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

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису» УДК <u>621.394.42</u>

### «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: «Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей»

### Виконав:

Студент 6 курсу, гр. ДЕ-61 М Сидоренко Ярослав Сергійович\_\_\_\_\_

### Науковий керівник:

Професор, канд. техн. наук

Циганок Б.А.

Жовнір М.Ф.

## Нормоконтроль:

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

### Рецензент:

Доцент кафедри мікроелектроніки, канд.техн. наук, доцент

Татарчук Д.Д .

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) Електроні ки Кафедра Електронні прилади та пристрої Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою Спеціальність (спеціалізація) –**171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)** 

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко «\_\_\_»\_\_\_\_2018 р.

### ЗАВДАННЯ

# на магістерську дисертацію студенту Сидоренко Ярослав Сергійович

## 1. Тема дисертації «Мультиплексор на основі динамічних неодноріднос-

тей» і науковий керівник дисертації Циганок Борис Архипович, професор, к.т.н.

затверджені наказом по університету від «<u>29</u>» <u>січня</u> 2018 р. №<u>310-с</u>

**2.** Термін подання студентом дисертації: «\_\_\_\_»\_\_\_\_ 2018 р.

**3. Об'єкт дослідження:** Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей

**4. Предмет дослідження:** На базі порівняльного огляду науково-технічної літератури щодо існуючих мультиплексорів, фізичні явища на основі якого вони реалізовані. Опис основних характеристик і параметрів кристалів A<sup>2</sup>B<sup>6</sup>, на основі яких буде реалізовано досліджуваний мультиплексор. Описати принцип роботи пристрою. Змоделювати мультиплексор на поверхневих акустичних хвилях. Центральна частота - 10 МГц, ширина спектру сигналу – 2,8 МГц.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** Огляд науково-технічної літератури по існуючих мультиплексорах; основних властивостей кристалу A<sup>2</sup>B<sup>6</sup>, математичні моделі пристроїв на ПАХ; формування алгоритму роботи домліджуваного мультиплексору, лабораторне дослідження кристалу CdS; розрахунок мультиплексора на ПАХ та

**6.** Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Основні види мультиплексорів, ЗШП, модель досліджуваного пристрою, плакати з формулами та графіками.

### 7. Перелік публікацій:

- 1. Yaroslav Sydorenko, Ostap Oliinyk, Borys Tsyganok «A multiplexor based on dynamic heterogeneities» ISSE 2017 Sofia, Bulgaria, 40-41p.
- 2. Патент, Б.А. Циганок, О.О. Олійник, Я.С. Сидоренко «Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей», Київ, 2017р..
- 3. С. Б. Сидоренко, О. М. Бевза, Я. С. Сидоренко «Дослідження чинників впливу на одержання розвинутої поверхні конденсату Al–O», Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii 2017, т. 15, № 1, сс. 133–139.
- 4. С. Б. СИДОРЕНКО, О. М. БЕВЗА, А. В. МУМЛАДЗЕ, Я. С. СИДОРЕ-НКО, Ю. Ю. ТКАЧЕНКО «Дослідження факторів впливу на отримання розвинутої поверхні конденсату Al-O», V Наукової конференції «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології», 2016, 126 ст.
- Сидоренко С. Б., Бевза О. М., Сидоренко Я. С. «Технологія отримання розвинутої поверхні у вакуумному реакційному середовищі», Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 20 – 26 березня 2017 р, 247 ст

### 8. Дата видачі завдання : 12.02.2018

# Календарний план

		Термін	
N⁰	Назва етапів виконання	виконання	Примите
3/П	магістерської дисертації	етапів магістер-	примпка
		ської дисертації	
1.	Огляд науково-технічної літератури іс-	10.04.2018	
	нуючих мультиплексорів		
2.	Розрахунок мультиплексора на ПАХ для	20.04.2018	
	CdS	20.04.2018	
3.	Експериментальні дослідження внутрі-	30.04.2018	
	шнього фотоефекту на кристалі CdS	50.04.2010	
4.	Розробка конструкторської документа-	10.05.2018	
	ції.	10.05.2018	
5	Оформлення пояснювальної записки,	15.05.2018	
	креслень, плакату, підготовка доповіді	13.03.2018	

Студент гр. ДЕ-61 М

Я.С. Сидоренко

Науковий керівник дисертації

Б.А. Циганок

#### ΡΕΦΕΡΑΤ

Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей / Магістерська дисертація зі спеціальності 171– Електроніка спеціалізації «Електронні прилади та пристрої». Сидоренко Ярослав Сергійович. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-61. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»,

2018. – 82 с., іл. 20, табл. 10.

Ключові слова: Лінія затримки на поверхневих акустичних хвилях, зустрічно-штирьовий перетворювач, мультиплексор, CdS, п'єзоелектрик, фотоефект.

Короткий зміст роботи: В дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по роботі існуючих мультиплексорів. Розглянуто основні характеристики кристалів  $A^2B^6$ , що володіють п'єзоефектом та внутрішнім фотоефектом: принципи вирощування кристалів, основні характеристики та сфери використання.

Приведено результати дослідження сульфіду кадмію, як основи для мультиплексора на динамічних неоднорідностях на ПАХ та мультиплексор розподілу сигналу в часі, сформовано принцип роботи. Розраховано основні параметри для мультиплексора на ПАХ, основою якого є кристал CdS.

#### АНОТАЦІЯ

В дисертації представлено огляд науково-технічної літератури щодо існуючих мультиплексорах. Показано можливість побудови мультиплексорів зі змінними частотами по кожному з вхідних каналів, з варіативною зміною частот по кожному з вхідних каналів. Це підвищує захищеність інформації, яка обробляється за допомогою таких мультиплексорів, оскільки зміна частот може програмуватись за певними встановленим розробником законами. Розроблена та запатентована конструкція такого мультиплексора. Передбачається використання сигналів діапазон від 8 МГц до 20МГц

#### SUMMARY

The diploma work provides an overview of scientific literature on existing multiplexers. It is shown the possibility of constructing multiplexers with changeable frequencies for each of the input channels, with variation of frequencies for each of the input channels. This increases the security of the information in device, because the frequency change can be programmed according to the developer's laws. Construction of such a multiplexer is designed and patented. Frequency band of device signal is from 8 MHz to 20 MHz.

# Перелік позначень, символів та скорочень

- 1. ЗШП- зустрічно-штирьовий перетворювач
- 2. ЛЗ лінія ЗАТРИМКИ
- 3. ТТЛ транзисторно-транзисторна логіка
- 4. ТТЛШ транзисторно-транзисторна логіка з діодами Шотткі
- 5. ОАХ об'ємна акустична хвиля
- 6. ПАХ поверхнева акустична хвиля
- 7. ФЧХ фазо-частотна характеристика
- 8. АЧХ амплітудно-частотна характеристьика

## **3**MICT

ВТУП	9
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Порівняння існуючих мультиплексорів і принципів їх роботи	11
1.2. Особливості мультиплексування	17
1.3.Багатоканальна система з частотнім ущільненням сигналів	18
1.4. Загальна характеристика ПАХ-перетворювачів	23
1.5.Конструктивні параметри ЗШП	29
1.6. Матеріали для пристроїв на ПАХ	36
1.7 Внутрішній фотоефект. Фізика процесу	36
1.8. З'єднання А <sup>II</sup> В <sup>VI</sup> . Загальні властивості	48
1.9 Основні параметри кристалу CdS шляхи його застосування	58
Висновки	59
2. ПРИНЦИП РОБОТИ МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВІ	
ДИНАМІЧНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ	61
2.1. Мультиплексор на ПАХ	61
2.2. Мультиплексор розподілу сигналу в часі	65
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПРОВІДНОСТІ	
КРИСТАЛУ CdS	66
Висновок	69
4. РОЗРАХУНОК МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ПОВЕРХНЕВИХ	
АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ	70
Висновки	78
5. РОЗРАХУНОК МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ПОВЕРХНЕВИХ	
АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ	79
Висновки	80
ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	82

### ВСТУП

Під час розвитку електроніки стала проблема збільшення кількості виводів та обробка всієї кількості інформаційних сигналів з них. В результаті цього було розроблено пристрій, що може виконати функцію об'єднання вхідних виводів в один на котрий будуть подаватись сигнали за певним алгоритмом відносно вхідних. Він має назві — мультиплексор і демультиплексор розклад вхідного сигналу на складові і подачу сигналу на виводи.

Мультиплексори в сучасній електроніці займають одну з основних ніш, оскільки засоби для комутації, сумування і обробки сигналів використовуються повсемісно, від засобів мережевого оточення до засобів мобільного зв'язку, що і визначає актуальність вибраної теми дипломного проекту.

Мета роботи являє собою розробку нового типу мультиплексорів на основі динамічних неоднорідностей, що буду оснований на властивостях кристалів фото-електриків типу A<sup>2</sup>B<sup>6</sup> - CdS та CdTe.

1. Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей, що містить входи та один вихід, який відрізняється тим, що містить синхронізатормікроконтролер, підключений через шину керування до світлодіодної матриці, яка розміщена над ділянкою поверхні фотокристалу з фотопровідністю, на якій створюються в режимі розподілу часу квазіметілічні доріжки, причому металізованими є тільки виводи на кристалі.

Він матиме широке застосування біомедицині для обробки результатів аналізу різних речовин в сумісності з сенсором.

2. Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей, що містить розташовані на п'єзо-фотокристалі частотно-селективні входи та один широкосмуговий вихід, виконаних у вигляді зустрічно-штирьових перетворювачів (ЗШП), який відрізняється від існуючого аналога[15] тим, що містить синхронізатор-мікроконтролер, підключений через шину керування до світлодіодної матриці, яка розміщена над ділянкою поверхні п'єзофотокристалу з фотопровідністю, на якій створюються в режимі розподілу часу вхідні частотно-селективні ЗШП (входи), причому спільні шини ЗШП виконані у вигляді металізованих смуг.

Він матиме застосування у випадках, коли необхідно мультиплексор, що буде передавати сигналі на певній смузі частот чи частотне ущільнення. Аналогом є оптичний мультиплексор, котрий формує світловий сигнал з декількох розкладених по спектру.

Новизною даного типу пристроїв є те, що можна створювати на поверхні фото-кристалу квазіметалізовані доріжки (доріжки з підвищеною провідністю) довільної форми, за допомогою опромінення поверхні лазерною матрицею. Це дає можливості динамічно в часі комутувати виходи чи формувати ЗШП, за необхідністю...Обмеженням даного виду пристроїв є роздільна здатність матриці. Звідси сілдує, що дана розробка є багато функціональна, тобто, дозволяє реалізувати на її основі різні електричні засоби такі, як мультиплексор, генератор довільної частоти на ПАХ, смугу затримки на ПАХ та інші...

# 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

# 1.1. Порівняння існуючих мультиплексорів і принципів їх роботи Цифровий мультиплексор

Мультиплексор (комутатор) призначений для комутації одного з m входів (каналів) на вихід. Входи мультиплексора, m інформаційних та k керуючих, знаходяться в наступному співвідношенні: m=2k. Вихід переважно один, він може бути як прямим, так і інверсним. Але в деяких випадках передбачені обидва виходи парафазного подання сигналу.

Розглянемо систему вхідних, вихідних та керуючих сигналів, а також правила роботи мультиплексора на прикладі типового варіанту мікроелектронної реалізації цього вузла на базі інтегральних мікросхем К155КП2, К555КП2, К531КП2П. Ці ІМС виконані на основі елементів ТТЛ, ТТЛШ і тому сумісні за всіма параметрами. В них один тип корпусу та однакове розведення виводів (рис.1.1,а).



Рис. 1.1 Мультиплексори. а) К531КП2П, К555КП2; б) К531КП11П, К555КП1[1]

Цей мультиплексор складається з двох частин, кожна з яких містить в собі чотири канали: A1-A4 та B1-B4, інверсні стробуючі входи (по одному для кожної частини) C1, C2 та по одному виходу FA, FB. Входи керування V1, V2 є спільними для обидвох частин, тобто сигнали на обидвох з цих вхо-

Вхід стробу	Входи упр	авління	Виходи	
C1 (C2)	V2	V1	FA	FB
0	0	0	A1	B1
0	0	1	A2	B2
0	1	0	A3	B3
0	1	1	A4	B4
1	X	Х	0	0

дів впливають на роботу обидвох частин IMC. Правила роботи мультиплексора розкриває таблиця 1.1.

Примітка: Х - довільний стан або 0, або 1.

Табл. 1.1 Правила роботи мультиплексора К555КП2[1]

Характеристики та параметри деяких мультиплексорів наведено в таблиці 1.2. При оцінці часових параметрів необхідно враховувати і те, що затримка розповсюдження сигналу до виходу від інформаційного, керуючого та стробуючого входів різна. Наприклад, у восьмиканального мультиплексора К155КП7 значення цих параметрів відповідно 17, 27 та 41 нс.

Для збільшення кількості каналів об'єднюють декілька мультиплексорів, використовуючи з цією метою стробуючі входи.

Крім цього, існують мультиплексори, канали яких складаються з декількох, наприклад чотирьох, розрядів: К531КП11П, К555КП14 та інші. Особливість багаторозрядних мультиплексорів полягає в тому, що на вихід комутують не одиничний сигнал, а групу сигналів, тобто кодову комбінацію. Такі ІМС включені в серії 530, К531, К555, К1533 в двох варіантах виконання: з прямими виходами (К531КП11П, К555КП11П, К1533КП11) та з інверсними (К531КП14П, К555КП14П, К1533КП14).

кість алів	имка, IC	Потужність споживан-	Напруга живлення,	кід рб"	
Кілы кана	Затр: н	ня, Вт	В	B) cTc	
Мультиплексори					
16	2.6	440	-4.5	-	
8x2	1.9	690	-4.5	-	
16	17	390	5	+	
16x16	100	800	5	+	
8	8	650	-5.2	-	
8	7	350	5	+	
8	24	50	5	+	
8	17	215	5	-(+)	
8	275	33	5	-	
8	600	0.15	315	+	
8	1000	15	-15, +5	+	
4x2	600	0.15	315	+	
4x2	1.7	513	-4.5	+	
4x2	9	350	5	+	
4x2	20	55	5	+	
4x2	19	102	5	+	
4x2	20	300	5	+	
4x2	275	33	5	-	
2(4)***	7	400	5	+	
2(4)***	18	58	5	+	
2(4)***	20	38	5	+	
2(4)***	450	0.25	315	-	
* Два восьмиканальних мультиплексори					
х канаци					
		НоменноКанали102.6162.68x21.9161716x16100888782481782758600810004x26004x21.74x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2204x2450	нотужність споживан- ня, ВтМультиплексори162.64408x21.9690161739016x1610080088650873508245082753386000.154x26000.154x293504x220554x21.75134x2203504x2203004x220332(4)***74002(4)***18582(4)***4500.25пьтиплексори38	99910тужністьНапруга живлення, ня, ВтМультиплексори162.6440-4.58x21.9690-4.5161739051617390516x16100800588650-5.2873505824505827533582753358172155827533586000.153154x26000.153154x21.7513-4.54x2205554x22030054x2203352(4)***185852(4)***4500.25315	

Табл. 1.2 Склад мультиплексорів в серіях ІМС[1]

Названі ІМС мають виходи на три стани, єдину систему розведення виводів в корпусі (рис.1,б), однакову напругу живлення та рівні сигналів 0 і 1.

Мультиплексори на КМДН елементах, які відносяться до серій К561, 564, наприклад К561КП1, 564КП1, відрізняються від розглянутих тим, що вони володіють властивістю двосторонньої провідності. Їх називають двонаправленими, оскільки вони дозволяють комутувати як цифрові, так і аналогові сигнали в обидвох напрямках і тому можуть використовуватись не тільки в якості мультиплексора для комутації одного з входів на вихід, але й в якості демультиплексора (селектора) для комутації виходу на один з входів.

До параметрів мультиплексорів серій К561, 564, які наведені в таблиці 1.2, також відносяться: найбільший розмах напруги, яка комутується (15В), максимальне значення струму через відкритий ключ (10мА), опір відкритого каналу (200...300Ом)

В серіях К176, К561, 564 є ІМС (К176КТ1, К561КТ3, 564КТ3), які містять окремі двонаправлені ключі з розглянутими властивостями. Мікросхеми ключів, мультиплексорів та селекторів серії К590, які виконані на основі р-МДН транзисторів, володіють приблизно тими ж можливостями, що і ІМС серій КМДН, але мають нижчу швидкодію. В деяких серіях передбачені ІМС ключів, які використовуються для узгодження малопотужних цифрових пристроїв з навантаженнями, що потребують великих струмів. Наприклад, К514КТ1 складається з дев'яти ключів на біполярних транзисторах з відкритим колектором, які розраховані на струм до 50мА, К146КТ1, містить сім ключів з вихідним струмом до 0.4А[1].

#### Загальні принципи технології DWDM



Рис. 1.3 Оптичний канал зв'язку

Технологія ущільненого хвильового мультиплексування (Dense Wave Division Multiplexing, DWDM) призначена для створення оптичних магістралей нового покоління, що працюють на мультігігабітних і терабітних швидкостях. Такий революційний стрибок продуктивності забезпечує принципово інший, ніж у SDH, метод мультиплексування - інформація в оптичному волокні передається одночасно великою кількістю світлових хвиль лямбда - Термін виник у зв'язку з традиційним для фізики позначенням довжини хвилі ?[9]

Мережі DWDM працюють за принципом комутації каналів, при цьому кожна світлова хвиля являє собою окремий спектральний канали несе власну інформацію.

Устаткування DWDM не займається безпосередньо проблемами передачі даних на кожній хвилі, тобто способом кодування інформації та протоколом її передачі. Його основними функціями є операції мультиплексування и демультиплексирования, а саме - об'єднання різних хвиль в одному світловому пучку і виділення інформації кожного спектрального каналу із загального сигналу. Найбільш розвинені пристрої DWDM можуть також коммутировать хвилі.

Першим застосуванням технології DWDM були протяжні магістралі, призначені для зв'язку двох мереж SDH. При такій простій двухточечной топології здатність пристроїв DWDM виконувати комутацію хвиль є зайвою, однак у міру розвитку технології і ускладнення топології мереж DWDM ця функція стає затребуваною.

Сьогодні обладнання DWDM дозволяє передавати по одному оптичного волокна 32 і більше хвиль різної довжини в вікні прозорості 1550 нм, при цьому кожна хвиля може переносити інформацію зі швидкістю до 10 Гбіт / с (при застосуванні протоколів технологій STM або 10 Gigabit Ethernet для передачі інформації на кожній хвилі). В даний час ведуться роботи по підвищенню швидкості передачі інформації на одній довжині хвилі до 40-80 Гбіт / с.[10] У технології DWDM є попередниця - технологія хвильового мультиплексування (Wave Division Multiplexing, WDM), яка використовує чотири спектральних каналу в вікнах прозорості 1310 нм і 1550 нм з розносом несучих в 800-400 ГГц. (Оскільки стандартної класифікації WDM не існує, то зустрічаються системи WDM і з іншими характеристиками.)

Мультиплексування DWDM називається «ущільненим» через те, що в ньому використовується істотно меншу відстань між довжинами хвиль, ніж в WDM. На сьогодні рекомендацією G.692 сектора ITU-T визначено два частотних плану (Тобто набору частот, віддалених один від одного на деяку постійну величину):[10]

Частотний план з розподілом частот між сусідніми каналами 100 ГГц,
 Відповідно до якого для передачі даних застосовується 41 хвиля в діапазоні
 від 1528,77 (196,1 ТГц) до 1560,61 нм (192,1 ТГц);

• Частотний план з кроком 50 ГГц, що дозволяє передавати в цьому ж діапазоні 81 довжину хвилі.

Реалізація частотних планів з кроком 50 ГГц і 25 ГГц пред'являє набагато більш жорсткі вимоги до обладнання DWDM, особливо в тому випадку, якщо кожна хвиля переносить сигнали зі швидкістю модуляції 10 Гбіт / с і вище (STM-64, 10GE або STM-256). Ще раз підкреслимо, що сама технологія DWDM (як і WDM) не займається безпосередньо кодуванням переданої на кожній хвилі інформації - це проблема більше високорівневою технології, яка користується наданою їй хвилею на свій розсуд і може передавати на цій хвилі як дискретну, так і аналогову інформацію . Такими технологіями можуть бути SDH або 10 Gigabit Ethernet. Теоретично зазори між сусідніми хвилями в 50 ГГц і навіть 25 ГГц дозволяють передавати дані зі швидкостями 10 Гбіт / с, але при цьому потрібно забезпечити високу точність частоти і мінімально можливу ширину спектра несучої хвилі, а також знизити рівень шумів, щоб мінімізувати ефект перекриття спектру.

### 1.2. Особливості мультиплексування

Рентгенографічний метод контролю є надійним і широко поширеним методом контролю, заснованим на здатності рентгенівського випромінювання проникати через метал. Виявлення дефектів при радіаційних методах засновано на різному поглинанні рентгенівського випромінювання ділянками металу з дефектами і без них. Основною відмінністю від інших методів неруйнівного контролю якості є те, що результат виконується на плівці.

Головною відмінністю одних мультиплексорів від інших є спосіб ущільнення каналів в один потік. Мультиплексування буває[6]:

- частотним / спектральним (FDMA);
- часовим (TDMA);
- кодовою (CDMA);
- просторовим (SDMA)
- Спектральне ущільнення каналів передачі(WDM)

Найчастіше в провідних каналах зв'язку використовуються перші два способи, в бездротових - всі чотири. Зазвичай, говорячи про мультиплексоре, мають на увазі провідні лінії, тому докладніше розглянемо частотний і тимчасової способи.

# Спектральне ущільнення каналів передачі, або ущільнення за довжинами хвиль

Технологія, яка дає змогу одночасно передавати декілька незалежних інформаційних каналів оптичним волокном, використовуючи оптичні несучі з різними довжинами хвиль. Технологія WDM дає змогу істотно збільшити пропускну здатність оптичного волокна за рахунок використання всієї його оптичної смуги пропускання. [5]

Характерною особливістю і суттєвою перевагою WDM технології є можливість реалізації в одному оптичному волокні багатьох оптично прозорих каналів, в кожному з яких можна вести передачу сигналів з будь-яким форматом. Таким чином, одним оптичним волокном можна одночасно передавати синхронні, асинхронні і аналогові сигнали, і немає потреби в єдиній

структурі сигналів, як це є, наприклад, в системах із часовим ущільненням каналів передачі.

#### Частотне мультиплексування.

При такому способі для кожного вхідного потоку в загальному каналі зв'язку виділяється окремий діапазон частот. Перед мультиплексором при цьому стоїть завдання перенести спектр кожного з вхідних каналів в інший частотний інтервал, який не перетинається з іншими каналами. Щоб мультиплексовані канали не стали на заваді один одному навіть в тому випадку, якщо спектр сигналу вийде за відведені рамки, між діапазонами частот залишаються спеціальні захисні інтервали. Застосовується FDMAмультиплексування як в електричних, так і в оптичних лініях зв'язку. В останніх його часто називають спектральним і використовують в технології WDM / DWDM.[5]

#### Часове мультиплексування.

На передачу кожного з вхідних сигналів в загальному високошвидкісному потоці відведений невеликий часовий проміжок, або таймслот, який періодично повторюється кожен часовий Фрейм. Перед мультиплексором при цьому стоїть завдання забезпечити циклічний доступ до загального середовища передачі для вхідних потоків на невеликий часовий проміжок. Уникнути накладання один на одного послідовних сигналів дозволяють невеликі захисні інтервали, які зазвичай залишаються між цими сигналами.

Розрізняють такі мультиплексори[15]:

термінальні. Розташовуються на кінцях лінії зв'язку;

- введення / виведення. Встановлюють в розрив лінії зв'язку з метою виведення декількох каналів із загального потоку. З їх допомогою уникають установки більш дорогих термінальних мультиплексорів.

# 1.3. Багатоканальна система з частотнім ущільненням сигналів – аналог[15]

Одним з найбільш цікавих варіантів використання АРК являється реалізація багатоканальних фільтрів розгалуження сигналів в системах з частотним керуванням. Приклад каналу зв'язку з частотним ущільнення сигналів приведений на рис. 1.3. На входи суматора (мультиплексора) подаються парціальні сигнали різних частотах ( $f_1 \div f_n$ ), що потрапляють після об'єднання в широкосмуговий канал зв'язку. На виході зв'язаного каналу передбачений розгалужувач (демультиплексор), що виконує розгалуження (виділення) парціальних сигналів шляхом частотної селекції.



Рис. 1.3. Канали зв'язку з частотним ущільненням сигналів[15]

В загальному випадку як мультиплексот, так і демультиплексор ідентичні та розрізняються тільки напрямок слідування сигналів, тобто конструктивно мають якби дзеркальну симетрію. В часному випадку роль мультиплексору може зводитись лише до широкосмугового сумування вхідних сигналів, при цьому полоса пропускання його по всім виходам може бути однаковою ( $\Delta f > f_n - f_1$ ). В демультиплексорі задача просторового розгалуження сигналів вирішується одночасно, а точніше шляхом їх частотної селекції. Смуга пропускання кожного із вихідних каналів повинна обиратись в залежності від спектру відповідного парціального сигналу. Тобто ми маємо справу з багатоканальним фільтром з різними центральними частотами смуг пропускання кожного із каналів. Інколи додаткова частотна селекція відбувається і в вхідних каналах мультиплексора; таким чином, ці властивості становляться повністю ідентичними.

Розглянем варіанти побудови багатоканального фільтру на ПАХ, що знаходиться в основі будь-якої конструкції акустичних де- і мультиплексорів.

Класична схема багатоканального фільтру (рис.1.4) являє собою зазвичай наявність спільного широкосмугового перетворювача, що взаємодіє за незалежним просторовим каналом з парціальними перетворювачами, центральні частоти якого знаходяться в межах смуги пропускання спільного перетворювача и відповідає частотам ущільнених (розділених) сигналів. На рис.60[15] багатоканальний фільтр ввімкнено в режимі демультиплексору: до широкосмугового перетворювача підводяться в хастотам упрокосмугового перетворювача в трьох незалежних просторових каналах в наведеному прикладі використовується двонаправлене випромінення вхідного перетворювача з апертурою  $W_{\Sigma}$ : вихідні перетворювачі з апертурою  $W_n = W_{\Sigma}/3$ , що розміщуються з обох його сторонам, що дозволяє в 2 рази зменшити втрати і загальну ширину звукопроводу при незначному збільшенню його довжини.



Рис. 1.4. Типова схема багатоканальнівого фільтру[15].

Власне селективні властивості багатоканального фільтру такої конструкції формують вихідні перетворювачі. При великій кількості каналів та вузькій полосі пропускання конструкція значно ускладняється, що безумовно впливає на його вартість та надійність.

Значно компактніший багатоканальний фільтр, в основі якого лежить використання ангармонічних складових спектру перетворювача розрідженою структурою електродів (рис.1.5). Нагадаємо, що присутність просторово чергуючихся груп та пропусків електродів обумовлює в спектрі перетворювача додаткових гармонічних складових на частотах  $f_1$ ,  $f_1$  і т.д. з інтервалом  $\Delta f$ , обернено пропорціональному кроку  $L_0$  групи електродів:  $\Delta f = v_a/L_0$ . І якщо в вузькосмугових смугових фільтрах ці гармонічні складові (ангармоніки) подавлялись, то при створення багатоканального фільтру їх існування дозволяє отримати сугубо позитивні результати.

На рис.1.5,а приведене конструкція багатоканального фільтру з спільним перетворювачем 1, що має розріджену структуру електродів. Відмітимо, що вихідні перетворювачі (1-5) зображені в одному просторовому каналі лиш для спрощення. В загальному випадку вони можуть розташовуватись як и в попередньому варіанті – в незалежних просторових каналах по обидві сторони від вхідного.

Суть даного рішення в том, що вхідний (в випадку демультиплексору – вихідний) перетворювач повність визначає селективність любого з частотних каналів.



Рис. 1.5. Багатоканальний фільтр з використанням розрідженого перетворювача[15].

Роль вихідних перетворювачів зводиться лише до подавлення частотних складових, що відповідають сусіднім каналам. Просторовий крок  $L_0$  групи електродів вхідного перетворювача та крок  $h_0$  електродів в групах вибираються таким чином, щоб центральна частина вхідного перетворювача співпадала з частотою одного з вхідних сигналів (вона являється також центральною, або близькою до неї для всієї групи вхідних сигналів), а найближчі до неї ангармоніки співпадали з рештою вхідних сигналів. Протяжність вихідних перетворювачів вибирається рівною просторовому кроку  $L_0$  груп вхідних перетворювачів, а крок електродів в них різний і вибирається в відповідності до частоти сигналу  $f_1$ , що виділяється. При цьому центральні частоти вихідних перетворювачів  $f_1 \div f_5$  співпадають з частотами відповідних ангармонік, а їх нулі – з частотами сусідніх гармонік, що використовуються, це виключає їх вплив на роботу фільтру (рис.1.5,б) Практично форма АЧХ, що відповідає кожному каналу, визначається законом аподизації вхідного перетворювача (на рис. 61зображено неаподизований перетворювач).

Приведені міркування повністю справедливі в тому випадку, коли потрібна полоса пропускання кожного з каналів значно вужча різниці між їх центральними частотами. Якщо ці величини близькі по значенню, форма АЧХ вихідного перетворювача починає впливати на форму АЧХ відповідного каналу фільтра, що потрібно враховувати при розрахунку.

#### 1.4. Загальна характеристика ПАХ-перетворювачів

З початку 60-х pp. XX століття почали використовувати однофазні або двофазні електродні перетворювачі. Це є важливим етапом розвитку пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Для виготовлення електродних перетворювачів виявилися придатними методи фотолітографії, це дозволило спростити технологію виготовлення і розширити діапазон робочих частот [2].

У п'єзоелектричному кристалі системою електродів за рахунок п'єзоефекту створюються пружні деформації, які поширюються від перетворювача у вигляді об'ємної і поверхневої акустичної хвиль. При цьому пружні деформації супроводжуються змінним електричним полем.



Рис. 1.6 Перетворювач: а) однофазний; б – двофазний (1 – електрод; 2підкладка (звукопровід); 3 – спільний електрод (земля, корпус); 4 – шина)[2]

Період електродів однофазного перетворювача беруть рівним  $\lambda$  (рис. 1.6). При цьому забезпечується максимальна ефективність взаємного перетворення електричного і акустичного сигналів. Ширина електродів вибирається рівної  $\frac{\lambda_a}{2}$ . Апертура електродів  $W >> \lambda_a$ . На рис. 1 представлені так звані еквідистантні перетворювачі.

Ефективність акусто-електричного перетворення зростає зі зменшенням товщини підкладки. Її максимальна товщина обмежена, по-перше, технологічними труднощами виготовлення тонких п'єзоелектричних звукопроводів, по-друге - умовою поширення недисперсійної поверхневої хвилі, яка полягає в тому, що на практиці товщина звукопровода завжди перевищує декілька довжин хвиль.

Двофазний перетворювач поверхневих акустичних хвиль являє собою зустрічно-штирову систему електродів *1* на (рис 1.6,б) на поверхні п'єзоелектрика. Електроди в кожній з груп з'єднані між собою шинами *4*. Шини, в свою чергу, з'єднані із джерелом напруги або навантаженням. З умови акустичного синхронізму крок електродів зустрічно-штирового перетворювача (ЗШП) вибирається рівним половині довжини поверхневої хвилі.

Різниця перетворювачів *a* і  $\delta$  (рис. 1.6) у тому, що однофазний перетворювач може бути виконаний на f = 100 МГц і вище (технологічно простіше). Змінюючи технологію, можна варіювати частотні характеристики зустрічноштирових перетворювачів. Однофазні і двофазні перетворювачі мають свої переваги і недоліки. При однаковому періоді штирів робоча частота однофазного перетворювача вдвічі вища робочої частоти двофазного. Крім цього, максимальне значення напруженості електричного поля в однофазному перетворювачі може значно перевищувати напруженість електричного поля двофазного, оскільки в однофазному перетворювачі різнополярні електроди розділені шаром п'єзоелектрика і немає небезпеки пробою через повітря, що має місце для двофазних перетворювачів[3].

Для характеристики перетворювача часто користуються поняттям акустичної добротності:

$$Q_a = \frac{f_a}{\Delta f} = N \tag{1.1}$$

яка чисельно дорівнює *N* – кількості електродів.

У межах апертури ЗШП відстань між протифазними електродами змінюється від  $h_{min}$  до  $h_{max}$ , а частота – від  $f_{max}$  до  $f_{min}$ . Де:

$$f_{\max} = \frac{\nu_a}{h_{\min}} \tag{1.2}$$

$$f_{\min} = \frac{\nu_a}{h_{\max}} \tag{1.3}$$

Смугапропускання тоді буде:

$$\Delta f = \frac{\nu_a}{2} \cdot \frac{2h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max} \cdot h_{\min}}$$
(1.4)

Число пар електродів ЗШП може бути вибрано, виходячи з умови оптимального узгодження АРК із зовнішніми ланцюгами. Зменшення втрат на перетворення вдається досягти, застосовуючи однонаправлені ЗШП та узгодження ланцюгів.

Енергетичні втрати, обумовлені двонаправленістю, складають, як мінімум, 3 дБ на один перетворювач. Таким чином, звичайна ЛЗ з двома ЗШП має нижню межу втрат 6 дБ. Випромінювання хвилі в небажаному напрямку призводить також і до виникнення відбиття на краях пластини, що спотворює характеристики пристрою. Уникнути перевідбиття можна нанесенням поглинаючих шарів на кінцях звукопроводу.

Також в останні роки з'явилися конструкції однонаправлених ЗШП. Робота однонаправленого перетворювача заснована на взаємній компенсації двох хвиль з різними фазами. Топологія такого перетворювача наведена на рис. 1.7



Рис. 1.7 Топологія однонаправленого перетворювача: 1,2 – ЗШП; 3 – підкладка; 4 – фазообертач[2]

Перетворювачі 1 і 2 розташовані на відстані  $\lambda_a(n+\frac{1}{4})$ , де n - ціле число. На резонансній частоті  $\lambda_a$  хвилі в одному напрямку складаються по фазі ( $\rightarrow v_a$ ), в іншому - взаємно компенсуються ( $\leftarrow$ ). Втрати на один перетворювач складають ~2дБ. Обмеженням застосування однонаправленого перетворювача є вузька смуга (до 10%), складність фазообертача (електромагнітна ЛЗ).

Лінії затримки. Одним з найчисленніших класів АРК є лінії затримки . Основними вимогами до ЛЗ: великий діапазон затримки робочих частот, широка смуга пропускання і низьке затухання. ЛЗ на ПАХ найбільш повно задовольняють цим вимогам:  $t_3 = 0,1$  мкс ÷ 1 мс; втрати  $10 \div 30$  дБ; повна інтегральна конструкція;  $f_{max} = 2$  ГГц. В якості звукопровода найчастіше застосовують ніобат літію (з нього можна зробити підкладку великої довжини) зі швидкістю  $v_a = 3,48$  км/с (до чотирьох - залежно від зрізу) і германат вісмуту з  $v_a = 2,21$  км/с. Застосування цих матеріалів дозволяє мінімізувати довжину звукопровода [8].

Звичайна лінія затримки на ПАХ (рис. 1.7) складається із вхідного і вихідного ЗШП, нанесених на поверхню п'єзоелектричної пластини (звукопровода), в якій можуть поширюватися поверхневі акустичні хвилі з незначним затуханням. Лінії затримки на ПАХ, як правило, мають однорідні перетворювачі. Під однорідним перетворювачем розуміється перетворювач з постійним періодом і перекриттям сусідніх електродів. Конструкція ЛЗ з реальними однорідними ЗШП зображена на рис. 3. У тих випадках, коли від ЛЗ потрібні властивості частотної селекції, в одному із ЗШП лінії затримки використовується аподизація електродів. Аподизацією електродів ЗШП зазвичай називають зміну взаємного перекриття сусідніх електродів на довжині ЗШП за якимось функціональним законом, наприклад, у вигляді функції Гауса, Тейлора і т.д.

Реальні параметри сучасних ЛЗ бувають дуже далекими від потенційних. Завдання розробників АРК полягає в тому, щоб мінімізувати (або усунути) вплив вторинних акустичних ефектів: перевідбиття, прямого проходження, появи ОАХ, підвищення температурної стабільності і т. д.



Рис. 1.8 Лінія затримки на ПАХ (R<sub>н</sub>, R<sub>г</sub> – опір навантаження і генератора)[2]

Основними параметрами ліній затримки є:

- час затримки сигналу в ЛЗ;
- смуга робочих частот;
- центральна частота;
- коефіцієнт передачі;
- втрати, що спричинені ЛЗ;
- рівень хибних сигналів.

Час затримки *t*<sub>3</sub> визначається часом поширення сигналу від вхідного перетворювача до вихідного перетворювача:

$$t_3 = \frac{L}{\nu_a} \tag{1.4}$$

де L - відстань між центрами перетворювачів;

 $\upsilon_{\scriptscriptstyle a}$  - швидкість поширення ПАХ в матеріалі звукопровода.



Рис. 1.9 Класифікація ЛЗ на ПАХ[5]

Прийнята сьогодні класифікація ЛЗ на ПАХ заснована по функціональним ознакам (рис. 1.9).

## 1.5. Конструктивні параметри ЗШП

Функціональні властивості ВШП повністю визначаються наступними конструктивними параметрами:

1. Геометрія розташування електродів:

- а) перекриття довжин електродів;
- б) їх періодичність;
- в) паралельність або вієподібно;
- г) нахил електродів;
- д) наявність «холостих» електродів;
- е) число електродів.
- 2. Геометрія самих електродів:
  - а) розщеплені електроди;
  - б) змінна ширина електродів.
- 3. Спосіб підключення до загальних потенційним шинам:
  - а) оптичний і ємнісний;

б) багатофазних (для односпрямованого випромінювання або реєстрації);

в) з розподілом потенціалу.

4. Наявність додаткових шарів, призначених для:

а) акустичного узгодження ЗШП з півпростором;

б) обертання фази;

в) захисту від зовнішніх впливів.

5. Пасивні або активні електричні навантаження, підключені до ЗШП і забезпечують:

a) залежність фазової швидкості ПАХ в перетворювачі від зовнішнього електричного навантаження;

б) залежність коефіцієнта відбиття, проходження від електричної чеського узгодження;

в) електронне посилення ПАР в перетворювачі.

6. Взаємне розташування перетворювачів визначає:

а) час затримки сигналу і відносну нерівномірність фазової характеристики;

б) корекцію фронту ПАХ плівковими хвилеводами;

в) відгалуження енергії ПАХ в сусідні канали;

г) можливість постановки електричних екранів.

У таблиці 1.3 наведені різні типи ЗШП і їх особливості (які є відносно типовими).

Ефективність збудження ВШП залежить від ширини електродів, тому, змінюючи ширину електродів уздовж va (табл. 1.3, поз. 12), можна рівномірно зважити перетворювач відповідно до заданої імпульсною характеристикою. Цей метод зважування можна розглядати як широтно-імпульсну модуляцію сигналу. Недоліком цього методу зважування є чутливість до технологічних погрішностей. Отже, зважування можна використовувати тільки на низьких частотах. Діапазон зважування ≈ 2.5: 1, що обмежує клас реалізованих АЧХ. Є й інші методи зважування. Одна з головних проблем, властивих методу зважування - зміна довжини електродів (аподизація).

Оскільки смуга пропускання ВШП обернено пропорційна числу його електродів, то в еквідистантним аподизованом ЗШП сильно зростають відображення від багатоелектродної структури при смугах менш  $\Delta f3 / f0 = 2 \div 5\%$ , і навпаки, при  $\Delta f3 / f0 > 30\%$  ( $\Delta f3$  - частота затримання)[3].

Віддзеркалення можна знизити, застосувавши структуру ВШП з розщепленими електродами, з проряженнимі електродами або зі зламом електродів (табл. 1.3)

Табл 1.3 Конструктивні особливості різної конфігурації ЗШП – переваги, недоліки [5,6,7]

Тип ВШП і спосіб зважу-	Конструкція	Переваги	Недоліки
вання			
1	2	3	4
<ol> <li>Неаподизованний, еквідистантний (без зважування)</li> </ol>		Простота розрахунків	Погана прямокутність, великий рівень бічних пелюсток
<ol> <li>Неаподизованний</li> <li>розщепленням елект- родів (без зважування)</li> </ol>		Малий коефіцієнт відбиття	Велика ймовірність дефектів виготовлення

3. Аподизованний еквідистантний (зважу- вання зміною довжини електродів)		Високий коефіцієнт прямокутності, смуга до 30%	Спотворення фазового фронту ПАХ і чутли- вість до дифракції
4. Аподизованний з пасивними електродами поза зоною перекриття		Зниження фазових спотворень фронту	Спотворення АЧХ через відбиття пасив- них електродів, чутли- вість до дифракції ПАХ
<ol> <li>Аподизованний з розщепленими індиві- дуально зваженими електродами</li> </ol>		Малий коефіцієнт відображення, можли- вість реалізації склад- них АЧХ	Велика ймовірність дефектів виготовлення
<ul><li>6. Аподізованний зі</li><li>зламом електродів поза</li><li>зоною перекриття</li></ul>	Складна форма	З малим коефіцієнтом відбиття	Чутливість до дифрак- ції
7. Аподізованний секційний		Малий коефіцієнт відбиття	Ангармонічного від- гуки в АЧХ

8. Аподізованний з		Малий коефіцієнт	Дисперсія ПАХ
металізацією поза зо-		відбиття	
ною перекриття	▝▀▁▖▋▋▝		
9. Із ступінчастим		Можливість приду-	Дифракція парціаль-
фронтом випроміню-		шення об емних хвиль	пих пучків
вання			
10. Олноспрямований	Ø	Високочастотність	Вузька смуга, великий
(зсув двох половин			рівень бічних пелюс-
ВШП на 90 °)			ток
11. Модифікований		Широкополосність	Верхня гранична час-
односпрямований			тота нижче в два рази
12 2			Иелостатијй рибјр
12. 3 зважуванням		го пучка по апертурі	реалізованих АЧХ,
ширини електродів			великий рівень бічних
			пелюсток
13. З зважуванням і		Зниження фазових	Збільшення рівня біч-
селективним видален-		спотворень фронту і дифракції	них пелюсток при розладі
ням електродів			

14. Еквідистантно - груповий (зміна періо- ду)	$\lambda_1$ $\lambda_2$	Зменшення дифракції	Великий рівень бічних пелюсток
<ol> <li>Нееквідистантним аподізованний (зважу- вання періоду і довжи- ни електродів)</li> </ol>	Різні Різні	Можливість управлін- ня видом АЧХ	Дискретна зрізаність фазової характеристи- ки
<ul> <li>16. Нееквідистатний аподизований (зважування періоду електродів вздовж напрямку <i>v<sub>a</sub></i>)</li> </ul>		широкосмугова диспе- рсія	Зрізаність фазової характеристики, вели- кий рівень бічних пелюсток
17. Віяловий аподи- зований (зі зважуван- ням періоду електродів поперек напрямку v <sub>a</sub> )		Високий коефіцієнт прямокутності АЧХ	Великий рівень бічних пелюсток
18. Віяловий аподи- зований (зміна періоду і довжини електродів)		Високий коефіцієнт прямокутності	Великий рівень бічних пелюсток



### 1.6. Матеріали для пристроїв на ПАХ

В приладах на ПАХ використовуться монокристали, п'єзокераміка і шаруваті системи, що являють собою комбінацію із неп'єзоелектричної підкладки і п'єзоплівки, які призначені для збудження і прийому ПАХ. Шаруваті системи у вигляді п'єзопідкладки і діелектричної плівки дозволяють реалізовувати перетворювачі з підвищеною температурною стабільністю [9].

В традиційному застосуванні ПАХ матеріали повинні мати: малі акустичні втрати; велику ефективність електромеханічного перетворювача; високу температурну стабільність, низьку швидкість поширення ПАХ, яка досягається при відповідній товщині плівки.

На практиці найбільш широке застосування отримали п'єзокварц, ніобат і танталат літію, германат вісмуту, берлініт, плівки нітриду алюмінію, оксид цинку, сульфід кадмію.

В датчиках на ПАХ переважно використовується п'єзокварц, а із сильних п'єзоелектриків – ніобат літію. Перспективним вважається використання у якості матеріалів підкладки – звукопроводів для ПАХ монокристалічного кремнію, у якого технологія формування досягла в останні роки високого рівня.

### 1.7 Внутрішній фотоефект. Фізика процесу

Внутрішній фотоефект - перерозподіл електронів по енергетичних рівнях у діелектриках, напівпровідниках (але не в металах) під дією світла. Якщо енергія кванта *hv* падаючого світла перевищує ширину забороненої зони в діелектрику або напівпровіднику, то електрон, що поглинув квант, переходить із валентної зони в зону провідності. У результаті цього переходу утворюється пара носіїв: у зоні провідності електрон, а у валентній зоні - дірка. Таким чином, у зоні провідності з'являються носії заряду, і при включенні напівпровідника в ланцюг по ній буде протікати струм або при додатку зовнішнього електричного поля буде протікати струм, що змінюється залежно від освітленості.[21]
Внутрішній фотоефект приводить:

1. До зміни концентрації носіїв у зоні провідності ( тобто зміні провідності);

2. Виникненню фото ЕРС.

На використанні внутрішнього фотоефекта заснована дія фотоелементів – обладнань, що перетворять світлову енергію в електричну, або властивості, що змінюють свої, під дією падаючого світла.

Властивості, що змінюють, працюють ка внутрішньому фотоефекті: фотоопору (ФС), фотодіоди (ФД), фототранзистори (ФТ), фоторезистори, фотомікросхеми. Оптоелектронна пара - в одному корпусі укладені джерело світла й фотоприймач - використовуються для гальванічної розв'язки ланцюгів.

Обладнання, що перетворять світлову енергію в електричну, використовують вентильний фотоефект (різновид внутрішнього фотоефекта) - виникнення фото ЕРС на *p-n* переході або на границі металу з напівпровідниками. Обладнання на вентильному фотоефекті використовуються у фотоапаратах, у сонячних батареях, у калькуляторах, на супутниках, у деяких будинках. Фотоелементи використовуються також у фотометрії, спектрометрії, в астрофізику, біології і т.д. Зовнішній фотоефект використовується у вакуумних фотоелементах, фотопомножувачах, у відіконах (трубки теле - і відеокамер) і т.д.

Надмірні електрони  $\Delta n$  і дірки  $\Delta p$  ж середня енергія рівноважних носіїв заряду. Проте в результаті взаємодії з фононами і дефектами кристалічної решітки енергія нерівноважних носіїв заряду за час близько  $10^{-10} - 10^{-12}$  с набуває такого розподілу по енергіях і квазіімпульсах, як у рівноважних носіїв. Тому рухливість нерівноважних носіїв заряду не відрізнятиметься від рухливості рівноважних носіїв. Отже, повна провідність напівпровідника визначається рівноважними носіями заряду  $n_0$ ,  $p_0$  і фотоносіями  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  і рівна:

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \qquad (1.5)$$

Оскільки темнова провідність  $\sigma_{\rm T} = \sigma_0 = e[n_0\mu_n + p_0\mu_p]$ , то фотопровідність напівпровідника, обумовлена безпосередньою дією випромінювання, є

$$\sigma_{\Phi} = \sigma - \sigma_0 = e[\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p] \tag{1.6}$$



Рис. 1.10 Зонні діаграми фотоефекта в фотоматеріалах.[17]

Природно, що концентрації надмірних носіїв заряду  $\Delta n$  і  $\Delta p$  залежать від інтенсивності і довжини хвилі світла. Нехай на шар речовини завтовшки dx, що має коефіцієнт поглинання  $\alpha$ , падає світло інтенсивності *I*. Тоді кількість світлової енергії, що поглинається в одиницю часу в одиниці об'єму цієї речовини

$$\frac{dI}{dx} = \alpha I. \tag{1.7}$$

Отже, при поглинанні квантів світла енергії *hv* в одиниці об'єму напівпровідника в одиницю часу для області власного поглинання утворюються надмірні електрони і дірки в кількості

$$G = \beta \alpha I / h v \tag{1.8}$$



Рис. 1.11. Зміна в часі концентрації носіїв заряду, збуджених світлом[21]

Тут коефіцієнт пропорційності β, який зазвичай називають квантовим виходом фотоіонізації, визначає число пар носіїв заряду (чи число носіїв заряду при домішковій фотопровідності), що утворюються одним поглиненим

фотоном, якщо інтенсивність світла вимірювати числом квантів в секунду на одиницю поверхні.

Проте відразу після початку освітлення фотопровідність напівпровідника не досягає максимального значення, бо в міру збільшення концентрації нерівноважних носіїв заряду наростає процес рекомбінації. Оскільки швидкість генерації нерівноважних носіїв залишається постійною при незмінній інтенсивності світла, то через якийсь проміжок часу інтенсивність рекомбінації досягне інтенсивності генерації, і встановиться стаціонарний стан, що характеризується постійним значенням концентрації фотоносіїв заряду  $\Delta n_{\rm cr}$  і  $\Delta p_{\rm cr}$  (рис. 1.11).

Стаціонарні концентрації надмірних носіїв заряду можна визначити, якщо скористатися рівнянням безперервності, в якому генераційний член записаний у виді (1.8), припускаючи однорідну генерацію. Тому

$$\Delta n_{\rm cr} = G_n \tau_n = \beta \alpha I \tau_n / h \nu; \tag{1.9}$$

$$\Delta p_{\rm cT} = G_p \tau_p = \beta \alpha I \tau_p / h \nu, \qquad (1.10)$$

а стаціонарна фотопровідність рівна:

$$\sigma_{\phi,\rm ct} = e\beta\alpha(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p)^{I}/_{hv}$$
(1.11)

Відношення фотопровідності  $\sigma_{\phi}$  до інтенсивності світла *I* визначає питому фоточутливість напівпровідника

$$S_{\Phi} = \sigma_{\Phi}/I \tag{1.12}$$

Якщо один з членів в дужках співвідношення (1.11) значно більше іншого (за рахунок різниці в значеннях рухливості або часу життя електронів і дірок), то фотопровідність визначається носіями заряду одного знаку і її називають монополярною. В цьому випадку

$$\sigma_{\phi,\rm ct} = e\beta\alpha\tau\mu^{I}/_{h\nu} \tag{1.13}$$

Вираз для стаціонарного значення щільності фотоструму матиме вигляд:

$$J_{\phi} = \sigma_{\phi,cT} \mathcal{E} = e\beta \alpha (\mu_{n}\tau_{n} + \mu_{p}\tau_{p})^{I\mathcal{E}} / hv$$
(1.14)

Рис. 1.12. Залежність квантового виходу (число збуджених електронів на одні поглинений фотон) від енергії фотона в германії T = 300 K (a) і кремній (б): 1 – 100 K; 2 – 300 K; 3 – 400 K[21]

Але  $\mu_n \mathcal{E} = v_n$ , а  $\mu_p \mathcal{E} = v_p$ , і якщо через *l* позначити розмір напівпровідника у напрямі поля, то час дрейфу  $t_n = l/v_n$  і  $t_p = l/v_p$ . З урахуванням цього (1.14) запишеться як

$$J_{\phi} = e\beta\alpha(\frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}) \frac{I\mathcal{E}}{h\nu}$$
(1.15)

Якщо величини, що входять в (1.15), відомі, то, вимірюючи  $J_{\phi}$ можна визначити квантовий вихід  $\beta$ . На рис. 1.12, а приведена спектральна характеристика квантового виходу для германію і кремнію. Видно, що при 300 К аж до 2,7 эВ для германію і аж до 3 эВ у кремнію  $\beta = 1$ . При подальшому зростанні енергії фотона квантовий вихід різко збільшується. Це відбувається тому, що поглинання фотона такої великої енергії супроводжується виникненням «гарячих» носіїв заряду, що мають енергію, достатню для утворення вторинних електронно-діркових пар шляхом ударної іонізації. Оскільки ширина забороненої зони кремнію зменшується при підвищенні температури, то межа зростання квантового виходу, як випливає з рис. 1.12,б, зміщується у бік менших енергій.

### РЕЛАКСАЦІЯ ФОТОПРОВІДНОСТІ

Нехай напівпровідник освітлюється імпульсом світла прямокутної форми, як це зображено на рис. 1.13, а. Стаціонарне значення фотопровідності досягається не миттєво, а лише через деякий час після початку освітлення (рис. 1.13, б). При вимкненні світла нерівноважна провідність зникне також через деякий час після припинення освітлення (рис. 1.13,б). Нас цікавитимуть закони наростання і спаду фотопровідності залежно від рівня освітлення. Розглянемо випадки малого і великого рівня збудження.

Зміна концентрації надлишкових носіїв заряду в одиницю часу  $d\frac{\Delta n}{dt} \in$  різниця між швидкостями генерації і рекомбінації носіїв заряду. Оскільки швидкість генерації  $G = \beta \alpha I / hv$ , то

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{\beta \alpha I}{h\nu} - R \tag{1.16}$$

де *R* враховує зменшення концентрації надмірних носіїв заряду в результаті процесу рекомбінації.

При малому рівні освітлення, для якого  $\Delta n \ll (n_0 + p_0)$ , згідно з виразом (7.18)[21]  $R = \Delta n / \tau$ ,

тому

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = \frac{\beta \alpha I}{hv} - \Delta n(t) / \tau \qquad (1.17)$$



Рис. 1.13. Релаксація фотопровідності(б) при збудженні її імпульсом світла прямокутної форми(а)[20]

Розділяючи змінні і інтегруючи з урахуванням початкової умови  $\Delta n = 0$  при t = 0, отримуємо вирази, що характеризують зміни концентрації надлишкових електронів в часі:

$$\Delta n = \beta \alpha \tau I / h \nu (1 - e^{-t/\tau}) = \Delta n_{\rm cr} (1 - e^{-t/\tau}) \qquad (1.18)$$

аналогічно для процесу спаду

$$\Delta n = \beta \alpha \tau \frac{I}{h\nu} e^{-t/\tau} = \Delta n_{\rm CT} e^{-t/\tau} \qquad (1.19)$$

Звідси витікає, що релаксація фотопровідності при малій освітленості визначається експоненціальним законом з постійною часу, такою, що відповідає часу життя нерівноважних носіїв заряду.

При великому рівні збудження, коли  $\Delta n \gg (n_0 + p_0)$ , згідно (7.20)[21]  $R = \gamma (\Delta n)^2$  і (1.17) набере вигляду

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{\beta \alpha I}{h\nu} - \gamma (\Delta n)^2$$
(1.20)

Для вирішення цього рівняння також використовуємо початкову умову:  $\Delta n = 0$  при t = 0. В результаті отримаємо, що концентрація надмірних електронів при квадратичній рекомбінації описується виразом для наростання

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\beta \alpha I}{\gamma h \nu}} \operatorname{th} t \sqrt{\frac{\beta \alpha I}{\gamma h \nu}}$$
(1.21)

а для процесу спаду



Рис. 1.12. Залежність стаціонарного фотоструму від інтенсивності освітлення для сірчистого вісмуту:1 — слабке освітлення; 2 — сильне



Рис. 1.13. Криві релаксації фотопровідності за відсутності(1) і наявності(2) центрів захоплення[21]

Таким чином, фотопровідність залежить від інтенсивності світла. При лінійному законі рекомбінації стаціонарна фотопровідність згідно (1.19) пропорційна інтенсивності світла, тобто.

$$\sigma_{\phi,c\tau} \sim I/_{h\nu} \quad i \quad J_{\phi} \sim I/_{h\nu} \tag{1.23}$$

При квадратичній рекомбінації з (1.22) витікає, що

$$\sigma_{\phi,c\tau} \sim \sqrt{I/h\nu} \quad i \quad J_{\phi} \sim \sqrt{I/h\nu} \tag{1.24}$$

У загальному випадку можна вважати, що

$$\sigma_{\phi,c\tau} \sim {I^b}/{hv} \tag{1.25}$$

При b = 1 фоторезистивний ефект називають лінійним, при b < 1 - сублінійним. Отже, залежність стаціонарного фотоструму напівпровідника від інтенсивності світла повинна мати дві ділянки; при слабкій освітленості – лінійний, а при великій освітленості – сублінійний (рис. 1.13).

Якщо в напівпровіднику є центри захоплення, то вони роблять вплив на кінетику фотопровідності. Вільні електрони не лише рекомбінуватимуть з дірками, але також захоплюватимуться центрами прилипання, що зменшить швидкість наростання стаціонарної концентрації носіїв заряду. При вимкненні збудливого світла спустошення пасток затягуватиме спад концентрації носіїв заряду. В результаті цього матиме місце уповільнення процесу наростання на і спаду фотопровідності (рис. 1.13).

## ФОТОПРОВІДНІСТЬ ЗА НАЯВНОСТІ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІ-НАЦІЇ І ДИФУЗІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ

У попередньому аналізі фотопровідності передбачалася однорідна генерація носіїв заряду по усьому зразку. Крім того, не була врахована поверхнева рекомбінація, яка призводить до зменшення концентрації нерівноважних носіїв заряду поблизу поверхні напівпровідника.

Розглянемо тепер випадок, коли падаюче випромінювання поглинається нерівномірно по товщині зразка і має місце дифузія носіїв заряду.

За відсутності центрів прилипання для обчислення стаціонарної концентрації надмірних носіїв заряду потрібно знайти рішення рівняння неперервності для неосновних нерівноважних носіїв заряду (наприклад, для дірок) :

$$-\frac{\Delta p}{\tau_p} + D\frac{d^2\Delta p}{dx^2} + Ge^{-\alpha x} = 0$$
(1.26)

У цьому рівнянні перший доданок враховує рекомбінацію; другий – дифузію нерівноважних дірок, яка виникає як результат неоднорідної генерації носіїв заряду і впливу поверхневої рекомбінації; третій – генерацію носіїв заряду, яка згідно (11.4)[21] буде

$$Ge^{-\alpha x} = \frac{\beta (1-R_s)^2 I_0}{hv} e^{-\alpha x}$$
 (1.27)

де  $\beta$  – квантовий вихід; hv – енергія кванта світла, що падає;  $R_s$  – коефіцієнт відбиття поверхні напівпровідника.

Якщо випромінювання інтенсивності  $I_0$  падає на поверхню зразка, то граничну умову для x = 0 можна записати у виді

$$D\frac{d\Delta p}{dx}\Big|_{x=0} = s\Delta p\Big|_{x=0}, \qquad (1.28)$$

де *s* — швидкість поверхневої рекомбінації на освітленій поверхні.

Умови на другій поверхні зразка завтовшки d можна не враховувати, якщо вважати зразок досить товстим: d >> L і  $d >> 1/\alpha$ .

Загальне рішення (1.26) має вигляд:

$$\Delta p(x) = A e^{-x/L} - \frac{\tau G e^{-\alpha x}}{L^2 \alpha^2 - 1}.$$
 (1.29)

Використовуючи граничну умову (1.28), матимемо:

$$\Delta p(x) = \frac{\tau G e^{-\alpha x}}{\alpha^2 L^2 - 1} \left[ \frac{\alpha L^2 + s\tau}{L + s\tau} e^{-x/L} - e^{-\alpha x} \right]$$
(1.30)

Повна кількість дірок, що генеруються, віднесених до одиниці поверхні зразка завтовшки d, отримаємо, якщо проінтегруємо  $\Delta p(x)$  в межах від 0 до d і врахуємо (1.27):

$$\Delta P = \int_{0}^{d} \Delta p(x) \, dx = \frac{\beta (1 - R_s)^2 I_0}{h \nu (\alpha^2 L^2 - 1)} *$$
$$* \left[ \frac{\alpha L^2 + s\tau}{L + s\tau} L (1 - e^{-\frac{d}{L}}) - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha d}) \right]$$
(1.31)

Оскільки  $\Delta P = \Delta N$ , а фотопровідність пропорційна  $\Delta P$  і  $\Delta N$  (1.6), то (1.31) дозволяє проаналізувати вплив швидкості поверхневої рекомбінації на фотопровідність, а також з'ясувати деякі особливості спектральної залежності фотопровідності власного напівпровідника. Для цього криву власного поглинання умовно розділимо на дві ділянки.

1. Область малого коефіцієнта поглинання, коли  $\alpha d < 1$  і  $\alpha L < 1$ . В цьому випадку  $1 - e^{-\alpha d} \approx \alpha d$ , а  $e^{-\frac{d}{L}} \approx 0$ , оскільки d > L. Тому (1.31) набере вигляду:

$$\Delta P = \frac{\beta (1 - R_s)^2 I_0 \tau \alpha}{h \nu} \left( d - \frac{\alpha L^2 + s \tau}{L + s \tau} L \right) \approx$$
$$\approx \frac{\beta (1 - R_s)^2 I_0 \tau \alpha}{h \nu} \left( d - \frac{s \tau L}{L + s \tau} \right) \tag{1.32}$$



Рис. 1.14. Залежність фотоструму від довжини хвилі поглиненого світла за відсутності (1) і наявності (2) поверхневої рекомбінації[21]

З цього виразу виходить, що в області малого коефіцієнта поглинання фотопровідність лінійно росте зі збільшенням  $\alpha$ . При цьому, якщо  $s\tau \ll d$ , поверхнева рекомбінація слабо впливає на фотопровідність, а якщо ж  $s\tau \gg d$ , то фотопровідність буде менше (крива 2, рис. 1.14), ніж при s = 0(крива 1, рис. 1.14).

2. Область середніх значень коефіцієнта поглинання, коли  $\alpha d > 1$ , а  $\alpha L < 1$ . В цьому випадку

$$\Delta P = \frac{\beta (1 - R_s)^2 I_0 \tau \alpha}{h \nu} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{\alpha L^2 + s \tau}{L + s \tau} L \right) \approx$$
$$\approx \frac{\beta (1 - R_s)^2 I_0 \tau \alpha}{h \nu} \left( 1 - \frac{\alpha \tau L}{L + s \tau} \right) \tag{1.33}$$

Видно, що з подальшим зростанням коефіцієнта поглинання  $\alpha$  фотопровідність убуватиме (крива 2, рис. 1.14). У разі відсутності поверхневої рекомбінації (*s* = 0) фотопровідність прагне до насичення (крива 1, рис. 1.14).

Отже, наявність поверхневої рекомбінації призводить до появи максимуму на кривій спектральній залежності фотопровідності.

## 1.8. З'єднання А<sup>П</sup>В<sup>VI</sup>. Загальні властивості.

До групи алмазоподібних напівпровідникових з'єднань AIIBVI відносяться наступні з'єднання [6]: CdS, CdSe, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdTe, HgSe, HgTe. Міжатомні зв'язки здійснюються sp3 електронами, тобто, приймається, що зв'язки носять переважно ковалентний характер, хоча різниці електронегативностей атомів компонентів і доля іонної компоненти зв'язку мають великі значення. Перші чотири з'єднання кристалізуються переважно в гратах типу вюрциту, а інші в гратах типу сфалериту. У таблиці. 1.4 представлені експериментально визначені параметри грат, відстані між атомами A і найближчі відстані між різнорідними атомами A-B, визначені експериментально і розраховані згідно зі значеннями ковалентних радіусів [8].

З'єднання	a, A	d(A — B) (експеримент)	d(A — A)	d(A — B) ковалентні (розрахунок)
ZnS	5,4093	2,34	3,82	2,35
ZnSe	5,687	2,45	4,01	2,45
ZnTe	5,437	2,07	4,32	2,63
CdS	5,820	2,52	4,12	2,52
CdSe	6,05	2,62	4,28	2,02
CdTe	6,481	2,80	4,58	2,80
HgSe	0,084	2,63	4,30	2,62
НgТе	6,460	2,80	4,57	2,31

Табл 1.4. Експерименто визначені параметри грат[8]

Порівняння експериментально визначених міжатомних відстаней з розрахунковими, для яких використовувалися значення ковалентних радіусів тетраедрів, показує, що характер зв'язків в цих з'єднаннях переважно ковалентний (радіуси тетраедрів елементів; Zn 1,31; Cd 1,48; Hg 1,48; S 1,04; Se 1,14; Te 1,32).

Як і у разі з'єднань AIIIBV, при зміні середньої атомної ваги з'єднання спостерігаються закономірні зміни забороненої зони, температури плавлення і ряду інших параметрів. Збільшення іонної складової зв'язку (в порівнянні із з'єднаннями AIIIBV) проявляється в нижчих значеннях рухливостей. Структурно-чутливі властивості чистих і легованих з'єднань AIIBVI значною мірою визначаються природою і концентрацією точкових дефектів, що обумовлюють відхилення від стехіометрії.

Виміри провідності чистих з'єднань AIIBVI показують, що оксиди, сульфіди і селеніди цинку, кадмію і ртуті, за будь-яких умов виготовлення мають тільки електронну електропровідність. Серед телуридів телурид цинку завжди має діркову електропровідність, а телуриди кадмію і ртуті можуть бути отримані як n -, так і p- типу, залежно від умов виготовлення.

## Причини, що обумовлюють переважний прояв того або іншого типу електропровідності

Величина провідності усіх чистих з'єднань AIIBVI може бути значно змінена (на декілька порядків) шляхом термообробки монокристалів в парах компонентів. Це свідчить про те, що усі з'єднання AIIBVI є нестехіометричними, з досить широкою областю існування фази тетраедра [11].

Електропровідність чистих і легованих з'єднанні визначається трьома чинниками:

1) появою в гратах кристала донорних або акцепторних центрів;

2) іонізацією створених центрів;

3) рухливістю носіїв заряду.

Облік цих чинників потрібний, щоб знайти пояснення незмінності типу електропровідності в одних випадках і керованості типом і величиною прові-

дність в інших.

Абсолютно очевидно, що якщо в матеріал не вдається ввести акцепторні центри, а донорні центри легко утворюються, то матеріал буде п типу. Можливий також випадок, коли матеріал містить акцепторні центри, але їх енергія іонізації така велика, що акцепторні властивості не проявляються.

Стехіометричний склад може відповідати одній з меж області існування з'єднання. Тоді, очевидно, відхилення від стехіометрії може бути обумовлене виникненням точкових дефектів тільки одного типу з донорними або акцепторними властивостями.

Якщо ж відхилення від стехіометричного складу можливі в обидві сторони, то переважне виникнення дефектів з донорними або акцепторними властивостями визначатиметься величиною ентальпії утворення донорних і акцепторних центрів. Точкові дефекти, що обумовлюють відхилення від стехіометрії, виникають в результаті взаємодії кристала із зовнішнім середовищем. Ця взаємодія ефективна тільки при високих температурах, тобто, в умовах, коли усі створювані дефекти іонізовані.

Положення акцепторних або донорних рівнів в забороненій зоні напівпровідника залежить від величини діелектричної проникності матеріалу і ефективних мас носіїв. При збільшенні середньої атомної ваги з'єднання діелектрична проникність зростає, а ефективні маси носіїв убувають; внаслідок цього повинні убувати і енергії іонізації донорних і акцепторних центрів.

Вище викладене дозволяє дати пояснення переважному прояву електронної або діркової електропровідності у вивчених (дуже відносно) з'єднаннях CdS, CdSe i CdTe. У таблиці.1.5 приведені експериментально визначені значення енергій іонізації дефектів [8].

Таблиця 1.5 енергія іонізації дефектів[8]

Енергії іонізації дефектів, эв	CdS	CdSe	CdTe
$E_I$	2,57	1 ,84	1,5

$E_D$	0,05	0,03	0,02
$E_{AI}$	1	0,6	0,05
$E_{A2}$	2	1,5	0,9

З цих таблиць. 2 витікає, що при усіх температурах, починаючи з кімнатної, в усіх з'єднаннях донори будуть повністю іонізовані. Двократна іонізація акцепторів ні в одному випадку не може мати місця при температурі обробки кристалів близько 900°С. При цій же температурі в CdTe одноразова іонізація акцептора буде повною, в CdSe — частковою і в CdS буде відсутня. Тому CdS має бути п типу; CdTe може бути перетворений шляхом обробки в парах як в n , так і в р тип; отримання кристалів CdSe р типу може бути можливе при обробці під високим тиском і при високих температурах (більше 1000°С).

Вплив багатократної іонізації на умови внутрішньої рівноваги, очевидно, повинен позначитися і на можливості легування монокристалів з'єднань з відхиленнями від стехіометрії.

В умовах, коли тип електропровідності матеріалу визначається іонізованими точковими дефектами, і він має один тип електропровідності, його не вдається змінити шляхом легування домішками.

Згідно з викладеним хімічна чистота матеріалу є хоча і необхідною, але недостатньою умовою для отримання кристалів з певними властивостями [10]. Тому розробка технології вирощування монокристалів з'єднань AIIBVI ставить ряд нових завдань, найважливішим з яких є дослідження змін стану внутрішньою рівноваги в кристалах при зміні зовнішніх умов (температури і складу зовнішньої фази). Кінетика процесів, які відбуваються в кристалах, що містять значну кількість точкових дефектів, повинна значною мірою залежати від природи і концентрації усіх видів недосконалості в кристалі (наприклад, ентальпія утворення вакансії цього виду залежить від внутрішніх напрузі; швидкість встановлення рівноважної концентрації дефектів Шотки залежить від щільності дислокацій і т. д).

Цим дуже жорстким вимогам до точності управління технологічним процесом протистоять фізико-хімічні властивості елементів-компонентів і самих з'єднань. Усі елементи, з яких утворюються з'єднання АШВVI, характеризуються низькими температурами плавлення і високим тиском насиченої пари. Тиски пари компонентів над розплавами з'єднань складають від двох до декількох десятків атмосфер; температура плавлення більшості з'єднань перевищує 1200°С.

## Отримання напівпровідникових монокристалів з'єднань типу А<sup>П</sup>В<sup>VI</sup>

Розглянувши вище викладені методи можна додати, що не усі з'єднання типу AIIBVI можна отримати одним і тим же методом. Ось, приміром, синтез і вирощування монокристалів з розплавів практично можна реалізовати тільки для з'єднань CdTe i HgTe. Для усіх інших з'єднань високі тиски дисоціації розплавів і високі температури плавлення не дозволяють використати цей метод в контрольованих умовах, оскільки процеси кристалізації повинні вестися в запаяних контейнерах, здатних витримувати високу температуру і високі тиски. Нині відоме тільки кварцове скло, яке починає розм'якшуватися вже при 1200°C.

Можливості вирощування кристалів з розчинів-розплавів також обмежені для більшості систем, тому що розчинність найбільш леткого компонента в розплаві другого компонента при температурах, прийнятних для проведення процесу, занадто малі. Метод вирощування кристалів з розчиніврозплавів може бути застосований тільки для CdTe, ZnTe i ZnSe.

При проведенні процесів синтезу з'єднанні АПВVI шляхом сплавлення компонентів слід враховувати дуже великі значення їх теплоти утворення. При швидкому нагріві суміші розплавлених компонентів виділяється така велика кількість тепла, що відбувається різке підвищення температури розплаву, що ще не повністю прореагував, і викликає різке підвищення тиску пари вільних компонентів та може привести до розриву ампули. Тому процеси синтезу сплавом потрібно вести при дуже повільному підвищенні температури.

Для синтезу сульфідів може бути використана хімічна технологія їх осадження з водних розчинів, яка була розроблена для отримання порошків люмінофорів.

Найбільш раціональним методом синтезу з'єднанні AIIBVI являється, мабуть, метод синтезу з парів компонентів, оскільки процес може проводитися при низьких температурах, при яких склад кристалів, що утворюються, безпосередньо задається складом парової фази, тиск якої дорівнює атмосферному. Чистота матеріалу визначається в цьому випадку чистотою початкових компонентів. Температури випару компонентів при проведенні процесів синтезу невеликі (300-800°С), а тому немає проблеми виготовлення особливих контейнерів. При синтезі сульфідів і селенідів можна використати замість елементарних сірки і селену їх леткі гідриди IbS і HgSe, які при температурі синтезу (900-1100°С) дисоціюють на елементи.

### Технологія синтезу і Методи отримання плівок ZnTe

Телурид цинку — бінарне з'єднання цинку і телуру з хімічною формулою ZnTe. Цинкова сіль телуроводневої кислоти. За нормальних умов є твердою речовиною. Напівпровідник, зазвичай з дірковим типом провідності і шириною забороненої зони 2,23-2,25 eB.

Може бути отриманий різними способами:

1)синтезом з елементів. Робиться тривалим нагріванням суміші порошків Zn і Te в запаяній кварцовій ампулі:

 $Zn + Te \rightarrow ZnTe$ 

2)взаємодією розчинної солі цинку у водному розчині з телуроводнем:

 $ZnCl_2 + H_2Te \rightarrow ZnTe \downarrow + 2HCl$ 

3)обмінною реакцією розчинного телуриду з розчинною сіллю цинку :

$$Zn(NO_3)_2 + K_2Te \rightarrow ZnTe \downarrow +2KNO_3$$

4) електролітичним методом, при цьому анод — цинковий і катод — телуровий, в розчині кислоти, наприклад, сірної.

Епітаксійні плівки ZnTe можна отримувати різними способами [7]:

1) методом близького перенесення;

2)методом вплавлення;

3)нанесенням плівок конденсацією у вакуумі;

4)хімічним осадженням плівок;

5)рідкофазовою епітаксією.

Використання методу нанесення плівок конденсацією у вакуумі дозволяє отримувати плівки завтовшки від декількох сотень ангстрема до декількох десятків мікрон, зважаючи на що можливо отримувати однорідний і максимально чистий матеріал, легко контролювати умови зростання плівок, а також у разі потреби отримання плівок заданої конфігурації можливе застосування масок.

У цьому методі можна виділити наступні способи випару початкових матеріалів :

1) катодне розпилення;

2) вибухове випаровування;

3) випаровування в квазізамкнутому об'ємі;

4) термічне відкрите випаровування;

5) випаровування електронним променем.

Метод катодного розпилення на відміну від попереднього дозволяє отримувати більш високі швидкості випаровуваний часток, 95% яких електрично нейтральні. Проте недоліком є наявність значного залишкового тиску газу ( $10^{-1} - 10^{-3}$  мм. рт.ст.), що перешкоджає зростанню чистих і високо орієнтованих шарів [7].

Метод вибухового (дискретного) випаровування полягає в тому, що маленькі частинки (~200 мкм) матеріалу подаються невеликими порціями на випарник, нагрітий до температури 1200 - 1800°С. Оскільки частки випаровуються до того, як вони прийдуть в контакт з випарником, розкладання початкової речовини зводиться до мінімуму, а зростаючі плівки мають склад близький до складу початкового порошку. А також шляхом безперервного подання матеріалу можна отримувати бажану товщину шару. Недоліком цьо-

го методу є необхідність отримання початкових матеріалів у вигляді дрібнодисперсних порошків.

У роботі отримували полікристалічні шари ZnTe методом вільного росту з парової фази при температурі ~ 600°С в динамічному вакуумі. Як початкова шихта використовувався очищений ZnTe, приведений до вмісту з мінімально можливим відхиленням від стехіометрії.

Випаровування в квазізамкнутому об'ємі (КО). Суть методу КО полягає в тому, що випар відбувається в закритих тиглях, де проміжок між поверхнею випару і підкладкою настільки малий, що дозволяє отримати мінімальний перепад температур між температурою випарника (ТВ) і температурою підкладки (ТП).

Найбільш поширеним методом отримання плівок  $A^{II}B^{VI} \in$  **термічне ві**дкрите випаровування матеріалу у вакуумі близько  $10^{-5} - 10^{-7}$  мм. рт. ст., передбачає нагрів матеріалу до температури, при якій відбувається випаровування, спрямований рух пари цього матеріалу і його конденсація на поверхні підкладки.

Метод випаровування електронним променем полягає в тому, що при надвисокому вакуумі як випарник використовується електронний промінь, сфокусований безпосередньо на матеріалі, що випаровується. За таких умов впродовж усього процесу вирощування плівки підтримується висока ступінь чистоти поверхні підкладки, і практично виключається забруднення матеріалу, можливе при використанні термічних випарників.

Якість отримуваних плівок в КО, а саме хімічний склад, ступінь досконалості структури, електричні і оптичні властивості визначаються механізмом і кінетикою випаровування початкового матеріалу, відмінністю тиску пари компонентів, процесами і умовами конденсації на підкладці. Суцільність шарів залежить від особливості конструкції випарників. Для відвертання попадання в парову фазу твердих часток випаровуваних матеріалів і попадання їх на підкладку приймають додаткові заходи, у випарник над порошком початкового матеріалу розміщують крупний кварцовий пісок або відрізки кварцових трубочок. Метод КО має простоту технічного виконання і високу технологічність. Конструктивним втіленням цього методу є роз'ємна камера, що нагрівається, і містить випаровувану речовину і підкладки (слюда, сапфір, скло). Камера розміщується в робочому об'єм установки і вакуумується спільно з ним. У такому не повністю ізольованому об'ємі камери мала зміна щільності пари внаслідок його витоку в зовнішній простір. За допомогою системи підігрівання в такій камері легко створити умови конденсації, близькі до рівноважних. Основні переваги цього методу полягають в наступному:

1. Він дозволяє проводити напилення в умовах незначного пересичення пари в зоні конденсат-підкладка при сильній обмінній взаємодії в цій зоні.

2. Малий об'єм камери при високих швидкостях випаровування забезпечує високу щільність пари і дифузійний характер доставки матеріалу до підкладки. Внаслідок цього збільшується вірогідність утворення молекул з'єднання в парі, а також збільшується середній час міграції молекул по підкладці.

 Закрита камера обмежує вихід компонент з'єднання із зони термодинамічного процесу, тому склад пари більше стехіометричний і знижуються непродуктивні втрати.

Високі температури підкладки і обмінна взаємодія забезпечують хороші умови для протікання на підкладці реакції з утворенням молекул початкового з'єднання.

## 1.9 Основні параметри кристалу CdS шляхи його застосування

Сульфід кадмію				
загальні				
Хімічна назва	Сульфід кадмію			
Хім. формула	CdS			
Фізичні властивості				
Стан	Кристалічна			
Молярна маса	144,46 г/моль			
Густина	4,82 г/см <sup>3</sup>			
Термічні властивості				
Т. плав.	1748°С (гексог.)			
Т. субл.	980C			
Ентальпія утворення	—144 кДж/моль			
Хімічні властивості				
Розчинність	нерозчинний			
Структура				
Кристалічна структура	цинкова обманка			
	а = 0.58320 нм;			
	вюрцита			
	a = 0.41348 нм, c = 0.6749 нм;			

Таблиця 1.5 Фізичні параметри[17]

58

3

асто-

#### сування

- Оптоелектроніка та люмінесценція

Сульфід кадмію є ширококутного напівпровідник із шириною забороненої зони 2,42 еВ при 300 К. Це властивість CdS використовується в оптоелектроніці, як в фотоприймача, так і в сонячних батареях. Сульфід кадмію використовують для виготовлення фоторезисторів (приладів, електричний опір яких змінюється в залежності від освітленості). Сульфід кадмію застосовується в якості люмінофора (також в суміші з сульфідом цинку та іншими домішками).

- Реєстрація елементарних частинок

З монокристалів сульфіду кадмію виготовляють сцинтилятори для реєстрації елементарних частинок і гамма-випромінювання.

- Лазерна техніка

Монокристали сульфіду кадмію можуть використовуватися в якості робочого тіла твердотільних лазерів.

Пьезо- і піроелектрика

Обидві кристалічні модифікації CdS (кубічна і гексагональна) виявляють п'єзоелектричні властивості, а гексагональна, крім того, - піроелектричні.

#### Висновки

- На даний час існує декілька типів мультиплексорів, принципи роботи яких було розглянуто вище. До їх недоліків можна віднести невелику кількість каналів, що не може задовольняти подальший розвиток електроніки при стрімкій її мініатюризації та збільшення швидкодії.
- Аналогом до мультиплексора на ПАХ являється, оптичний в якому відбувається усчільнення сигналу по частотам. Недоліком його є неможливість зміни спектру вхідних каналів, порівняно з досліджуваним

- 3. Для кожного фотоматеріала слід підбирати опромінювач певної довжини хвилі – спектру, щоб отримувати найбільшу провідність.
- 4. Перспективним представляється використання мультиплексорів на кристалі CdS, в якого канали передачі даних будуть визначатись світлодіодною матрицею, що буде формувати на кристалі доріжки провідності за рахунок внутрішнього фотоефекту. Слід зазначити також, що для отримання найбільш чистогоматеріалу, даного кристалу слід використовувати газову фазу.

# 2. ПРИНЦИП РОБОТИ МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ

#### 2.1. Мультиплексор на ПАХ[18]

Корисна модель відноситься до галузі електронних пристроїв, зокрема до пристроїв з оптоелектронним керуванням, фотопровідністю в п'єзофотоматеріалах.

Відомий мультиплексор на основі поверхневих акустичних хвиль (ПАХ)[17], який містить розташовані на поверхні п'єзопластини кілька вхідних частотно-селективних зустрічно-штирьових перетворювачів (ЗШП) та один широкосмуговий вихідний ЗШП.

Недоліком прототипу є те, що будучи один раз технологічно виготовленими вхідні ЗШП ефективно здатні приймати сигнали лише однієї частоти, яка визначається умовою акустичного синхронізму (h= $\lambda$ , де h – відстань між штирями однієї фази ЗШП (крок ЗШП),  $\lambda$  – довжина поверхневої акустичної хвилі).

Найбільш близьким до корисної моделі є мультиплексор, що містить кілька вхідних ЗШП з різними кроками ЗШП, що обумовлює їх роботу на певних частотах, що визначаються кроком ЗШП. Вихідний ЗШП охоплює всі акустичні канали, в яких передаються сигнали від різних вхідних ЗШП, і є широкосмуговим, що забезпечує прийом і подальшу передачу електричних сигналів від всіх вхідних каналів мультиплексора.

Недоліком найближчого аналога є те, що він не дозволяє в процесі експлуатації змінювати частоти вхідних сигналів різних вхідних каналів, що обумовлюється незмінністю кроків виготовлених в процесі виробництва вхідних ЗШП. Це обмежує можливість переналагодження мультиплексора на роботу з іншими частотами вхідних сигналів в процесі експлуатації.

В основу корисної моделі поставлена задача переналагодження мультиплексора на роботу з різними за частотами вхідними сигналами, які за певною закономірністю можуть змінюватись на різних вхідних каналах, що дозволяє додатково підвищити захищеність інформації від несанкціонованого доступу.

Поставлена задача вирішується тим, що мультиплексом на основі динамічних неоднорідностей містить підкладку з п'єзо-фотоматеріалу, на якій розміщений виготовлений технологічно вихідний ЗШП, який охоплює всі акустичні канали від всіх вхідних ЗШП та по дві для кожного вхідного каналу металізовані смужки – спільні шини. Також, згідно з корисною моделлю, мультиплексор містить синхронізатор-мікроконтролер, підключений через шину керування до світлодіодної матриці, яка розміщена над підкладкою з п'єзо-фотоматеріалу та накопичувач вхідних сигналів, поєднаний з синхронізатором-мікроконтролером та спільними шинами різних вхідних каналів.

Технічний результат полягає у забезпеченні можливості передачі через вхідні канали різних за частотою сигналів, які (частоти) до того ж можуть змінюватись за заданою закономірністю, що обумовлює вищу захищеність від несанкціонованого доступу.

Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей містить підкладку з п'єзо-фотоматеріалу 1, на її поверхні розміщений вихідний широкосмуговий ЗШП 2 та спільні шини для різних вхідних каналів 3', 3", ... 3<sup>n</sup> до яких приєднаний накопичувач сигналів 4, що в свою чергу шиною 5 пов'язаний з синхронізатором-мікроконтролером 6. Над п'єзо-фотопровідною підкладкою 1 на відстані 0,001-1мм розташована світлодіодна матриця 7, що керується через шину керування 8 синхронізатором-мікроконтролером 6. Світлове випромінювання 9 з пікселей 10 світлодіодної матриці 7 формую в приповерхневому шарі підкладки з п'єзо-фотопровідного матеріалу 1 квазіметалізовані електроди –штирі 11, які спільно зі спільними шинами 3', 3", ... 3<sup>n</sup> формують вхідні ЗШП для різних вхідних каналів.

Мультиплексом на основі динамічних неоднорідностей працює наступним чином.

У синхронізаторі-мікроконтролері 6 закладені алгоритми, згідно з якими при надходженні на різні входи різних за частотою сигналів через шину керування 8 синхронізатор-мікроконтролер передає керуючі сигнали на світлодіодну матрицю 7 для формування необхідних світлових плям 11 у вигляді штирів-електродів ЗШП на поверхні підкладки з п'єзо-фотоматеріалу 1 синхронно керуючи через шину 5 подачею вхідних сигналів різних частот з накопичувача сигналів 4 на спільні шини 3', 3", ... 3<sup>n</sup> різних вхідних каналів. Причому, в залежності від частоти сигналу (довжини хвилі) даного каналу синхронізатор-мікроконтролер 6, керуючи світлодіодною матрицею 7, формую за рахунок світлового опромінення з неї між спільними шинами кожного з каналів квазіметалізовані штирі-електроди з виконанням умови акустичного синхронізму h= $\lambda$  (де h – крок між штирями-електродами однієї фази, а  $\lambda$  – довжина поверхневої акустичної хвилі, що генерується вхідним сигналом даної частоти). При одночасному формуванні між спільними шинами кожного з каналів квазіметалізованих штирів-електродів та надходженні вхідних сигналів відповідних частот за рахунок зворотнього п'єзоефекту в акустичних каналах кожного вхідного каналу формується поверхнева акустична хвиля з відповідною довжиною хвилі, яка розповсюджуючись в приповерхневому шарі підкладки з п'єзо-фотоматеріалу 1 досягає широкосмугового вихідного ЗШП 2 і за рахунок прямого п'єзоефекту формує в ньому вихідний електричний сигнал, який передається в канал зв'язку.



Рис. 2.1 Макет мультиплексора ПАХ .

### 2.2. Мультиплексор розподілу сигналу в часі

Корисна модель відноситься до галузі електронних пристроїв, зокрема до пристроїв з оптоелектронним керуванням, з фотопровідністю фотоматеріалах.

Конструктивно мультиплексор схожий до попереднього, що описаний в пункті 2.1. Відмінним є те, що створюється технологічним методом металізовані доріжки 2 на кожному вході та на виході між якими будуть протікати сигнали розподілені в часі. Світлодіодна матриця буде формувати на фотоматеріалі квазіметалізовані доріжки 1, з заданим алгоритмом роботи на синхронізаторі-мікроконтролері, що будуть з'єднувати вхідний і вихідний електрод, для передачі сигналів розподілених в часі.



Рис. 2.2 Мультиплексор розподілу сигналу в часі

# 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПРОВІД-НОСТІ КРИСТАЛУ CdS

Мультиплексор основі динамічних неоднорідностей повинен складатись з кристалу CdS, яких буде опромінюватись в певних місцях фотодіодною матрицею, де за рахунок внутрішнього фотоефекту, будуть утворюватися канали провідності. Для перевірки даного твердження розроблено та створено експериментальну установку.

Установка (рис. 3.1) складалась з генератора Г5-54, осцилографа С1-67, напівпровідникового зеленого лазера потужність 5 мВт та довжиною хвилі 532 нм, та самого кристалу CdS 3x3 мм<sup>2</sup>. Осцилограми знімались з резистору 10 кОм.

На кристалі було реалізовано канал провідності між контактами, що припаювались за допомогою Індію, який має великий рівень адгезії до CdS та низьку температуру плавлення.

Оскільки деталі мали дрібний розмір (кристал 3х3 мм<sup>2</sup>), в процесі пайки було використано мікроскоп. Нажаль більшу кількість каналів створити не вдалося внаслідок відсутності спеціалізованого технологічного обладнання.

Виконання: послідовно з'єднується резистор на 10 кОм, кристал, генератор та паралельно до резистора підключається осцилограф.

На генераторі виставляється подачу одиничних імпульсів з частотою 100 кГц, з затримкою сигналу 7,8 мкс, тривалістю імпульсу 6,15 мкс амплітудою 2 В. На осцилографі виставлено 1 мкс/діл та 0,5 В/діл. В результаті спостерігаємо осцилограму рис. 3.2.

Як бачимо кристал виконує роль диференціатора, тобто є наявність ємності і еквівалентна схема буде мати вигляд рис. 3.3.



Рис. 3.1 Блок схема експериментальної установки



Рис. 3.2 Осцилограма без ввімкненого лазеру



Рис. 3.3 Еквівалентна схема диференціатора виконаного на полікристаліч-

ному CdS/CdTe

Розглянемо випадок з ввімкненим лазером, що опромінює проміжо між припаяними дротами, щоб утворився квазіпровідний шар.При зміні кута падіння променю лазера змінюються параметри перехідного процесу (рис. 3.4).



Рис. 3.4 Осцилограма вихідного сигналу при освітленні CdS.

Як бачимо на рис. 3.4 перехідні процеси, на передньому та задньому фронтах, демонструють перехідні процеси в кристалі CdS спричинені часом генерації та рекомбінації носіїв зарядів. Форма еквівалентної електричної схеми матиме вигляд рис. 3.5.



Рис. 3.5 Еквівалентна електрична схема схема інтегратора виконаного

### на кристалі CdS

Можна вирахувати значення ємності через час перехідного процесу: t=500нс

R=500 кОм – опір при вимкненому генераторі τ=t/3=500/3=167 нс C= τ/R=0,334 пФ

### Висновок

Порівнюючи осцилограми до опромінювання лазером та після, можна зробити висновок, що при опроміненні канал зменшує свій опір на 4 порядки з  $10^8$  Ом/м до  $10^4$  Ом/м. При цьому спостерігається зміна функції з диференцюючої на інтегруючу, що може бути пояснено фотоємнісним ефектом в кристалах CdS/CdTe.

Окрім того з осцилограм видно, що кристал можна використовувати у якості диференціатора чи інтегратора, параметрами якого можна керувати за допомогою зміни параметрів освітлення.

# 4. РОЗРАХУНОК МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Для традиційного ЗШП доріжки утворюють за допомогою металізації. В нашому випадку створення доріжок відбувається за рахунок освітлення кристалу CdS, де створюються динамічні неоднорідності під впливом внутрішнього фотоефекту, утворюючи різну провідністю в приповерхневому шарі.

Таким чином розрахунки традиційного ЗШП справедливі і в нашому випадку, тільки замість розташування металізації потрібно реалізувати відповідне світіння діодів світлодіодної матриці.

Розрахуємо геометричні параметри поверхні, що буде піддана освітленню, тобто параметри світлового ЗШП і на основі них буде зпроектовано мультиплексор на ПАХ що матиме 4 вхідних канала і 1 вихідний.



Рис.5.1 Лінія затримки на ПАХ

- 1. Пластина п'єзоматеріалу
- 2. Вхідний зустрічний штировий перетворювач (ЗШП)
- 3. Вихідний ЗШП
- 4. Пара протифазних штирів та електродів
- 5. Поверхнева акустична хвиля (ПАХ) з довжиною  $\lambda$
- 6. Спільна лінія, яка об'єднує електроди однієї фази

- 7. Пластина п'єзоматеріалу
- 8. Вхідний зустрічний штирьовий перетворювач (ЗШП)
- 9. Вихідний ЗШП
- 10. Пара протифазних штирів та електродів
- 11. Поверхнева акустична хвиля (ПАХ) з довжиною  $\lambda$
- 12. Спільна лінія, яка об'єднує електроди однієї фази

Умовні позначення:

- L відстань між вхідним та вихідним ЗШП
- h відстань між штирями однієї фази.
- h`- відстань між протифазними штирями.
- d ширина електроду.
- W апертура ЗШП ступінь перекриття електродів
- N число штирів ЗШП

### Розрахунок

Розрахувати мультиплексор на поверхневих акустичних хвилях, матиме наступні параметри:

Вихідний ЗШП

Центральна частота $f_0 = 10 \ {\rm M} {\Gamma} {\tt ц}$ Смуга пропускання $\Delta f = 2.8 \ {\rm M} {\Gamma} {\tt ц}$ 

1. Визначимо число штирів ЗШП:

$$N = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{f_0}{\Delta f} = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{10 \cdot 10^6}{2.8 \cdot 10^6} = 5$$

2. Визначимо швидкість розповсюдження акустичної хвилі : Для CdS вона становить

$$v_a = 1.7 \ \kappa m/c$$

3. Визначимо відстань між протифазними штирями h`:

$$h = \frac{v_a}{2 \cdot f_0} = \frac{1700}{2 \cdot 10 \cdot 10^6} = 85$$
мкм

4. Визначимо відстань між синфазними штирями h:

$$h = 2h$$
`  $= 85 \cdot 2 = 170$ мкм

5. Розрахуємо ширину штиря:

$$d = 0.5 \cdot h^{`} = 85 \cdot 0.5 = 42.5$$
 мкм

6. Розрахуємо ширину штиря:

$$\lambda=h=170$$
 мкм

Чис-	Швидкість	Відстань	Відстань	Шири-	Дов-
ло	розповсю-	між про-	між синфа-	на	жи-на
шти-	дження	тифаз-	зними шти-	штиря	хвилі
рів	<i>v</i> <sub>a</sub> , км/с	ними шти <b>-</b>	рями h, мкм	d, мкм	λ,
3ШП,		рями h`,			МКМ
Ν		МКМ			
5	1,7	85	170	42,5	170

Табл. 5.1. Параметри вихідного ЗШП

Вхідний ЗШП №1:

Центральна частота	$f_0 = 9 \ \mathrm{M}\Gamma$ ц
Смуга пропускання	$\Delta f=0.7~{ m M}$ Гц

1. Визначимо число штирів ЗШП:

$$N = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{f_0}{\Delta f} = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{9 \cdot 10^6}{0.7 \cdot 10^6} = 18$$

2. Визначимо швидкість розповсюдження акустичної хвилі : Для CdS вона становить

$$v_a = 1.7 \ \kappa m/c$$
$$h = \frac{v_a}{2 \cdot f_0} = \frac{1700}{2 \cdot 9 \cdot 10^6} = 94$$
 MKM

4. Визначимо відстань між синфазними штирями h:

h = 2h` = 94 · 2 = 188 мкм

5. Розрахуємо ширину штиря:

$$d = 0.5 \cdot h` = 85 \cdot 0.5 = 47$$
 мкм

6. Розрахуємо довжина акустичної хвилі:

Чис-	Швидкість	Відстань	Відстань	Шири-	Дов-
ло	розповсю-	між про-	між синфа-	на	жи-на
шти-	дження	тифаз-	зними шти-	штиря	хвилі
рів	$v_{\rm a}$ , км/с	ними шти-	рями h, мкм	d, мкм	λ,
3ШП,		рями h`,			МКМ
Ν		МКМ			
18	1,7	94	188	47	188

Табл. 5.2. Параметри вхідного ЗШП №1

Вхідний ЗШП №2:

Центральна частота	$f_0 = 9.7 \; { m M}{ m \Gamma}$ ц
Смуга пропускання	$\Delta f = 0.7$ МГц

1. Визначимо число штирів ЗШП:

$$N = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{f_0}{\Delta f} = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{9.7 \cdot 10^6}{0.7 \cdot 10^6} = 20$$

2. Визначимо швидкість розповсюдження акустичної хвилі : Для CdS вона становить

$$v_a = 1.7 \ \kappa m/c$$

$$h^{\sim} = \frac{v_a}{2 \cdot f_0} = \frac{1700}{2 \cdot 9.7 \cdot 10^6} = 87$$
 MKM

4. Визначимо відстань між синфазними штирями h:

$$h = 2h$$
`  $= 87 \cdot 2 = 174$  мкм

5. Розрахуємо ширину штиря:

$$d = 0.5 \cdot h` = 87 \cdot 0.5 = 43.5$$
 мкм

6. Розрахуємо довжина акустичної хвилі:

$$\lambda = h = 174$$
 мкм

Чис-	Швидкість	Відстань	Відстань	Шири-	Дов-
ло	розповсю-	між про-	між синфа-	на	жи-на
шти-	дження	тифаз-	зними шти-	штиря	хвилі
рів	$v_{a}$ , км/с	ними шти-	рями h, мкм	d, мкм	λ,
3ШП,		рями h`,			МКМ
Ν		МКМ			
20	1,7	87	174	43,5	174

Табл. 5.3. Параметри вхідного ЗШП №2

Вхідний ЗШП №3:

Центральна частота	$f_0 = 10.4$ МГц
Смуга пропускання	$\Delta f = 0.6$ МГц

1. Визначимо число штирів ЗШП:

$$N = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{f_0}{\Delta f} = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{10.4 \cdot 10^6}{0.6 \cdot 10^6} = 25$$

2. Визначимо швидкість розповсюдження акустичної хвилі : Для CdS вона становить

$$v_a = 1.7 \ \kappa m/c$$

$$h^{\sim} = \frac{v_a}{2 \cdot f_0} = \frac{1700}{2 \cdot 10.4 \cdot 10^6} = 81.7 \text{ MKM}$$

4. Визначимо відстань між синфазними штирями h:

h = 2h` = 81.7 · 2 = 163 мкм

5. Розрахуємо ширину штиря:

$$d = 0.5 \cdot h^{`} = 81.7 \cdot 0.5 = 40.8$$
 мкм

- 6. Розрахуємо довжина акустичної хвилі:
  - $\lambda = h = 163$  мкм

Чис-	Швидкість	Відстань	Відстань	Шири-	Дов-
ло	розповсю-	між про-	між синфа-	на	жи-на
шти-	дження	тифаз-	зними шти-	штиря	хвилі
рів	$v_{a}$ , км/с	ними шти-	рями h, мкм	d, мкм	λ,
3ШП,		рями h`,			МКМ
Ν		МКМ			
25	1,7	81.7	163	40.8	163

Табл. 5.4. Параметри вхідного ЗШП №3

Вхідний ЗШП №4:

Центральна частота	$f_0 = 11.1 \; { m M}{ m \Gamma}$ ц
Смуга пропускання	$\Delta f = 0.5$ МГц

1. Визначимо число штирів ЗШП:

$$N = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{f_0}{\Delta f} = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{11.1 \cdot 10^6}{0.5 \cdot 10^6} = 31$$

2. Визначимо швидкість розповсюдження акустичної хвилі : Для CdS вона становить

$$v_a = 1.7 \ \kappa m/c$$

$$h^{\sim} = \frac{v_a}{2 \cdot f_0} = \frac{1700}{2 \cdot 11.1 \cdot 10^6} = 76.5 \text{ MKM}$$

4. Визначимо відстань між синфазними штирями h:

 $h = 2h` = 76.5 \cdot 2 = 153$  мкм

5. Розрахуємо ширину штиря:

$$d = 0.5 \cdot h^{`} = 76.5 \cdot 0.5 = 38$$
 мкм

6. Розрахуємо ширину штиря:

$$\lambda = h = 153$$
 мкм

Чис-	Швидкість	Відстань	Відстань	Шири-	Дов-
ло	розповсю-	між про-	між синфа-	на	жи-на
шти-	дження	тифаз-	зними шти-	штиря	хвилі
рів	$v_{\rm a}$ , км/с	ними шти-	рями h, мкм	d, мкм	λ,
3ШП,		рями h`,			МКМ
Ν		МКМ			
31	1,7	76.5	153	38	153

Табл. 5.5. Параметри вхідного ЗШП №4







Рис. 5.2 Розрахований мультиплексор на ПАХ для CdS

#### Висновки

Розраховано і побудовано креслення для мультиплексора на ПАХ для кристала CdS з часом затримки 0,1 мкс, робочою частотою 10 МГц і смугою попускання 2,8 МГц для вихідного ЗШП і вхідни з центральними частотами 9МГц, 9.7МГц, 10.4МГц, 11.1МГц і смугою пропускання 0.7 МГц, 0.7 МГц, 0.6МГц і 0.5 МГц.

Слід зазначити також, що:

1. Щоб дифракційними шумами можна було жнехтувати апертура зустрічно штиревого перетворювача повина бути більшею за

$$W \ge \sqrt{L \cdot \lambda}$$

Де L – довжина хвилевода, а  $\lambda$  – довжина акустичної хвилі

- 2. Центральна частота повинна бути більшою за смугу пропускання
- 3. Смуги пропускання вхіжних ЗШП повинні потрапляти в смугу пропускання вихідного.
- 4. При вузькій смузі пропускання буде значно бульше число штирів чим при широкій.

# 5. РОЗРАХУНОК МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Розрахунок шумів:

Тепловий шум:

$$P_{\text{THI}} = 4kT_e\Delta f \tag{6.1}$$

 $P_{TIII} = 4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 25 \cdot 10^{6} = 4.14 \cdot 10^{-13} BT$  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} BT/(K \cdot \Gamma \mu) - стала Больцмана$  $T_e = 300K - температура роботи мультиплексора$  $\Delta f = 25M\Gamma \mu - смуга пропускання$ Дробовий шум:

$$P_{\rm A}p = 2qI_0R\Delta f \tag{6.2}$$

 $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд електрона  $I_0 = 0,1$  мкА – середнє значення струму R = 500кОм – опір кристалу Pдр =  $2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^6 = 8 \cdot 10^{-13}$  Вт Потужність шумів: Pш= $P_{TШ} + P$ др= $12 \cdot 10^{-13}$  Вт Потужність сигналу:

$$Pc = \frac{U_{\rm M} \cdot I_{\rm M}}{2} \tag{6.3}$$

Им – амплітуда напруги

Ім - амплітуда напруги

$$Pc = \frac{1,8B \cdot 0,2MKA}{2} = 1,8 \cdot 10^{-7}BT$$

Відношення Сигнал /шум:

$$C/III=20lg(Pc/PIII)$$
(6.4)

Пропускна здатність каналу зв'язку, формула Шенона:

$$C = \Delta f \cdot \lg \left(\frac{P_{C}}{P_{III}} + 1\right)$$
(6.5)

 $C = 25 \cdot 10^{6} \cdot \log_2 \left( \frac{1.8 \cdot 10^{-7}}{12 \cdot 10^{-13}} + 1 \right) = 4.3 \cdot 10^{8} \text{ foit/c}$ 

### Висновки

- 1. Теоретично розраховано відношення Сигнал/Шум 103,522 дБ, сигнали передаються без значних спотворень шумом.
- 2. Пропускна здатність каналу досягає 0,4 Гбіт/с, що є досить високою.

#### ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел засвідчує, що створення мультиплексорів з можливістю гнучкої зміни частот по кожному з вхідних каналів є актуальною проблемою. Це особливо важливо для сучасних систем захисту інформації.

2. В магістерській дисертації запропоновано оригінальний метод створення мультиплексорів з використанням динамічних неоднорідностей при формуванні квазіметалізованих штирів електродів ЗШП в кожному з каналів.

3. Розроблено конструкція та виконані розрахунки мультиплексора на основі динамічних неоднорідностей.

4. При виконанні магістерської дисертації отримано патент, який підтверджує новизну технічних рішень.

5. Результати досліджень опубліковано в матеріалах ISSE в 2017 році.

6. Результати окремих експериментальних досліджень підтверджують можливість створення квазіметалізованих доріжок.

7. Мультиплексор на динамічних неоднорідностях на ПАХ має такі переваги над аналогічними мультиплексорами на ЗШП:

 дозволяє в процесі експлуатації змінювати частоти вхідних сигналів різних вхідних каналів, що обумовлюється незмінністю кроків виготовлених в процесі виробництва вхідних ЗШП.

 зміна форми зустрічно штиревого перетворювача, конфігурації типів штирів, у відповідності до типів сигналів – що в свою чергу підвищує ефективність роботи.

8. Мультиплексор розподілу сигналу в часі має таку перевагу:

 має високу роздільну здатність виводів, що обумовлюється роздільною здатністю лазерної матриці, розмір одного пікселя досягає порядку 0.1 мкм.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. http://vozom.ho.ua/R4/page55.html «Склад мультиплексорів в серіях IMC - Курс електроніки. Лекці» 1.05.2016, 13:00

Речицкий, В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах / В. И. Речицкий. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.

 Соловьянова, И. П. Теория волновых процессов: акустические волны: учебной пособие / И. П. Соловьянова, С. Н. Шабунин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 142 с.

 Чернышова, Т.И. Проектирование фильтров на поверхностноакустических волнах : учебно-методическое пособие / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2008. – 48 с.

Орлов, В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах /В.
 С. Орлов, В. С. Бондаренко. – М. : Радио и связь, 1984. – 272 с.

 Речицкий, В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты /В. И. Речицкий. – М. : Радио и связь, 1987. – 192 с.

7. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчёт, техноло-гия и применение: перевод с англ. / под редакцией Г. Метьюза. – М. :

 Радио и связь, 1981. – 471 с.6. Речицкий, В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах / В. И. Речицкий. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.

Расчёт и конструирование АПВ-фильтров / Н. С. Пащин, М. М.
 Рубанович, А. В. Ковалёв и др.; под редакцией И. Б. Яковкина. –Новосибирск
 : Наука, Сибир. отд., 1982. – 176 с.

 Поверхностные акустические волны: перевод с англ. / под редакци-ей А. Олинера. – М. ; Мир, 1981. – 390 с.

11. Красько А.С. "Проектирование усилительных устройств" 2000 г.

12. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Под редакцией Перельмана Б.Л., М, «Радио и связь» 1982 г. Шарыгина Л.И. "Сборник задач по усилительным устройствам"
 2000 г.

14. Фреїк, Д. М., Чобанюк, В. М., Криницький, О. С., & Горічок, І. В. (2012). Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання на основі кадмій телуриду ІІ. Основні досягнення і сучасний стан. Фізика і хімія твердого тіла, 744–758.

15. Речицкий В. И. Радиокомпоненти на ПАВ // Издательство: Радио И Связь, 1984.

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D1%83
 %D1%80%D0%B8%D0%B4\_%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%BC%D1%96
 %D1%8E#cite\_note-1 Кадмій телурію 05.05.2016 13:00

17. Yaroslav Sydorenko, Ostap Oliinyk, Borys Tsyganok «A multiplexor based on dynamic heterogeneities» ISSE 2017 – Sofia, Bulgaria, 40-41p.

18. Патент, Б.А. Циганок, О.О. Олійник, Я.С. Сидоренко «Мультиплексор на основі динамічних неоднорідностей», Київ, 2017р

Георгобиани А.Н. Широкозонные полупроводники А II В VI и перспективы их применения //Успехи физических наук. – 1974. – Том 113. – Вып. 1. – С. 129–152.

20. Сенокосов Э. А. Получение и физические процессы в монокристаллических слоях и плёночных гетеропереходах соединений А II В VI на сапфире. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико- математических наук. – Кишинёв, 1989. – С.18–23.

21. К.В.Шалимова. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. М.: Энергоатомиздат, 1985. — 392 с.

22. Калинкин И. П., Алесковский В. Б., Симашкевич А. В. Эпитаксиальные пленки соединений А II В VI. – Ленинград: ЛГУ. – 1978.