

УДК 621.383.7

## Еволюція датчиків зображення: КМОН-ФД і ПЗЗ-матриці

Чирук В.М., к.т.н., доц., Шмирьова Л.М.

### Вступ

Сьогодні фоточутливі ВІС і камери на їх основі можна знайти в самому різноманітному електронному обладнанні - автомобільній електроніці, комп'ютерних відеосистемах, побутових відеокамерах і фотоапаратах, біомедичних системах, іграшках, зчитувача штрихових кодів, системах спостереження, охорони і безпеки. До недавнього часу на ринку фоточутливих ВІС домінували фоточутливі ПЗЗ (ФПЗЗ). Однак у міру розвитку КМОН технології ФПЗЗ все активніше витісняються дешевшими (завдяки масовій технології виготовлення) КМОН-фотодіодними (КМОН-ФД) мікросхемами, що дозволяють реалізувати однокристалні цифрові камери. Які достоїнства і недоліки КМОН-ФД в порівнянні з ФПЗЗ? Які найбільш перспективні напрямки їх розробок?

### Принцип роботи ПЗЗ

Принцип роботи ПЗЗ базується на властивостях структури метал-оксид-напівпровідник (МОН-структура), яка може збирати, накопичувати і зберігати зарядові пакети неосновних носіїв в локальних потенціальних ямах, що утворюються біля поверхні

напівпровідника під дією електричного поля. Зарядові пакети утворюються під дією світла (рис.1).

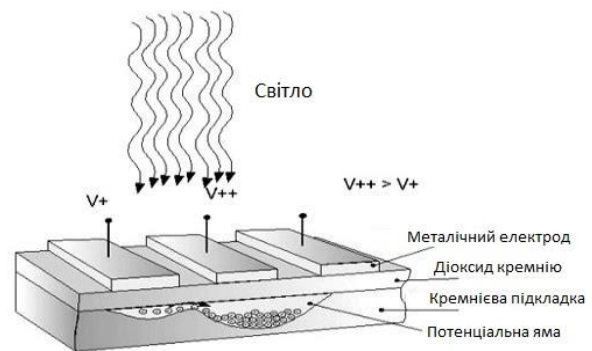


Рис. 1. Утворення зарядових пакетів

Перенесення зарядових пакетів відбувається шляхом переміщення потенціальних ям в потрібному напрямку завдяки подачі на матрицю відповідним чином сформованих управляючих сигналів.(рис.2).

Під дією управляючих сигналів зарядові пакети від окремих елементів матриці переносяться на вихідний пристрій, що перетворює їх у відеосигнали [1]. Вихідна ємність такого пристрою не перевищує 0,1 пФ, що покращує відношення сигнал/шум і сприяє підвищенню чутливості перетворювача. В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. Коли в кремнії поглинається фотон, то генерується

пара носіїв заряду - електрон і дірка. Електростатичне поле в області пікселя "розносить" цю пару, витісняючи дірку в глиб кремнію. Неосновні носії заряду, електрони, будуть накопичуватися в потенційній ямі під електродом, до якого підведено позитивний потенціал. Тут вони можуть зберігатися досить тривалий час, оскільки дірок в збідненій області немає і електрони не рекомбінують.

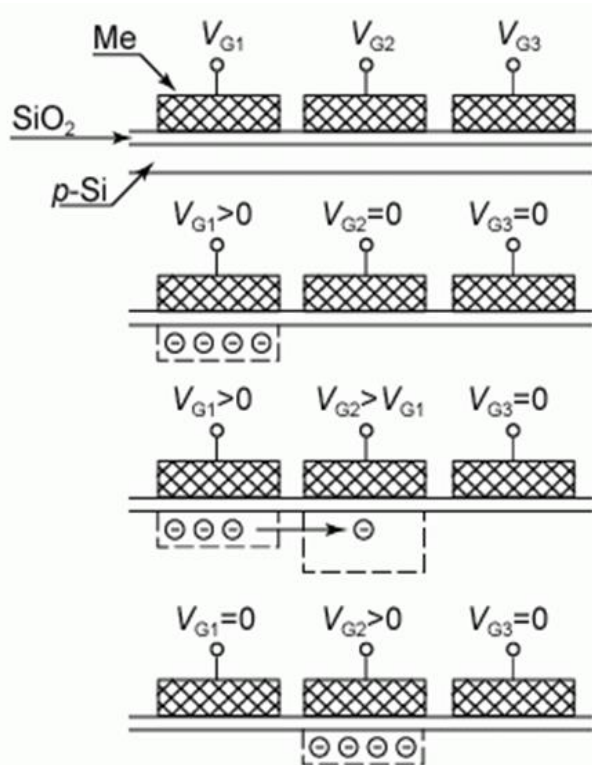


Рис 2. Послідовність роботи ПЗЗ-елемента.

Носії, згенеровані за межами збідненої області, повільно рухаються - дифундують і, зазвичай, рекомбінують з ґраткою перш ніж потраплять під дію градієнта поля збідненої області. Носії, згенеровані поблизу збідненої області, можуть дифундувати в сторони і можуть

потрапити під сусідній електрод. У червоному і інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають роздільну здатність гіршу, ніж у видимому діапазоні, так як червоні фотони проникають глибше в кристал кремнію і зарядовий пакет розмивається [1]. Заряд, накопичений під одним електродом, в будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшений, у той час як потенціал першого електрода, буде зменшений.

**Основні параметри ПЗЗ-матриці** приведені у таблиці №1.

Таблиця №1

Параметр	ФПЗЗ	КМОН-ФД
Фактор заповнення, FF, %	70-90	30-50
Темновий струм, нА/см <sup>2</sup>	0,01-1	2-5
Мінімальний розмір пікселя, мкм	3-5	6-8
Максимальний формат, пікселі	4080x4080	2000x2000
Динамічний діапазон, дБ	60-70	50-60
Довільна вибірка сигналів зображення в потрібних в потрібних областях	Відсутня	Реалізується
Інтеграція додаткових функцій на кристалі	Прості аналогові функції обробки	Програмовані цифрові та аналогові функції
Зовнішні сигнали управління	Джерело живлення на 5-12 В і	Джерело живлення на 2,5-5 В і

	трьох-дев'яти фазових імпульсів	одного синхроімпульсу
Технологія виробництва	Спеціальна	Налагоджена КМОН-технологія
Реалізація цифрової камери	ФПЗЗ, НВІС управління і АЦП	Однокристальна
Переважні області застосування	Наукові, космічні і медичні системи	Однокристальні побутові (фото- і відеокамери), автомобільні і охоронні системи, відеотелефони

### Фоточутливі КМОН-ФД НВІС

На сьогодні в області фоточутливих НВІС крім подальшого вдосконалення ФПЗЗ спостерігаються інтенсивні розробки КМОН-ФД матриць з внутрішньо кристалльними схемами управління та обробки зображення.

Фоточутливі КМОН-ФД НВІС містять матрицю активних фоточутливих елементів (активних пікселів), схеми управління, аналогові підсилювачі зчитування на виході кожного стовпця, АЦП і ряд інших цифрових блоків (рис.3).

У таких КМОН-ФД матрицях схеми управління можуть реалізовувати довільну координатну вибірку сигналів, що значно розширює можливості фільтрації і обробки (в тому числі паралельної) сигналів зображення. А оскільки зазвичай ВІ займає невелику частину кадру, швидкість зчитування, в порівнянні з ФПЗЗ, в котрих необхідно зчитувати

весь кадр, може бути значно збільшена.



Рис.3. Структурна схема КМОН-ФД НВІС

**Активний елемент** утворений фотодіодом (ФД) і чотирма транзисторами (рис.4), які виконують функцію зчитування заряду, накопиченого фотодіодом (транзистор V1), відновлення вихідної напруги (V2), входу витоків повторювача (V3) і вибірки рядків (V4). Витік транзистора V4 підключений до шини стовпця.

У режимі інтегрування сигналів зображення імпульс R, який подається на транзистор V2, дорівнює нулю. ФД накопичує фотогенеровані електрони, і в міру їх накопичення потенціал діода зменшується. В результаті потенціал загального вузла з'єднання транзисторів V1, V2 і V3 виявляється

плаваючим (плаваючий вузол). У режимі вибірки на транзистор V2 надходить імпульс відновлення  $R = 1$ , V2 відкривається і потенціал плаваючого вузла відновлюється до вихідного рівня. Потім на всі активні елементи вибраного рядка подається імпульс  $TG1 = 1$ , який надходить на затвор транзистора V1, відкриваючи його. Накопичений фотодіодом сигнальний заряд передається в плаваючий вузол. Коефіцієнт передачі по напрузі витокового повторювача близький до одиниці. На шини стовпців передаються лічені сигнали всіх елементів обраного рядка. Дешифратор стовпців послідовно вибирає сигнали шин і передає їх на схему аналогової обробки сигналів окремих активних елементів матриці. Після закінчення режиму зчитування сигнал  $RS = 0$ , і V4 закривається.[3]. Починається накопичення зарядів наступного кадру зображення.

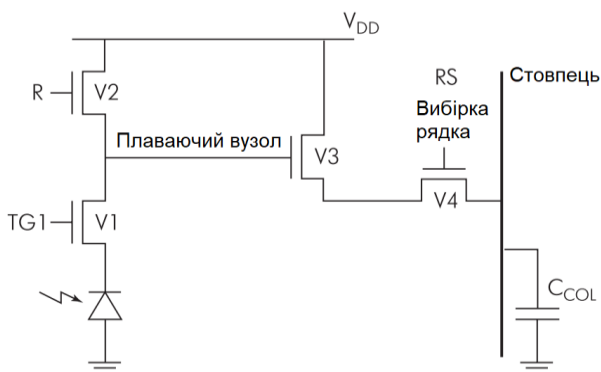


Рис. 4. Схема активного пікселя

### Елемент із сполученим управлінням

З метою зменшення числа транзисторів активного елемента і організації прогресивного процесу зчитування розробили елемент з суміщеними управлінням. Він містить

загальні на два активних елемента відновлюючий транзистор V3 і витоковий повторювач на транзисторах V4 і V5. Який послідовно передає на шину стовпця сигнали двох сусідніх ФД (рис.5) [3].

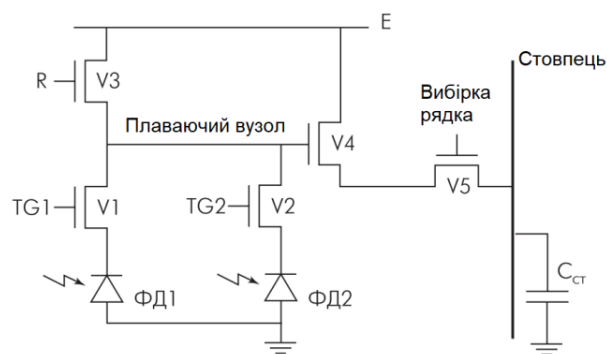


Рис. 5. Електрична схема елемента із сполученим управлінням

Два додаткових транзистора зв'язку - V1 і V2 - виконують функцію адресації ФД. У режимі інтегрування ФД накопичують сигнальні заряди. При відмиканні транзистора зв'язку V1 сигнал першого ФД передається в загальну для двох фоточутливих елементів дифузійну область і потім через витоковий повторювач - на вихід шини стовпчика.

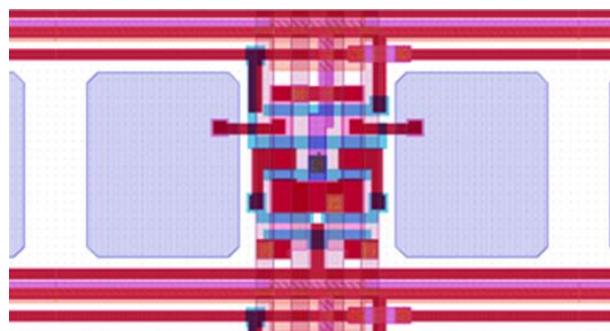


Рис. 6. Загальний вигляд однієї комірки КМОН-ФД НВІС

Потенціал ФД1 відновлюється, і V1 закривається. Відмикається

транзистор V2, і на вихід надходить сигнал ФД2. Таким чином, елемент з суміщеними управлінням містить п'ять керуючих транзисторів і два фоточутливих елементи. Така схема використовується в цифровому КМОН-ФД форматом 1280x1024 елементів (рис.6) [2].

### Порівняння характеристик ФПЗЗ і КМОН-ФД НВІС

Процеси накопичення і зчитування зарядів ФПЗЗ і КМОН-ФД різні. У ФПЗЗ фоточутлива область займає більшу частину площі активного елемента (може досягати 100%). У КМОН-ФД фоточутлива область займає лише частину площі фоточутливого елемента, тоді як решта площі зайнята шинами і КМОН транзисторами (30-35%).

Для підвищення фоточутливості КМОН-ФД використовуються мікролінзи (технологія, освоєна раніше для ФПЗЗ). При перпендикулярному напрямку падаючого світла це дозволяє підвищити FF до 80%. Однак для світла, що падає під іншими кутами, ефективність застосування мікролінз різко падає, і реальне значення FF становить лише 45-50%.

Як уже зазначалося, основна перевага КМОН-ФД в порівнянні з ФПЗЗ - можливість інтеграції на одному кристалі функцій прийому і обробки зображення, тобто реалізації однокристалльної камери з цифровим виходом [3]. Інші переваги КМОН-ФД - низька споживана потужність, можливість програмування потрібних

користувачу вікон і висока швидкість зчитування даних.

Основні недоліки - високий геометричний шум, обумовлений тим, що активний елемент містить кілька МОН транзисторів і кілька шин, низька фоточутливість, більш високий темновий струм, великі розміри активного елемента, менша, ніж у ФПЗЗ, роздільна здатність (див. таблицю №1).

### КМОН-ФД НВІС для космічної та військової апаратури

Можливість суміщення на одному кристалі функцій прийому і обробки зображень дозволяє створювати нову елементну базу для спеціальних застосувань.

КМОН-ФД приймачі знайшли використання в системі космічної орієнтації і зіркових датчиків (див. таблицю №2) з наступними характеристиками:

Таблиця №2

Частота зчитування кадрів, Гц	10
Кутова точність вимірювання, кут.хв	1
Еквівалентний шум вимірювання кута, кут.хв	1
Кут огляду, град.	20x20
Апертура	f/26
Споживана потужність	3,3, Вт
Охолодження	Пасивне

Габарити, мм	78x57x57
Маса, г	310

Відеосистема на основі цифрового КМОН-ФД приймача вперше була встановлена в 1997 році на космічному апараті Agian 502 Європейського космічного агентства, де успішно використовувалася для спостереження за процесом поділу супутників [3].

### Висновок

Порівняння КМОН-ФД і ФПЗЗ показує, що КМОН-ФД поступаються ФПЗЗ по роздільній здатності, фоточутливості, однорідності і динамічному діапазону. Тому космічну оптоелектронну апаратуру дистанційного зондування Землі, високоточні системи технічного зору, астрономічне, медичне і біологічне обладнання слід будувати на основі ФПЗЗ. КМОН-ФД приймачі ж знайшли широке застосування не тільки в побутовій апаратурі (цифрові камери і фотоапарати, відеотелефони, системи безпеки транспорту), але і в промислових, космічних і оборонних системах (астронавігації, астроорієнтації, технічному зорі, системах спостереження і контролю тощо). Основна перевага КМОН-ФД -

можливість створення однокристальних цифрових камер з пристроями аналогової, цифрової і нейроподібної обробки зображення. Тому найбільш перспективні напрямки розробок - створення інтелектуальних камер, які в найближче десятиліття дозволять реалізувати системи технічного та штучного зору, зіставні за характеристиками з біологічним зором.

### Література

1. Неизвестный С.И., Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная Техника. - №4. - 1999.
2. Кравченко О.П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки: Навч. посібник. К.: Либідь, 1993. 216 с.
3. А. Стемповкий, В. Шилин. КМОП-фотодиодные СБИС, Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2/2003, - С. 14-20.