

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ
АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ ЕФЕКТІВ**

Студентка гр. ЕП-71



А. С. Кулак

Науковий керівник
к.ф.-м.н., доцент



О. П. Ткач

Завідувач кафедри ЕЗПФ
д-р ф.-м. н., професор

І.Ю. Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в дослідженні сенсорів фізичних величин на основі акустoeлектронних ефектів.

Під час виконання роботи використовували інформаційні джерела та програми для створення симуляторів.

Робота складається з двох розділів, у першому наводиться літературний огляд. У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що сьогодні при виборі матеріалу для датчиків, необхідно шукати матеріал з високим коефіцієнтом фазової швидкості поверхневої хвилі та низьким температурним коефіцієнтом. Основні переваги акустичних хвиль – мала швидкість поширення і відносно невеликі втрати на поглинання і електромеханічне перетворення. У другому розділі виконані розрахунки коефіцієнтів загасання смугового фільтру, розроблено тернажер по вивченню базових знань з акустoeлектроніки в програмі Scratch та змодельовано систему вимірювання відстані до об'єктів на основі акустoeлектронного сенсора відстані HC-SR04 в онлайн симуляторі Autodesk Tinkercad.

Робота викладена на 25 сторінках, зокрема, містить 14 рисунків, список використаних джерел із 32 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА, АКУСТИЧНІ ХВИЛІ, БІОСЕНСОР, SCRATCH, ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ ЕФЕКТІВ	6
1.1 Акустоелектроніка в техніці	6
1.2 Розповсюдження акустичних хвиль в твердому тілі.....	7
1.3 Зустрічно-штирьові перетворювачі.....	11
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	22
2.1 Розрахунки смугового фільтра на ПАХ.....	22
2.2 Розробка схеми індикації руху об'єктів	25
2.3 Розробка тренажера по вивченню акустичних хвиль та їх застосування ..	27
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	30

ВСТУП

Пристрої поверхневих акустичних хвиль мають успіх в електронному світі, де домінують інтегровані цифрові напівпровідникові схеми. Такі датчики використовуються в споживчих та високопрофесійних пристроях та системах: митному контролі, в криміналістиці та контролі стану промислових виробів, в автоматизованих системах керування літаків, кораблів та контролю двигуна, а також через зростаючу роль екологічної та біологічної безпеки та необхідності запобігання або мінімізації наслідків виробничих аварій. Ці сенсори можна використовувати для виявлення крихітних слідів біомолекул через спорідненість до біомаркерів для виявлення патогенних мікроорганізмів, вірусів, діагностики та захворювань [1-3].

Одним із основних функціональних і конструктивних елементів акустоелектронних пристроїв є перетворювач сигналів. Цей факт дає підстави досліджувати і використовувати досягнення акустоелектроніки для створення досконалих сенсорів різного призначення. До таких датчиків можна отримати бездротовий доступ, що забезпечує віддалений контроль у суворих умовах. Вони працюють в діапазоні частот від 10 МГц до декількох ГГц, мають міцну компактну структуру, високу стабільність та чутливість, низьку вартість, швидку реакцію в реальному часі, надзвичайно малий розмір.

Широкі дослідження фізичних явищ, пов'язаних з взаємодією акустичних хвиль з електричними полями та електронами в п'єзоелектричних діелектриках та напівпровідниках проводились у 1970–1990-ті роки в Європі, США, СРСР, Японії та інших країнах. У 1974 р. п'ять європейських учених Е. Еш, Дж. Коллінз, Ю. Гуляєв, К. Інгебригцен та Е. Пейдж були нагороджені премією Хьюлетт-Пакарда Європейського фізичного товариства за розробку фізичних основ. [4]

Мета роботи полягала в дослідженні сенсорів фізичних величин на основі акустоелектронних ефектів та втіленні узагальнених результатів у вигляді тренажеру для здобувачів освіти.

РОЗДІЛ 1. СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ ЕФЕКТІВ

1.1 Акустоелектроніка в техніці

Акустоелектроніка – взаємодія акустичних хвиль з електронами провідності в твердих тілах, яка дозволяє створювати різноманітні сенсори на основі акустоелектронних ефектів. До напрямків розвитку акустоелектроніки можна віднести: цифрові фільтри, смугові фільтри, дисперсійні фільтри.

Сьогодні застосування фільтрів дуже широке. Вони використовуються в побутових пристроях (телевізори, мобільні телефони, системи GPS, цифрове кабельне телебачення, радіолокаційні системи, супутниковий телекомунікації, а також при обробці сигналів у режимі реального часу). Телекомунікаційна галузь є найбільшим споживачем фільтрів в першу чергу для мобільних телефонів, базових станцій, радарів, потім у галузі радіочастот, осциляторів для телевізорів, а також при обробці сигналів. Також як маркери для дистанційної ідентифікації будь-яких об'єктів від споживчих товарів до літаків, ракет, поїздів, автомобілів тощо аж до особистої ідентифікації.

Серед основних підприємств, що виробляють акустоелектронні вироби, є такі відомі компанії, як Murata, Kyoto Ceramics, Fujitsu, Hitachi, NEC, Samsung, Thompson, Vectron, Motorola, Siemens " та багато інших.

Що ще ми можемо віднести до напрямків розвитку: лінії затримки, лінії затримки дисперсії, резонатори та генератори, пристрої для кодування та декодування сигналів, синтезатори частоти, пристрої для згортки та кореляції сигналів, датчики та ін. Також в наступні роки розвиток буде пов'язаний із використанням п'єзоелектричних напівпровідників або п'єзоелектричних напівпровідникових шаруватих структур, розглянемо деякі:

1. Підсилювач шляхом надзвукового дрейфу електронів. Найкращий результат (центральна частота 280 МГц) порівнянний з характеристиками транзисторів і свідчить про те, що цей підсилювач знайде свою нішу, тим більше,

що він має деякі переваги, такі як повна електрична ізоляція вхід з виходу.

2. Так званий акустоінжекційний транзистор в якому коефіцієнт посилення сигналу досягається модулюванням провідності області між колекторними електродами в результаті згущення електронів акустичною хвилею, що генерується вхідним сигналом. Перші експериментальні результати показують перспективність цього пристрою.

3. Пристрої акустичної хвилі з передачею заряду.

4. Конвертери на основі поперечного акустоелектронного ефекту. Нові ефективні конструкції цих пристроїв дозволяють сподіватися на їх широке використання для розпізнавання сигналів та іншої обробки інформації. Ще одним перспективним пристроєм є пристрій зчитування зображень, що використовує короткі акустичні імпульси, що поширюються в шаруватій структурі п'єзоелектричного - світлочутливого напівпровідника і викликають локальний поперечний акустоелектричний ефект.

5. Пристрої пам'яті, засновані на ефекті захоплення вторинних електронів, вибитих зовнішнім імпульсним електронним пучком, у поверхневий шар п'єзоелектрика відповідно до розподілу потенціалу. Виглядає так, ніби ПАХ «зупинилася» на деякий час (години або дні - залежно від залишкової провідності п'єзоелектрика). Зчитування "записаної" інформації здійснюється шляхом подачі на поверхню чергового короткого імпульсу електронного пучка, який замикає п'єзоелектричні поля.

1.2 Розповсюдження акустичних хвиль в твердому тілі

У ранніх експериментах п'єзоелектричним матеріалом був кварц. Акустичний вихід хвилі був низьким, оскільки кварц має низький рівень коефіцієнта п'єзоелектричного зв'язку, який є фактором визначення зв'язку між електричними та акустичними сигналами. Наразі, при виборі матеріалу для

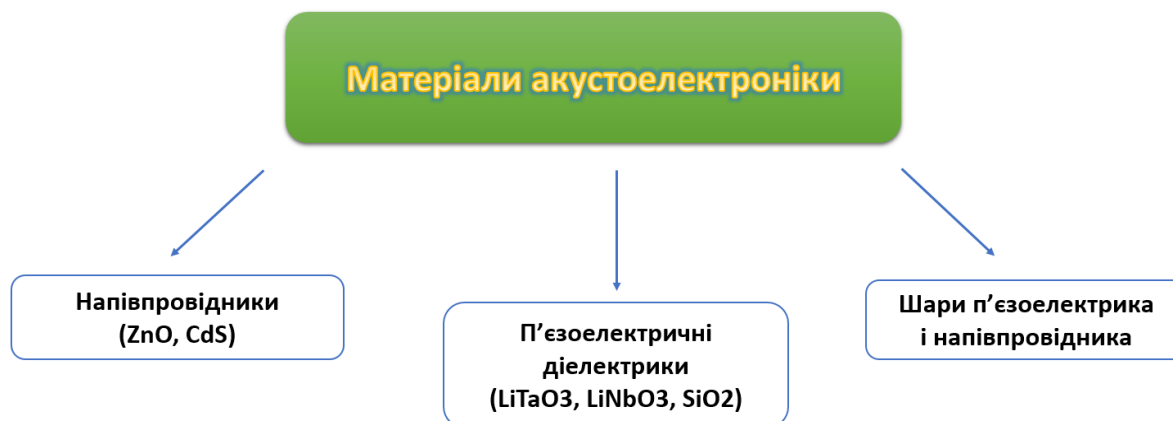


Рисунок 1.1 – Класифікація матеріалів акустоелектроніки

датчиків, необхідно шукати матеріал з високим коефіцієнтом фазової швидкості поверхневої хвилі та низьким температурним коефіцієнтом (якщо це не датчик температури) (рис. 1.1). Ніобат літію (LiNbO_3) і тантал літію (LiTaO_3), арсенід галію (GaAs) і фосфат галію (GaPO_4), карбід кремнію (SiC), оксид цинку (ZnO) нітрид алюмінію (AlN) та фосфат алюмінію (AlPO_4), тетраборат літію ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), титанат цирконію свинцю (PZT) та інші [5].

Основні переваги акустичних хвиль – мала швидкість поширення (приблизно в 10^5 разів менше швидкості поширення електромагнітних хвиль) і відносно невеликі втрати на поглинання і електромеханічне перетворення.

Варіації фазової швидкості акустичної хвилі можна віднести до:

- внутрішні фактори, такі як властивості матеріалу, щільність, еластичність, фазове перетворення, в'язкість, провідність, зміни концентрації та рухливості носія;
- зовнішні фактори, такі як масове навантаження, температура, деформація, тиск, деформація, напруга, вологість, значення ультрафіолетові джерела, зовнішні електричні або магнітні поля та інжекція заряду

Швидкість акустичної фази v пов'язана з резонансною частотою:

$$f_r = \frac{v}{k}, \quad (1.1)$$

де k - довжина хвилі.

Зміна акустичної швидкості приводить до зміни резонансної частоти. Наступне співвідношення показує різні джерела, які можуть сприяти зміні швидкості акустичної фази:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta v}{v_{\text{acoustic}}} = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Delta \sigma + \frac{\partial v}{\partial c} \Delta c + \frac{\partial v}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial v}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial v}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial v}{\partial \rho} \Delta \rho \dots \right) \quad (1.2)$$

Вищевказане рівняння передбачає, що будь-які зовнішні збурення, перераховані нижче, малі; де Δm - це зміна масового навантаження; $\Delta \sigma$ - зміна провідності; Δc - зміна механічної константи; $\Delta \epsilon$ - зміна діелектричної проникності; ΔT - зміна температура; ΔP - зміна тиску; $\Delta \rho$ - зміна щільності.

Критичними параметрами датчика акустичної хвилі є чутливість, час відгуку, стабільність, відтворюваність, реверсивність, багаторазове використання, діапазон динамічних випробувань, межі зондування, надійність та гнучкість, а також проблеми із витратами та екологією, такі як температура і вологість.

Чутливість датчика акустичної хвилі S_r до будь-якого зовнішнього збурення x визначається як:

$$S_r = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{f \Delta x} = \frac{df}{f dx}, \quad (1.3)$$

де Δf – зсув частоти, викликаний Δx , – зміна або збурення таких факторів, як температура, тиск, маса, щільність, в'язкість або провідність.

Коли п'єзoeлектричний матеріал використовується як датчик для визначення маси, частота зміни може бути виражена як

$$\Delta f = \frac{2\Delta m f_r^2}{A\sqrt{\rho\mu}}, \quad (1.4)$$

де μ - співвідношення маса / площа; ρ - щільність матеріалів; A - площа поверхні.

Рівняння вказує на те, що збільшення резонансної частоти та зменшення базової маси та площі поверхні пристрою збільшить чутливість гравіметричних датчиків акустичної хвилі.

В твердих тілах можуть розповсюджуватися об'ємні та поверхневі акустичні хвилі (рис. 1.2). Об'ємні акустичні хвилі - поширюються в повному обсязі твердого тіла.

На їх основі виготовляють пристрої: запам'ятовування частоти, генератори, широкосмугові та вузькосмугові твердотільні лінії затримки. Також широкого застосування набули кварцово-кристалічні мікроваги які виготовляються з об'ємного п'єзоелектричного матеріалу, переважно з використанням кристалу кварцу затиснутого між двома металевими електродами як правило золотом.

Поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) – це хвилі, що поширюються в однорідному середовищі з вільною плоскою поверхнею та їх амплітуда зменшується експоненціально з глибиною. До пристроїв можна віднести резонатори та генератори на поверхнево акустичних хвилях, широкосмугові та вузькосмугові фільтри, лінії затримки на ПАХ, синтезатори частот, дисперсійні фільтри, пристрої запам'ятовування, комутуючі пристрої [6].

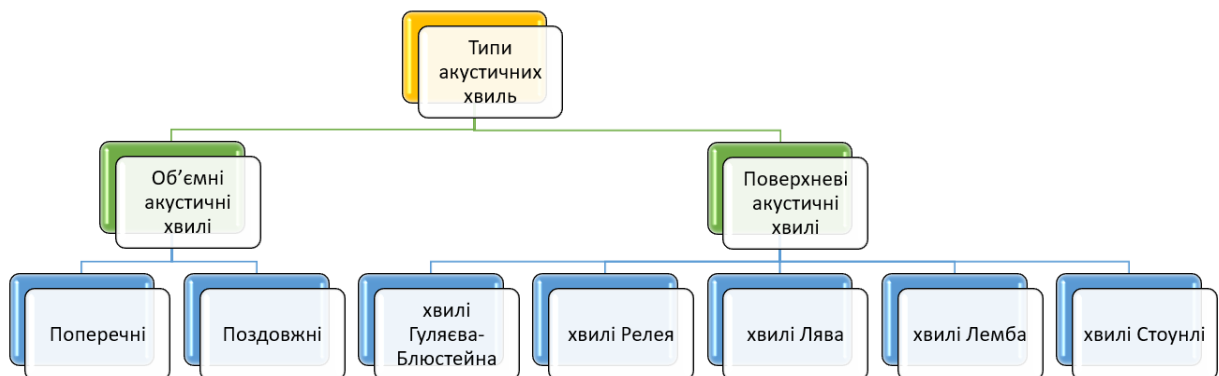


Рисунок 1.2 – Основні види акустичних хвиль, що розповсюджуються в твердому тілі

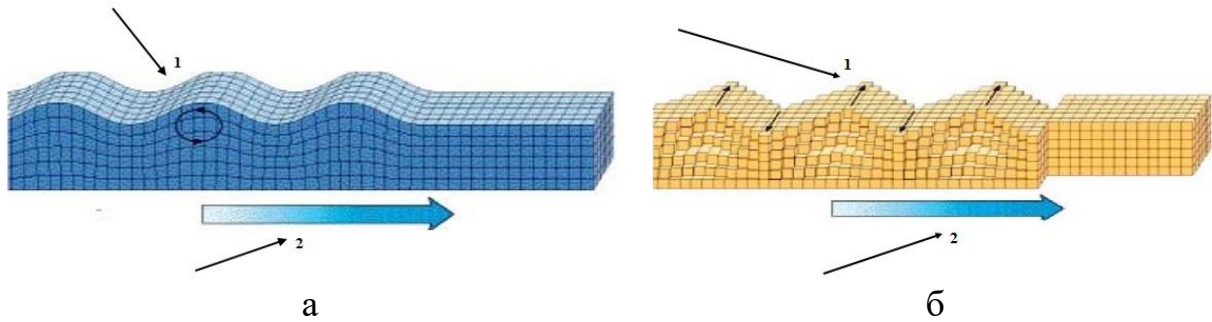


Рисунок 1.3 – Хвиля Релея (а) та Хвиля Лява (б): 1 – напрямок розповсюдження; 2 – напрям руху частинок. Адаптовано з роботи [9].

Швидкість ПАХ становить 3-4 км/сек, тобто на 4 порядки менше швидкості електромагнітної хвилі. Цим обумовлені габарити пристроїв на ПАХ, менші на 2-3 порядки в порівнянні з електромагнітними аналогами. До основних поверхнево акустичних хвиль відносять (рис. 1.3): хвилі Гуляєва-Блюстейна, Релея, Лява, Стоунлі [7].

На перший погляд, Релеєві хвилі схожі на поверхневі хвилі у воді, але при уважному спостереженні можна помітити, що рух їхніх частинок різний. У водяній хвилі кожна частинка робить кругові рухи у напрямку поширення хвилі. У хвилі Релея частинки здійснюють еліптичний рух проти напрямку поширення. Отже, їх рух є ретроградним [8].

У хвилях Лява було досліджено, що частинки взагалі не рухаються обертально. Натомість вони смикаються вперед-назад перпендикулярно до напрямку поширення хвилі [9].

В основі біосенсорів для проведення точних вимірів в рідких умовах лежать хвилі Лява [10].

1.3 Зустрічно-штирьові перетворювачі

П'єзоелектричний ефект – це поява електризації на поверхні матеріалу, коли він піддається механічним навантаженням. Цей процес є оборотним: при

прикладанні до п'єзоелектричного матеріалу певного електричного поля створюється механічне напруження. У п'єзоелектричних елементах застосовується змінне (коливальне) електричне поле, щоб створити механічну хвилю, яка поширюється через п'єзоелектричну підкладку, а потім вона знову перетворюється в електричний сигнал, який реєструється.

П'єзоелектричні плівкові матеріали мають найбільший коефіцієнт п'єзоелектричної проникності та коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Однак плівки мають недоліки для біосенсорних застосувань, такі як високе акустичне затухання, низькоякісний фактор, великі втрати енергії, низька швидкість звукової хвилі, погана біосумісність. [11] Один із методів збудження поверхневих хвиль є метод використання перетворювачів зустрічних штирів.

Зустрічно-штиркові перетворювачі (ЗШП) (рис.1.4) поверхневих акустичних хвиль складаються з великої кількості металевих смуг, розміщених на підкладці п'єзоелектричного кристала за допомогою мікроелектронних технологій. Їх основне призначення - розподілити електричне поле, яке подається до перетворювача шини над поверхнею основи специфічним чином, визначаючи частоту перетворювача у сформованих ПАХ [12].

Без плівки ємність ЗШП визначається за формулою:

$$C_T = (N - 1)C_S W, \quad (1.5)$$

де, C_S – ємність на одиницю довжини електрода; N – число електродів ЗШП; W – апертура ЗШП.

За наявності плівки ємність зустрічно – штирвового перетворювача визначається за формулою:

$$C_L = \varepsilon_0 \varepsilon_L \left(\frac{h'}{r} \right), \quad (1.6)$$

де $r=d/2b$ – коефіцієнт металізації ЗШП; ε_L – діелектрична проникність плівки; b – відстань між електродами; d – ширина електрода; h' – висота електрода.

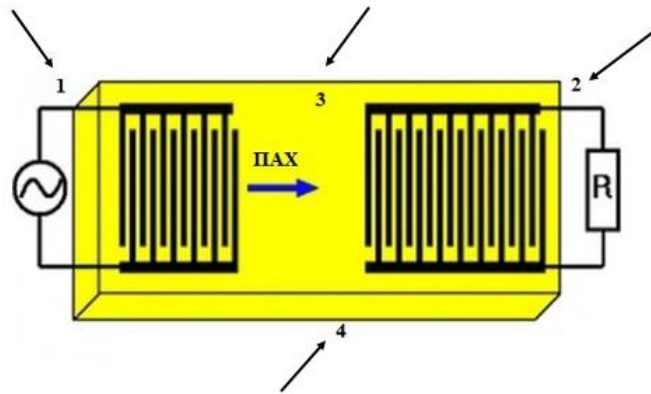


Рисунок 1.4 – Пристрій на ПАХ з зустрічно-штирьовими перетворювачами: 1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – напрям ПАХ; 4 – п'єзоелектрична підкладка. Адаптовано з роботи [13]

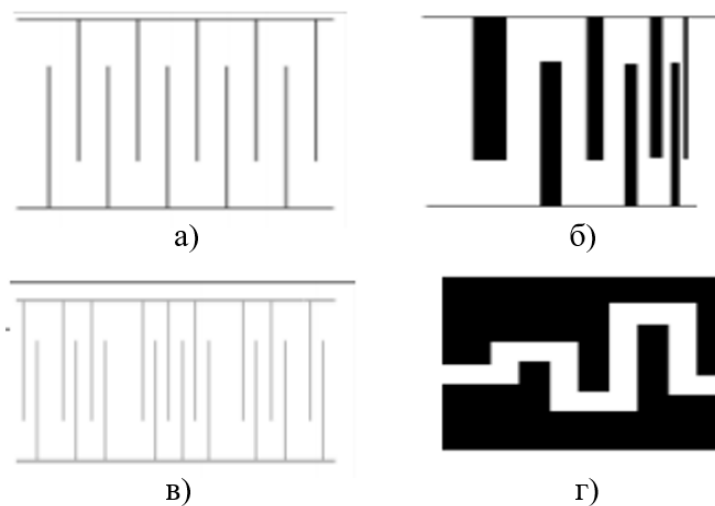


Рисунок 1.5 – Різновиди ЗШП: а – еквідістантний; б – нееквідістантний; в – неоподизований; г – аподизований перетворювачі. Адаптовано з роботи [14].

Відбивні структури призначені для відображення та заломлення хвиль і часто використовуються для зміни траєкторії поширення хвиль. Відбивачами поверхневих АХ служать будь-які нерівності і неоднорідності поверхні підкладки. Контрольоване відображення хвиль забезпечується застосуванням систем відбивачів, відстань між котрими погоджено з довжиною акустичних хвиль. Найбільше розповсюдження отримали відбивачі у вигляді металевих електродів або канавок.

Змінюючи форму ЗШП, а саме кількість та ширину штирів, площу перекриття, можна створювати необхідні параметри поверхневих хвиль. Види перетворювачів: еквідістантний перетворювач (з однаковими відстанями між штирями), нееквідістантний перетворювач (з різними відстанями між штирями), неаподизованний перетворювач (з однаковими перекриттями штирів), аподизованний перетворювач (з різним ступенем перекриття штирів) (рис. 1.5).

1.4 Застосування ПАХ в електроніці

Якщо розглянути технологію поверхнево акустичної хвилі (рис.1.6) на сенсорному дисплеї то можемо побачити, що:

- п'єзоелектричні елементи розміщуються в кутках дисплею;
- відбивачі розповсюджують хвилю рівномірно по дисплею;
- дотик до екрану викликає поглинання хвиль;
- сенсори фіксують зміни в ПАХ;
- контролер визначає координати дотику.

Незважаючи на те, що ультразвукові сканери почали використовуватися на смартфонах (рис. 1.7) пізніше всіх, сама технологія використовується дуже давно в інших галузях. Сканування відбитка пальця відбувається за допомогою ультразвуку.

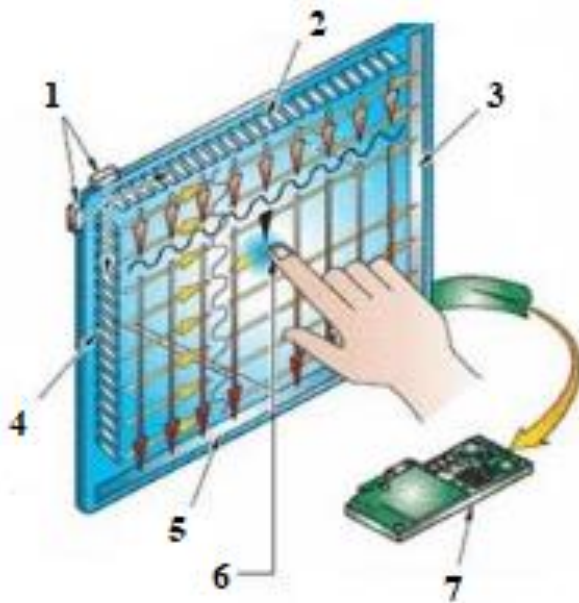


Рисунок 1.6 – Технологія поверхнево акустичної хвилі на сенсорному дисплеї: 1– п'єзоелектричні перетворювачі ; 2 – відбивачі звукових хвиль; 3 – сенсор; 4 – відбивачі звукових хвиль; 5 – сенсор; 6 – дотик поглинає частину енергії ПАХ; 7 – контролер. Адаптовано з роботи [15]

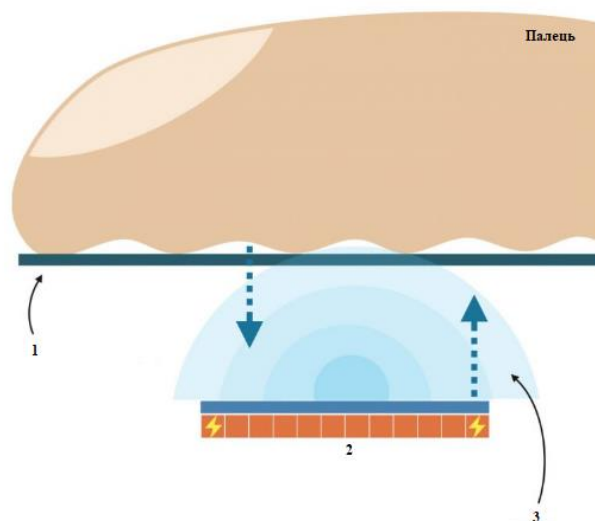


Рисунок 1.7 – Ультразвуковий сканер відбитку пальців: 1 – захисне скло, 2 – ультразвуковий сканер; 3 – звукові хвилі. Адаптовано з [16]

Поширення хвиль відбувається через захисне скло екрану, де ультразвукові хвилі і стикаються з перешкодою – нашим пальцем. Одні хвилі відіб'ються ще від скла і повернуться в п'єзoeлектрик, інші – пройдуть трохи далі і зіткнуться з горбками на шкірі – відбиток (рисунок) пальця і знову повернуться на сканер, інші хвилі підуть далі і заповнять простір між западинами відбитка і склом, а потім знову відіб'ються і повернуться на датчик. Повертаючись на п'єзoeлектрик, хвиля «вдаряє» по його поверхні і зі зворотного боку з'являється електричний заряд.

Історично давно датчики використовувались для вимірювання величин важливих у повсякденному житті таких як температура, тиск та вага. Потім були розроблені датчики для розширення зондування можливості людей. Сюди входили світлочутливі пристрої у спектральних діапазонах, дуже складні слухові апарати, тактильні датчики та датчики, що імітують наш смак і сприйняття запаху та інші. Особливо останні, нюхові датчики відіграють дуже важливу роль у виявленні хімічних, токсичних речовин отрути, забруднювачів, хімічних та біологічних бойових та вибухових речовин, але останнім часом також для аналізу дихання (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Різновид сенсорів на основі ПАХ

Сенсори використовуються у взаємодії між водієм та автомобілем, в автономних машинах, у розумних будинках та цифровій індустріалізації.

Сьогодні датчики на основі акустоелектронних ефектів вже використовуються для ідентифікації газів, парів та рідин. За останні роки було запропоновано багато нових конструкцій датчиків із підвищеною чутливістю та селективністю, в тому числі із застосуванням нових типів. Це відкриває нові сфери застосування, включаючи виявлення токсичних речовин та наркотиків.

Типи датчиків акустичних хвиль загалом класифікуються відповідно до типів режиму збудження. Режим зсуву товщини може бути використаний як для газу, так і для рідини фази, широко відомі як (мікробаланс кварцових кристалів). Водотоннажність поверхнево акустичних хвиль складається з переміщення в напрям розповсюдження хвилі і те, що у напрямку нормальний до основи, через нормальне переміщення. Енергія випромінюється в рідину [17].

До систем моніторингу газових сумішей зарубіжних фірм належать: Великобританія: EEV Ltd., Chemical Sensors System, Франція: Alpha, MOS-Multi, Organoleptic, Німеччина: Rst Rostock.

Для прикладу можна розглянути принцип роботи сенсора для визначення газової суміші.

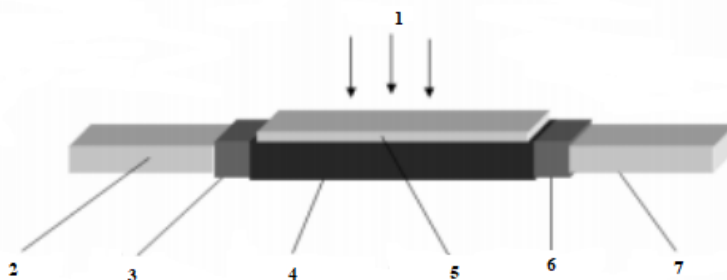


Рисунок 1.9 – Будова п'єзоелектричного сенсора на основі поверхнево акустичних хвиль: 1 – газ; 2 – електрод; 3 – вхідний перетворювач; 4 – п'єзоелектрична пластина; 5 – полімерна плівка; 6 – вихідний перетворювач; 7 – електрод. Адаптовано з роботи [18]

На поверхні п'єзоелектричної пластини, яка покрита полімерною мембраною швидкість поширення акустичної хвилі буде залежати від маси мембрани, яка в свою чергу поглинає аналізуючий газ. Зсув фаз між фазою змінного електричного струму, який збуджує поверхневу хвилю, і фазою струму на виході вторинного і буде інформаційним параметром даного сенсору [18].

Біосенсори на основі акустoeлектронних ефектів є дуже привабливими, оскільки вони відповідають науковим та комерційним вимогам, щодо простого та надійного використання [19].

Більшість біосенсорів працюють з горизонтальними хвилями. Сьогодні проводиться багато досліджень у галузі нових матеріалів, які наносяться на п'єзoeлектричну підкладку, що має високу хімічну стійкість та біоінертність, наприклад алмаз. Також багато важливих світових лабораторій працюють над вдосконаленням цих датчиків, їх мініатюризацією, оптимізацією захисного шару та їх використанням *in vivo* [20].

Прикладом є біосенсор розроблений у дослідницькому центрі у Франції. Розміри датчика становлять 3x4 мм, як підкладка – кварц, з нанесеними електродами з Al, що покриті шаром Si і шаром Au. Фазова діаграма показує затримку $0,7^\circ$ щодо H_2O , що є результатом утворення мономолекулярного шару жиру. Він може використовуватися для вимірювання згортання крові під час складних хірургічних процедур, де потрібен надійний прилад з швидкою реакцією, який надає дані про виміряні величини [21]. Діаграма зміни фаз дозволяє знайти дані мініатюрних пристроїв на основі елементів поверхнево акустичних хвиль, а бездротова передача даних використовується для вимірювання температури *in vivo* [22].

На сьогодні дуже необхідні швидкі діагностичні тести на інфекційні захворювання такі як грип, ВІЛ / СНІД, хронічні захворювання, вагітність, рак тощо. Тому до сенсорів швидкої діагностики висувається ряд вимоги: портативність, низька вартість за тест, максимальна чутливість, простота використання, можливість самостійного використання пацієнтами. Багато

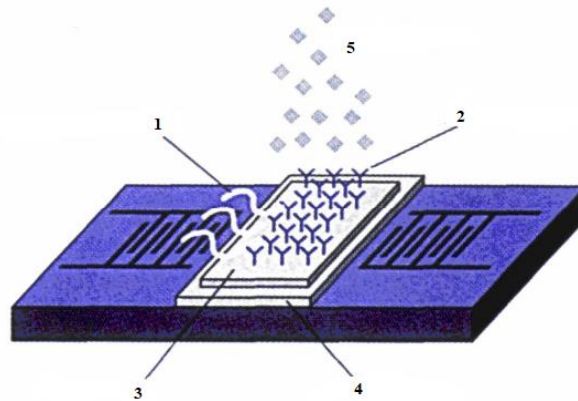


Рисунок 1.10 – Біосенсор на основі поверхнево-акустичних хвиль для діагностики раку: 1 – збуджуючі акустичні хвилі; 2 – антитіла; 3 – шар для підсилення сигналу; 4 – шар золота; 5 – цільовий антиген. Адаптовано з роботи [24]

систем були реалізовані як тест-смужки на основі мембрани, часто закриті пластиковою касетою. Однак на мембранній основі тестові-смужки мають недоліки через їх візуальне зчитування. З іншого боку, біосенсори на основі імунологічного аналізу можуть бути одноразовими, недорогими і придатний для масового виробництва [23]. Електричний зчитувач розміром з долоню підключений до сенсорного пристрою потрібен для виявлення антитіл або інших реакцій.

Розглянемо приклад біосенсора на основі поверхнево-акустичних хвиль для проведення діагностики раку (рис.1.9). Антитіла, які зв'язують антигени, розміщені на золотій пластинці з допомогою полімерного покриття з тіолу або силану. Саму золоту пластинку розміщують на кремнієвій підкладці. Зміна маси структури приводить до відповідної зміни резонансної частоти ПАХ, по величині якої визначають концентрацію антигенів, що дозволяє достатньо точно провести діагностику ракової пухлини.

Для порівняння можна розглянути роботу біосенсора, де золото розміщується на кварці (рис. 1.10). Шар підкладки (I) – це кварц, металевий шар (II) – це золота плівка з товщиною 92 нм, і шар рідини (IV) – ньютонівська



Рисунок 1.11 – Приклад розташування шарів біосенсора на основі кварцу в рідкому середовищі: 1 – кварц; 2 – шар золота; 3 – біоматеріал; 4 – рідина. Адаптовано з роботи [25]

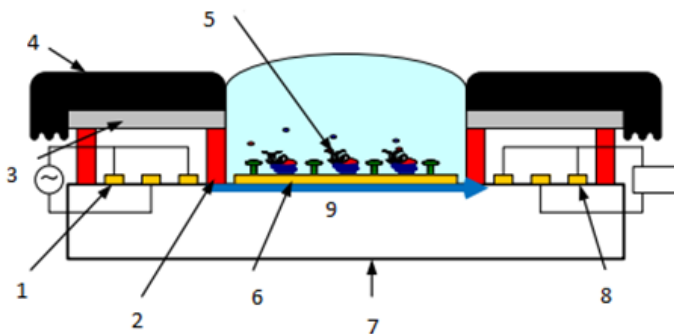


Рисунок 1.12 – Поперечний переріз біосенсора: 1 – перетворювачі з плаваючими електродами; 2 – стінка; 3 – скляна кришка; 4 – смола; 5 – інтерфейс біореакції; 6 – золото; 7 – кварц; 8 – перетворювачі з плаваючими електродами; 9 – хвиля. Адаптовано з роботи [25]

рідина (рідини великої в'язкості, розплави полімерів, тверді суспензії) [25]. Шар біоматеріалу (III) являє собою іммобілізований шар біомолекули, такий як антитіло, фермент і ДНК. Рідкий шар і підкладка розглядаються як напівнескінченні шари, тоді як плівка золота та біоматеріал розглядається як скінченний шар.

Бездротові температурні датчики застосовуються в автоматизованих системах керування літаків, кораблів та контролю двигуна. До основної проблеми створення таких датчиків є дуже маленький вибір матеріалу. До них належить танталат літію (LiTaO_3), ніобат літію (LiNbO_3) та кварц. Із досліджень також є сімейство кристалів ланганат (LGT) та лангасит (LGS). Для створення високотемпературного датчика такі матеріали як тантал літію та кварц не підходять, бо температура Кюри танталата літію (938K) буде низькою. А якщо взяти кварц з температурою фазового переходу (846K), тоді α -кварц перейде в β -кварц. Ніобат літію (1438K) за температури Кюри мав би право на використання, але його власна провідність дуже зростає при 1165K, і вона може привести до замикання в п'єзоелектричному звукопроводі. Тож залишається тільки використання ланганата та лангасіта. Вони мають гарні п'єзоелектричні властивості до 1273K та високу температуру плавлення.

Датчик вологості використовує оксид графена як чутливий матеріал. Оксид графену має високий вміст гідрофільності [26]. Коли волога в повітрі проникає в оксид графену, швидкість звукової хвилі змінюється при проходженні через сенсорну плівку; таким чином реєструється вологість [27].

РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

2.1 Розрахунки смугового фільтра на ПАХ

Важливим параметром в пристроях на акустичних хвилях є величина втрат, яка приводить до ослаблення обробки самого сигналу.

До основних критеріїв втрат відносять:

- загасання поверхнево-акустичних хвиль в підкладці;
- двоспрямованість вихідного та вхідного ЗШП;
- загасання в електродах перетворювача сигналу;
- дифракційна розбіжність акустичного пучка;
- неузгодженість ЗШП з внутрішніми електричними ланцюгами.

Виконаємо розрахунок смугового фільтра та визначимо його коефіцієнти втрат, якщо дано: $f_0 = 1,8$ МГц; $\frac{\Delta f}{f} = 20\%$; $R_{\text{випр}} = 60$ Ом.

1. Застосовуючи умову забезпечення смуги пропускання, визначимо необхідну кількість пар електродів N :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{N} \rightarrow N = \frac{1}{\frac{\Delta f}{f_0}} = 5.$$

Використовуючи табличні дані визначаємо матеріал підкладки, у якого N_0 буде близьким до N . Підходить ніобат літію, де швидкість поширення в акустичних хвиль $\vartheta_a = 3,49 \cdot 10^3$ м/с. Наступним етапом треба визначити довжину хвилі.

$$\lambda_a = \vartheta_a \cdot \frac{1}{f_0} = 3,39 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^6} \approx 210 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

2. Визначаємо період розміщення електродів, щоб він дорівнював довжині акустичної хвилі.

$$h = \frac{\lambda_a}{dx} = \frac{210 \cdot 10^{-6}}{2} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

3. Розраховуємо довжину електродів:

$$b = \frac{h}{2} = \frac{105 \cdot 10^{-6}}{2} = 52,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

4. Знаходимо апертуру W для ніобату літію

$$\frac{W_0}{\lambda_a} = M_0 = 17 \rightarrow W_0 = M_0 \cdot \lambda_a = 17 \cdot 210 \cdot 10^{-6} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розраховуємо шукану апертуру, яка відповідає опору випромінювання

$$R_{\text{випр}} = 60 \text{ Ом}$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{R}{R_0} \rightarrow W = W_0 \cdot \frac{R_{\text{випр}}}{R_0} = 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60}{50} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$$

5. Як матеріал електродів вибираємо алюміній – він широко застосовується для виготовлення комутацій ІМС. Для поглиначів – оксид хрому.

6. Так як товщина комутації (≈ 1 мкм), то товщина електродів повинна бути близькою до цього числа.

7. Для того щоб визначити втрати енергії потрібно розрахувати коефіцієнт η . Опір випромінювання з навантаженням $R_H = R_{\text{випр}} = 60 \text{ Ом}$

$$\eta = \frac{R_H}{R_{\text{випр}}} = \frac{60}{60} = 1.$$

Визначаємо коефіцієнт розсіювання:

$$T_{11} = \frac{1}{(1 + \eta)^2} = \frac{1}{(1 + 1)^2} = \frac{1}{4};$$

$$T_{12} = \frac{\eta^2}{(1 + \eta)^2} = \frac{1}{(1 + 1)^2} = \frac{1}{4};$$

$$T_{13} = \frac{2\eta}{(1 + \eta)^2} = \frac{2}{(1 + 1)^2} = \frac{1}{2};$$

Для знаходження втрат енергії на електромеханічному відбиванні, рівняння:

$$B_{11} = -10 \log T_{11} = -10 \log \frac{1}{4};$$

$$B_{12} = -10 \log T_{12} = -10 \log \frac{1}{4};$$

$$B_{13} = -10 \log \frac{1}{2}.$$

Щоб визначити сумарні втрати енергії:

$$B = B_{11} + B_{12} + B_{13} = -10 \left(\log \frac{1}{4} + \log \frac{1}{4} + \log \frac{1}{2} \right) = -10 \log \frac{1}{32} = 25 \text{ дБ.}$$

Опис конструкції проектного фільтру:

Фільтр містить один вхідний перетворювач і один вихідний. Вхідний перетворювач - еквідистантним неаподизований широкопуговий, число пар штирів - 2. Вихідний перетворювач - нееквідистантний аподизований з числом пар штирів - 10.

Матеріалом для звукопровіда проектного фільтру на ПАХ є ніобат літій з орієнтацією ZY. Клас обробки звукопровіда - V13. Розміри підкладки $22,5 \times 10,5 \times 1,5$ мм.

Матеріалом виготовлення штирів перетворювачів є алюміній А99 ГОСТ11069-64, з міркувань найменшої вартості. Для поліпшення адгезії використовується шар ванадію. Для захисту від впливу навколишнього середовища елементи конструкції ЗШП покриваються захисним матеріалом - фоторезист негативний ФН-11 ТУ6-14-631-71. В якості матеріалу для поглиначів використовується епоксидна смола ЕД-5 ГОСТ10587-75.

Проектований фільтр виготовляють за методом прямої контактної фотолітографії.

Для герметизації фільтра використовується металоскляний прямокутний корпус з ковара, шнуром виводами типу 1210 (157.29-1), відповідний по типу-розміру ГОСТ17467-79.

2.2 Розробка схеми індикації руху об'єктів

Метою створення схеми індикації руху об'єктів було показати застосування датчиків (ультразвукових дальномірів) в реальних умовах. Моделювання здійснювалося в середовищі Autodesk Tinkercad – платформа яка класифікується як програмне забезпечення для 3D-моделювання та створення моделей, які можна реалізувати за допомогою 3D-принтер. Також його можна використовувати для створення моделей електричних схем, що складаються з різних електронних компонентів або для написання кодів [28].

Все створює звукову хвилю лише завдяки існуванню та впливає на потік повітря навколо них з їх природною частотою. Ці частоти перевищують діапазон слуху людей. Хвиля в діапазоні частот 20000 Гц і поблизу них називаються ультразвуковою хвилею і ці хвилі можна виявити за допомогою ультразвукового датчика, який допомагає нам отримати різні знання. Ультразвуковий детектор зазвичай має перетворювач, який перетворює звукову енергію в електричну, а електричну в звукову. Вони використовуються для вимірювання положення та орієнтації об'єкта, системи запобігання зіткненням, системи спостереження і т.п.

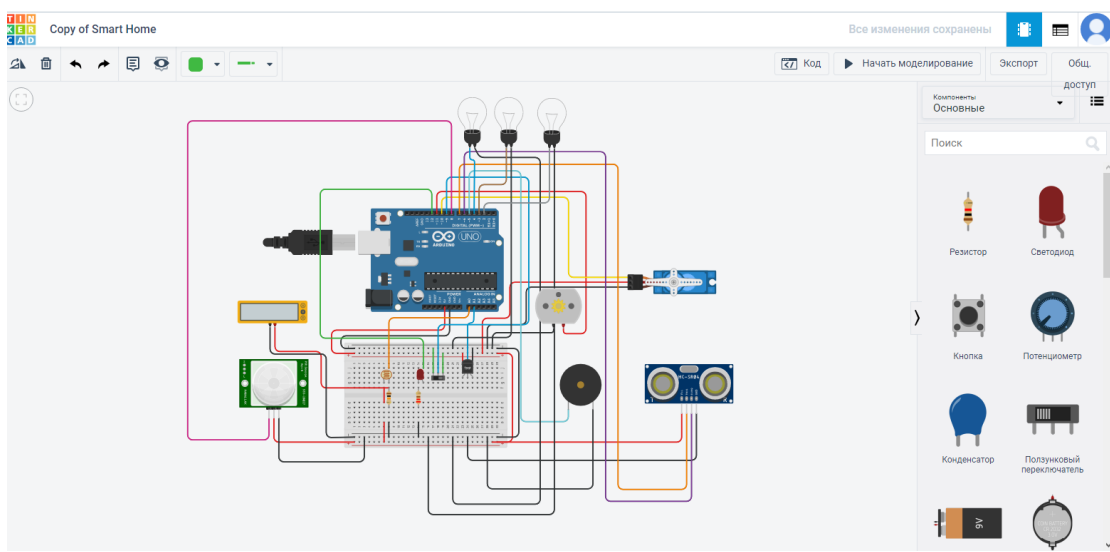


Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми Autodesk Tinkercad та змодельована схема індикації руху об'єктів

Ультразвукова технологія забезпечує полегшення такої проблеми, як проблема лінійних вимірювань, оскільки дозволяє користувачеві отримувати безконтактні вимірювання при цьому шлях відстані між об'єктом та його швидкістю тощо можна легко виміряти.

Швидкість руху звукової хвилі залежить від квадратного кореня співвідношення середньої щільності та жорсткості. Також, властивість швидкості звуку може також можуть змінюватися внаслідок природного середовища, наприклад температури [29].

Отже, в основному ультразвуковий датчик посилає ультразвукові хвилі, які рухаються в повітрі і відображаються після удару по будь-якому предмету. Вивчаючи властивість відбитої хвилі, ми можемо отримати знання про відстань об'єктів, положення, швидкість тощо [30].

Апаратна система складається в основному з 3-х компонентів, названих Arduino, серводвигуном та ультразвуковим датчиком. Ультразвуковий датчик змонтований на сервомотор, який допомагає йому рухатися і забезпечує йому поворотний механізм. І ультразвуковий датчик, і сервомотор управляються і живляться через плату Arduino – це електронна платформа з відкритим кодом, заснована на простому у використанні апаратному та програмному забезпеченні. Він працює на Windows, Mac OS X та Linux. Середовище написано на Java та базується на обробці та іншому програмному забезпеченні з відкритим кодом. Це програмне забезпечення можна використовувати з будь-якою платою Arduino. Програмне забезпечення Arduino містить текстовий редактор для написання коду, області повідомлень, текстової консолі, панелі інструментів з кнопками загальної функції.

В ланцюгу знаходиться дисплей з метою діагностики та усунення несправності електричних та електронних схем.

Контроль руху також відбувається і піроелектричним датчиком, що є пасивним інфрачервоним сенсором. Він здатний вимірювати лише повторні зміни, що створюються іншими об'єктами навколо нього. При фіксації

спрацьовує система оповіщення через світлову та звукову сигналізацію.

2.3 Розробка тренажера по вивченню акустичних хвиль та їх застосування

Scratch – це мова програмування, заснована на блоках, її можна використовувати для створення ігор, інтерактивної анімації, історій та наукових моделювань. Запущений у травні 2007 року сайт Scratch зріс до більш ніж 6,8 мільйона зареєстрованих членів, і понад 13 000 проєктів Scratch завантажуються щодня. Scratch розглядають як шлюз до мови програмування Java.

Спрайти - скретч-код організований у „спрайти”: двовимірні картинки, кожна з яких має свій власний вихідний код.

Скрипт – вихідний код у спрайтах упорядкований у сценарії: сценарій завжди починається з події, за якою слідує кількість блоків. Скрипти мають дві різні відмінності сценаріїв, один починається з натискання зеленого прапорця, а другий – натискання пробілу. Також є можливість мати один спрайт на кілька сценаріїв, ініційованих однією і тією ж подією. У такому випадку всі сценарії виконуватимуться одночасно [32].

Розробка тренажера по вивченню акустичних хвиль та їх застосування була виконана в програмі Scratch. Мета тренажера полягає в ознайомленні й навчанні здобувачів освіти з акустичними хвилями у мультиплікаційному форматі. Саме через яскравий інтерфейс програми Scratch привертається зацікавленість та увага у вивченні більш складних фізичних наук.

Тренажер включає в себе ознайомлення з типами акустичних хвиль та їх класифікацією. За допомогою анімацій показано приклади руху хвиль та їх частинок. А також представлено рух цих хвиль в об’ємному тілі.

Структура матеріалу тренажера. Вступне слово ведучої про акустоелектроніку. Інформація про об’ємні хвилі (поперечні та поздовжні) та поверхневі: Релея та Лява. Далі наводяться конструктивні складові біосенсору

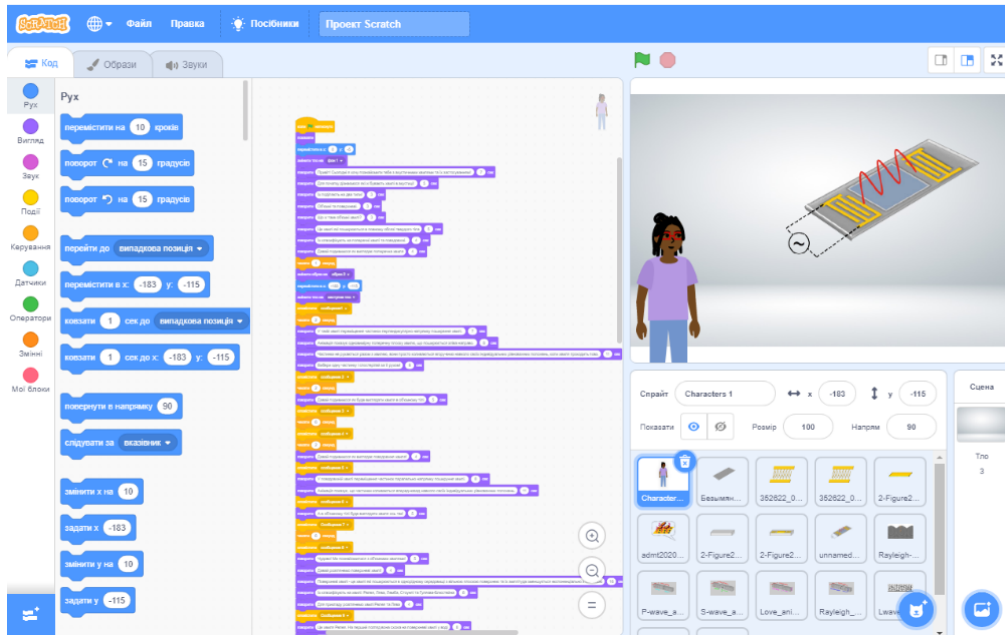


Рисунок 2.2 – Тренажер по вивченню акустичних хвиль та їх застосуванню

для визначення ракових клітин.

Головним героєм тренажеру є дівчинка (спрайт), яка ілюструє акустичні хвилі та розповідає про них. (рис. 2.2)

На основі вивченого матеріалу пропонується створити імітацію біосенсора в якому для роботи застосовується одна з вивчених хвиль. У процесі створення розглядаються елементи з яких саме складається даний датчик.

Для створення такого тренажеру була використана палітра блоків: керування, події, вигляд та рух. За допомогою яких спрайт говорить, переміщується та змінює образи.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра було досліджено акустoeлектронні сенсори фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях.

1. Сенсорні пристрої на ПАХ використовуються для вимірювання, контролю та керування фізичними параметрами: відстані, температури, тиску, величини магнітного поля, вологості, тощо. Вони знаходять застосування у сучасній радіотехніці і радіозв'язку, в системах глобального орієнтування GSM, цифрового та локального бездротового зв'язку і т. п.
2. Показано, що варіації фазової швидкості акустичної хвилі залежать від багатьох внутрішніх факторів (властивості матеріалу, щільність, еластичність, фазове перетворення, в'язкість, провідність, зміни концентрації та рухливості носія) та зовнішніх (масове навантаження, температура, деформація, тиск, деформація, напруга, вологість, значення ультрафіолетові джерела, зовнішні електричні або магнітні поля та інжекція заряду)
3. Розглянуто принципи роботи датчиків вологості, температури, тиску та біосенсорів, що можуть бути використані при діагностиці ракових клітин, інфекційних захворювань, швидкості згортання крові.
4. Проведено розрахунок смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях, визначено сумарні втрати енергії, що становлять 25дБ і на основі отриманих результатів запропонована конструкція проектованого фільтра.
5. Розроблено схему індикації руху об'єктів в онлайн середовищі Autodesk Tinkercad з використанням ультразвукового дальноміра та піроелектричного датчика руху. У випадку наявності руху спрацьовує звукова та світлова сигналіція.
6. Розроблено тренажер по вивченню акустичних хвиль в середовищі Scratch у вигляді інформаційно-анімаційної програми, де наводяться приклади об'ємних і поверхневих хвиль та їх коливання частинок в твердому тілі. Здійснюється ознайомлення з складовими частинами біосенсору на основі золота та його принципами функціонування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Delsing, P., Cleland, A. N., Schuetz, M. J. A., Knörzer, J., Giedke, G., Cirac, J. I. Westerhausen, C. The 2019 surface acoustic waves roadmap // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2019. – P. 52(35), 353001.
- 2 Kuznetsova, I. E., Zaitsev, B. D., Shikhabudinov, A. M., Tsivileva, O. M., Pankratov, A. N., & Verona, E. Acousto-electronic gas sensor based on mushroom mycelial extracts // Sensors and Actuators B: Chemical. - 2017. –P. 243, 525–531.
- 3 Hallil, H., Aouled, N. O., Plano, B., Delepee, R., Agrofoglio, L., Dejous, C., & Rebiere, D. SH-SAW sensing system based on thin film molecularly imprinted polymer: Study of Volatile organic compounds adsorption // 28th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro 2013). - 2013.
- 4 Fakhfouri, A., Devendran, C., Albrecht, T., Collins, D. J., Winkler, A., Schmidt, H., & Neild, A. Surface acoustic wave diffraction driven mechanisms in microfluidic systems // Lab on a Chip. - 2018. – P. 18(15), 2214–2224.
- 5 Lee, B., Hong, J., Woo Kim, J., Kwak, Y. H., Kim, K., Lee, J.-W., & Ju, B.-K. Development of high-sensitivity ambient light sensor based on cadmium sulfide-deposited surface acoustic wave sensor // Sensors and Actuators A: Physical. - 2019. – P. 146– 149.
- 6 Sasaki, S. Surface Acoustic Wave // Compendium of Surface and Interface Analysis. - 2018. – P. 657–660.
- 7 Thevenard, L., Camara, I. S., Majrab, S., Bernard, M., Rovillain, P., Lemaître, A., ... Duquesne, J.-Y. Precessional magnetization switching by a surface acoustic wave // Physical Review B. - 2016. – P. 93(13).
- 8 <https://seismo.berkeley.edu/blog/2009/07/27/lord-rayleigh-and-the-love-waves.html> - Lord Rayleigh and the Love Waves, дата доступу: 21.04.2021
- 9 Trivedi, S., Nemade, H. B. Finite element simulation of Love wave resonator for DNA detection // International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics. – 2015,- V.7(4). – P. 210–218.

- 10 Mujahid, A., & Dickert, F. Surface Acoustic Wave (SAW) for Chemical Sensing Applications of Recognition Layers // *Sensors*. – 2017. – P. 17(12), 2716.
- 11 Go, D. B., Atashbar, M. Z., Ramshani, Z., & Chang, H.-C. Surface acoustic wave devices for chemical sensing and microfluidics: a review and perspective // *Analytical Methods*. - 2017. – P. 9(28), 4112–4134.
- 12 Марікуца У. Б. Технічні системи розпізнавання газів на основі електронних сенсорів // «Національний університет «Львівська політехніка», - 2008. С. 16 – 20
- 13 Fu, Y. Q., Luo, J. K., Nguyen, N. T., Walton, A. J., Flewitt, A. J., Zu, X. ., ... Milne, W. I. Advances in piezoelectric thin films for acoustic biosensors, acoustofluidics and lab-on-chip applications // *Progress in Materials Science*. - 2017. – P. 89, 31–91
- 14 Mudit Ratana Bhalla, Anand Vardhan Bhalla Comparative Study of Various Touchscreen Technologies // *International Journal of Computer Applications*. – 2010. – P. 106– 120
- 15 <https://deep-review.com/articles/fingerprint-sensors-for-dummies/> – Види сучасних сканерів відбитків пальців, дата доступу: 26.04.2021
- 16 Tang, Y., Ao, D., Li, W., Zu, X., Li, S., & Fu, Y. Q. NH₃ sensing property and mechanisms of quartz surface acoustic wave sensors deposited with SiO₂, TiO₂, and SiO₂-TiO₂ composite films // *Sensors and Actuators B: Chemical*. - 2018. – V.254. – P. 1165–1173.
- 17 Марікуца У. Б. Технічні системи розпізнавання газів на основі електронних сенсорів // «Національний університет «Львівська політехніка», - 2008. С. 16 – 20
- 18 Caliendo, C., Verona, E., & D'Amico, A. Surface Acoustic Wave (SAW) Gas Sensors. *Gas Sensors*. - 1992. – P. 281–306.
- 19 Damiani, S. Acoustic Biosensors for Cell Research. *Handbook of Cell Biosensors*, - 2020. – P. 1–32
- 20 Ji, J., Pang, Y., Li, D., Wang, X., Xu, Y., & Mu, X. Single-layered graphene/Au

- NPs-Based Love Wave Biosensor for Highly Sensitive and Specific Detection of Staphylococcus aureus Gene Sequence. *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2020. – P. 12417–12422
- 21 Lakshmanan, A., Jin, Z., Nety, S. P., Sawyer, D. P., Lee-Gosselin, A., Malounda, D., ... Shapiro, M. G. Acoustic biosensors for ultrasound imaging of enzyme activity // *Nature Chemical Biology*.- 2020. – P. 475–479.
- 22 Okuda, S., Ono, T., Kanai, Y., Ikuta, T., Shimatani, M., Ogawa, S., ... Matsumoto, K. Graphene Surface Acoustic Wave Sensor for Simultaneous Detection of Charge and Mass. *ACS Sensors*, - 2018. – V. 3(1). – P. 200–204.
- 23 Ding, X., Li, P., Lin, S.-C. S., Stratton, Z. S., Nama, N., Guo, F. Surface acoustic wave microfluidics // *Lab on a Chip*, - 2013. – V. 13(18). – P. 3626.
- 24 А. Т. Богороц, Л. П. Рибак, А. Бубулiс, Створення магнiтних бiосенсорiв для дiагностики захворювань // *Informational Technologies/* -2008. – P. 256–260.
- 25 Goto, M., Yatsuda, H., & Kondoh, J. SH-SAW biosensor on quartz // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). - 2016. – P. 144–150.
- 26 Xuan, W., Chen, J., He, X., Wang, W., Dong, S., & Luo, J. Flexible Surface Acoustic Wave Humidity Sensor with on Chip Temperature Compensation. // *Procedia Engineering*. - 2015. – V. 120. – P. 364–367.
- 27 Решетник Д.М., к.т.н., доц. Жовнiр М.Ф. Акустoeлектроннi радiосенсори фiзичних величин / «Перспективнi напрямки сучасної електронiки». – Киiв: КПi iм. Iгоря Сiкорського, ФЕЛ. – 2017. – С.119-126
- 28 Paul, B., Paul, C., Varghese, A., P, S., Shajoo, S., & Kurian, N. Design of a Power Feeder for Elderly & Simulation of Motor Circuit Developed using Autodesk Tinkercad. 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET). – 2018– P. 378–397.
- 29 Firat, Y., Ugurlu, T. Automatic Garage Door System with Arduino For defined licence plates of cars. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP). – 2018– P. 50–75.
- 30 Gunpath, S., Murdan, A. P., & Oree, V. Design and implementation of a low-cost

- Arduino-based smart home system. 2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). – 2017– P. 64–67.
- 31 Gavran, M., Fruk, M., & Vujisic, G. PI controller for DC motor speed realized with Arduino and Simulink. 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). – 2017– P. 1557–1560.
- 32 Swidan, A., Serebrenik, A., & Hermans, F. How do Scratch Programmers Name Variables and Procedures? 2017 IEEE 17th International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM). – 2017– P. 51–59.