электронное цифровое преобразование изображений. – М.: Радио и связь, 1991. – 208 с.: ил.
5. А.А. Манцетов, А.К. Цыцулин. Телекамеры на КМОП фотоприемниках [Цит. 2008, 01 грудня] – доступний з <http://www.es-experts.ru>.
6. История фотографии «Фиксация изображений цифровым фотоаппаратом» [Цит. 2008, 01 грудня] – доступний з <http://novotarbeevo.narod.ru>.
7. Зотов В. Д. Полупроводниковые устройства восприятия оптической информации. М., «Энергия», 1976.
8. Ковтонюк Н.Ф., Сальников Е.Н. Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений. – М.: Радио и связь, 1990. – 160 с.: ил. – (Массовая библиотека инженера «Электроника»).
9. Неизвестный С.И., Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы [Цит. 2008, 12 грудня] – доступний з <http://www.ess.ru>.
10. Т.Л. Флодина, А.Ш. Черняк. Измерение светотехнических параметров установок наружного освещения с помощью мобильной лаборатории. – ж. «Светотехника» № 1, 2007.
11. Ф Шмидт. Динамический метод измерения яркости на дорогах и в тунелях. – ж. «Светотехника» № 3, 2005.

МАТРИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВЕТА С ЦИФРОВЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ СИГНАЛА

Я М. Осадца., Р.Й. Рипецкий

Проведен анализ современного состояния матричных фотопреобразователей, поданы примеры в применении матричных элементов в светотехнических измерениях.

MATRIX TRANSFORMERS OF LIGHT WITH DIGITAL PRESENTATION OF SIGNAL

Y.M Osadtsa., R.Y. Ripetsky

The modern state of matrix transformers of light had been analyzed. The examples application of matrix elements in measuring technologies of lightning are given.