

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»
УДК 681.78

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д. Писаренко
“ ____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 171 –Електроніка

Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»

на тему: «Рентгенотелевізійна система неруйнівного контролю
на основі рентгенівського екрану»

Виконав:

Студент 6 курсу, гр. ДЕ-71мп **Чичкан Антон Андрійович** _____

Науковий керівник:

Доцент, канд. техн. наук

Михайлов С.Р. _____

Нормоконтроль:

Доцент, канд. техн. наук

Чадюк В.О. _____

Рецензент:

Доцент кафедри звукотехніки
та реєстрації інформації
канд. техн. наук

Трапезон К.О. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) _____ Е л е к т р о н і к и
Кафедра _____ Електронні прилади та пристрої
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
Спеціальність (спеціалізація) –171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕПП,
проф., д.т.н.

« ____ » _____ 2018 р. Л.Д. Писаренко

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Чичкану Антону Андрійовичу

- 1. Тема дисертації «Рентгенотелевізійна система неруйнівного контролю на основі рентгенівського екрану»**
і науковий керівник дисертації Михайлов Сергій Ростиславович, доцент, к.т.н. затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. № 4114-С
- 2. Термін подання студентом дисертації:** « ____ » _____ 2018 р.
- 3. Об'єкт дослідження:** Рентгенівська система неруйнівного контролю
- 4. Предмет дослідження:** На базі порівняльного огляду науково-технічної літератури щодо типів рентгенівських екранів, фотоприймачів та їх конструктивних особливостей розробити рентгенотелевізійну систему. Роздільна здатність – щонайменше 4 пар лін./мм; Оптичний формат - 2/3"(11мм); Технологія фотоприймача – ПЗЗ; Охолодження фотоприймача – за допомогою елемента Пельт'є; Розмір робочого поля 160x120 мм.
- 5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** Огляд науково-технічної літератури по типам рентгенотелевізійних систем, рентгенівських екранів та телевізійним камерам на основі ПЗЗ; розробка функціональної та структурної схеми рентгенівської системи; розрахунки параметрів пристрою що забезпечують необхідні технічні характеристики.
- 6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**
Схема електрична принципова високочутливої телевізійної камери на основі ПЗЗ;
Функціональна схема пристрою.

7. Дата видачі завдання : 01.09.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по по типам рентгенотелевізійних систем.	03.09.2018	
2.	Огляд науково-технічної літератури по типам рентгенівських екранів та ПЗЗ матриць.	05.10.2018	
3.	Розробка функціональної та структурної схеми високочутливої телевізійної камери.	21.10.2018	
4.	Розрахунок параметрів пристрою що забезпечують необхідні технічні характеристики	03.11.2018	
5.	Виконання стартап проекту за темою магістерської дисертації	20.11.2018	
6.	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів. Підготовка доповіді	06.12.2018	

Студент гр. ДЕ-71мп

В.О. Ганін

Науковий керівник дисертації

С.Р. Михайлов

РЕФЕРАТ

Рентгенотелевізійна система неруйнівного контролю на основі рентгенівського екрану / Магістерська дисертація зі спеціальності **171–Електроніка** спеціалізації «**Електронні прилади та пристрої**». **Чичкан Антон Андрійович**. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-71мп М. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 116 с., іл. 39 табл. 17.

Короткий зміст роботи: В магістерській атестаційній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по типам рентгенотелевізійних систем та їх складових. В цей огляд входить класифікація, принцип дії, сфера застосування. Показано переваги та недоліки різних видів систем, з них була обрана найбільш сучасна та універсально-цінна цифрова рентгенотелевізійна система на основі рентгенівського екрану, що розроблюється у даній роботі.

Розроблена структурна, функціональна та електрична принципова схема, яка складається з матриці ПЗЗ, драйверів, БШК, аналогового комутатора, відеопроцесора, шинного формувача та вихідного інтерфейсу.

Представлено методику розрахунку охолоджувальної системи на основі елементу Пельт'є, згідно якої виконано розрахунки таких параметрів: потужність, необхідна для охолодження матриці, необхідне значення холодопродуктивності, тепловий опір радіатора на гарячій стороні термоелектричного модуля..

У заключній частині було створено стартап-проект згідно теми магістерської дисертації та зроблено висновки по виконаній роботі.

Ключові слова: Рентгенотелевізійна система, сцинтиляційний екран, ПЗЗ, елемент Пельт'є, телевізійна камера.

А Н О Т А Ц І Я

В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по рентгенотелевізійним системам та сучасним засобам реалізацій рентгенівського неруйнівного контролю. Розглянуто сфери використання та перспективи розвитку таких пристроїв в промисловості.

Описано принцип дії цифрової рентгенотелевізійної системи на основі рентгенівського екрану. Розроблено схему керування та обробки сигналу ПЗЗ матриці. Розглянуто схемотехнічні особливості та параметри кожного елементу схеми пристрою, що розробляється. Наведена порівняльна характеристика сцинтиляційних екранів. Показано, що при використанні сучасної ПЗЗ матриці та сцинтиляційного екрану з високим світловиходом, рентгенотелевізійна система має достатню чутливість і роздільну здатність для якісного виконання неруйнівного контролю виробів. Розроблено стартап проект.

S U M M A R Y

In the master's dissertation the review of scientific and technical literature on X-ray television systems and modern means of realization of X-ray non-destructive control is presented. Areas of use and prospects of development of such devices in industry are considered.

Described the principle of operation of the digital X-ray television system on the basis of the X-ray screen. The scheme of control and processing of the CCD signal matrix is developed. The schematic features and parameters of each element of the scheme of the developed device are being considered. The comparative characteristic of scintillation screens is given. It is shown that when using a modern CCD of a matrix and a scintillation screen with a high luminosity, the X-ray television system has sufficient sensitivity and resolution for the qualitative performance of non-destructive product control. A startup project is being developed.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ ВИЩОЇ ОСВІТИ
СТУДЕНТА КАФЕДРИ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ТА ПРИСТРОЇВ
ФАКУЛЬТЕТУ ЕЛЕКТРОНІКИ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Чичкана Антона Андрійовича

НА ТЕМУ: **«Рентгенотелевізійна система неруйнівного контролю
на основі рентгенівського екрану»**

Київ – 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
1. СУЧАСНІ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ	10
1.1 Рентгенографічні системи	11
1.2 Рентгенотелевізійні системи	15
1.2.1 Рентгенотелевізійні системи з прямим перетворенням зображення	18
1.2.2 РТВС на основі рентгеночутливих твердотільних приладів.....	18
1.2.3 РТВС на основі детекторів рентгенівського випромінювання SID – A50	21
1.2.4 Рентгенотелевізійні системи з непрямим перетворенням зображення	23
1.3.1. РТВС на основі підсилювачів рентгенівського зображення	23
1.3.2 РТВС з рентгенівськими екранами та високочутливими перетворювачами світло-сигнал.....	25
Висновки до першого розділу.....	29
2 СУЧАСНІ СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ЕКРАНИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	30
2.1 Загальні відомості про сцинтиляційні екрани для цифрової радіографії	30
2.2 Порівняльна характеристика цифрових радіографічних систем.	31
2.2.1 Порівняння характеристик сцинтиляторів.....	33
2.2.2 Сцинтилятори на основі селеніду цинку	37
2.3 Оптимізація параметрів сцинтиляційних панелей	38
2.4 Технологія виготовлення багатоелементних сцинтиляційних збірок... ..	47
Висновки до другого розділу	50

					МРП.171.071.021 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>“Рентгенотелевізійна система неруйнівного контролю на основі рентгенівського екрану”</i>	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Чичкан А.А.						7	128
Перевір.		Михайлов С.Р.				<i>КПІ ім.Сікорського</i>			
Реценз.		Трапезон К.О.							
Н. Контр.		Чадық В.О.							
Затверд.		Писаренко Л.Д.							

3	СУЧАСНІ ПЗЗ МАТРИЦІ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЧУТЛИВОСТІ	51
3.1	Принцип дії ПЗЗ матриці	51
3.2	Типи твердотільних фотоприймачів.....	54
3.2.1	Матричні ПЗЗ з кадровим перенесенням.....	54
3.2.2.	Матричний ПЗЗ із рядковим перенесенням	57
3.2.3.	Матричні ПЗЗ з рядково-кадровим перенесенням	58
3.3	Підвищення чутливості камер на ПЗЗ.....	59
3.4.	Шум в ПЗЗ камерах.....	61
3.5	Цифрові камери CSDU з охолодженням ПЗЗ матриці	64
	Висновки до третього розділу	67
4	ЕЛЕМЕНТИ ПЕЛЬТ'Є	68
4.1.	Ефект Пельт'є	68
4.2.	Модулі Пельт'є.....	73
5	РОЗРАХУНОК ДОЦІЛЬНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЗЗ МАТРИЦІ	77
5.1.	Відношення сигнал/шум в ПЗЗ матрицях	77
5.2.	Вплив охолодження ПЗЗ матриці на чутливість РТВС	80
	Висновки до п'ятого розділу	87
6	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТУ ПЕЛЬТ'Є.....	88
	Висновки до шостого розділу.....	95
7	РОЗРОБКА ВИСОКОЧУТЛИВОЇ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ	96
7.1	Розробка структурної схеми	96
7.2	Розробка функціональної схеми.....	97
7.3	Вибір і обґрунтування елементної бази.....	100
7.4	Розробка принципової електричної схеми	101
	Висновки до сьомого розділу	109
8	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	110
	Висновки	120
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	122
	Додаток А.....	128

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РТВС - рентгенотелевізійна система

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком

ЕПП – електронно-променеві прилади

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

МКП – мікроканальна пластина

РВ – рентгеновідікон

ЕОП – електронно-оптичний перетворювач

ПРЗ – підсилювач рентгенівського зображення

ЦР – цифрова радіографія

ТГ – тактуючий генератор

ВП - відеопроцесор

АК – аналоговий комутатор

ПКВ – подвійна корелятивна вибірка

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема

ШФ – шинний формувач

USB – universal serial bus (універсальна послідовна шина)

1. СУЧАСНІ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ

При радіаційному контролі найпоширеніші методи рентгенографії і рентгеноскопії, що використовують для просвічування об'єктів рентгенівське випромінювання. Рентгенографія здійснюється шляхом перетворення потоку рентгенівського випромінювання, що пройшло об'єкт контролю, у рентгенографічний знімок на рентгенівській плівці або фотопапері. Забезпечуючи високі чутливість та роздільну здатність контролю, рентгенографія має істотні недоліки – низьку продуктивність і високу вартість контролю через використання рентгенівської плівки на основі срібла.

Рентгеноскопія, заснована на перспективі рентгенівських зображень контрольованих об'єктів і світлові, дозволяє більш ніж на порядок підвищити продуктивність і знизити вартість контролю, причому аналіз зображень може проводитись безпосередньо в процесі контролю. В даний час рентгеноскопія найчастіше здійснюється за допомогою рентгенотелевізійних систем (РТВС), що представляють собою сукупність оптичних, електронно-оптичних, телевізійних, електронних аналогових і цифрових пристроїв. Такі системи дозволяють значно поліпшити якість рентгенівських зображень за рахунок використання аналогових і цифрових методів обробки зображень і відкривають можливість створення автоматизованих систем неруйнівного контролю. Маючи перераховані переваги, РТВС поступаються методу рентгенографії по відносній чутливості контролю, діапазону контрольованих товщин об'єктів і роздільній здатності. Очевидні переваги твердотільного телебачення та серійне освоєння приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) обумовлюють їх все зростаючу поширеність у більшості РТВС. Традиційні передавальні електронно-променеві прилади (ЕПП) рентгенівського й оптичного діапазонів випромінювання використовуються в основному в

специфічних випадках. Рентгенівські комп'ютерні томографи є унікальним та досить складними системами, які в даній роботі розглядаються коротко.

1.1 Рентгенографічні системи

При рентгенографічному контролі протягом багатьох років як детектори для одержання й запису зображень використовуються рентгенографічні плівки. На сьогоднішній день у світі для промислової дефектоскопії використовується досить велика номенклатура рентгенографічних плівок різних виробників. Найбільше поширення одержали рентгенографічні плівки наступних фірм: КОДАК (США, Франція); Агфа-гевард (Бельгія); ФУДЖИФІЛЬМ (Японія); ПО «ТАСМА» (Татарстан); ФОМА (Чехія); ПО «СВЕМА» (Україна).

Незважаючи на те, що процес рентгенографічного контролю з використанням рентгенографічних плівок дорогий через велику витрату срібла, тривалого часу хіміко-фотографічної обробки рентгенограм, часу експозиції й інших факторів, такий рентгенографічний контроль існував і ще багато років буде застосовуватись в промисловій дефектоскопії зварних з'єднань і металоконструкцій [4].

В процесі переходу на цифрові системи стала досить розповсюдженою оцифровка рентгенограм. При цьому для перетворення рентгенграми в цифрову форму її або сканують мікроденситометром, або перетворюють за допомогою телевізійної системи, або сканують за допомогою лазерного пристрою або лінійного матричного детектора [11, 14, 17].

Телевізійні системи високої чіткості, як правило, мають локальну роздільну здатність 0,1% робочого поля, так що при розмірі знімка 250×250 мм розмір елемента зображення складе 0,25 мм, що набагато вище власної нерізкості високоякісного рентгенівського знімка.

Лазерні скануючі системи можуть досить швидко знімати інформацію із плівок великої площі. Так, одна із систем при часі сканування 30с (плівка

35,5×43,2 см) має просторову роздільну здатність 0,07 мм, а за час 50 с – 0,035 мм на половині вказаної площі [14].

Слід відзначити, що цифрова обробка зображень не в змозі повністю компенсувати погіршення якості знімка, викликане порушенням технології контролю. Для одержання оптимальних результатів неодмінне дотримання всіх відомих правил підвищення якості знімка.

До рентгенографічних можна віднести системи де перетворювачем випромінювання є люмінесцентний рентгенівський екран, що має здатність до запам'ятовування зображення. Він складається з полімерної плівки-основи покритої органічною зв'язуючою речовиною з імпантованими зернами люмінофору. Власне кажучи цей екран виконує ту ж функцію, що і рентгенівська плівка при звичайній рентгенографії, запасаючи енергію іонізуючого випромінювання в процесі експонування і тим самим формуючи приховане зображення, що здатне зберігатися тривалий час (до 6 год). Важливо те, що його можна використовувати в тих самих системах що і рентгенівську плівку.

Проявлення прихованого зображення відбувається під дією видимого або інфрачервоного випромінювання. Найчастіше це здійснюється шляхом сканування екрана променем гелій-неонового (He-Ne) лазера (рис. 1.1) з довжиною хвилі 633 нм і апертурою променя 0,05 – 0,2 мм. Під дією лазерного випромінювання відбувається звільнення акумульованої в екрані енергії у вигляді спалахів світла - фотостимульованої люмінесценції (ФСЛ). Ці спалахи за допомогою світловодів генерують на виході фотоелектронного фотопомножувача аналогові електричні сигнали, які перетворюються аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) у цифрові сигнали. Після обробки на комп'ютері цифрові сигнали за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) знову перетворюються в аналогові сигнали, що модулюють інтенсивність електронного променя дисплея. Приховане зображення, що залишилось на екрані з люмінофором, стирається шляхом

засвічування екрану потужним пучком видимого світла, після чого екран можна багаторазово використовувати знову.

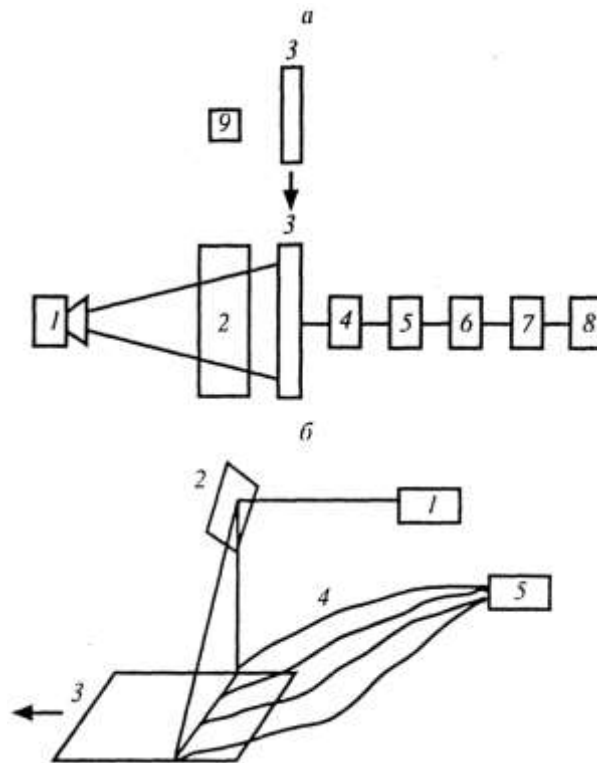


Рис. 1.1 Структурна схема системи на основі запам'ятовуючих люмінофорів:

а – загальна блок-схема системи; 1 – джерело випромінювання, 2 – об'єкт дослідження, 3 – запам'ятовуючий екран, 4 – пристрій для зчитування (лазерний сканер), 5 – АЦП, 6 – комп'ютер, 7 – ЦАП, 8 – дисплей або принтер, 9 – джерело світла для стирання зображення;

б – схема пристрою для зчитування, 1 – лазер, 2 – обертове дзеркало, 3 – запам'ятовуючий екран (суцільна стрілка вказує напрямок його руху), 4 – волоконні світловоди, 5 – фотоелектронний помножувач.

Типовим екраном, що має пам'ять до випромінювання, є шар люмінофора із галогеніду барію, активованого європієм ($\text{BaBr} : \text{Eu}^{2+}$ або $\text{BaFBr} : \text{Eu}^{2+}$ [11, 14]) зі зв'язувальною речовиною, що нанесена на пластину. Також промислово придатними речовинами для запам'ятовуючих люмінофорів є $\text{Ba}_2\text{GeO}_4\text{Br}_6\text{Eu}^{+2}$ та $\text{Y}_2\text{SiO}_5\text{Ce}^{+3}$ [17]. З екрана розміром 40×30 см за час близько 1 хв. може бути зчитане зображення з розміром матриці

2000×2000×8 біт. Інформація яка залишається на сигнальній пластині стирається за допомогою засвічення потужною галогенною лампою.

Системи даного типу лінійні в діапазоні $1:10^4$, а їх роздільна здатність в основному визначається товщиною люмінофорного шару екрана та апертурою зчитуючого лазерного променя [14]. Так, наприклад, роздільна здатність однієї із систем, що використовує лазерний зчитуючий пристрій, типу "Digiscan", становить 5 пар ліній/мм при зчитуванні зображення з екрана форматом 18×24 см й 2,5 пар ліній/мм при зчитуванні зображення з екрана форматом 35×3 см. При цьому інформаційна ємність відліків становить 10 біт.

Основними перевагами запам'ятовуючих люмінофорів перед рентгенівськими плівками є:

- Вищий динамічний діапазон
- Вища чутливість
- Можливість повторного використання
- Відсутність обробки рідкими хімікатами

Основним недоліком запам'ятовуючих люмінофорів є нижча, порівняно з плівкою, просторова роздільна здатність.

1.2 Рентгенотелевізійні системи

Рентгенотелевізійні системи (РТВС) забезпечують високу оперативність та знижену, порівняно з рентгенографією, вартість контролю, дають можливість спостерігати динаміку процесів. У даний час для неруйнівного контролю в промисловості застосовуються різні РТВС, структурні схеми яких наведені на рис 1.2 [9].

У структурі рис 1.2,а перетворювачем рентгенівського випромінювання в оптичне є рентгенівський люмінесцентний екран або монокристалічний перетворювач. Через низьку яскравість світіння екрана як перетворювач світло - сигнал використовуються високочутливі передавальні ЕПП типу ізокон, супервідикон, кадмікон, харпікон, кремнікон, а також ПЗЗ – матриці з підвищеною чутливістю або інші типи високочутливих твердотільних перетворювачів світло – сигнал. Такі РТВС забезпечують неруйнівний контроль об'єктів, що рухаються зі швидкістю до 4м/хв., у широкому діапазоні товщин по сталі (до 40 мм) з відносною чутливістю 2,5÷3% і роздільною здатністю 2÷4 пар ліній./мм.

У структурі рис 1.2,б для підвищення освітленості на вході перетворювача світло – сигнал використовується підсилювач світла. Як підсилювачі світла застосовуються електронно-оптичні перетворювачі (ЕОП), а також підсилювачі на мікроканалних пластинах (МКП). Як перетворювач світло – сигнал у таких РТВС використовуються передавальні ЕПП, а також ПЗЗ – матриці та інші типи твердотільних перетворювачів світло – сигнал. Параметри таких систем приблизно відповідають параметрам РТВС із екраном (рис. 1.2,а).

До переваг РТВС рис. 1.2,а та рис 1.2,б можна віднести можливість заміни рентгенівського екрана, що дозволяє підбирати необхідні параметри й характеристики РТВС (розмір робочого поля, спектральну характеристику чутливості, роздільну здатність і т.д.).

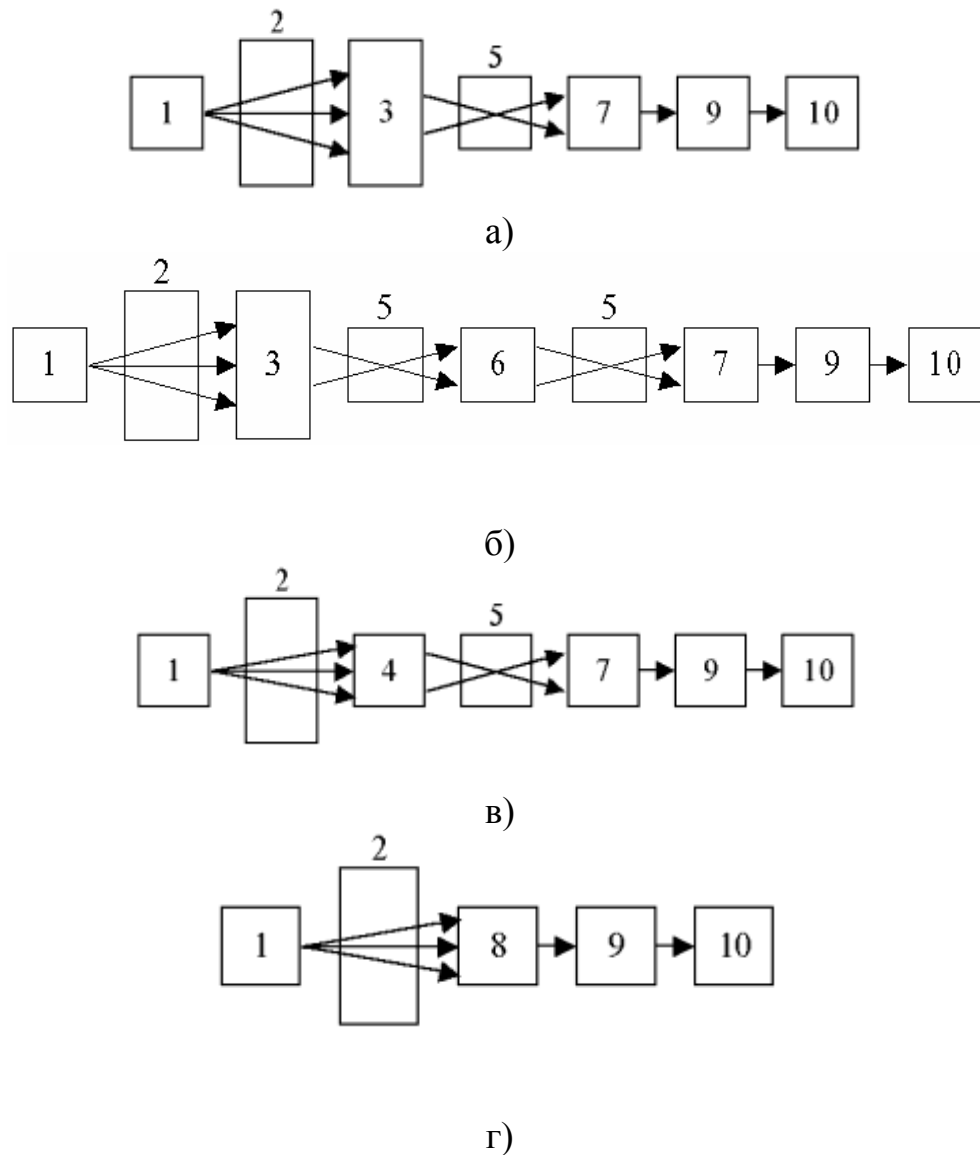


Рисунок 1.2 Структурні схеми рентгеноскопічних систем:
 1-рентгенівський апарат; 2-досліджуваний об'єкт; 3-рентгенівський люмінесцентний екран або монокристалічний перетворювач; 4 - рентгенівський електронно-оптичний перетворювач (РЕОП); 5-оптична система; 6-підсилювач світла (ЕОП); 7- перетворювач світло-сигнал; 8- рентгеновідикон або його твердотільний аналог; 9-телевізійна система; 10-відеоконтрольний пристрій.

У структурі рис. 1.2,в перетворювачем рентгенівського випромінювання в оптичне є рентгенівський електронно-оптичний перетворювач (РЕОП), що одночасно виконує функції підсилювача яскравості рентгенівських зображень. Як перетворювач світло-сигнал у таких РТВС використовуються передавальні ЕПП і твердотільні перетворювачі світло-сигнал. РТВС із РЕОП застосовуються для контролю в динаміці виробів зі сталі товщиною до 40 мм,

що рухаються зі швидкістю до 3 м/хв. Відносна чутливість контролю таких РТВС становить 2÷3%, роздільна здатність — від 2-х до 4-х пар лін./мм.

Як оптичні системи РТВС рис. 1.2,а – рис. 1.2,в застосовуються світлосильні лінзові тандемні об'єктиви коліматорного типу, що забезпечують малий рівень втрат світла при переносі зображення. Відносний отвір таких об'єктивів становить 1:0,95÷1:0,68. У деяких РТВС використовуються світлосильні дзеркально-лінзові об'єктиви.

Як оптичні системи РТВС останнім часом широко застосовуються оптоволоконні з'єднувачі і планшайби, що дозволяють мінімізувати втрати світла й зберегти високу просторову роздільну здатність при переносі зображення. До недоліків оптоволоконних з'єднувачів варто віднести неможливість регулювання світлового потоку, що надходить на вхід перетворювача світло-сигнал [19].

У РТВС із рентгенівським екраном і РЕОП (рис. 1.2,а – рис. 1.2,в) тіньове рентгенівське зображення перетвориться в оптичне, котре потім перетвориться в електричний сигнал (*непряме перетворення*). Непряме перетворення застосовується в діапазоні енергій, де безпосередня реєстрація неможлива. Отже, перевагами непрямого перетворення є широкий енергетичний діапазон (від ~5 кеВ до жорсткого рентгенівського діапазону), та високий радіаційний захист перетворювача, що є особливо важливим у випадку застосування твердотільних сенсорів [19, 30]. Недоліком непрямого перетворення є втрата просторово-часової й градаційної інформації про досліджуваний об'єкт, що призводить до зниження чутливості контролю й роздільної здатності.

У системі рис. 1.2,г тіньове рентгенівське зображення перетворюється безпосередньо в електричний сигнал за допомогою рентгеночуйливих передавальних ЕПП — рентгеновідиконів або їх твердотільних аналогів (*пряме перетворення*). За рахунок цього такі РТВС мають більш високі рентгенотехнічні параметри, ніж системи з екраном і РЕОП.

1.2.1 Рентгенотелевізійні системи з прямим перетворенням зображення

Прямим перетворювачем рентгеновського зображення в електричний сигнал є рентгеновідикон (РВ) або його твердотільний аналог. РТВС з прямим перетворенням показані на рис. 1.2,г, забезпечують високу відносну чутливість контролю (1,5%) і високу роздільну здатність (до 25 пар лін./мм). Завдяки високій роздільній здатності, такі системи є основою для побудови рентгенотелевізійних мікроскопів.

1.2.2 РТВС на основі рентгеночутливих твердотільних приладів

Останнім часом в РСС в якості перетворювачів світло-сигнал, наряду з передавальними ЕПП, застосовуються їх твердотільні аналоги – матриці ПЗЗ. Цьому сприяє удосконалення ПЗЗ-матриць, яке йде по шляху збільшення кількості фоточутливих елементів, зменшення темного струму, шумів і кількості дефектів, розширення динамічного діапазону і спектрального діапазону чутливості. Зараз розроблені матриці з кількістю елементів по горизонталі і вертикалі, що перевищує 2000, і розмірів елементів 2-3 мкм. В таблиці 1.3 приведені параметри деяких сучасних матриць ПЗЗ. Як видно з таблиці матриці ПЗЗ поступаються роздільній здатності передавальним ЕПП (таблиці 1.1, 1.2).

Таблиця 1.3 Параметри сучасних матриць ПЗЗ

Тип матриці ПЗЗ	Фірма, країна	Оптичний формат	Кількість елементів матриці	Розміри елемента, мкм	Чутливість, В/лк, (електрон/лк)	Динамічний діапазон, дБ
HDCS-1100	Hewlett Packard, США	1/2"	352x288	-	1,3	60
HDCS-2100		1/2"	640x480	-	1,1	60

TC 255P	Texas, Instruments, США	1/4"	336x244	10x10	0,38	66
TC 241		2/3"	780x488	11,5x27	0,15	60
TC 281		2/3"	1036x1010	8x8	0,24	60
5403-01	Hamamatsu, Японія	1/3"	752x582	6,5x6,25	-	60
7500-11		1/2"	752x582	8,6x8,3	-	60
3077-01		2/3"	756x581	11x11	-	60

Продовження таблиці 1.3

FT17P	Philips, Голландія	2/3"	942x576	22x9	0,3	70
ICX-429ALL	SONY, Японія	1/2" EXview HAD CCD	752x582	8,6x8,3	-	60

Поступаються ПЗЗ-матриці і по радіаційній стійкості. Відікони з стебнітовою мішенню можуть працювати без виявлення радіаційних ефектів при дозі опромінення 10^7 - 10^8 Р, в той час як поглинута доза рентгенівського випромінювання, при якій починають проявлятися радіаційні ефекти, складає приблизно 10^5 Р. Основними ефектами, що приводять до деградації матриць ПЗЗ, являються накопичення фіксованого просторового заряду в об'ємі діелектрика, створення швидких поверхневих станів на границі розподілу діелектрик-напівпровідник і створення центрів генерації-рекомбінації в області напівпровідника. Перечислені ефекти приводять до зміни таких параметрів ПЗЗ-матриць, як темновий струм, ефективність переносу заряду, квантова ефективність і порогова напруга перемикання МОН-транзисторів.

В прямому методі датчики на ПЗЗ можуть використовуватись для безпосередньої реєстрації м'якого (до 20 кеВ) рентгенівського випромінювання [19, 30]. Один рентгенівський фотон за рахунок своєї

великої енергії може створити у ПЗЗ-сенсорі сотні електронно-діркових пар. Пряме перетворення забезпечує високу просторову роздільну здатність (порівняну з розміром пікселя) та високу квантову ефективність в певному енергетичному діапазоні (до 20 кеВ). Недоліками прямого перетворення є: мала квантова ефективність для фотонів з енергіями понад 20 кеВ, відносно мала площа зображення (більшість ПЗЗ-сенсорів мають активну площу не більше (50×50) мм², яка є малою порівняно з листами фотографічної плівки) та пошкодження ПЗЗ при експозиції великими дозами рентгенівського випромінювання. Вплив іонізуючих випромінювань на ПЗЗ найбільш критично позначається на неефективності переносу заряду, зсуві напруги плоских зон (або граничної напруги) та темновому струмі. Існують спеціальні методи які значно підвищують радіаційну стійкість ПЗЗ-структур: використання ПЗЗ з об'ємним переносом заряду; використання діелектричних шарів з нітриду кремнію Si₃N₄ або окису кремнію SiO, замість SiO₂; охолодження ПЗЗ; корекція неефективності переносу заряду при наступній комп'ютерній обробці зображення [19]. У застосуваннях, що потребують високу радіаційну стійкість детекторів, доцільніше використовувати РВ. Для прямого перетворення часто використовуються наступні типи ПЗЗ:

- ПЗЗ з частково непокритою електродною структурою (наприклад, ПЗЗ з віртуальною фазою);
- ПЗЗ з освітленням зі зворотнього боку підложки;
- біполярні ПЗЗ

В [11] повідомляється про розробку нового покоління твердотільних плоских панелей детекторів (ППД), які працюють на основі матриць із використанням аморфного кремнію або телуриду кадмію (CdTe). Ці панелі мають розмір 244×163 мм, а кількість пікселів - 1920×1280. Безпосереднє перетворення енергії рентгенівських квантів в електричний сигнал (відсутність ланцюжка рентгенівський квант - світло - електричний сигнал)

забезпечує в цих системах кращу роздільну здатність у порівнянні із системами, у яких застосовуються оптичні перетворювачі інформації.

1.2.3 РТВС на основі детекторів рентгенівського випромінювання SID – А50

Детектор рентгенівського випромінювання SID – А50 представляє собою детектор третього покоління від компанії Pony Industry та Hamamatsu Photonics. На відміну від інших детекторів непрямого перетворення SID –А50 не має сцинтилятора, а отже, відсутнє перетворення рентгенівського випромінювання в світло. Камера використовує напівпровідниковий компаунд з телура кадмію (CdTe) в якості приймальної поверхні. Цей напівпровідниковий матеріал генерує електричний сигнал відповідно до дози випромінювання, що надходить на нього. Він володіє унікальними характеристиками, що дозволяє усунути проблеми, що виникають при використанні інших детекторів.

При усуненні ланки сцинтилятора з ланцюжка перетворення рентгенівського випромінювання зображення стає більш чітким, а ефективність перетворення більш високою (рис. 1.3). У порівнянні зі своїми попередниками – детекторами непрямого перетворення - SID – А50 демонструє чітку деталізацію.

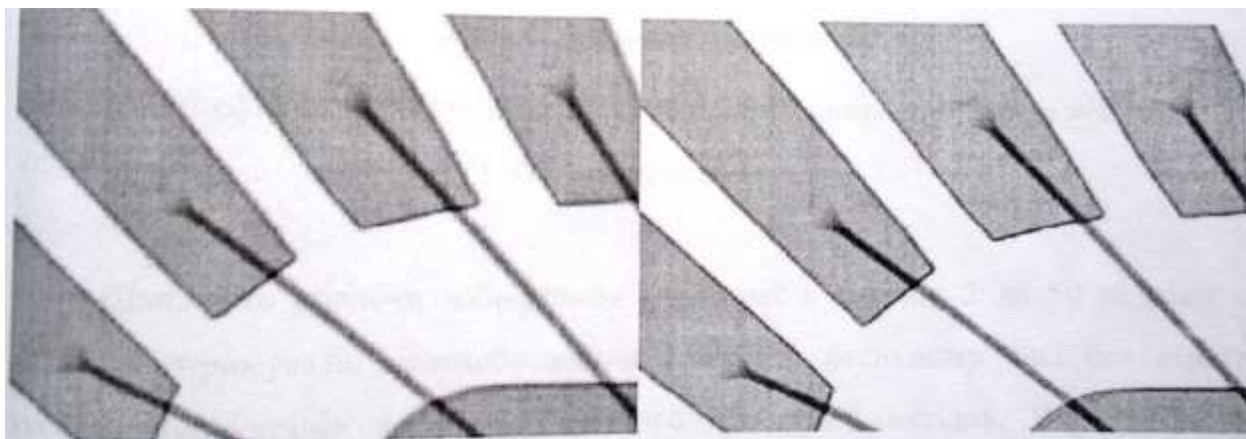


Рис. 1.3 Порівняння зображень КМОП – детектора та SID – А50

Так як в SID – А50 не використовується сцинтилятор, він не має таких проблем, як розсіювання світла і ефект «випалювання», властиві детекторам непрямого перетворення. На рис. 1.4. показаний коефіцієнт екранування рентгенівського випромінювання кристалом телуриду кадмію (CdTe) товщиною 1 мм. Як і у випадку з КМОП – фотодіодом, зчитувальна електроніка SID – А50 (ASIC), так само вразлива до впливу рентгенівського випромінювання. Тим не менш детектори з покриттям з телуру кадмію володіють видатним коефіцієнтом екранування (більше 99% при напрузі 120кВ), що істотно зменшує пошкодження електроніки, що наноситься рентгенівським випромінюванням. Це, в свою чергу, значно знижує швидкість зростання рівня чорного в кінцевому зображенні.

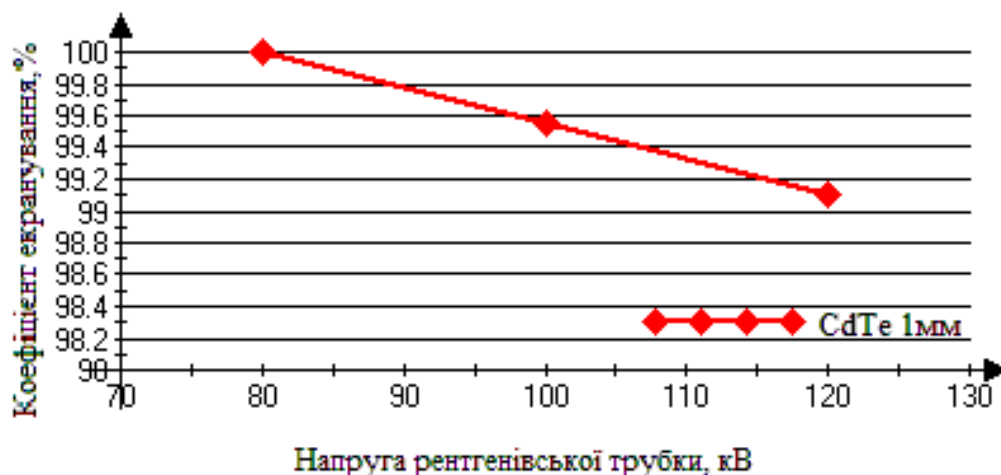


Рис.1.4 Коефіцієнт екранування рентгенівського випромінювання кристалом CdTe товщиною 1 мм

Швидкість обробки зображення в режимі 1×1 від 2 до 50 кадрів / с дозволяє отримувати відео зображення об'єкта в реальному часі без втрати якості. Експлуатація детектора третього покоління вигідна. Висока якість зображення, практично незмінна з плином часу, дозволяє вирішувати найскладніші завдання дефектоскопії. А тривалий термін експлуатації знизить затрати на технічне обслуговування системи.

У порівнянні з КМОП – матрицею SID – А50 може витримувати дози випромінювання більші в 5 разів.

1.2.4 Рентготелевізійні системи з непрямым перетворенням зображення

Найбільш поширені в РТВС з непрямым перетворенням РЗ у зображення видимого діапазону. Такі системи використовують або підсилювачі рентгенівського зображення (див. рис.1.2,б,в) або рентгенівські екрани в комбінації з високочутливими перетворювачами світло-сигнал (див. рис.1.2,а).

1.3.1. РТВС на основі підсилювачів рентгенівського зображення

Зазвичай підсилювачем рентгенівського зображення (ПРЗ) є РЕОП, а також, але рідше, комбінація рентгенолюмінесцентний екран – ЕОП. Перевагою ПРЗ є можливість значно знизити експозиційну дозу випромінювання. Принцип дії систем на основі ПРЗ полягає в наступному. Джерело випромінювання, просвічуючи ОК, формує на його виході рентгенівське зображення (РЗ). ПРЗ перетворює РЗ у світлове зображення, що за допомогою оптики переноситься на вхід відеокамери. Виникаючий при цьому на виході відеокамери аналоговий електричний сигнал перетворюється за допомогою АЦП у цифровий сигнал, що спочатку надходить у комп'ютер для обробки, а потім відтворюється на екрані дисплея у вигляді напівтонового зображення (рис. 1.5).

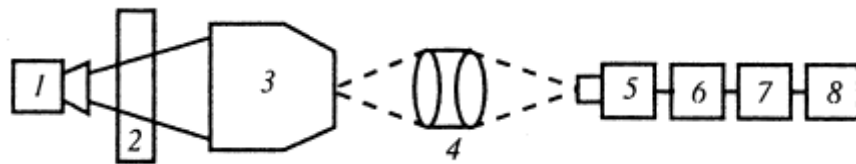


Рисунок 1.5 Структурна схема системи на основі ПРЗ:

1 – джерело випромінювання; 2 – ОК; 3 – ПРЗ; 4 – оптичний тандем; 5 – відеокамера; 6 – АЦП; 7 – комп'ютер; 8 – дисплей.

В останні роки в РТВС як перетворювач світло-сигнал, поряд з передавальними ЕПП, все частіше використовуються ПЗЗ-матриці. Цьому сприяють відомі переваги ПЗЗ-матриць перед передавальними ЕПП (мінімальні геометричні спотворення за рахунок фіксованої геометрії растра; відсутність інерційності; менші габарити, маса й напруги живлення; великий термін служби й ін.). Застосування ПЗЗ-матриць здійснюється в першу чергу в РТВС, що працюють у стандартах 625 рядків/50 полів в сек. та 525 рядків/60 полів в сек. Для роботи в цих стандартах використовуються ПЗЗ-матриці з оптичним форматом 1/2 або 2/3 дюйма, роздільна здатність яких приблизно відповідає роздільній здатності дюймових передавальних ЕПП [9].

Системи на основі підсилювачів рентгенівського зображення мають низку переваг: кількість просторових елементів, у яких випромінювання може реєструватися незалежно й одночасно, може перевищувати 10^6 при робочому полі контролю 400 мм і вище; можливість контролю як нерухомих, так і рухомих об'єктів; можливість діагностики процесів зварювання. За допомогою даних систем можна визначити координати дефекту з точністю $\sim 0,3$ мм, а його об'єм — з точністю $\sim 10\%$ [14]. Недоліком таких систем є обмеження динамічного діапазону ПРЗ й відеокамери, внаслідок чого для подання відліків цифрового зображення, як правило, використовується 8-розрядний байт. До інших недоліків цих систем варто віднести: виникнення в РЕОП геометричних спотворень під впливом магнітного поля; необхідність у дорогій оптиці й високовольтному блоці живлення ПРЗ (25-30 кВ); товсте переднє скло у РЕОП зменшує квантову ефективність і знижує контраст зображення.

Незважаючи на відзначені недоліки створення систем даного типу викликає в розробників в усьому світі великий інтерес. Так, наприклад, в [11] повідомляється про створення в Нідерландах автоматизованої системи на основі ПРЗ, призначеної для контролю отворів, просвердлених для охолодження, у лопатках газових турбін. Ця система містить два випромінювачі на 160 й 320 кВ із фокусними плямами $0,4 \times 0,4$ мм у першого

й 0,8×0,8 мм й 1,8x1,8 мм - у другого випромінювача; три ПРЗ з діаметрами вихідних екранів 215, 160 й 120 мм із роздільною здатністю у центрі відповідно 52, 58 й 68 пар ліній/см; твердотільну телевізійну камеру; комп'ютер, маніпулятор. Цифрова частина системи дозволяє поліпшити відношення сигнал/шум шляхом інтегрування зображень і запам'ятати зображення на жорсткому диску. Час на контроль знижується в порівнянні зі звичайною радіографією в 5-7 разів.

1.3.2 РТВС з рентгенівськими екранами та високочутливими перетворювачами світло-сигнал

Досить перспективним типом двовимірного високочутливого матричного детектора рентгенівського випромінювання є комбінація сцинтиляційний екран — оптика (волоконна або об'єктив) — двовимірна матриця фотодіодів. При цьому найчастіше використовують сцинтиляційні екрани із сполук цезію або гадолінію (CsI, CsI: Tl, Gd₂O₂S), а фотодіоди — із кремнію або аморфного кремнію. Такі детектори можна розглядати як плоску рентгеночутливу панель із піксельною структурою. Рентгенівське випромінювання попадає спочатку на шар сцинтилятора, у якому воно перетворюється у світлові фотони. За шаром сцинтилятора розташована фотодіодна матриця, по своїй спектральній чутливості відповідна сцинтилятору. Фотони наводять в елементах матриці електричний заряд. Зчитування заряду здійснюється керуванням ключових елементів усередині кожного пікселя.

Прикладом систем із двовимірним матричним детектором у вигляді комбінації сцинтиляційний екран - об'єктив - матричний фотоприймач є цифровий флюорограф "Ренекс — Флюоро" (ООО "СП Гелпик", Москва) [14]. У цьому флюорографі використаний найбільш чутливий до рентгенівського випромінювання флуоресцентний екран з окису сульфїду гадолінію. Структурна схема флюорографа показана на рис. 1.6.

Застосування даного флюорографа дозволяє знизити дозове навантаження на пацієнта в 5 разів у порівнянні із плівковою флюорографією.

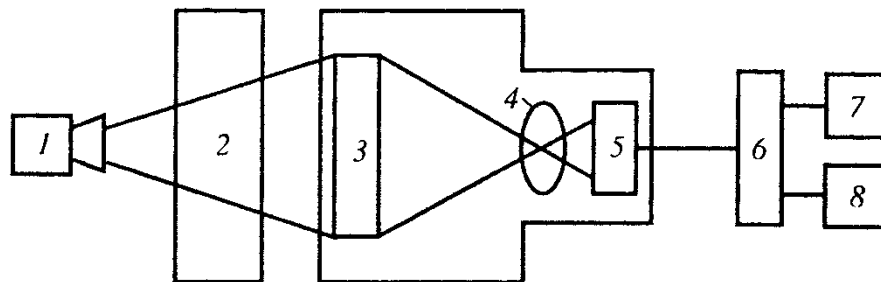


Рисунок 1.6 Структурна схема апарату для цифрової флюорографії „Ренекс-Флюоро”: 1 – джерело випромінювання; 2 – об’єкт дослідження;

3 – флюоресцентний екран; 4 – оптика; 5 – матричний фотоприймач; 6 – комп’ютер; 7 – дисплей; 8 – принтер.

Іншим типом матричних детекторів рентгенівського випромінювання є комбінацію люмінесцентного екрана – оптика (волоконна або об’єктив) – ПЗЗ-камера.

Найбільш популярним методом з’єднання люмінофора з ПЗЗ-матрицею є з’єднання за допомогою оптоволоконної оптики (фокона), як показано на рис. 1.7 [10].

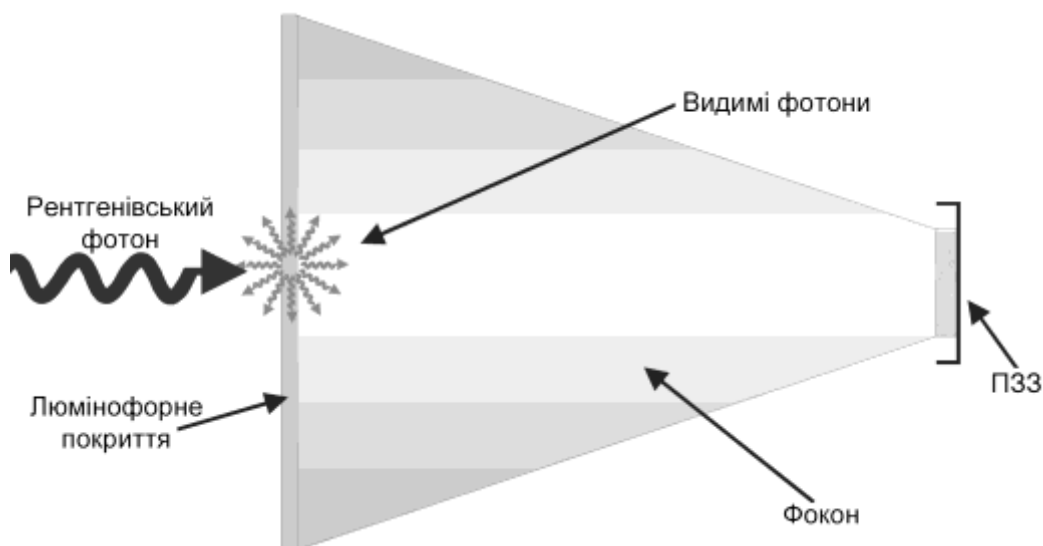


Рисунок 1.7 Ілюстрація з’єднання рентгенолюмінофора з ПЗЗ за допомогою фокона

Люмінофор наноситься безпосередньо на одній стороні фокона в той час коли інша з'єднується з ПЗЗ-сенсором. Фоконні об'єктиви передають 70...90% світла при забезпеченні високої роздільної здатності (до 100 ліній/мм) та дуже низького рівня геометричних аберацій. Практично єдиним недоліком фоконів порівняно з лінзовими системами – неможливість керування світловим потоком [19]. Для того щоб забезпечити більшу ефективну площу зображення використовують фокони з вхідним діаметром більшим за вихідний, хоча слід зазначити, що фокон з відношенням діаметрів 1:1 має найменший рівень світлових втрат.

Класичним прикладом рентгенівської ПЗЗ-камери з використанням фокона може служити С6086 фірми Hamamatsu [12], параметри якої наведені в таблиці 1.5, 10-бітний АЦП камери забезпечує високу якість зображень, а спеціальний контролер дозволяє виконувати в реальному часі усереднення зображень, віднімання зображень та підкреслювання контурів.

Таблиця 1.5 Технічні характеристики С6086

Марка	С6086-04	С6086-14	С6086-24	С6086-54
Матеріал сцинтилятора	Gd ₂ O ₂ S: Tb з алюмінієвим вікном			
Енергетичний діапазон, кеВ	10...100			
Роздільна здатність, мкм	25	43	62	30
Ефективне поле зору, мм ²	8,6×6,4	19,5×14,6	31,6×21,8	12,4×9,3
Збільшення фокона	1:1	2,27:1	3,69:1	1,45:1
Розмах відеосигнала	1 В на навантаженні 75 Ом			

В [3] наводяться результати досліджень відносної чутливості РТВС на основі рентгенівського монокристала та високочутливої ПЗЗ-камери

оптичного діапазону. Така РТВС (див. таблицю 1.6) є перспективною заміною системам, з застосуванням передавальних ЕПП: «Интроскоп» на ізоконі ЛИ-801, ПТУ-84 на супервідиконі ЛИ-702 та ін. в зв'язку з тим, що вона має не гірші параметри. Для досліджень були обрані дві телевізійні камери на основі високочутливих EXview HAD ПЗЗ-матриць фірми Sony форматом 1/2" (діагональ 8 мм) [21].

Таблиця 1.6 Параметри експериментальної РТВС на основі високочутливої ПЗЗ-камери та рентгенівського монокристала

Матеріал монокристала	CsI: Tl
Діаметр монокристала, мм	200
Товщина монокристала, мм	4
Кількість активних елементів ПЗЗ-матриці	752×582
Розмір елемента ПЗЗ-матриці, мкм ²	8,6×8,3
Рентгенівський апарат	РАП 150/300
Відстань між анодом рентгенівської трубки та екраном, мм	400

Одна з камер типу КТ-62.013 розроблена на ОКБ «ТЕКОН-ЭЛЕКТРОН» ОАО «КОНЦЕРН-ЭЛЕКТРОН» (м. Львів) на основі матриці ICX-249AL, друга типу VSC-746 – на ЗАО ЭВС (м. Санкт-Петербург, Росія) на основі матриці ICX-429ALL [20]. Досліджувалася відносна чутливість контролю з'єднаних методом зварювання сталевих пластин з товщиною 10, 20 та 30 мм для енергій 130, 140, 160, 180 та 200 кеВ. Найкращим результатом відносної чутливості контролю є 1,5%. Характеристики камери VSC-746 та інших високочутливих телевізійних камер ЗАО ЭВС наведені в таблиці 1.7 [20].

Висновки до першого розділу

Рентгенографія є надійним та перевіреним методом неруйнівного контролю та діагностики, що має високу чутливість та просторову роздільну здатність, але за останні роки намітився активний перехід від традиційних систем до розробки цифрових рентгенотелевізійних систем. В якості перетворювачів світло-сигнал в основному використовуються ПЗЗ-матриці.

Ефективним способом підвищення відносної чутливості контролорентгеноскопичних систем до величин, які співрозмірні або навіть перевищують чутливість рентгенографії, а також розширення граничної товщини контролюючих об'єктів являється перехід передавальних пристроїв в режим регульованої тривалості накопичення сигналу на мішені.

Застосування систем з безплівковою технологією візуалізації радіаційних зображень разом із цифровою обробкою інформації дозволяє істотно (в 5-100 разів) знизити променеве навантаження на досліджуваний об'єкт у порівнянні із традиційними екранно-плівковими системами. Перспектива цієї технології при крупносерійному і масовому виробництві надає право прогнозувати розширення областей її застосування.

Рентгенівські перетворювачі зображення можуть бути побудовані як системи з прямим перетворенням, так і системи з непрямим перетворенням. Конструктивно вони можуть бути лінійними або матричними. Кожен варіант має свої переваги і недоліки та його кінцевий вибір залежить від конкретної області застосування та необхідних характеристик.

В даний час активно ведуться розробки перетворювачів з безпосередньою реєстрацією рентгенівського випромінювання. Можна очікувати появи нових зручних цифрових датчиків масового використання з прямим перетворенням для необхідних енергетичних діапазонів.

2 СУЧАСНІ СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ЕКРАНИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

2.1 Загальні відомості про сцинтиляційні екрани для цифрової радіографії

В даний час цифрова радіографія (ЦР) (флеш-радіографія) є одним з найбільш поширених і перспективних методів радіаційного неруйнівного контролю (НК) [22]. При цифровій радіографії іонізуюче випромінювання, що пройшло через контрольований об'єкт, за допомогою електронних засобів перетворюється в масив електричних сигналів, які оцифровуються, обробляються за допомогою комп'ютерної техніки і використовуються для формування цифрового зображення контрольованого об'єкта. Цифрове зображення об'єкта містить інформацію про його внутрішню структуру і може формуватися безпосередньо під час просвічування, тобто в реальному часі [23].

У порівнянні з традиційною плівковою радіографією ЦР, поряд з можливістю отримання зображення в реальному часі має також наступні переваги: - більш ефективна реєстрація іонізуючого випромінювання в широкому енергетичному діапазоні (30 кеВ ... 10 МеВ); - можливість комп'ютерної обробки і аналізу цифрових зображень; - можливість створення електронних архівів цифрових зображень, документування зображень і їх передачі на значні відстань з використанням комп'ютерних мереж; - значне підвищення продуктивності контролю за рахунок виключення технологічних операцій обробки проміжних носіїв інформації (плівок, пластин і т. П.); - зниження вартості контролю; - зниження променевого навантаження на контрольований об'єкт.

Перераховані переваги ЦР визначили її застосування в таких областях, як технічна діагностика і НК, інспекційні системи, комп'ютерна томографія, медична рентгенодіагностика.

В даний час в ЦР найбільш поширені детектуючі системи непрямого перетворення. У таких системах тіньове радіаційне зображення за допомогою сцинтиляторів (сцинтиляційних екранів) перетворюється на початку в світлове, яке потім перетворюється в електричний сигнал. Далі електричний сигнал оцифровується і використовується для формування вихідного зображення внутрішньої структури об'єкта. До таких детектуючих систем відносяться системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів (РЕОП), системи типу «сцинтилятор-оптика-ПЗЗ», а також системи на основі плоскопанельних матричних і лінійних детекторів «сцинтилятор-напівпровідник» [23].

У таких детектуючих системах однією з основних ланок в процесі перетворення тіньового радіаційного зображення в електричний сигнал є сцинтилятор (сцинтиляційний екран), параметри якого в значній мірі визначають якість зображень, одержуваних за допомогою цифрової радіографічної системи.

2.2 Порівняльна характеристика цифрових радіографічних систем.

У системах на основі РЕОП, останній є перетворювачем рентгенівського випромінювання в видиме і одночасно виконує функції підсилювача яскравості зображення. Діаметр робочого поля різних типів РЕОП становить від 120 до 400 мм, а діаметр вихідного екрану 20, 25, 30 або 35 мм. Вхідні сцинтиляційні екрани у сучасних РЕОП виготовляють в основному з йодиду цезію CsI. Зображення, сформоване на вихідному екрані РЕОП, за допомогою оптичної системи переносять на вхід фотоприймача телевізійної камери. Як фотоприймача в сучасних телевізійних камерах застосовуються матриці на основі приладів із зарядним зв'язком (ПЗЗ-матриці), а також КМОП-сенсори. Такі системи застосовуються для

контролю об'єктів в динаміці з відносною чутливістю 2 ... 3% і роздільною здатністю 3 ... 5 пар ліній / мм.

Недоліками систем на основі РЕОП є висока вартість, великі габарити і маса, відносно невеликий розмір робочого поля, чутливість до вібрацій і ударів.

Системи «сцинтилятор-оптика-ПЗС» мають ряд переваг перед системами на основі РЕОП: можливість зміни сцинтиляційного екрану, що дозволяє змінювати розмір робочого поля і інші параметри системи; малий час отримання зображення; простота конструкції; малі габарити і маса; низька вартість і ін. Сцинтиляційний екран в таких системах перетворює тіньове радіаційне зображення контрольованого об'єкта в видиме. Перенесення видимого зображення з екрану на фотоприймач телевізійної камери відбувається за допомогою дзеркально-лінзової оптичної системи. Для захисту від прямого іонізуючого випромінювання, яке може приводити до деградації фотоприймача, телевізійна камера укладена в захисний свинцевий екран.

Параметри цифрових систем «сцинтилятор-оптика-ПЗС» визначаються параметрами кожної ланки системи: сцинтиляційного екрану, оптичної системи і фотоприймача. Якщо система призначена для промислового НК, то в якості сцинтиляційного екрану застосовують монокристалічні екрани CsI: Tl або порошкові екрани Gd₂O₂S (Tb), а в оптичних системах застосовують мегапіксельні світлосильні об'єктиви.

Через низьку яскравість світіння сцинтиляційних екранів в телевізійних камерах таких систем необхідно застосовувати високочутливі фотоприймачі з високою роздільною здатністю (мегапіксельні ПЗС-матриці або КМОП-сенсори, параметри яких практично зрівнялися з параметрами ПЗС-матриць). Придатні, наприклад, ПЗС-матриці з мікролінзами фірми Sony (технологія EXview HAD CCD). Для підвищення чутливості і зменшення шумів на зображенні застосовують режим тривалого накопичення зображень на

фотоприймачі, а збільшення можливих тривалостей накопичення зображень досягається за рахунок охолодження фотоприймача за допомогою елементів Пельтьє. З метою збільшення розміру робочого поля і роздільної здатності таких систем для зчитування зображення з сцинтиляційного екрану іноді застосовують кілька ПЗС-матриць (від 4 до 88) [21].

Чутливість контролю систем «сцинтилятор-оптика-ПЗС» відповідає чутливості плівковою радіографії, а роздільна здатність становить до 10 пар лін. / Мм. У матричних плоскопанельних детекторах найчастіше використовуються панелі на основі аморфного кремнію (a-Si) в комбінації з різними сцинтиляторами (наприклад, Gd₂O₂S: Tb, CsI: Tl і ін.). Максимальні розміри плоскопанельних детекторів «сцинтилятор-напівпровідник» складають 40 × 40 см, а роздільна здатність - до 10 пар лін. / Мм, що відповідає розміру пікселя 50 мкм. Недоліками плоскопанельних матричних детекторів є їх висока вартість і обмежена радіаційна стійкість.

2.2.1 Порівняння характеристик сцинтиляторів.

Інтенсивність люмінесценції екрану залежить від квантового виходу сцинтилятора, товщини поглинаючого шару і прозорості екрану до власного випромінювання. Товщину шару сцинтилятора необхідно вибирати такий, щоб забезпечувалося як ефективне поглинання квантів іонізуючого випромінювання, так і достатній вихід світлового сигналу на фотоприймач. При виборі пари сцинтилятор-фотоприймач для досягнення високої ефективності детектування необхідно забезпечувати відповідність спектральної характеристики випромінювання сцинтилятора спектральній характеристиці чутливості фотоприймача. Мірою такого взаємного відповідності є коефіцієнт спектральної відповідності:

$$K_c = \int_0^{\infty} I(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} I(\lambda)d\lambda ,$$

, де $I(\lambda)$ і $S(\lambda)$ - нормовані спектральні характеристики випромінювання сцинтилятора і чутливості фотоприймача відповідно.

У таблиці наведено параметри традиційних і нових типів сцинтиляторів, що застосовуються в сцинтиляційних детекторах [24-25]. Ці параметри дають уявлення про світність (Світловихід λ_{\max}), поглинальної здатності рентгенівських квантів (щільність і $Z_{\text{еф}}$), умовах світлозбору (показник заломлення і коефіцієнт ослаблення власного випромінювання), радіаційної стійкості і кінетики сцинтиляційного сигналу (час висвічування і рівень післясвітіння через 3 мс після припинення опромінення).

Для НК, в якому застосовуються великі флюенси високоенергетичних рентгенівських квантів, необхідно застосовувати такі сцинтилятори з великим атомним номером і високою щільністю, як CdWO_4 , ZnWO_4 , Lu_2SiO_5 : Ce, $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$: Tb. Для ряду люмінофорів, які не розкладаються при плавленні (CdWO_4 , ZnWO_4 , Lu_2SiO_5 : Ce), можливе отримання екранів у вигляді кристалів. Оксісульфідні сцинтилятори застосовуються у вигляді монодисперсного порошку, розподіленого в полімерному сполучному або у вигляді кераміки.

Параметр	CsI:Tl	CdWO ₄	ZnWO ₄	Gd ₂ O ₂ S:Pr,Ce,F	Gd ₂ O ₂ S:Tb	Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO:CE)	ZnSe:Al
Абсолютний світловихід, фот./МеВ при 662 кеВ (10 ³)	56	20	14	35	60	30	60
Щільність, г/см ³	4,51	8,28	7,87	7,3	7,3	7,41	5,42
Zеф	54	66	61	62	62	66,4	33
T плавлення, С	894	1325	1200	Розкл.	Розкл.	2150	1520
Показник заломлення	1,79	2,3	2,2	2	2	1,82	2,5
λтах, нм'	550	495	490	520	550	420	610
Коеф. ослаблення власного випромінення, см ⁻¹	0,05	0,03	0,05	1	0,6	0,04	0,3
Радіаційна стійкість, рад	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁷
Час висвічування, мкс	6	5	3	4	600	0,04	2
Післясвітіння, % через 3 мс	20	0,1	0,2	0,1	1	0,5	0,1

Таблиця 2.1 Порівняння параметрів сцинтиляторів

Для сцинтиляційних речовин, наведених у таблиці, характерні висока радіаційна стійкість і задовільні кінетичні параметри (за винятком Gd₂ O₂ S: Tb). Для сцинтиляторів ZnSe: Al, Gd₂ O₂ S: Tb, Gd₂ O₂ S: Pr, Ce, F забезпечується задовільна спектральна відповідність з кремнієвими фотоприймачами. У зв'язку з необхідністю контролю об'єктів в режимі реального часу з високою роздільною здатністю і розвитком мультіенергетичних методик контролю виникли нові вимоги до параметрів сцинтиляторів. Це посилення вимог до кінетики люмінесценції, симбатно характер зміни світловиходу з температурою, радіаційна стійкість сцинтиляторів не нижче 10⁶ рад. При цьому енергетична залежність

світловиходу сцинтиляторів істотно залежить від товщини зразка, ефективного атомного номера ($Z_{\text{еф}}$) і прозорості до власного випромінювання.

На рис. 2.1 наведені вимірні залежності світловиходу керамічного сцинтилятора $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (GOS) і кристалічних ZnSe:Al , CsI:Tl від анодної напруги рентгенівської трубки. При 50 кВ максимальний сигнал спостерігається у селеніду цинку товщиною 0,6 мм. Зі збільшенням анодного напруги від 50 до 130 кВ Світловихід цього зразка практично не змінюється через поглинання в ньому тільки низькоенергетичної частини рентгенівського випромінювання. Світловихід зразка селеніду цинку товщиною 4 мм при збільшенні анодного напруги зростає і перевищує Світловихід тонкого зразка при напрузі понад 110 кВ.

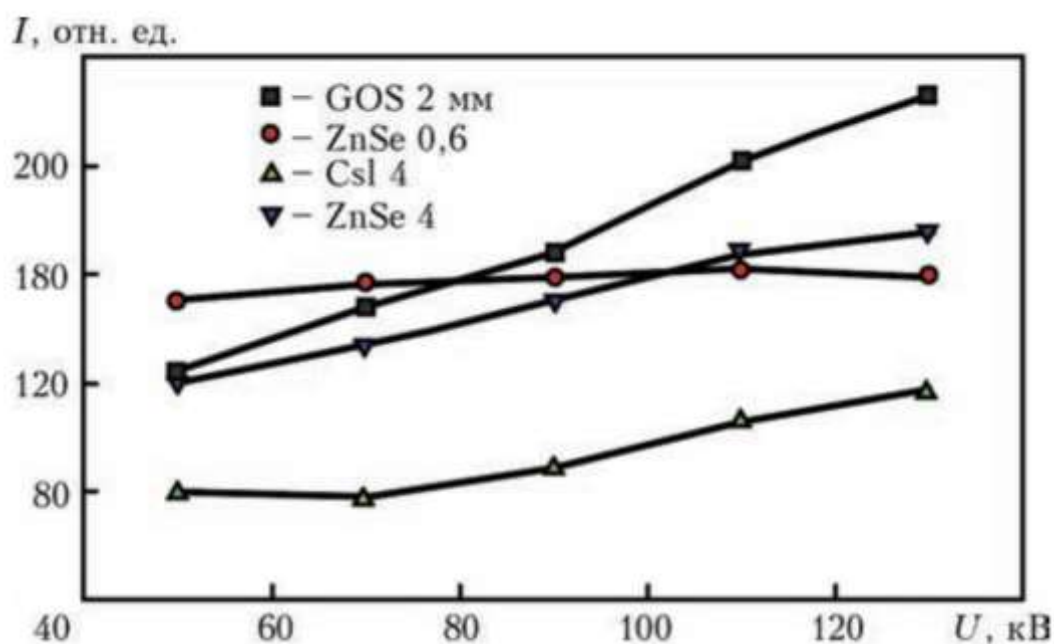


Рис. 2.1. Залежності світлового виходу керамічного сцинтилятора $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (GOS) та кристалевих ZnSe:Al , CsI:Tl від анодної напруги на рентгенівській трубці.

2.2.2 Сцинтилятори на основі селеніду цинку

Сцинтилятор ZnSe відноситься до класу напівпровідникових матеріалів групи A2 B6 і широко застосовується в рентгенівських детекторах типу сцинтилятор-фотодіод для сучасних багатоканальних низькоенергетичних радіаційних засобів візуалізації прихованого зображення (системи неруйнівного контролю (НК), медична томографія, радіографія) [26].

Таблиця 2.2. Сцинтиляційні та фізичні параметри сцинтиляторів $Gd_2O_2S(Tb)$ і $ZnSe(Te)$

Параметр	Сцинтилятор	
	$Gd_2O_2S(Tb)$	$ZnSe(Te)$
Щільність ρ , г/см ³	7,3	5,42
Ефективний атомний номер	60	33
Світловий вихід, фотони/MeV	60 000	60 000
Максимум випромінювання λ , нм	545	640
Конверсійна ефективність, %	19	до 22
Післясвітіння (після 6 мкс), %	1	<0,05
Гігроскопічність	Ні	Ні
Хімічна стабільність	Необмежена	Необмежена
Механічна та термічна стійкість	Висока	Висока
Радіаційна стійкість	Висока	Висока

Сцинтиляційні кристали селеніду цинку характеризуються високим квантовим виходом (60 тис. Фотон / MeV), максимум люмінесценції в червоній області спектра оптимальний для реєстрації кремнієвим фотоприймачем, час висвітлювання і рівень післясвітіння дозволяють реєструвати тіньове зображення об'єктів в реальному режимі часу [27].

У деяких областях радіаційного приладобудування фотоприймачі мають не тільки лінійну конфігурацію, але і складний профіль. Наприклад, у медичній рентгенографії існують сферичні ПЗС-матриці для томографів, в області радіаційної дефектоскопії розроблені фотоприймачі складного профілю для дослідження виробів такого ж профілю (дефектоскопія зварних швів труб або дефектоскопія виробів складної форми, отриманих методом лиття). Така оптимізація кінцевої форми фотоприймача дозволяє отримувати

найбільш повну інформацію про досліджуваний об'єкт. Для ефективної реєстрації рентгенівського випромінювання і щоб уникнути спотворення інформації про об'єкт, сцинтилятор повинен точно повторювати форму фотоприймача і найбільш вдалим рішенням цього завдання є гнучка сцинтиляційна панель, яка максимально щільно прилягає до поверхні фотоприймача будь-якого профілю і може стати альтернативою фотоплівки.

В даний час в якості сцинтиляційних матеріалів для виготовлення сцинтиляційних панелей, рентгенівських підсилюючих екранів і інших дисперсних сцинтиляторів в світі широко використовуються $Gd_2 O_2 S: Tb$, $CsI: Na$, $CsI: Tl$, $NaI: Tl$, $ZnS: Cu$, $(Zn, Cd) S: Cu$, $(Zn, Cd) S: Ag$, $CdWO_4$, $Bi_4 Ge_3 O_{12}$ (BGO), $(Y, Gd)_2 O_3: Eu^{3+} + (Pr)$, $Gd_2 O_2 S: Pr (Ce, F)$ і ін. [28]. Найбільш часто вживаним матеріалом для виготовлення дисперсних сцинтиляторів різного призначення є $Gd_2 O_2 S: Tb$ [29]. У табл. 2.2 представлені порівняльні дані сцинтиляційних характеристик $ZnSe (Te)$ і $Gd_2 O_2 S (Tb)$, з яких випливає, що селенід цинку не поступається за своїми характеристиками $Gd_2 O_2 S: Tb$, а за деякими параметрами і перевершує його (конверсійна ефективність, післясвітіння). У дисперсному вигляді сцинтилятор на основі $ZnSe (Te)$ не обмежений за площею і має на порядок вищу рівномірність люмінесценції, ніж кристалічний зразок [30-35]. Можливість отримання кристалічних зразків $ZnSe (Te)$ великої площі технологічно обмежена, причому зі збільшенням площі кристала рівномірність люмінесценції погіршується внаслідок сегрегації легуючих добавок в кристалі при їх вирощуванні.

2.3 Оптимізація параметрів сцинтиляційних панелей

Для оптимізації сцинтиляційних параметрів сцинтиляційних панелей має велике значення залежність світлового виходу панелей від розміру часток сцинтилятора $ZnSe (Te)$ і товщини екрану (рис. 2.2). Залежність світлового

виходу ZnSe (Te) від дисперсності частинок визначається ступенем поглинання частинками рентгенівського випромінювання. Чим більше частка, тим більший відсоток рентгенівського випромінювання буде поглинений, отже, інтенсивність люмінесценції зростає при збільшенні розміру частинок. Згідно рис. 1 найбільшу інтенсивність мають частки з дисперсністю 200 ... 600 мкм. Якщо рухатися в бік зменшення розміру часток, то інтенсивність люмінесценції падає, причому при досягненні певного розміру (близько 30 мкм) люмінесценція стає дуже низькою. Це пов'язано з довжиною пробігу електрона в даному матеріалі і якщо вона стає більше розміру часток, то лише незначна частина рентгенівського випромінювання поглинається в матеріалі і індукує люмінесценцію. До ослаблення люмінесценції при зменшенні розміру частинок призводять також дисипативні властивості середовища дисперсного сцинтилятора (розсіювання і перепоглинання випущених квантів люмінесценції). Оптимальна товщина зразків сцинтиляційних панелей для досягнення максимального рівня квантового виходу при дисперсності частинок 40 ... 120 мкм складає

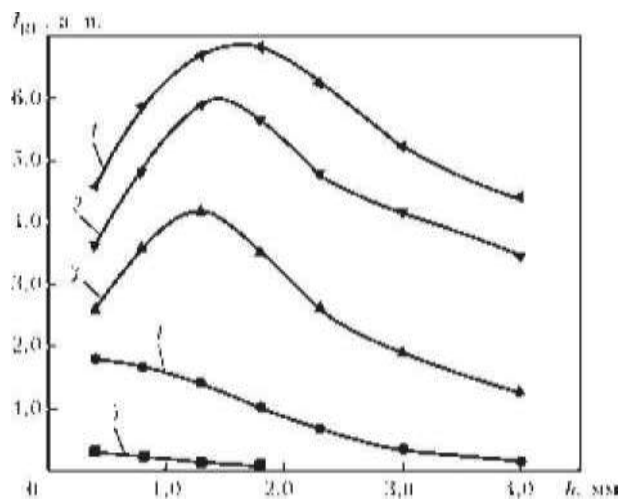


Рис. 2.2. Залежність рівня світлового виходу сцинтиляційних панелей на основі ZnSe (Te) від розміру часток полікристалічного порошку і товщини зразка: 1 - зразок панелі з діаметром частинок порошку 200 ... 600 мкм; 2 -

120 ... 200; 3 - 40 ... 120; 4 - 25 ... 40; 5 - 1 ... 1,0 ... 1,5 мм, для 120 ... 200 мкм - 1,3 ... 1,8 мм і 200 ... 600 мкм - 1,5 ... 2,0 мм.

При товщині панелі більшої за оптимальну, рентгенівське випромінювання поглинається в верхньому шарі зразка і його інтенсивність в нижніх шарах зразка недостатня для збудження максимального рівня люмінесценції, а кванти люмінесценції з верхніх шарів не досягають фотоприймача і виділяються у вигляді теплової енергії. При товщині панелі менше оптимальної, кількості сцинтиляційного матеріалу в зразку недостатньо для отримання максимального рівня люмінесценції. Для зразків панелей більш дрібних фракцій оптимальна товщина екрана зменшується.

Відносний світловий вихід кристалічних і дисперсних зразків сцинтиляторів на основі ZnSe (Te) представлений на рис. 2.3. Сцинтиляційні панелі, виконані з найбільш великої фракції порошку селеніду цинку - 200 ... 600 мкм - за рівнем світлового виходу наближаються до кристалічному зразком (до 95% світлового виходу кристала). При зменшенні розміру часток світловий вихід падає (згідно з наведеними раніше роз'ясненнями) і для частинок з дисперсністю 120 ... 200 мкм становить близько 80%, для частинок 40 ... 120 - до 55% і 25 ... 40 мкм - до 30%. Частинки найменшою дисперсністю не мають практичного інтересу за рахунок вкрай низького світлового виходу - до 10%. Порівняння світлового виходу проводиться з кристалічними зразками тих же типорозмірів як і сцинтиляційні панелі.

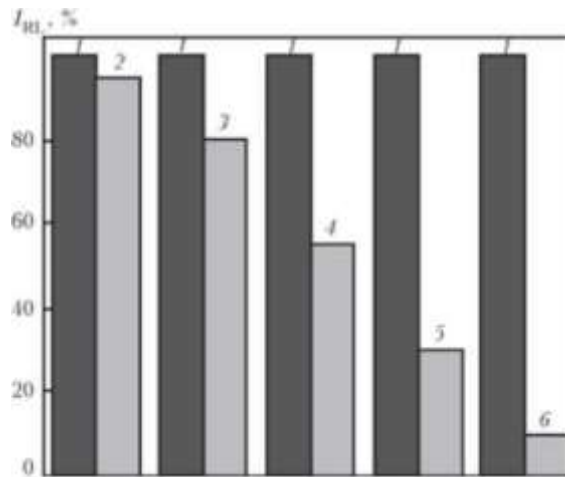


Рис. 2.3 Порівняльні величини світлового виходу дисперсного і монолітного кристалічного сцинтиляторів однакових типорозмірів на основі ZnSe (Te): 1 - монолітний кристалічний сцинтилятор; 2-6 - дисперсний сцинтилятор (2 - частки 200-600 мкм; 3 – 120-200; 4 – 40-120; 5 – 25-40; 6 – 1-2)

Для збільшення світлового виходу основного сцинтилятора (селенід цинку) за рахунок введення додаткового сцинтиляційного матеріалу, що має максимум люмінесценції в області фотопоглинання основного сцинтилятора і для застосування технології виготовлення сцинтиляційних панелей на інших сцинтиляційних матеріалах, виготовляють однокомпонентні і двокомпонентні сцинтиляційні панелі на основі ZnSe (Te), CdWO₄, ZnWO₄, GSO і LGSO. Спектри радіюлюмінесценції таких сцинтиляційних панелей показані на рис. 2.4 і 2.5.

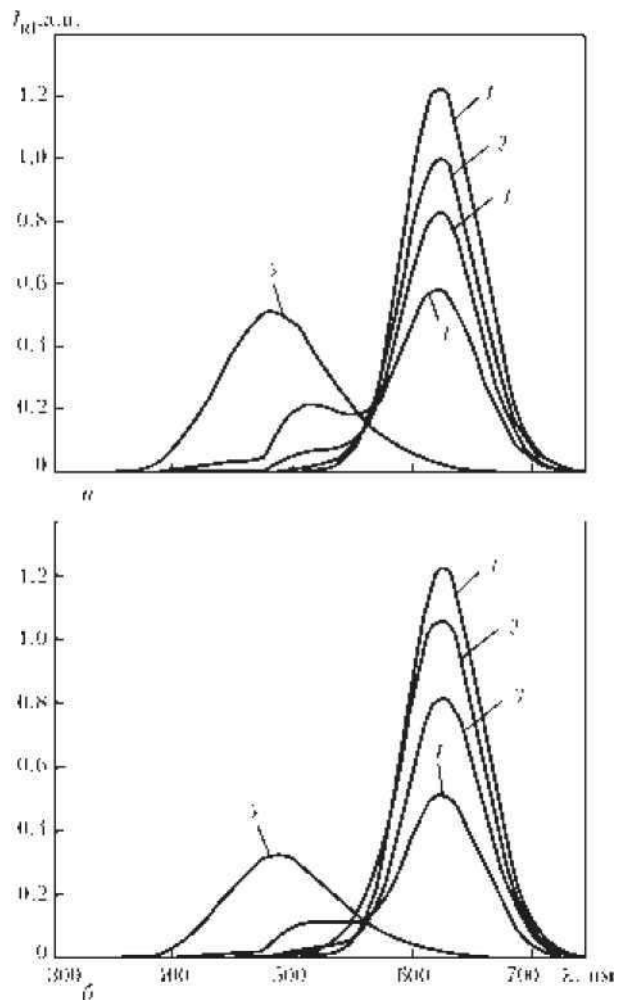


Рис. 2.4. Спектри радіолюмінісценції зразків сцинтиляційних панелей на основі $\text{ZnSe}(\text{Te})$, CdWO_4 , ZnWO_4 при різних концентраціях компонент в панелях: *a* - $\text{ZnSe}(\text{Te}) + \text{CdWO}_4$; *б* - $(\text{Ti}) + \text{ZnWO}_4$ (криві 1 відповідають зразкам на основі $\text{ZnSe}(\text{Te})$; для *a* - 2-4 відповідають концентраціям $\text{ZnWO}_4/\text{ZnSe}(\text{Te})$ - 1: 3, 1: 1, 3: 1, 5 - ZnWO_4 ; для *б* - 2-4 відповідають концентраціям $\text{ZnWO}_4/\text{ZnSe}(\text{Te})$ - 1: 3, 1: 1, 3: 1; 5 - ZnWO_4)

У двокомпонентних системах в залежності від співвідношення селеніду цинку і додаткового сцинтилятора спостерігається перерозподіл інтенсивності люмінесценції зразків і зміна виду спектрів люмінесценції, згідно інтенсивності і спектральної області люмінесценції кожної компоненти панелі. Максимальну інтенсивність люмінесценції мають однокомпонентні панелі на основі селеніду цинку. Збільшення інтенсивності люмінесценції за рахунок фотозбудження $\text{ZnSe}(\text{Te})$ не спостерігається. Сумарний світловий вихід у двокомпонентних зразків нижче, ніж у

однокомпонентних на основі селеніду цинку, що можна пов'язати з істотною різницею світловиходів селеніду цинку і додаткових сцинтиляторів. Також специфіка дисперсної середовища перешкоджає ефективному перенесенню енергії від додаткового сцинтилятора до основного. При спробі збільшити процентне співвідношення основної / додатковий сцинтилятор фотозбудженого селеніду цинку не компенсує втрати світлового виходу панелі за рахунок зменшення процентної частки основного сцинтилятора в зразку, що і призводить до зменшення сумарного світлового виходу.

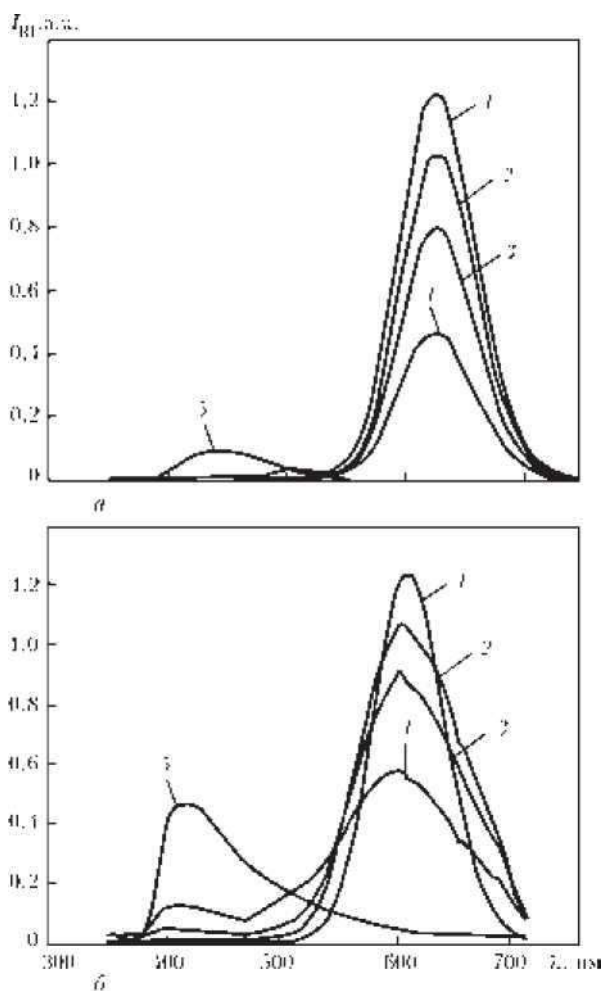


Рис. 2.5. Спектри радіолюмінесценції зразків сцинтиляційних панелей на основі ZnSe(Te), GSO і LGSO при різних концентраціях компонент в панелях: *а* - ZnSe(Te)+GSO:Ce; *б* - ZnSe(Te)+ LGSO: Ce (*1* відповідають зразкам на основі ZnSe(Te); для *а* - 2-4 відповідають концентраціям LGSO / ZnSe(Te)- 1: 3, 1: 1, 3: 1; 5 - GSO; для *б* - 2-4 відповідають концентраціям LGSO / ZnSe(Te)- 1: 3, 1: 1, 3: 1; 5 - LGSO)

Залежність інтенсивності люмінесценції однокомпонентних і змішаних панелей на основі селеніду цинку і вольфраматів цинку або кадмію від енергії квантів рентгенівського випромінювання показана на рис. 5. Сцинтилятор ZnSe (Te) має абсолютний світловий вихід на рівні приблизно 60 000 фотон / MeB, абсолютний світловихід CdWO₄ і ZnWO₄ становить близько 22 000 фотон / MeB. Таким чином, спостерігаємо лінійну залежність зміни інтенсивності люмінесценції двокомпонентних зразків щодо інтенсивності люмінесценції однокомпонентних зразків пропорційно співвідношенню селеніду цинку і вольфраматів. Інтенсивність люмінесценції панелей зростає при збільшенні енергії квантів рентгенівського випромінювання за рахунок підвищення відсотка конверсії рентгенівського випромінювання.

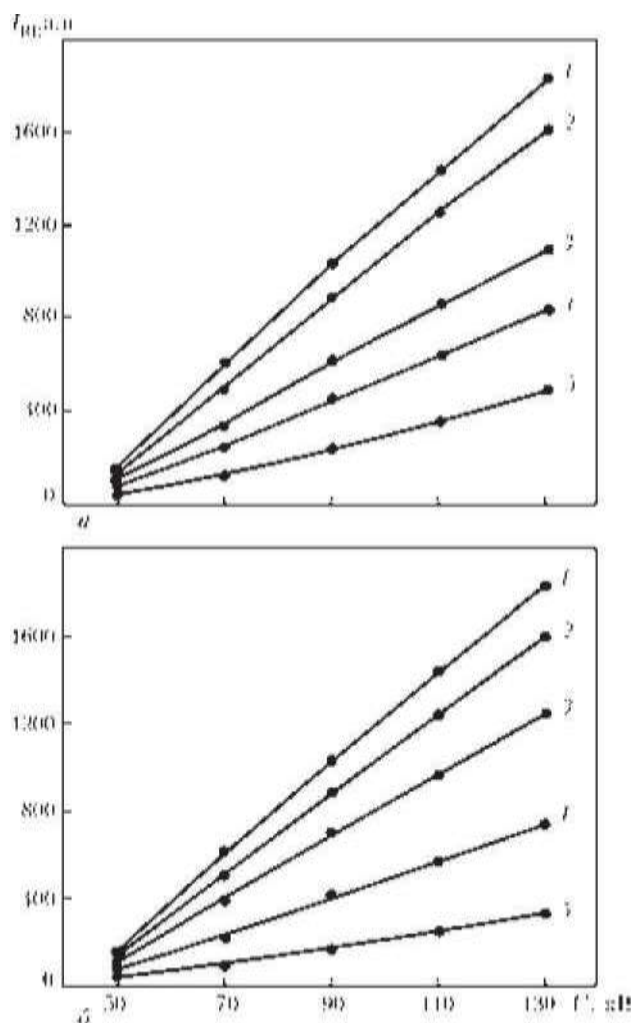


Рис. 2.6. Залежність інтенсивності радіолюмінесценції зразків сцинтиляційних панелей на основі ZnSe(Te), ZnWO₄, ZnWO₄ від напруги на

рентгенівській трубці (напруга варіюється в межах від 50 до 130 кВ): *a* - ZnSe(Te)+ ZnWO₄; *б* - ZnSe(Te)+ ZnWO₄ (криві 1, *б* відповідають зразкам на основі ZnSe(Te); для *a* - 2-4 відповідають концентраціям ZnWO₄/ ZnSe(Te)- 1: 3, 1: 1, 3: 1, 5 - ZnWO₄; для *б* - 2-4 відповідають концентраціям ZnWO₄/ ZnSe(Te)- 1: 3, 1: 1, 3: 1, 5 - ZnWO₄)

Дані про поглинання рентгенівського випромінювання однокомпонентними і двокомпонентними зразками сцинтиляційних панелей наведені на рис. 2.7. Ступінь поглинання рентгенівського випромінювання двокомпонентних зразків аддитивна величина і визначається процентним співвідношенням компонент в змішаній системі. Завдяки більш високому ефективному атомному номеру оксидні сцинтилятори мають більш високі коефіцієнти поглинання рентгенівського випромінювання, ніж селенід цинку. Відповідно добавки таких сцинтиляторів призводять до збільшення частки поглиненого рентгенівського випромінювання в зразках двокомпонентних сцинтиляційних екранів.

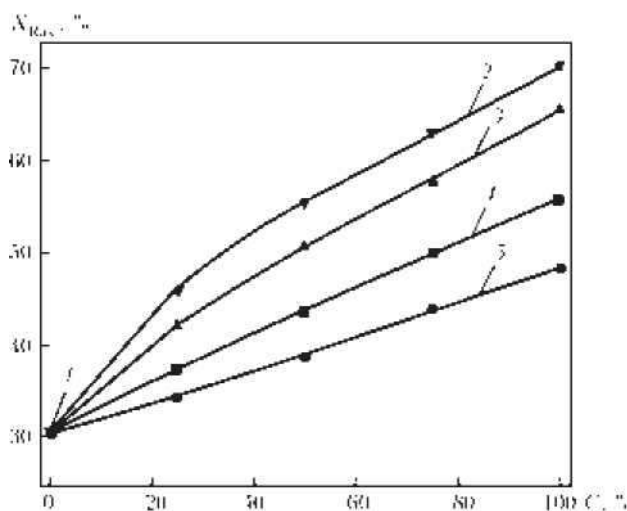


Рис. 2.7. Поглинання рентгенівського випромінювання двокомпонентними та однокомпонентними сцинтиляційними панелями (напруга на трубці 140кВ). Точка 1 відповідає панелі на основі ZnSe(Te); 2 - ZnWO₄; 3 - ZnWO₄; 4 GSO:Ce; 5 - LGSO:Ce.

Таблиця 2.3 Сцинтиляційні та фізичні характеристики дисперсних та кристалевих сцинтиляторів на основі ZnSe(Te)

Параметр	Кристал ZnSe(Te)	Сцинтиляційна панель ZnSe(Te)
Нерівномірність люмінесценції по площі зразка, %	30	5
Площа робочої поверхні зразка, см ²	25	400
Механічні характеристики	Крихкий Твердий	Гнучкий

Для практичного застосування сцинтиляційних панелей необхідно забезпечити рівномірність люмінесценції по площі панелі. Вимірювання рівномірності люмінесценції по площі кристалічних і дисперсних зразків однакових типорозмірів на основі селеніду цинку показало, що дисперсний сцинтилятор характеризується приблизно в 6-7 разів більшою рівномірністю люмінесценції (табл. 2.3). Це досягається гомогенізацією порошку ZnSe (Te) в процесі його приготування і рівномірним розподілом його по площі панелі.

Селенід цинку, маючи більш високу швидкодію, ніж широко поширений оксісульфід гадолінію, за рахунок низького післясвітіння, дозволяє отримати більш чітку картину рухомих об'єктів і, відповідно, більш якісно провести контроль виробів в реальному часі.

2.4 Технологія виготовлення багатоелементних сцинтиляційних збірок.

Як сцинтиляційного матеріалу використовуємо селенід цинку, легований алюмінієм ZnSe: Al [40]. Даний сцинтилятор забезпечує гарну спектральну відповідність з фотодіодом, великий динамічний діапазон (104), високу швидкодію в області низьких енергій рентгенівського випромінювання (30 ... 50 кеВ) і високу чутливість детектора «сцинтилятор-фотодіод».

Технологія виготовлення багатоелементних сцинтиляційних збірок [42] полягає в різанні пластини сцинтиляційного матеріалу потрібного розміру на необхідну кількість елементів в двох взаємно перпендикулярних напрямках і приміщення металевого відбивача між ними. В якості відбивача застосовують металеве покриття з срібла, індію або алюмінію. Пластину сцинтилятора перед порізкою жорстко закріплюють на підкладці, яка виконується з світловідбиваючої кераміки або фторопласта. На рис. 2.8 наведені покрокові ескізи технології виготовлення багатоелементних збірок. Технологія виготовлення економічна і проста, збірки отримують з однієї пластини, жорстко укріпленої на підкладці, повним її прорізанням в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Реалізація технології не вимагає ніякої додаткової оснастки. Після порізки не потрібно полірування сторін кожного елемента, що також виключає брак при виготовленні (відколи і розтріскування). При цьому забезпечуються однакові геометричні розміри кожного елемента, а також рівна товщина відбивача між елементами.

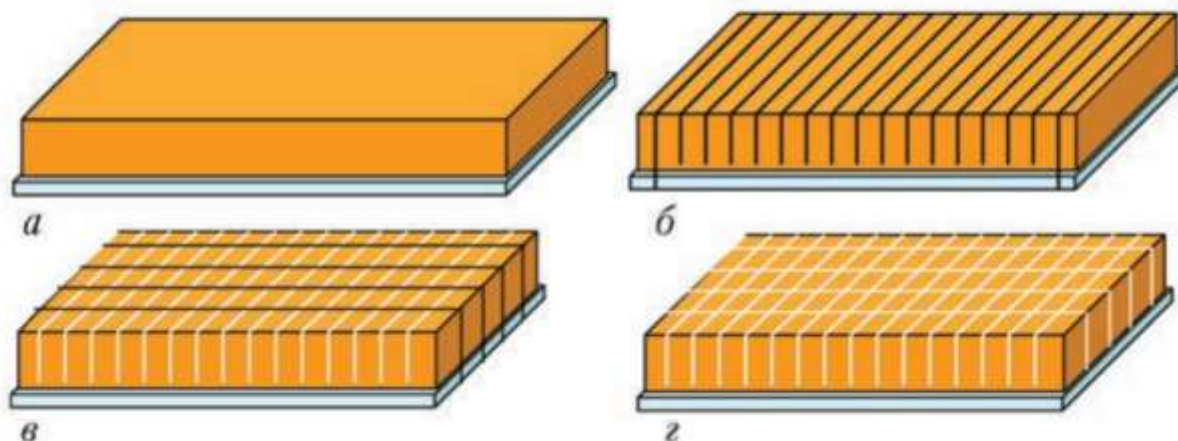


Рис. 2.8 Покрокові ескізи технології виготовлення багатоелементних сцинтиляційних збірок: а - сцинтиляційна заготовка, наклеєна на підкладку; б - сцинтиляційна заготовка, що прорізає на 16 каналів; в - сцинтиляційних заготовка, розрізана на 1D-матриці; г - 2D-матриця, виготовлена для цифрової радіографії.

Розглянемо більш докладно запропоновану технологію на прикладі виготовлення матриці з ZnSe: Al, що складається з 3136 пікселів. Розмір одиничного пікселя дорівнює $1 \times 1 \times 0,6$ мм, ширина світловідбиваючого каналу 0,3 мм. Підготовлену пластину-заготовку ZnSe: Al довільного розміру товщиною 0,6 мм приклеювали на керамічну світловідбиваючу підкладку. Заготівлю закріплювали на верстаті з алмазної пилкою з зовнішньої ріжучою крайкою. Прорізали перший базовий рез таким чином, щоб пила розрізала заготовку і світловідбиваючу підкладку. Далі прорізаємо 55 різів з кроком 1,3 мм. Прорізаємо пластину-заготовку на глибину 0,6 мм до світловідбиваючої керамічної підкладки. Робимо останній рез, як і базовий, з кроком 1,3 мм. Розрізану заготовку повертаємо на 90° і прорізаємо 56 каналів аналогічно сказаного вище. Розрізану в двох взаємно перпендикулярних напрямках заготовку знімають з верстата і промивають в ультразвукової ванні для того, щоб видалити з бічної поверхні кристала утворилася в процесі різання стружку. Далі на бічні поверхні каналів наносять світловідбиваючий

металевий шар. Потім заповнюють канали матриці клеєм для додання їй твердості. Після полімеризації клею сцинтиляційних матриця готова.

Пропонована технологія дозволяє отримувати багатоеlementні лінійки (1D) і матриці (2D) з мінімальними розмірами одиничного елемента 1×1 мм. Виходячи з цього, сцинтиляційні багатоеlementні збірки, виготовлені за даною технологією, мають більш високу просторову роздільну здатність.

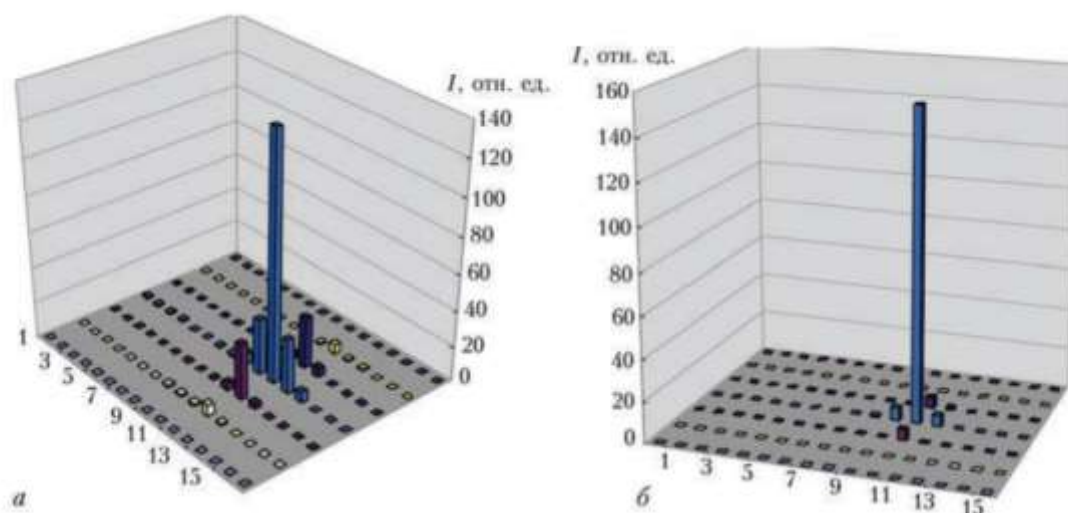


Рис. 2.9. Тривимірна гістограма взаємовпливу пікселів у сцинтиляційній матриці ZnSe(Al) з порошковим світловідбивачем (а) та металевим (б)

На рис. 2.9 наведені виміряні тривимірні гістограми взаємовпливу між каналами в сцинтиляційних матрицях з ZnSe (Al) з використанням різних світловідбивних покриттів. При осадженні металевого шару на бічні поверхні кожного пікселя сцинтиляційної матриці взаємний вплив між пікселями зменшується вдвічі. Це призводить до збільшення світловиходу, чутливості і просторової роздільної здатності матриць.

Висновки до другого розділу

Розглянуто методику отримання дисперсних сцинтиляційних панелей великої площі на основі швидкодіючого люмінофора ZnSe (Te), що характеризуються високим квантовим виходом і рівномірністю люмінесценції.

Наведено оптимальні параметри розмірів частинок і товщини композитного шару сцинтилятора ZnSe (Te), що забезпечують високий квантовий вихід і задовільний просторову роздільну здатність для рентгенівського випромінювання з напругою на аноді 50 ... 130 кВ.

Встановлено характер впливу добавок оксидних сцинтиляторів на спектри радіолюмінесценції зразків і на поглинання рентгенівського випромінювання люмінесцентними екранами на основі халькогенідного сцинтилятора селеніду цинку, що дає можливість варіювати оптичні і люмінесцентні параметри одержуваних екранів в широкому діапазоні.

Розглянута технологія дозволяє виготовлення багатоелементних лінійних (1D) і матричних (2D) сцинтиляційних збірок з високою просторовою роздільною здатністю. Технологія реалізується без застосування складної спеціальної оснастки, є простою, економічною і легко застосовується для серійного виробництва. Наведені дані щодо 198-піксельних сцинтиляційних матриць на основі кристалів селеніду цинку, легованих алюмінієм ZnSe: Al, в складі комп'ютерного томографа показали їх ефективність і перевагу над іншими сцинтиляторами в області малих енергій рентгенівського випромінювання. Встановлено, що для істотного зменшення взаємовпливу пікселів доцільно застосовувати металеві світлоповертаючі покриття.

3 СУЧАСНІ ПЗЗ МАТРИЦІ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЧУТЛИВОСТІ

3.1 Принцип дії ПЗЗ матриці

Пристрій з зарядовим зв'язком являє собою однорядкову або двовимірну матрицю, кожен елемент якої є мініатюрним електричним конденсатором типу метал-оксид-напівпровідник (МОН) (рис. 3.1).

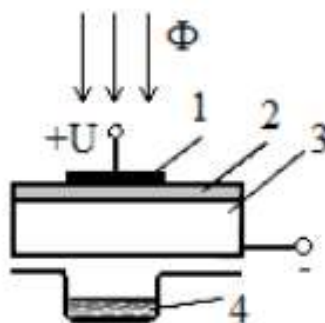


Рис. 3.1 Елемент ПЗЗ – електричний конденсатор типу МОН:

1 – металевий електрод; 2 – діелектрик; 3 – напівпровідник *p*-типу; 4 – потенціальна яма, що сформувалась біля площини розділу між діелектриком та напівпровідником під впливом прикладеного до електрода імпульсу позитивної напруги.

В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. При освітленості структури світловим потоком Φ в напівпровіднику генеруються пари носіїв заряду – електрон і дірка. Під дією позитивної напруги (+U) дірки витісняються вглиб напівпровідника, а неосновні носії заряду, електрони, накопичуються в потенціальній ямі. Тут вони можуть зберігатись достатньо тривалий час, оскільки дірок в збідненій області немає і електрони не рекомбінують. Електроди виготовлені з полікристалічного кремнію, який є прозорим майже у всьому видимому діапазоні. Якщо два мініатюрних конденсатори розмістити один біля одного так, щоб їх електричні поля впливали один на одного, потенціальними ямами двох конденсаторів стануть зв'язаними, а накопичений заряд потече в більш глибоку потенціальну яму.

Таке перетікання зарядів складає основу принципу дії пристроїв з зарядовим зв'язком [56].

На рис. 3.2. Показана структура одного елемента, лінійного трифазного ПЗЗ. Заряд, накопичений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під суспільний електрод, якщо його потенціал (U_2) буде збільшений, тоді як потенціал (U_1) першого електроду буде зменшений. Перенесення в трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямків (ліворуч чи праворуч). Всі зарядові пакети лінійки переносяться в той же бік одночасно.

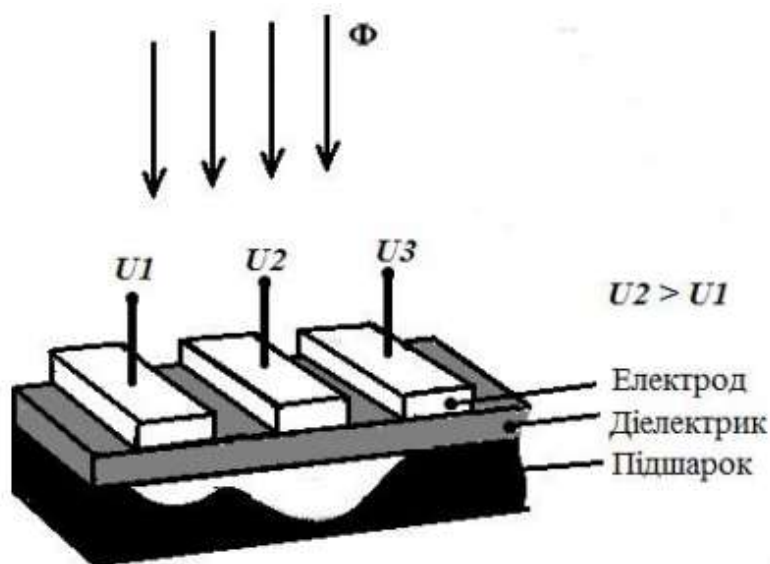


Рис.3.2 Елемент трифазного ПЗЗ

Двовимірний масив (матрицю) пікселів отримують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗЗ на стовпці. Стоп-канали – це вузькі області, що формуються спеціальними технологічними прийомами в поверхневій області, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних областей – області накопичення і області зберігання. Пристрій схематично показаний на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Структура ПЗЗ – матриці

Область зберігання захищена від світла світлонепроникним покриттям. Зарядовий рельєф, сформований в області накопичення, швидко переноситься в область зберігання і, потім, поки експонується наступний кадр, зчитується порядково у вихідний зсуваючий (послідовний) регістр. З послідовного регістра зарядові пакети виводяться один за одним послідовно через вихідний підсилювач, розташований на цьому ж кристалі. У цьому вузлі відбувається перетворення заряду в напругу для подальшої обробки сигналу зовнішньою електронною апаратурою.

Існують також матриці, в яких відсутня секція зберігання, і тоді рядкове перенесення здійснюється по секції накопичення. Для роботи таких матриць потрібний оптичний заслін.

3.2 Типи твердотільних фотоприймачів

3.2.1 Матричні ПЗЗ з кадровим перенесенням

Історично першими були розроблені матричні ПЗЗ з кадровим перенесенням (рис. 3.4.). Цей прилад містить світлочутливу секцію накопичення, що складається з вертикальних ПЗЗ - регістрів, відокремлених один від одного областями стоп-каналів. Безпосередньо до секції накопичення примикає секція пам'яті, що має ту ж структуру і те ж число елементів, що і секція накопичення. В кінці секції пам'яті розташований горизонтальний ПЗЗ- регістр. Число елементарних комірок цього регістра дорівнює числу стовпців у секціях накопичення і пам'яті. В кінці горизонтального регістру розташований вихідний пристрій. Секція пам'яті, вихідний горизонтальний регістр і вихідний пристрій екрануються від падаючого світла напиленням алюмінієвого покриття на поверхню кристала [43].

Протягом часу накопичення на один або на кілька електродів секції накопичення подається позитивний потенціал, який утворює двомірний масив збіднених областей. Генеруються падаючим світлом носії заряду збираються в довколишніх збіднених областях, причому до переповнення потенційної ями їх кількість лінійно залежить від експозиції.

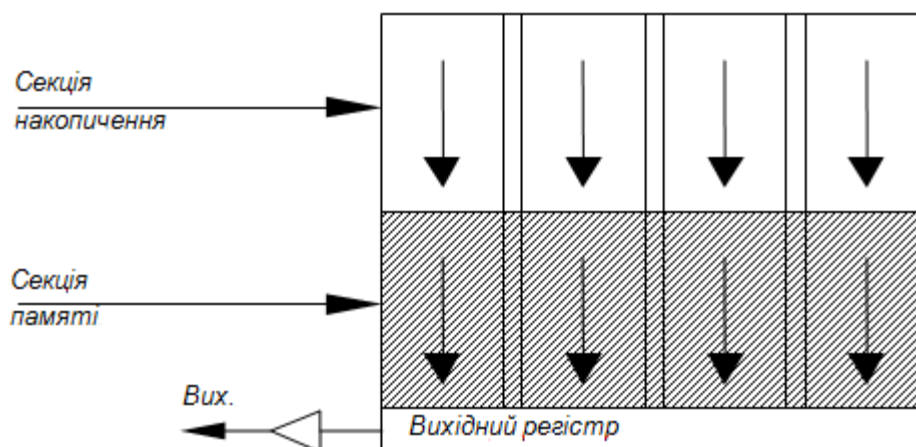


Рис. 3.4 Матричний ПЗЗ з кадровим перенесенням

Після закінчення часу накопичення під час зворотного ходу по кадру на фазні електроди секції накопичення та секції пам'яті подаються імпульси перенесення. Накопичений двомірний масив зарядових пакетів за час перенесення паралельно зсувається з секції накопичення в секцію пам'яті. Так як число осередків у секції пам'яті дорівнює числу осередків у секції накопичення, то кожен накопичений в секції накопичення зарядовий пакет займе відповідне місце в секції пам'яті. Після того, як всі зарядові пакети перенесені в секцію пам'яті, процес накопичення зарядових пакетів поновлюється.

Одночасно з цим в секції пам'яті під час зворотного ходу по рядку зарядові пакети порядково переносяться в горизонтальний вихідний регістр. Для цього на один з електродів горизонтального регістру подається позитивний потенціал, відповідний утворення під ним потенційної ями, а на електроди секції пам'яті подаються імпульси, відповідні паралельного зсуву масиву зарядових пакетів на один трифазний елемент у напрямку до горизонтального регістру. Таким чином чергова рядок зарядових пакетів виявляється в горизонтальному регістрі, а наступна за нею - розташовується в тому рядку секції пам'яті, яка безпосередньо прилягає до регістру.

Далі, під час прямого ходу по рядку, зарядові пакети зчитуються з горизонтального регістра через вихідний пристрій, для чого на електроди цього регістра подаються імпульси перенесення. Після закінчення зчитування рядка зарядових пакетів з секції пам'яті зсувається наступний рядок і процес повторюється. Після того, як будуть прочитані всі рядки з секції пам'яті, в неї може бути перенесення масиву зарядових пакетів, накопиченого в секції накопичення. Для реалізації черезрядковості накопичення в різних напівкадрах реалізується під різними фазними електродами секції накопичення.

До переваг матричних ПЗЗ з кадровим перенесенням слід віднести можливість реалізації освітлення з боку підкладки і повне використання світлочутливої секції, що в сукупності забезпечує рекордний квантовий вихід

– до 98%. Завдяки особистій опроміненню світлом поверхні кремнію ці матриці мають високу чутливість у ближній ІЧ-області спектра. Це обумовлює широке застосування ТВ - камер на базі матриць з кадровим перенесенням для задач нічного спостереження, в тому числі з ІЧ-підсвічуванням.

Істотним недоліком матриць ПЗЗ з кадровим перенесенням є вертикальне змазування від яскравих деталей зображення. Під час перенесення масиву зарядових пакетів з секції накопичення в секцію пам'яті світловий потік продовжує генерувати Фотоелектрони. Так як кожна потенційна яма проходить весь стовпець світлочутливої секції (частково до початку накопичення, частково після), вона неминуче накопичить певну кількість зарядів від всіх точок зображення, що лежать на даному стовпці. У реальних зображеннях зустрічаються області, освітленість яких у багато разів пере-ті не перевищує середній рівень освітленості сцени, що спостерігається. Наявність цих областей призводить до утворення світлового вертикального стовпця, що є продовженням яскравої деталі (рис. 3.5) [49].

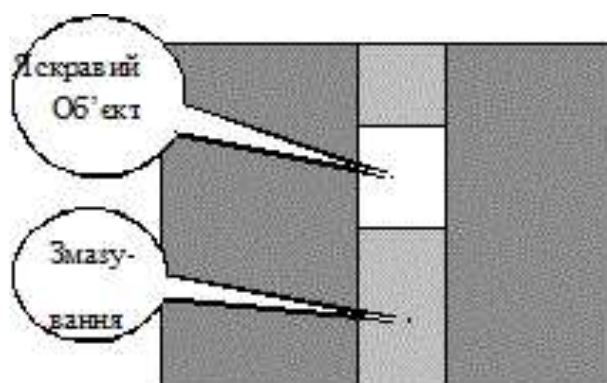


Рис.3.5 Зображення на екрані монітора при наявності змазування

Рівень вертикального змазування прямо пропорційний освітленості і площі яскравою деталі зображення, а також тривалості переносу зарядів з секції накопичення в секцію пам'яті і може перевищувати поріг зорового сприйняття. Ефект вертикального змазування в цих матрицях може бути

усунений тільки перекриттям світлового потоку на час перенесення за допомогою механічного затвора.

Додатковим фактором, що обмежує сферу застосування ПЗЗ з кадровим перенесенням, є значна площа матриці, обумовлена наявністю секції пам'яті. Оскільки вартість мікросхем пропорційна четвертого ступеня діагоналі кристала, то ціна цих ПЗЗ досить висока.

3.2.2. Матричний ПЗЗ із рядковим перенесенням

У охоронному телебаченні найбільше поширення отримали матричні ПЗС із рядковим перенесенням. Для накопичення зарядових пакетів в них використовуються стовпці зворотно зміщених фотодіодів р - типу (Hole-accumulation diode, HAD). У безпосередній близькості від кожного стовпця фотодіодів знаходиться нечутливий до світла вертикальний ПЗЗ - реєстр, відокремлений від фотодіодів фотозатвором. У перших матрицях ПЗЗ зі стічних перенесенням роль фотозатвора виконував окремий полікремнієвий електрод. В даний час його роль виконує частину затвора вертикального ПЗЗ - реєстру, що виступає за край прихованого каналу перенесення зарядів. В кінці вертикальних ПЗЗ - реєстрів розташований горизонтальний ПЗЗ - реєстр з вихідним пристроєм (Рис.3.6).

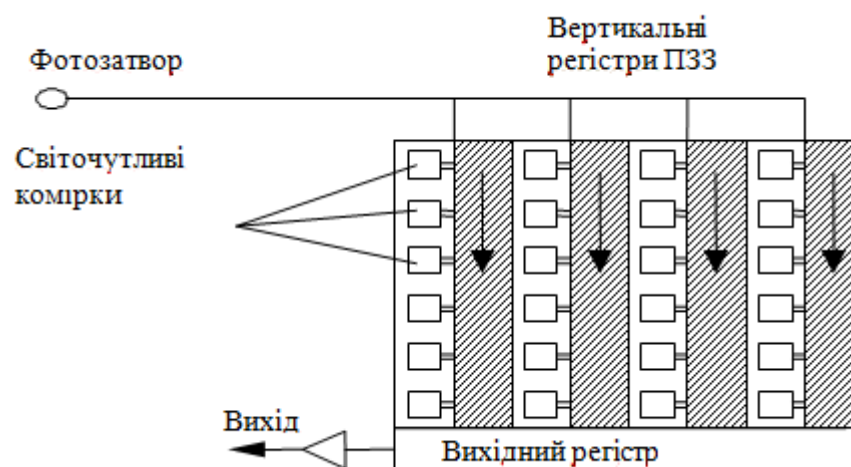


Рис.3.6 Матричний ПЗЗ з рядковим перенесенням

Всі реєстри ПЗЗ - вертикальні і горизонтальний - виконуються екранованими від падаючого світла.

Під час накопичення зарядових пакетів у фотодіодах на фотозатвор подається низький потенціал, який забезпечує потенційний бар'єр між фотодіодами і вертикальним ПЗЗ - реєстром. Після закінчення накопичення на фотозатвор короткочасно подається позитивний потенціал, який дозволяє перенесення зарядових пакетів з фотодіодів в потенційні ями, утворені у вертикальних ПЗЗ - реєстрах. Потім з фотозатвора знімається позитивний зсув і накопичення зарядових пакетів у фотодіодах поновлюється.

Зарядові пакети з вертикальних ПЗЗ – реєстрів порядково переносяться в горизонтальний ПЗЗ - реєстр, з якого поелементно зчитуються через вихідний пристрій. Перенесення з світлочутливих фотодіодів у вертикальні реєстри здійснюється під час зворотного ходу по кадру, а перенесення зарядових пакетів з вертикальних реєстрів в горизонтальний реєстр - під час зворотного ходу по рядку. Після того як всі рядки зарядових пакетів будуть лічені, можливе перенесення наступного двомірного масиву зарядових пакетів з фотодіодів [59].

Перевагою матричних ПЗЗ із рядковим перенесенням є малий рівень змазування, пов'язаний з тим, що перенесення всіх зарядових пакетів в захищені від світла вертикальні ПЗЗ - реєстри відбувається протягом короткого проміжку часу. Основний недолік матричних ПЗЗ із рядковим перенесенням - неповне використання світлового потоку внаслідок наявності нечутливих вертикальних реєстрів.

3.2.3. Матричні ПЗЗ з рядково-кадровим перенесенням

Матричні ПЗЗ з рядково-кадровим перенесенням були розроблені спеціально для телевізійного мовлення і в телекамерах використовуються вкрай рідко. Такі матриці складаються із звичайного матричного ПЗЗ із

рядковим перенесенням, до якого додана секція пам'яті від матричного ПЗЗ з кадровим переносом. Кількість осередків у секції пам'яті дорівнює половині кількості фотодіодів. Зарядові пакети, накопичені у фотодіодах, переносяться у вертикальні ПЗЗ - реєстри, після чого на підвищеній частоті пересуваються у вертикальні ПЗЗ - реєстри секції пам'яті. У подальшому вони зчитуються через горизонтальний ПЗЗ - реєстр так само, як і в матричному ПЗЗ із рядковим переносом. Особливістю даного типу фотоприймачів є те, що під час зчитування зарядові пакети, котрі не в безпосередній близькості від фотодіодів, а в секції пам'яті, і, таким чином, повторне відбиття світла і дифузія з глибини напівпровідника спотворюють сигнал тільки під час перенесення зарядових пакетів в секцію пам'яті. Тим самим рівень змазування в порівнянні з матричним ПЗЗ із рядковим перенесенням зменшується в 20-50 разів [44].

3.3 Підвищення чутливості камер на ПЗЗ

Можливість спостереження на більшій відстані, на більшій площі, з кращою якістю при меншій освітленості забезпечується при збільшенні чутливості телекамер. Всі зусилля розробників телекамер направлені на збереження потоку світла (фотонів) від об'єкту і подальше накопичення сигналу (заряду) в матриці і пристрої обробки відеосигналу. Застосування електронно-оптичних перетворювачів (ЕОП) перед матрицями ПЗЗ збільшує вартість таких камер більш ніж на порядок і з'являються недоліки, властиві ЕОП (випалювання, плями, малий ресурс і так далі).

Виділимо чинники, що обмежують чутливість в сучасних камерах і можливості їх поліпшення шляхом застосування нових ПЗЗ матриць і об'єктивів.

Втрати світла в об'єктиві. Не всі фотони світла, що потрапляють на вхідну лінзу, проходять до матриці ПЗЗ. Частина з них розсівається, а частина поглинається матеріалом лінз. Потрібно сказати, що сучасні

асферичні об'єктиви з відносним отвором 0,8 – 0,75 – мають дуже високі характеристики і в найближчому майбутньому важко чекати помітного поліпшення їх параметрів.

Втрати через малу відносну площу фоточутливих елементів до повної площі фоточутливої секції. Фоточутливі осередки, особливо в матрицях малих форматів 1/3 дюйми і менш займають менше 10% площі чутливої поверхні. Решта площі використовується під канали перенесення заряду і систему антибллінга. 10 років тому це було одним з головних обмежень чутливості. Фірма SONY винайшла і застосувала прозорі мікролінзи на поверхні ПЗЗ - матриці, які концентрують світло зі всієї поверхні на маленькі фоточутливі осередки. Рік тому SONY удосконалила ці лінзи і випустила нову серію матриць ПЗЗ під маркою EXWAWENAD CCD, що дозволило додатково в 3 – 4 рази підняти чутливість телекамер. В даний час параметри мікролінзового масиву близькі до теоретичної межі, і тут також важко чекати істотних поліпшень.

Втрати при перетворенні фотон/електрон. Квантовий вихід кращих ПЗЗ- матриці наближається до 0,5 в діапазоні видимих довжин хвиль і ближньому ІЧ діапазоні. Освоєння нових матеріалів і подальша оптимізації структури приладів в майбутньому могла б дозволити збільшити це значення, особливо в області синього і ближньою ультрафіолетовою, що могло б поліпшити чутливість камер. Проте серйозних зрушень тут також важко чекати.

Обмеження чутливості через шум зчитування вихідного пристрою ПЗЗ - матриці. Зараз шум зчитування – головний чинник що обмежує чутливість телекамер. Його значення 20 – 30 електронів/піксель теоретично можна було б понизити в 10 разів. Обмеженням тут є площа затвора першого вихідного транзистора. Чим менше площа, тим менше шум, але затвор з малою площею не в змозі вмщати заряд пікселя у разі, коли світла багато, що приведе до обмеження сигналу в денних умовах. Є патенти, в яких пропонується розмістити в ПЗЗ матриці 2 вихідних пристрою, одне для малих, а інше для

великих зарядів, і перемикає їх вночі і вдень відповідно. Тому можна чекати надалі появу нових ПЗЗ - матриць із зменшеним шумом вихідного пристрою, що могло б привести до подальшого зростання чутливості ПЗЗ камер у декілька разів.

Обмеження чутливості через свічення транзисторів вихідного пристрою матриці ПЗЗ. Всі транзистори слабо світяться (аналогічно світлодіодам і лазерним діодам), а в матрицях ПЗЗ це перешкоджає спостереженню слабких освітленостей. Була опублікована стаття [7], де в охолоджуваній астрономічній камері ПЗЗ було відмічено свічення в тому кутку зображення, де розташований вихідний пристрій. Тоді це було розцінено як унікальне явище, що виявляється тільки при охолодженні ПЗЗ - матриці, що працюють з великим часом експозиції. З тих пір чутливість матриць ПЗЗ зросла в 100 разів і цей ефект вже заважає спостереженню в найчутливіших камерах фірм PANASONIC, BAXALL, EBC.

Можна виділити чотири головні моменти, що визначають високу чутливість сучасних ПЗЗ телевізійних камер:

- застосування високочутливих матриць ПЗЗ з мікролінзами.
- використання асферичних світлосильних об'єктивів.
- введення адаптивних режимів накопичення і зчитування заряду в ПЗЗ.
- застосування спеціальних електричних режимів, що підвищують чутливість матриці ПЗЗ.

3.4. Шум в ПЗЗ камерах

Фотонний шум. Цей шум є наслідком дискретної природи світла. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) числа фотонів від середнього значення дорівнює кореню квадратному з середнього значення. Для максимальних сигналів СКВ фотонного шуму в елементі матриці ПЗЗ досягає сотень електронів.

Шум темного сигналу. Якщо об'єктив закрити непрозорою кришкою, то в осцилограмі вихідного сигналу поряд з сигналом синхронізації буде присутній темновий сигнал. Основною причиною темного сигналу є

термоелектронна емісія, при якій темновий струм експоненціально зменшується при зниженні температури. Кількість термогенерірованих елементів N_i підпорядковується статистиці Пуасона, і їх середньоквадратичне відхилення (СКВ) від середнього значення дорівнює $\sqrt{N_i}$. В камерах, в яких ПЗЗ – матриці примусово не охолоджуються, середньоквадратичним значенням шуму темнового сигналу (до 20 електронів (e)) знехтувати не можна.

Шум переносу. Під час перенесення зарядового пакету по елементах ПЗЗ деяка частина електронів губиться, вона захоплюється на дефектах і домішках, що існують в кристалі. Ця неефективність перенесення є функцією кількості переносимих зарядів (N), числа переносів (n) і неефективності окремого акта перенесення (ϵ). Якщо припустити, що кожен пакет переноситься незалежно, то СКВ шуму перенесення можна обчислити за формулою:

$$\sigma = \sqrt{2\epsilon n N} \quad (3.1)$$

Наприклад, для неефективності перенесення 10^{-5} , 500 переносів (центр матриці ПЗЗ) і числа електронів в пакеті 25 000 (максимальний сигнал) СКВ шуму перенесення складе 16 e.

Шум зчитування. Коли сигнал, накопичений в елементі ПЗЗ, виводиться з матриці, перетворюється в напругу і посилюється, в кожному елементі з'являється додатковий шум, що називається шумом зчитування. Шум зчитування присутній в зображенні при відсутності світла на вході камери і не залежить від шуму темнового сигналу. Типове значення СКВ шуму зчитування складає 20e і теоретично може бути знижено на порядок. Обмеженням тут є площа затвора першого вихідного транзистора. Чим менше площа, тим менше шум, але затвор з малою площею не в змозі вмістити заряд елемента в умовах великої освітленості. Для усунення цього протиріччя можна розмістити в матриці ПЗЗ два вихідних пристрої: один для малих, а інший для великих зарядів, і перемикає їх залежно від умов

спостереження. Тому можна чекати надалі появу нових ПЗЗ із зменшеним шумом вихідного пристрою.

Шум скидання (kTC-шум). Перед введенням в детекторний вузол сигнального заряду необхідно вивести попередній заряд, для того використовується транзистор скидання. Електричний рівень скидання залежить тільки від температури T , Ємності вузла зчитування C і його СКВ з урахуванням заряду електрона q і постійної Больцмана k обчислюється за формулою:

$$\sigma = \sqrt{kTC/q} \quad (3.2)$$

Для типового значення ємності C , рівної $0,1\text{пФ}$, при кімнатній температурі СКВ шуму скидання складає близько 130 е . Цей шум повністю пригнічується подвійною корельованою вибіркою (ПКВ), яка ефективно усуває і низькочастотні перешкоди, внесені ланцюгами живлення.

Розглянуті компоненти шуму є першою причиною обмеження потенційно досяжного відношення сигнал/шум. З іншого боку, воно обмежене ємністю елемента ПЗЗ, яка в типових матрицях з рядковим перенесенням складає приблизно $50\ 000$ електронів. Тому в камерах максимальне відношення сигнал/шум при великій освітленості не перевищує 50 дБ .

Відношення сигнал/шум є об'єктивною характеристикою зображення, пов'язаної з суб'єктивною оцінкою його якості. Експертна оцінка суб'єктивного погіршення якості при збільшенні рівня шуму за п'ятибальною шкалою, рекомендованою Міжнародним консультативним комітетом по радіотехніці (МККР), наведена в табл. 3.1.

Якість зображення залежить від числа m відтворюваних градацій (порогових перепадів яскравості, що розрізняються оком), яке обмежується лише шумом. У першому наближенні при рівні шуму, що не залежить від інтенсивності сигналу, число градацій визначається граничним відношенням сигнал/шум:

$$m = \frac{\psi}{\psi_{\text{нор}}} + 1 \quad (3.3)$$

Таблиця 3.1

Uш, мВ при Us=100 IRE	ψ , дБ	ψ , раз	Якість	Погіршення
14,0	50	316	Відмінна	Не помітне
17,5	40	100	Добра	Помітне, але не заважає
23,0	30	32	Задовільна	Трохи заважає
35,0	20	10	Незадовільна	Заважає
70,0	10	3	Непридатне	Сильно заважає

3.5 Цифрові камери CSDU з охолодженням ПЗЗ матриці

Сімейство цифрових камер CSDU включає в себе ряд виробів на основі ПЗЗ матриць різного розширення.

Цифрові камери сімейства CSDU призначені для одержання високоякісних кольорових і чорно-білих зображень і передачі їх в комп'ютер по інтерфейсу USB 2.0. Живлення камер здійснюється від інтерфейсу USB. Живлення елемента Пельт'є здійснюється від зовнішнього джерела живлення 12В.

Камери оснащені двоступінчастим термоелектричним холодильником на основі елемента Пельт'є, що дозволяє охолоджувати ПЗЗ матрицю до температури на 60 градусів нижче навколишньої. Елемент Пельт'є і ПЗЗ матриця встановлені у вакуумній камері. Для відводу тепла від гарячого спаю елемента Пельт'є використовується мідний радіатор з вентилятором.

Логіка роботи і управління камерою можуть бути легко адаптовані під конкретну задачу, завдяки застосуванню ПЛІС. На ПЛІС можуть бути також реалізовані деякі алгоритми обробки і аналізу зображення.

Особливості цифрових камер сімейства CSDU:

- Широкий динамічний діапазон і низький рівень шумів, що досягаються завдяки використанню для оцифровки зображення спеціалізованої для цієї мети ІМС (CCD image digitizer).
- Висока швидкість передачі даних в комп'ютер, завдяки використанню інтерфейсу USB 2.0 High Speed – до 20 Мбайт / с.
- Можливість підключення до 127 камер до одного комп'ютера (з використанням USB розгалужувачів).
- Можливість об'єднання пікселів для підвищення чутливості та динамічного діапазону (тільки для чорно-білих камер).
- Можливість введення частини зображення (region of interest – ROI) для підвищення частоти зйомки або зниження інтенсивності потоку даних, що передаються в комп'ютер.
- Можливість програмної установки експозиції з точністю до 1 мкс в межах від одиниць мікросекунд до 60 хвилин.
- Відключення вихідного підсилювача ПЗЗ при тривалих експозиціях для усунення створюваної ним паразитної засвітки («amplifier glow»).
- Можливість використання різних режимів запуску зйомки.
- Можливість програмної установки і підтримки необхідної температури ПЗЗ матриці з точністю 1 градус.
- Можливість оновлення внутрішнього програмного забезпечення камери шляхом простого оновлення драйверів, завдяки повністю завантажується архітектурі камер.

Області застосування цифрових камер сімейства CSDU:

- Мікроскопія (в т. ч. для спостереження біолоюмінесценції)
- Реєстрація об'єктів в системах технічного зору
- Неруйнівний контроль та діагностика
- Оптичні вимірювання
- Астрономія

Камери CSDU на основі матриць з черезрядковим виводом зображення представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Сучасні камери CSDU

Модель	Матриця	Розмір ПЗЗ (дюйм/мм)	Розмір пікселя (мкм)	Максимальна частота зйомки (кадр/с)	Час експозиції
CSDU-423*	SONY CCD ICX 423 AL	2/3, 8.58x6.47	11.6x11.2	12	6 мкс – 60 хв
CSDU-429	SONY CCD ICX 429 AL	1/2, 6.36x4.8	6.6x8.3	12	6 мкс – 60 хв
CSDU-285C	SONY CCD ICX 285 AQ	2/3, 8.77x6.6	6.45x6.45	7.5	7 мкс – 60 хв
CSDU-205*	SONY CCD ICX 205 AL	1/2, 6.32x4.76	4.65x4.65	7.5	7 мкс – 60 хв

Висновки до третього розділу

ПЗЗ камери можуть застосовуватись в високочутливих РТВС з непрямым перетворенням. Однак, ПЗЗ камери мають низьку радіаційну стійкість, тому їх необхідно екранувати від рентгенівського випромінювання.

Основними чинниками, що обмежують чутливість ПЗЗ камер, є втрати світла в об'єктиві, втрати через малу відносну площу фоточутливих елементів до повної площі фото чутливої секції, втрати при перетворенні фотон/електрон, обмеження чутливості через власні шуми ПЗЗ камери. Найбільш перспективним напрямом поліпшення чутливості є зменшення власних шумів ПЗЗ матриці.

Основними власними шумами ПЗЗ камери є фотонний шум, шум темного сигналу, шум переносу та шум скидання. При тривалій експозиції найбільш впливовим є темновий шум, що може становити до $20e$ на піксель. Ефективним способом боротьби з темновими струмами є охолодження ПЗЗ матриці.

4 ЕЛЕМЕНТИ ПЕЛЬТ'Є

4.1.Ефект Пельт'є

Ефект Пельт'є – термоелектричне явище, при якому відбувається виділення або поглинання тепла при проходженні електричного струму в місці контакту (спаю) двох різнорідних провідників.

Елемент Пельт'є застосовується в ситуаціях, коли необхідно охолодження з невеликою різницею температур, або енергетична ефективність охолоджувача не важлива. Наприклад, елементи Пельт'є застосовуються в маленьких автомобільних холодильниках, так як застосування компресора в цьому випадку неможливо через обмеження розмірів і, крім того, необхідна потужність охолодження невелика.

Крім того елементи Пельт'є застосовуються для охолодження пристроїв з зарядовим зв'язком у цифрових фотокамерах. За рахунок цього досягається помітне зменшення теплового шуму при тривалих експозиціях (наприклад в астрофотографії). Багатоступінчасті елементи Пельт'є застосовуються для охолодження приймачів випромінювання в інфрачервоних сенсорах.

Тепло Пельт'є пропорційне селі струму і може бути виражене формулою:

$$Q_n = \Pi \cdot q \quad (4.1)$$

де q - заряд, що пройшов через контакт, Π – так званий коефіцієнт Пельт'є, який залежить від природи контактуючих матеріалів та їх температури. Коефіцієнт Пельт'є може бути виражений через коефіцієнт Томпсона:

$$\Pi = \alpha \cdot T \quad (4.2)$$

де α – коефіцієнт Томпсона, T – абсолютна температура.

Необхідно відзначити, що коефіцієнт Пельт'є знаходиться в істотній залежності від температури. Деякі значення коефіцієнта Пельт'є для різних пар металів представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Значення коефіцієнта Пельт'є для різних пар металів

Залізо - константан		Мідь - нікель		Свинець - константан	
Т, К	П, мВ	Т, К	П, мВ	Т, К	П, мВ
273	13,0	292	8,0	293	8,7
299	15,0	328	9,0	383	11,8
403	19,0	478	10,3	508	16,0
513	26,0	563	8,6	278	18,7
593	34,0	613	8,0	633	20,6
833	52,0	718	10,0	713	23,4

Величина виділяемого Пельт'є і його знак залежить від виду контактуючих речовин, сили струму і часу його проходження, тому Q_n може бути виражене ще однією формулою:

$$dQ_n = P_{12} \cdot Idt \quad (4.3)$$

де $P_{12} = P_1 - P_2$ - коефіцієнт Пельт'є для даного контакту, пов'язаний з абсолютними коефіцієнтами Пельт'є P_1 і P_2 контактуючих матеріалів. При цьому вважається, що струм йде від першого зразка до другого. При виділенні тепла Пельт'є маємо $Q_n > 0$, $P_{12} > 0$, $P_1 > P_2$.

При поглинанні тепла Пельт'є воно вважається від'ємним і відповідно: $Q_n < 0$, $P_{12} < 0$, $P_1 < P_2$. Очевидно, що $P_{12} = -P_{21}$.

Розмірність коефіцієнта Пельт'є $[P]$ СИ = Дж/Кл = В.

Класична теорія пояснює явище Пельт'є тим, що при перенесенні електронів струмом з одного металу в інший, вони прискорюються або уповільнюються внутрішньою контактною різницею потенціалів між металами. У разі прискорення кінетична енергія електронів збільшується, а потім виділяється у вигляді тепла. У зворотньому випадку кінетична енергія зменшується, і енергія поповнюється за рахунок енергії теплових коливань атомів другого провідника, таким чином він починає охолоджуватись. При

більш повному розгляді враховується заміна не тільки потенційної, а й повної енергії.

На рис. 4.1. і рис. 4.2. зображений замкнутий ланцюг, складений з двох різних напівпровідників $НП_1$ і $НП_2$ з контактами А і В.

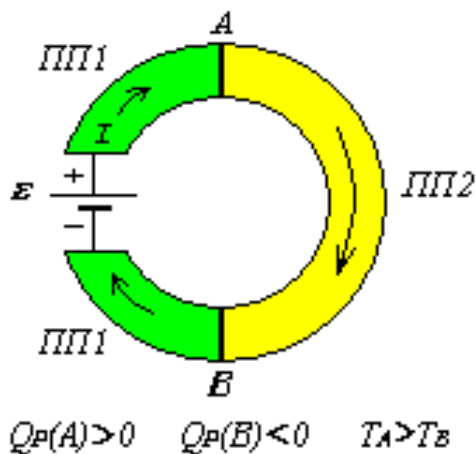


Рис. 4.1 Виділення тепла Пельт'є (контакт А)

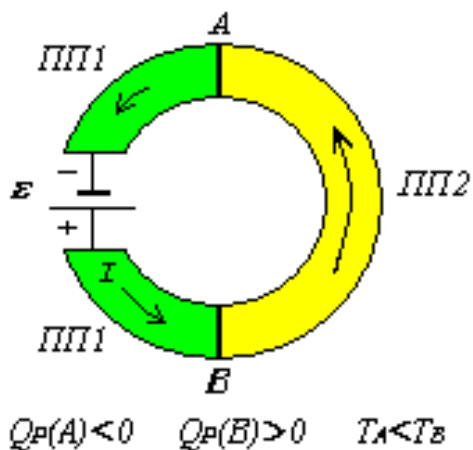


Рис. 4.2 Поглинання тепла Пельт'є (контакт А)

Такий ланцюг, прийнято називати термоелементом, а його вітки – термоелектродами. Через ланцюг тече струм I , створений зовнішнім джерелом e . Рис 4.1. ілюструє ситуацію, коли на контакті А (струм тече від $НП_1$ до $НП_2$) відбувається виділення тепла Пельт'є $Q_n(A) > 0$, а на контакті В (струм направлений від $НП_2$ до $НП_1$) його поглинання - $Q_n(B) < 0$. У результаті відбувається зміна температур спаїв: $T_A > T_B$.

На рис. 4.2. зміна знака джерела змінює напрямок струму на протилежне: від $НП_2$ до $НП_1$ на контакті А і від $НП_1$ до $НП_2$ на контакті В. Відповідно змінюється знак тепла Пельт'є і співвідношення між температурами контактів: $Q_n(A) < 0, Q_n(B) > 0, T_A < T_B$.

Причина виникнення ефекту Пельт'є на контакті напівпровідників з однаковим видом носіїв струму (два напівпровідника n -типу або два напівпровідника p -типу) така ж, як і у випадку контакту двох металевих провідників. Носії струму (електрони чи дірки) по різні боки спаю мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох причин: енергетичного спектру, концентрації, механізму розсіювання носіїв заряду. Якщо носії, пройшовши через спай, потрапляють в область з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній решітці, в результаті чого поблизу контакту відбувається виділення тепла Пельт'є ($Q_n > 0$) і температура контакту підвищується. При цьому на іншому спаї носії, переходячи в область з більшою енергією, запозичують відсутню енергію від решітки, відбувається поглинання тепла Пельт'є ($Q_n < 0$) і зниження температури.

Ефект Пельт'є, як і всі термоелектричні явища, виражений особливо сильно в ланцюгах, складених з електронних (n - тип) і діркових (p - тип) напівпровідників. У цьому випадку ефект Пельт'є має інше пояснення. Розглянемо ситуацію, коли струм в контакті йде від діркового напівпровідника до електронного. При цьому електрони і дірки рухаються назустріч один одному і, зустрівшись, рекомбінують. В результаті рекомбінації звільняється енергія, яка виділяється у вигляді тепла. Ця ситуація розглянута на рис. 4.3, де зображені енергетичні зони (ЕС - зона провідності, EV - валентна зона) для домішкових напівпровідників з дірковою та електронною провідністю.

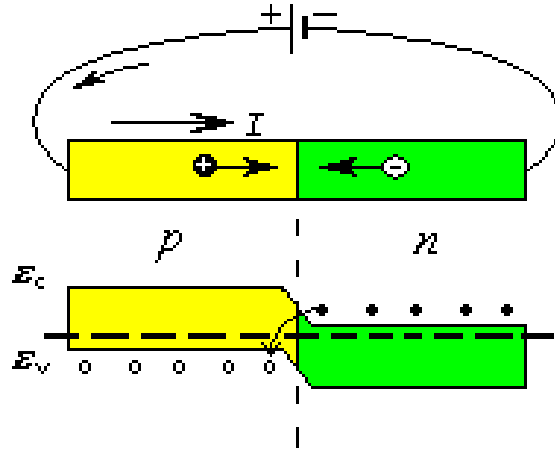


Рис. 4.3 Виділення тепла Пельт'є на контакті напівпровідників p і n -типів

На рис. 4.4. (E_c - зона провідності, E_v - валентна зона) ілюструється поглинання тепла Пельт'є для випадку, коли струм йде від n до p - напівпровідника.

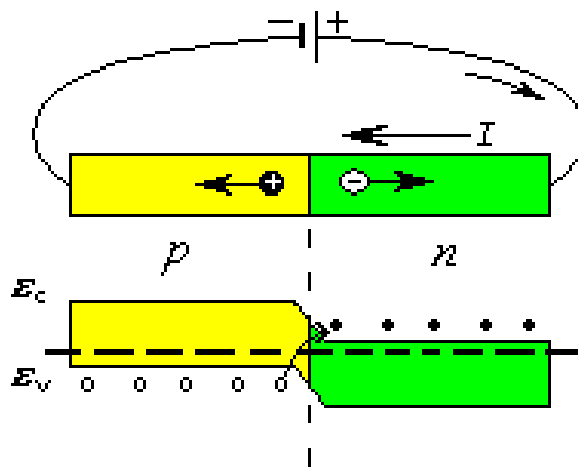


Рис. 4.4 Поглинання тепла Пельт'є на контакті напівпровідників p і n - типів

Тут електрони в електронному й дірки в дірковому напівпровідниках рухаються в протилежні сторони, ідучи від кордону розділу. Спад носіїв струму в прикордонній області заповнюється за рахунок попарного народження електронів і дірок. На утворення таких пар потрібна енергія, яка поставляється тепловими коливаннями атомів решітки. Утворені електрони і

дірки захоплюються в протилежні сторони електричним полем. Тому поки через контакт йде струм, безперервно відбувається народження нових пар. У результаті в контакті тепло буде поглинатися.

Застосування напівпровідників різних типів в термоелектричних модулях представлено на рис. 4.5.



Рис. 4.5 Застосування напівпровідникових структур в термоелектричних модулях

4.2. Модулі Пельт'є

Об'єднання великої кількості пар напівпровідників p -і n -типу дозволяє створювати охолоджуючі елементи - модулі Пельт'є порівняно великій потужності. Структура напівпровідникового термоелектричного модуля Пельт'є представлена на рис. 4.6.

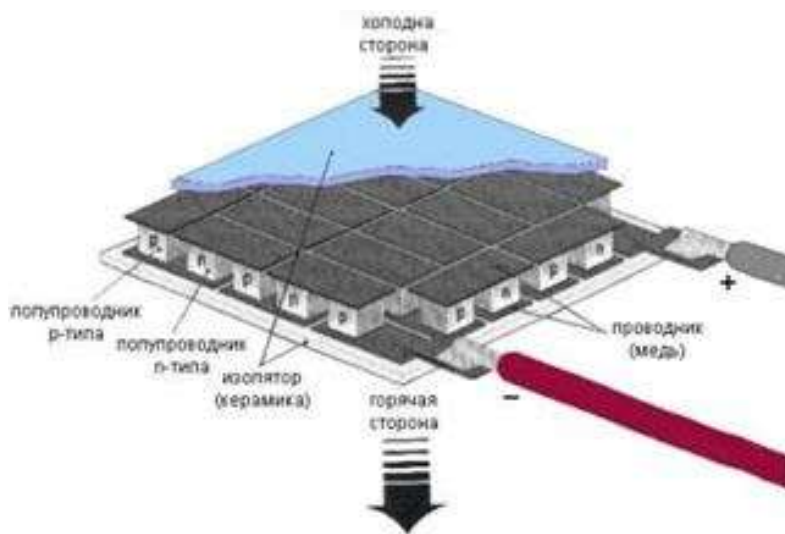


Рис. 4.6 Структура модуля Пельт'є

Модуль Пельтьє, являє собою термоелектричний холодильник, що складається з послідовно з'єднаних напівпровідників p -і n -типу, що утворюють pn -і np -переходи. Кожен з таких переходів має тепловий контакт з одним з двох радіаторів. У результаті проходження електричного струму певної полярності утворюється перепад температур між радіаторами модуля Пельтьє: один радіатор працює як холодильник, інший радіатор нагрівається і служить для відведення тепла. На рис. 4.7. представлений зовнішній вигляд типового модуля Пельтьє.

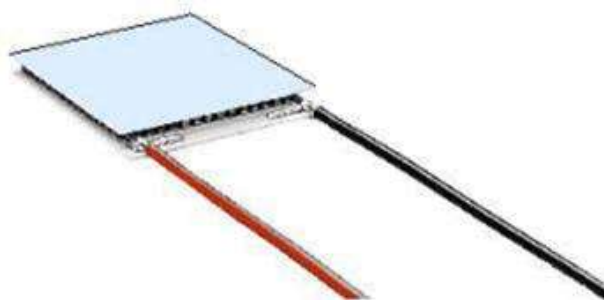


Рис. 4.7 Зовнішній вигляд модуля Пельтьє

Типовий модуль забезпечує значний температурний перепад, який складає декілька десятків градусів. При відповідному примусовому охолодженні нагріваемого радіатора другий радіатор - холодильник, дозволяє досягти негативних значень температур. Для збільшення різниці температур можливе каскадне включення термоелектричних модулів Пельтьє при забезпеченні адекватного їх охолодження. Це дозволяє порівняно простими засобами отримати значний перепад температур і забезпечити ефективне охолодження елементів, що захищаються. На рис. 4.8. представлений приклад каскадного включення типових модулів Пельтьє.

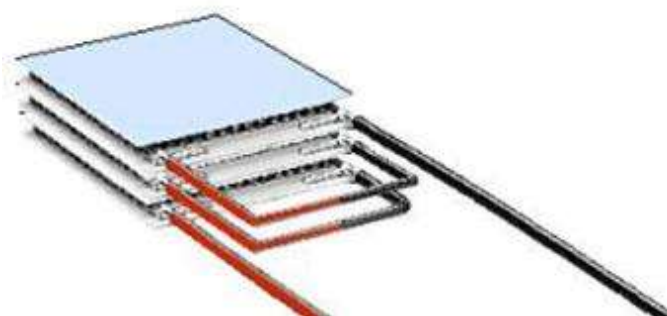


Рис. 3.8 Приклад каскадного включення модулів Пельтьє

Головна характеристика термоелектричного охолоджувального пристрою - це ефективність охолодження:

$$Z = a^2 / (rl),$$

де a - коефіцієнт термоЕРС; r - питомий опір; l - питома теплопровідність напівпровідника.

Параметр Z - функція температури і концентрації носіїв заряду, причому для кожної заданої температури існує оптимальне значення концентрації, при якій величина Z максимальна. Введення в напівпровідник тих чи інших домішок - основний доступний засіб змінювати його показники (a , r , l) в бажану сторону.

На теперішній час існує багато фірм виробників модулів Пельт'є, характеристики яких представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Характеристики модулів Пельт'є

Модуль	I_{max} , А	U_{max} , В	Q_{max} , Вт	dT_{max} , К	Розміри
STORM-71	16,1	3,6	36,0	71	40x40x3,2
FROST-72	16,1	3,6	36,0	71	40x40x3,2
FROST-72	16,3	6,2	62,0	72	40x40x5,4
ICE-71	16,7	6,3	65,0	74	40x40x6,3
HAIL-71	16,1	8,0	80,0	71	40x40x5,4
DRIFT-1,5	16,1	8,0	80,0	71	40x40x4,8
DRIFT-1,2	24,9	6,1	94,0	70	40x40x6,7
DRIFT-1,15	24,6	7,6	115,0	69	40x40x5,8
DRIFT-1,05	24,6	7,9	120,0	69	40x40x5,9
DRIFT-0,8	24,6	8,6	131,0	69	40x40x6,3
TB-127-2,0-1,15	24,6	11,3	172,0	69	40x40x3,7

Висновки до четвертого розділу

Елементи Пельт'є можуть ефективно застосовуватись в високочутливих РТВС на основі ПЗЗ камери для охолодження ПЗЗ матриці. За рахунок цього досягається помітне зменшення темного шуму при тривалих експозиціях.

Ефективність охолодження елемента Пельт'є залежить від концентрації носіїв заряду в напівпровідниках, з яких складається елемент. Введення в напівпровідник тих чи інших домішок – основний доступний засіб змінювати показники елемента Пельт'є в необхідну сторону.

Типовий модуль Пельт'є забезпечує значний температурний перепад, який становить кілька десятків градусів. При відповідному примусовому охолодженні нагріваного радіатора другий радіатор – холодильник, дозволяє досягти негативних значень температур. Для збільшення різниці температур можливе каскадне включення термоелектричних модулів Пельт'є при забезпеченні адекватного їх охолодження. Це дозволяє порівняно простими засобами отримати значний перепад температур і забезпечити ефективне охолодження елементів, що захищаються.

5 РОЗРАХУНОК ДОЦІЛЬНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЗЗ МАТРИЦІ

5.1. Відношення сигнал/шум в ПЗЗ матрицях

До складу шумів ПЗЗ матриць входять:

- Випадкові коливання фото-електронів від джерела спостереження, тобто дробові шуми від джерела сигналу ($S_{obj}^{0.5}$).

- Випадкові коливання термічно-породжених електронів, що утворюються в ПЗЗ, тобто дробовий шум від темного струму ($S_{dark}^{0.5}$).

- Шум детектора, що залежить від часу, тобто шум зчитування, R . Так як немає сигналу, пов'язаного з цим джерелом шуму i , отже, пуасонівська статистика не застосовується, то тут не потрібен квадратний корінь.

Припустимо, що всі перераховані вище джерела шуму незалежні, загальний шум, N , визначається як квадратний корінь з суми квадратів окремих шумів:

$$N = (S_{obj} + S_{dark} + R^2)^{0.5} \quad (5.1)$$

Таким чином, відношення сигнал / шум задається рівнянням:

$$SNR = S/N = \left(\frac{S_{obj}}{S_{S_{obj}}} + S_{dark} + R^2 \right)^{0.5} \quad (5.2)$$

Важливо розуміти, що це рівняння можна застосувати навіть після віднімання середнього значення темного струму від кожного пікселя, оскільки дробові шуми від цього джерела будуть присутні.

Щоб використовувати це рівняння правильно, потрібно визначитися з одиницями виміру, що використовуються для кожного з доданків. Як правило, при розрахунках відношення сигнал / шум для ПЗЗ матриць використовується:

- S_{obj} в одиницях фотонів в секунду.
- S_{dark} в одиницях електронів в секунду на піксель.
- R в одиницях електронів на піксель.

Варто зазначити, що зі збільшенням часу експозиції S_{obj} та будуть S_{dark} зростати, а R залишатиметься постійною. Таким чином, в рівнянні сигнал / шум, наведеному вище, ми повинні враховувати час експозиції ПЗЗ t . Також слід враховувати кількість пікселів на які поширюється випромінювання досліджуваного об'єкта, n_{pix} , і ефективність перетворення фотонів в електрони, QE . Перетворення фотонів в електрони є істотним, оскільки в іншому випадку можна було б отримати більш високе співвідношення сигнал/ шум, ніж виміряти, тобто сигнал в рівнянні (5.2) повинен бути сигналом виявлення ПЗЗ матрицею, а не сигналом, випромінюваним джерелом. В результаті отримаємо рівняння:

$$SNR = \frac{[S_{obj} \cdot t \cdot QE]}{[S_{obj} \cdot t \cdot QE + S_{dark} \cdot t \cdot n_{pix} + R^2 \cdot n_{pix}]^{0.5}} \quad (5.3)$$

Рівняння може бути спрощено:

$$SNR = \frac{[S_{obj} \cdot t \cdot QE]^{0.5}}{[S_{obj} + n_{pix} \cdot S_{dark} / QE + R^2 / QE]^{0.5}} \quad (5.4)$$

Тепер можемо використовувати рівняння (5.2) для визначення трьох граничних випадків: випадок домінування шумів від джерела, домінування темного шуму і домінування шуму зчитування.

Домінування шумів від джерела спостереження. В цьому випадку сигнал від об'єкта набагато більший, ніж темновий струм або шум зчитування. Таким чином,

$$SNR = \frac{S}{N} = \left(\frac{S_{obj}}{S_{S_{obj}} + S_{dark} + R^2} \right)^{0.5} \approx S_{obj}^{0.5} \quad (5.5)$$

В цьому випадку, *сигнал / шум* збільшується як квадратний корінь з сигналу об'єкта. Оскільки сигнал об'єкта пропорційний часу експозиції, це означає, що *сигнал / шум* пропорційно квадратному кореню з часу експозиції. Якщо час експозиції збільшиться в два рази, то *сигнал / шум* збільшиться на $2^{0.5} \approx 1,4$. Сигнал об'єкта також пропорційний площі апертури камери, яка пропорційна квадрату діаметра. Таким чином, *сигнал / шум* пропорційне

діаметру апертури камери – якщо діаметр збільшити в два рази, *сигнал / шум* подвоїться.

Домінування темного шуму. В цьому випадку значення темного шуму на піксель набагато більше, ніж сигнал досліджуваного об'єкта, чи шум зчитування на піксель. Таким чином,

$$SNR = S/N = \left(\frac{S_{obj}}{S_{S_{obj}} + S_{dark} + R^2} \right)^{0.5} \approx \frac{S_{obj}}{S_{dark}^{0.5}} \quad (5.6)$$

Такі випадки є вкрай рідкісними, і в основному зустрічаються в рентгенотелевізійних системах або в астрономії. Темновий струм вносить помітний внесок у значення накопиченого заряду в ПЗЗ матриці, внаслідок чого зменшується можливий час експозиції. Методом боротьби з темновими шумами є охолодження ПЗЗ матриць. Більш докладно ця тема буде розглянута далі.

Домінування шуму зчитування. В цьому випадку шум зчитування на піксель набагато більше, ніж сигнал об'єкта або темновий струм на піксель. Таким чином,

$$SNR = S/N = \left(\frac{S_{obj}}{S_{S_{obj}} + S_{dark} + R^2} \right)^{0.5} \approx \frac{S_{obj}}{R} \quad (5.7)$$

Так як шум зчитування не залежить від часу експозиції або апертури камери, *сигнал / шум* буде лінійно зростати зі збільшенням часу накопичення і пропорційно квадрату діаметра апертури камери.

Для максимального *сигнал / шум*, потрібно збільшувати час накопичення заряду на ПЗЗ матриці і одночасно з цим охолоджувати її. В іншому випадку на якість зображення будуть впливати темнові шуми або шуми зчитування.

5.2. Вплив охолодження ПЗЗ матриці на чутливість РТВС

Корисним сигналом на вході S_{ex} в досліджуваній системі є кількість рентгенівських γ - квантів, що потрапили за час експозиції на елемент зображення (піксель) вхідного люмінесцентного екрану:

$$S_{\text{ex}} = N_{\gamma} \quad (5.8)$$

Для дисперсії вхідного сигналу, яка представляє собою дисперсію числа квантів, в приміщенні пуассонівської статистики, приймемо:

$$\Delta^2 S_{\text{ex}} = \Delta^2 N_{\gamma} = N_{\gamma} \quad (5.9)$$

Після перетворення зареєстрованого рентгенівського сигналу досліджуваною системою ми одержуємо результуючий оцифрований сигнал на кожному пікселі I_m .

Цей сигнал уже володіє своїми статистичними характеристиками: середнім значенням I_0 і дисперсією $\Delta^2 I$. Причому співвідношення між цими величинами не є таким простим, як для вхідного сигналу (5.9). Справа в тому, що кожен крок перетворення сигналу вносить додаткові шуми і в підсумку співвідношення дисперсії і середнього виглядає наступним чином:

$$\Delta^2 I = \alpha I_0 + \Delta_{\text{ПЗЗ}}^2 \quad (5.10)$$

Тут величина $\Delta_{\text{ПЗЗ}}^2$ відповідає власним шумам приладу з зарядовим зв'язком, а число α виявляється більше одиниці і пов'язане з квантовою ефективністю детектування приладу [55]. Чисельне значення цієї величини в основному визначається попередніми ступенями перетворення сигналу і, тому, задається схемою системи візуалізації.

Власні шуми ПЗЗ, як видно з (5.10) сильно впливають на якість зображення при малих сигналах, і, тому питання про зменшення цих шумів виявляється таким актуальним.

Здатність системи візуалізації розрізняти об'єкти заданого розміру і малого контрасту завжди була однією з якісних порівняльних характеристик різних пристроїв. Ця характеристика використовувалась в перших

аналогових телевізійних системах, при визначенні якості підсилювачів рентгенівського зображення [50], і використовується зараз, наприклад, при визначенні контрастної чутливості цифрових систем візуалізації рентгенівського зображення.

В роботі [53] був запропонований об'єктивний варіант методу визначення контрастної чутливості приладу, який вводиться наступним чином:

Припустимо, що на зображення перебуває об'єкт певного розміру, що відрізняється від фону. Візьмемо слідувачи [53], в якості корисного сигналу S відміну середнього сигналу I , обчисленого по пікселям, які займає об'єкт ($I = M^{-1} \sum_{m=1}^{m=M} I_m$), від середнього, обчисленого по іншому зображенню:

$$S = I_0 - I \quad (5.11)$$

Якщо ми припустимо, що зоровий апарат людини, намагаючись знайти на зображенні об'єкта заданого розміру, усереднює сигнал від сусідніх M пікселів і співвідносить всьому об'єкту сигнал S , то дисперсія розподілу значень величин по можливих сукупностях колективів з сусідніх M пікселів буде дорівнювати

$$\Delta^2 S = \frac{1}{M} \Delta^2 I \quad (5.12)$$

Природним тепер є введення відношення сигнал / шум для цього конкретного об'єкта наступним чином:

$$\Psi = SNR = \frac{S}{\sqrt{\Delta^2 S}} = \frac{I_0}{I} \sqrt{M} = K \sqrt{M} \frac{I_0}{\sqrt{\Delta^2 I}} \quad (5.13)$$

де $K = (I_0 - I) / I_0$ - контраст об'єкта.

Як відомо [46], ця величина дозволяє визначити можливість виявлення заданого об'єкта зоровим апаратом людини. Причому для цієї величини були зроблені оцінки [46] і проведені експерименти [53], з яких випливало, що в якості критичного значення, що визначає поріг розрізнення об'єкта, можна взяти величину

$$SNR_{(порог)} = \Psi_c \approx 5 \quad (5.14)$$

За допомогою співвідношення (5.13) можна обчислити величину, яку забезпечує конкретний прилад при певній дозі, заданому радіаційному контрасті і розмірі тест – об’єкта. Потім, з порівняння знайденої величини з критичним значенням або з такими ж величинами, обчисленими для інших приладів, судити про якість приладу. Таким чином, величина, яку можна назвати «розрізнення граничного контрасту», фактично є порівняльною характеристикою систем візуалізації рентгенівського випромінювання, причому об’єктивною і кількісною характеристикою.

На рис. 5.1.показана залежність від експозиційної дози параметра розрізнення об’єкта із заданим контрастом (1%). Лінії відповідають розрахункам за формулою (5.13). На цьому і всіх подальших малюнках лінії 1 відповідає розрахунку для охолоджувальної ПЗЗ камери, а лінії 2 – для не охолоджуваної.

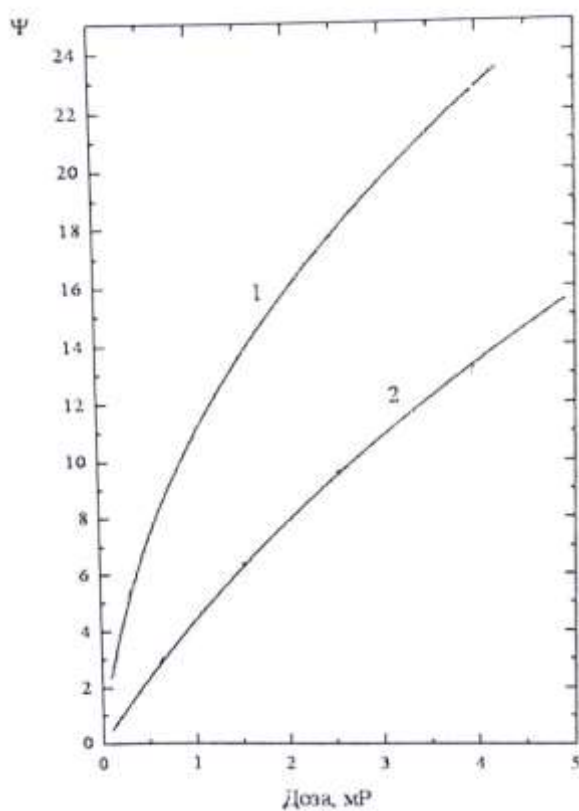


Рис. 5.1 Залежність від експозиційної дози параметра розрізнення об’єкта

Зростання кривих на рис.5.1. відображає добре відомий факт поліпшення розрізнення слабкоконтрастних об'єктів при збільшенні дози. У той же час істотна відмінність кривої 1, що відповідає охолодженню ПЗЗ, від кривої 2, що відповідає не охолодженню приладу свідчить про значний вплив охолодження на розрізнення об'єкта. Так, наприклад, якщо у випадку теплового ПЗЗ при дозі 1,5 мР об'єкт погано помітний ($\Psi = 6 \approx \Psi_c$), то на охолодженню приладі той же об'єкт безперечно виявляється: $\Psi = 14 > \Psi_c$.

На другому етапі досліджувався вплив охолодження на залежність розрізнення об'єкта від його розмірів і контрасту при постійній дозі. На рис. 5.2 показані залежності параметра розрізнення об'єкта від добутку контрасту на діаметр при постійній дозі в 1 мР для охолодженого приладу (крива 1) і неохолодженого приладу (крива 2). З рисунка видно, що охолодження ПЗЗ призводить до великих значень параметра розрізнення Ψ , так і до зміни нахилу досліджуваної залежності. З цього випливає, що охолоджуваний ПЗЗ дозволяє не тільки детектувати об'єкти меншого контрасту і (або) розміру, але й краще розрізняти один від одного об'єкти близького контрасту. Ця властивість фактично призводить до збільшення динамічного діапазону приладу.

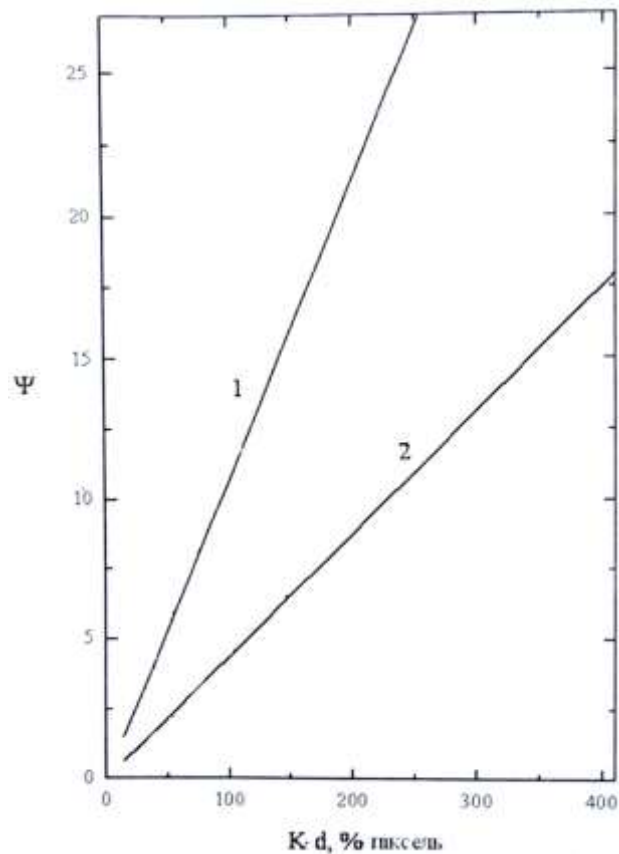


Рис 5.2 Залежності параметра розрізнення об'єкта від добутку контрасту на діаметр при постійній дозі в 1мР

На третьому етапі перевірялося поліпшення розрізнення об'єктів при охолодженні ПЗЗ, у разі однакових експозицій. Тобто перевірялося, наскільки меншим буде контраст і (або) розміри цілком помітного об'єкта в разі охолодженого ПЗЗ в порівнянні з неохолодженим. На рис. 5.3 представлена залежність контрасту об'єкта, який надійно виявляється, як функція його розміру при постійній дозі для випадку охолоджуваного (крива 1) і не охолоджуваного (крива 2) ПЗЗ.

З рисунка видно, що в разі охолоджуваної матриці при заданому контрасті розпізнаються більш маленькі об'єкти, так як крива 1 лежить практично в два рази ближче до вертикальної осі. Крім того, при заданому розмірі об'єкта вдається розпізнати менш контрастні об'єкти. Це видно з того, що крива 1 лежить практично в два рази нижче, ніж крива 2.

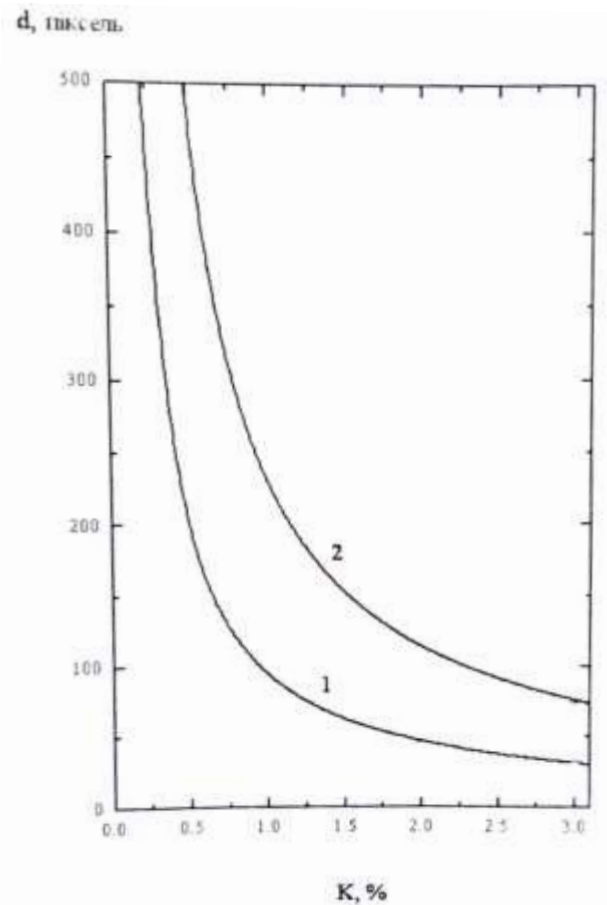


Рис. 5.3 Залежність контрасту об'єкта, який надійно виявляється, як функція його розміру при постійній дозі

Четвертий етап був найбільш важливим у сенсі можливості зниження експозиційної дози при збереженні розрізнення об'єктів за рахунок охолодження. Основне питання було наступним: наскільки можна зменшити експозиційну дозу за рахунок охолодження ПЗЗ, щоб при цьому не погіршилося розрізнення об'єктів заданого розміру і контрасту.

На рис. 5.4. показана залежність дози, необхідної для збереження безумовної видимості об'єкта від його контрасту при заданих розмірах об'єкта. З рисунка видно, що крива 1, відповідна охолодженому ПЗЗ, лежить нижче в три рази, ніж крива 2, відповідна неохолодженому ПЗЗ. Це означає, що для забезпечення безумовного розпізнавання об'єкта в разі охолодження потрібні в три рази менші дози, ніж для випадку не охолоджуваної ПЗЗ.

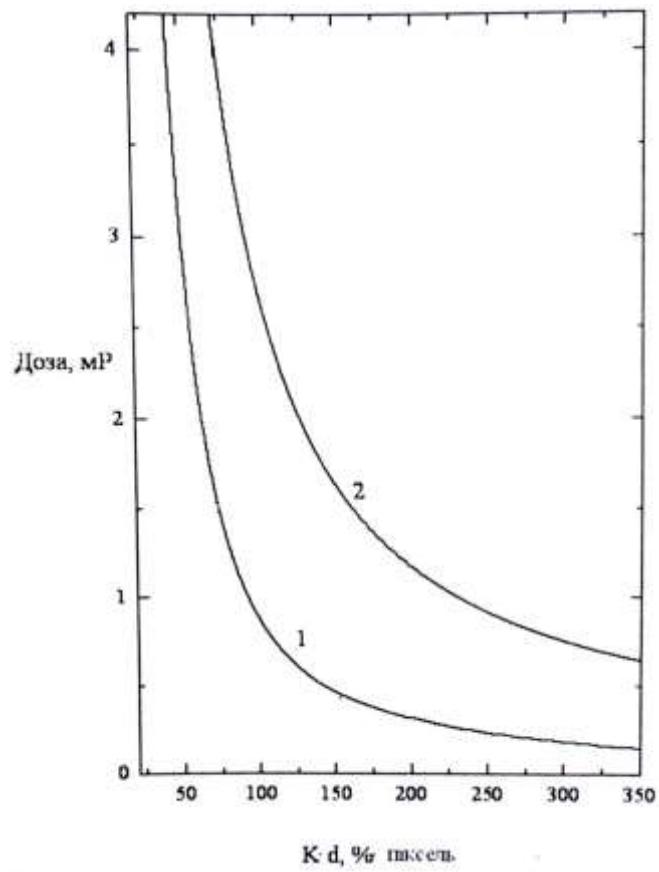


Рис. 5.4 Залежність дози, необхідної для забезпечення безумовної видимості об'єкта від його контрасту при заданих розмірах об'єкта

Висновки до п'ятого розділу

До складу шумів ПЗЗ матриці входять дробові шуми від джерела сигналу, дробові шуми темного струму та шум зчитування. Першу складову шуму можна зменшити при збільшенні часу накопичення ПЗЗ матриці. При збільшенні часу експозиції в 2 рази, відношення сигнал / шум збільшення в 1,4 рази при цьому будуть збільшуватись темнові шуми.

До складу темного струму ПЗЗ матриці входять темновий струм, що генерується в області збіднення, дифузія темного струму, що генерується на кордоні Si-SiO₂. Останнім доданком можна знехтувати.

Темновий струм області збіднення пропорційний ширині збідненої області, концентрації власних носіїв заряду та обернено пропорційний часу життя носіїв заряду збідненої області. Вважається, що ця складова домінує при кімнатних температурах.

Дифузійний темновий струм пропорційний коефіцієнту дифузії електронів, квадрату концентрації власних носіїв заряду та обернено пропорційний концентрації акцепторів в підкладці р-типу. Ця складова швидше зростає при збільшенні температури, тому вважається, що цей струм домінує при високих температурах.

При охолодженні ПЗЗ матриці можна майже повністю позбутися темнових шумів. Темнові шуми зменшуються в 2 рази при охолодженні на кожні 10К. Таким чином, використовуючи ПЗЗ камери з великим часом експозиції та системами охолодження можна значно покращити відношення сигнал / шум.

6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТУ ПЕЛЬТ'Є

Перед тим, як приступити до вибору модуля Пельт'є необхідно визначитись при яких умовах він буде працювати:

- Температура, яку необхідно забезпечити поверхні об'єкта охолодження 5-10° С;
- Величина охолодженого робочого об'єму: ½ дюйма;
- Температура навколишнього середовища: 28°С;
- Наявність в охолоджуваному обсязі активного навантаження: ні.

Залежно від особливостей охолоджуваного об'єкта, температури охолоджуваного об'єкта і температури навколишнього середовища можливі різні умови функціонування термоелектричного охолоджувального пристрою і відповідно різні вимоги до значення величини холодопродуктивності.

Для зменшення впливу температури навколишнього середовища слід використовувати теплоізолюючі матеріали. Одним з найбільш часто вживаних і рекомендованих для теплоізоляції матеріалом, є пінополіуретан, що має коефіцієнт теплопровідності 0,035 Вт /мК.

Теплопровідність кремнію 150 Вт /мК.

У тому випадку, якщо температура навколишнього середовища нижче температури, яку треба отримати на охолоджуваному об'єкті, то в такій системі необхідно враховувати природне перенесення тепла від охолоджуваного об'єкта в навколишнє середовище через стінки ізолюючої камери, що призводить до зниження необхідного значення холодопродуктивності термоелектричного модуля.

У цьому випадку матеріал стінок охолоджуваної камери повинен мати максимально високе значення величини теплопровідності. Зазвичай, у цьому випадку стінки охолоджуваної камери слід виготовляти з матеріалу. Значення теплопровідності для часто використовуваних матеріалів (табл.6.1):

Таблиця 6.1 Значення теплопровідності для часто використовуваних матеріалів

Мідь	386 Вт / мК
Алюміній	204 Вт / мК
Цинк	112 Вт / мК
Чавун	83 Вт / мК
Сталь	48 Вт / мК

В нашому випадку використання ізолюючої камери не є необхідним.

При проведенні розрахунків будемо використовувати наступні позначення:

T_h - температура гарячої сторони модуля;

Q_1 - холодопродуктивність, необхідна для досягнення температури 5°C ;

Q_2 - холодопродуктивність, необхідна для компенсації теплонатікання;

Q_c - повна холодопродуктивність ($Q_1 + Q_2$);

Q_3 - теплова потужність, яка виділяється на гарячій пластині модуля;

P - потужність споживана модулем, Вт.

Послідовність вибору необхідного модуля складається з наступних кроків.

1. Визначення потужності, необхідної для охолодження матриці до необхідної температури (Q_1):

$$Q_1 = \frac{mc(T_a - T_c)}{t} = \frac{0.02 \cdot 678(28 - 5)}{20} = 23.4 \text{ Вт} \quad (6.1)$$

2. Визначення втрат за рахунок тепло натікання (Q_2):

$$Q_2 = \frac{\lambda S(T_a - T_c)}{\delta} = \frac{0.035 \cdot 0.00013(28 - 5)}{20 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ мВт} \quad (6.2)$$

де площа зовнішньої поверхні $S_{\text{вн}} = 0,00013 \text{ м}^2$.

3. Визначення необхідної сумарної холодопродуктивності термоелектричного модуля (Q_c):

$$Q_c = Q_1 + Q_2 \quad (6.3)$$

Використовуючи розрахунки, проведені раніше на кроці 1 і кроці 2, одержимо:

$$Q_c = 23 + 0,005 = 26,4 \text{ Вт}$$

Таким чином, в результаті кроків 1-3 визначено необхідне значення холодопродуктивності Q_c для заданої різниці температур $\Delta T = 23\text{С}$.

4. Визначення температури гарячої сторони термоелектричного модуля T_h і різниці температур на модулі ΔT :

На основі практичних рекомендацій температуру гарячої сторони термоелектричного модуля T_h слід взяти на 20 С вище температури навколишнього середовища (для ефективної роботи радіатора).

У цьому випадку досягається ефективна робота радіатора, близька до максимальної:

$$T_h = T_a + 20 = 48\text{С}. \quad (6.4)$$

Різниця температур між сторонами модуля:

$$\Delta T = T_h - T_c = 48 - 5 = 43\text{С}. \quad (6.5)$$

5. Визначення максимальної холодопродуктивності Q_{\max} , термоелектричного модуля:

Q_{\max} оцінюється за формулою:

$$Q_{\max} = 1,15 Q_c \frac{1}{1 - \frac{\Delta T}{67}} \left(\frac{300}{T_h} \right)^2 \quad (6.6)$$

Підставляючи чисельні значення, маємо:

$$Q_{\max} = 2,54 * 26,4 = 67 \text{ Вт}$$

Як правило, для більшості практичних застосувань можуть бути використані також термоелектричні модулі, які мають в інтервалі

$$[Q_{\max} - 10\%; Q_{\max} + 20\%]$$

6. Вибір термоелектричного модуля:

Використовуючи значення Q_{\max} , отримані на кроці 5, слід звернутися до каталогу термоелектричних модулів, вибрати термоелектричний модуль з Q_{\max} , максимально близьким до значення, розрахованого на кроці 5.

Аналізуючи каталог і результати розрахунку, вибираємо термоелектричний модуль ТВ-71-2,2-1,5.

Таблиця 6.2. Параметри елементів Пельт'є

Модуль	I _{max} (А)	Q _{max} (Вт)	U _{max}	D T _{max} (К)	Розміри (мм)		
					А	В	Н
ТВ-127-1,4-1,5	6,1	60,0	15,9	70	40,0	40,0	3,9
ТВ-127-1,4-1,2	7,6	75,0	15,9	70	40,0	40,0	3,6
ТВ-127-1,4-1,15	7,9	76,0	15,7	69	40,0	40,0	3,4
ТВ-127-1,4-1,05	8,6	84,4	15,7	69	40,0	40,0	3,3
ТВ-127-2,0-2,5	7,6	76,0	16,3	72	48,0	48,0	4,9
ТВ-71-2,0-1,5	12,4	68,0	8,9	70	40,0	40,0	4,0
ТВ-32-2,8-1,5	24,4	60,0	4,0	70	40,0	40,0	4,0
ICE-71	8,0	80,0	16,1	71	40,0	40,0	3,4
НАІL	7,9	76,0	15,7	69	48,0	48,0	3,4
TURBO-1.3 посл.	3,6	69,0	31,4	69	40,0	40,0	3,6
TURBO-1.3 пар.	7,2	69,0	15,7	69	40,0	40,0	3,6
ТВ-119-1,4-1,15СН	7,9	72,0	14,7	69	40,0	40,0	7,8

7. Визначення споживаного струму I , напруги U і споживаної електричної потужності:

Визначимо струм I модуля ТВ-71-2,0-1,5, необхідний для забезпечення холодопродуктивності $Q_c = 26,4 \text{ Вт}$ при температурах гарячої сторони $T_h = 318 \text{ К}$ та холодної сторони $T_c = 278 \text{ К}$. Охолодження модуля залежить від поглинання теплоти за рахунок ефекту Пельт'є, яке прямо пропорційно протікаю чому струму, від виділення теплоти Джоуля (квадратично зростає при збільшенні струму) і від потоку теплоти в модулі за рахунок теплопровідності. Для знаходження необхідного струму необхідно вирішити наступне квадратичне рівняння:

$$\theta^2 + b \cdot \theta + c = 0 \quad (6.7)$$

де $\theta = \frac{I}{I_{\max}}$ - безрозмірний струм, або $I = \theta \cdot I_{\max}$;

$$b = \frac{-2T}{300 - \Delta T_{\max}} \quad (6.8)$$

$$c = \frac{2Q_c}{U_{\max} I_{\max}} \frac{300}{300 - \Delta T_{\max}} + \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \quad (6.9)$$

Визначивши коефіцієнти b і c , можна знайти необхідний струм як рішення квадратного рівняння за відомою формулою:

$$I = \theta \cdot I_{\max} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} I_{\max} \quad (6.10)$$

Для чисельного розрахунку коефіцієнтів d , b , c необхідно використовувати наступні параметри обраного модуля (ТВ-71-2,0-1,5):

Максимальний струм $I_{\max} = 6,3A$;

Максимальна холодопродуктивність $Q_{\max} = 65,0W$;

Максимальна напруга $U_{\max} = 16,7V$;

Максимальна різниця температур на модулі $\Delta T_{\max} = 74K$;

Підставляючи чисельні значення, маємо:

Коефіцієнт $b = -2,46$

Коефіцієнт $c = 1,21$

Постійний струм живлення I дорівнює:

$$I = \frac{2.46 - \sqrt{(-2.46)^2 - 4 \cdot 1.21}}{2} \cdot 6.3 = 0.68 \cdot 6.3A = 4.3A$$

Напруга живлення U можна визначити за такою формулою:

$$U = \left(\frac{I}{I_{\max}} \cdot \frac{300 - \Delta T_{\max}}{300} + \frac{\Delta T}{300} \right) \cdot U_{\max}$$

$$U = \left(\frac{4.3}{6.3} \cdot \frac{300 - 74}{300} + \frac{40}{300} \right) \cdot 16.7 = 0.65 \cdot 16.7 = 10.8V$$

Потужність, що P визначається як добуток струму на напругу живлення:

$$P = U \cdot I$$

$$P = 10.8 \cdot 4.3 = 46.4 \text{ Вт}$$

Таким чином, визначені всі електричні параметри: струм $I=4.3 \text{ А}$, напруга $U=10.8 \text{ В}$, споживана потужність $P=46.4 \text{ Вт}$.

8. Визначення теплового опору радіатора на гарячій стороні термоелектричного модуля:

Для відводу тепла, що виділяється на гарячій стороні термоелектричного модуля необхідно використовувати радіатор з певним тепловим опором R_h . Воно визначається різницею температур між гарячою стороною модуля і середовищем і тепловою потужністю, що виділяється на гарячій стороні:

$$R_{hot} = (T_h - T_a) / (Q_c + P) \quad (6.11)$$

Використовуючи чисельні значення прикладу, маємо:

$$R_{hot} = (45 - 25) / (26 + 56) = 0,24 \text{ К / Вт}$$

Необхідний радіатор може бути вибраний за довідниками або за каталогами фірм – виробників радіаторів.

Отже для зниження темнових струмів в осередках ПЗЗ, що призводять до виникнення паразитного фонових сигналу і появи на зображенні «гарячих пікселів», в камері використовується охолодження ПЗЗ матриці за допомогою термоелектричного холодильника на основі ефекту Пельтьє. Для відводу тепла від гарячого спаю елемента Пельтьє використовується мідний радіатор з вентилятором. Це дозволяє охолоджувати матрицю до температури на 60 градусів нижче навколишнього. Зазвичай досягається температура ПЗЗ сенсора -30 ... -32 градуси. На ПЗЗ матриці встановлений електронний датчик температури, що дозволяє контролювати і підтримувати задану програмно температуру матриці з точністю 1 градус. Для підтримки температури застосовується широтно-імпульсне регулювання потужності холодильника Пельтьє. Максимальна потужність холодильника становить 30

Вт. На радіаторі також встановлений датчик температури. Внутрішня логіка камери відключає елемент Пельт'є при перегріві його гарячого спаю для попередження виходу з ладу.

Охолодження ПЗЗ матриці дозволяє досягати часу експозиції до 1 години. При цьому матриця здатна реєструвати настільки малі порції світла, що виникає таке неприємне явище, як вплив світіння вихідного підсилювача ПЗЗ, зване в іноземній літературі «amplifier glow». Воно обумовлене тим, що наявні у вихідному каскаді ПЗЗ прямозміщені р-п - переходи, через які протікає струм, випромінюють дуже слабке світло, яке реєструють комірки ПЗЗ матриці. При експозиції проядка хвилин і більше це явище стає помітним на око і проявляється у вигляді яскравої плями в лівому верхньому куті кадру (там, де розташований підсилювач). Для усунення цього явища в даній камері прийняті спеціальні заходи. Підсилювач спеціальним чином відключається на час експозиції та явище «amplifier glow» відсутнє.

Живлення цифрової частини камери здійснюється від інтерфейсу USB. Для формування необхідних для роботи ПЗЗ позитивних і негативних напруг у складі камери є DC / DC перетворювач з високим ККД.

Живлення елемента Пельт'є здійснюється від зовнішнього джерела напругою 12 В. Якщо охолодження матриці не потрібно, то це джерело можна не підключати.

Висновки до шостого розділу

Для вибору необхідного модуля Пельтьє були проведені розрахунки потужності, необхідної для охолодження матриці до температури 5°C , визначення втрат за рахунок тепло натікання та визначення максимальної холодопродуктивності термоелектричного модуля.

За отриманими результатами з каталогу термоелектричних модулів був вибраний модуль ТВ-71-2,0-1,5.

Для вибраного модуля Пельтьє були розраховані струм, напруга та електрична потужність, що необхідні для забезпечення обраної температури ПЗЗ матриці. Отримані результати:

- Струм – 4,3А;
- Напруга – 10,8 В;
- Споживана потужність – 46,4 Вт.

7 РОЗРОБКА ВИСОКОЧУТЛИВОЇ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ

7.1 Розробка структурної схеми

Основу пристрою складає фоточутливий прилад із зарядним зв'язком ПЗЗ. Для його управління потрібен таймінг-генератор (ТГ), що генерує керуючі імпульси. Імпульси проходять через блок драйверів (БД), який виробляє сигнали управління. Блок драйверів ділиться на блок горизонтальних драйверів (ГД) і вертикальних драйверів (ВД). Для правильного функціонування ТГ потрібен зовнішній стабільний сигнал, які може подавати задаючий тактовий генератор (ЗГ). Конфігурацію для необхідного алгоритму ТГ створює завантажувач (З), який завантажує в ТГ початкову програму.

Для посилення сигналів буде використовуватися блок широкосмугових буферних каскадів. Для комутації сигналів з двох виходів ПЗЗ потрібен блок аналогових комутаторів (БАК), їх повинно бути два - для лівого і для правого виходу ПЗС. Для перетворення сигналу з аналогової форми в цифрову встановлюється блок відеопроцесорів (БВП). БВП може також посилювати надходжуючий аналоговий сигнал на внутрішньому підсилювачі з заданим коефіцієнтом посилення. Всі необхідні сигнали управління і синхронізації БАК і БВП отримують від ТГ.

У зовнішнє середовище інформаційний сигнал надходить через блок шинних формувачів (БШФ) або USB-контролер. На рис. 7.1 представлена структурна схема пристрою.

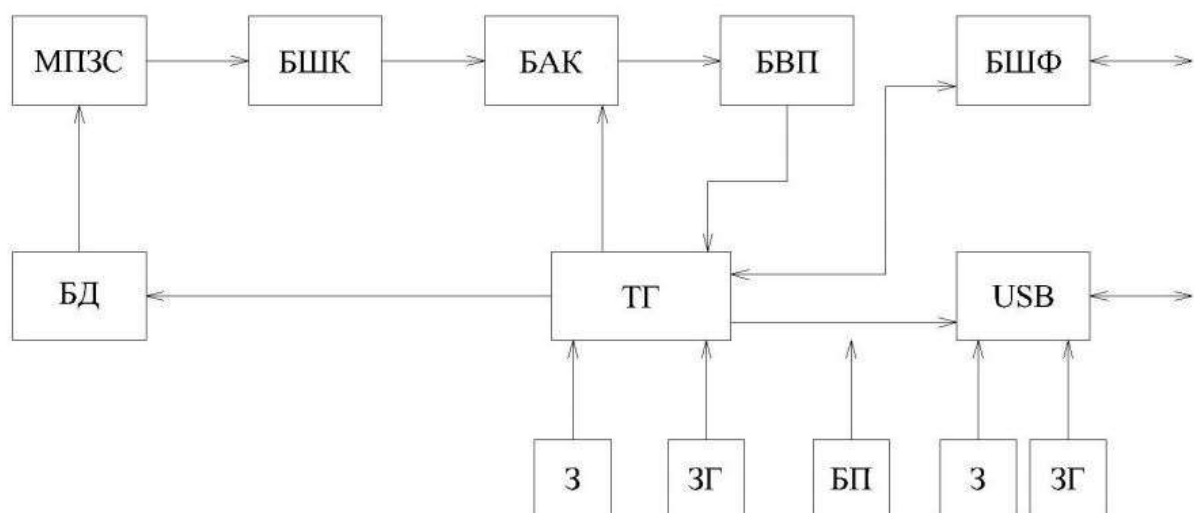


Рис 7.1 - Структурна схема телевізійної камери

7.2 Розробка функціональної схеми

Всі керуючі і синхронізуючі імпульси, що необхідні для коректної роботи всієї розроблюваної схеми в цілому, виробляє ТГ. Блок ЗГ формує тактовий сигнал (G_CLK) з частотою, необхідною для роботи ТГ. В даному проекті використовується генератор з частотою 36 МГц. При включенні живлення в ТГ, в нього завантажуються початкова програма зі спеціального завантажувача.

Для управління і синхронізації роботи паралельного і послідовного регістрів зсуву ПЗС-матриці ТГ посилає сигнали на вертикальні ВД (сигнали - XFPG, XPFG, XV1, XV2) і горизонтальні ГД (сигнали - ХН1LR, ХН1AL, ХН1LL, ХН2L, ХН1BL, XRGR, XRGL, XXG, ХН2R, ХН1AR, ХН1BR) драйвери відповідно. У блоці ВД ці сигнали посилюються по напрузі і надходять на відповідні входи ПЗС-матриці вже як сигнали FPG, PFG, V1, V2. У блоці ГД керуючі сигнали посилюються по струму і надходять на ПЗС-матрицю як сигнали Н1LR, Н1AL, Н1LL, Н2L, Н1BL, RGR, RGL, XG, Н2R, Н1AR, Н1BR.

З ПЗС-матриці аналогові сигнали надходять на буферний широкосмугового каскад, де посилюються по струму, при цьому зменшується ймовірність наведення. Далі йде блок аналогових комутаторів АК, що складається з двох однакових АК. АК виконують попарно комутацію сигналів, що надходять з правих і лівих виходів ПЗС-матриці. Робота АК синхронізується сигналами L_COM, R_COM, які надходять від ТГ.

Зкомутовані сигнали OUT_L, OUT_R з виходів АК надходять на два ідентичних відеопроцесора ВП, які обробляють сигнали за методом подвійної корелятивної вибірки. (ПКВ), а також підсилюють сигнал і за допомогою АЦП перетворюють в цифрову форму. ВП керуються сигналами CLK, VP, HD, VD, SCK, SDI, SL від ТГ.

З ВП сигнали у вигляді десятибітного цифрового коду L_D0-L_D9, R_D0-R_D9 надходять на ТГ, що виконує функції мультиплексування. Для передачі сигналів у зовнішній пристрій застосовані блоки шинних формувачів ШФ і USB.

ШФ посилює сигнали для передачі їх на велику відстань. ТГ подає єдиний цифровий відеопотік SH_DO - SH_D9 на ШФ1 разом з сигналами службової інформації FRAME, T_V, LINE, PIX. ШФ2 призначений для отримання службової інформації CI1, CI2, CI3, CI4, CI5 від зовнішнього пристрою, який дозволяє ПЛІС вибрати режим функціонування.

На USB ТГ передає інформаційні сигнали у вигляді UD_D1 - UD_D10. Для формування тактового сигналу U_CLK з частотою, необхідною для роботи USB контролера, використовується задаючий генератор ЗГ. Частота ЗГ, використовуваного в даному проекті, 19,2 МГц. Початкову програму для конфігурації USB контролера завантажує завантажувач (3) USB. Програмування USB-контролера може здійснюватися через JTAG або USB.

Живлення всіх елементів схем здійснюється від БЖ. Необхідні напруги живлення: +15 В, +5 В, +3,3 В, +2,5 В, +1,8 В, +1,2 В. Функціональна схема представлена на Рис 7.2

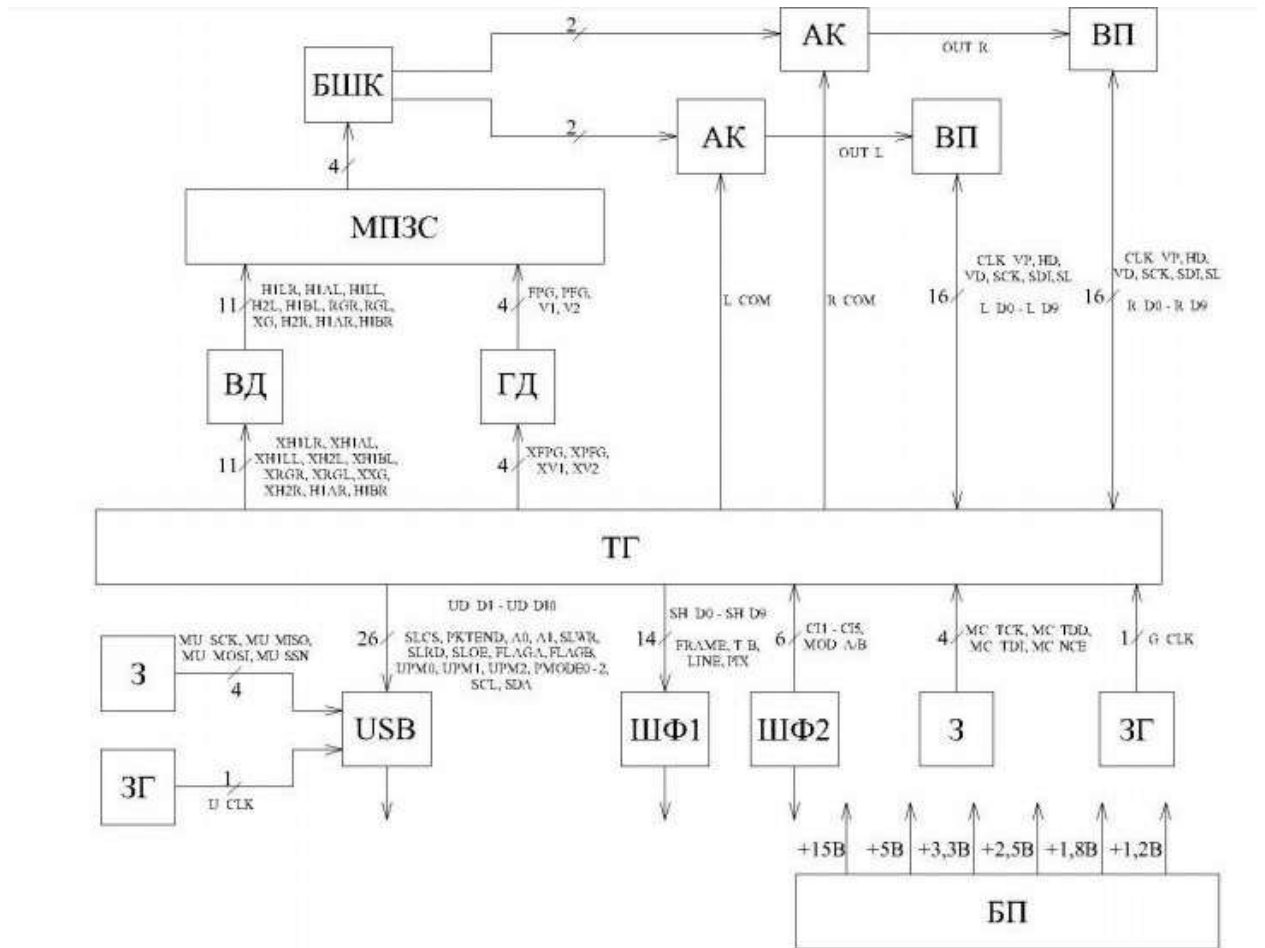


Рис 7.2 Функціональна схема телевізійної камери

7.3 Вибір і обґрунтування елементної бази

В якості ПЛІС для управління компонентами пристрою була обрана програмована вентиляційна матриця фірми Altera сімейства Cyclone IV E - EP4CE6F17C8 [57]. Особливості даної лінійки програмованих матриць, і зокрема обраної схеми, - низьке енергоспоживання, поєднання високої функціональності з найменшими витратами. Для розробки мікропрограм для ПЛІС використовується ПО Quartus II.

Мікросхема-завантажувач, що завантажує в ПЛІС початкову програму після включення електроживлення, повинна як мінімум задовольняти вимогам компанії-розробника ПЛІС. Однією з таких схем є мікросхема M25P16[58]. Також вона має низьку вартість.

Задаючий генератор повинен працювати на частоті, як мінімум в два рази більшої частоти роботи матриці (18 МГц). При цьому він повинен бути стабільним. На основі цього обраний кварцовий генератор ASA-36.0MHzLT[59]. У мікросхемі Cyclone IV є ФАПЧ, який буде множити частоту 36 МГц на 4.

Драйверами для управління двофазним вертикальним регістром обрані ISL55110[60]. Аналогові комутатори - ADG719-EP[61], вони забезпечують високу швидкість перемикання, низький опір і низькі струми витoku. В якості ВП обрана мікросхема схема AD9979BCHZ[62] - процесор для ПЗС-датчиків, що включає АЦП і підсилювач відеосигналу. Мікросхема реалізує обробку сигналів за методом подвійного корелятивною вибірки (ДКВ). Для узгодження проектованого пристрою з навантаженням буде використаний шинний формувач SN74LVC245A [63]- 8-канальний двонаправлений формувач фірми Texas Instruments, що підсилює потужність вихідних сигналів.

В якості USB-контролера обрано CYUSB3014[64]. Його відмінні риси: повнофункціональний периферійний контролер USB 3.0 з вбудованим

фізичним рівнем, висока продуктивність, гнучкість, низьке енергоспоживання, багатозадачність, гнучке налаштування тактової частоти - можливість використання кварцового резонатора на частоти 19.2, 26, 38.4 і 52 МГц. Має широку сферу застосування, в тому числі для відеокамер форматів 1080p Full HD і 4K Ultra HD (UHD). Для синхронізації потрібен зовнішній кварцовий резонатор 19.2 МГц. Кварцовим резонатором для CYUSB3014 обраний 8Y-19.200MEEQ-T частотою 19,2МГц фірми TXC, що має високу стабільністю частоти 10PPM.

7.4 Розробка принципової електричної схеми

Роль світлочутливого сенсора в даній роботі виконує мікросхема ICX825ALA фірми Sony. Імпульсні сигнали управління формуються ПЛІС і надходять на сенсор з блоку вертикальних і горизонтальних драйверів на відповідні входи датчика. Керуючі сигнали проходять через некеровані схеми фіксації, що забезпечує їх відповідність робочій зоні датчика. Живлення постійном струмом різних вузлів мікросхеми здійснюється блоком живлення. До виводів живлення мікросхеми необхідно підключити блокувальні керамічні конденсатори ємністю 0,1мкФ. Підкладка підключається до загального проводу. Чотири вихідних сигнали OUTLA, OUTLB, OUTRA, OUTRB надходять на блок широкосмугових буферних каскадів. Схема включення датчика представлена на рис. 7.3

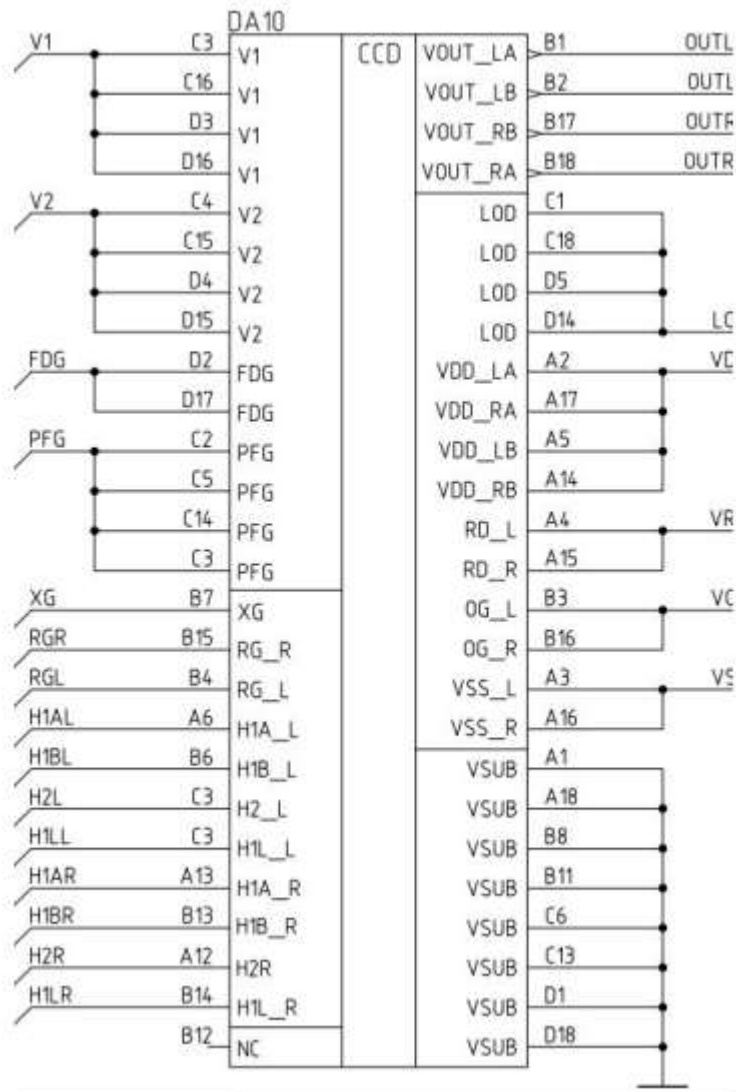
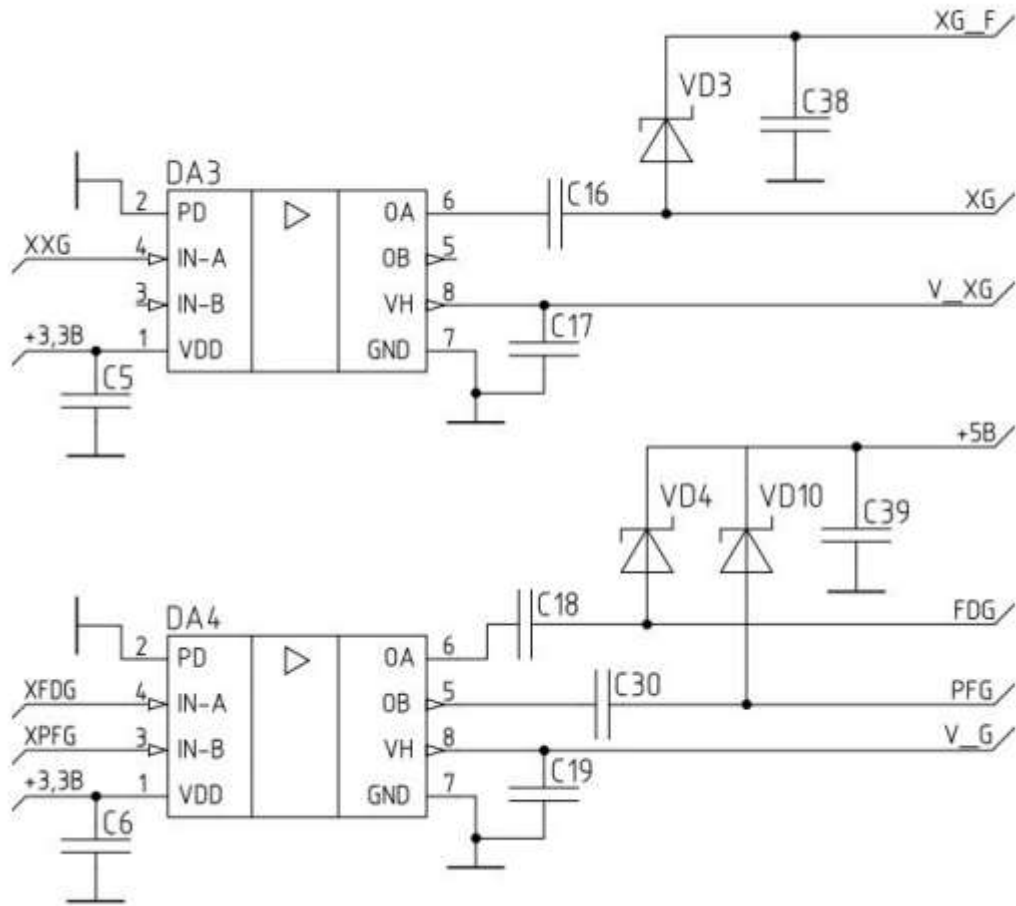


Рис. 7.3 - Схема підключення матриці ПЗЗ.

Драйвери виконані на мікросхемах ISL55110. Частина їх керує роботою вертикального регістра ПЗС, частина горизонтального. Відмінність драйверів полягає в вихідних рівнях напруг живлення. Для датчика KAF-50100 сигнали управління мають різні напруги, які повинен забезпечити блок живлення, не аналізовані в даній роботі. На виходах драйверів розміщені некеровані схеми фіксації. Схеми складаються з діода і конденсатора і забезпечують необхідні рівні напруг вихідних імпульсів. Це необхідно для коректного функціонування датчика, тому що тоді імпульсні сигнали потрапляють в робочу зону датчика. Вхідні сигнали для драйверів надходять від ПЛІС і мають напругу 3,3В. На малюнку 7.4 представлена схема включення двох драйверів. На кожен вихідний сигнал OUTLA, OUTLB, OUTRA, OUTRB з

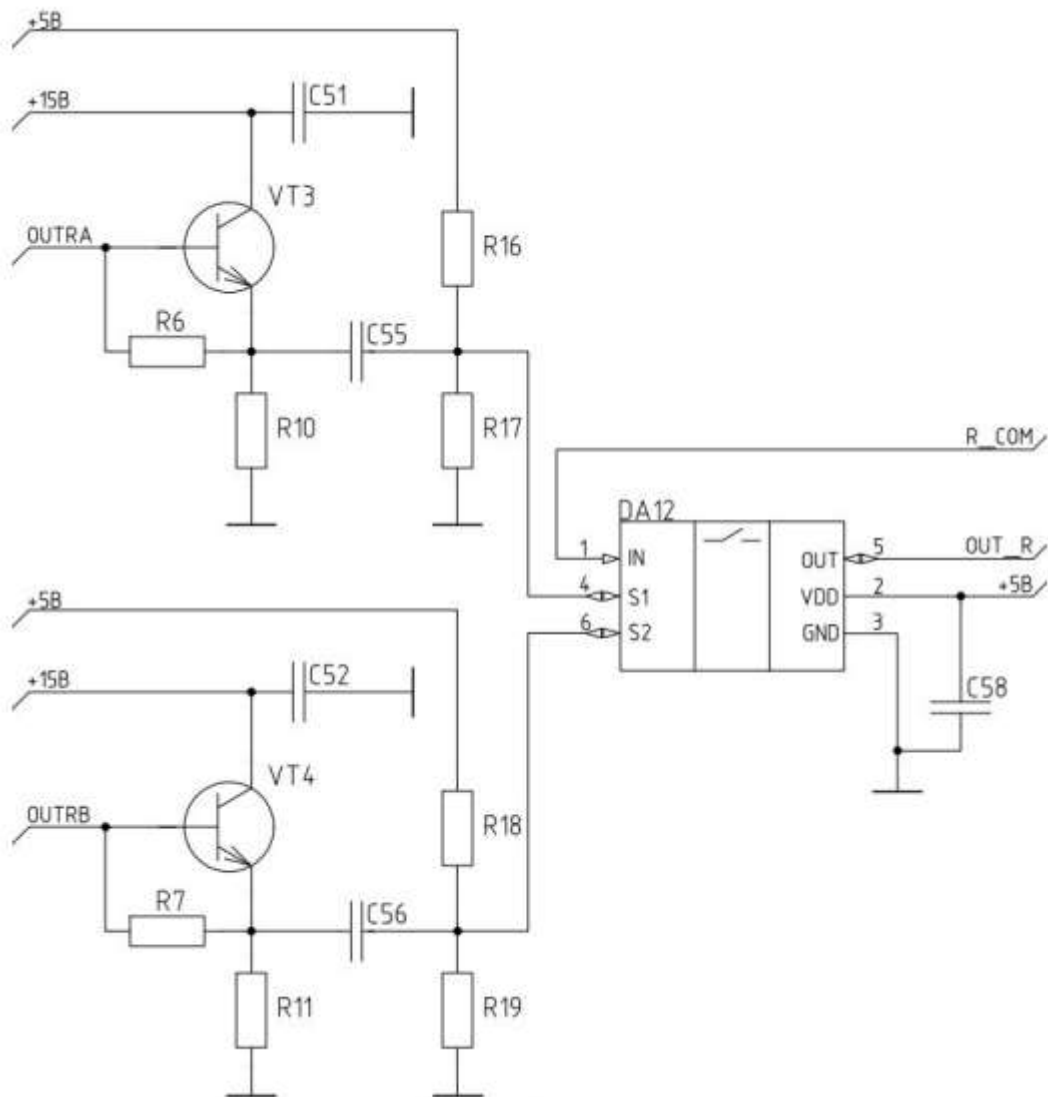
датчика ПЗЗ доводиться по одному широкосмуговому буферному каскаду, які збільшують сигнали по потужності.



Малюнок 7.4 - Схема включення двох драйверів.

БШК виконані за схемою емітерного повторювача на транзисторі 2SC3356. Для резисторів R1 і R2 (для одного 1-го БШК, інші - аналогічно) обрані номінали 140 Ом і 1 кОм відповідно. Конденсатор по живленню має ємність 0,1мкФ. Розділовий конденсатор обраний номіналом 1мкФ. З двох БШК сигнали OUTLA і OUTLB (для другої пари - OUTRA і OUTRB) сигнали надходять на один комутатор. В якості комутатора обрана мікросхема ADG719 яка виконує функцію високошвидкісного перемикача аналогових сигналів. Перемикання відбувається по керуючим сигналам, що надходять від ПЛІС - L_COM. (для другого комутатора - R_COM). Керуючий сигнал надходить на вхід IN комутатора. Оскільки даний комутатор є однополярним по живленню, на його входи поставлені резистивні подільники відразу за

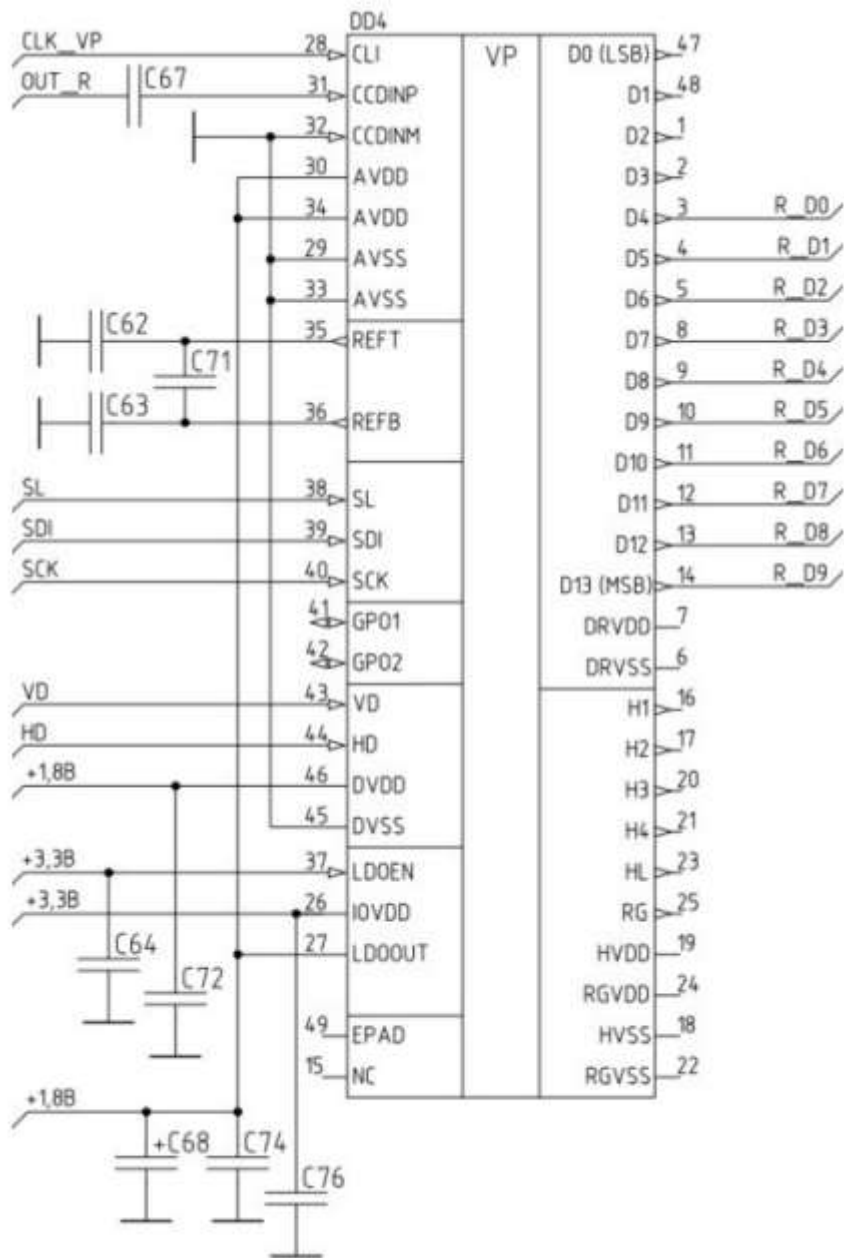
розділовими конденсаторами БШК. Номінал резисторів - 1 кОм. На виходи комутаторів надходять сигнали для лівої і правої половини кадру - OUT_L і OUT_R. Схема підключення пари БШК і комутатора представлена на малюнку 7.5.



Малюнок 7.5 - Схема включення двох БШК і аналогового комутатора.

З комутаторів сигнали надходять на відеопроцесор. В якості ВП обраний процесор фірми AnalogDevices AD9979. Поступаючий на нього сигнал обробляється за методом подвійної корелятивної вибірки (ПКВ), далі посилюється з програмованим коефіцієнтом підсилення, потім перетворюється за допомогою внутрішнього вбудованого 14-розрядного АЦП в цифрову форму. Керуючі сигнали, необхідні для коректної роботи

процесора (CLK, _VP, HD, VD, SCK, SDI, SL), надходять на відповідні входи від ПЛІС. Схема включення відеопроцесора представлена на малюнку 7.6. Перетворені цифрові 14-бітові сигнали L_D0 - L_D9, R_D0 - R_D9 надходять на ТГ.



Малюнок 7.6 - Схема включення відеопроцесора.

Для передачі інформаційних сигналів від проектованого пристрою використовується шинний формувач. ШФ обраний трансівер фірми Texas Instruments SN74ALVCHR162245. Він посилює сигнали для передачі без втрати даних. Використовується два ШФ: а) один для передачі

інформаційних сигналів в зовнішні пристрої DD5 на схемі. На вхід мікросхем надходять сигнали SH_D - SH_D9 від ТГ, вихідні сигнали, що передаються в роз'єм P_D0 - PD9. б) один ШФ, що складається з одного трансивера, для отримання службової інформації від зовнішніх пристроїв, що дозволяє ПЛІС вибирати режим функціонування. Робота ШФ в різних напрямках забезпечується різним підключенням виводу вибору напрямку передачі даних DIR. Схема включення ШФ представлена на малюнку 7.7. Для передачі даних через USB підключений USB-контролер. Інформаційний сигнал U_D1 - U_D10 надходить на контролер від ТГ. Режим роботи USB 3.0 здійснюється шляхом підключення до роз'єму контролера R_USB3 резистора номіналом 200 Ом. Програмування контролера здійснюється через роз'єми USB і JTAG. Вихідні сигнали надходять на роз'єм USB 3.0. Тактування відбувається від зовнішнього кварцового резонатора DD10 з частотою 19,2 МГц. Схема включення контролера зображена на рис. 7.8.

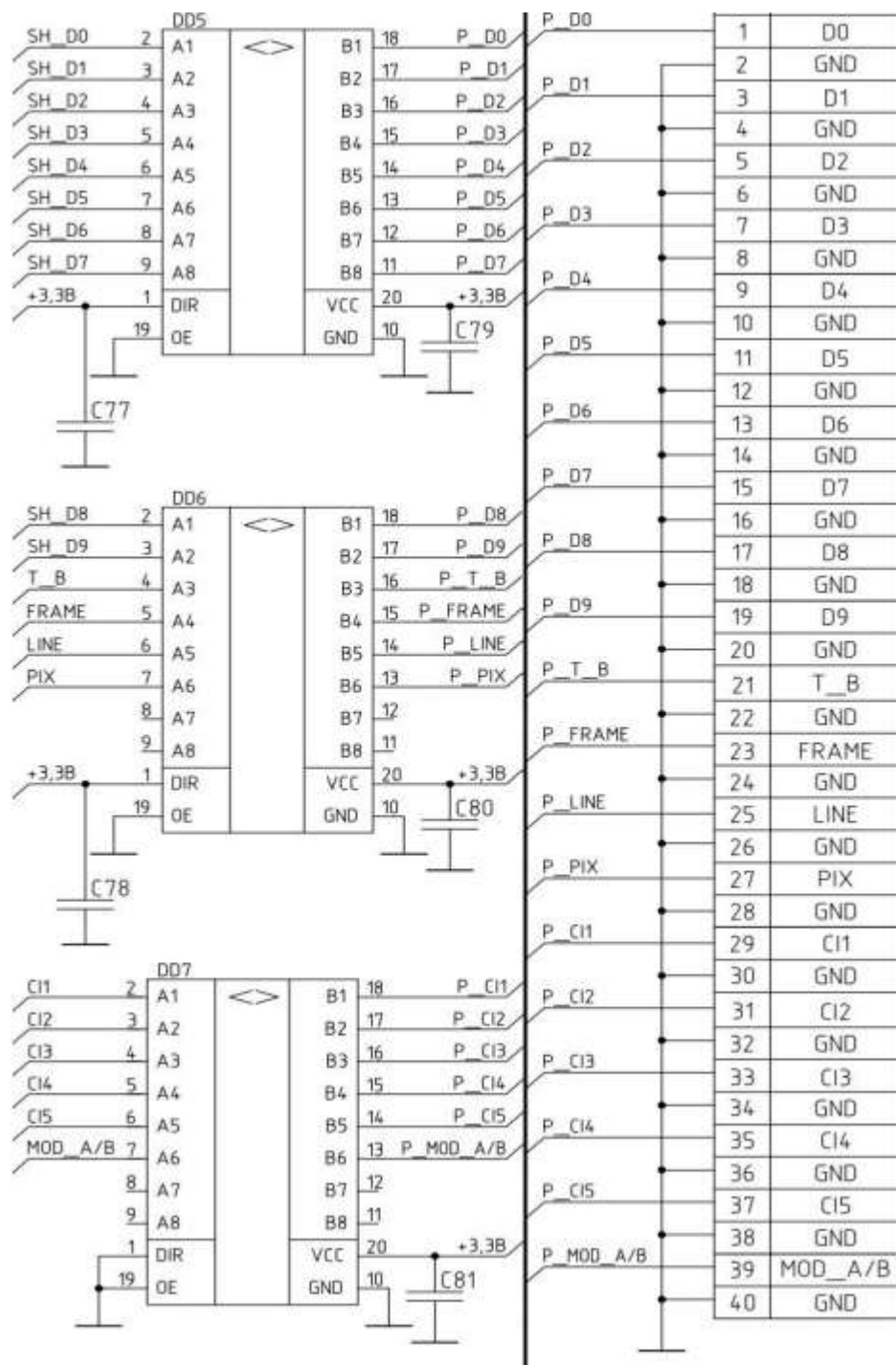


Рис. 7.7 - Схема включення ШФ і роз'єму.

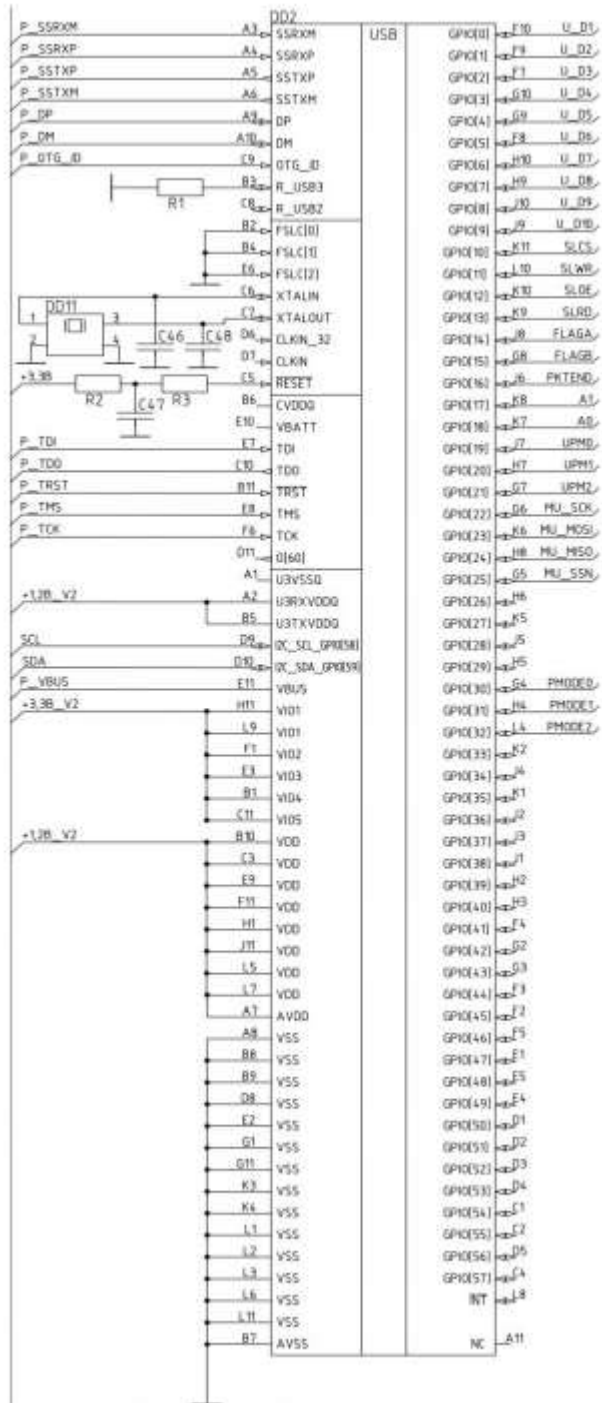


Рис. 7.8 - Схема включения USB-контролера.

Висновки до сьомого розділу

В даному розділі була розроблена телевізійна камера на ПЗС матриці підвищеної роздільної здатності.

В процесі розробки відповідно до технічного завдання була обрана елементна база, розроблені структурна, функціональна та принципова електрична схеми приладу. Всі елементи і рішення, застосовані у розробці відповідають таким вимогам:

- висока якість та надійність компонентів;
- актуальність всіх компонентів, тобто відповідність рекомендаціям компаній-виробників і наявність у продажу;
- низьке енергоспоживання;
- задовільнення вимогам ТЗ;
- можливість роботи з сучасною комп'ютерною технікою;

Розроблене рішення дозволяє отримати прилад з високою надійністю, якістю та такий, що відповідаю сучасним потребам і тенденціям розвитку телевізійної техніки.

8 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Таблиця 1 Опис ідеї проекту

Зміст ідеї проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка високочутливої рентгенотелевізійної системи неруйнівного контролю з високою роздільною здатністю для контролю структури виробів і матеріалів на промисловому виробництві.	Промислове виробництво	Підвищення контролю якості виготовляємої продукції, зменшення витрат часу на контроль якості продукції, розвиток автоматизації виробництва. Можливість визначити дефекти, котрі неможливо визначити іншими методами (непропаї, раковини, тощо). Можливість точної локалізації дефектів, що дає можливість швидкого ремонту. Можливість оцінки величини випуклості та вігугості валиків усилень зварного шва. Даний метод дозволяє контролювати метали, сплави, мінерали, неорганічні та органічні з'єднання, полімери, аморфні речовини.

№ П/п	Технічної характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Даний проект	Конкурент1 GE DXR250C-W	Конкурент2 Плівкова			
1	Формат зображення	1472x1050	1024x1024	10 парлін/мм	Немає	Немає	Параметр значно вище ніж у конкурентів
2	АЦП	14 біт	14 біт	Відсутній	Немає	Параметри однакові	Немає
3	Вартість пристрою	5000\$	150000\$	10000\$	Немає	Немає	Ціна значно нижча
4	Можливість контролю в реальному часі	Є	Немає	Немає	Немає	Немає	Функція присутня

5	Сцинтилятор/плівка	ZnTe	GOS	Плівка	Немає	Немає	Параметр кращий
6	Портативність	Немає	Є	Немає	Функція відсутня	Немає	Немає

Таблиця 2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Таблиця 3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка системи, що має високу чутливість та поїдвищену роздільну здатність.	Ідея реалізується шляхом впровадження сцинтиляційного екрану з високим світловим виходом.	Наявна	Доступна
	Розробка системи, що має універсальний стандартизований цифровий вихід для комп'ютерного обладнання.	Ідея реалізується шляхом використання контролерів послідовної цифрової шини USB 3.0	Наявна	Доступна
	Розробка камери що має підвищений параметр-роздільна здатність, та можливість роботи в	Ідея реалізується шляхом впровадження ПЗС останнього покоління у фотоприймачі.	Наявна	Доступна

	реальному часі.			
--	-----------------	--	--	--

Таблиця 4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Більше 20 од.
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Більше 15 млрд ум.од
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока складність обладнання, необхідна висока кваліфікація персоналу, вимоги до безпеки в роботі з рентгенівським випромінюванням.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Обов'язкова сертифікація
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	50%

Таблиця 5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба у контролі якості виробів, або у дослідженні внутрішньої структури воробу/матеріалу.	Виробничі галузі, наукові області діяльності.	Необхідність використання продукту для внутрішніх потреб, використання продукту для розробки та впровадження.	Необхідність у вищих параметрах та характеристиках ніж у конкурентів при аналогічній або нижчій ціні.

Таблиця 6. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства.
Досконалий тип конкуренції	Не має можливості диктувати умови та ціни продажу товарів	Продаж товарів за цінами, що пропонує ринок
Міжнаціональний рівень боротьби	Конкуренція у продажу товарів здійснюється міжнаціонально	Можливість до збільшення обороту товару.
Внутрішньо галузева конкуренція	Конкуренція здійснюється тільки в даній галузі	Необхідність конкурувати з великими виробниками.
Товарно-видова конкуренція	Різні види продукту конкурують між собою	Немає.
Неціновий характер конкурентних переваг	Конкуренція здійснюється у підвищенні параметрів продукту	Потенційні покупці мають широку потребу у товарі

Таблиця 7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентно-спроможності	Обґрунтування
1	Доступ до ефективної технології	Технологічна реалізація продукту має велику ефективність та може задовільнити більше коло споживачів.
2	Застосування ресурсозберігаючих технологій	Зменшення втрат на реалізацію проекту шляхом використання технології зменшення витрат ресурсів.
3	Здатність до розширення ринків збуту продукції	Збільшення збуту продукції шляхом універсалізації технології та підстроювання продукту до інших ринків.

Таблиця 8. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)Високі якісні параметри продукту 2)Ефективна технологія реалізації 3)Потребність споживачів у продукції 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)Нижча надійність через відсутність досвіду виробництва, порівняно з світовими корпораціями 2)Велика конкуренція на ринку збуту товару
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)Розширення ринків збуту 2)Прогрес технології продукту 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)Відторження ринком збуту 2)Можливість демпінгування цін великими конкурентами.

Таблиця 9. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана стратегія розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Реалізація стратегії розвитку

Стратегія спеціалізації	Концентрація на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти.	Забезпечення унікальних параметрів, що задовольняють потреби конкретного кола споживачів дозволяє досягнути домінування у конкретному сегменті ринку.	Реалізація цієї стратегії вимагає детального дослідження потреб конкретного цільового сегменту.
-------------------------	--	---	---

Таблиця 10. Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1)Високі якісні параметри товару 2)Необхідна цінова межа 3)Забезпечення підтримки та сервісу товару.	Стратегія спеціалізації	1)Відмітні властивості товару 2)Необхідність споживачів у товарі	1)Аналіз сильних і слабких сил товару 2)Виявлення можливих напрямів розвитку

Таблиця 11. Визначення ключових переваг товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Споживач потребує систему неруйнівного контролю з високою роздільною здатністю в реальному часі і по розумній ціні.	1)Високі вихідні параметри системи 2)Ефективна технологія сцинтилятора, фотоприймача 3)Низьке електроспоживання	1)Значно більша чутливість сенсора 2)Мале електроспоживання 3)Висока роздільна здатність 4)Необхідний розмір пікселів 5)Можливість контролю у реальному часі.

Таблиця 12. Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Ціна в межах від 10000\$ до 150000\$	Ціна в межах від 10000\$ до 150000\$	Доходи споживачів різняться в залежності від галузі. Середній дохід 500000\$	Враховуючи ціни на елементну базу що необхідна для створення пристрою, а також затрати на реалізацію та розробку пристрою то нижня межа встановлюється : 10000\$, а верхня-20000\$

Таблиця 13. Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Пошук товару, порівняння цін та хар-к товару з аналогами, закупка товару	Глобальна мережа Інтернет, внутрішні канали галузі, виставки та конференції	Надання інформації про товар, залучення клієнтської бази	Залучити споживачів до закупки товару, акцентувати увагу на можливостях та ціні	Повідомлення про товар, його характеристики, ціну та переваги

Таблиця 14. Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Пошук необхідного товару, ознайомлення з характеристиками та параметрами, порівняння ціни з аналогами та остаточний вибір товару що закупляється	1) встановлення контактів із споживачами і підтримання їх; 2) формування попиту і стимулювання збуту; 3) організація руху товару; 4) зменшити витрати в ході збуту продукції	присутні кілька дистриб'ютори: 1) ексклюзивний, 2) регіональний 3) національний	Система національних, , дистриб'юторів, які здійснюють розподіл товарів споживачам певних галузей, секторів економіки, держкомпаній і підприємств - природних монополій.

Висновок до стартап проекту

У данному розділі був розроблений стартап проект відповідно до теми магістерського проекту .

Роблячи загальні висновки можна сказати, що у данного пристрою є можливість до ринкової комерціалізації, наразі у різних сферах діяльності та промисловості наявен попит до оновлення обладнання неруйнівного контролю, або його запровадження на виробницті у зв'язку зі зростаючими потребами у якості виробів. Динаміка впровадження та реалізації таких пристроїв показує стабільний ріст.

Завдяки високим вихідним параметрам та можливостями, що реалізуються завдяки сучасним ПЗС фотоприймачам, та нових рішень у виготовленні сцинтиляторів, для проекту є перспектива входження на ринок та конкуренції з вже наявними аналогами систем неруйнівного контролю.

ВИСНОВКИ

1. В першому розділі дипломного проекту було розглянуто сучасні РТВС неруйнівного контролю. В останні декілька років традиційні системи почали активно замінювати розробкою цифрових рентгенотелевізійних систем. Це було викликано низкою технічних, економічних та ергономічних причин. Для перетворення світло-сигнал використовують ПЗЗ-матриці.

Ефективним способом підвищення чутливості контролю рентгенотелевізійних систем до величин, що співрозмірні або навіть перевищують чутливість рентгенографії, а також розширення граничної товщини контролюючих об'єктів є перехід передавальних пристроїв в режим регульованої тривалості накопичення сигналу мішені.

2. В другому розділі були розглянуті різновиди сцинтиляційних екранів, характер впливу розміру частинок і товщини композитного шару на квантовий вихід екрана, характер впливу оксидних домішок сцинтиляторів на спектр люмінесценції, описана технологія виробництва багатоелементних сцинтиляційних збірок з високою просторовою роздільною здатністю.

3. В третьому розділі було розглянуто типи ПЗЗ – матриць, їх принцип дії, а також розглянуто класифікацію телевізійних камер. Велике значення приділяється параметрам цих камер, а саме роздільній здатності та чутливості та методам їх покращення.

4. В четвертому розділі дипломного проекту було розглянуто елементи Пельт'є. На протязі останніх років їх широко використовують для охолодження пристроїв із зарядовим зв'язком в цифрових фотокамерах. З їх використанням помітно зменшується темновий шум при тривалих експозиціях (наприклад в рентгенографії).

5. В п'ятому розділі було досліджено необхідність охолодження ПЗЗ матриць в високочутливих РТВС. Були розглянуті основні складові власних шумів ПЗЗ матриці та розраховані відношення сигнал / шум для трьох граничних випадків. З проведених розрахунків можна зробити

висновок, що при охолодженні ПЗЗ – матриці можна майже повністю позбутись темнових шумів.

6. В шостому розділі дипломного проекту були розраховані параметри елемента Пельтьє для охолодження ПЗЗ матриці розміром 2/3". За отриманими результатами з каталогу термоелектричних модулів був вибраний модуль ТВ-71-2,0-1,5, який працює при значеннях струму та напруги в 4.3 А та 10.8 В відповідно.

7. В сьомому розділі дипломного проекту були розроблені структурна та електрична принципова електрична схеми цифрової телевізійної камери на основі ПЗЗ – матриці IXC825ALA. Зроблений вибір елементної бази.

8. В розділі «стартап-проект» проведено дослідження доцільності виробництва високочутливої телевізійної камери. При оцінці конкурентоспроможності прилад перевищує наведені існуючі рішення, що вказує на можливість отримання прибутку при його реалізації. Проведене дослідження вказує на рентабельність та доцільність розробки, виробництва та збуту розробленої цифрової телевізійної камери.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Абакумов В.Г. Фотоэлектрические сканирующие устройства преобразования информации. –К.: Вища школа, 1979. – 168с.
2. Адаменко А.А. Современные методы радиационной дефектоскопии. – К.: Наук. думка, 1984. – 216с.
3. Азимов Е.И., Миленин Н.К. Современные рентгенотелевизионные системы // Техника кино и телевидения. – 1995. № 11. – С.33-40.
4. Акаткин О.А., Скачков Е.Н., Тащилкин С.А. Методика интерполяции массовых коэффициентов ослабления моноэнергетического рентгеновского излучения в области энергии до 100 кэВ // Дефектоскопия. – 1990. - №6. – С. 56-59.
5. Байбиков В.В., Гальчинецкий Л.П., Ополонин А.Д. и др. Детекторы рентгеновского излучения типа сцинтиллятор-фотодиод и приборы на их основе // Труды Междунар. конф. «Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования». Харьков: ХТУРЭ.- 1998. – С. 407-412.
6. Белый Н.Г., Лещишин А.В., Михайлов С.Р. Высокочувствительные радиоскопические системы // Труды II Украинской конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». – Днепропетровск. – 1997. – С. 235-236.
7. Белый Н.Г., Троицкий В.А., Денбновецкий С.В., Лещишин А.В., Михайлов С.Р. Повышение чувствительности рентгенотелевизионного контроля // Труды III Украинской конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». – Днепропетровск. – 2000. – С. 225-228.
8. Боровской А.И., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки и малогабаритные микрофокусные излучатели для медицины,

промышленности и научных исследований // Электронная промышленность. – 1991. - №5. – С. 86-94.

9. Брацлавец П.Ф., Росселевич И.А., Хромов Л.И. Космическое телевидение. – 2-е изд., доп. – М.: Связь, 1973. – 248с.

10. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука, 1969. – 407 с.

11. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. – М.: Наука, 1987. – 431 с.

12. Видиконы для персепективных телекамер / Toshiba Rev. – 1986. Vol. 41, № 5 // Техника кино и телевидения. – 1987. - №10. – С. 70.

13. Виноградов М.Н., Михайлов В.Н. Разработка парка телевизионных установок нового поколения для дефектоскопии // Электронная промышленность. – 1991. - № 5. – С. 75-78.

14. Гершберг А.Е. Передающие телевизионные трубки с внутренним фотоэффектом. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1973. – 256с.

15. Гершберг А.Е. Электронный луч и потенциальный рельеф в электроннолучевых приборах. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 312с.

16. Головизина С.А., Дятлов В.М., Шишкина Л.Б. Размерный ряд передающих телевизионных трубок кадмионов с дефлекторно-электростатической системой отклонения // Труды республиканской научно-технической конференции «Телевизионные методы и средства в науке и технике». – Киев: Киев. политехн. ин-т. – 1987. – С. 124-127.

17. Головин Ю.Ф., Декстер П.В., Мооговский Л.Я., Пеликс Е.А. Импульсные рентгеновские аппараты АРИНА-02 и АРИНА-2 // Дефектоскопия. – 1989. - №12. – С.31-34.

18. Голуб В. Приборы с зарядовой связью и зарядовой инжекцией // Электронные компоненты и системы. 1999. №7 (23). – С. 33-37.

19. Горбунов В.И., Епифанцев Б.Н. Автоматические устройства в радиационной дефектоскопии. – М.: Автомиздат, 1979. – 120с.
20. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения. Санкт-Петербург: Политехника, 2000. – 277 с.
21. Неизвесный С.И., Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная техника. - №4. – 1999.
22. Троицкий В.А. Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–50.
23. Современные системы радиационного неразрушающего контроля / В.А. Троицкий, С.Р. Михайлов, Р.О. Пастовенский и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. –2015. – № 1. – С. 23–35.
24. Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Семиноженко В.П. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе / Под. ред. В.Д. Рыжикова. – Киев: Наук. думка, 2007. – 447 с.
25. Ананьева Г.В., Горохова Е.И., Демиденко В.А. Оптические свойства керамики на основе Gd₂O₂S // Оптический журнал. – 2005. – № 72 (1). – С. 68–72.
26. Nikl M.. Meas. Sci. Technol. – 2006. – 17. – P. 37.
27. Рюдигер Ю. Г. О применении синей и зеленой систем визуализации изображения в рентгенографии // Медицинская техника. – 2004. – № 6. – С. 32–36.
28. Трансформация дефектной структуры кристаллов селенида цинка под воздействием водорода / В. Д. Гальчи-нецкий, Н. Г. Рыжиков, К.А. Старжинский и др. // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – 88, № 5. – С. 58–62.
29. Carel W. E van Eijk. Inorganic scintillators in medical imaging // Physics in medicine and biology. – 2002. – № 47. – P. 85–88.
30. Ананьева Г. В., Горохова Е. И., Демиденко В. А. Оптические свойства керамики на основе Gd₂O₂S // Оптический журнал. – 2005. – № 72(1). – С. 68–72.

31. Пат. 1512339 Украина G01T 1 / 20. Детектор рентгеновского и мягкого гамма- излучений // Квитницкая В.З. и др.– 1988.
32. Пат. 4362946 США G01T 1 / 164 Distributed phosphor scintillator structures / Dominic A. Cusano and others. – 1982.
33. Пат. 1075726 Украина. Сцинтилляционный материал // Рыжиков В.Д. и др.– 1981.
34. Pat. 7081627 US. Image detector for X-ray radiation // Bjoern Heismann and others. – 2006.
35. Pat. 4138361 US. Radiation-conversion screens // Andre R. Suys and others. – 1979.
36. Pat. 5411806 US. Method for the manufacture of a phosphor screen and resulting article // John C. Dahlquist. – 1995.
37. Гурвич А. М. Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны. – М.: Атомиздат, 1976. – С. 63.
38. Блинов Н. Н. Стандартизация технических условий выполнения рентгенологических исследований / Медицинская рентгенология / Под ред. Р. В. Ставицкого. – М.:МНПИ, 2003. – С. 28.
39. Гурвич А. М. Физические основы радиационного контроля и диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 35.
40. Пат. № 92286 Украина от 29.10.2009. Полупроводниковый сцинтилляционный материал на основе легированного ZnSe и способы его получения / Е.Ф.Воронкин, С.Н. Галкин, В.Д. Рыжиков и др.
41. Сцинтилляционные экраны на основе селенида цинка и оксидных сцинтилляторов для неразрушающего контроля /Е. Ф. Воронкин. - Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №1, 2014
42. Перспективы применения селенида цинка для цифровой радиографии /Е.Ф. ВОРОНКИН, С.Р. МИХАЙЛОВ. - Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №4, 2015

43. Никитин В. В, Цицулин А. К. Телевидение в системах физической защиты: учеб.-метод. пособие -2005.
44. Куликов А.Н. Телевизионные наблюдения в сложных условиях// Специальная техника, – 2000. – № 35. – С.30 – 33.
45. Выбор и применение телевизионных систем видеоконтроля: Рекомендации/ВНИИПО МВД России, НИЦ "Охрана". – М., 1996. – 51 с.
46. J.R. Janesick, T. Elliott, S Collins. "Scientific charge-coupled devices.", Optical Engineering, August 1987, Vol. 28, No. 8, p. 692 - 714.
47. Телевизионные наблюдения в сложных условиях. // <http://www.evs.ru>
48. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
49. Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцветов. Цифровое преобразование изображений //Под ред. Р.Е. Быкова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 228 с.
50. Старшин В.В. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах / В.В. Сташин, А.В. Урусов, Мологонцева О.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 221 с.
51. Diagonal 8 mm (type 1/2) CCD image sensor for CCIR B/W video cameras ICX429ALL //www.sony.net.
52. Цифровая ПЗС-камера на основе охлаждаемого ПЗС ICX249AL (SONY) //www.silar.spb.ru.
53. Моргун О.Н., Немченко К.Э., Рогов Ю.В. // Мед. техника. – 2003. – т.37 (5).
54. Жидецкий В.Ц., Джигирев В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці: Навчальний посібник. – Львів:Афіша, 2000. – 350с.
55. СНИП 11-4-79. Пожарная безопасность. Общие требования.
56. СНИП 2.09.02-85. Естественное и искусственное освещение.

57. Cyclone IV Device Datasheet, Intel (Altera)
<https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-53001.pdf>
58. Micron M25P16 Serial Flash Embedded.
<https://www.micron.com/~media/documents/products/data-sheet/nor-flash/serial-nor/m25p/m25p16.pdf>
59. Dual, High Speed MOSFET Driver, Renesas
<https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl5/isl55110-11.pdf>
60. AD CMOS 1.8 V to 5.5 V, 2.5 Ω 2:1 Mux/SPDT Switch in SOT-23
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adg719-ep.pdf>
61. AD9979 14-Bit, CCD Signal Processor with Precision Timing™ Core
<https://www.analog.com/ru/products/ad9979.html>
62. SN74LVC245A Octal Bus Transceiver With 3-State Outputs
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc245a.pdf>
63. EZ-USB® FX3: SuperSpeed USB Controller
<http://www.cypress.com/file/140296/download>
64. Розроблення стартап-проекту, Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей, Київ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016