

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

за спеціальністю 171 «Електроніка» освітньо-професійної програми
«Електронні інформаційні системи»
на тему «СЕНСОРИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ У ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРАХ»

здобувача групи ЕП-01 Осадчого Владислава Володимировича
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Владислав ОСАДЧИЙ
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст. викладач кафедри ЕЗПФ,
к-т. фіз.-мат. наук,

_____ Олександр ПИЛИПЕНКО

Суми 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ЕЗПФ
Л.В.Одnodворець
«01» травня 2024 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА
Осадчого Владислава Володимировича**

1.Тема роботи «СЕНСОРИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ У ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРАХ»

затверджена наказом СумДУ від «24» квітня 2024 р., № 0417-VI

2. Термін здавання здобувачем закінченої роботи: 24 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета):

Мета кваліфікаційної роботи полягає аналізі принципів роботи та особливостей характеристик ССD-сенсорів з метою здійснення їх оптимізації для ефективнішого використання у електронних пристроях. Це дослідження включатиме детальний огляд різноманітних типів пристроїв та врахування різних критеріїв вибору, що сприятиме покращенню розуміння їхньої ефективності та допоможе в їх практичному впровадженні у наукових дослідженнях та виробничих процесах.

4. Зміст текстової частини роботи (перелік питань, які необхідно розробити):

1. Загальна інформація, фізичні принципи роботи приладів із зарядовим зв'язком.
2. Аналіз сучасних приладів із зарядовим зв'язком та методики їх покращення.
3. Розрахунки характеристик рентгеноелектричного перетворювача на основі матриці приладів з зарядовим зв'язком.
4. Висновки.
5. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайд № 1-2: Актуальність і мета роботи

Слайд № 3-5: Аналіз сучасних пристроїв із зарядовим зв'язком..

Слайд № 6-7: Аналіз роботи напівпровідникових сенсорів.

Слайд № 8-11: Моделювання процесів рентгеноелектричного перетворення з застосуванням матриць приладів із зарядовим зв'язком

Слайд № 12 Висновки

Слайд № 13 Подяка

6. Дата видачі індивідуального завдання: 01.05.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан виконання роботи
1.	Аналіз літературних даних	до 07.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 22.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Підготовка тексту кваліфікаційної роботи	до 26.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	31.05.2024 р., 10-00, онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	04.06.2024 р., 10-00, онлайн	

Здобувач вищої освіти

Керівник

Владислав ОСАДЧИЙ

Олександр ПИЛИПЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота за темою «Сенсори із зарядовим зв'язком у електронних пристроях» викладена на: 32 сторінках, містить 3 розділи, 18 рисунків та 18 літературних джерел.

Сенсори із зарядовим зв'язком (CCD-сенсори) відіграють ключову роль у розвитку сучасних електронних пристроїв, забезпечуючи високу якість зображення та ефективність роботи. Завдяки своїй здатності точно фіксувати та передавати світлову інформацію, вони стали невід'ємною частиною в різноманітних сферах, включаючи цифрову фотографію, медичну візуалізацію, астрономію та наукові дослідження. Актуальність дослідження обумовлена потребою в подальшому вдосконаленні цих сенсорів для підвищення продуктивності та якості електронних пристроїв.

Об'єкт дослідження – Сенсори із зарядовим зв'язком (CCD-сенсори), які використовуються в електронних пристроях.

Предмет дослідження – Принципи роботи, конструкція та характеристики CCD-сенсорів, їх застосування та вплив на ефективність і якість роботи електронних пристроїв.

Мета роботи: Дослідження принципів роботи та характеристик CCD-сенсорів з метою оптимізації їх використання в електронних пристроях для покращення їх продуктивності та якості.

Результати роботи можуть бути включені в навчальні курси з електроніки, оптики та матеріалознавства, а також стати основою для подальших наукових досліджень у цих галузях..

Ключові слова: Сенсори із зарядовим зв'язком, електронні пристрої, просторово-частотна характеристика, рентгенооптичний перетворювач.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРИСТРОЇ ІЗ ЗАРЯДОВИМ З'ЯЗКОМ	4
1.1 Метал-оксид-провідник конденсатори.....	4
1.2 Робота та покращення пристроїв.....	9
1.3 ППЗ із заглибленим каналом	10
1.4 ПЗЗ з заднім підсвічуванням	11
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ.....	12
2.1 Датчики зображення на комплементарній структурі метал-оксид-напівпровідник	12
2.2 Параметри та характеристики датчиків зображення.....	15
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РЕНТГЕНОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З ЗАСТОСУВАННЯМ МАТРИЦЬ ПРИЛАДІВ З ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ.....	18
3.1 Розрахунки характеристик рентгеноелектричного перетворювача на основі матриці приладів з зарядовим зв'язком	18
3.2 Розрахунки характеристик перетворювачів на основі кремнію та германію	21
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	28

ВСТУП

Винайдений у 1969 році в лабораторіях Bell Labs компанії AT&T Віллардом Бойлом та Джорджем Е. Смітом [1], прилад (сенсори) із зв'язаними зарядами (ПЗЗ) являє собою планарний масив метал-оксид-провідник (МОП) конденсаторів (МОП-структур), витравлених на поверхні напівпровідника (зазвичай кремнію), утворюючи інтегральну схему (ІС) зі світлочутливими елементами, кожен з яких відповідає компоненту зображення або пікселю.

У більш технічному розумінні, ІС ПЗЗ є послідовним пристроєм, де пакети зарядів генеруються, передаються та зчитуються один за одним. Пакети зарядів, які зберігаються в зоні виснаження МОП-структур, передаються всередині ІС шляхом керування індивідуальними напругами затворів МОП-структур, щоб дозволити зарядам перетікати з однієї МОП-структури до іншої, звідки і походить назва "прилади із зв'язаними зарядами". Підсилювач на вихідному каскаді сенсора зображення забезпечує зчитування напруги, яку можна обробляти цифровим способом [2].

Метою бакалаврської роботи є дослідження сенсорів із зарядовим зв'язком. У цій роботі буде розглянуто МОС-конденсатори їх робота та розвиток. Також буде розглянуто КМОН матриці, їх різновиди та особливості.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРИСТРОЇ ІЗ ЗАРЯДОВИМ З'ЯЗКОМ

1.1 Метал-оксид-провідник конденсатори

МОС-конденсатор (MOSCAP) складається з металевого електрода (тобто затвора) та ізоляційної тонкої плівки (тобто діелектрика затвора), такої як діоксид кремнію (SiO_2), розміщеної поверхнею напівпровідниковому підкладці. Ізоляційна плівка може мати товщину до 1,5 нм.

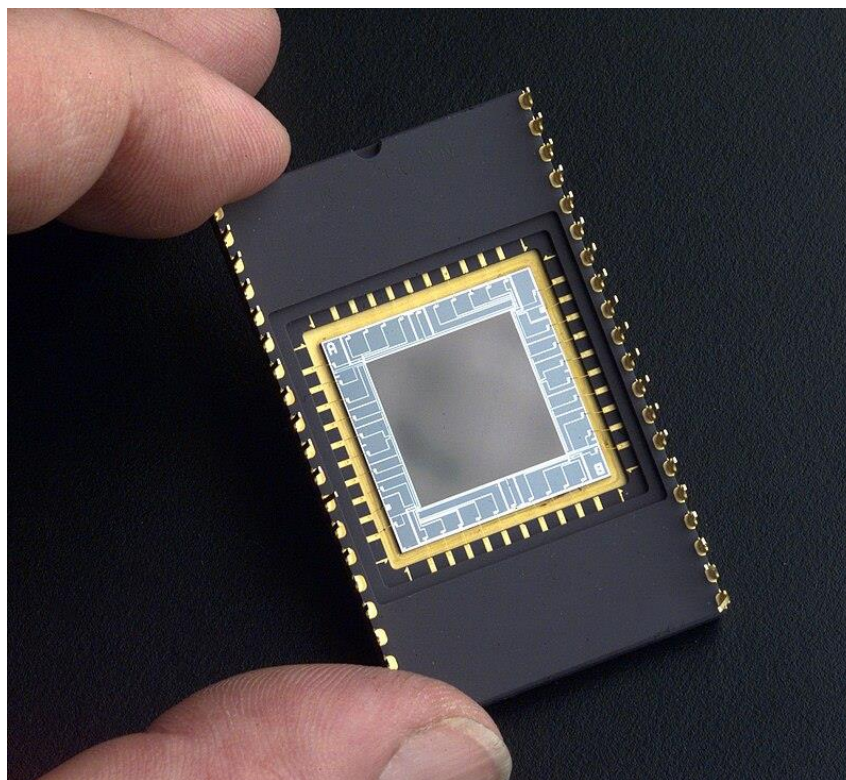


Рисунок 1.1 – Спеціально розроблена ПЗЗ-матриця в дротяному корпусі, яка використовується для ультрафіолетового зображення [3]

До 1970 року як матеріал для електродів затвора зазвичай використовували метали (наприклад, алюміній (Al)), тому їх називали Al-MOS. Через здатність витримувати високі температурні режими без реакції з SiO_2 , після 1970 року сильно легований полікристалічний кремній (полі-Si) замінив Al та інші метали як стандартний матеріал затвора. Проте термін MOSCAP залишився. Структури MOSCAP з кремнієвими підкладками р-типу називаються nMOS-конденсаторами,

тоді як структури з підкладками n-типу називаються pMOS-конденсаторами [1]. У CCD-датчиках зображення кожен піксель відповідає nMOS-конденсатору.

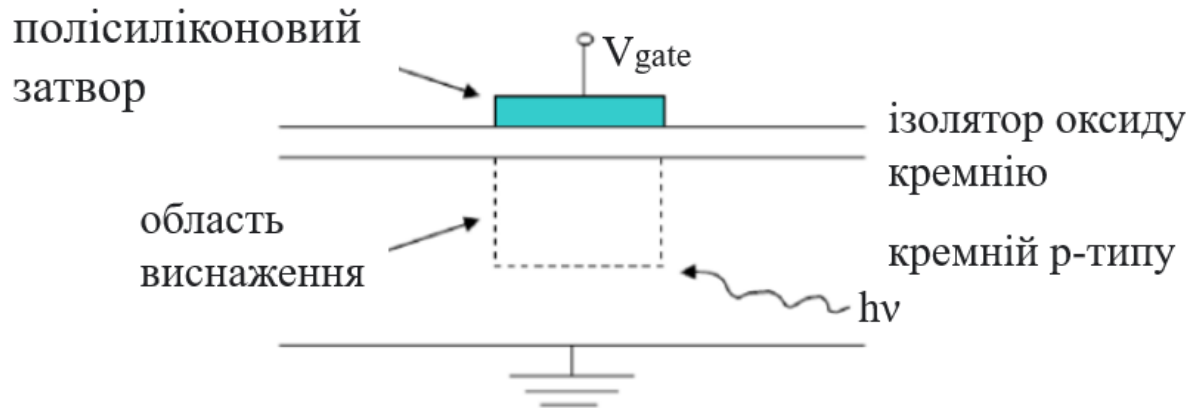


Рисунок 1.2 – Основний метал-оксид-напівпровідниковий конденсатор (MOSCAP). Адаптований з роботи [4]

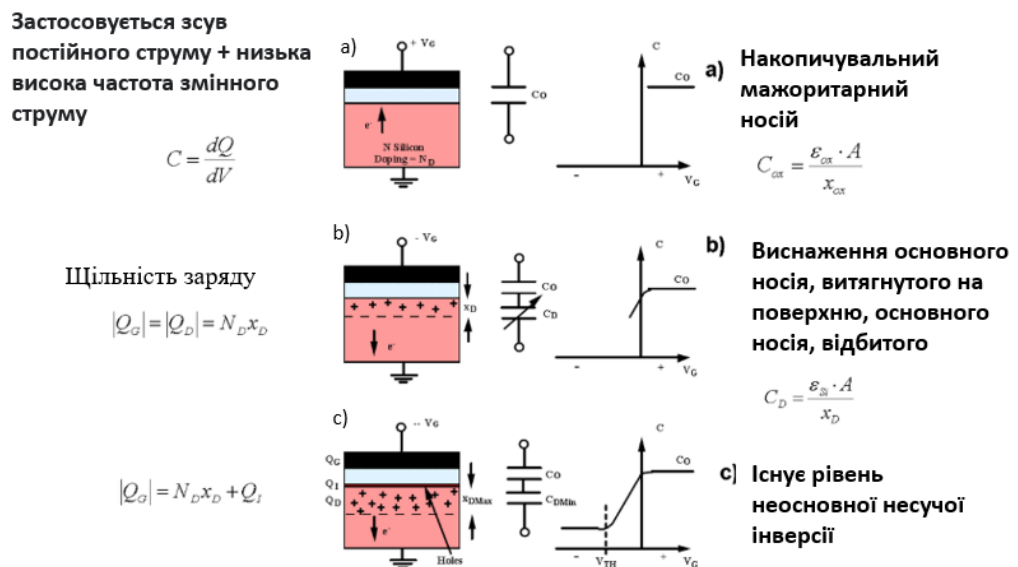


Рисунок 1.3 – Структура pMOS конденсатора та результуюча графік CV; (а) відповідає накопиченню, (б) виснаженню і (в) інверсії. Адаптований з роботи [5].

1. Постійна напруга +VG на затворі (Рисунок 1.3[а])

Позитивні напруги затвора притягують основні носії заряду (електрони) в n-області підкладки до поверхні кремнію (тобто накопичення основних носіїв заряду). Ємність у цьому випадку фактично є ємністю оксиду (C_{ox}) і вимірюється

за допомогою малого високочастотного змінного сигналу (зазвичай від 100 кГц до 1 МГц). Не створюється жодних зон виснаження. Натомість, кремнієва підкладка разом із SiO_2 утворюватиме опір. Виділяється лише ємнісна частина імпедансу, яка не залежить від V_G , як показано в першому рівнянні праворуч на рисунку 1.3[a].

2. Постійна напруга $-V_G$ на затворі (Рисунок 1.3[b])

Зона виснаження утворюється, коли негативні напруги віддаляють більшість основних носіїв заряду (електронів) від поверхні кремнію. Позитивні заряди від донорних атомів підкладки (вони мають загальний позитивний заряд, оскільки рухливі електрони були віддалені) компенсуватимуть будь-який негативний заряд, розміщений на затворі, і підтримуватимуть нейтралітет заряду. В результаті:

$$|Q_G| = |Q_D| = N_D x_D, \quad (1)$$

де N_D - це легування кремнієвої підкладки (вважається однорідним); Q_D і Q_G - це відповідно чисті заряди області виснаження та затвора, вимірювані в одиницях кількості зарядів на cm^2 ; а x_D - глибина області виснаження, яка залежить від напруги затвора (збільшується зі збільшенням V_G). За визначенням, ємність області виснаження на одиницю площі задається рівнянням:

$$C_D = \frac{\epsilon_{Si}}{x_D}, \quad (2)$$

де ϵ_{Si} - діелектрична проникність кремнію. Виміряна ємність структури МОП-структури тепер являє собою змінну ємність зони виснаження оксиду (C_D) послідовно з SiO_2 , як показано на графіку праворуч на рисунку 1.3[b]. C_D зменшується зі збільшенням негативного значення V_G , оскільки x_D збільшується.

Ще більші значення негативної постійної напруги затвора (V_G) на затворі (Рисунок 1.3[c]) Якщо прикладена негативна постійна напруга затвора є достатньо високою, утворюється інверсний шар, оскільки поверхня кремнію фактично інвертується з n-області в p-область. Оскільки негативна напруга на затворі притягує до поверхні міноритарні носії заряду (дірки) в підкладці, і якщо їх там

достатньо, вони можуть утворити інверсний шар із носіїв р-типу. Напруга затвора, при якій відбувається ця інверсія, називається пороговою напругою. Після створення інверсного шару x_D перестає збільшуватися і досягає значення насичення x_{DMax} .



Рисунок 1.4 – Ілюстрація pn переходу . Адаптований з роботи [5].

p-n-перехід - це перехід, що розділяє напівпровідник p-типу і напівпровідник n-типу. У p-n-переході надлишкові електрони дифундують у матеріал p-типу, і, подібно, надлишкові дірки дифундують у матеріал n-типу. Як показано на рисунку 1.4, результуюче електричне поле зрештою зупинить процес дифузії, створивши зону виснаження, де розподіл заряду електрично еквівалентний конденсатору з двома пластинами [5].

Коли фотон взаємодіє з напівпровідником, він створює пару електрон-дірка (e-h), за умови, що енергія падаючого фотона дорівнює або перевищує ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу. Енергія падаючого фотона визначається за формулою:

$$E_{inc.} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3)$$

де h - стала Планка, c - швидкість світла у вакуумі, λ - довжина хвилі падаючого світла. Оскільки кремній має ширину забороненої зони приблизно

1,124 eV за температури 300 K, фотони видимого діапазону (довжини хвиль в діапазоні від 400 до 700 нм, що відповідає приблизно 1,77 до 3,1 eV) мають достатньо енергії для створення пар електрон-дірка (e-h). Вибитий електрон буде притягуватися до зони з найбільш позитивним зарядом в р-n-переході, розташованій у виснажливій області в матеріалі n-типу, як показано на рисунку 1.4.

У видимому діапазоні діелектричні шари в ІС прозорі для падаючого світла, тоді як металеві шари, як правило, відбивають частину падаючих фотонів [6, 7].

Відповідно до вищесказаного, МОП-конденсатори (MOSCAP) у типовому робочому n-каналному ІС ПЗЗ (тобто з р-легованим кремнієм, а не з n-легованим, як обговорювалося вище) зміщуються в область виснаження перш ніж зазнати впливу падаючого світла. Тому затвор потрібно зміщувати позитивною напругою (+VG), що перевищує порогову напругу для сильного інвертування, оскільки це призведе до утворення n-каналу під затвором, як у МОП-транзисторі.

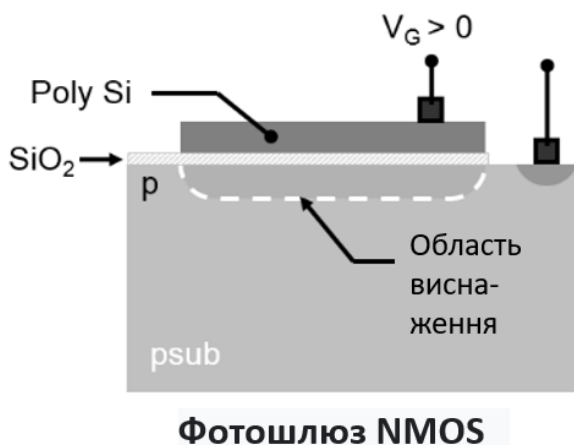


Рисунок 1.5 – фоторіт nMOS. Адаптований з роботи [8].

Порогова напруга - це напруга, на якій поверхневий потенціал пристрою інвертує підкладковий канал. Канал може бути слабо або сильно інвертований із поверхневими потенціалами ϕ_B або $2\phi_B$ відповідно, де ϕ_B - це бар'єр потенціалу носіїв заряду [4]. На рисунку 1.6 показано nMOS-фотозатвор, який по суті є

типовою системою МОП-конденсатора для збирання та передачі створених пар e^- і h^+ , і використовується в ПЗЗ із затримкою часу та інтеграцією (TDI-CCDs) та кадрових ПЗЗ (FTCCDs) [8].

1.2 Робота та покращення пристроїв

ПЗЗ працюють у стані, що називається глибоким виснаженням, оскільки після початкового зміщення дірки змушені рухатися глибше в підкладку, а вільних електронів немає на поверхні кремнію або біля неї. Робота в області глибокого виснаження необхідна, оскільки деяким пристроям (наприклад, ПЗЗ у наукових камерах високого класу) може знадобитися до години для досягнення теплової рівноваги, необхідної для сильного інвертування [8].

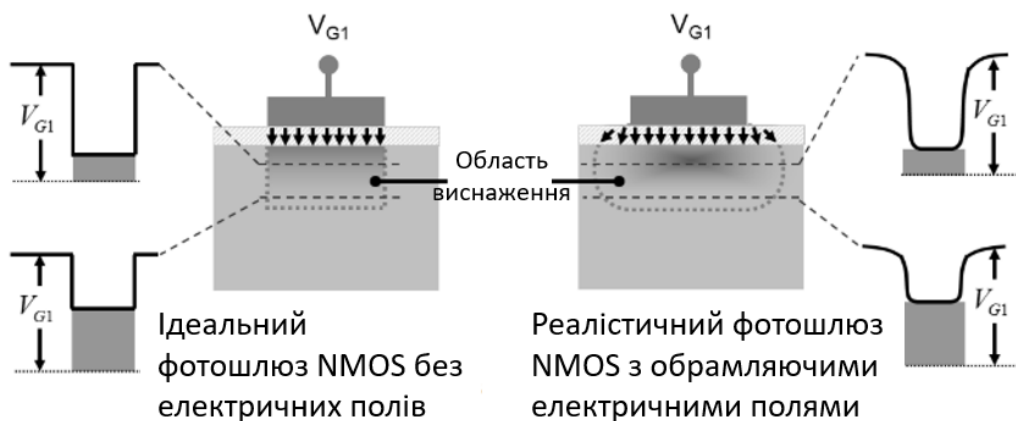


Рисунок 1.6 – Крайові електричні поля в nMOS фотозатворах Адаптований з роботи [8].

Більше того, через розривні межі розподілу заряду на краях МОП-структури вводяться окантовувальні електричні поля, які, таким чином, розширюють потенційну яму, що містить локальний мінімум потенційної енергії, і, отже, сприяє процесу передачі пакетів зарядів [9]. Порівняння ідеального та неідеального nMOS-фотозатвора наведено на рисунку 1.6, тоді як вплив проміжку

між електродами затвора на процес передачі заряду показано на рисунку 1.7. Фізична відстань між електродами затвора повинна бути невеликою відносно товщини діелектрика, щоб забезпечити ефективне зв'язування зарядів через окантовувальні електричні поля від сусідніх електродів [8].

1.3 ПЗЗ із заглибленим каналом

В звичайних ПЗЗ інтерфейсний шар між поверхневим каналом і тонким оксидом часто має кристалічні дефекти, які можуть захоплювати заряди, що призводить до втрат заряду та розмиття зображення під час передачі пакетів заряду вздовж цього інтерфейсу.

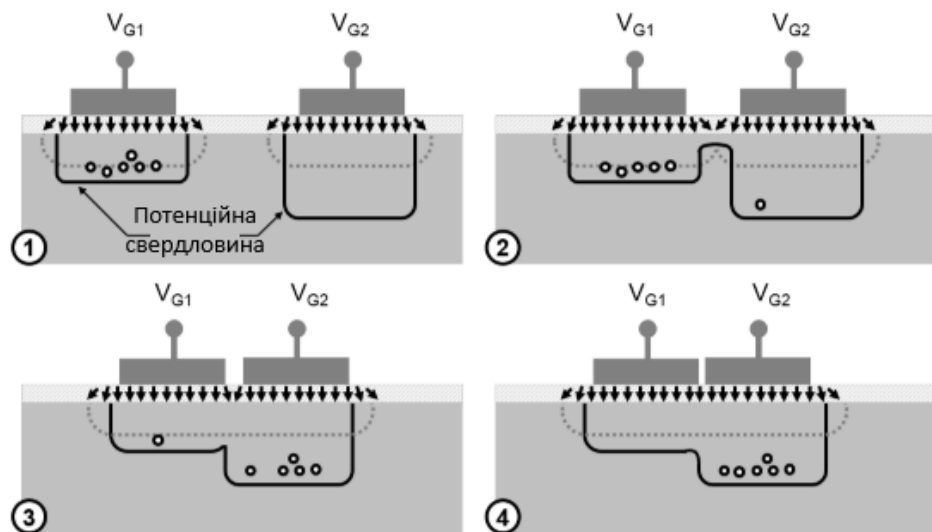


Рисунок 1.7 – Ілюстрація ефекту скорочення проміжку між двома сусідніми електродами затвора. Адаптований з роботи [8].

У ПЗЗ із заглибленим каналом, шар n-легованого кремнію розміщується поверх р-легованого шару кремнію, а між ними подається напруга зміщення, як показано на рисунку 1.8. Таким чином, область зберігання заряду "заглиблена" всередину зони виснаження. Отже, ПЗЗ із заглибленим каналом значно менше страждають від захоплених зарядів на інтерфейсі [9].

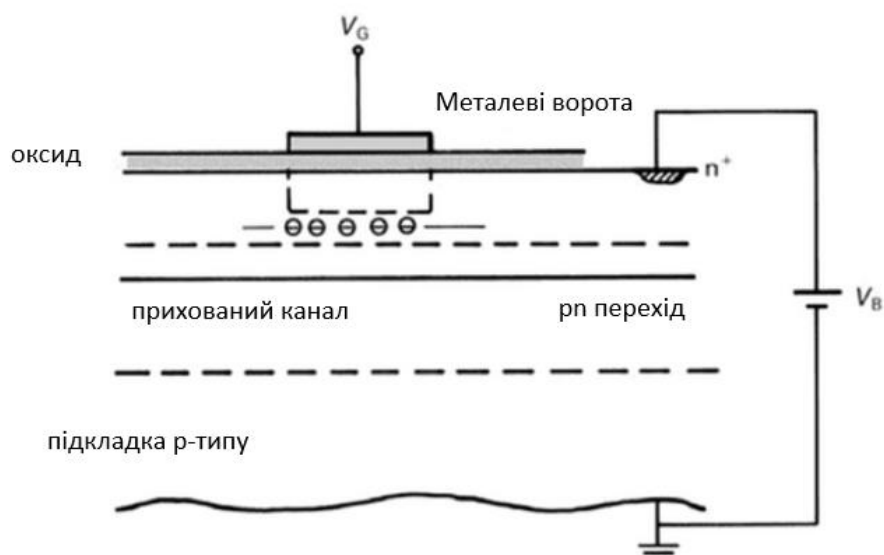


Рисунок 1.8 – Вигляд у поперечному перерізі місця зберігання в ПЗЗ-матриці із захованим каналом. Адаптований з роботи [10].

1.4 ПЗЗ з заднім підсвічуванням

У звичайних ПЗЗ світло падає на пристрій спереду, проходячи через шари електродів та проводів перед тим, як досягти світлочутливого шару. Це може призвести до втрат світла, оскільки деякі фотони поглинаються цими шарами.

ПЗЗ з заднім підсвічуванням вирішує цю проблему, **підсвічуючи** ПЗЗ ззаду. Це дозволяє світлу потрапляти на світлочутливий шар, не проходячи через електроди та шари проводів.

Хоча електроди частково пропускають світло, втрати є нерівномірними, що призводить до варіацій чутливості окремих пікселів. Для реалізації заднього підсвічування ПЗЗ-матрицю потрібно зробити тоншою (приблизно до 15 мкм) за допомогою сухого або вологого травлення. Під час виробництва кремнієву пластину також тоншать ззаду, а потім переорієнтовують розміщення проводки за світлочутливий шар. Таким чином, світло падає безпосередньо на світлочутливий шар, не взаємодіючи з електродами та проводкою [11,12].

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ

2.1 Датчики зображення на комплементарній структурі метал-оксид-напівпровідник

Сенсори КМОН, як правило, сприймають лише градації сірого (відтінки світла від чорного до білого). Щоб камера розпізнавала кольори, на кремнієву матрицю за допомогою фотолітографії наносять масив кольорових фільтрів. У сенсорах з мікролінзами ці фільтри розміщуються між лінзами та фотоприймачем.

Методи отримання кольорового зображення розрізняються в цифрових камерах з одним сенсором (більшість споживчих моделей) використовуються масиви кольорових фільтрів (CFA) для розрізнення кольорів. Виділяють три основних методи:

Мозаїчний фільтр: Кожен піксель матриці за допомогою кольорового фільтра сприймає лише один з трьох основних кольорів (RGB).

Тришаровий сенсор: Пікселі розміщуються на різній глибині кремнієвої пластини, де максимально поглинаються червоне, зелене або синє світло (світло з певною довжиною хвилі).

RGB-матриця: Розподіл на RGB-компоненти здійснюється за допомогою дихроїчних дзеркал всередині кожного пікселя, що містить три фотодіода та одну мікроліну.

Найпоширенішим типом CFA в цифрових камерах є масив Басра, розроблений компанією Kodak в 70-х роках. Ця RGB-модель розкладає кольорове зображення на червоні, зелені та сині компоненти (рис. 2.1). Фільтри розташовані в шаховому порядку, причому зелених фільтрів у два рази більше, ніж червоних або синіх. Це пов'язано з кращою сприйнятливістю людського ока до зеленого кольору. [13, 15]

КМОН-датчики – основа сучасних цифрових фотокамер. Кольорові фільтри на матриці дозволяють камері розпізнавати кольори. Існує три основних методи

отримання кольорового зображення: мозаїчний фільтр, тришаровий сенсор та RGB-матриця.

Найпоширенішим типом CFA є масив Баєра, де зелені фільтри домінують над червоними та синіми.



Рисунок 2.1 – Розміщення світлофільтрів в Баєрівській схемі. Адаптовано з роботи [14]

Масив Баєра має більше зелених фільтрів оскільки людське око більш чутливе до зеленого світла, тому в масиві Баєра використовується більше зелених фільтрів, щоб краще відповідати цій особливості. Це робить зображення більш природним та приємним для сприйняття. Шаховий порядок: Шахове розташування фільтрів гарантує, що зображення буде однаково кольоровим, незалежно від того, як ви тримаєте камеру (вертикально або горизонтально). Це важливо для отримання послідовних та якісних фотографій.

При зчитуванні інформації з сенсора з масивом Баєра кольори записуються послідовно в рядках. Перший рядок повинен бути BGBGBG, наступний - GRGRGR і т.д.

Масив Баєра застосовують у різних виконаннях різні виробники. Так Sony додала до RGB-фільтрів смарагдовий (emerald), щоб покращити передачу синьо-зелених та червоних відтінків, роблячи зображення більш природним. RGBW: Білий фільтр замінює смарагдовий. Це може трохи зменшити чіткість зображення,

але покращити його яскравість. CYGM: Використовуються блакитний, жовтий, зелений та пурпурний кольори. CYM: Тільки блакитний, жовтий та пурпурний.

Типова проблема сенсорів з масивом Баєра, а також з деякими його варіаціями, полягає в гіршій реєстрації світла в синьому та червоному діапазонах довжин хвиль. Це може призвести до спотворення кольорів, особливо в умовах низького освітлення. Масив фільтрів Баєра та його варіації є поширеними в цифрових камерах завдяки простоті, економії та відповідності сприйняттю кольорів людським оком. Однак важливо знати про можливі проблеми з реєстрацією синього та червоного світла, які можуть впливати на якість зображення.

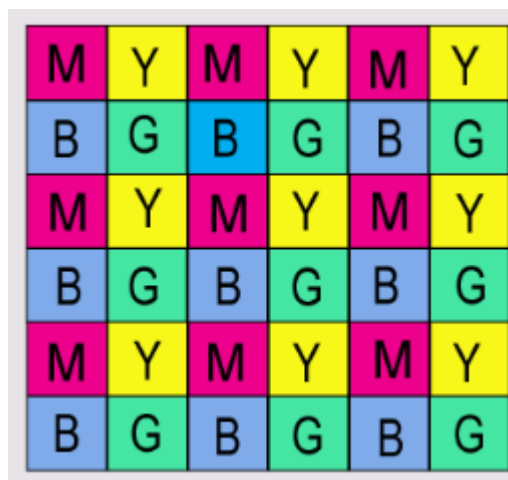


Рисунок 2.2 – CYGM-модель розміщення світлофільтрів. Адаптовано з роботи [14]

Існує два основних типи синтезу кольорів: адитивний та субтрактивний.

Адитивний синтез використовує випромінювання світла. Змішуючи у певних пропорціях червоне, зелене та синє світло, можна отримати будь-який колір. Ці три кольори, які неможливо отримати один з одного, називаються основними. Завдяки їх змішуванню утворюються всі інші, що відрізняються колірним тоном, насиченістю та яскравістю. Цей принцип ґрунтується на метамерії - здатності людського ока сприймати світло з різним спектральним складом як одного кольору. Субтрактивний синтез ґрунтується на поглинанні та відображенні світла.

Він використовує кольори барвників. Якщо за основні приймати червоний, зелений та синій, то додатковими будуть жовтий, пурпурний та ціановий (зеленоблакитний). Цю систему позначають аббревіатурою СМУ. У субтрактивному синтезі основний колір вважається додатковим до основного кольору адитивного, якщо барвник першого повністю поглинає випромінювання другого.[16]

Наприклад: червоний барвник поглинає зелене та синє світло, відбиваючи лише червоне, тому він є додатковим до синьо-зеленого (ціано) у субтрактивному синтезі. Жовтий барвник поглинає синій колір, відбиваючи червоний та зелений, тому він є додатковим до синього у адитивному синтезі.

Таким чином, адитивний та субтрактивний синтез є двома різними, але взаємодоповнюючими підходами до створення кольорів.

2.2 Параметри та характеристики датчиків зображення

Основна мета датчика зображення полягає в тому, щоб збирати, конвертувати та передавати інформацію з об'єктів навколишнього середовища до інтелектуальної системи для подальшої обробки та інтерпретації. Очевидно, що результат та можлива реакція системи залежать від обсягу переданої інформації. Проте, дискретність носіїв інформації (таких як фотони та електрони) може призвести до часткової втрати інформації. Альберт Роуз висунув ідею введення абсолютного показника якості для зорової системи, щоб оцінити якість сприйняття в широкому сенсі - як для зорових систем людини чи тварини, так і для електронних зорових систем.

Спектральний діапазон визначає діапазон частот або довжин хвиль електромагнітних хвиль, які може сприймати або відтворювати датчик або сенсор. Більшість сенсорів створені на основі кремнію і призначені для роботи з видимим випромінюванням. Коли фотони падають на кремній, електрони в кремнії

збуджуються, і ковалентний зв'язок, який утримує електрони в атомах кремнію, порушується. Кількість вивільнених електронів прямо пропорційна енергії або інтенсивності світла.

Звернімо увагу, що фотони мають мати достатню енергію, щоб розірвати ковалентні зв'язки в атомах кремнію, і тільки тоді вільні електрони (або електронно-діркові пари) з'являються. Це означає, що енергія фотонів повинна перевищувати ширину забороненої зони кремнію, яка становить 1,1 еВ. Це означає, що фотони повинні бути з видимої частини спектра (від 400 до 750 нм) або близькі до інфрачервоного (до 1100 нм) - тільки такі фотони можуть розірвати зв'язки. Тому кремній був обраний в якості основи для сенсорів фотоапаратів. Хвилі з довжиною менше 400 нм можуть бути поглинені структурою сенсора. Якщо фотони не мають необхідної енергії (зазвичай це хвилі довжиною більше 1100 нм), то вільні електрони не виникають, і фотони не спричиняють жодної реакції[17].

Кремній, який використовується у фоточутливих елементах подібних матриць, може реєструвати як видиме світло, так і ближнє інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі до 1100 нм.

ПЗЗ-матриці виготовляють також із сполук, таких як антимонід індію (InSb) та телурид кадмію-ртуті ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$). Матриці на основі InSb охоплюють діапазон довжин хвиль від 2 до 5,5 мікрометрів, тоді як матриці на основі $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ можуть покривати декілька діапазонів в залежності від відносного вмісту кадмію у сполуці: від 1 до 2,5 мікрометрів, від 3 до 5 мікрометрів та від 8 до 12 мікрометрів.

Квантова ефективність цифрової камери - це співвідношення між кількістю електронів інформаційних зарядів, які накопичуються у всіх потенціальних ямах матриці протягом певного часового інтервалу Δt , та кількістю фотонів, які були зловлені фотооб'єктивом протягом того ж самого інтервалу часу. Зменшення

квантової ефективності може бути спричинене оптичними та електричними втратами.

Просторова роздільна здатність фотоприймальної матриці визначається кількістю пікселів, які може сформувати певна матриця у цифровому зображенні. Вимірюється роздільна здатність у мегапікселях (Мп). Роздільна здатність матриці не залежить від щільності розміщення фоточутливих елементів на поверхні напівпровідникової підкладки. Таким чином, її можна підвищити, збільшуючи кількість фоточутливих елементів як за рахунок збільшення площі матриці, так і за рахунок зменшення розмірів елементів. У професійних цифрових фотоапаратах роздільна здатність може сягати 50 Мп. У цифрових камерах наукового призначення, наприклад, астрономічних, площа матриці перевищує 10 см^2 , що дозволяє отримати роздільну здатність понад 100 Мп [17].

Глибина кольору - це енергетична роздільна здатність, що визначає, скільки відтінків певного кольору може бути представлено у вихідному зображенні, а відтак, скільки рівнів яскравості предметів певного кольору може передати цифрова камера. У рентгенівських камерах, наприклад, значення прозорості предмета може бути передане у вигляді відтінків сірого кольору у чорно-білому зображенні.

При використанні великої розрядності аналого-цифрового перетворювача (АЦП) теоретично можна досягти більшої глибини кольору. Глибина кольору тісно пов'язана з глибиною пікселя, що вимірюється у бітах на піксель. Це вказує на те, скільки бітів використовується для кодування кольору одного пікселя зображення. Чим більше бітів інформації на піксель, тим більше доступних кольорів і точніше представлення кольорів. У моделі кольору RGB в комп'ютерній графіці зазвичай використовуються 24-бітні кольори, що означає, що червоний, зелений і синій кольори мають по 256 (2^8) відтінків кожен, що дозволяє відображення понад 16 мільйонів (точніше 256^3) кольорів [17].

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РЕНТГЕНОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З ЗАСТОСУВАННЯМ МАТРИЦЬ ПРИЛАДІВ З ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

3.1 Розрахунки характеристик рентгеноелектричного перетворювача на основі матриці приладів з зарядовим зв'язком

Для проведення розрахунків з використанням розробленої моделі була вибрана ПЗЗ-матриця з прямою засвіткою PI-SCX:1300 від компанії "Princeton Instruments", яка належить до серії передових рентгеночутливих приладів для наукових досліджень.

Площа світлочутливої поверхні даної ПЗЗ-матриці становить 26.8×26 мм², з кількістю пікселів 1340×1300 та розмірами пікселя $L_{py} \times L_{pz} = 20 \times 20$ мкм². Кількість електронів у комірці, що відповідає максимальному значенню амплітуди вихідного сигналу, складає 5.3×10^3 . Конструктивно матриця постачається у комплексі з оптоволоконним концентратором світла, на торці якого розташований рентгенооптичний перетворювач, що базується на шарі різних сцинтиляторів: $Gd_2O_2S(Tb)$ та $CsI(Tl)$ для різних діапазонів енергії рентгенів. Особливий інтерес представляє модифікація $CsI(Tl)$ з конверсійною ефективністю $C_{ef} = 0.06$. Нормований спектральний розподіл випромінювання цього сцинтилятора за довжиною хвилі $\phi_{ns}(\lambda)$ представлений на рис. 3.1. Залежності квантової ефективності $F(\lambda)$ від довжини хвилі світла для матриці PI-SCX:1300 показані на рис. 3.2. На рис. 3.3 представлена залежність долі поглиненого рентгенівського випромінювання $f_{abs}(E)$ від його енергії для двох модифікацій сцинтиляційного покриття $CsI(Tl)$ з берилієвим вікном товщиною 10 мм.

Через відсутність конкретних значень ємності виходу матриці C_A у довідкових даних, вихідний сигнал можна оцінити шляхом врахування накопиченого в комірці зарядового пакету. Однак для зручності використання у

розрахунках можна припустити, що ємність виходу СА становить 0.2 пФ, що є типовим значенням для багатьох фото-ПЗЗ, які згадуються в [9]. Щодо часу накопичення заряду (експозиції), доцільно обрати період кадрової розгортки $T_k = 3 \cdot 10^{-3}$ с, або його кратну величину $N_k T_k$ при використанні режиму регульованої тривалості накопичення. Значення коефіцієнтів γ та K_{opt} можна прийняти за 1 для спрощення обчислень та забезпечення однозначності.

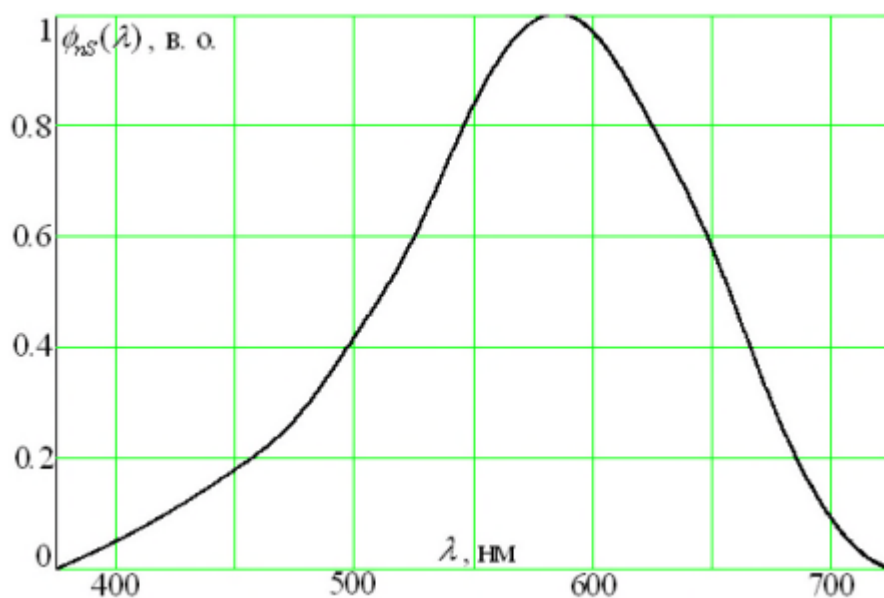


Рисунок 3.1. Нормований спектральний розподіл випромінювання сцинтилятора на основі CsI(Tl).

Зокрема, особливий інтерес представляють залежності між вихідним сигналом перетворювача та параметрами, що характеризують потік рентгенівського випромінювання. До цих залежностей належать дозові характеристики, які відображають залежність вихідного сигналу РЕП від потужності дози рентгенівського випромінювання PD на виході РА для різних матеріалів та товщин просвічуваних зразків.

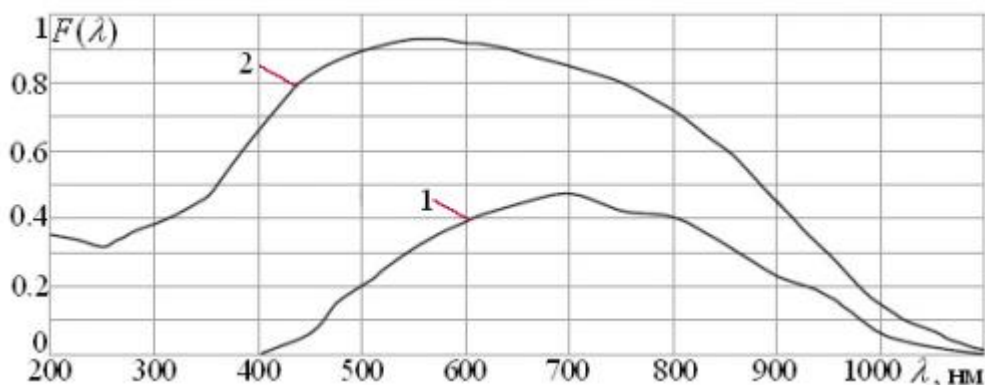


Рисунок 3.2. Залежності квантової ефективності від довжини хвилі світла матриць PI-SCX:1300 (крива 1) та PI-SCX:1300B (крива 2) з прямою та зворотною засвітками відповідно [18].

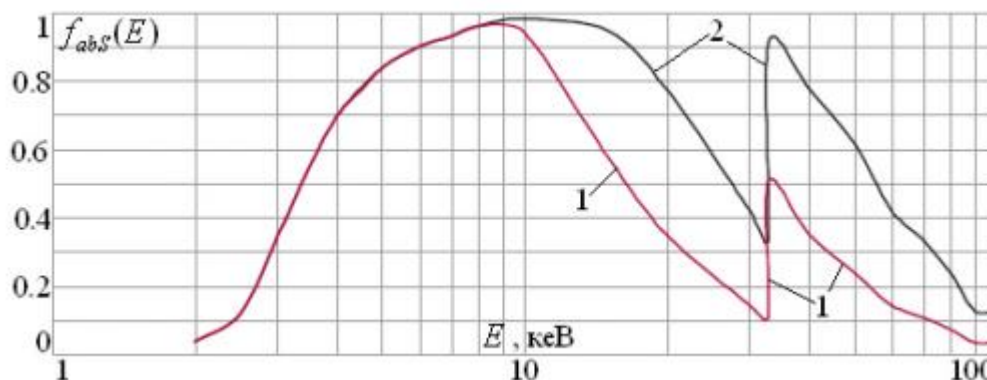


Рисунок 3.3. Залежність від енергії рентгенівських квантів доли випромінювання, яке поглинається в сцинтиляторі, для двох модифікацій сцинтиляційного покриття CsI(Tl) – для випромінювання до 8 кеВ (крива 1) та до 80 кеВ (крива 2) [18].

На рисунках 3.4 а та 3.4 б представлені наведені у [9], дозові характеристики для просвічування кремнієм та германієм відповідно, при режимі регульованої тривалості накопичення з різною кількістю кадрів накопичення. Для розрахунку первинного енергетичного спектра $N_0(E)$ використовувалися характеристики та робочі параметри трубки P_A , такі як: вольфрамовий анод, $I = 4$ мА, $\Theta = 19^\circ$, товщина вихідного берилієвого вікна $H_0 = 4$ мм, та відстань до об'єкта $r_s = 30$ см.

Потужність дози регулювалася зміною напруги на трубці до 100 кВ при сталому значенні анодного струму, що є типовим для практичних вимірювань.

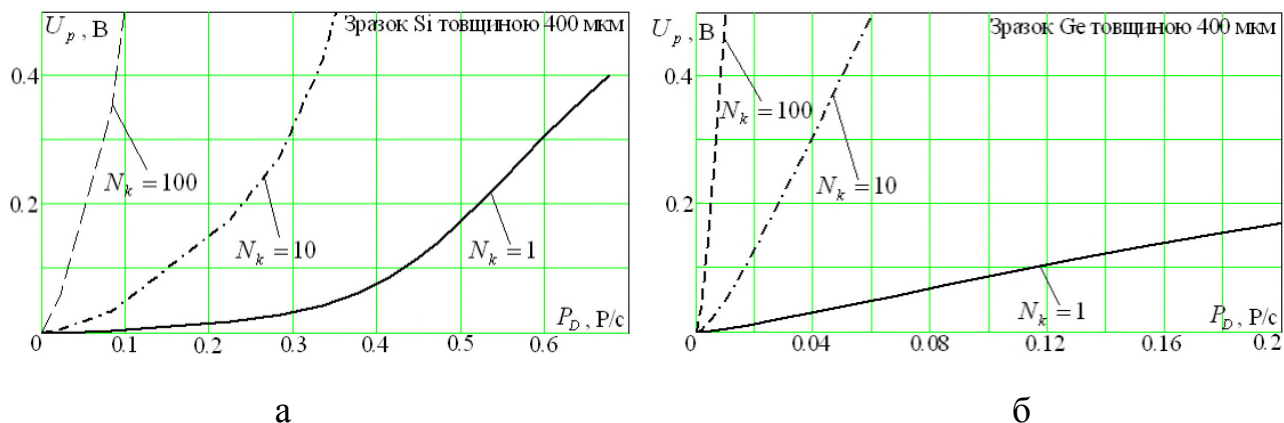


Рисунок 3.4. Залежності вихідного сигналу перетворювача від потужності дози рентгенівського випромінювання при просвічуванні зразка товщиною 400 мкм кремнію (а) та германію (б). [9]

Далі, на рисунках 3.5 а та 3.5 б представлені залежності вихідного сигналу перетворювача від напруги на аноді трубки для кремнію та германію відповідно.

3.2 Розрахунки характеристик перетворювачів на основі кремнію та германію

При подальшому аналізі функціонування перетворювача, перевага буде надаватися залежностям від анодної напруги, оскільки саме електричні параметри РА є інструментом регулювання та контролю кількісних характеристик потоку рентгенівського випромінювання. Зазначені характеристики вказують на наявність протяжних лінійних ділянок. Наприклад, для кремнію при $N_k = 1$ такі ділянки відповідають максимальній енергії рентгенівських квантів в діапазоні від 20 до 35 кеВ та понад 50 кеВ. Для германію аналогічні ділянки становлять від 40 до 50 кеВ та понад 70 кеВ. При використанні режиму регульованої тривалості накопичення відповідні характеристики мають більш круті нахили. Це вказує на

перевагу роботи з меншими дозовими навантаженнями, особливо у випадку недостатньої чутливості до режиму регульованої тривалості накопичення. Важливо зазначити, що максимальний вихідний сигнал перетворювача становить приблизно 0.5 В, тому робота на верхній межі характеристик може призвести до виходу за динамічний діапазон пристрою, що небажано через можливість нелінійних ефектів.

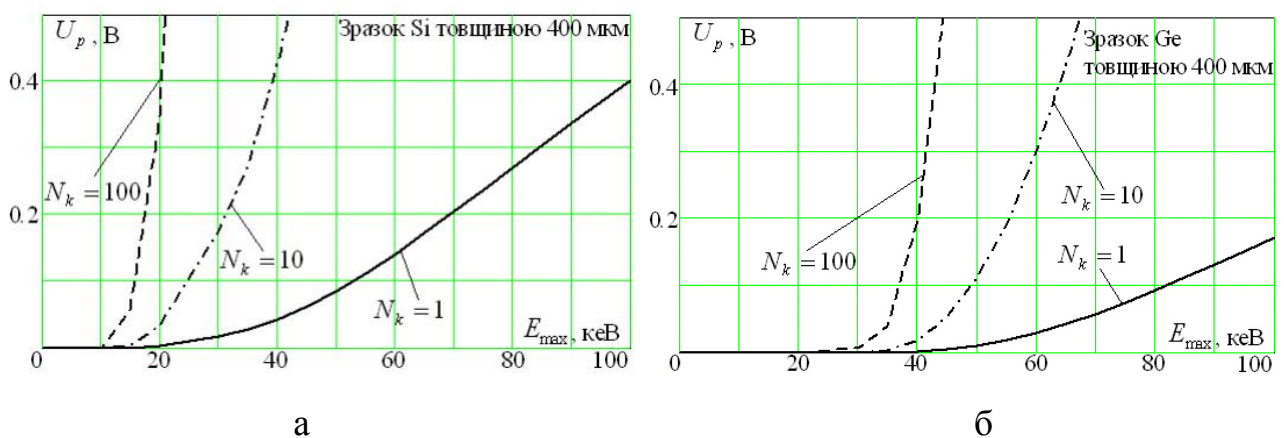


Рисунок 3.5. Залежності вихідного сигналу перетворювача від максимальної енергії рентгенівських квантів при просвічуванні зразка товщиною 400 мкм кремнію (а) та германію (б).

Ефективність дефектоскопічної системи виявлення дефектів визначається співвідношенням між величиною вихідного сигналу та рівнем шумів системи. У цьому контексті величина вихідного сигналу U_s визначається як різниця між величиною вихідної напруги, зумовленої проникненням випромінювання через дефектну ділянку зразка, та величиною, що відповідає загальному фону. Ця величина формується внаслідок наявності перепаду товщини ΔH , який представляє собою певний відсоток фонові товщини H_1 досліджуваного зразка.

$$U_s(\Delta H) = \pm U_p(H_1 \pm \Delta H) \pm U_p(H_1), \quad (4)$$

Для розглядуваної ПЗЗ-матриці PI-SCX:1300 характерний низький рівень внутрішніх шумів усіх видів. Параметр шуму, що відповідає темновому струму, зазначений у паспортній документації, становить лише десяти долі заряду електрона для цієї матриці. Шуми, що виникають під час процесу зчитування, мають рівень одиниць електронного заряду. У сучасних матрицях з об'ємними каналами переносу, які включають матрицю PI-SCX:1300, фоновий заряд непорожнього нуля зазвичай не враховується.

Як і для рентгенового випромінювання на основі рентгенових трубок, було важливим застосувати запропоновану математичну модель для отримання амплітудних характеристик розглянутого твердотілого рентгеноелектричного перетворювача у системі рентгенівської дефектоскопії для тонких зразків напівпровідникових матеріалів (Si та Ge). Ці характеристики дозволяють оцінити, як зміна товщини зразка впливає на залежність величини вихідного сигналу рентгеноелектричного перетворювача від товщини об'єкта. Для цього, так само, як у попередньому розділі, обиралися набори зразків відповідних матеріалів, які мали форму клиновидної платівки. Товщина H кожного зі зразків лінійно зростала вздовж осі Y , яка збігалася з напрямком горизонтального рядка світлочутливих комірок ПЗЗ-матриці, від $H = 0$ при $Y = 0$ до $H = H_1$ при $Y = 1$. Кожен набір для відповідного матеріалу включав платівки з різною величиною H_1 (так само, як у розділі 3 під час моделювання амплітудних характеристик рентгенових трубок). Для розрахунків та представлення їх результатів використовувався лінійний розмір пікселю ($L_{py} = 20$ мкм), а просторовий розмір (довжина) платівки був визначений як $L_{py1} = 60$. Отже, поточна товщина платівки на рівні m -тої комірки (де m – послідовність цілих чисел від 1 до 60) становила $mH_1/60$. Згідно з [18], вихідний сигнал від m -тої комірки може бути виражений таким чином:

$$U_p(m) = K_{opt} \frac{\gamma}{C_A} \frac{qL_{pz}T_k N_k C_{ef}}{hc \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{nS}(\lambda) d\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda \int_{(m-1)L_{py}}^{mL_{py}} \times$$

$$\times \int_0^{E_{max}} N_0(E) \exp\left[-\frac{\mu_1(E)yH_1}{60L_{py}}\right] f_{ads}(E) E dE dy \quad (5)$$

Тобто, загальна залежність $U(y)$ складе послідовність відповідних сигналів комірок від $m = 1$ до $m = 60$.

Характеристики амплітуди перетворювача представлені для кремнію на рис. 4.7 а та для германію на рис. 3.7 б у вигляді залежності напруги U_p на виході ПЗЗ-матриці від номера комірки в рядку m , що відображає просторову координату комірки вздовж осі Y . Відповідні входні сигнали, тобто серії залежностей товщини зразка від просторової координати, представлені на рисунках 3.6 а та 3.6 б попереднього розділу. Таким чином, вихідний сигнал розраховувався для клиновидних платівок з розмірами $H_1 = 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.6$ та 2 см для кремнію (характеристики 1, 2, 3, 4, 5 та 6 на рис. 3.6 а відповідно) та $H_1 = 0.005, 0.01, 0.015, 0.025, 0.05$ та 0.1 см для германію (характеристики 1, 2, 3, 4, 5 та 6 на рис. 4.7 б відповідно). Розрахунок вихідного сигналу проводився за таких умов: $I = 4$ мА, $E_{\max} = 50$ кеВ, $N_k = 1$, та $r_s = 30$ см.

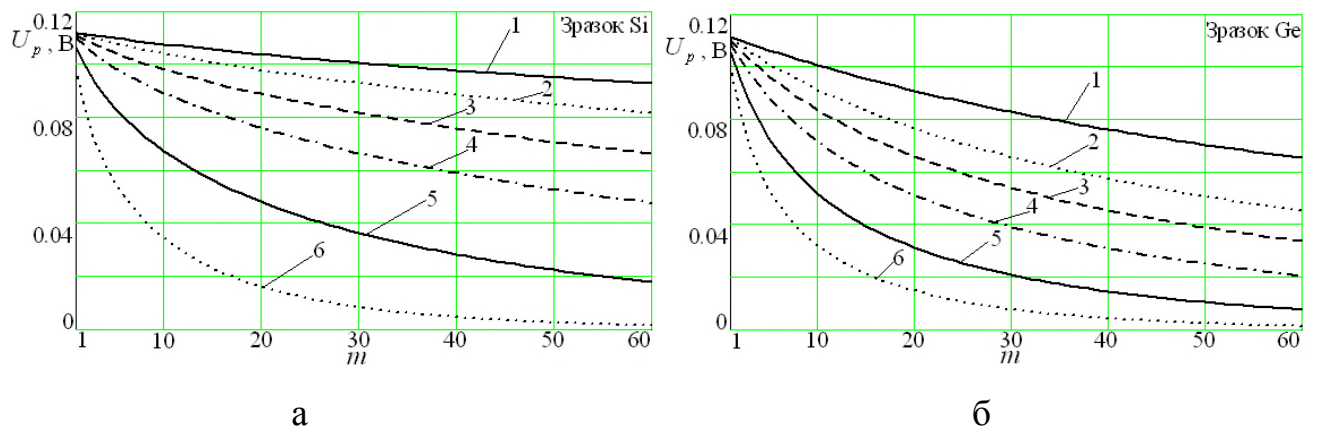


Рисунок 3.6. Амплітудні характеристики перетворювача для зразка кремнію (а) та германію (б).

Залежності вихідної напруги від просторової координати відображають лінійний характер відповідної залежності товщини зразка для кремнію до значень $H_1 = 0.1$ см і для германію до 0.01 $H_1 =$ см. Зі збільшенням значення H_1 відхилення від лінійності зростає.

На рисунках 3.7 а та 3.7 б показані узагальнені амплітудні характеристики для кремнієвих та германієвих зразків, відповідно, що відображають вплив робочих параметрів системи на амплітудні характеристики рентгеновоелектричного перетворювача. Товщина зразків змінюється від 0 до 0.1 см при різних значеннях напруги на аноді рентгенової трубки: $E_{\max} = 30, 50, 100$ кеВ.

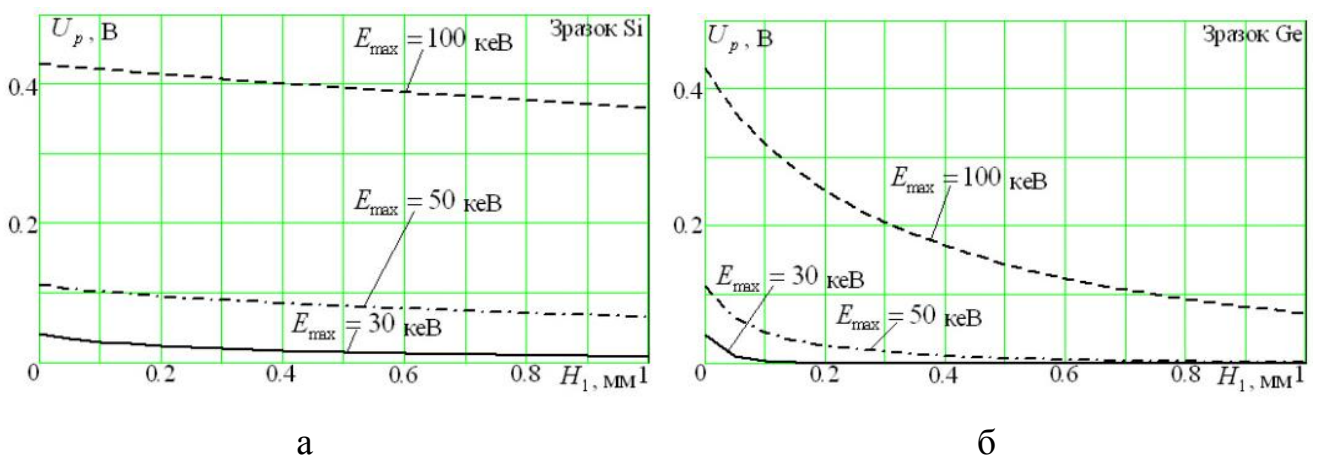


Рисунок 3.7. Узагальнені амплітудні характеристики перетворювача для зразка кремнію (а) та германію (б) при $E_{\max} = 30, 50$ та 100 кеВ.

Як і очікувалося, для зразків кремнію у досліджуваному діапазоні товщин залежності вихідної напруги від товщини зразка залишаються лінійними при всіх використаних значеннях напруги на аноді рентгенової трубки. Для зразків германію ступінь лінійності відповідних залежностей в цілому трохи гірший, але все ж таки існують досить значні ділянки, де ця залежність може бути апроксимована лінійно.

Для визначення чутливості α h РЕП на основі ПЗЗ-матриці, як і у випадку з РВ (формула (3.3)), представимо амплітудні характеристики перетворювача у такому вигляді:

$$U_{inv}(H) = U_p(0) - U_p(H) \quad (6)$$

Відповідні графіки зображені на рис. 3.8 а та б. Вони розраховані за тих самих умов, що й амплітудні характеристики, наведені вище на рис. 4.8 а та б (тобто, для зразків кремнію і германію відповідно, при напрузі на аноді рентгенівської трубки $U_A = 30, 50$ та 100 кВ, та інших аналогічних умовах).

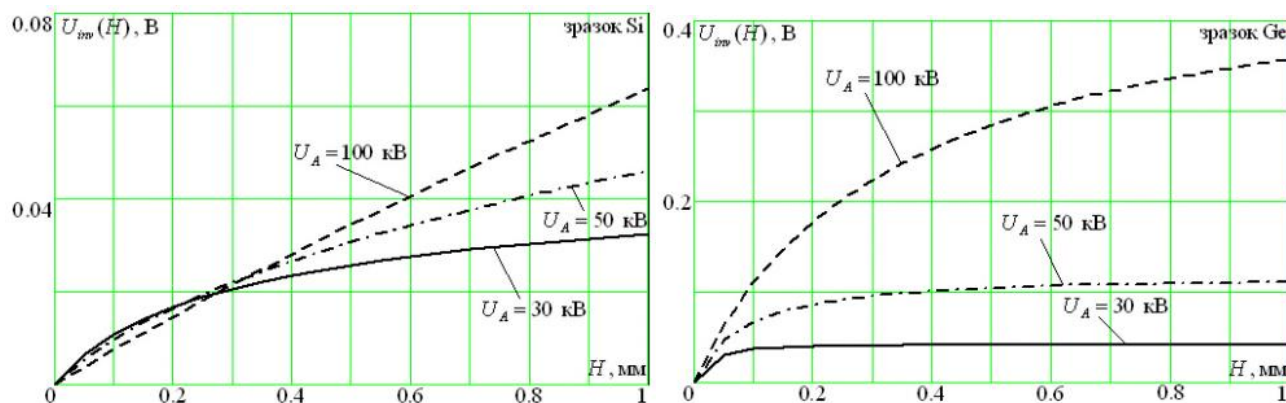


Рисунок 3.8. Амплітудні характеристики РЕП на основі ПЗЗ-матриці, розраховані за формулою (6) для зразка кремнію (а) та германію (б) при різних значеннях прискорювальної напруги.

Як видно з попередніх залежностей (рисунки 3.6 – 3.8), здатність ПЗЗ-матриць передавати просторово-частотний спектр зображення залежить насамперед від їхніх дискретних характеристик, тобто від просторових розмірів елементарної комірки (пікселя). Оскільки рентгенооптичний перетворювач на основі скінтілятора CsI(Tl), розроблений у лабораторіях Princeton Instruments і жорстко з'єднаний з матрицею, має паспортну роздільну здатність до 20 мкм, можна вважати, що результуюча ПЧХ системи визначається виключно властивостями ПЗЗ-матриці.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена аналізу двох основних типів фотоприймальних матриць: ПЗЗ-матриці та КМОН-матриці (комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник). Розвиток ПЗЗ-матриць не стоїть на місці, і тому розробляються нові конструкторські рішення, такі як Супер ПЗЗ HR та SR, для підвищення чутливості та розширення динамічного діапазону. Сучасні КМОН-фотоприймачі представляють собою приймачі з внутрішньокристальним процесором. Вони включають в себе матрицю активних фоточутливих елементів, схеми управління, аналогові підсилювачі для зчитування на виході кожного стовпчика, мультиплексор, аналого-цифровий перетворювач, блок цифрової обробки та ряд інших цифрових блоків.

Розглянуто методи формування кольорових зображень в ПЗЗ-матрицях використовують масиви фільтрів, що відповідають моделі кольорів Баєра (RGB). Серед варіацій фільтра Баєра можна виділити такі типи: RGBE, RGBW, CYGM та CYUM. В обох типах матриць, будь то ПЗЗ або КМОН, застосовується технологія кольорового зображення з використанням Foveon X3. Однак технологія повноколірної RGB матриці для КМОН має перевагу в ефективному використанні світлового потоку, бо вона забезпечує 1.5-кратне використання світлового потоку, порівняно з елементами фотосенсорів RGBW.

Результати розрахунків характеристик рентгеноелектричного перетворювача на основі матриці приладів з зарядовим зв'язком дослідження показали, що залежність вихідного сигналу РЕП від товщини зразка має лінійний характер у певному діапазоні товщин. Зі збільшенням товщини зразка відхилення від лінійності зростає. На амплітудні характеристики РЕП суттєво впливає енергія рентгеновського випромінювання. Чутливість РЕП до змін товщини зразка може бути збільшена за рахунок використання режиму регульованої тривалості накопичення заряду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. R. Janesick, Scientific charge-coupled devices. SPIE press Belling-ham, 2001, vol. 117.
2. PowerPoint lecture notes from Rochester Institute of Technology. Title: “Detectors”. Course number 1051-465, lecture CCDs [Online].
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
4. https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET#MOS_capacitor
5. J. D. Plummer, Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling. Pearson Education, 2000.
6. R. C. Neville, Solar Energy Conversion: The Solar Cell. Elsevier, 1995.
7. C. Hu, Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits. Prentice Hall, 2010.
8. PowerPoint lecture notes from King Abdullah University of Science and Technology. Title: “Integrated Image Sensors”. Course EE391A, lecture 12.
9. J.-Y. Cheng and J.-G. Hwu, “Characterization of edge fringing effect on the C–V responses from depletion to deep depletion of MOS(p) capacitors with ultrathin oxide and high- κ dielectric,” IEEE Transactions on Electron Devices, 2012.
10. M. Tompsett, “The quantitative effects of interface states on the performance of charge-coupled devices,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 20, no. 1, pp. 45–55, 1973.
11. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Back-illuminated_sensor&oldid=666467813
12. A. El Gamal and H. Eltoukhy, “CMOS image sensors,” Circuits and Devices Magazine, IEEE, vol. 21, no. 3, pp. 6–20, May 2005.
13. Fossum, Eric R.; Hondongwa, D. B. (2014). "A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors". IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2 (3): 33–43. doi:10.1109/JEDS.2014.2306412.
14. <https://www.math.utah.edu/~gustafso/f2010/digitalPhotoMatrixOperations>.

[pdf](#)

15. Fossum, Eric R. (18 December 2013). "Camera-On-A-Chip: Technology Transfer from Saturn to Your Cell Phone". *Technology & Innovation*. **15** (3): 197–209.
16. "Imaging and Sensing Technology". Sony Semiconductor Solutions Group. Sony. Archived from the original on 18 May 2020
17. Novel CMOS image sensor with a 132-dB dynamic range / D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo M. Gottardi // IEEE journal of solid-state circuits, vol. 37, N 12, dec 2002, pp. 1846–1852
18. X-ray CCD Cameras // www.roperscientific.de./index.html