

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ  
проф. Валерій Антонович Скришевський  
Протокол № \_\_\_\_ засідання кафедри  
від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**РОЗРОБКА ЛІНІЙ ЗАТРИМКИ НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУ-  
СТИЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЗАСТОСУВАННЯ У ДВО-  
ВИМІРНИХ ПРИСТРОЯХ**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра  
студента спеціальності  
105 Прикладна фізика та наноматеріали  
ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології»  
**Якименко Андрій Олегович**

Науковий керівник від кафедри  
асистент кафедри нанофізики  
конденсованих середовищ  
к.ф.-м.н. **Пилипова Ольга Вікторівна**

Робота виконана у юніті електронного та квантового магнетизму  
ОКІНАВСЬКОГО ІНСТИТУТУ НАУК ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Оцінка захисту роботи

---

## Анотація

Якименко А. О. Розробка ліній затримки на основі поверхневих акустичних хвиль для подальшого застосування в двовимірних пристроях - випускна кваліфікаційна робота бакалавра зі спеціальності – прикладна фізика та наноматеріали ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології».

У дипломній роботі описано процес створення пристроїв на основі поверхневих акустичних хвиль (SAW). Зустрічно-штирьові перетворювачі з шириною штиря 2 мікрони були виготовлені за допомогою нанофабрикації поверх ніобатних підкладок. Прилад здатний збуджувати SAW із центральною частотою 427 МГц. Експериментальні результати порівнювали з теоретичною моделлю. Елементи S-матриці були проаналізовані та ефекти, які заважали SAW, були зменшені. Ми також розробили пристрої з розміром штиря від 1 мікрона до 100 нм. В деяких випадках, утворювалися зернисті структури, що, як було доведено, пов'язано з впливом дози опромінення на фоторезист. Пристрої, які ми виготовили, вже доступні для досліджень керованими поверхневими акустичними хвилями в області матеріалознавства.

**Ключові слова:** поверхневі акустичні хвилі; хвилі Релея; міжпальцевий перетворювач; мікролітографія; нанолітографія; оптична мікроскопія; амплітудно-частотна характеристика; S -параметри; скануюча електронна мікроскопія; стробування у часовій області; аналіз Фур'є.

## Зміст

Анотація	2
Вступ	5
Розділ 1: Теоретичні основи пристроїв на основі ПАВ	6
1.1 Опис SAW в теорії пружності	6
1.1.1 Основні пружні величини	6
1.1.2. Розклад векторного поля Гельмгольца зміщення	6
1.1.3 Хвильові рівняння в пружних середовищах	7
1.1.3 Об'ємні поздовжні та поперечні хвилі	9
1.1.4 Граничні умови	11
1.1.5 Хвиля Релея	12
1.2. IDT як метод збудження SAW	15
1.2.1 Характеристики IDT	15
Розділ 2: Виготовлення пристроїв на основі SAW	18
2.1 Технологія виготовлення IDT	18
2.1.1 Відривний спосіб 18	18
2.1.1.1 Очищення	18
2.1.1.2 Нанесення фоторезисту	19
2.1.1.3 Експозиція фоторезисту	19
2.1.1.4 Розробка фоторезисту	19
2.1.1.5 Осадження металу	19
2.1.1.6 Старт	20
2.1.2 Метод мокрого травлення 20	20
2.2 Виготовлення пристрою методом оптичної літографії	21
2.3 Мікроскопічна характеристика:	22
2.4 Виробництво IDT субмікронного розміру	23
2.4.1 Процедура виготовлення.	23

2.4.2	Характеристика за допомогою електронно-променевої мікроскопії.	24
2.4.3	Видалення зернистості структур	25
2.5	Характеристика пристрою	28
2.5.1	Підготовка приладу до електричних вимірювань	28
2.5.2	21-29	29
	Висновки	33
	Література	34

## Вступ

Пристрої з поверхневими акустичними хвилями (SAW) широко використовуються в радіочастотних та електронних пристроях. [1]Ця технологія має добре встановлену теоретичну основу та передові інженерні методи для застосування в електроніці та радіозв'язку. [2]Останнім часом SAW викликав інтерес як параметр для зміни властивостей матеріалів [3]. Використовуючи SAW як додатковий параметр для фізичних систем, було розроблено низку нових експериментів з такими явищами, як індукована SAW негативна диференціальна провідність, [4]екситонний транспорт [5], контроль намагніченості [6]та одноелектронний транспорт [7]. Мета цієї дипломної роботи полягає в розробці лінії затримки SAW як основи для майбутніх експериментів, що включає характеристику пристрою за допомогою вимірювань S-параметрів, оптичної та скануючої електронної мікроскопії, порівняння результатів з теоретичним моделями і створення пристроїв, здатних працювати в різних діапазонах частот.

## Розділ 1: Теоретичні основи пристроїв на основі SAW

### 1.1 Опис SAW за допомоги теорії пружності

#### 1.1.1 Основні пружні величини

При деформації тіла точки на тілі змінюють своє положення. Для опису цієї деформації використовується вектор зміщення. Якщо  $\mathbf{r}$  є радіус вектором до деформації та  $\mathbf{r}'$  після, то вектор зміщення  $\mathbf{d}$  визначається як  $\mathbf{d} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}$ . Цей вектор як функція координат визначає векторне поле.

Тензор деформації  $\varepsilon_{ik}$ , який описує зміну елемента довжини, визначений у рівнянні (1.1 )

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_i}{\partial x_k} + \frac{\partial d_k}{\partial x_i} \right) \quad (1.1).$$

Тут  $x_k$  – та компонента системи координат (  $x, y, z$  ).

Після деформації точки перемішуються, і виникають сили, що повертають тіло в початковий стан. Ці сили описуються тензором напружень  $\sigma_{ij}$ , який визначено в рівнянні (1.2 ):

$$\sigma_{ij} = \frac{F_i}{A_j} \quad (1.2),$$

де  $F$  — сила, а  $A$  — площа. Індекс  $i$  позначає складову сили. Індекс  $j$  позначає компонент вектора нормалі площі [8].

#### 1.1.2. Теорема розкладу Гельмгольца

Використання розкладу Гельмгольца. [9] Векторне поле можна представити як суму потенціального векторного поля та соленоїдального. Розкладемо векторне поле вектора зміщення  $\mathbf{d}$  в потенціальну складову  $\mathbf{d}_l$  і соленоїдальну складову  $\mathbf{d}_t$ , яка повинна виконувати співвідношенням згідно з розкладом Гельмгольца [10] (1.3, 1.4)

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_l + \mathbf{d}_t \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{d}_t = 0 \quad (1.4a)$$

$$\operatorname{curl} \mathbf{d}_l = 0 \quad (1.4b)$$

Потенціальне може бути представлено як градієнт скалярного потенціалу  $\varphi$  (рівняння 1.5a). Соленоїдальне поле можна представити як ротор векторного потенціалу  $\psi$  (рівняння 1.5b)[11].

$$\mathbf{d}_l = \operatorname{grad} \varphi \quad (1.5a)$$

$$\mathbf{d}_t = \operatorname{curl} \psi \quad (1.5b)$$

### 1.1.3 Хвильові рівняння в пружних середовищах

Розглядати тіло за відсутності зовнішніх сил. Відповідно до другого закону Ньютона сила інерції повинна бути врівноважена силами деформації, що діють на поверхні  $S$ , що обмежує об'єм. Щоб отримати рівняння руху, нам потрібно прирівняти силу внутрішнього напруження до добутку прискорення на масу одиниці об'єму, яка є густиною (рівняння 1.6).

$$\rho \ddot{d}_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (1.6)$$

Кожна крапка вгорі символу представляє один порядок похідної за часом.

Підставляємо  $\sigma_{ik}$  із закону Гука для пружних середовищ [12], який визначено в рівнянні (1.7):

$$\sigma_{ik} = K \varepsilon_{ll} \delta_{ik} + 2\mu \left( \varepsilon_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \varepsilon_{ll} \right) = 2\mu \varepsilon_{ik} + \lambda \delta_{ik} \varepsilon_{ll} \quad (1.7)$$

Де  $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ ,  $\lambda$  і  $\mu$  параметри Ламе,  $\delta_{ik}$  це символ Кронекера.

Підставивши ( 1.7 ) у ( 1.6 ) отримаємо рівняння ( 1.8 )

$$\rho \ddot{d}_i = 2\mu \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_k} + \lambda \delta_{ik} \frac{\partial \varepsilon_{ll}}{\partial x_k} \quad (1.8)$$

Після підставлення фактичного виразу для деформацій ( 1.1 ) у рівняння ( 1.8 ) і запису його у векторній формі, враховуючи, що  $\frac{\partial^2 d_i}{\partial x_l^2}$  є компонентами вектора  $\Delta \mathbf{d}$  і  $\frac{\partial d_l}{\partial x_l}$  є компонентами вектора  $div \mathbf{d}$  отримуємо рівняння (1.9).

$$\rho \ddot{\mathbf{d}} = \mu \Delta \mathbf{d} + (\lambda + \mu) grad div \mathbf{d} \quad (1.9)$$

Підставляючи (1.3) у (1.9) отримуємо рівняння ( 1.10)

$$\ddot{\mathbf{d}}_l - \frac{\lambda+2\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_l + \ddot{\mathbf{d}}_t - \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_t + (\lambda + \mu) grad div \mathbf{d}_l = 0 \quad (1.10)$$

Ми застосовуємо операцію  $div$  до обох сторін цього рівняння, враховуючи, що  $div \mathbf{d}_t = 0$

Отримуємо рівняння ( 1.11 ).

$$div \left( \ddot{\mathbf{d}}_l - \frac{\lambda+2\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_l \right) = 0 \quad (1.11)$$

Ротор рівняння (1.11) також дорівнює нулю через співвідношення (1.4b). Якщо  $curl$  і  $div$  вектора зникають у всьому просторі, то цей вектор дорівнює нулю. Отже, отримуємо рівняння (1.12).

$$\ddot{\mathbf{d}}_l - \frac{\lambda+2\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_l = 0 \quad (1.12)$$

Аналогічно застосовуючи  $\text{curl}$  у рівнянні ( 1.10) і враховуючи, що  $\text{curl } \mathbf{d}_l = 0$ , ми отримуємо рівняння (1.13)

$$\text{curl} \left( \ddot{\mathbf{d}}_t - \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_t \right) = 0 \quad (1.13)$$

Значення виразу в дужках дорівнює нулю відповідно до ( 1.4а ). Аналогічно, якщо і розбіжність, і завиток зникають, тоді вектор має дорівнювати нулю.

$$\ddot{\mathbf{d}}_t - \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{d}_t = 0 \quad (1.14)$$

Будемо позначати  $c_t^2 = \frac{\mu}{\rho}$  і  $c_l^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho}$  в наступних виразах.

Якщо підставити вирази (1.5 ) у рівняння (1.14) і (1.12), то можна отримати хвильове рівняння для потенціалів (1.5)

$$\ddot{\varphi} - c_l^2 \Delta \varphi = 0 \quad (1.15a)$$

$$\ddot{\psi} - c_t^2 \Delta \psi = 0 \quad (1.15b)$$

### 1.1.3 Поздовжні та поперечні хвилі в нескінченному об'ємі

Спочатку ми обговоримо поздовжні та поперечні хвилі в нескінченному об'ємі, оскільки вони важливі для розуміння SAW. Поздовжня хвиля – це хвиля, у якій коливання відбуваються в тому ж або протилежному напрямку, що й хвильовий вектор, тоді як поперечна хвиля має коливання в поперечному напрямку до хвильового вектора[13].

Щоб отримати рівняння хвиль, ми шукатимемо рішення хвильових рівнянь ( 1.15 ) Розв'язок рівняння ( 1.15а ) має вигляд рівняння (1.16):

$$\varphi = f(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - c_l t) \quad (1.16).$$

У рівнянні ( 1.16 ),  $\mathbf{n}$  – довільний одиничний вектор;  $f$  — довільна скалярна функція, а  $\mathbf{r}$  — радіус-вектор.

$\varphi$  постійна, коли  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - c_l t = const$ . Це рівняння описує площини, перпендикулярні до  $\mathbf{n}$  у яких потенціал постійний. Ці площини називаються формою хвилі. Зміна потенціалу відбувається між формами хвилі, а вектор  $\mathbf{n}$  є напрямком поширення хвилі. У наступних виразах будемо позначати  $\xi = \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - c_l t$ .

Далі виведемо вектор зміщення для потенційного поля. Підставляючи скалярний потенціал ( 1.16 ) у вираз ( 1.15 а ), отримуємо вираз ( 1.17 а ) або у векторній формі ( 1.17 б ):

$$\mathbf{d}_l = grad \varphi = n_i \frac{d\varphi}{d\xi} \quad (1.17 \text{ а})$$

$$\mathbf{d}_l = \mathbf{n} \frac{d\varphi}{d\xi} \quad (1.17 \text{ б})$$

Як бачимо, зсув паралельний напрямку розповсюдження. Отже, хвиля, яка описується виразами (1.17) і (1.16), є поздовжньою.

Загальний вигляд розв'язку хвильового рівняння (1.15 б) має вигляд (1.18):

$$\psi = F(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - c_l t) \quad (1.18)$$

Аналогічно скалярному потенціалу  $n$  – довільний одиничний вектор, паралельний напрямку поширення хвилі;  $F$  — довільна вектор-функція, а  $r$  — радіус-вектор.

Підставивши векторний потенціал ( 1.18 ) до ( 1.15b ) отримаємо соленоїдальну частину вектора зміщення (1.19)

$$\mathbf{d}_t = \text{curl}\boldsymbol{\psi} = \mathbf{n} \times \frac{d\boldsymbol{\psi}}{d\xi} \quad ( 1.19 )$$

Оскільки  $\mathbf{d}_t$  є векторним добутком векторів  $\mathbf{n}$  і  $\frac{d\boldsymbol{\psi}}{d\xi}$  вона перпендикулярна до них. Отже, зсув перпендикулярний до напрямку поширення хвилі, а хвиля поперечна . [14]

#### 1.1.4 Граничні умови

Граничні умови різні залежно від типу контакту пружних середовищ.

Для з'єднаних поверхонь без відносного зсуву зміщення і деформація мають бути неперервними та задовольняти умови ( 1.20 )

$$\left( d_j^{(1)} - d_j^{(2)} \right)_S = 0 \quad ( 1.20a )$$

$$\left( \sigma_{nj}^{(1)} - \sigma_{nj}^{(2)} \right)_S = 0 \quad ( 1.20b )$$

Тут  $n$  індекс осі, нормальної до площі  $S$ ;  $j$  – індекс компоненти сили, паралельної осі ( $x, y, z$ ). Верхній індекс позначає півпростори.

Для контактуючих поверхонь з відносним зміщенням тангенціальна складова сили на границі дорівнює нулю. Нормальна складова зміщення і сили

повинна бути безпервною. Отже, граничні умови набувають вигляду рівнянь ( 1.21 )

$$\left( d_n^{(1)} - d_n^{(2)} \right)_s = 0 \quad ( 1.21a )$$

$$\left( \sigma_{nn}^{(1)} - \sigma_{nn}^{(2)} \right)_s = 0 \quad ( 1.21b )$$

$$\sigma_{nj}^{(1)}|_s = \sigma_{nj}^{(2)}|_s = 0, \quad j \neq n, \quad ( 1.21c )$$

Для межі між пружним тілом і вакуумом поверхня не має напружень, а гранична умова описується рівнянням ( 1.22 ) [15]

$$\sigma_{nj}|_s = 0 \quad ( 1.22 )$$

#### 1.1.5 Хвиля Релея

Хвилі Релея - це тип хвиль, які поширюються на поверхні і сильно затухають в об'ємі підкладки. Вони складаються зі зв'язаних поперечних і поздовжніх хвиль.

Щоб вивести хвилю Релея, розглянемо поширення хвилі в однорідному середовищі. Систему координат вибираємо так, щоб межа між напівпросторами проходила в площині ХУ, а хвильовий вектор  $q$  був уздовж додатної осі  $x$  (рисунок 1.1). Використовуючи рівняння (1.3) і

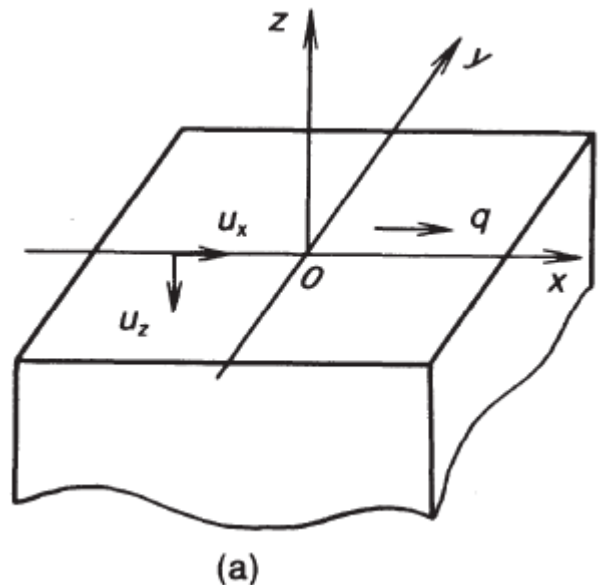


Рисунок 1.1 Ілюстрація хвилі Релея, що проходить між півпросторами.  $q$  хвильовий вектор.  $u_x$  та  $u_y$  це  $x$  та  $y$  компоненти вектора зміщення.

(1.4), ми виражаємо векторне поле зміщення за допомогою скалярного та векторного потенціалів.

$$\mathbf{d} = \text{grad}\varphi + \text{curl}\psi \quad (1.23)$$

У нашій системі координат єдиною ненульовою компонентою векторного потенціалу є  $y$ .

Отже, зміщення набуває вигляду рівнянь (1.24).

$$d_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial z} \quad (1.24a)$$

$$d_z = \frac{\partial\varphi}{\partial z} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (1.24b)$$

Якщо замінити вирази (1.24) на закон Гука (1.7), то отримаємо рівняння (1.25):

$$\sigma_{xx} = \lambda \Delta \varphi + 2\mu \left( \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi}{\partial x\partial z} \right) \quad (1.25a)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \Delta \varphi \quad (1.25.b)$$

$$\sigma_{xz} = 2\mu \left( \frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial z} - \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} \right) \quad (1.25c)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \Delta \varphi + 2\mu \left( \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi}{\partial x\partial z} \right) \quad (1.25g)$$

Шукатимемо розв'язок у вигляді (1.26)

$$\varphi = \varphi_0 \exp[pz + i(qx - \omega t)] \quad (1.26a)$$

$$\psi = \psi_0 \exp[sz + i(qx - \omega t)] \quad (1.26b)$$

Підставивши їх у хвильові рівняння (1.15), отримаємо систему (1.27)

$$p^2 = q^2 - k_t^2 \quad (1.27a)$$

$$s^2 = q^2 - k_t^2 \quad (1.27b)$$

Далі застосовуємо граничну умову (1.22) і отримуємо систему рівнянь:

$$[\lambda(p^2 - q^2) + 2\mu p^2]\varphi_0 + 2i\mu q s \psi_0 = 0 \quad (1.28a)$$

$$2ipq\varphi_0 - (q^2 + s^2)\psi_0 = 0 \quad (1.28b)$$

Ця система рівнянь чітко показує, що амплітуди потенціалів за'язані одна з одною. Оскільки амплітуди потенціалу лінійно пов'язані рівняннями (1.28), ми можемо записати скалярний потенціал у формі (1.29a)

$$\varphi = \Phi_0 \exp[pz + i(q_R x - \omega t)]. \quad (1.29a)$$

Тоді можна показати, що векторний потенціал дорівнює виразу

$$\psi = \frac{2iq_R p}{q_R^2 + s^2} \Phi_0 \exp[sz + i(q_R x - \omega t)] \quad (1.29b)$$

Де  $\Phi_0$  амплітуда скалярного потенціалу.

Щоб отримати вектори зміщень, ми підставимо розв'язки (1.29) у вирази (1.24) і дослідимо зміщення біля межі між півпросторами ( $z = 0$ ). Отримані вектори задаються співвідношеннями (1.30).

$$d_z = -\frac{pk_t^2}{q_R^2 + s^2} \Phi_0 \exp[i(q_R x - \omega t)] \quad (1.30a)$$

$$d_x = i \frac{k_t^2}{2q_R} \Phi_0 \exp[i(q_R x - \omega t)] \quad (1.30b)$$

Уявна одиниця в  $d_x$  означає, що дотична складова вектора зміщення має фазовий зсув  $\frac{\pi}{2}$  відносно нормальної складової. Це показує нам, що частинки

середовища рухаються по еліпсах і у випадку гармонічної хвилі SAW мають кругову поляризацію[16].

## 1.2. IDT як спосіб збудження SAW

Традиційним методом збудження SAW є використання п'єзоелектричного кристала. Електричне поле в п'єзоелектричному матеріалі може індукувати акустичне поле, і навпаки, зростання акустичного поля призводить до появи електричного поля. [17]Таким чином, використовуючи ці властивості, ми можемо перетворити електричний сигнал в акустичну хвилю, а потім перетворити його назад в електричний сигнал для подальшого аналізу.

Пристрій на зустрічно-штирьовому перетворювачі (IDT) складається з п'єзоелектричної підкладки та міжпальцевого перетворювача на її поверхні. IDT

— це масив металевих смуг, підключених до джерела струму.

Вони діють як антени, які перетворюють електричну енергію в акустичну хвилю і навпаки.

Розглянемо одноелектродну конструкцію IDT (рис. 1.2). Ця

конструкція складається з чергуються смуг, з'єднаних із

заземленням і прикладеною напругою. Пристрій має однакову ширину та відстань між пальцями. Пристрій складається з двох IDT: одного для запуску та одного для прийому[18].

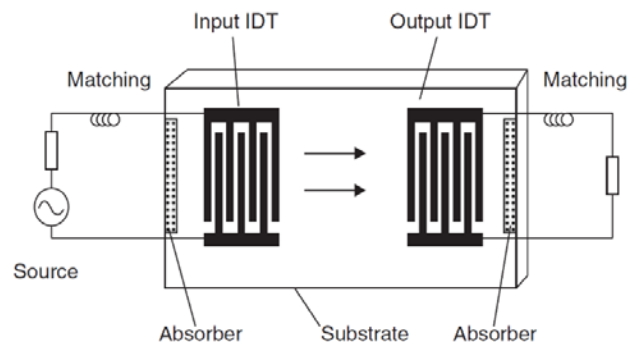


Рисунок 1.2 Схематичне зображення лінії затримки на SAW

### 1.2.1 Характеристики IDT

Ми починаємо огляд характеристик з імпульсної характеристики IDT. Коли електричний сигнал досягає п'єзоелектрика, він перетворюється в акустичний сигнал. Швидкість SAW набагато менша, ніж електрична хвиля. Кожен штир забезпечує затримку  $T$ , тому відповідь на сигнал буде повторюватися  $N$  разів. Де  $N$  - кількість пар штирів. Імпульсна характеристика системи показана на малюнку 1.3(a). Далі розглянемо апроксимацію безперервної імпульсної характеристики, показану на малюнку 1.3(b). За допомогою перетворення Фур'є отримуємо частотну характеристику.

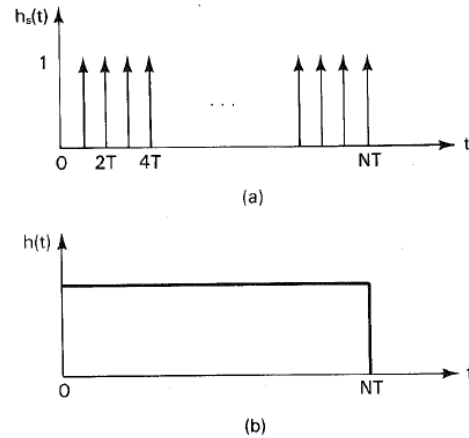


Figure 1.3 Імпульсна характеристика IDT (a) Апроксимація безперервною імпульсною характеристикою (b)

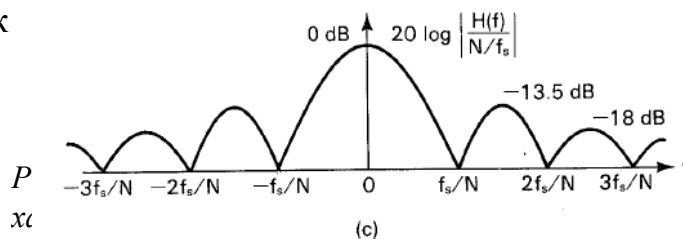
$$H(f) = \int_0^{NT} e^{-j2\pi ft} dt = \frac{N}{f_s} e^{-jN\pi \frac{f}{f_s}} \frac{\sin\left(\frac{N\pi f}{f_s}\right)}{\frac{N\pi f}{f_s}} \quad (1.31)$$

Де  $f_s = 1/T$  є центральною частотою.

$T$  можна обчислити за допомогою швидкості SAW  $v_{SAW}$ . Позначаємо відстань між пальцями  $p$ . Час, протягом якого SAW проходить відстань між позитивними пальцями,  $2p$  розділена на швидкість SAW. Підставляючи це в,  $f_s$  ми отримуємо співвідношення ( 1.31 )

$$f_s = \frac{v_{SAW}}{2p} \quad (1,31)$$

Графік



АЧХ наведено на

рис. 1.4:

Збільшення  $N$  призводить до вужчої смуги пропускання та створення більшої кількості бічних пелюсток [19].

## Розділ 2 : Виготовлення пристроїв на основі SAW

### 2.1 Технологія виготовлення IDT

Усі етапи вимагають роботи в чистому приміщенні. Перед усіма операціями пластини необхідно очистити. Існує два основні методи створення IDT: вибухова літографія і вологе травлення. У розділах 2.1.1 ми обговоримо метод вибухової літографії, у розділі 2.1.2 ми обговоримо метод мокрого травлення.

#### 2.1.1 Метод вибухової літографії

Метод зняття має наступні етапи: очищення, нанесення резисту, обпалення резиста, проявлення резиста, осадження металу, зняття решти резиста. Загальна ідея методу вибухової літографії полягає в тому, щоб створити шар резисту на поверхні, який з часом буде видалено. Потім ми знімаємо резист з частин, де нам потрібно нанести метал. Шаблон пристрою буде видалено з резиста. Після цього метал наноситься на весь зразок. Таким чином метал наноситься на підкладку в тих місцях, де буде пристрій. Решта поверхні покрита резистом, а над ним розташований метал. Нарешті, резист, що залишився, видаляється разом із металом, що поверх нього. Після процесу лише ті ділянки, з яких видалили резист, мають метал.

##### 2.1.1.1 Очищення

Для очищення використовується ультразвукова ванна для пластин. Ми з'ясували, що найкращий варіант – почати з очищення мильним розчином до води у співвідношенні 1:3, щоб видалити жирні забруднення. Далі виконується ультразвукова обробка в ацетоні для видалення органічних залишків. Після цього зразок промивають в ізопропанолі, а потім у воді. Воду на зразку висушують у потоці азоту.

### 2.1.1.2 Нанесення фоторезисту

Фоторезист наноситься методом обертання. На підкладку наноситься крапелька фоторезисту. Після цього пластина обертається центрифугою для нанесення покриття, щоб рівномірно розподілити фоторезист по поверхні підкладки. Збільшуючи швидкість обертання, ми можемо регулювати товщину фоторезисту.

### 2.1.1.3 Експозиція фоторезисту

Фоторезист піддається опроміненню. Для тонких структур (менше 1 мкм) необхідна система електронно-променевої літографії зі спеціальним фоторезистом. Для більшої роздільної здатності можна використовувати оптичну літографію.

Якщо фоторезист позитивний, ми повинні оголити ділянки, де нам потрібен метал. Якщо фоторезист негативний, то всі області, окрім візерунка пристрою, будуть опроміненні.

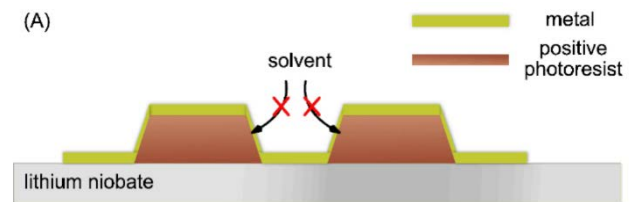


Рисунок 2.1 Схематичне зображення виготовлення пристрою. Етап після нанесення металу.

### 2.1.1.4 Проявлення фоторезисту

Після експонування ділянки на пластині, на які ми хочемо нанести метал, стають розчинними для проявника. Отже, занурюючи пластину з фоторезистом, ми можемо розчинити візерунок пристрою на резисті.

### 2.1.1.5 Осадження металу

Тонкий шар металу (від 5 нм до 300 нм) наноситься на всю поверхню пластини. Він буде контактувати з підкладкою на проявленій частині поверхні,

тоді як на решті площі він матиме шар фоторезисту між металом і підкладкою. (рисунок 2.1) У нашому експерименті ми використовували електронно-променеве осадження. У наших експериментах ми спочатку нанесли тонший шар Ti або Cr, щоб забезпечити адгезію між металом і підкладкою.

#### 2.1.1.6 Відрив

Пластина занурюється в розчинник, щоб видалити весь залишковий резист з поверхні пластини. Металевий шар на резисті буде видалено разом із ним, тому залишиться лише метал, який безпосередньо контактує з підкладкою.

#### Метод мокрого травлення створення структур

Мокре травлення має інший процес. Спочатку на поверхню рівномірно наноситься шар металу. Резист діятиме як захисний шар, що захищає метал від травника. Очищення та осадження металу такі ж, як і для методу відриву. Однак процес змінено на очищення, осадження металу, нанесення фоторезисту, проявлення фоторезисту та видалення фоторезисту такі ж, як і в методі відриву.

1. Пластину очищають.
2. На чисту підкладку наноситься шар металу.
3. Поверх металевого шару наноситься шар фоторезисту.
4. Проявлення: якщо резист має негативний тон, то візерунок приладу розчиняється в проявнику. У разі позитивного тону - всі інші зони, крім приладу, розчиняються.
5. Для видалення металу використовують травитель (кислотний, плазмовий тощо).
6. Фоторезист видаляють [20].

## 2.2 Виготовлення приладу методом оптичної літографії

Ми виготовили апарати методом вибухової літографії, так як це зручніше і не потребує кислот та інших травників. Для виробництва пристрою ми використали систему літографії без маски та позитивний фоторезист. В результаті ми отримали пристрій з мінімальним розміром елемента 2 мкм з гладкими краями. Всі 30 пар пальців рівні і без дефектів. Ми досягли ліміту розширення для літографічної системи, тому для отримання тонших пальців потрібна електронно-променева літографія.

### 1. Очищення ніобату літію

- 1.1. Пластина ніобату літію *x-Cut 10* на 10 мм була оброблена ультразвуком у розчині мило/вода 1:3 протягом 5 хвилин.
- 1.2. Пластину занурювали в чистий ацетон (концентрація 99,5%) і обробляли ультразвуком протягом 1 години при кімнатній температурі.
- 1.3. Пластину промивали в чистому ізопропанолі (концентрація 99,7%)
- 1.4. Після цього пластину промивали в дистильованій воді.
- 1.5. Пластину сушили під струменем азоту.

### 2. Фоторезист було нанесено за допомогою центрифугування.

- 2.1 Пластину випікали при температурі 115°C для видалення залишків вологи.
- 2.2 На підкладку нанесено позитивний фоторезист S1813G. Потім обертали при 500 об/хв протягом 3 секунд, після чого одразу при 5000 об/хв протягом 30 секунд
- 2.3. Пластину з нанесеним фоторезистом випікали при 120°C протягом 1 хв

3. Фоторезист було опромінено за допомогою безмаскової оптичної літографічної системи «Dlight DL-1000GS/OIC (L2-A645-CR)», наданої NANO SYSTEM SOLUTIONS» доза опромінення 120 мДж / см<sup>2</sup>.
4. Пластина була проявлена в гідроксиді тетраметиламонію (ТМАН). Концентрація ТМАН у водному розчині становила 2,38%. Проявку проводили протягом 30 секунд.
5. 5 нм Ti , а потім 80 нм Al були нанесені за допомогою системи осадження «PLASSYS BESTEK MEB550S2-HV», наданої « Plassys COM».
6. Резист, що залишився, видаляли обробкою ультразвуком в ацетоні.

Пальці IDT мають довжину 515 мікрон і ширину 2 мікрони. У ньому загалом 30 пар, які мають площу перекриття 500 мікрон.

### 2.3 Мікроскопічна характеристика:

Зображення IDT були зроблені за допомогою оптичної мікроскопії (Малюнок 2.2 Ліворуч і справа вгорі). Ми бачимо, що помітних пошкоджень немає. Пальці рівні. Скануюча електронна мікроскопія дозволяє досліджувати пристрій з

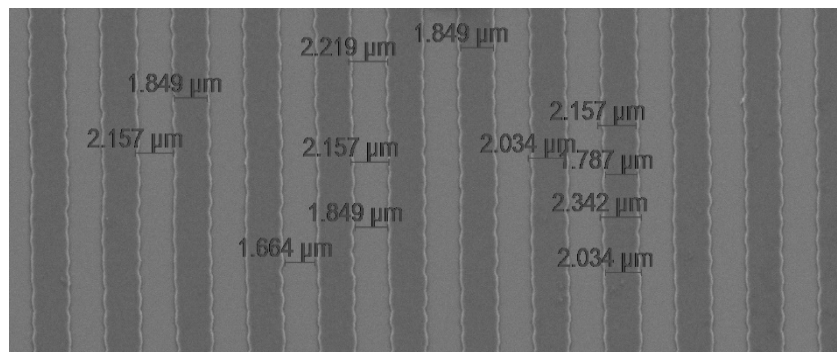
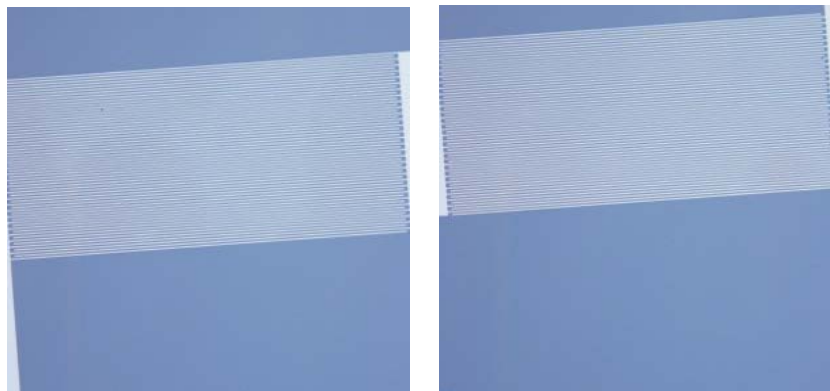


Рисунок 2.2 Фотографії готових приладів. Згори справа та зліва – зроблені оптичною мікроскопією. Знизу – скануючою електронною мікроскопією

кращою роздільною здатністю. Як бачимо, розмір пальця може незначно варіюватися від 2 мікрон.

## 2. 4 Виробництво ІІТ субмікронного розміру

Для роботи з більш високими частотами необхідно зменшити ширину штирів ІІТ. У попередніх експериментах ми вже досягли обмеження системи оптичної літографії без маски "NANO SYSTEM SOLUTIONS Dlight DL-1000GS/OIC (L2-A645-CR)". Тому для створення пристрою з центральною частотою вище ніж 427 МГц, використовувалася електронно-променева літографія. Щоб розробити рецепт виготовлення ІІТ, було вирішено зробити шаблон, що складається з масивів штифтів різної ширини: 1 мікрон, 750 нм, 500 нм, 200 нм і 100 нм. Ми ще не робили пристрій на ніобаті літію, але для експериментів з виготовлення пристрою ми використовували кремній. Кремній був обраний через його меншу вартість. Пристрій SAW не може працювати з кремнієвою підкладкою, оскільки вона не є п'єзоелектричною, але все одно є хорошою підкладкою для експериментів із виготовленням пристрою.

Після виготовлення приладу його охарактеризували за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Отримані ІІТ далекі від досконалості, оскільки краї не рівні, а поверхня зерниста.

### 2.4.1 Процедура виготовлення.

#### 1. Очищення кремнієвої підкладки

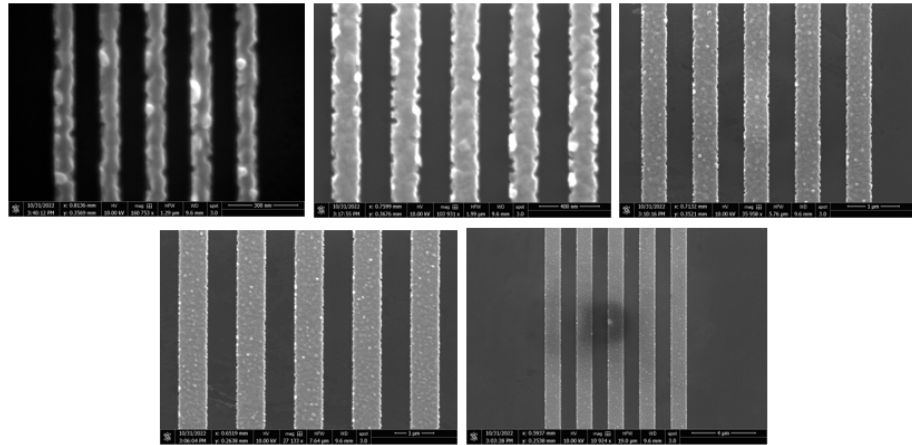
1.1 Кремнієву пластину 10 на 10 мм обробляли ультразвуком у розчині мило/вода 1:3 протягом 5 хвилин.

1.2 Субстрат занурювали в чистий ацетон (концентрація 99,5%) і обробляли ультразвуком протягом 1 години при кімнатній температурі.

- 1.3 Пластину промили в чистому ізопропанолі (концентрація 99,7%)
  - 1.4 Після цього його промивали в дистильованій воді.
  - 1.5 Субстрат сушили в струмі азоту.
  2. Нанесення резисту обертанням.
    - 2.1 Субстрат випікали при температурі 120°C для видалення залишків вологи.

На зразок було нанесено центрифугування резист CSAR 62 Ar-P 6200.09. Спочатку при 500 об/хв протягом 3 секунд, потім при 5000 об/хв протягом 30 секунд.
    - 2.3 Пластину випікали при 150°C 3 хвилини.
  3. Резист був опромінений системою електронно-променевої літографії "Elionix ELS-7500EX (L2-A645-CR)" з дозою 120 мкКл /  $cm^2$ .
  4. Проявка резиста:
    - 4.1 Пластина з резистом була занурена в амілацетат на 60 секунд.
    - 4.2 Пластину занурили в суміш 1:3 метилізобутилкетону (MIBK) та ізопропанолу. Протягом 30 секунд.
    - 4.3 Пластину занурили в ізопропанол на 1 хвилину
  5. 5 нм Ti, а потім 80 нм Al були нанесені зі швидкістю 0,05 і 0,1 нм/с відповідно за допомогою електронно-променевого осадження з парової фази з використанням системи осадження «PLASSYS BESTEK MEB550S2-HV».
  6. Фоторезист, що залишився, видаляли обробкою ультразвуком у бутаноні.
2. 4.2 Характеристика за допомогою електронно-променевої мікроскопії.

Виготовлені IDT були охарактеризовані за допомогою електронно-променевої мікроскопії (рис. 2.3). Виявилось, що отримані IDT мають зернисту поверхню. Це



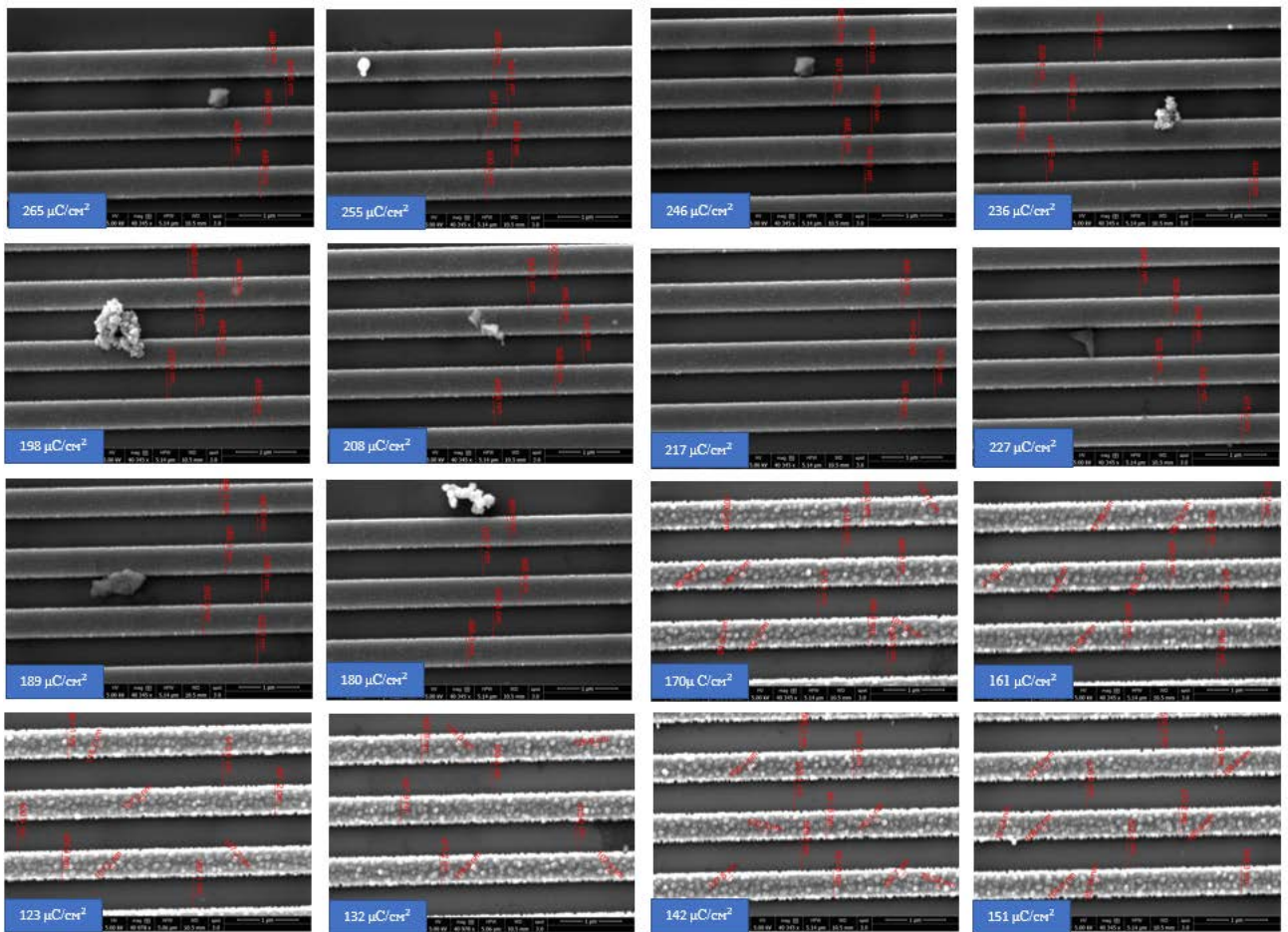
потенційно погіршує властивості виготовлених

Рисунок 2.3 Електронна фотографія IDT з шириною піна 100нм 200нм 500нм 750нм 1000нм (зліва на право згори вниз)

пристроїв. Висловлювалося припущення, що така поверхня може бути пов'язана з недостатньою дозою опромінення. Якщо дозування недостатньо для повного проявлення резисту, то залишки резисту залишаються на поверхні субстрату. Тоді в процесі осадження в місцях, де залишився резист, утворюються зерна. Як ми перевірили нижче, саме цей механізм і став причиною такої структури.

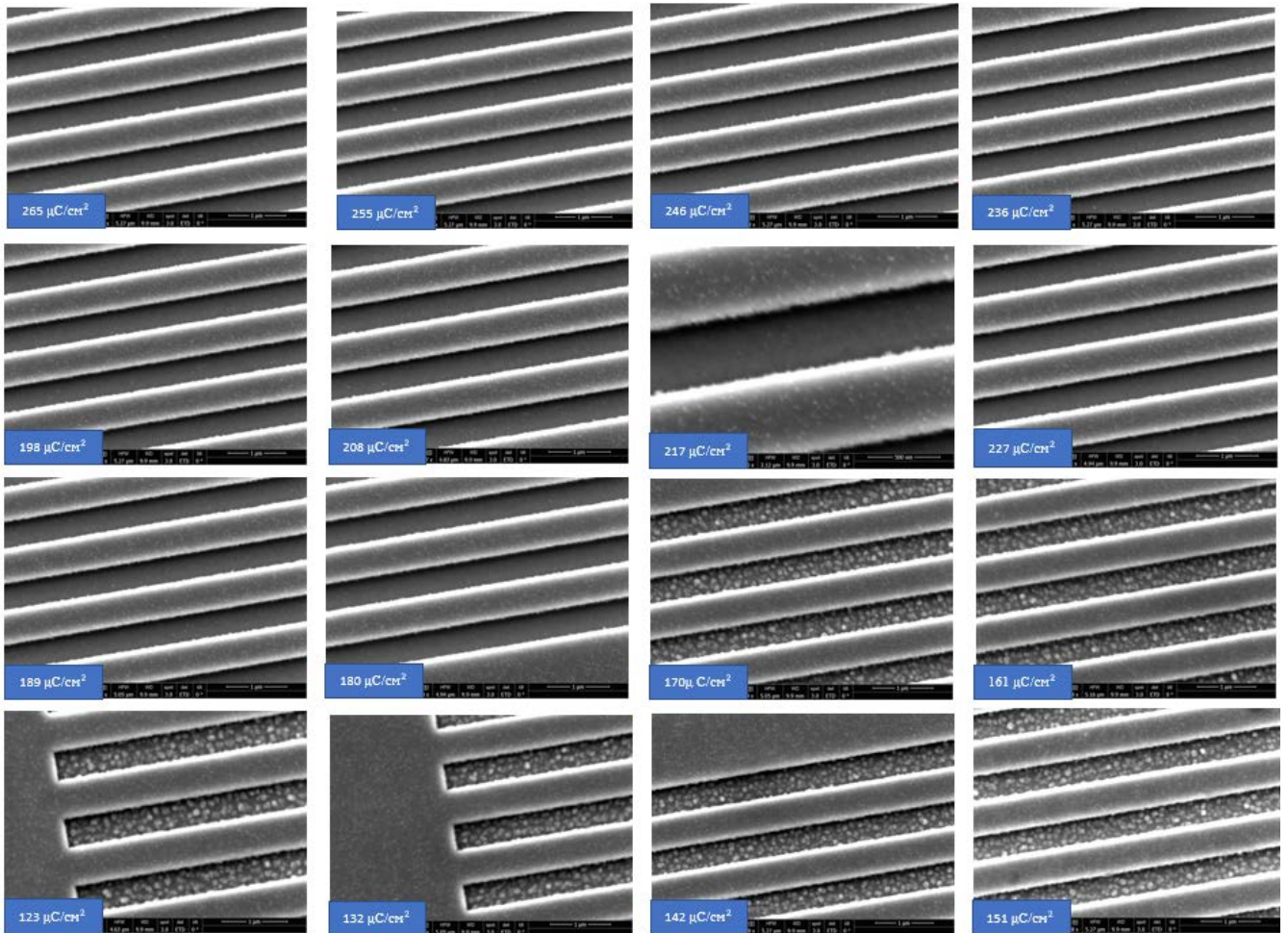
#### 2.4.3 Усунення зернистості структур

Щоб перевірити цю гіпотезу, було проведено тест на дозування. Встановлено, що при дозах нижче 180 мкКл / см<sup>2</sup> зерниста структура зберігається. Щоб перевірити причину такої поведінки, було зроблено електронні фотографії для різних етапів виробництва: після проявлення, після осадження та самих готових IDT.



*Рисунок 2.4 Електронні фотографії IDT шириною 500 нм при різних дозах опромінення (вказано на малюнках). Кожне зображення відповідає IDT, сформованому на одній пластині. IDT після остаточного старту*

На рисунку 2.4 наведено готові IDT із зернистою структурою та гладкою в залежності від дозування. На малюнку 2.5 показано пристрій після осадження металу, але резист не видалено. Як ми бачимо, гранули знаходяться лише в тих областях, які були показані. На малюнку 2.6 показано пристрій після розробки. Як ми бачимо, гранули дійсно присутні в дозах нижче 180 мкКл / см<sup>2</sup>. Що підтверджує гіпотезу про причину утворення зернистої поверхні.



*Рисунок 2.5 Електронні фотографії IDT шириною 500 нм при різних дозах опромінення (вказано на малюнках). Кожне зображення відповідає IDT, сформованому на одній пластині. Показано IDT після осадження.*

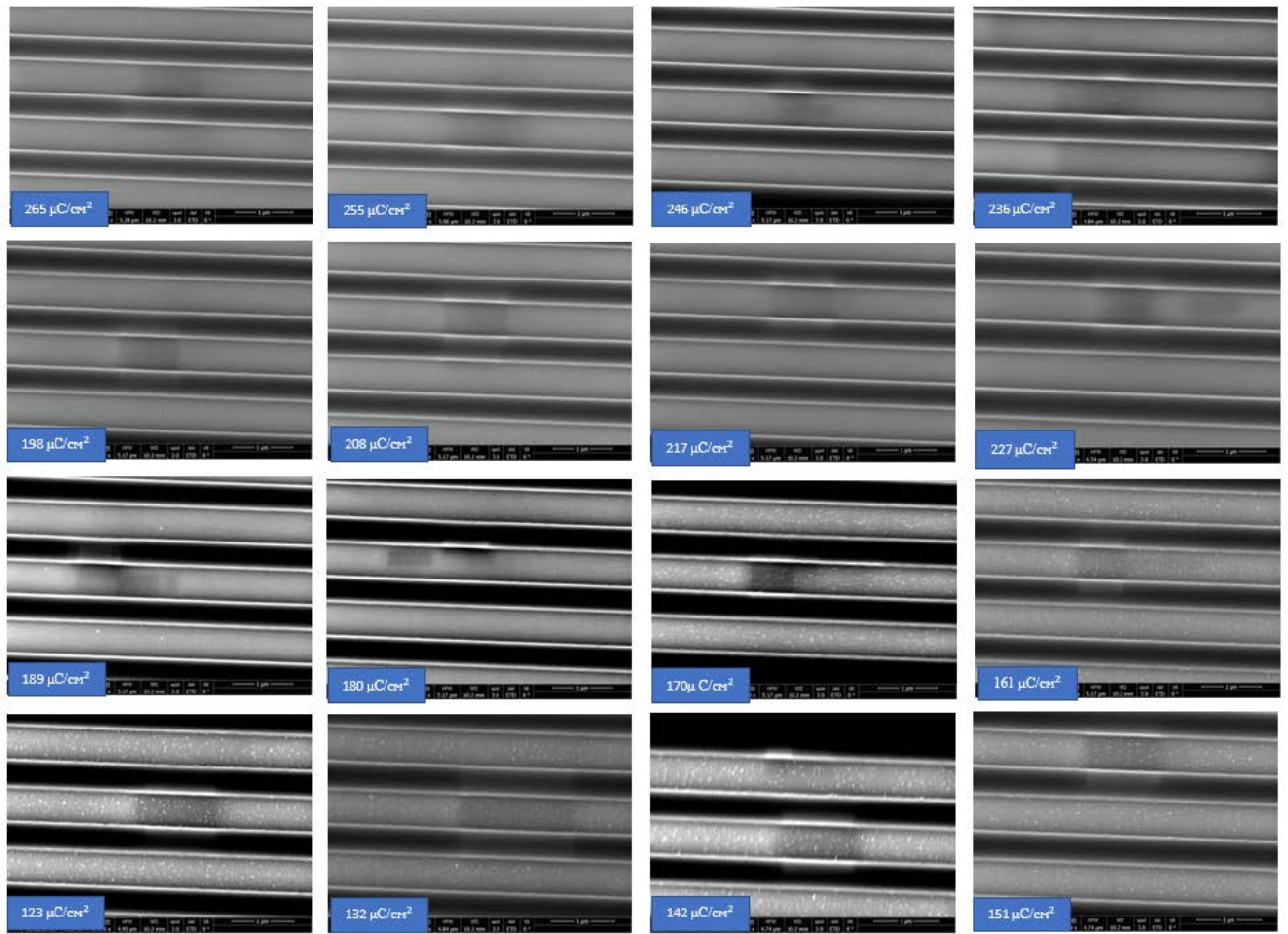


Рисунок 2.6 Електронні фотографії IDT шириною 500 нм при різних дозах опромінення (вказано на малюнках). Кожне зображення відповідає IDT, сформованому на одній пластині. Показана пластинка з усіма IDT після проявлення.

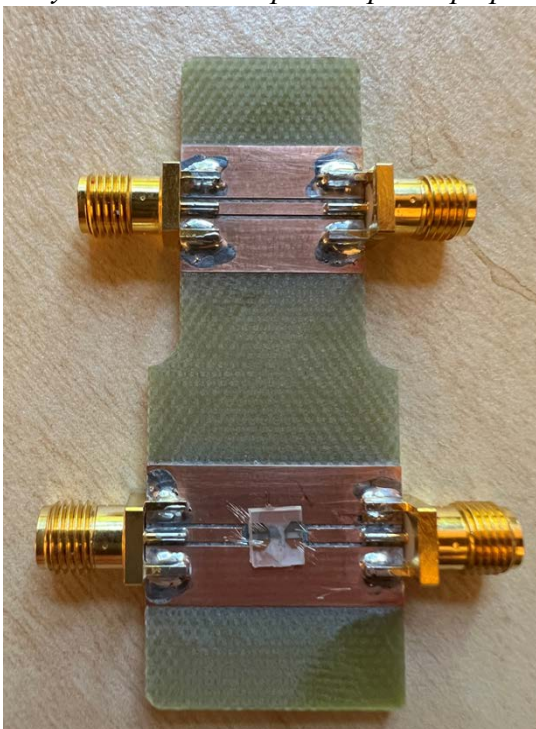


Рисунок 2.8 (Знизу) Готовий прилад для вимірів

## 2. 5 Характеристика приладу

### 2.5.1 Підготовка приладу до електричних вимірювань

Ми будемо характеризувати

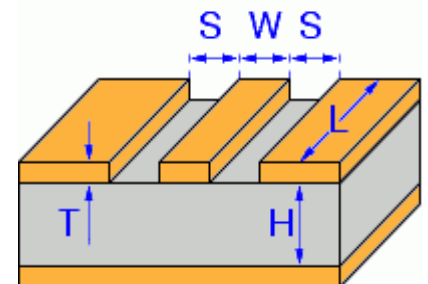


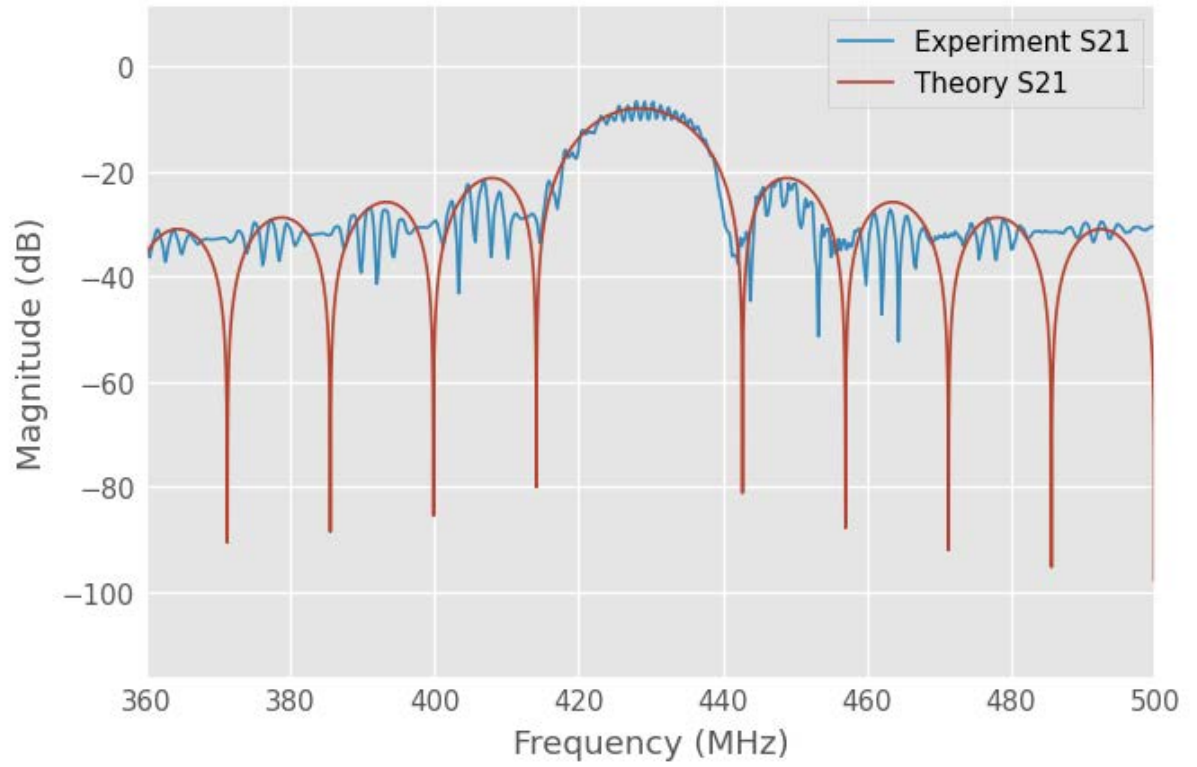
Рисунок 2.7 Схематичне зображення копланарного хвилевода

пристрій, виготовлений у розділі 2.2. Для електричних вимірювань нам потрібно подати на пристрій сигнал мікрохвильової частоти. Для цього ми виготовили друковану плату (PCB) з копланарним хвилеводом. Плата була виготовлена за допомогою приладу «LPKF Protomat D104 PCB». Копланарний хвилевід з'єднує центральну доріжку, яка має ширину  $w$ , із сигналом, а всі інші площини з'єднані із землею (рис. 2.7). Ми використовували двосторонній мідний ламінат «FR-4». Товщина підкладки  $H$  1,6 мм, товщина міді  $T$  35 мікрон. Довжина хвилеводу  $L$  24 мм. Відстань між сигнальною доріжкою та площинами заземлення  $S$  становить 0,25 мм. У середині сигнальної доріжки ми видалили мідь шириною 6 мм, щоб встановити пристрій. Пристрій приклеїли поверх розрізу центральної доріжки. Для електричного підключення пристрою до хвилеводу ми використовували ультразвуковий розпаювач виводів «Kulicke & Soffa 4523A». Ми приєднали алюмінієві дроти діаметром 25 мкм як до друкованої плати, так і до контактів пристроїв. До кожного контакту ми підключили 5-8 проводів для більш надійного з'єднання. Нарешті, конектори SMA були припаяні до друкованої плати. Готовий пристрій показано на малюнку 2.8.

#### 2.5.2 $S_{21}$ параметр

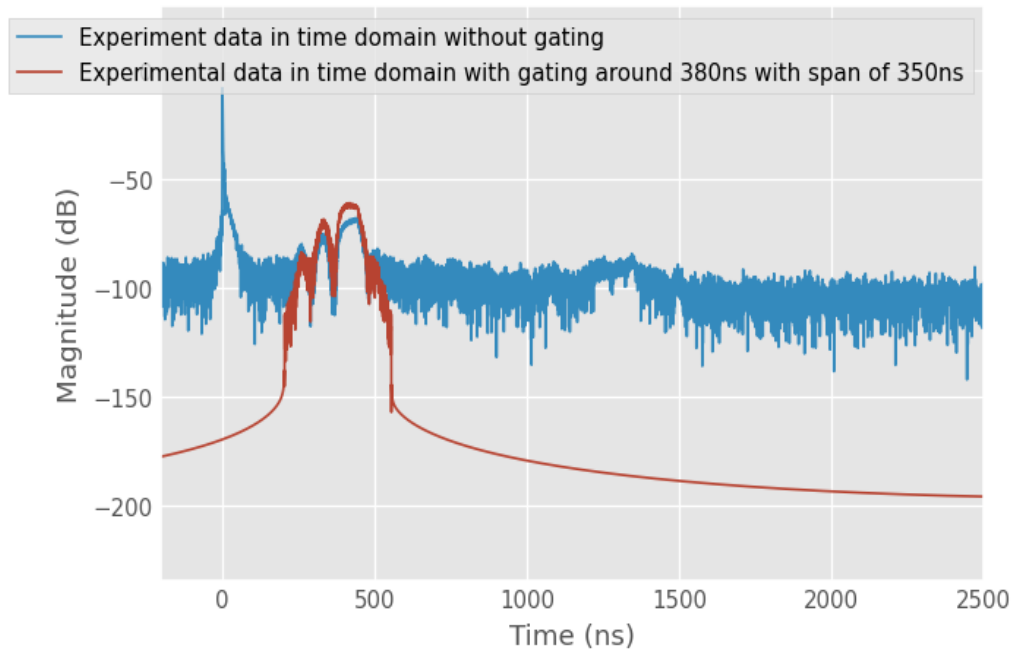
Вимірювання проводили за допомогою векторного аналізатора мережі (VNA). Дані були проаналізовані та візуалізовані за допомогою бібліотеки python sci-kit RF.

Теоретична модель, яка обговорювалася раніше, та експериментальний результат зображені разом на малюнку 2.9. На вершині пелюстків є сигнал биття.



*Рисунок 2.9 Параметр S21: порівняння теоретичних розрахунків (червоний) і вихідних експериментальних даних (синій)*

Це биття виникає внаслідок інтерференції, не пов'язаної з SAW, наприклад індукцією струму . Коли електричний струм досягає контактів



*Рисунок 2.10 Експериментальні данні в імпульсному представлені до стробування (синій) та після (червоний)*

пристрою та IDT, він індукує електричне та магнітне поле, яке може індукувати струм на приймальному IDT. Крім того, виникає потрійний транзитний сигнал, оскільки частина сигналу SAW відбивається від приймального IDT, поширюється назад до стартових IDT і знову відбивається, поширюючись уздовж початкового напрямку , і в цей час виявляється приймачем . Щоб усунути такі ефекти, нам потрібно було б виконати стробування у часовій області.

Спочатку ми перетворимо дані у часову область (рис. 2.10). Тоді ми будемо обробляти сигнал приблизно за 380 нс із шириною 350 нс. Ці параметри були обрані на основі наступних міркувань: центральна частота становить близько 427 МГц. Використовуючи рівняння (1.31 ), виводимо, що швидкість

SAW становить приблизно 3430 м/с . Після цього перший сигнал досягає 1,3 мм через 380 нс. Часовий інтервал 350 нс був обраний для захоплення всіх пелюсток відповіді. Після вибору потрібного імпульсу виконуємо перетворення Фур'є назад до параметра S21 (рисунок 2.11)

Як бачимо, теорія відповідає експерименту. Однак висота бічних пелюсток нижча за прогнозовану. Це тому, що модель не враховує втрати, тому фактичні дані відрізняються.

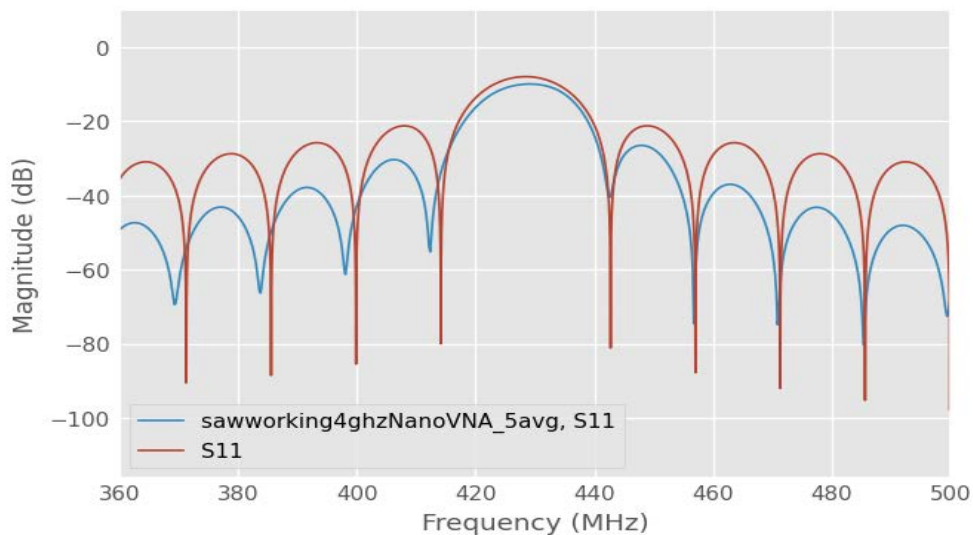


Рисунок 2.11 S21 параметр: порівняння теоретичних обчислень (червоний) та експериментальних даних після стробування у часовій області (синій)

## Висновки

Ми виготовили прилади SAW з центральною частотою 427 МГц. Теоретичний графік параметра  $S_{21}$  незначно відрізняється від експериментальних даних. Це можна пояснити як недосконалістю пристрою, так і простотою обраної теоретичної моделі. Аналіз ускладнюється потрійним транзитним сигналом і ефектами, не пов'язаними з ПАВ, такими як індукція електричного струму. Ці ефекти були зменшені стробуванням у часовій області. Розроблено ширину структури пристрою від 100 нм до 1 мкм. Існує проблема із зернистою поверхнею, яку ми вирішили, встановивши оптимальну дозу впливу. Лінія затримки SAW може запускати поверхневі акустичні хвилі для експериментів, які вивчають вплив SAW на різні фізичні системи.

## Список використаної літератури

- [1] S. Datta, *Surface Acoustic Wave Devices*, Englewood Cliffs: Prentice Hal, 1986, pp. 194-240.
- [2] D. Morgan, *Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing*, London: Academic Press, 2007.
- [3] P. Delsing, "The 2019 surface acoustic waves roadmap," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 52, no. 353001, 2019 .
- [4] M. Yakoi, "Negative resistance state in superconducting NbSe<sub>2</sub> induced by surface acoustic waves," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 34, 2020.
- [5] R. Peng, A. Ripin. and Y. Ye, "Long-range transport of 2D excitons with acoustic waves," *Nature Communications*, vol. 13, no. 1334, 2022.
- [6] R. Sasaki, Y. Nii and Y. Onose, "Magnetization control by angular momentum transfer from surface acoustic wave to ferromagnetic spin moments," *Nature Communications*, vol. 12, no. 2599, 2021.
- [7] H. Edlbauer, "In-flight distribution of an electron within a surface acoustic wave," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, no. 114004 , 2021.
- [8] L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Theory of Elasticity*, London: Pergamon Press; Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co, 1959, pp. 1 - 5.
- [9] A. F. Anatoli Babin, *Neoclassical Theory of Electromagnetic Interactions*, London: Springer, 2016, p. 671–674.
- [10] P. Steinmann, *Geometrical Foundations of Continuum Mechanics*, Berlin,

Heidelberg: Springer , p. 276.

- [11] L. D. Landau and E. M. Lifshits, Theory of elasticity, London: Pergamon Press; Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co., 1959, pp. 98-100.
- [12] L. D. Landau and E. M. Lifshits, Theory of elasticity, London: Pergamon Press, 1959, p. 11.
- [13] D. Morgan, Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing, Jordan Hill: Academic Press, 2007, pp. 44 - 46.
- [14] L. Goncharov and V. Brekhovskikh, Mechanics of Continua and Wave Dynamics, Berlin: Springer, 1985, pp. 55-58.
- [15] L. Goncharov and V. Brekhovskikh, Mechanics of Continua and Wave Dynamics, Berlin: Springer, 1985, pp. 58-59.
- [16] S. V. Biryukov, Y. V. Gulyaev and V. V. Kry, Surface Acoustic Waves in Inhomogeneous Media, Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 1995, pp. 1-5.
- [17] S. Datta, Surface Acoustic Devices, Prentice Hall, 1986, pp. 52-53.
- [18] D. Morgan, Surface Acoustic Wave Filters, 2nd ed., Jordan Hill: Academic Press, 2007, pp. 4-6.
- [19] S. Datta, Surface Acoustic Wave Devices, Englewood Cliffs: Prentice Hal, 1986, pp. 17-19.
- [20] M. Travagliati , R. Shilton , . F. Beltram and M. Cecchin, "Fabrication, Operation and Flow Visualization in Surface-acoustic-wave-driven Acoustic-counterflow Microfluidics.," *J. Vis. Exp.*, vol. 78, no. e50524, 2013.

