

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

До захисту допущено
Завідувачка кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2021 р.

Дипломний проєкт

на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Спеціальність 171 Електроніка
(код та назва спеціальності)

Освітня програма Електронні прилади та пристрої

на тему: Дистанційний вимірювач рівня освітленості

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ДЕ-71

Олександр КОВАЛЕНКО
(ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Керівник професор, д.т.н. Леонід ПИСАРЕНКО
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант професор, д.т.н. Леонід ПИСАРЕНКО
(назва розділу) (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент доцент, к.т.н Кирило ТРАПЕЗОН
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант
з нормоконтролю доцент, к.т.н. Павло САФРОНОВ
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Освітня програма Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2021 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Олександр КОВАЛЕНКО
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту Дистанційний вимірювач рівня освітленості

Керівник проєкту професор, д.т.н. Леонід ПИСАРЕНКО,
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

затверджена наказом по університету від « 24 » травня 2021 року № 1316-с

2. Термін подання студентом проєкту 08.06.2021

3. Вихідні дані до проєкту розрахунок математичної моделі пасивного безпроводного сенсору

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

Огляд науково-технічної літератури по результатам дослідження приладів на поверхневих акустичних хвилях та фоточутливих елементах. Ознайомлення та опис існуючих приладів для вимірювання рівня освітленості та пасивних безпроводних сенсорів на поверхневих акустичних хвилях. Розрахунок математичної моделі пасивного безпроводного сенсору на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання рівня освітленості.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) схема електрична принципова, схема електрична структурна.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Ім'я ПРІЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання _____ 27 листопада 2020 _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Оформлення першого розділу роботи	12.04.2021	виконано
2	Оформлення другого розділу роботи	18.04.2021	виконано
3	Оформлення третього розділу роботи	11.05.2021	виконано
4	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	28.05.2021	виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	10.06.2021	виконано

Студент

_____ (підпис)

Олександр КОВАЛЕНКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту

_____ (підпис)

Леонід ПИСАРЕНКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

В дипломному проєкті представлено огляд науково-технічної літератури по результатам дослідження приладів на поверхневих акустичних хвилях та фоточутливих елементах. Розглянуто конструкцію та принцип роботи приладів для вимірювання освітлення та безпроводних сенсорів фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях. Розраховано математичну модель безпроводного пасивного сенсору на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання рівня освітленості, побудованого на основі двох ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях, а саме опорної та навантаженої на фототранзистор вимірювальної. Проведено математичне моделювання конструктивних елементів – перетворювачів поверхневих акустичних хвиль та ліній затримки між ними. Побудовано графік залежності модуля коефіцієнту відбиття перетворювача та амплітуди відбитого сигналу від провідності навантаження.

Ключові слова: Сенсор на ПАХ, фототранзистор, освітленість, коефіцієнт відбиття.

A N N O T A T I O N

The diploma project presents a review of scientific and technical literature on devices on surface acoustic waves and photosensitive elements. The design and principle of operation of devices for measuring light and wireless sensors of physical quantities on surface acoustic waves are considered. A mathematical model of a wireless passive sensor on surface acoustic waves for remote measurement of the light level, built on the basis of two delay lines on surface acoustic waves, namely the reference and loaded on the phototransistor measuring. Mathematical modeling of structural elements - transducers of surface acoustic waves and delay lines between them is carried out. The graph of dependence of the modulus of the reflection coefficient of the converter and the amplitude of the reflected signal on the conductivity of the load is constructed.

Key words: SAW sensor, phototransistor, illuminance, reflection coefficient.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1 Поняття і сутність поверхневих акустичних хвиль	8
1.2 Види поверхневих акустичних хвиль	12
1.3 Технологія виготовлення п'єзоелектричних підкладок для приладів на ПАХ	15
1.4 Методи збудження ПАХ.....	17
1.5 Види приймачів оптичного випромінювання	21
1.6 Висновки до розділу	24
2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ	26
2.1. Дослідження конструкції та принципу роботи вимірювачів освітлення.....	26
2.2. Дослідження перетворювачів фізичних величин на ПАХ.....	28
2.3 Висновки до розділу	32
3. РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЧА ОСВІТЛЕНОСТІ НА ПАХ	33
3.1 Вибір матеріалу звукопроводу та розрахунок лінії затримки	33
3.2 Розрахунок параметрів ЗШП	35
3.2.1 Розрахунок періоду слідування електродів ЗШП та їх ширини	35
3.2.2 Розрахунок кількості електродів ЗШП	36
3.2.3 Розрахунок апертури перетворювача.....	37
3.2.4 Розрахунок узгоджувальних елементів	38
3.3 Розрахунок коефіцієнту відбиття ЗШП та амплітуди відбитого сигналу	40
3.4 Висновки до розділу	42

ДП. ДЕ-71.006 ПЗ

Змн.	Арк. А	№ докум. №	Підпис П.	Дата				
					<i>Дистанційний вимірювач рівня освітленості</i>			
Розроб		Коваленко			Літ	Літ	Арк	Архівів
Перевір		Писаренко					3	48
Реценз.					«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-71			
Н. Контр.		Сафонов						
Затверд.		Писаренко						

ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	47
Додаток А. Summary	

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Арк
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		4

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЕП – акустoeлектронний перетворювач;
ПАХ – поверхнева акустична хвиля;
ЗШП – зустрічно-штирьовий перетворювач;
ЛЗ – лінія затримки;
ПП – первинний перетворювач;
ВП – вимірювальний перетворювач;
ФВ – фізична величина;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ФЧХ – фазочастотна характеристика;
АЛЗ – акустична лінія затримки;
КЕМЗ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

З розвитком технологій виникає потреба у підвищенні чутливості та точності вимірювання фізичних величин (ФВ). Традиційні вимірювальні перетворювачі (ВП) на відомих фізичних ефектах (резистивні, п'єзоелектричні, ємнісні, гальваноманітні, електромагнітні, фотоелектричні, акустооптичні) не можуть забезпечити такі вимоги. Технічні параметри традиційних ВП досягли своїх граничних можливостей, і подальше підвищення їх чутливості та точності вимірювання можливо лише шляхом створення первинних перетворювачів (ПП) з використанням нових фізичних ефектів. Не менш важливим є вимоги до зменшення маси та габаритів ВП.

Проведені дослідження показали, що акустоелектронні перетворювачі (АЕП) з використанням пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), та системи на їх основі, задовольняють більшість поставлених вимог. Зараз пристрої на ПАХ використовують для виготовлення активних і пасивних ПП: температури, тиску, вологості, лінійного та кутового переміщення, швидкості та прискорення, напруженостей електричного та магнітного полів, та інших.

Мета дослідження: Метою даної роботи є дослідження характеристик перетворювачів на ПАХ для подальшої розробки класу пристроїв на основі ПАХ та тонкоплівкових підкладках, які дозволяють утворювати системи для дистанційного вимірювання рівня освітленості.

Об'єкт дослідження: Акустоелектронні перетворювачі фізичних величин на основі використання поверхневих акустичних хвиль.

Предмет дослідження: Методи вимірювання рівня освітленості; перетворювальні компоненти на основі тонкоплівкових акустоелектронних перетворювачів поверхневих акустичних хвиль (АЕП-ПАХ) та активних компонентів.

Тип та зміст моделі «вхід-вихід»: Дистанційний вимірювач рівня освітленості являє собою систему, що складається з п'єзоелектричного звукопроводу, на поверхні якого розташовані ЗШП, що з'єднаний з антеною,

									Анк
									6
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ				

ЗШП, що з'єднаний з навантаженням, та група відбивачів. Пристрій опитування та обробки інформації надсилає сигнал запиту на антену сенсора. ЗШП, що з'єднаний з антеною перетворює сигнал в поверхневу акустичну хвилю, яка розповсюджується в обидві сторони звукопроводу. Хвилі відбиваються від групи відбивачів та ЗШП, що з'єднаний з навантаженням, і повертаються до ЗШП, що з'єднаний з антеною, який перетворює цю хвилю в електричний сигнал, що випромінюється в простір антеною. Коефіцієнт відбиття ЗШП залежить від провідності навантаження. Після надходження опорного та вимірювального сигналів на пристрій опитування та обробки інформації здійснюється обробка вимірювальної інформації.

Завдання: Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідження характеристик первинних перетворювачів на ПАХ.
2. Дослідження основних принципів будови та розрахунку ПП на ПАХ.
3. Дослідження характеристик приймачів оптичного випромінювання.
4. Розробка математичної моделі дистанційного вимірювача рівня освітленості на ПАХ.

Для вирішення поставлених задач використовувалися: методи математичної фізики; положення теорії пружності, теорії коливань та хвиль; фізико-топологічне моделювання і чисельні розрахунки моделей, що використані для побудови математичної моделі дистанційного вимірювача рівня освітленості на ПАХ, дослідження його характеристик та шляхів удосконалення конструкції.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Поняття і сутність поверхневих акустичних хвиль

Акустичні хвилі в твердих тілах – це явище, яке виникає внаслідок деформації матеріалу. Через вибивання атомів з положення рівноваги, виникають внутрішні пружні сили, які прагнуть повернути атоми в початкове положення. За рахунок взаємного впливу атомів один на одного, при вибиванні одного атома з вузла кристалічної решітки, будуть виникати зміщення і в сусідніх атомів. Внаслідок чого виникають коливання, які поширюються в твердих тілах. Така деформація називається пружною, а матеріал, в якому вона виникає називають пружним. Якщо, після припинення дії зовнішніх сил на матеріал, деформація не зникає, її називають пластичною [1, 2].

Описати акустичні хвилі в твердих тілах можна за допомогою декількох фізичних величин. Деформацію S можна описати за допомогою зміщення. Зміщення показує переміщення деякої частинки матеріалу, яка знаходиться в точці з координатами x'_i ($i = 1, 2, 3$), при дії зовнішніх сил на матеріал. Величина зміщення залежить не тільки від координат, а і від напрямку, тобто величина зміщення $\vec{u}(x_1, x_2, x_3)$ – це векторна векторна величина, і характеризує відхилення частинок від початкового положення. Для характеристики деформації в твердому тілі використовують тензор деформації, який складається з дев'яти величин S_{ij} , де $i, j = 1, 2, 3$.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (1.1)$$

Тензор деформації симетричний, тобто

$$S_{ij} = S_{ji}, \quad (1.2)$$

тому тільки шість компонентів з дев'яти відрізняються один від одного [1, 2, 3].

									Анк
									8
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ				

Внутрішні сили, які виникають при деформації, можливо описати за допомогою тензора напруженості T_{ij} (рис.1.1). Тензор напруженості є тензором другого рангу, який складається з дев'яти величин.

$$T_{ij} = \frac{F_{Xi}}{S^{(j)}}, \quad (1.3)$$

де $S^{(j)}$ – це поверхня одиничної площини.

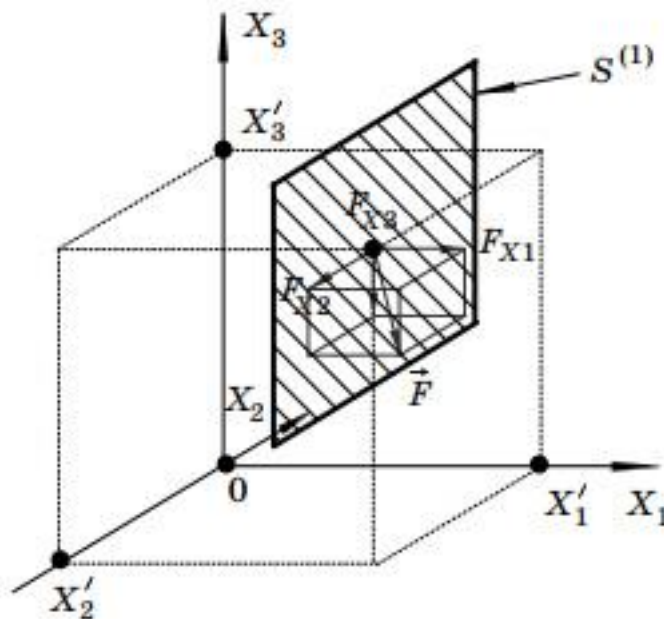


Рис. 1.1. Схематичне зображення тензора напруженості [1].

Тензор напруженості є симетричним тензором, тобто

$$T_{ij} = T_{ji}, \quad (1.4)$$

тому тільки шість компонентів з дев'яти відрізняються один від одного. При поверненні матеріалу в початковий стан тензор деформації та тензор напруженості дорівнюють нулю [1, 2, 3].

Оскільки напруженість в твердому пружному тілі виникає внаслідок деформації, то повинно існувати співвідношення, яке пов'язує ці дві ФВ. Ці величини поєднує закон Гука:

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl}, \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3, 4). \quad (1.5)$$

Із закону Гука можна вивести коефіцієнти c_{ijkl} , які є лінійним співвідношенням між тензорами другого рангу напруженості та деформації, і являють собою тензор четвертого рангу, який називається тензор модулів пружності.

$$c_{ijkl} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}}. \quad (1.6)$$

Оскільки тензор модулів пружності є тензором четвертого порядку, він має $3^4 = 81$ компонентів, але оскільки тензори деформації та напруженості симетричні, то c_{ijkl} не буде змінюватись при перестановці двох перших чи останніх індексів, тобто:

$$c_{ijkl} = c_{jikl}; c_{ijkl} = c_{ijlk}. \quad (1.7)$$

Це зменшує кількість незалежних компонентів до 36. Крім того, за рахунок законів термодинаміки, першу і другу пари індексів можна міняти місцями, тобто:

$$c_{ijkl} = c_{klij}, \quad (1.8)$$

за рахунок цього, кількість незалежних компонентів зменшується до 21. Ще зменшити кількість компонентів можна за рахунок симетрії кристалу. Наприклад, в кристалі з кубічною симетрією, тензор модулів пружності має лише три незалежні компоненти [1, 2, 3].

В перших пристроях на акустичних хвилях використовувались об'ємні хвилі. Одним з недоліків використання об'ємних хвиль є те, що акустична хвиля укладена в об'ємі кристалу, і через це виникали труднощі з керуванням хвилею. Ця проблема відсутня у приладах на ПАХ, де хвиля розповсюджується вздовж поверхні твердого тіла. Це дозволяє керувати хвилею в будь-якій точці, на її шляху, що розширює область використання приладів на ПАХ [3].

Найпростішими, і одночасно найбільш популярними є хвилі Релея. Дані хвилі були відкриті досить давно. Ще в 1885 році, Джон Вілям Стретт, третій барон Релей, більш відомий як лорд Релей, передбачив існування поверхневих акустичних хвиль в твердих тілах. Релеївські хвилі можуть існувати в твердих тілах, що межують з вакуумом, чи достатньо розрідженим газовим середовищем. Амплітуда цих хвиль обернено пропорційна глибині, в якій

						Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	
					10	

розповсюджуються хвилі, і зменшується експоненційно, при збільшенні глибини. В зв'язку з цим, 90% перенесеної енергії зосереджено в шарі, глибина якого приблизно дорівнює довжині хвилі (рис. 1.2) [1, 3].

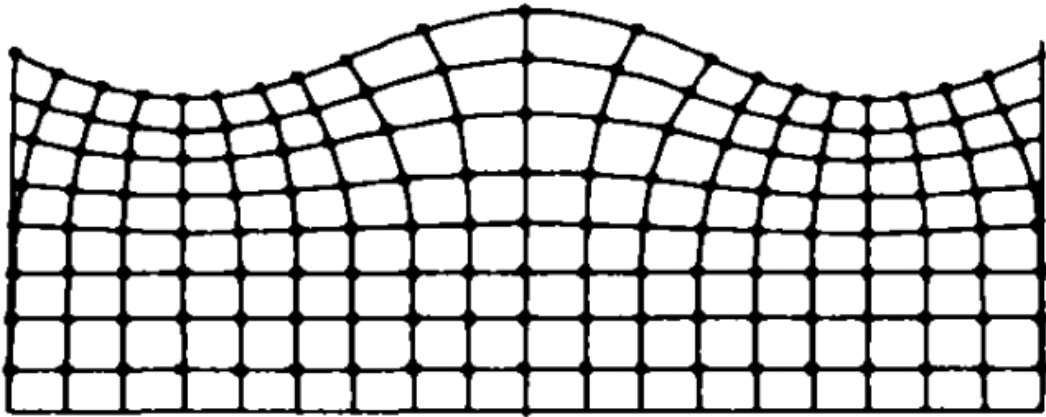


Рис 1.2. Поширення акустичної хвилі в твердому тілі [2].

Проте, після теоретичного відкриття, поверхневі акустичні хвилі не використовували практично, в зв'язку з відсутністю ефективних методів збудження акустичних хвиль в п'єзоелектриках. Лише протягом останніх років був зроблений значний внесок у дослідження ПАХ. В середині 60-х років ПАХ почали використовувати у фільтрах для аналогової обробки сигналів. На даний момент, прилади на ПАХ активно використовують у багатьох областях електроніки, за рахунок невеликих габаритів і маси, достатньої чутливості та точності, а також за рахунок сумісності з мікроелектронною технологією. Серед цих приладів можна виділити елементарні прилади на ПАХ, на основі яких будуються більш складні системи. До таких елементарних приладів можна віднести дисперсні та бездисперсні лінії затримки, багатовідводні лінії затримки з кодуванням по фазі затриманих сигналів, а також резонатори та фільтри різного типу. До систем, які включають такі елементарні прилади можна віднести перетворювачі різних фізичних величин, гребінчасті фільтри, корелятори, аналізатори спектру радіосигналів, суматори, атенюатори, та інші. Ці прилади використовують поверхневі, чи об'ємні акустичні хвилі, які розповсюджуються в твердих, пружних тілах. Проте, не завжди використовують матеріали, які мають п'єзоефект. В таких випадках збудження

						ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			11

акустичних хвиль здійснюється з допомогою перетворювача, який складається з електродів та матеріалу, який має п'єзоелектричні властивості. Подальше дослідження поверхневих акустичних хвиль ще довго буде актуальним, і це один з найперспективніших напрямів електроніки на даний час. Область технічного використання приладів на ПАХ стрімко розвивається [1, 2, 3].

1.2. Види поверхневих акустичних хвиль

За видом поляризації поверхневі акустичні хвилі можна розділити на дві групи: ПАХ з вертикальною поляризацією та ПАХ з горизонтальною поляризацією.

До хвиль з горизонтальною поляризацією відносяться хвилі Лява, які розповсюджуються в напівпросторі з слабкою поверхневою неоднорідністю.

Хвилі Стоуні можуть бути як з вертикальною, так і з горизонтальною поляризацією. Вони розповсюджуються на межі двох пружних середовищ. На рис. 1.3 зображені хвилі Стоуні з різними типами поляризації, де а – вертикальна поляризація; б – горизонтальна поляризація [2].

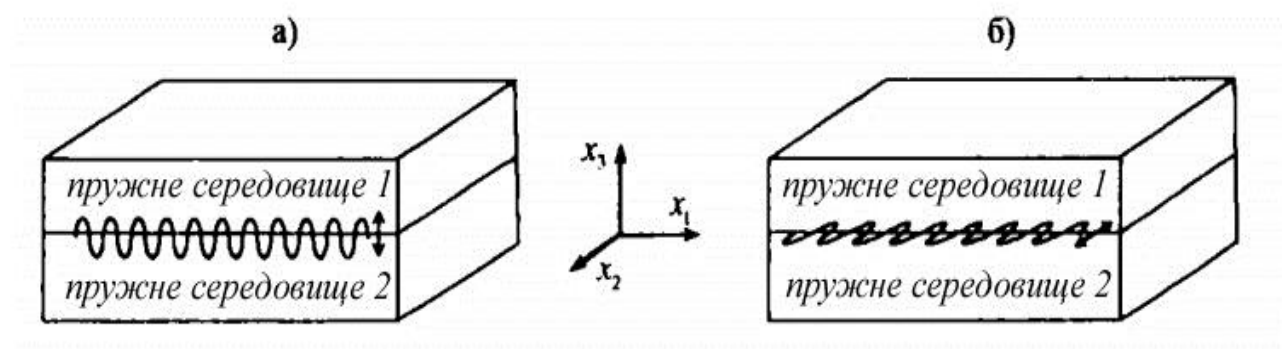


Рис. 1.3. Схематичне зображення хвиль Стоуні на межі двох пружних тіл [2].

Ще одним типом поверхневих акустичних хвиль є хвилі Гуляєва-Блюштейна. Проте, в пристроях використовується не часто, через те, що даний тип хвиль погано керується з поверхні. Це обумовлено тим, що, навіть у сильних п'єзоелектриках, таких як сульфід кадмію, типове значення глибини проникнення для металізованої поверхні приблизно дорівнює чотирьом

									Анк
									12
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ				

сторонах екрану знаходяться відбивачі, а на двох протилежних сторонах датчики, що приймають хвилі. Контролер посилає на кожен п'єзоелектричний перетворювач електричний сигнал, з певною частотою, приблизно 5 МГц, який перетворюється в ПАХ, які відбиваються від відбивачів. Хвилі приймаються датчиками, які подають їх на п'єзоелектричні перетворювачі, де вони перетворюються в електричний сигнал, який аналізується контролером. Навіть легкий дотик в будь-якій точці екрану буде поглинати хвилі. Ці зміни буде фіксувати приймаючі датчики, а контролер визначає положення точки дотику (рис. 1.5) [4].

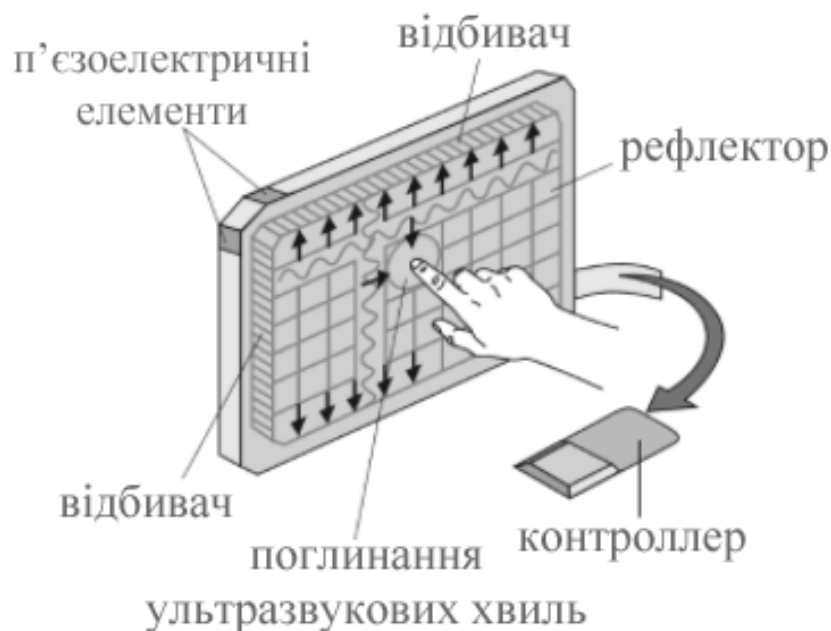


Рис. 1.5. Сенсорний екран на ПАХ [4].

Однією з переваг такого сенсорного екрану над екранами, які працюють на інших фізичних процесах, є можливість реалізації визначення не тільки координат точки дотику, а і сили дотику. Це пояснюється тим, що степінь поглинання залежить від тиску в точці дотику. Ще одна перевага такого екрану – це можливість використання захисного скла будь-якої товщини, так як керування хвилями здійснюється на поверхні скла. Це дозволяє використовувати такі екрани в пристроях, які потрібно захистити від проявів вандалізму, наприклад в банкоматах, чи гральних автоматах. Головним

						ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			14

недоліком є те, що такий екран буде погано працювати, чи не працювати взагалі при забрудненні поверхні скла, через те що хвилі можуть поглинатись брудом і сторонніми предметами. Ще одним недоліком може бути низька точність, проте, зазвичай такі екрани використовуються в пристроях з інтерфейсом, який не потребує високої точності. Також до недоліків можна віднести і те, що даний екран не буде реагувати на натиснення предметами, які не поглинають хвилі, наприклад пластиковою картою [5].

1.3. Технологія виготовлення п'єзоелектричних підкладок для приладів на ПАХ

Одним з найважливіших явищ, яке використовується в приладах на ПАХ, є явище п'єзоефекту. Це явище було відкрито в 80-х роках XIX століття французькими вченими Жаком і П'єром Кюрі. Існують прямий і обернений п'єзоефект. Прямий п'єзоефект заключається у виникненні поляризації діелектрика під дією деформації. Аналогічно прямому п'єзоефекту існує обернений п'єзоефект, який заключається у виникненні деформацій в діелектрику під дією зовнішнього електричного поля (рис. 1.6) [6].

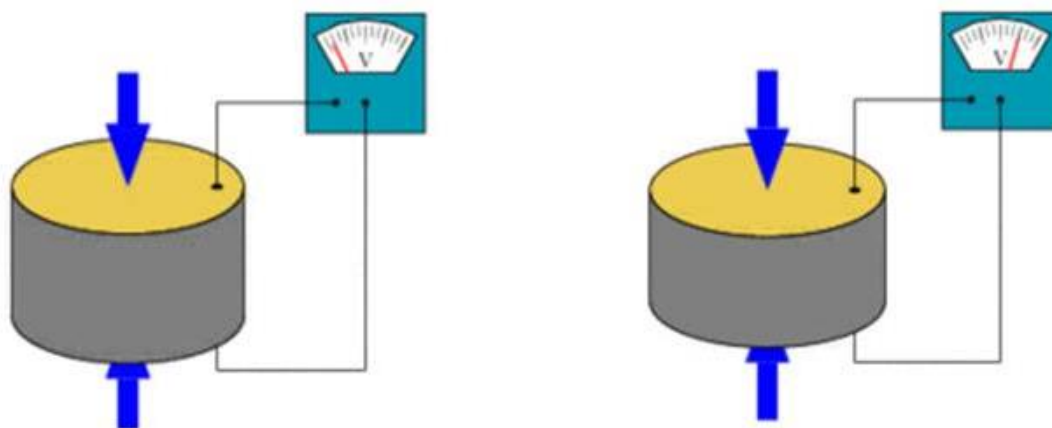


Рис. 1.6. Наглядне зображення п'єзоелектричного ефекту [6].

Величина заряду пропорційна деформації п'єзоелектрика, це дає змогу використовувати п'єзоелектрики не тільки в генераторах електроенергії, як це

					ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		15

зроблено в запальничках з п'єзоелементом, а і в різних датчиках тиску чи вібрацій. Для прикладу, датчики з п'єзоелектричним ефектом використовують в якості звукознімачів на гітарах з нейлоновими струнами, через те, що магнітні звукознімачі не будуть реагувати на коливання нейлонових струн в магнітному полі. В таких датчиках використовується лише прямий п'єзо ефект. У приладах на ПАХ використовується як прямий, так і обернений п'єзо ефекти [6].

Явищем п'єзо ефекту володіють певні матеріали. Оскільки при збудженні ПАХ можуть збуджуватись і об'ємні акустичні хвилі, що є не бажаним, необхідно вибрати матеріал і площину зрізу так, щоб збудження об'ємних хвиль було мінімальним. До найпопулярніших матеріалів, які використовуються в приладах на ПАХ, можна віднести кварц ST-зрізу і ніобат літію YZ-зрізу. Від вибору матеріалу також залежить і швидкість розповсюдження акустичної хвилі в звукопроводі (табл 1.1) [1].

Таблиця 1.1

Матеріал	Зріз	Швидкість ПАХ, м/с
Ніобат літію	YZ	3488
Кварц	ST	3158

Технологія виготовлення звукопроводу починається з вирощування монокристалу. Для вирощування монокристалів використовують метод Чохральського. Вирощування кристалів даним методом можна розділити на декілька стадій:

- вантаження та плавлення шихти;
- стабілізація розплаву;
- вирощування перетяжки;
- розрощування перетяжки до заданого діаметра;
- вирощування тіла монокристала;
- вирощування оберненого конуса;
- охолодження монокристала.

Охолодження потрібно проводити в печі вирощування монокристалу в зв'язку з тим, що при різкому охолодженні всередині кристалу виникають тріщини [7].

Наступною стадією є орієнтація кристалу. Це виконується рентгенівськими методами. Після орієнтації настає процес розрізу п'єзоелектричного монокристалу на тонкі пластини. Розріз проводиться на верстаках з алмазними дисками. Після розрізу пластини попередньо шліфують, для отримання поверхні з необхідною орієнтацією. Після шліфування обробляється контур, і зворотна сторона пластини. Для того, щоб об'ємні хвилі не відбивалися від зворотної сторони пластини, на ній наносять насічки алмазним диском. Це дозволяє розсіювати об'ємні хвилі. Наступним кроком є повторне шліфування, яке проводиться на плоско-шліфувальних станках. Завершальним етапом у виготовленні п'єзоелектричної підкладки є полірування. Полірування проводиться у спеціальних приміщеннях, які отримали назву «чиста кімната». У таких приміщеннях рівень запиленості мінімальний. Для виготовлення пристроїв на ПАХ на частотах 400 – 500 МГц при поліруванні використовують полірувальні суспензії, розмір часток яких не повинен перевищувати розмір часток полірувальної речовини. Для виготовлення приладів на більш високих частотах полірування проводиться хіміко-механічними методами [8].

1.4. Методи збудження ПАХ

Найважливішим для створення приладів на ПАХ є процес збудження і прийому акустичних хвиль. Для цього в приладах на ПАХ найчастіше використовують зустрічно-штирвові перетворювачі (ЗШП). ЗШП складається з двох гребінчатих електродів, які наносяться на п'єзоелектричну підкладку (рис 1.7).

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17



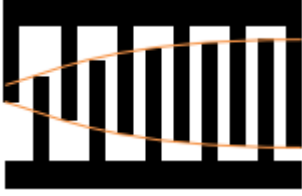

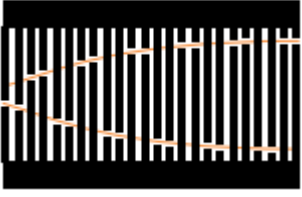


Рис. 1.7. Зустрічно-штирьовий перетворювач [3].

Кожна пара електродів завдяки оберненому п'єзоэффекту збуджує дві біжучі поверхневі хвилі, що поширюються у взаємно протилежних напрямках. В залежності від потрібних характеристик, конструкція ЗШП може змінюватись (табл. 1.2) [3, 8, 9].

Таблиця 1.2

Тип ЗШП і спосіб зважування	Конструкція	Переваги	Недоліки
Неаподизований еквідистантний з одинарними електродами		Легкість розрахунку	Низька прямокутність, велика кількість бокових пелюсток
Неаподизований еквідистантний з розщипленими електродами		Невеликий коефіцієнт відбиття	Велика ймовірність дефектів виготовлення
ЗШП з зважуванням коефіцієнту металізації		Однорідність фазового фронту по апертурі	Обмежений вибір реалізованих АЧХ, великий рівень бокових пелюсток АЧХ

ЗШП з зважуванням вибірковим видаленням електродів		Зниження фазових викривлень фронту і дифракції	Наявність негармонічних відкликів у смузі режекції
ЗШП з ємнісним зважуванням		Зниження фазових викривлень фронту і дифракції	Обмежений вибір реалізованих АЧХ
Віяловий неаподизований		Високий коефіцієнт прямокутності	Великий рівень бокових пелюсток АЧХ
Секціонований		Можливість приглушення об'ємних акустичних хвиль	Наявність негармонічних відкликів у смузі режекції
Аподизований еквідистантний		Високий коефіцієнт прямокутності	Викривлення фазового фронту, чутливість до дифракції ПАХ
Аподизований з пасивними електродами поза зоною перекриття електродів		Зниження фазових викривлень фронту	Викривлення АЧХ через відбиття від пасивних штирів, чутливість до дифракції ПАХ
Аподизований з розщипленими індивідуально зваженими електродами		Мінімальне відбиття	Велика ймовірність дефектів виготовлення

Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата

В якості матеріалу для виготовлення ЗШП зазвичай використовують алюміній. Він має ряд переваг перед іншими металами, таких як малий питомий опір, мала маса, стійкість до впливу навколишнього середовища, за рахунок плівки окислу, і мала вартість. Для нанесення тонкої плівки алюмінію на п'єзоелектричну підкладку найчастіше використовують два вакуумних методи, а саме електронно-променеве нанесення з водоохолоджуваного тигля, і магнетронне нанесення. При таких методах нанесення стоять високі вимоги до тиску у вакуумній камері та нагрівання підкладок. Для отримання достатньої адгезії між алюмінієм і п'єзоелектричною підкладкою використовують ванадій в якості адгезійного шару. Методи нанесення ванадію і алюмінію ідентичні. Для формування структури ЗШП зазвичай використовують процес фотолітографії. На рис 1.8 зображені основні етапи фотолітографії, де а – підкладка з металевою плівкою; б – нанесення фоторезисту; в – експонування через фотошаблон; г – проявлення фоторезисту; д – травлення металевої плівки; е – зняття фоторезисту [8].

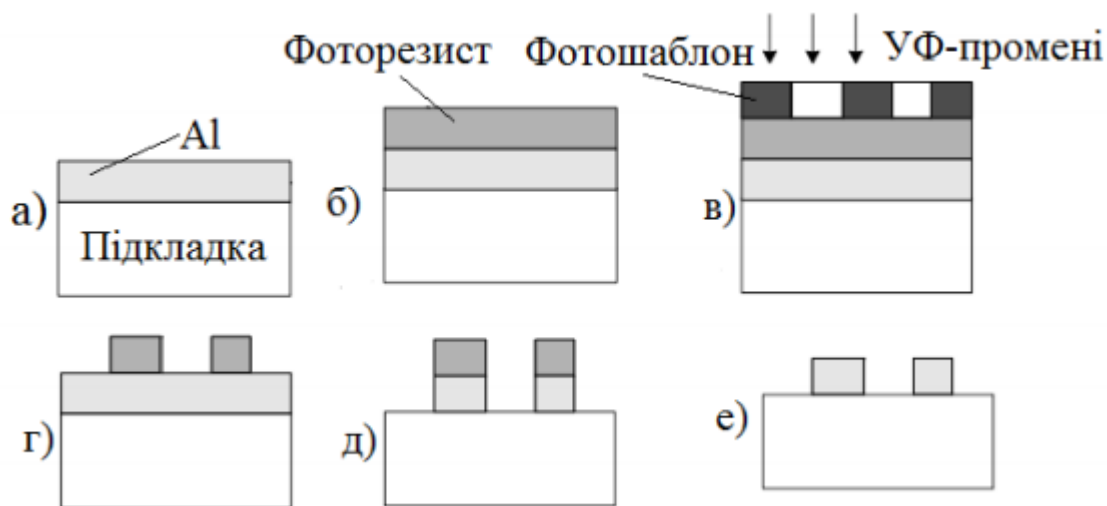


Рис. 1.8. Основні етапи фотолітографії [8].

1.5. Види приймачів оптичного випромінювання

Приймачі оптичного випромінювання – це перетворювачі енергії оптичного випромінювання в інші види енергії. Зазвичай приймачі оптичного випромінювання розділяють на теплові та фотоелектричні [10].

Теплові приймачі працюють за принципом перетворення енергії оптичного випромінювання в теплову енергію. Для цього, поверхня, на яку попадає оптичне випромінювання повинна бути затемнена, для кращого поглинання тепла. При зміні температури буде змінюватись і провідність металу, чи напівпровідника [10].

Фотоелектричні приймачі перетворюють енергію оптичного випромінювання в електромагнітну енергію за рахунок такого явища, як фотоефект. Фотоефект може бути як зовнішній, так і внутрішній [10, 11].

При зовнішньому фотоефекті електрони вилітають з тіла, внаслідок поглинання фотонів (рис. 1.9).

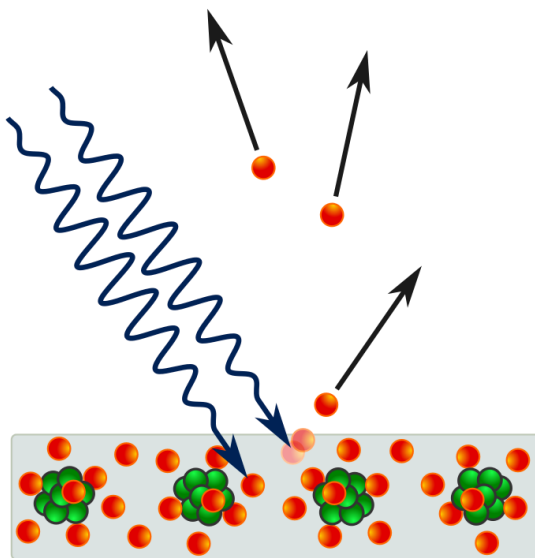


Рис. 1.9. Зовнішній фотоефект [11].

До фотоелементів з зовнішнім фотоефектом відносяться електронні лампи, в яких фотони викликають електронну емісію з фотокатода [10, 11].

При внутрішньому фотоелектричному ефекті електрони залишаються в тілі, а провідність збільшується за рахунок перерозподілу електронів по енергетичним станам. Внутрішній фотоелектричний ефект спостерігається в напівпровідниках. До найпопулярніших приймачів на внутрішньому фотоелектричному ефекті можна віднести фоторезистор, фототранзистор та фотодіод [10, 11].

Фоторезистор – це пасивний компонент, у якого опір змінюється під дією світла. Зазвичай він виглядає як диск з двома контактами (рис. 1.10).

У деяких фоторезисторів опір в темноті може досягати 10 МОм, а при яскравому освітленні опір деяких резисторів може знижатись до 500 Ом. Фоторезистор є пасивним компонентом, полярність якого не грає ролі, тому його можна включати в схеми як з постійним, так і з змінним струмом. Проте, в багатьох країнах фоторезистори не використовують, через те, що вони в більшості випадків виготовляються з сульфіду кадмію, який є небезпечним для навколишнього середовища. Діаметр фоторезистора може бути від 5 до 25 мм. На фоторезисторах часто відсутнє маркування, тому при роботі з ними є можливість переплутати, і використати фоторезистор з іншими характеристиками, що може виявитись критичним.

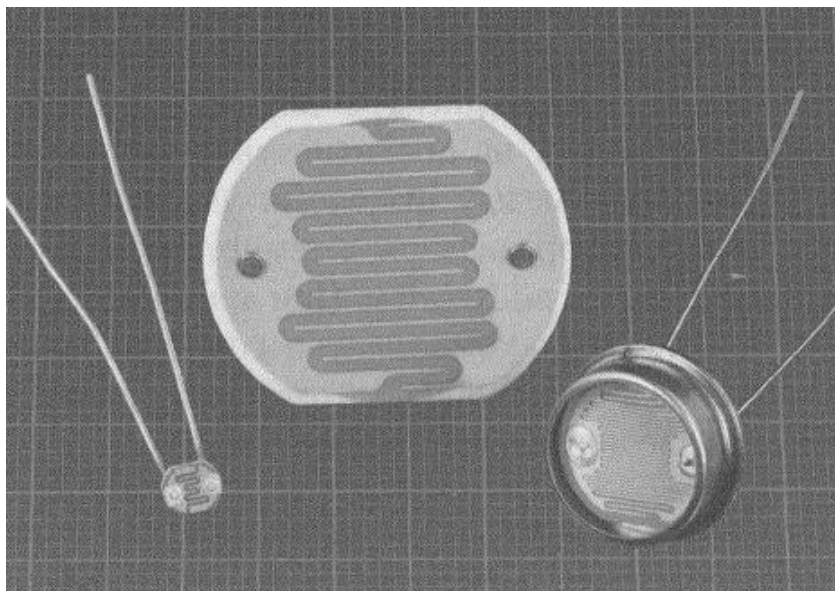


Рис. 1.10. Фоторезистори [12].

На схемах можна зустріти шість видів позначення фоторезистора. Всі вони є ідентичними [12].

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	<i>Алк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

В порівнянні з фототранзистором, фоторезистор програє в багатьох параметрах, таких як швидкодія, діапазон опорів, в фоторезисторі опір сильніше залежить від температури, ніж у фототранзистора. При цьому середня вартість фоторезисторів більша, ніж фототранзисторів [12].

Фототранзистор – це транзистор, в якому струм керується світлом. Він може бути польовим, чи біполярним. Зазвичай він схожий на індикаторний світлодіод (рис. 1.11). Для видимого світла корпус виготовляється з прозорого

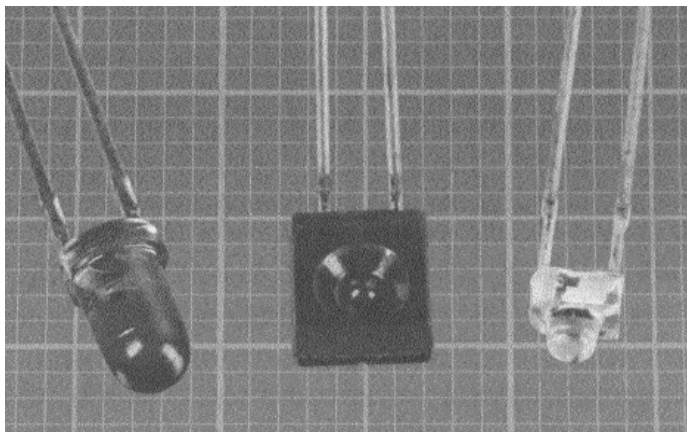


Рис. 1.11. Фототранзистори

пластику. Якщо фототранзистор призначений для роботи в інфрачервоному діапазоні, його корпус роблять темним [12].

На відміну від звичайного транзистора, фототранзистор зазвичай має не три виходи, а два. Це пов'язано з тим, що база фототранзистора реагує не на струм, а на світло, і керує струмом між виходами. При відсутності світла струм між колектором і емітером складає не більше 100 нА, а при освітленні досягає 50 мА [12].

Як і фоторезистор, фототранзистор на схемах можуть позначати по різному (рис 1.12), всі, крім випадку «В» ідентичні. Таким позначенням, як у випадку «В» позначають фототранзистори, у яких є додатковий вихід бази [12].

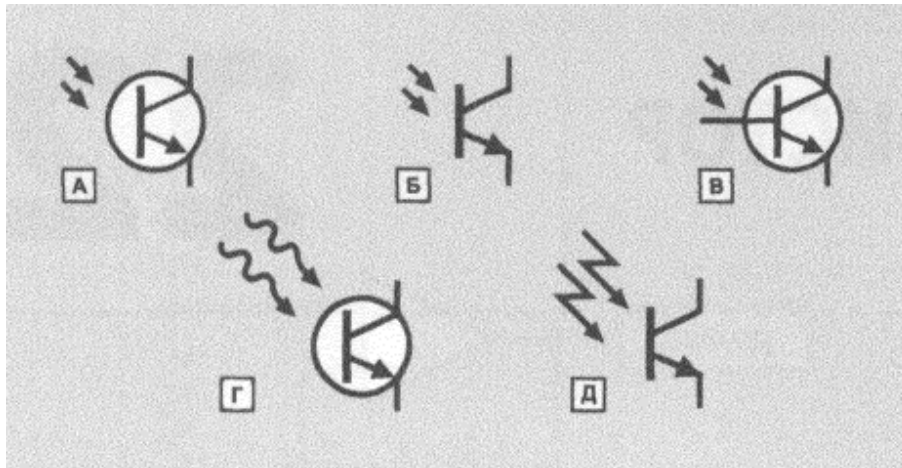


Рис. 1.12. Позначення фототранзисторів на схемах [12].

Принцип роботи фоторезистора та фототранзистора схожі між собою, вони змінюють струм, що проходить через них, в залежності від рівня освітленості. Принцип роботи фотодіода дещо відрізняється. Фотодіод може працювати у двох режимах: фотодіодному та фотогальванічному. Для роботи в фотодіодному режимі до фотодіода підключають додаткове джерело живлення зворотною полярністю. При відсутності освітлення фотодіод можна порівняти до звичайного діода, в такому випадку через фотодіод буде проходити дуже малий струм [12].

Головна відмінність фотодіода від фоторезистора та фототранзистора проявляється при фотогальванічному режимі. В цьому режимі фотодіод працює без зовнішнього джерела живлення. Це можливо за рахунок того, що світло в напівпровіднику створює електронно-діркові пари, електрони переміщуються до катоду, а дірки до аноду, внаслідок чого, між ними виникає напруга [12].

1.6. Висновки до розділу

Технічні параметри традиційних ВП досягли граничних можливостей, тому все більш актуальнішим стає питання розробки первинних перетворювачів на використанні нових фізичних ефектів. Після відкриття ефективних методів збудження поверхневих акустичних хвиль, перетворювачі на ПАХ стали одними з найперспективніших у подальшому дослідженні та

										Анк
										24
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ					

розробці. Це пояснюється тим, що такі перетворювачі мають більшу точність та чутливість, при менших розмірах та масі, що дозволяє використовувати їх в більш складних системах.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

2.1. Дослідження конструкції та принципу роботи вимірювачів освітлення

Освітленість – це освітлення поверхні, що створюється світловим потоком, який падає на поверхню. В міжнародній системі одиниць, одиницею вимірювання освітленості є люкс. Найчастіше рівень освітленості визначають за допомогою люксметра, проте, в кінематографії та фотографії також використовують прилад, який називається експонетр [13].

Люксметр має дуже велику область використання. Їх використовують для розподілу освітлення, та створення комфортних умов для людей в житлових будинках, офісах, навчальних та медичних закладах, бібліотеках, музеях. Також контроль освітлення важливий в ботанічних садах та теплицях, оскільки різні рослини потребують різну кількість освітлення [14].

Загальну конструкцію люксметра можна умовно розділити на дві основні частини: фоточутливий елемент і блок обробки та відображення результату. Найпростіший люксметр складається з селенового фотоелементу і стрілочного мікроамперметра, шкала якого проградуєвана в люксах. Перевагами даного люксметра є легке виготовлення, та здатність працювати без додаткових джерел живлення. Недоліком є неточність вимірів, через те, що на стрілочних вимірювальних приладах точність залежить від положення ока спостерігача відносно шкали приладу. Для використання цифрового мікроамперметра необхідне додаткове живлення. Фоточутливий елемент може бути вмонтований в корпус люксметра або може бути в окремому корпусі, і з'єднуватись з люксметром гнучким кабелем (рис 2.1). У випадку, коли фоточутливий елемент кріпиться за допомогою гнучкого кабелю, зручніше проводити виміри рівня освітленості у важкодоступних місцях. Фоточутливий елемент люксметра

									ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	Анк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата						26

покривають матовим склом для захисту від механічних пошкоджень, та прямого попадання сонячного світла [14, 15].



Рис. 2.1. Люксметр [15].

Для вимірювання високого рівня освітленості використовують спеціальні насадки, які розсіюють і поглинають світло в певну кількість разів. При цьому результати вимірювання необхідно помножити на поправочний коефіцієнт. Фотоелемент люксметра чутливий не лише до видимого світла, а й до ультрафіолетового та інфрачервоного. Через це, у випадках, коли потрібно проводити виміри лише видимого світла, для більшої точності використовують фільтри, які поглинають ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання [14, 15].

До вимірювачів рівня освітленості можна віднести і датчики освітлення. Зазвичай їх використовують для автоматизації різних процесів, наприклад їх можна використовувати для автоматизації ввімкнення вуличного освітлення. Також, зараз всі сучасні смартфони обладнані датчиком освітлення для автоматичного регулювання яскравості. Це зроблено для збереження зору. При дуже яскравому навколишньому освітленні на темному екрані буде погано видно, і очі будуть швидко втомлюватись, а в темноті яскравий екран буде «різати» очі. Часто датчик освітлення в смартфонах використовують разом з штучним інтелектом, який запам'ятовує налаштування яскравості користувача, та потім змінює яскравість екрану в залежності від тих налаштувань.

									Анк
									27
Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ				

2.2. Дослідження перетворювачів фізичних величин на ПАХ

За останні роки ПАХ почали використовувати в багатьох приладах для різного призначення. На це в першу чергу посприяло відкриття ефективного метода збудження акустичних хвиль в твердих тілах за допомогою ЗШП. Для обробки сигналів використовують п'ять типів приладів на ПАХ:

1. лінії затримки;
2. фільтри;
3. елементи пам'яті;
4. прилади для стискання імпульсів;
5. нелінійні прилади [3].

Акустичні лінії затримки (АЛЗ) можуть бути як на об'ємних, так і на поверхневих хвилях. До створення АЛЗ не було приладів, які здатні були затримати сигнал з частотою порядку одного гігагерцу на декілька мікросекунд. Для затримки сигналу хоча б на дві мікросекунди за допомогою коаксіального кабеля потрібно приблизно 400 метрів кабеля. При цьому через великі розміри будуть виникати значні втрати сигналу. За допомогою АЛЗ можна затримати сигнал більше ніж на 10 мкс, при цьому об'єм АЛЗ буде складати декілька кубічних сантиметрів [3].

Найпростіша лінія затримки на ПАХ складається з звукопроводу, на якому розміщені два ЗШП (рис. 2.2). В більшості випадків в лініях затримки використовують однорідні ЗШП. Головною характеристикою лінії затримки є час затримки, який визначається довжиною звукопроводу, та швидкістю хвилі. В таких ЛЗ максимальний час затримки обмежений 50 мкс, проте існують методи збільшення часу затримки. Одним з таких методів є циклічне проходження акустичної хвилі навколо звукопроводу з заокругленими краями (рис. 2.3). При цьому радіус заокруглення повинен бути набагато більшим за довжину хвилі. Хвиля Релея зможе розповсюджуватись по такій поверхні з

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	<i>Алк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Алк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		28

невеликими втратами. При використанні матеріалів, в яких швидкість ПАХ невелика, разом з такою конструкцією, можна досягти досить високих показників часу затримки. Для прикладу, при використанні кристалу з германата вісмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, в якому хвила розповсюджується із швидкістю $V_R=1708$ м/с, і траєкторія буде довжиною 10 см, то час затримки буде 58,5 мс [1, 3].

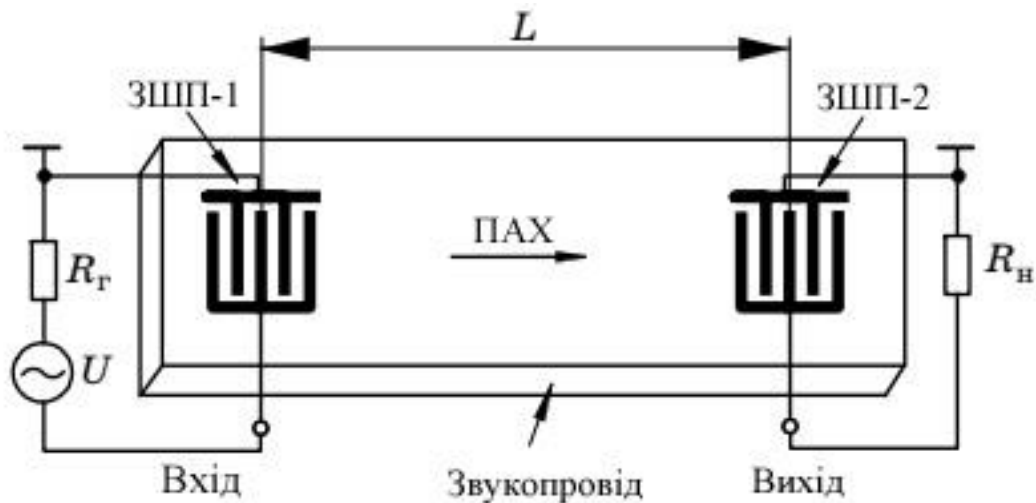


Рис. 2.2. Лінія затримки на ПАХ [1].

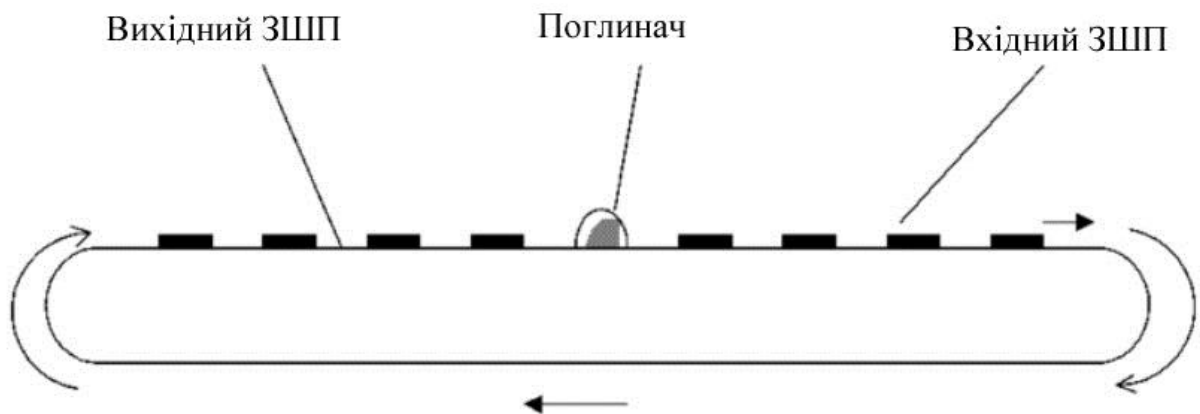


Рис. 2.3. Циліндрична лінія затримки [3].

На основі акустичної лінії затримки можливе виготовлення пасивних безпроводних сенсорів фізичних величин. Перевагами таких сенсорів є можливість використання їх в важкодоступних місцях. Такі сенсори не потребують дротового зв'язку з блоком обробки інформації, а також не потребують використання акумуляторів, чи інших джерел живлення, що

ЗШП залежить від опору навантаження. Відбита хвиля поширюється по звукопроводу, і ЗШП, який з'єднаний з антеною, за рахунок прямого п'єзоефекту перетворює ПАХ в сигнал, який через антену надсилає до пристрою опитування та обробки інформації [17, 18].

Недоліком такої конструкції є залежність показів сенсора від відстані між пристроєм опитування та обробки інформації і антеною сенсора.

Для вирішення даної проблеми до попередньої конструкції на звукопроводі додають групу відбивачів, які разом з ЗШП, що з'єднаний з антеною, утворюють опорну лінію затримки ПАХ, що формує опорний сигнал (рис. 2.5, рис. 2.6) [17, 18, 19].

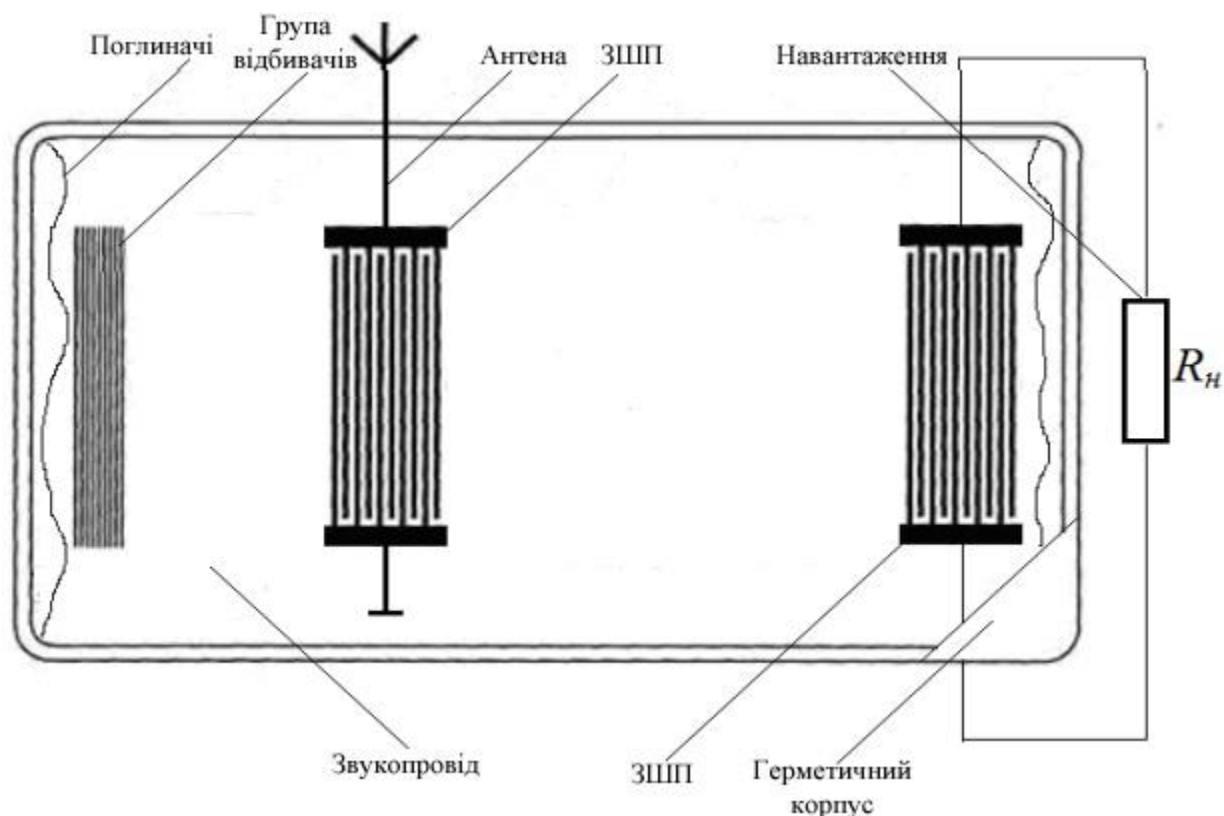


Рис. 2.5. Сенсор фізичної величини на ПАХ [17].

Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата

інформації, а також не потребують джерела живлення, що дозволяє використовувати їх в важкодоступних місцях і агресивних середовищах.

3. РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЧА ОСВІТЛЕНОСТІ НА ПАХ

3.1. Вибір матеріалу звукопроводу та розрахунок конструктивних параметрів лінії затримки

Від вибору матеріалу п'єзоелектричної підкладки залежить швидкість розповсюдження поверхневої акустичної хвилі. Матеріал підкладки повинен виконувати певні вимоги. Підкладка повинна бути механічно міцною, стійкою до широкого діапазону температури, вологості, вібрації, тощо. Важливо щоб матеріал допускав можливість механічної обробки, наприклад різки на пластини, шліфування, полірування. Крім того, матеріал повинен бути однорідним та пружним [20].

Оскільки, в більшості випадків, для п'єзоелектричної підкладки використовують анізотропні матеріали, то характеристики підкладки залежать не лише від матеріалу, а й від обраного кристалографічного зрізу. Для задання зрізу зазвичай використовують так звані кути Ейлера (Φ , Ψ , θ). На рис. 3.1 зображена система координат (X , Y , Z) для визначення кутів Ейлера, та пластина з зрізом $X'Y'$ [20].

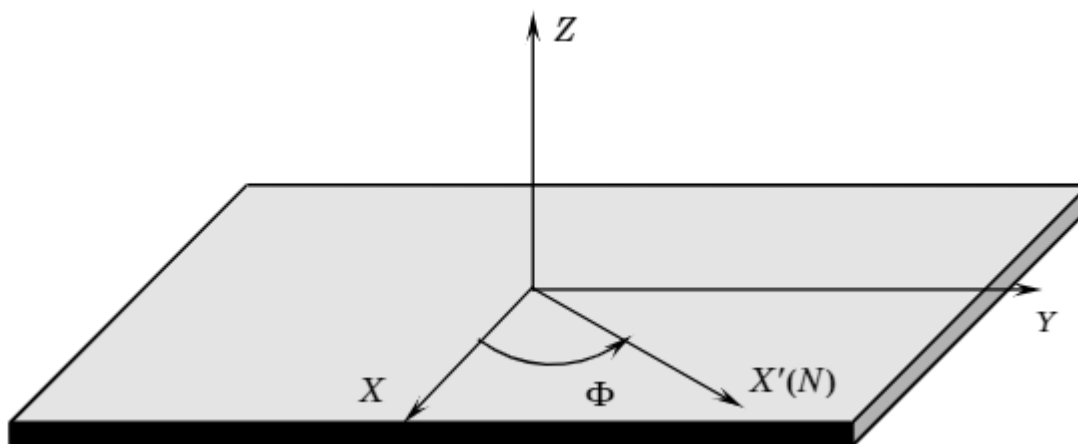


Рис. 3.1. Пластина з зрізом $X'Y'$ [20].

Фазова швидкість ПАХ залежить від щільності матеріалу, його пружних та п'єзоелектричних характеристик, а також від стану поверхні підкладки. Наприклад, для ніобату літію YZ-зрізу швидкість $V_{ПАХ} = 3488$ м/с, для ніобату літію YX-зрізу $V_{ПАХ} = 3992$ м/с, а для кварцу ST-зрізу $V_{ПАХ} = 3158$ м/с.

Час затримки t_3 – це час, за який сигнал проходить від вхідного ЗШП до вихідного ЗШП, чи до групи відбивачів. Час затримки залежить від швидкості розповсюдження ПАХ та відстані між центрами перетворювачів:

$$t_3 = \frac{L}{V_{ПАХ}}. \quad (3.1)$$

У рамках даної роботи для моделювання процесу дистанційного вимірювання освітлення за допомогою сенсору на ПАХ були прийняті такі конструктивні параметри:

- фазова швидкість ПАХ $V_0 = 3488$ м/с (як звукопровід використано YZ-зріз ніобату літію);
- центральна частота $f_0 = 434$ МГц.

Для підвищення точності вимірювання доцільно використовувати конструкцію сенсору на ПАХ яка містить п'єзоелектричний звукопровід, на поверхні якого розташований ЗШП, з'єднаний з антеною, ЗШП, з'єднаний з навантаженням і групу відбивачів (рис. 3.2). Така конструкція має дві лінії затримки, а саме опорну та вимірювальна лінія затримки.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		34

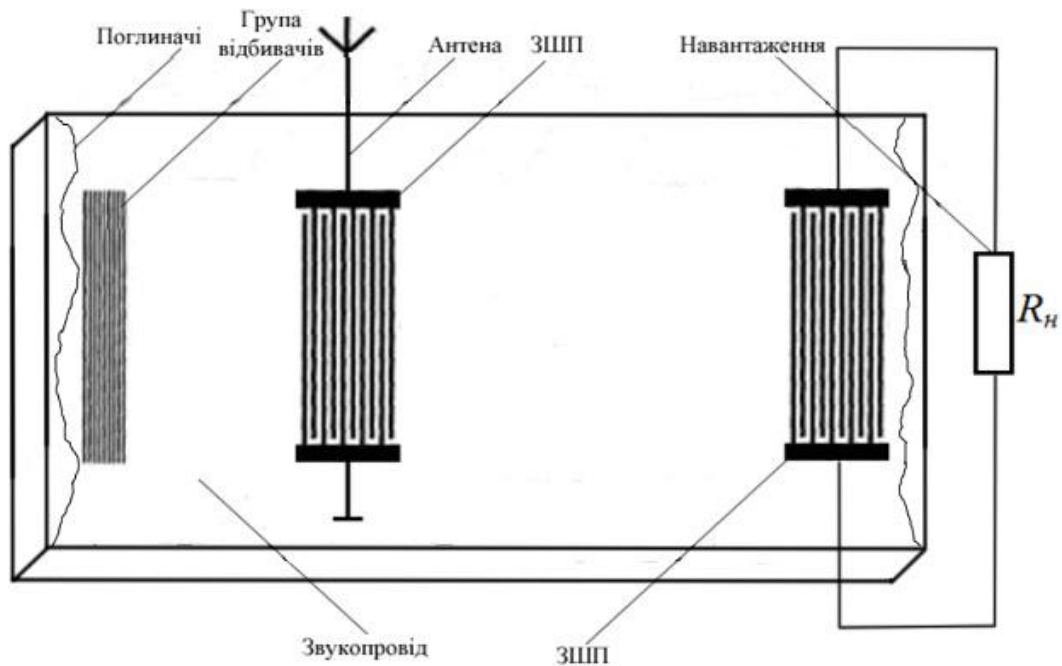


Рис. 3.2. Вимірювач рівня освітленості на ПАХ.

Для отримання затримки приходу вимірювального сигналу відносно опорного в 1 мкс необхідно щоб був час затримки опорного сигналу $t_{30} = 0,5$ мкс, а час затримки вимірювального сигналу $t_{36} = 1$ мкс. Для отримання такого часу затримки необхідно розрахувати відстань між ЗШП, з'єднаним з антеною, та групою відбивачів L_o , а також відстань між ЗШП, з'єднаним з антеною, та ЗШП, з'єднаним з навантаженням L_6 . Використовуючи відношення (3.1) можна розрахувати ці відстані:

$$L = t_3 V_{ПАХ} \cdot \quad (3.2)$$

$$L_o = t_{30} V_{ПАХ} = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3488 = 1744 \text{ мкм}$$

$$L_6 = t_{36} V_{ПАХ} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3488 = 3488 \text{ мкм}$$

3.2. Розрахунок параметрів ЗШП

3.2.1 Розрахунок періоду слідування електродів ЗШП та їх ширини

Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата

Для ефективного збудження та відбиття поверхневої акустичної хвилі відстань між центрами електродів однакової фази l_0 в двофазних ЗШП з одинарними електродами повинна дорівнювати довжині ПАХ $\lambda_{ПАХ}$ (рис. 3.3).

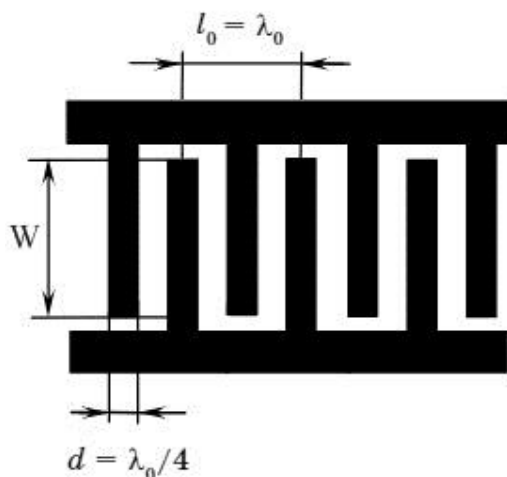


Рис. 3.3. Фрагменти топології двофазного ЗШП ПАХ з одинарними електродами [20].

$$l_0 = \lambda_{ПАХ} = \frac{V_{ПАХ}}{f_0}. \quad (3.2)$$

$$l_0 = \lambda_{ПАХ} = \frac{3488}{434 \cdot 10^6} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Ширина електрода d вибирається рівною чвертю довжини хвилі $\lambda_{ПАХ}$.

$$d = \frac{\lambda_{ПАХ}}{4} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{4} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

3.2.2 Розрахунок кількості електродів ЗШП

Для еквідистантного перетворювача ширина полоси робочих частот Δf обернено пропорційна кількості пар електродів:

$$\Delta f = \frac{f_0}{N}. \quad (3.3)$$

Тобто, перетворювач ефективно працює в полосі частот, яка обмежена нижньою f_n та верхньою f_s частотами:

$$f_n = f_0 - \frac{f_0}{N}, \quad (3.4)$$

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		36

$$f_s = f_0 + \frac{f_0}{N}. \quad (3.5)$$

Для високої ефективності в максимальній полосі частот необхідно щоб акустична добротність Q_a дорівнювала електричній добротності Q_e . Акустичну добротність можна визначити відношенням:

$$Q_a = \frac{f_0}{\Delta f} = N. \quad (3.6)$$

Електрична добротність Q_e залежить від коефіцієнту електромеханічного зв'язку (КЕМЗ) k , та кількості пар електродів:

$$Q_e = \frac{\pi}{4k^2 N}. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку показує відношення між електричною та механічною енергією в п'єзоелектрику. Для ПАХ квадрат КЕМЗ можна визначити за допомогою відношення:

$$k^2 = 2 \frac{\Delta V}{V_{ПАХ}} = 2 \frac{V_{ПАХ} - V_m}{V_{ПАХ}}, \quad (3.8)$$

де $V_{ПАХ}$ - фазова швидкість ПАХ на вільній поверхні, V_m - фазова швидкість ПАХ на металізованій поверхні.

Для YZ-зрізу ніобату літію $k^2 = 0,048$.

Порівнявши відношення (3.6) та (3.7) можна отримати рівняння оптимальної кількості пар електродів ЗШП:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{\pi}{4k^2}}. \quad (3.9)$$

Підставивши у рівняння (3.9) значення КЕМЗ для YZ-зрізу ніобату літію отримаємо оптимальну кількість пар електродів:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot 0,048}} \approx 4.$$

3.2.3 Розрахунок апертури перетворювача

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		37

Вибираючи апертуру перетворювача W (рис. 3.2) необхідно враховувати можливі дифракційні втрати, пов'язані з розбіжністю акустичного променя, обмеженої апертури. В зв'язку з цим, апертура електродів ЗШП W не повинна бути менша значення, яке визначається границею Френеля [1]:

$$W > \sqrt{\lambda_{ПАХ} L |1 + \gamma|}, \quad (3.10)$$

де γ - параметр анізотропії, L - довжина шляху розповсюдження ПАХ.

Величина та знак γ визначає степінь дифракції ПАХ. В ізотропному середовищі $\gamma = 0$. Якщо в анізотропному середовищі $\gamma > 0$, то дифракційні втрати будуть більші, ніж в ізотропному середовищі. Якщо $\gamma < 0$, то втрати будуть менші ніж в анізотропному середовищі. При $\gamma = -1$ в анізотропному середовищі спостерігається явище автоколімації, при якому розширення акустичного пучка мінімальне. З точки зору дифракційних ефектів ідеальним є матеріал з параметром анізотропії близьким до -1 . Для YZ-зрізу ніобату літію $\gamma = -1,083$ [20].

Підставивши необхідні параметри до нерівності (3.10) можна дізнатися мінімальну апертуру для ЗШП:

$$W > \sqrt{8 \cdot 10^{-6} \cdot 3488 \cdot 10^{-6} \cdot 0.083} \Rightarrow W > 48.13 \cdot 10^{-6}$$

Оскільки довжина апертури повинна бути більшою за границю Френеля, то це значення можна округлити до $W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

3.2.4 Розрахунок узгоджувальних елементів

Перетворювач ПАХ можна представити у вигляді еквівалентних схем. На рис. 3.4 зображені паралельна (а), та послідовна (б) еквівалентні схеми ЗШП. На рис. 3. 5 зображена еквівалентна схема вимірювача рівня освітленості на ПАХ.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		38

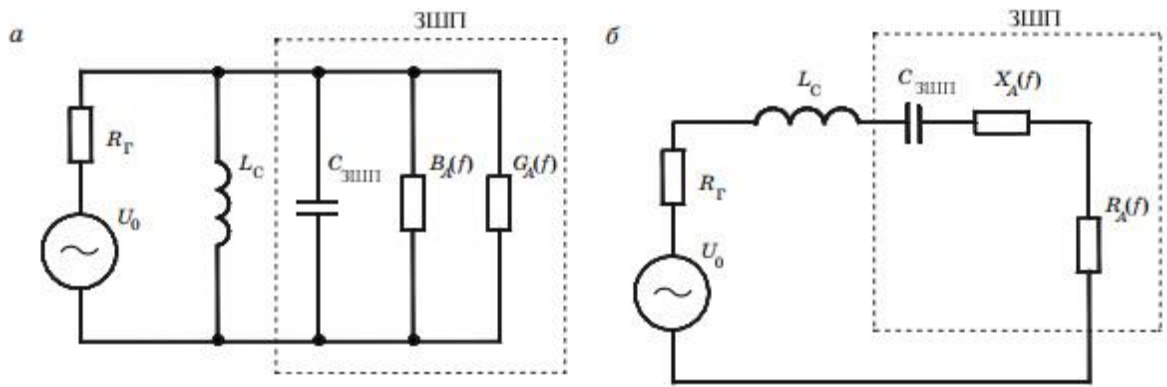


Рис. 3.4. Еквівалентні схеми ЗПП [1].

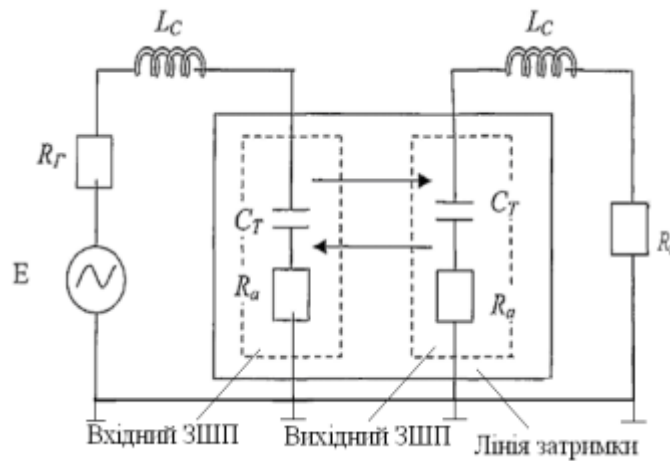


Рис. 3.5. Еквівалентна схема вимірювача рівня освітленості на ПАХ [19].

Паралельна еквівалентна схема ЗПП містить паралельне з'єднання статичної ємності $C_{ЗПП}$, активної та реактивної складових провідності вимірювання $G_a(f)$ і $B_a(f)$ відповідно. Ці параметри визначаються за допомогою співвідношень:

$$C_{ЗПП} = NC_s W, \quad (3.11)$$

де C_s - погонна ємність пари електродів (для YZ-зрізу ніобату літійу $C_s = 4,6 \frac{n\Phi}{cm}$),

N - кількість електродів ЗПП, W - апертура ЗПП.

$$G_a(f) = G(f_0) \left[\frac{\sin Y}{Y} \right]^2; \quad (3.12)$$

$$B_a(f) = G(f_0) \left[\frac{\sin(2Y) - 2Y}{2Y^2} \right], \quad (3.13)$$

де $G(f_0)$ - активна складова провідності випромінювання при резонансі:

$$G(f_0) = 8k^2 f_0 C_{зшп} N, \quad (3.14)$$

$$Y = \frac{N\pi\delta}{2}, \quad (3.15)$$

$$\delta = \frac{f - f_0}{f_0}. \quad (3.16)$$

Послідовна еквівалентна схема ЗШП містить паралельне з'єднання статичної ємності $C_{зшп}$, активної та реактивної складових опорів вимірювання $R_a(f)$ і $X_a(f)$ відповідно. Ці параметри визначаються за допомогою співвідношень:

$$R_a(f) = R(f_0) \left[\frac{\sin Y}{Y} \right]^2; \quad (3.17)$$

$$X_a(f) = R(f_0) \left[\frac{\sin(2Y) - 2Y}{2Y^2} \right], \quad (3.18)$$

де $R(f_0)$ - активна складова опору випромінювання при резонансі:

$$R(f_0) = \frac{1}{8k^2 f_0 C_{зшп} N}. \quad (3.19)$$

Підставивши необхідні параметри у співвідношення (3.11)-(3.19) отримаємо:

$$C_{зшп} = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,6 \cdot 10^{-10} = 92 \cdot 10^{-15} \Phi;$$

$$Y = \frac{4 \cdot 0,25 \cdot \pi}{2} = \frac{\pi}{2};$$

$$G(f_0) = 8 \cdot 0,048 \cdot 434 \cdot 10^6 \cdot 92 \cdot 10^{-15} \cdot 4 = 61,3 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$G_a(f) = 61,3 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} \right]^2 = 61,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 183,9 \cdot 10^{-10} \text{ См};$$

$$B_a(f) = 61,3 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\sin \pi - \pi}{2\pi^2} \right] = 61,3 \cdot 10^{-6} \cdot (-0,16) = -9,6 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$R(f_0) = \frac{1}{8 \cdot 0,048 \cdot 434 \cdot 10^6 \cdot 92 \cdot 10^{-15} \cdot 4} = \frac{10^9}{61329,408} = 16,3 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_a(f) = 16,3 \cdot 10^3 \left[\frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} \right]^2 = 16,3 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 4,89 \text{ Ом};$$

					ДП. ДЕ-71.006 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		40

$$X_a(f) = 16,3 \cdot 10^3 \left[\frac{\sin \pi - \pi}{2\pi^2} \right] = 16,3 \cdot 10^3 \cdot (-0,16) = -2,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Для компенсації статичної ємності ЗШП $C_{зшп}$ використовують узгоджуючу індуктивність L_c (рис. 3.3), яку можна розрахувати за допомогою співвідношення:

$$L_c = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_s N W}, \quad (3.20)$$

$$L_c = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 188356 \cdot 10^{12} \cdot 4,6 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10^{-5}} = \frac{1}{684111708,018 \cdot 10^{-3}} = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

3.3. Розрахунок коефіцієнту відбиття ЗШП та амплітуди відбитого сигналу

Інформацію про рівень освітлення можна отримати за рахунок аналізу параметрів сигналу, відбитого від ЗШП, який з'єднаний з навантаженням. Коефіцієнт відбиття від ЗШП залежить від провідності навантаження ЗШП, і визначається співвідношенням:

$$|K_{відб}| = \frac{G(f_0)}{G(f_0) + Y_H + jf_0 C_{зшп}}, \quad (3.21)$$

де Y_H - провідність навантаження ЗШП.

Підставивши отримані вище значення в співвідношення (3.21) можна отримати графік залежності модуля коефіцієнту відбиття від провідності навантаження (рис. 3.6):

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		41

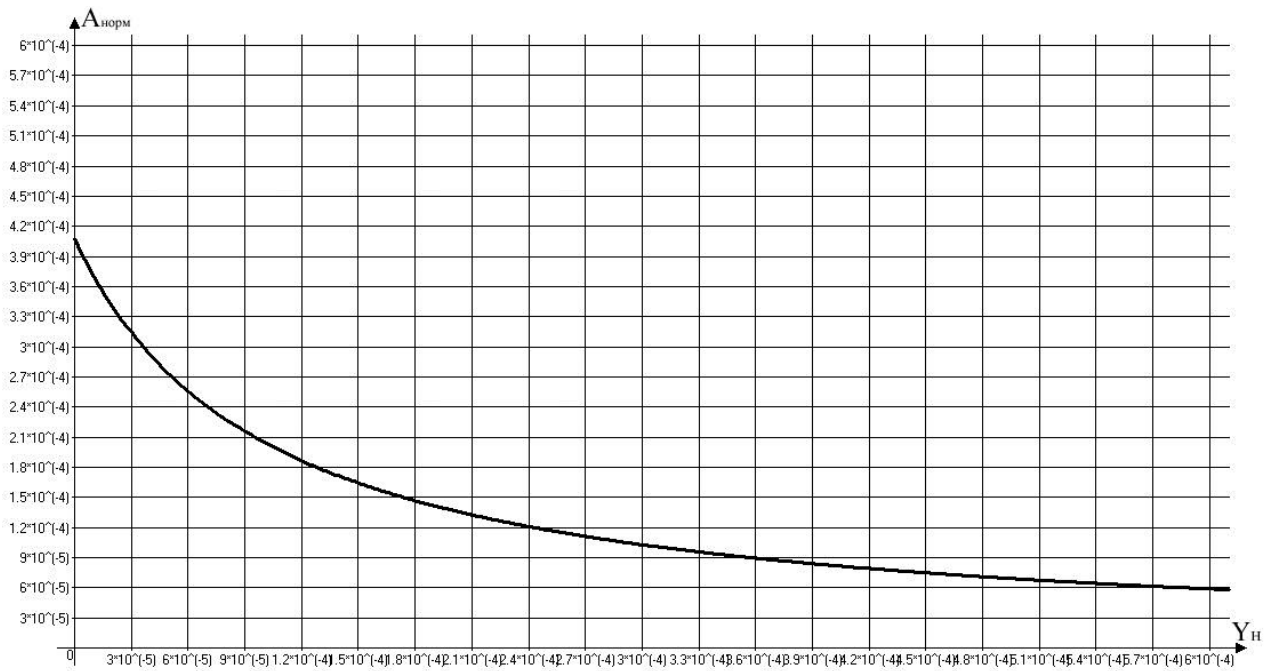


Рис. 3.7. Графік залежності амплітуди відбитого сигналу від провідності навантаження.

3.4. Висновки до розділу

В даному розділі було проведено розрахунки основних параметрів ЗШП для безпроводного вимірювача рівня освітленості на ПАХ:

- довжина лінії затримки опорного сигналу: $L_o = 1744$ мкм;
- довжина лінії затримки вимірювального сигналу: $L_e = 3488$ мкм;
- час затримки опорного сигналу: $t_{30} = 0,5$ нс;
- час затримки вимірювального сигналу: $t_{36} = 1$ нс;
- відстань між електродами однакової фази: $l_o = 8 \cdot 10^{-6}$ м;
- ширина електродів: $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м;
- кількість електродів: $N = 4$;
- апертура: $W = 5 \cdot 10^{-5}$ м;
- Статична ємність: $C_{зшп} = 92 \cdot 10^{-15}$ Ф;
- Активна складова провідності випромінювання при резонансі:
 $G(f_0) = 61,3 \cdot 10^{-6}$ См;
- Узгоджувальна індуктивність: $L_C = 1,46 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Отримавши всі необхідні параметри було побудовано графік залежності коефіцієнту відбиття ЗШП від провідності навантаження (рис. 3.6), а також графік залежності амплітуди відбитого сигналу від провідності навантаження (рис. 3.7). Ці результати можуть бути корисними при подальшому виготовленні пасивних безпроводних сенсорів на ПАХ для вимірювання рівня освітленості.

У рамках даної дипломної роботи для розрахунку математичної моделі використовувались такі вхідні дані:

- фазова швидкість ПАХ: $V_0 = 3488$ м/с (як звукопровід використано YZ-зріз ніобату літію);
- центральна частота: $f_0 = 434$ МГц;
- довжина лінії затримки опорного сигналу: $L_o = 1744$ мкм;
- довжина лінії затримки вимірювального сигналу: $L_e = 3488$ мкм;
- час затримки опорного сигналу: $t_{zo} = 0,5$ нс;
- час затримки вимірювального сигналу: $t_{ze} = 1$ нс;
- відстань між електродами однакової фази: $l_o = 8 \cdot 10^{-6}$ м;
- ширина електродів: $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м;
- кількість електродів: $N = 4$;
- апертура: $W = 5 \cdot 10^{-5}$ м.

Для більшої точності вимірювання, та незалежності результату вимірювання від відстані між сенсором та пристроєм опитування та обробки інформації було обрано конструкцію, яка містить дві лінії затримки, а саме опорну та вимірювальну (рис. 3.2), (рис. 3.5).

На основі прийнятих вхідних даних, за допомогою співвідношень (3.11)-(3.20) розраховані характеристичні параметри ЗШП:

- Статична ємність: $C_{зшп} = 92 \cdot 10^{-15}$ Ф;
- Активна складова провідності випромінювання при резонансі:
 $G(f_0) = 61,3 \cdot 10^{-6}$ См;
- Активна складова провідності: $G_a(f) = 183,9 \cdot 10^{-10}$ См;

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
						44
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		

- Реактивна складова провідності: $B_a(f) = -9.6 \cdot 10^{-6} \text{ См}$;
- Активна складова опору випромінювання при резонансі:
 $R(f_0) = 16,3 \cdot 10^3 \text{ Ом}$;
- Активна складова опору: $R_a(f) = 4,89 \text{ Ом}$;
- Реактивна складова опору: $X_a(f) = -2.6 \cdot 10^3 \text{ Ом}$;
- Узгоджувальна індуктивність: $L_C = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$.

У результаті моделювання сенсору, побудованого за наведеною на рис. 3.2 схемою, за допомогою співвідношень (3.21), (3.22) отримані залежності модуля коефіцієнту відбиття та амплітуди відбитого сигналу від провідності навантаження (рис. 3.6), (рис. 3.7) відповідно.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		45

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проєкті було розраховано математичну модель дистанційного вимірювача рівня освітленості. В основі даного вимірювача використано пасивний безпроводний сенсор, побудований на основі лінії затримки на ПАХ. Такі сенсори не потребують дротового з'єднання з пристроєм опитування та обробки інформації, а також не потребують з'єднання з акумулятором, чи іншими джерелами живлення, що в поєднанні з малими габаритами дозволяє використовувати їх в важкодоступних місцях, і місцях з агресивним середовищем.

В першому розділі було проведено огляд науково-технічної літератури по акустичних хвилях та приймачах оптичного випромінювання. Було розглянуто причини виникнення акустичних хвиль в твердих пружних тілах, види поверхневих акустичних хвиль та методи їх збудження, явище прямого та оберненого п'єзоефекту, технологію виготовлення п'єзоелектричного звукопроводу, а також види фоточутливих елементів, їх переваги та недоліки.

В другому розділі було розглянуто види вимірювачів та датчиків освітлення, їх загальну конструкцію та принцип роботи та область їхнього застосування. Також було розглянуто конструкції та принцип роботи безпроводних сенсорів на ПАХ. Конструкція, в якій використовуються дві лінії затримки, а саме опорна та вимірювальна, має перевагу над конструкцією з однією лінією затримки за рахунок того, що в першому випадку результати вимірювання не будуть залежати від відстані між сенсором та пристроєм опитування та обробки інформації.

В третьому розділі було проведено розрахунок математичної моделі дистанційного вимірювача рівня освітленості на ПАХ:

- довжина лінії затримки опорного сигналу: $L_o = 1744$ мкм;
- довжина лінії затримки вимірювального сигналу: $L_e = 3488$ мкм;
- час затримки опорного сигналу: $t_{30} = 0,5$ мкс;
- час затримки вимірювального сигналу: $t_{36} = 1$ мкс;

									Анк
									46
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДЕ-71.006 ПЗ				

- відстань між електродами однакової фази: $l_0 = 8 \cdot 10^{-6}$ м;
- ширина електродів: $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м;
- кількість електродів: $N = 4$;
- апертура: $W = 5 \cdot 10^{-5}$ м;
- Статична ємність: $C_{ЗШП} = 92 \cdot 10^{-15}$ Ф;
- Активна складова провідності випромінювання при резонансі:
 $G(f_0) = 61,3 \cdot 10^{-6}$ См;
- Узгоджувальна індуктивність: $L_C = 1,46 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Отримавши всі необхідні параметри було побудовано графік залежності коефіцієнту відбиття ЗШП від провідності навантаження (рис. 3.6), а також графік залежності амплітуди відбитого сигналу від провідності навантаження (рис. 3.7). Ці результати можуть бути корисними при подальшому виготовленні пасивних безпроводних сенсорів на ПАХ для вимірювання рівня освітленості.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		47

12. Энциклопедия электронных компонентов. Том 3. Датчики местоположения, присутствия, ориентации, вибрации, жидкости, газа, света, тепла, звука, электричества: Пер. с англ./ Ч. Платт, Ф. Янссон. – СПб.:БХВ-Петербург, 2017. – 288 с.: ил.
13. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Освітленість>
14. http://ecounit.com.ua/artikle_103.html
15. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Люксметр>
16. Кузьменко О. М., Жовнір М. Ф. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури / Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2013. № 3/2013 (80). С.113-117 (Україніка наукова, ВІНІТІ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus).
17. Пат. на корисну модель 88694 Україна. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко, Д. В. Черненко; № u201312927; заявл. 07.11.2013; опубл. 25.03.2014; бюл. № 6.
18. Гайдамака В. В., Жовнір М. Ф. Безпроводний датчик магнітного поля / Перспективні напрямки сучасної електроніки: мат. ІХ наук.– практ. конф. НТУУ "КПІ". Київ, 2015. С 97–100.
19. Кузьменко О. М., Жовнір М. Ф. Пасивні безпроводні сенсори на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури та вологості / Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2014. № 4/2014 (87). С.82-86 (Україніка наукова, ВІНІТІ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus).
20. Балышева О.Л. Материалы для акустоэлектронных устройств: учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2005. – 50 с.

					<i>ДП. ДЕ-71.006 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

S U M M A R YRemote light level meter

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization ELECTRONIC DEVICES AND EQUIPMENT Kovalenko Alexander. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-71. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 48 p., Ill. 25, tables 2.

With the development of technology there is a need to increase the sensitivity and accuracy of measuring physical quantities. Traditional transducers with known physical effects (resistive, piezoelectric, capacitive, galvanomagnetic, electromagnetic, photoelectric, acousto-optical) cannot provide such requirements. The technical parameters of traditional measuring transducers have reached their limit, and further increase of their sensitivity and measurement accuracy is possible only by creating primary transducers using new physical effects. Equally important are the requirements for reducing the weight and dimensions of transducers.

Studies have shown that acoustoelectronic transducers using devices on surface acoustic waves, and systems based on them, meet most of the requirements. Currently, devices on surface acoustic waves are used for the manufacture of active and passive primary transducers: temperature, pressure, humidity, linear and angular displacement, velocity and acceleration, electric and magnetic field strengths, and others.

To date, passive wireless sensors of physical quantities on surface acoustic waves have been widely used. The advantages of such sensors are the ability to use them in hard to reach places. Such sensors do not require a wired connection to the information processing unit, nor do they require the use of batteries or other power sources, which allows the use of such sensors in extreme conditions, such as high radiation.

Sensors are an integral part of information and measurement systems, automatic control systems, process control systems. The information received from the sensors helps to predict the occurrence of dangerous situations at the enterprises, which will allow to take timely measures to eliminate the fault. Therefore, it is important that the sensors are reliable and accurate.

The wireless sensor of physical size on surface acoustic waves is made in the form of a delay line. Input and output counter-pin transducers are formed on the piezoelectric sound line. The input transducer is connected to the antenna, and the output transducer is connected to a load, the parameters of which change when the physical quantity to be measured changes. Since the surface acoustic wave propagates in both directions from the counter-pin transducers, absorbers are applied at the ends of the sound conductor to reduce the level of erroneous signals and ensure the mode of the traveling wave.

When a signal is received from the interrogator and information processing device at the antenna input of this sensor, the counter-pin transducer, which is connected to the antenna, due to the inverse piezoelectric effect excites a surface acoustic wave in the piezoelectric sound conductor, which propagates in both directions. . The part of the energy that propagates in the opposite direction to the counter-pin converter connected to the load is absorbed. The rest of the energy propagating in the direction of the counter-pin converter is reflected from it. The reflection coefficient from the loaded counter-pin transducer depends on the load resistance. The reflected wave propagates through the sound conductor, and the transducer, which is connected to the antenna, due to the direct piezoelectric effect, converts the surface acoustic wave into a signal, which is sent through the antenna to the interrogator and information processing device.

The disadvantage of this design is the dependence of the sensor readings on the distance between the polling and information processing device and the sensor antenna.

To solve this problem, a group of reflectors is added to the pre-design on the sound pipe, which together with the counter-pin transducer connected to the antenna,

form a reference line of delay of the surface acoustic wave, which forms a reference signal. The counter-pin transducer connected to the antenna and the counter-pin transducer connected to the load form a delay measurement line that forms a control measurement signal. After receipt of the interrogation device and processing of the reference and measuring signal information, the received information is processed. The formation of the two signals eliminates the effect of the distance between the interrogator and the sensor antenna on the attenuation of the measuring signal, because the attenuation of the reference and measuring signals due to propagation from the interrogator to the sensor is the same. In this case, the delay time of the arrival of the reference and measuring signals must be different, and therefore the delay lines must be different.

The speed of surface acoustic wave propagation depends on the choice of piezoelectric substrate material. The substrate material must meet certain requirements. The substrate must be mechanically strong, resistant to a wide range of temperature, humidity, vibration, etc. It is important that the material allows the possibility of machining, such as cutting into plates, grinding, polishing. In addition, the material must be homogeneous and elastic.

Since, in most cases, anisotropic materials are used for the piezoelectric substrate, the characteristics of the substrate depend not only on the material but also on the selected crystallographic section.

The phase velocity of the surface acoustic wave depends on the density of the material, its elastic and piezoelectric characteristics, as well as the condition of the substrate surface.

As part of this work to model the process of remote measurement of illumination using a sensor on the surface acoustic wave were adopted the following design parameters:

- phase velocity of the surface acoustic wave: $V_0 = 3488 \text{ m / s}$ (YZ-slice of lithium niobate was used as a sound conductor);
- center frequency: $f_0 = 434 \text{ MHz}$.
- reference signal delay line: $L_0 = 1744 \text{ } \mu\text{m}$;

- measuring signal delay line: $L_g = 3488 \text{ } \mu\text{m}$;
- reference signal delay time: $t_{30} = 0,5 \text{ } \mu\text{s}$;
- measurement signal delay time: $t_{36} = 1 \text{ } \mu\text{s}$;
- distance between electrodes of the same phase: $l_0 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$;
- width of electrodes: $d = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$;
- number of electrodes: $N = 4$;
- coefficient of electromechanical connection: $k^2 = 4,8\%$;
- aperture: $W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$;
- $Y = \frac{\pi}{2}$.

The photosensitive electronic component acts as a load in the wireless light level sensor. Compared with the phototransistor, the photoresistor loses in many parameters, such as speed, resistance range, in the photoresistor resistance depends more on the temperature than the phototransistor. The average cost of photoresistors is greater than phototransistors.

Based on the received initial data are calculated characteristic parameters of the counter-pin converter:

- Static capacity: $C_{3III} = 92 \cdot 10^{-15} \text{ F}$;
- Active component of radiation conductivity at resonance:
 $G(f_0) = 61,3 \cdot 10^{-6} \text{ S}$;
- Active component of conductivity: $G_a(f) = 183,9 \cdot 10^{-10} \text{ S}$;
- Reactive conductivity component: $B_a(f) = -9,6 \cdot 10^{-6} \text{ S}$;
- Active component of radiation resistance at resonance:
 $R(f_0) = 16,3 \cdot 10^3 \text{ Ohm}$;
- Active component of resistance: $R_a(f) = 4,89 \text{ Ohm}$;
- Reactive component of resistance: $X_a(f) = -2,6 \cdot 10^3 \text{ Ohm}$;
- Matching inductance: $L_c = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Gn}$.

Taking into account the above parameters, it is possible to calculate the reflection coefficient of the counter-pin transducer, the value of which varies depending on the load conductivity of the photosensitive electronic component. Knowing the reflection coefficient of the counter-pin converter, you can calculate the amplitude of the reflected signal.

CONCLUSIONS. As a result of use of the resulted schemes of sensors for remote measurement level of illumination can increase accuracy measurement process due to the formation of the reference signal.

Keywords: SAW sensor, phototransistor, illuminance, reflection coefficient.