

АКУСТОЕЛЕКТРОНІ КА

№5

Прилади акустоелектроніки

Резонатори. Хвилеводи. Лінії затримки.

4.8. Резонатори на пружних хвилях

Основні області застосування резонаторів:

- **частотно-задаючі елементи в стабільних генераторах**, які вимагають високої добротності та малої швидкості старіння,
- **елементи фільтрів**, в тому числі багатоканальних, для виділення окремих каналів.

4.8.1 Резонатори на об'ємних АХ

Дія резонатора на ОАХ основана на **багатократному відбитті хвиль від двох протилежних граней кристалу**. Коефіцієнт відбиття від вільної поверхні кристалу не дорівнює одиниці, перш за все, з причини його **навантаженості повітрям**. Одначе, від цього можна позбавитись, занурюючи резонатор до вакууму. Такі кристалічні резонатори вимагають забезпечення високого рівня паралельності двох поверхонь, що відбивають АХ.



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

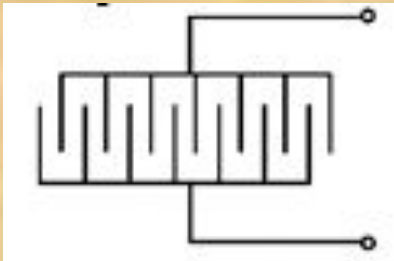
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.8.2. Резонатори на поверхневих АХ

На частотах понад 100 МГц працюють резонатори на ПАХ. Верхня частотна межа застосування резонаторів на ПАХ визначається точністю нанесення відбивних металевих смужок та електродів. Сучасні методи електронно-променевої та рентгенівської літографії дозволили просунути верхню межу виготовлення резонаторів на ПАХ до ≈ 2 ГГц.

I. Простіший ПАХ-резонатор - **протяжний ЗШП**.



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

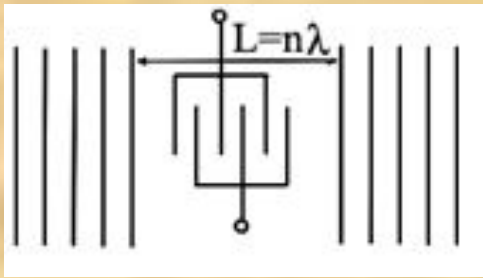
Обмеження на максимальне значення добротності:

втрата, обумовлені генерацією перетворювачем паразитних ОАХ, перевипромінення ПАХ між сусідніми електродами.

Для зменшення втрат застосовують багатoelementні перетворювачі з "розщепленими" електродами та застосовують звукопроводи з малим значенням коефіцієнту електромеханічного зв'язку K .

II. ПАХ-резонатори типу **Фабрі-Перо** складаються з **двох систем відбивачів** хвиль з **великим коефіцієнтом відбиття**; вони **рознесені на відстань** та забезпечують **адитивну інтерференцію** хвиль при їх послідовних відбивань. При рознесенні двох систем відбивачів утворюється **резонуюча порожнина**, зв'язок з якою можна здійснити за допомогою одного чи більше ЗШП, розташованих різними способами.

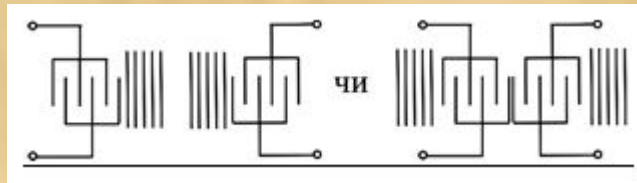
Одновходовий резонатор. Системи відбиваючих ґраток аналогічні до



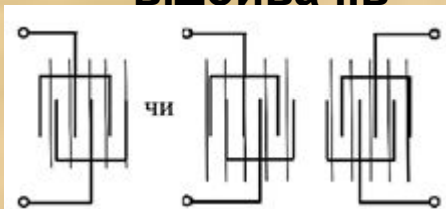
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

ЗШП знаходяться ззовні чи в середині резонаторної порожнини:

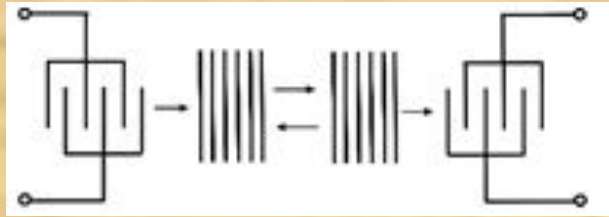


ЗШП розміщуються безпосередньо на ґратці відбивачів



Робиться у випадку, коли відбивачі виготовлено **дифузією іонів** в матеріал звукопроводу, чи методом **імплантації**. В таких схемах можливе використання схеми з одним чи двома ЗШП.

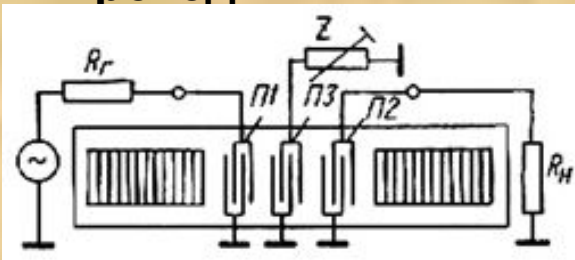
Як працює двовходовий прохідний резонатор ?



- аналогічно до оптичного резонатору типу Фабрі-Перо: замість дзеркал тут застосовують ґратки з чергуючимся значенням опору (аналог оптичного скла із складним діелектричним покриттям). Тому від певної їх частини ПАХ відбиваються або проходять.

- переріз відбивача в такому резонаторі (тришарова структура).

Двовходовий резонатор може бути з електронною підстройкою:



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

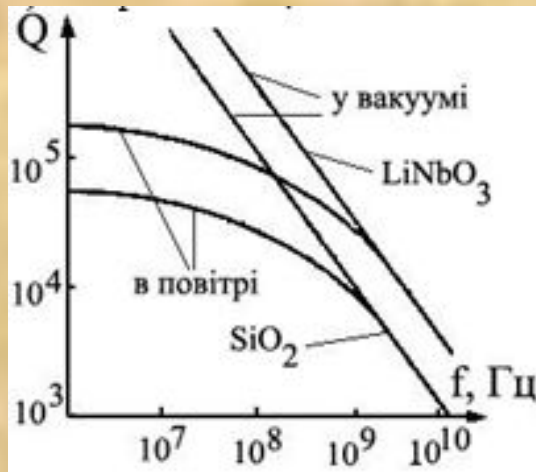
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.8.3. Добротність АХ резонаторів

Чинники величини добротності резонаторів на ПАХ:

- 1) в'язкісні втрати в матеріалі звукопроводу;
- 2) втрати, пов'язані з передачею енергії хвилям, що збуджуються в повітрі;
- 3) втрати, пов'язані з дифракційною розбіжністю пучку хвиль;
- 4) втрати, пов'язані із генерацією об'ємних АХ перетворювачами;
- 5) випромінення, пов'язане із витіканням енергії хвиль через відбиваючі ґратки.



Якщо позбутися вкладів п.3-5 та розмістили прилад у вакуумі, то добротність резонатора буде обмежуватись тільки **в'язкими втратами**.

- відповідні розрахунки для кварцу та ніобата літію в повітрі та вакуумі.

4.9. Хвилеводи для пружних хвиль

- - **частинний випадок звукопроводу.**, в якому поширюються не тільки нульові моди (з однорідним розподілом амплітуди хвилі), а й **більш високі моди коливань.**

Хвилеводи на ОАХ - смужки чи проволоки використовуються як лінії затримки на великі часи затримки.

Хвилеводи на ПАХ

Пучкам ПАХ у різноманітних приладах притаманні такі **недоліки:**

- дифракційне розширення пучків хвиль,
- неефективне використання поверхні звукопроводу,
- порівняна складність повороту пучка ПАХ для зміни напрямку поширення.

В результаті **збільшуються енергетичні втрати** та спотворюються результуючі характеристики приладів.

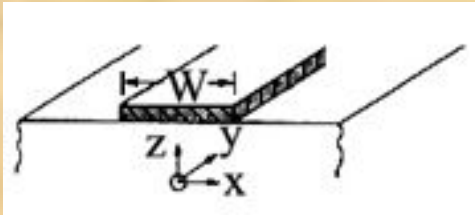
Для подолання цих недоліків застосовують **хвилеводи** – **протяжні геометричні структури, які розташовані вздовж напрямку поширення хвилі, та обмежують поперечний розмір ПАХ, локалізуючи її.**

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

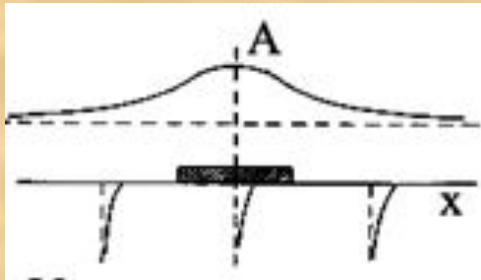
4.9.1 Плоскі шаруваті хвилеводи.

- в них смужка з одного матеріалу розміщується на підкладці з іншого.



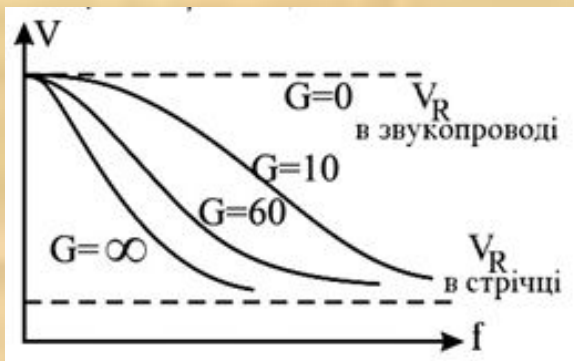
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

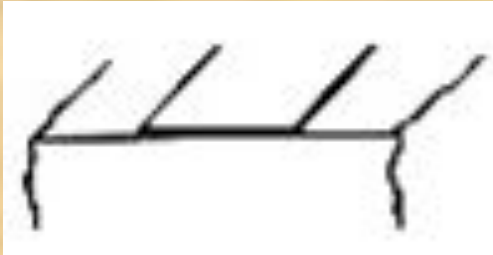
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



- спостерігаємо значну дисперсію хвиль. На низьких частотах хвиля переважно поширюється в звукопроводі (типова ПАХ Релея). Із збільшенням частоти більша частина енергії ПАХ концентрується в стрічці і поступово швидкість хвилі в хвилеводі прямує до ПАХ Релея в матеріалі стрічки. Таким чином, поперечний розподіл амплітуди хвилі сильно залежить від частоти.

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



- тонка металева плівка на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу. Плівка закорочує тангенційні складові електричного поля ПАХ, що викликає локальне незначне зменшення хвилі на величину ΔV під плівкою:

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

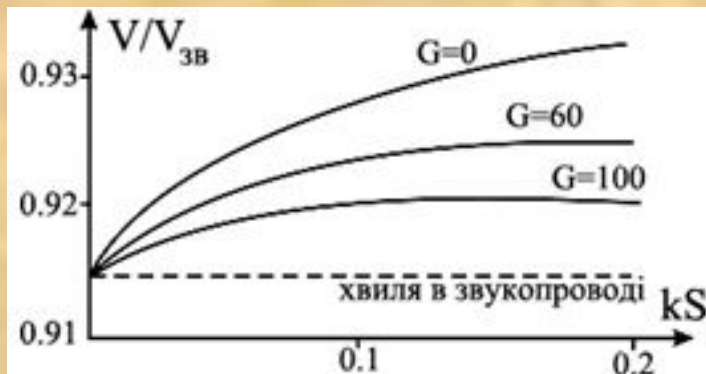
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Щілинний хвилевід



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

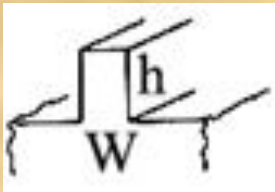


Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.9.2 Топографічні хвилеводи

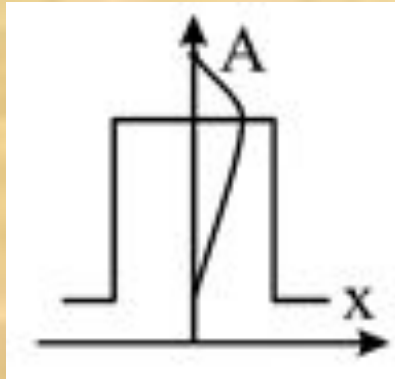
- утворюються при **локальній деформації (топографії) звукопроводу**. Каналювання енергії хвилі відбуваються в результаті зменшення утримуючих сил, що діють на поверхню матеріалу звукопроводу (топографічні хвилеводи не мають аналогів серед електромагнітних хвилеводів). **Деформація має** бути такою, аби **утворювати виступ**, а не заглиблення.



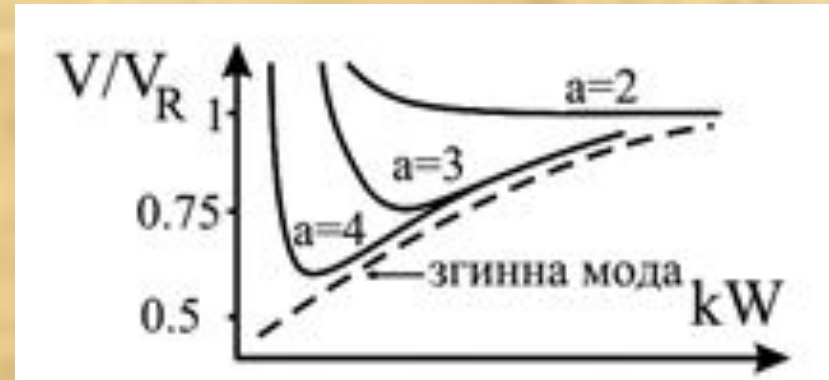
Прямокутний гребінь

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



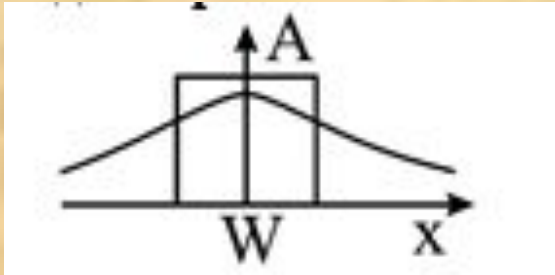
- розподіл енергії
несиметричної
моди



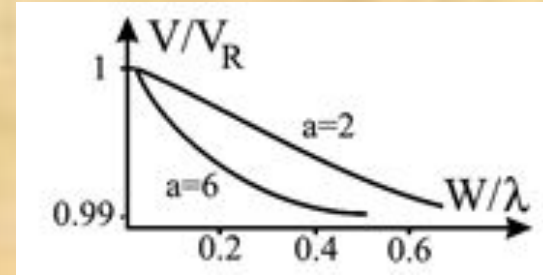
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Симетрична мода (псевдорелеєвська) - має широкий частотний спектр, характеризується **сильною просторовою локалізацією** (особливо на ВЧ) та **малою дисперсією**.



- розподіл енергії симетричної моди на НЧ



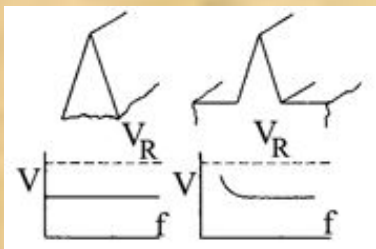
- дисперсія швидкості для різних співвідношень висоти та ширини гребню (характерні розміри: $W=10$ мкм, $h=1$ мм).

На НЧ вплив основного хвилеводу є суттєвим і енергія хвилі сконцентрована в основному звукопроводі - тому **дисперсія така, як і ПАХ Релея**. На **ВЧ** поглинання хвилі у верхній частині гребня настільки значне, що **хвиля**, по суті, **є відірваною від основного звукопроводу**; при цьому зміна дисперсії (швидкості) складає $\approx 1\%$.

Клиноподібний хвилевід



- складається із клину на поверхні звукопроводу. *Ідеальний клин* (підкладка дуже віддалена) характеризується тільки кутом клину незалежно від інших розмірів. Тому швидкість хвилі не залежить від довжини хвилі - **дисперсії немає**.

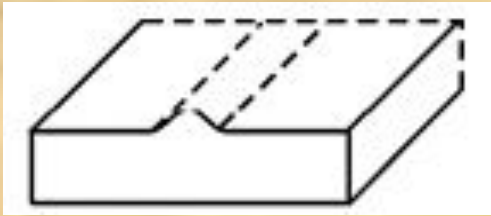


Для “ідеального” клину швидкість – дисперсія пряма, що паралельна до вісі частот. У випадку “реального” клину майже вся енергія на ВЧ сконцентрована в клині. Із зменшенням частоти частина енергії хвилі поширюється по підкладці. В залежності від кута клину існують декілька мод, їх енергія зосереджена на вершині клину.

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об’ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Хвилевід з округлим гребнем



Зі зменшенням висоти та збільшенням ширини прямокутного гребеневого хвилеводу, цей гребінь набуває форми підвищення на поверхні звукопроводу та може виступати в якості хвилеводу, оскільки хвилі будуть поширюватися через області з меншою фазовою швидкістю.

Хвиля відхилятиметься в область із більшою кривиною поверхні (меншим радіусом кривини).

Цей принцип каналювання енергії **застосовується** в таких приладах як діелектричний хвилевід, затримуючі системи ламп біжучої хвилі, світловоди з тепловими лінзами для лазерного випромінювання.

4.9.3 Хвилеводи із локальною зміною властивостей матеріалу звукопроводу

Поверхня звукопроводу залишається плоскою при певній зміні його властивостей в приповерхневих шарах. Способи локальної зміни властивостей звукопроводу:

- **пряма дифузія**, яка призводить до зміни швидкості чи поглинання ПАХ;
- **іонна імплантація**;
- **деполяризація** (у випадку сегнетоелектриків)

Дифузійні хвилеводи



Дифузія іонів металів (Ti, Ni, Cr) у звукопровід LiNbO_3 призводить до збільшення швидкості ПАХ на 1-2 % при несуттєвому збільшенні

Добротність коливально-резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

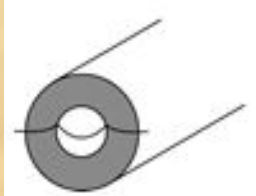
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

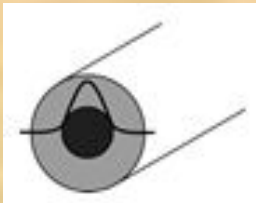
4.9.4 Круглі волоконні хвилеводи

Круглі волоконні хвилеводи застосовуються в лініях затримки на великі часм затримки та є аналогічними до оптичних волоконних хвилеводів. Основні вимоги при їх створенні: малі втрати та слабка дисперсія.



Капілярне волокно

ПАХ направляються вздовж внутрішньої поверхні. Основна мода є по суті Релесвською, скрученою в циліндр (вісь якого співпадає з напрямком поширення). Енергія хвилі спадає за $e^{-\alpha r}$ у радіальному напрямку від внутрішньої поверхні. Виготовляють такі структури термічним витягуванням із стандартної кварцевої трубки. На частоті $f=16$ МГц втрати ПАХ становили 6 дБ/м (переважно втрати перетворювачів).



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ Мгц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Переваги: не потрібно працювати над якістю поверхні, хвилевід можна згортати в спіраль для отримання великих часів затримки, немає втрат на повітряне навантаження.

Недолік: складність приєднання перетворювачів АХ.

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ Мгц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.9.5 Інші типи хвилеводів

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

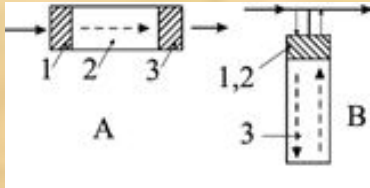
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.10 Лінії затримки

4.10.1 Основні параметри та класифікація

Області застосування ЛЗ: радіолокаційна апаратура, прилади зв'язку, телебачення, обчислювальна техніка.



ЛЗ складаються з **трьох основних елементів**: вхідного та вихідного перетворювачів хвиль (1,2) та звукопроводу (3).

Варіанти конструкцій ЛЗ: на прохід (А, вхідний та вихідний перетворювачі розділені) та на відбиття (В, перетворювач працює як вхідний в момент подачі на нього сигналу, що потім затримується, та як вхідний при зйомі з нього затриманого сигналу).

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини

$Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має

дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на

частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Порівняння параметрів ЛЗ

Типи хвиль	Час затримки τ	f_0	$\Delta f, \text{МГц}$	Втрати L, dB
Об'ємні	1 мкс – 10 мс	1 МГц – 1 ГГц	0,1 ÷ 300	40 – 80
Поверхневі	0,5 мкс – 1 мс	5 МГц – 1,5 ГГц	0,5 ÷ 200	15 – 80
Хвилеводні	20 мкс – 20 мс	1 МГц – 300 МГц	0,1 ÷ 2	10 – 60

Класифікація ЛЗ за функціональністю

- 1) **Калібраційні** – “на відбиття”, дають на виході еквідистантні затримані сигнали при подачі на вхід одиночного імпульсу (застосовуються для контролю параметрів радіолокаційної апаратури)
- 2) **Багатовідводні** - з декількома виходами при одному загальному вході (застосовуються для формування кодованих сигналів та в якості узгоджених фільтрів)
- 3) **Змінні** - з затримкою, що плавно змінюється (застосовуються в спеціальній апаратурі)
- 4) **Дисперсійні** – величина часу затримки залежить від частоти (застосовуються в приладах формування та стискування сигналів з частотною модуляцією).

4.10.2 ЛЗ на об'ємних хвилях

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини

$Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має

дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на

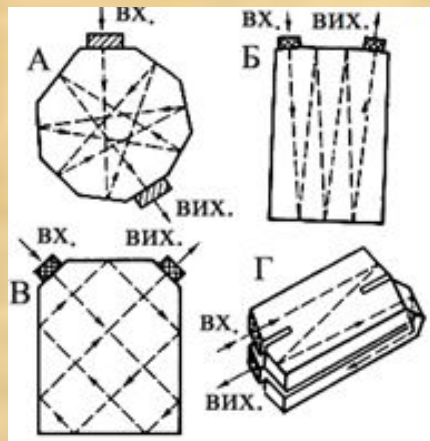
частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та

крихкою. Наприклад, для кварцу:

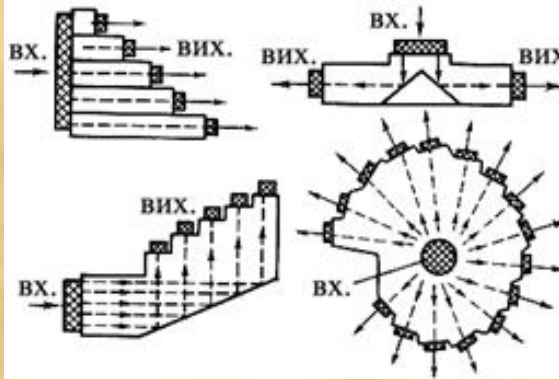
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Конструкції ЛЗ на об'ємних АХ

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

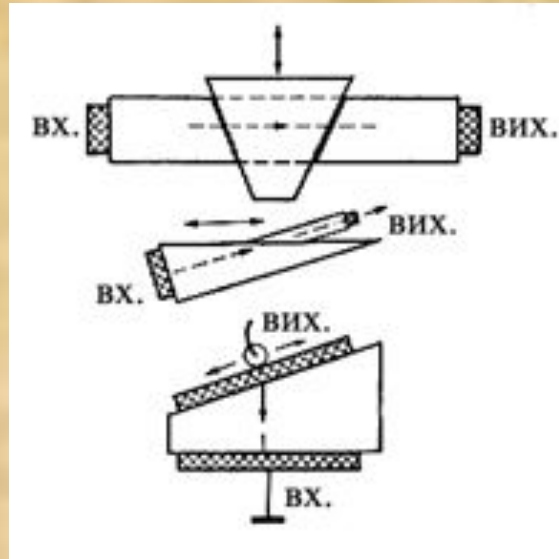


$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



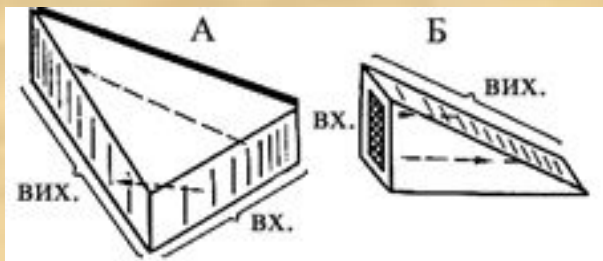
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ Мгц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ Мгц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



Дисперсійні ЛЗ

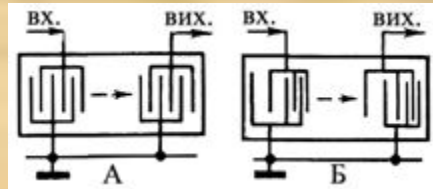
Перпендикулярно-дифракційні ЛЗ (А) - вхідний та вихідний перетворювачі виконано у вигляді **однофазних нееквідистантних ґраток** (з смужок п'єзоелектрика CdS, ZnO) та нанесено на взаємно перпендикулярні грані кварцу.

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.10.3 ЛЗ на поверхневих АХ

4.10.3.1 Загальні



перетворення хвиль відбувається за допомогою електродів, що наносяться на поверхню звукопроводу у вигляді **ЗШП** із еквідистантними (А) чи нееквідистантними (Б) ґратками. Ширина електродів та проміжків між ними складає, зазвичай,

Добротність колидних резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

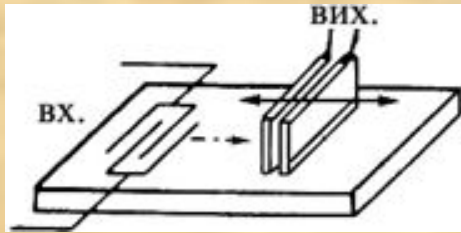
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Типові параметри ЛЗ на

Матеріал Звукопроводу	Час затримки τ , мкс	Робоча частота f_0 , МГц	Відносна смуга $\Delta f/f_0$	Втрати L , дБ
Кварц SiO_2	1 – 100	$10 - 10^3$	0,15	30 – 60
Ніобат літію $LiNbO_3$	1 – 20	$10 - 3 \cdot 10^3$	0,3	8 – 40
Германа вісмуту $Bi_{12}GeO_{20}$	1 – 100	10 – 600	0,15	20 – 50
П'єзокераміка	1 – 20	10 – 30	0,3	8 – 15

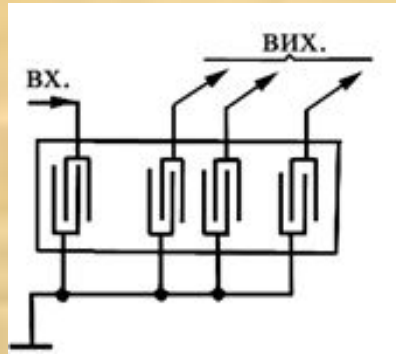
Як правило, вхідний та вихідний перетворювачі однакові, одначе їх товщини та резонансні частоти – різні. Це робиться для збільшення смуги пропускання.

4.10.3.2 Конструкції ЛЗ на поверхневих АХ



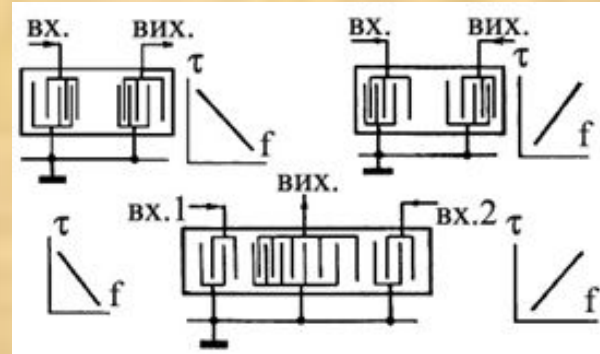
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

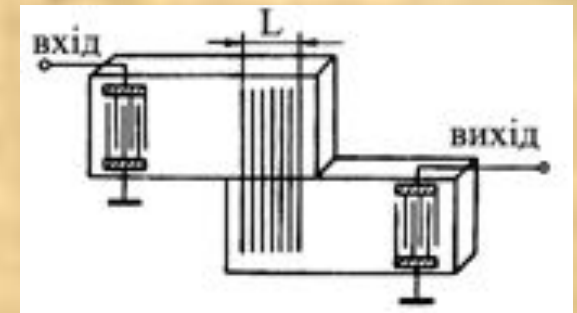
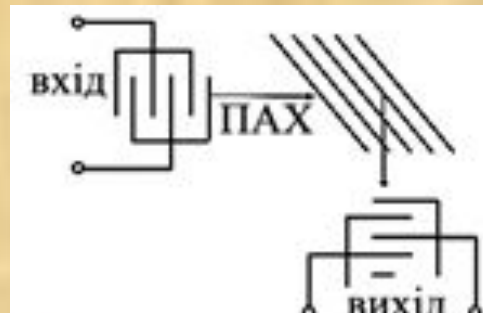
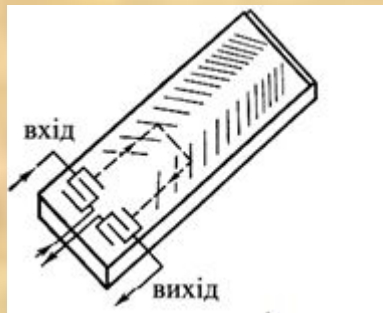


Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному робочими гратками та є різною величини $Q_0 = 10^3 - 10^4$. Тому на частотах проходу λ дорівнювати половині довжини хвилі $\lambda/2$. Отже на частотах λx понад $f = 50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу $\lambda = 3 \cdot 10^{-3}$

$f_0, \text{МГц}$		20 – 300	300 – 700	700 – 2000
$\Delta f/f_0$		0,1 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,3
$L, \text{дБ}$	LiNbO_3	15 – 20	20 – 40	50
	SiO_2	25 – 30	30 – 40	65 – 70



ЛЗ на системі відбиваючих ґраток із змінним кроком - ПАХ різних частот проходять різні шляхи (залежить від кроку ґратки).

ЛЗ на системі відбиваючих ґраток із сталим кроком – вузькосмугова ЛЗ

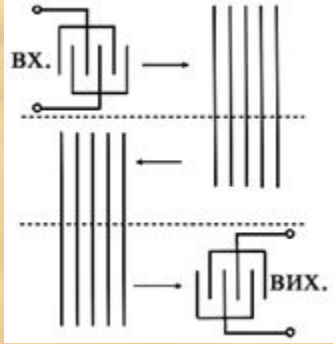
ЛЗ на системі напрямлених відгалужувачів - збільшується відстань, яку проходять ПАХ

4.10.4 ЛЗ на ПАХ з великим часом затримки

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

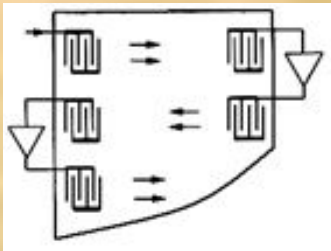
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

4.10.4.1 ЛЗ з плоскою поверхнею



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ Мгц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

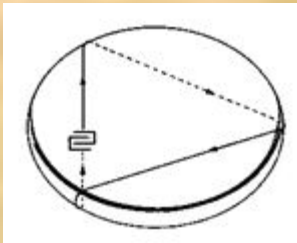


- **меандровий шлях** поширення ПАХ: об'єднання коротких ЛЗ із підсилювачами для підсилення рівня сигналу, що компенсує відносно втрати в кожній з ЛЗ

4.10.4.2 ЛЗ на викривлених поверхнях

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

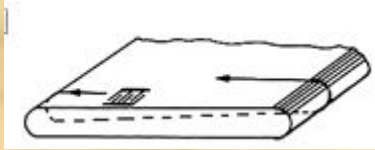
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



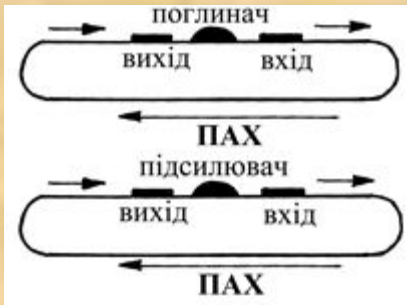
Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати **половині довжини хвилі** $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ **понад $f=50$ МГц**, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Циліндричні ЛЗ



- прямокутна пластина з округленими торцями, що дозволяє прямолінійній траєкторії “накручуватись” на зовнішню поверхню звукопроводу без помітного спотворення профілю хвилі



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

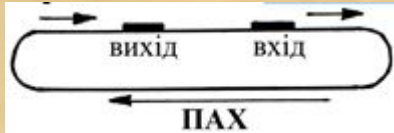
$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



- в ЛЗ без поглинача поширення ПАХ відбувається по замкненій траєкторії паралельно до вісі звукопроводу. Детектування здійснюється після одного чи декількох циркуляцій хвиль.



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

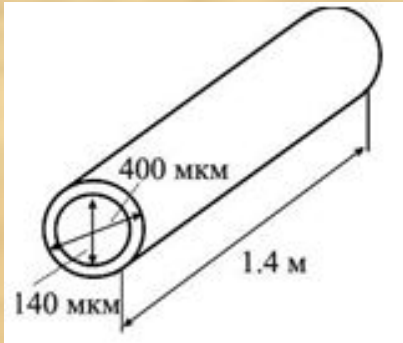
Проблеми технології при виготовленні ЛЗ

Виготовлення циліндричних ЛЗ вимагає великих зусиль по шліфуванню, поліруванню та доводці кристалів звукопроводу.

При використанні обох робочих поверхонь звукопроводу необхідно:

- 1) забезпечити строгу паралельність поверхонь;
- 2) витримувати паралельність торцевих поверхонь, інакше втратиться когерентність пучка ПАХ;
- 3) забезпечити постійність радіусу закруглення з точністю до долів довжини хвилі ПАХ в будь-якій сагітальній площині в будь-якому перерізі по вісі зразка.

4.10.5 Хвилеводі ЛЗ



Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Добротність коливань резонаторів на ОАХ обмежується в основному об'ємними втратами та сягає величини $Q_0 \approx 10^5$. Товщина матеріалу звукопроводу має дорівнювати половині довжини хвилі $S = \frac{\lambda}{2}$. Отже на частотах АХ понад $f=50$ МГц, пластина стає тонкою та крихкою. Наприклад, для кварцу:

$$S = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} = 3 \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Дякую за увагу!

