

УДК 621.383

Й. Й. Білинський, к. т. н., доц.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Наступна революція, яка відбудеться у двадцять першому сторіччі, зумовлена поєднанням дешевих оптичних сенсорів із мікропроцесорами та лазерами, які є основою оптико-електронних вимірювальних систем. Такі системи включають використання широкого класу фотодетекторів, до яких відносяться позиційно-чутливі фотодетектори ПЧД, матриці й фотолінійки на основі приладів із зарядовим зв'язком ПЗЗ, а також на основі комплементарних структур метал-оксид-напівпровідник КМОП, які і описані в даній статті.

Вступ

Наступна революція, яка відбудеться у двадцять першому сторіччі, зумовлена поєднанням дешевих оптичних сенсорів із мікропроцесорами та лазерами. Сенсоризація виробничої діяльності, тобто заміна органів чуття людини на сенсори, повинна розглядатися як третя промислова революція після машинно-енергетичної та інформаційно-комп'ютерної. Потреба в сенсорах, вимірювальних приладах стрімко росте у зв'язку з бурхливим розвитком автоматизованих систем контролю й керування, впровадженням нових технологічних процесів, переходом до гнучких автоматизованих виробництв.

Основна частина

Переважає більшість наявних сенсорів є оптичними, а оптико-електронні системи на їх основі здатні створювати зображення об'єкта шляхом його сканування використовуючи, як правило, одну з трьох технологій: точкове сканування, рядкове сканування та сканування по площі.

Використовуючи один одноелементний детектор або піксел (елемент зображення) можна зісканувати зображення, послідовно знімаючи інформацію про об'єкт у дискретних координатах. Перевагами цієї технології є висока роздільна здатність, однорідність вимірювань від одного місця до другого, низька ціна й простота детектора, а недоліками – похибки реєстрації від переміщення об'єкта або детектора, невисока швидкість сканування кадру через повторюваність експонування й складність системи, пов'язану з переміщенням.

Ефективнішими технологіями сканування об'єктів є рядкове сканування та сканування по площі. Такі оптико-електронні системи працюють із високою точністю і не мають рухомих частин, а процес вимірювання виконується в реальному часі. Ці технології включають використання широкого класу фотодетекторів, до яких відносяться позиційно-чутливі фотодетектори (ПЧД від англ. PSD – position sensitive detector), матриці й фотолінійки на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ від англ. CCD — charge-copler devise), а також на основі комплементарних структур метал-оксид-напівпровідник (КМОП від англ. CMOS — *complementary metal-oxide semiconductor*) [1, 2].

ПЧД є монолітними детекторами без дискретних елементів і забезпечують безперервні дані про положення об'єкта, використовуючи опір поверхні фотодіода. Сигнал на виході ПЧД є функцією центра мас загальної кількості світла на активній ділянці, а вихідні сигнали визначаються миттєвими значеннями оптичних потоків, що не залежать від часу опромінення. У зв'язку з чим ПЧД носять ще назву багатоелементні приймачі миттєвої дії. Час перетворення сигналу складає наносекунди з роздільною здатністю нанометра, а з використанням опорних точок, досягається підвищення точності на порядок. Оскільки ПЧД забезпечує визначення положення через фоточутливість діода, пристрій можна розглядати як звичайний фотодіод великої площі, а для обробки сигналу використовуються стандартні методи [3].

ПЧД можна виготовити будь-якої форми. Для тривимірних задач використовуються нестандартні ПЧД, які мають спіральний, кільцевий або сферичний вигляд, у зв'язку з чим їх поділяють на одноплощинні й багатоплощинні. За принципом опитування фотодіодів ПЧД бувають із паралельним і послідовним опитуванням елементів. Використання ПЧД із паралельним опитуванням забезпечує одночасне підключення всіх робочих елементів до своїх каналів підсилення, але одночасне підключення великого числа елементів з малим кроком просторової структури ускладнює реалізацію. У рамках даної групи ПЧД найпоширеніші чотириелементні фотодіоди, що з успіхом використовуються як швидкодійні координатно-чутливі фотоприймачі у різних оптико-електронних вимірювальних системах. Кожний з чотирьох каналів фотоприймача можна розглядати як незалежний одноелементний фотодіод, що підключений до вхідного ланцюга наступної електронної схеми. Як узгоджувальний каскад, у даному випадку, доцільно використовувати перетворювач струм-напруга.

У тих випадках, коли необхідно реалізувати багатоеlementну фотоприймальну структуру, що містить до декількох сотень елементів, кращим є принцип послідовного опитування елементів із можливістю координатної вибірки сигналів. Подібні ПЧД можна використовувати як перетворювачі просторового розподілу освітленості у площині аналізу зображення в часову послідовність імпульс-відеосигнал.

Основними характеристиками ПЧД є висока роздільна здатність положення, висока лінійність та швидкодія, широкий діапазон спектральної чутливості та інтенсивності світла, одночасне вимірювання положення й інтенсивності світла, незалежність від фокуса світлової плями, просте обчислення положення.

ПЧД використовуються для вимірювання зміщень, вібрації, оптичних вимірювань положення й кута, аналізу тривимірного руху високої швидкості, вирівнювання характеристик лазерного променя, спектрального аналізу, тривимірного машинного зору, моніторингу й вирівнювання рентгівського променя.

Технологія безпосереднього зчитування даних у сучасних пристроях зображень і багатьох оптико-електронних вимірювальних системах реалізується, переважно, на основі фотодетекторів типу ПЗЗ і КМОН. Сенсори на основі ПЗЗ — це твердотільні електронні компоненти, що складаються з безлічі маленьких світлочутливих елементів, а в залежності від типу пристрою сенсори можуть мати різну конфігурацію і різну кількість елементів [4]. Для створення приладу із зарядовим зв'язком на поверхню напівпровідникового кристала (як правило, кремнію) наносять прозору оксидну плівку, що служить діелектриком у мікроскопічних конденсаторах, підкладками яких є поверхня самого кристала та нанесені на діелектрик металізовані електроди. Товщина електродів складає частки мікрона (0,1—0,6 мкм), а для підвищення прозорості електродів з метою проходження світла застосовують полікремній. В одній ПЗЗ-лінійці може бути від декількох сотень до декількох тисяч, а в ПЗЗ-матриці — декілька мільйонів фоточутливих елементів. Розмір елемента ПЗЗ є критичним параметром, тому що від нього залежить не тільки роздільна здатність, але і максимальна величина утримуваного заряду, а отже, і динамічний діапазон пристрою. Збільшення роздільної здатності приводить до звуження його динамічного діапазону.

В основу роботи ПЗЗ покладена залежність провідності р-п-переходу звичайного напівпровідникового діода від ступеня його освітленості. Фотодіод перетворює світло (фотони) у заряд (електрони). Розрізняють два режими роботи фотоприймачів: режим безпосереднього зчитування й режим накопичення заряду. У першому випадку вихідний електричний сигнал фотоприймача в будь-який момент часу пропорційний інтенсивності оптичного сигналу, що падає на нього, а в другому — повному світловому потокові, що падає за час накопичення. Оскільки потужність оптичного сигналу, що надходить на вхід окремого елемента фотоматриці, дуже мала, то робота фотоприймачів у режимі накопичення заряду є більш ефективною.

ПЗЗ-матриця складається з пікселів, або елементів зображення, що впорядковані в ХУ-матрицю, яка містить колонки та рядки. Кожен піксел, у свою чергу, складається з фотодіода та

суміжної області перетворення заряду, що захищена від світла. Области перетворення заряду впорядковані в колонку, яка утворює вертикальний реєстр передачі заряду.

Пристрої ПЗЗ за способом організації поділяються на матриці повнокадрової (Full Frame sensor) і кадрової або міжрядкової передачі (Interline Transfer sensor). ПЗЗ-матриця кадрової або міжрядкової передачі сама може включати або виключати реєстрацію світла, що падає на неї, тобто працювати як електронний затвор. Це здійснюється перенесенням електричного заряду з фотоелемента (фотодіода) у реєстр зсуву і далі в інший реєстр, і т. д. до виходу фотоматриці. Перевага таких фотоматриць у тому, що ними можна керувати програмно, їм не потрібний механічний затвор. Оскільки в такій матриці між фотоелементами розташовуються елементи керування, то ефективна площа фотоматриці складає близько 30 %. Для збільшення ефективності реєстрації світла деякі виробники встановлюють над кожним фотоелементом індивідуальну мікролінзу, що дозволяє збільшити ефективну площу приблизно до 70 % [5].

Повнокадрові ПЗЗ-матриці мають найпростішу структуру. У них немає реєстрів зсуву, тому для них обов'язково потрібний механічний затвор. Після відкриття або закриття затвора заряди з фотоелементів послідовно переносяться в матрицю запам'ятовування, яка не чутлива до світла, що дозволяє дуже швидко перенести відзняте зображення від фотоматриці або матриці зображення до матриці запам'ятовування. Оскільки повнокадрові сенсори влаштовані простіше (не мають зсувних реєстрів і елементів керування навколо кожного фотоелемента), вони мають велику ефективну площу (близько 70 %) і їм не потрібні мікролінзи. Простота повнокадрової структури забезпечує найвищу роздільну здатність і найбільшу щільність, а також набагато нижчу вартість. Переважна більшість професіональних фотокамер оснащені переважно повнокадровими сенсорами.

Інші структури зчитування зображень, які не будуть розглядатися тут, включають кадрово-порядкову передачу, пристрої з інжекцією заряду й МОН-пристрої з XY-адресацією.

Окрім стандартного розташування на матрицях нового покоління Super CCD фотодіоди розташовуються по діагоналі і виконані у вигляді восьмигранників. Подібне розташування елементів дає можливість записати знімок із роздільною здатністю у два рази вищою. Технологія виробництва Super CCD істотно не змінила виробництво фотоматриць, а основним поліпшенням у новому сенсорі по відношенню до попереднього покоління є те, що світлочутливий елемент став трохи меншим, а стандартний розмір матриці при цьому залишився попереднім. Так, Super CCD HR-матриця розміром 1/1,7 дюйма містить 6,63 млн пікселів (інтерполюється до 12,3 млн пікселів у записаному зображенні), а матриця розміром 1/2,7 дюйма вміщує 3,14 млн пікселів (інтерполюється до 6 млн пікселів).

Інший шлях підвищення роздільної здатності ПЗЗ-матриці запропонувала компанія Foveon. Це сенсор, який має змінний розмір піксела (Variable Pixel Size). Малий розмір піксела дозволяє робити знімки високої якості в разі високого рівня освітленості, більший розмір (декілька пікселів) дозволяє знімати в разі слабкого освітлення. При цьому об'єднання сенсорів у пікселі може виконуватися програмно, без зміни самої структури матриці.

Інноваційне рішення, застосовано при розробці іншого представника нових сенсорів Fujі Photo Film Super CCD SR (Super Dynamic Range). Ця світлочутлива матриця, яка містить майже 7 млн пікселів (6,7 млн для матриці розміром 1/1,7 дюйма) і побудована за технологією, що дозволяє розширити динамічний діапазон матриці. Для цього на її поверхні нанесена не одна суцільна, а дві «сітки» фотоелементів, кожна з них містить по 3,35 млн пікселів. Одна із сіток містить «крупні», а значить, більш чутливі до світла S-пікселі, а друга – дрібніші R-пікселі, які менш чутливі до світла. Таким чином, S-пікселі вловлюють деталі зображення в затемнених ділянках сцени, а R-пікселі легко фіксують яскраво освітлені ділянки. Спеціальний процесор за принципом суперпозиції складає дані в єдине зображення, одержане з кожної сітки фотодіодів, видаючи на виході картинку з істотно розширеним динамічним діапазоном (орієнтовно діапазон розширений у чотири рази). Одночасно збільшена і чутливість сенсорів, її максимальне значення (для роздільної здатності 1280×960 пікселів) дорівнює 1600 одиницям ISO [6].

Останнім часом виробники ПЗЗ представили нові, високочутливі матриці для створення зображень наднизької освітленості. Нові детектори використовують революційну технологію «вбудова-

ного множення-накопичення» для збільшення генерованого заряду фотонами до рівня вище шуму зчитування, навіть при швидкості вищій ніж швидкість зміни відео кадрів. ПЗЗ — детектори з множенням заряду працюють ефективно в умовах низької освітленості, що вимагає відео (або вище ніж відео) швидкості зміни кадрів і високої роздільної здатності. Як приклади, можна назвати створення зображень внутрішньоклітинних іонів, біологічні вимірювання потоків рідини й створення зображень флуоресценції одиничних молекул [7].

Принципова відмінність між ПЗЗ із множенням заряду і стандартними ПЗЗ полягає в наявності розширеного послідовного регістра. Електрони прискорюються від піксела до піксела додатковою частиною регістра, застосовуючи вищу ніж звичайно напругу тактової частоти і, викликаючи ударну іонізацію з породженням вторинних електронів. Підвищення або зниження напруги тактової частоти визначає пропорційний напрузі приріст множення на мікросхемі. Ця технологія підвищує чутливість і може бути застосована для всіх ПЗЗ структур. Крім цього, низький шум зчитування, який досягається приростом множення на мікросхемі, дозволяє проглядати окремі кадри послідовно на «живій» швидкості зміни кадрів.

ПЗЗ-матриці на основі кремнію є монохромними за своєю природою. Це означає, що вони не мають здатності визначати кількість RGB інформації, спрямованої на піксел. Для отримання кольору для заданого кадру використовують одну із трьох технологій, спільною проблемою для яких є те, що для створення кольорового зображення кількість необхідної інформації потроєється.

Кольорове зображення можна створити за допомогою ПЗЗ, знімаючи три послідовних експозиції, одночасно переключаючи оптичні фільтри, що мають необхідні RGB характеристики. Перевагою є те, що зберігається роздільна здатність ПЗЗ, недоліком – необхідно три експозиції, що зменшує швидкість зміни кадрів більш ніж у три рази. Вузол перемикання фільтрів також додає механічної складності системі. Замість перемикання кольорів за допомогою колеса кольорових фільтрів тричіпові кольорові системи використовують оптику для розщеплення кадру на три окремих зображення. Кольорові зображення потім можна зняти, одночасно синхронізуючи виходи трьох ПЗЗ, приводячи, таким чином, частоту зміни кадрів до частоти однієї сенсорної системи. Недоліком такої системи є дуже висока складність, потроєна ефективна швидкість передачі даних (смуга пропускання) і складна система калібрування сенсорів. При цьому фільтрування зображення можна виконувати безпосередньо, розміщуючи фільтри з відповідними характеристиками на самому чіпі. Цей підхід можна застосувати під час виробництва, використовуючи пофарбовані фоторезисти в різних комбінаціях, що значно спрощує систему, але проблемою є те, що на відміну від плівки кожен піксел може бути лише одного (система основних кольорів RGB) або двох (система складених кольорів CMY) кольорів, або їх комбінацією.

Чутливість «кольорових» сенсорів повинна збільшитися, головним чином, за рахунок відсутності розкладання світла на три складові мозаїчного фільтра, який і визначає основні втрати чутливості при кольоровій зйомці. Якісно нового рівня кольоровості можна досягти, у тому числі, і в разі використання чотириколірної фільтрації і процесорної обробки зображення в режимі реального часу. Йдеться про нові фільтри компанії Sony, які додають піксел смарагдового кольору до базового растра, що працює з червоним, зеленим і синім кольорами. Після додавання смарагдового піксела новий графічний процесор камери конвертує чотириколірний сигнал назад у традиційні три кольори за допомогою лінійної матричної системи. В порівнянні з традиційним трибарвним, цей фільтр у два рази зменшує помилки і робить зображення ближчим до сприйняття людським оком за різних умов зйомки. Домішка до традиційного трибарвного фільтру ясно-блакитного або, як називає його сама компанія, смарагдового, дозволяє створювати зображення природніших кольорів, наближаючи характеристики до людської зорової системи. Плюс до цього нова 4-колірна RGBE-технологія дозволяє говорити про поліпшення таких характеристик, як швидкість зйомки й відтворення синьо-зелених і червоних відтінків.

ПЗЗ-детектори можна використовувати також і для прямого детектування рентгенівських променів менше 10 кеВ. Однак, при детектуванні рентгенівських променів у медичній діагностиці і промислового неруйнівного контролю, які, як правило, мають значення від 10 кеВ до 100 кеВ,

повинні використовуватися сцинтилятори для рентгенівського випромінювання, щоб перетворювати світло. При попаданні під рентгенівське випромінювання ці сцинтилятори випромінюють світло з максимумом хвилі в області 550 нм, а ПЗЗ ефективно детектує це випромінюване світло.

Для детектування об'єктів у ближній інфрачервоній області використовуються спеціальні ПЗЗ-структури із силіконовими підкладками вдвічі товстішими, що використовують відбите освітлення. В інфрачервоній області, тобто для діапазону 8...14 мкм, ПЗЗ-матриці не застосовують, але багатоеlementні фотоприймальні пристрої на основі напівпровідникових сполук також працюють. Вони використовують матриці на основі плівок, що мають назву КРТ (твердий розчин телуридів кадмію й ртуті). Для складу 22 % по кадмію він оптимальний в діапазоні 8...14 мкм, а для складу 30 % — в діапазоні 3...5 мкм. Такі пристрої використовують у тепловізорах. Фірми США вже багато років серійно випускають і продають тепловізори діапазону 3...5 мкм із фотоприймальними пристроями на основі антимоніду індію. Є багато моделей тепловізорів цього ж діапазону на основі силіциду платини. Фотоматриці ІЧ-діапазону мають формати 4×48, 32×32, 128×128, 256×256 і 512×512 елементів для розміру елемента менше 30 мкм [8].

Сенсори на основі КМОН-технології характеризуються високою щільністю розміщення елементів і схемами обробки сигналу на мікросхемі, вищою продуктивністю, єдиним живленням і низьким рівнем енергоспоживання, можливостями синхронізації й контролю. Ключові характеристики КМОН дозволяють створювати дешевші оптико-електронні пристрої та системи менших розмірів у порівнянні з ПЗЗ, що дає можливість застосовувати їх в мобільних виробках. На відміну від ПЗЗ, КМОН-матриці інтелектуальніші, оскільки крім збору інформації з фотоелементів і її перенесення, вони проводять і оброблення зображень: фільтрація, виділення контурів, зниження рівня, перетворення аналог-код. Усі зведені функції у ПЗЗ-структурах виконуються додатковими схемотехнічними рішеннями. Крім того, КМОН-матриці можуть бути запрограмовані на різні алгоритми поліпшення знятого матеріалу, що дозволяє робити їх гнучкими й інтелектуальними. Але КМОН-технологія містить у собі і ряд недоліків. Серед них усі ті, що властиві й іншим КМОН-пристроєм: струми витоку, залишковий заряд і, як наслідок, порівняно високий рівень шуму. Але ці проблеми в тій чи іншій мірі вирішуються шляхом програмування внутрішньої логіки КМОН-матриць [9].

Варто сказати, що про КМОН-матриці як про реального конкурента ПЗЗ-технології заговорили відносно недавно – лише в 1993 році, коли одній з лабораторій NASA вдалося додати до кожного активного сенсора транзисторний підсилювач для зчитування. Ця технологія одержала назву Active Pixel Sensor CMOS. На практиці це дозволяє швидше, ніж у ПЗЗ-структурах зчитувати дані, а, крім того, одночасно підсилювати або обробляти сигнал.

Як і ПЗЗ КМОН-детектори виготовляються на кремнієвих пластинах за допомогою схожого обладнання, але на цьому подібності закінчуються. Різні виробничі процеси, різна структура пристроїв і унікальні матеріали роблять ці пристрої створення зображень зовсім різними, а тому і придатнішими для різних застосувань. Цей тип матриці виробляється аналогічно звичайним мікросхемам, тому для їхнього випуску не потрібно окремого устаткування. КМОН-сенсори мають схеми, розміщені на площадці піксела, що дозволяє зчитувати зображення одночасно. Зменшення ширини металевих ліній до 0,35 мкм зменшило розмір піксела від 14 до 12 мкм². Для коефіцієнта заповнення 45 % фотодіод став меншим і створює менше шуму, що дає в результаті динамічний діапазон до 62 дБ [10]. Співвідношення перетворення заряд-напруга від ємності фотодіода майже подвоєне, з 14 мкВ/е до 27 мкВ/е, що приводить до підвищення чутливості до світла. Можливість працювати при низькій інтенсивності світла, використовуючи високу роздільну здатність, робить КМОН-матрицю придатною для спостереження швидкоплинних процесів в реальному режимі часу, наприклад, швидкого руху бактерій в мікроскопічних дослідженнях, зміна структури матеріалу, що знаходиться під тиском, політ кулі і т. д. Звичайно, кожний КМОН-сенсор містить від трьох до чотирьох транзисторів на піксел. У новій архітектурі на кожен піксел припадає менше двох транзисторів: компанія Matsushita збирається використовувати сім транзисторів на чотири пікселі, при цьому розмір кожного з них складе 2,25 мкм. Як стверджують, це буде найменший сенсор, зокрема, серед ПЗЗ-матриць. Схожу схему збирається використовувати і Canon: на один піксел припадає 1,5 транзистора. Sharp Corp оголосила про створення найменшої у світі 1,1-мегапіксельної цифрової

камери, призначеної для встановлення в стільникові телефони, комунікатори, смартфони і долонні комп'ютери. Пристрій, оформлений у вигляді мініатюрного модуля обсягом усього $1,44 \text{ см}^3$ і товщиною 9,7 мм [11].

КМОН-сенсори як і ПЗЗ використовують такі ж технології для створення кольорового зображення, але відносно «нове слово» у області формування кольорових зображень належить компанії Foveon, що розробила сенсор «ХЗ». В основі цього світлоприймача лежить відома дисперсна властивість кремнію — поглинання світла залежно від довжини хвилі на різній глибині кристала. Синій колір, що має найкоротшу довжину хвилі, поглинається раніше інших, і «синій» фотодетектор знаходиться найближче до поверхні кристала. Найдовші, червоні хвилі поглинаються в останню чергу, тому фотодетектори, налаштовані на червоний колір, знаходяться найглибше, а «зелені» детектори розташовані всередині. Таким чином, матриця знайшла «третє вимірювання». Подібне рішення дозволяє збільшити роздільну здатність сенсорів, адже тепер детектори налаштовані на один колір, не розкидані по всій матриці, а просто лежать один над одним. Назва нового сенсора «ХЗ» означає його «тривимірність» або «трибарвність» [12, 13].

Оскільки фотокамери поступово стають невід'ємним атрибутом стільникових телефонів, а від них вимагають високу роздільну здатність і якість при низькому енергоспоживанні, то перспективні КМОН-технології знайшли собі застосування саме в даному сегменті цифрової фототехніки. Але, крім цього, сенсори даного типу все ширше застосовуються у високоточних оптико-електронних приладах, зокрема, в мікроскопії, спектроскопії, фотометрії.

Висновки

ПЗЗ-матриці займають чільне місце у відеосистемах, зокрема у професіональних відеокамерах, відеосистемах для біологічних досліджень, але в оптико-електронних вимірювальних системах широкого застосування на сьогоднішній день не знаходять.

За всіма економічними параметрами КМОН-матриці перевершують ПЗЗ — це і низька вартість самого елемента, і нижче енергоспоживання (у 5...10 разів), що значно збільшує час роботи приладу, вища роздільна здатність при рівних габаритах завдяки високій ущільненості елементів. Таким чином, основною областю застосування КМОН-сенсорів стануть промислові системи машинного зору.

ПЧД, на відміну від ПЗЗ і КМОН, є монолітним детектором без дискретних елементів і забезпечує безперервні дані про положення, використовуючи опір поверхні фотодіода. ПЗЗ не може виміряти центр мас світлової плями без додаткового цифрового оброблення сигналу і, таким чином, цей тип вимірювань не буде легко доступним як у ПЧД. Формування вибірки, цифрова обробка всіх пікселів вимагає деякого часу і робить ПЗЗ повільнішим, ніж ПЧД. Але ПЧД не вірно «реагує» на спотворену форму світлової плями, що використовується для вимірювань. Це зсуває центр мас світлової плями, вводячи ПЧД в оману. З іншого боку, ПЗЗ визначає пікове значення й ідентифікує його як координату цілі: однорідно й точно.

Слабким місцем є те, що ПЧД не може розрізнити прямий промінь від відбитого. Він просто видає спільний центр мас двох світлових плям. Використовуючи ПЗЗ можна відрізнити пряме попадання від відбитого, оцінюючи силу сигналу світлової плями. Іншою проблемою є те, що темні поверхні, наприклад, резина чорного кольору, мають низьку відбивну здатність і звичайний ПЧД, на відміну від ПЗЗ, в таких умовах працювати не буде.

Динамічний діапазон ПЗЗ обмежений і раптовий зсув інтенсивності світла може викликати розпливчастість зображення. Цей ефект можна подолати, використовуючи матриці КМОН. Ця якість може знадобитися під час вимірювання кількості світла малої тривалості.

В еру бурхливого розвитку оптоелектроніки вартість багатоелементних сенсорів швидко падає від тисячі доларів у недалекому минулому до декількох доларів на сьогоднішній день, що дозволяє їх використовувати в залежності від поставленої задачі для побудови широкого класу спеціалізованих оптико-електронних вимірювальних пристроїв і систем із високими технічними характеристиками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шаригин М. Е. Сканеры и цифровые камеры / Под ред. О. В. Колесниченко, И. В. Шишигина. — СПб.: БХВ-Петербург; Арлит, 2001. — 384с.
2. Anna Wehlin. Position Sensitiv Detector // Laser Focus World. — 2003. — Vol. 39, № 2. — P. 93—95.
3. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л. Источники и приемники излучения. — СПб.: Политехника, — 1991. — 240 с.
4. Terry Guy. Interline CCDs Serve Machine Vision Aplications // Photonics spectra. — 2004. — Vol. 38, № 4. — P. 72—73.
5. Don Thomas. Fast Cameras Meet the Need for Speed // Photonics spectra.. — 2000. — Vol. 34, № 2. — P. 137—139.
6. Hank Hogan. CMOS and CCD Share More Than a Letter // Photonics spectra. — 2004. — Vol. 38, № 9. — P. 51—54.
7. Stephen Marcus, Jeff Grant. Advances in CCD technology target specific applications // Laser Focus World. — 2002. — Vol. 38, № 12. — P. 72—73.
8. Сусов Е. В., Сидоров Ю. Г., Северцев В. Н., Комов А. А., Чеканова Г. В., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Дьяконова Л. И. Многоэлементный охлаждаемый фоторезистор на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe // Автометрия. — 1996. — № 4. — С. 40—48.
9. Dana Dudley. Micromirror Technology Enable More Than Projector // Photonics spectra. — 2004. — Vol. 38, № 5. — P. 76—78.
10. Werner Brockherder. CMOS Image Sensor Features Improved Contrast and Noise // Europhotonics. — 2005.— Vol. 10, № 2. — P. 72—73.
11. Tim Brandt. High-speed CMOS images are flexible // Laser Focus World. — 2004. — Vol. 40, № 2. — P. 72—73.
12. Brian L. Benamati. In Search of the Ultimate Image Sensor // Photonics spectra. — 2001. — Vol. 14, № 4. — P. 62—64.
13. Eric Zaracov. Direct Image Sensor Tackles Color Concern // Photonics spectra. — 2003. — Vol. 37, № 11. — P. 99—106.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5. 07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05
Рекомендована до друку 21.07.05

Білинський Йосип Йосипович —доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Вінницький національний технічний університет