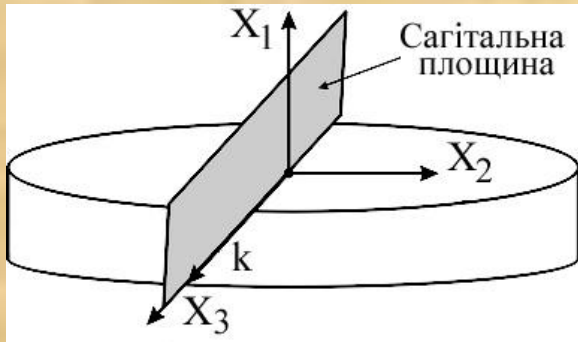


# **АКУСТОЕЛЕКТРОНІ КА**

**№2**

**Поверхневі акустичні  
хвилі**

# ПАХ Релея в ізотропному і анізотропному середовищах



Для ПАХ Релея в напівобмеженому п'єзоелектрику вихідною є система рівнянь з закону Гука, другого закону Ньютона та матеріального

Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку**! Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку**! Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

# ПАХ Релея в ізотропному і анізотропному середовищах

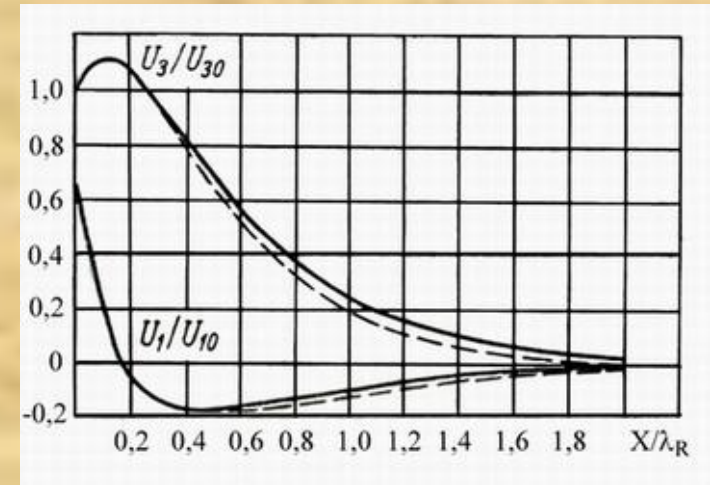
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



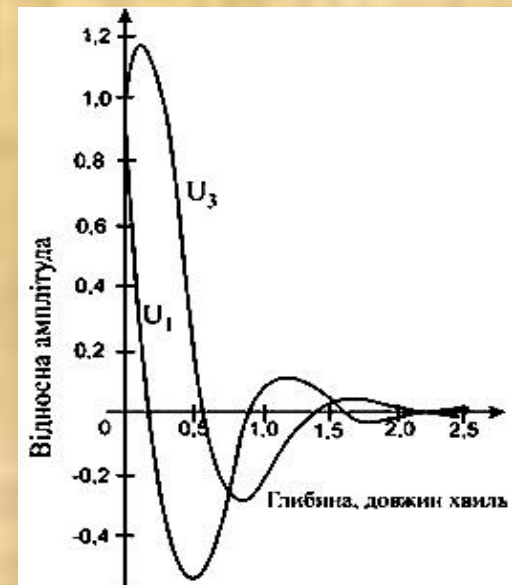
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

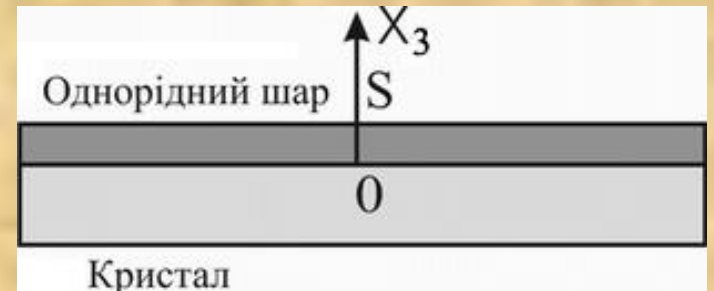
$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Поширення ПАХ Релеєвського типу в тонких шарах

**Електричне закорочення** вільної поверхні акустичного кристалу – один з методів керування властивостями АХ. Розглянемо вплив на характеристики ПАХ поверхні акустичного кристалу шляхом **нанесення однорідного ізотропного шару**.



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

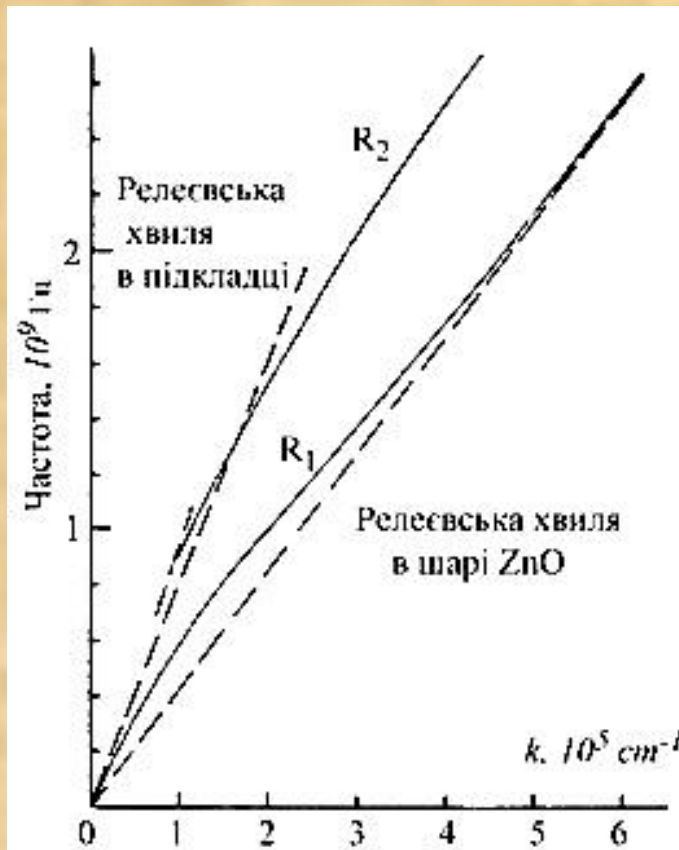
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Дисперсія ПАХ у структурі тонкого шару ZnO



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

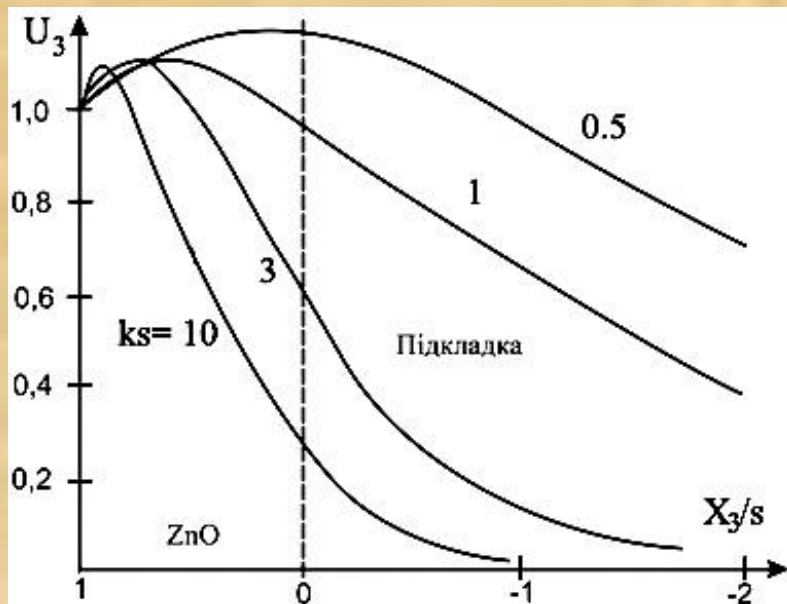
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна-Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

# Дисперсія ПАХ у структурі тонкого шару ZnO



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

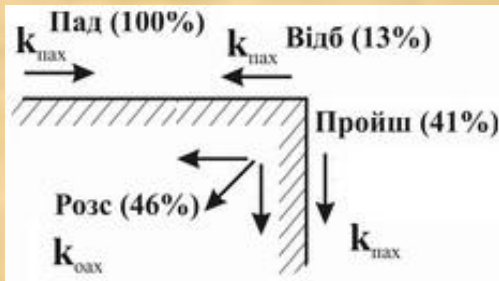
# Відбиття поверхневих АХ

До цього часу середовище поширення ПАХ вважалось необмеженим як в напрямку поширення, так і в перпендикулярному до нього напрямку. Одначе, всі прилади мають обмежені розміри, тому для практики є важливими випадки:

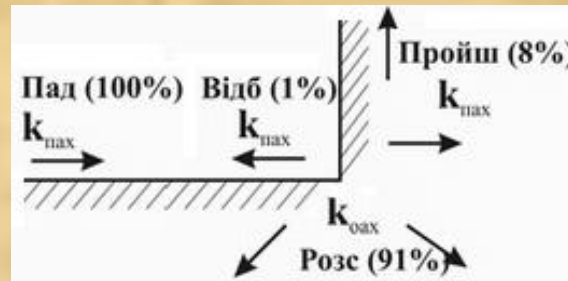
- відбиття АХ від розриву поверхні
- дифракційні явища (через обмежений поперечний розмір пучку хвиль)

# Відбиття ПАХ від розриву поверхні

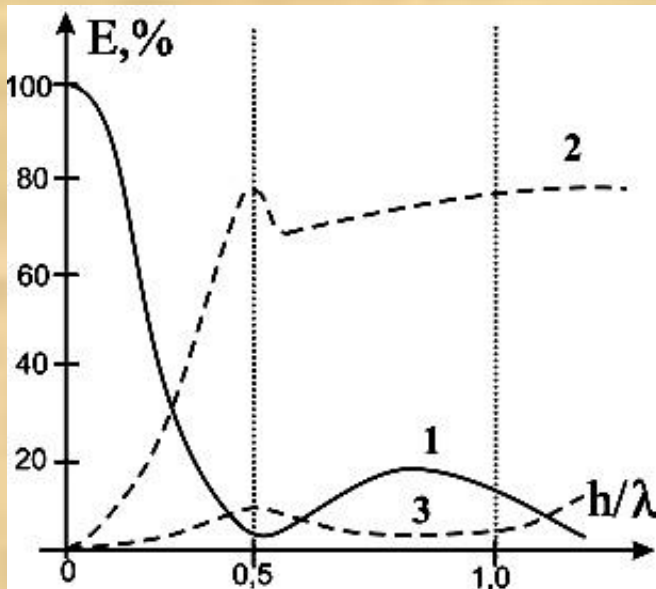
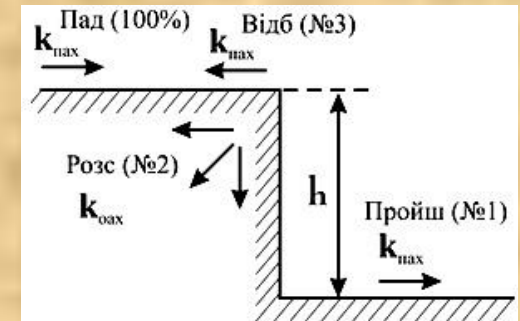
Кут 90



кут 270



сходи́нка



- крива 1 відповідає хвилі, що пройшла як поверхнева по перешкоді (пряма ПАХ)
- крива 2 відповідає хвилі, яка перетворилась у об'ємні хвилі та випроменилась вглиб кристалу (сягає 83%).
- крива 3 відповідає хвилі, яка відбилася як поверхнева від верхньої частини сходи́нки



# Диференційні явища при поширенні ПАХ

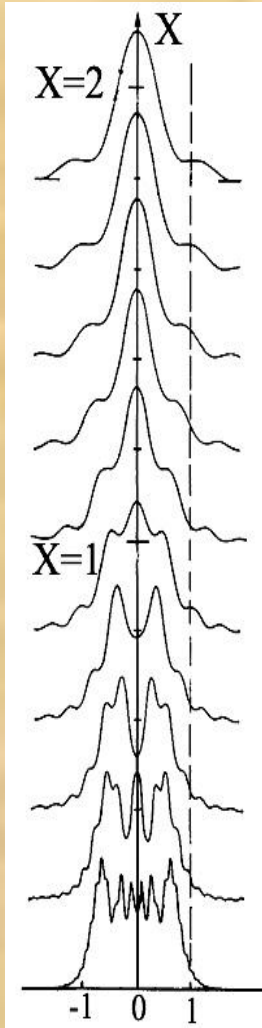
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Енергетичні співвідношення для акустичних хвиль

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

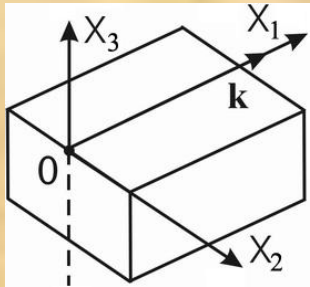
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

# Енергетичні співвідношення для акустичних хвиль



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Феноменологічний опис поглинання АХ

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Феноменологічний опис поглинання АХ

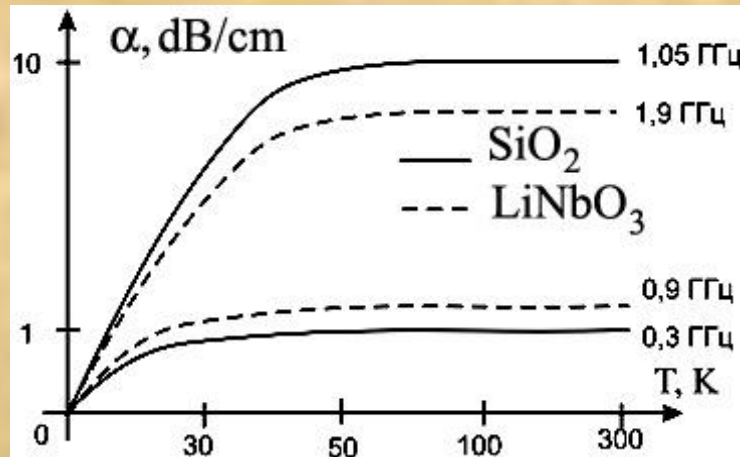
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

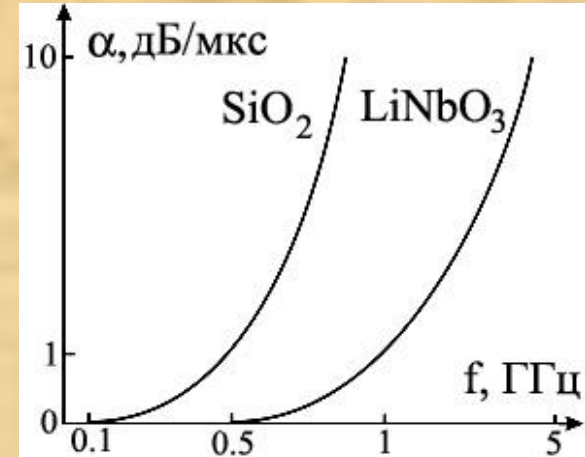
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

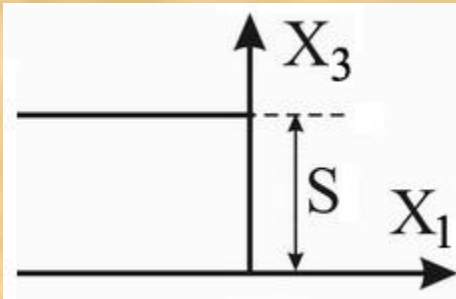


**температурна залежність втрат енергії ПАХ при на різних частотах в найбільш популярних акустичних кристалах – кварцу та ніобату літію**



**частотна залежність поглинання ПАХ в цих же кристалах на одиницю часу затримки при кімнатній температурі**

# Хвилі Лемба

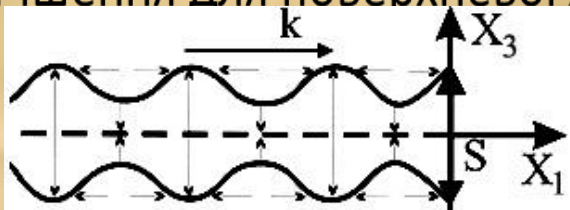


Поширюються в пластині твердого тіла з вільними границями, зміщення вузлів кристалічної ґратки в відбуваються як напрямку поширення хвилі, так і перпендикулярно до нього.

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

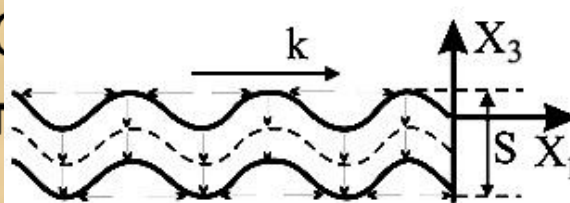
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:



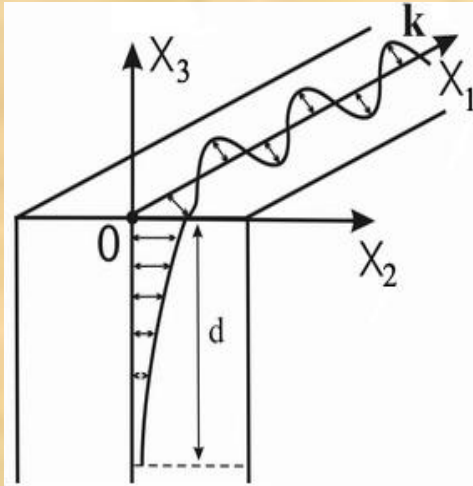
$$U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\}$$

$$\varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\}$$

—Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого** ступеня. Швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Хвилі Гуляєва-Блюстейна



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

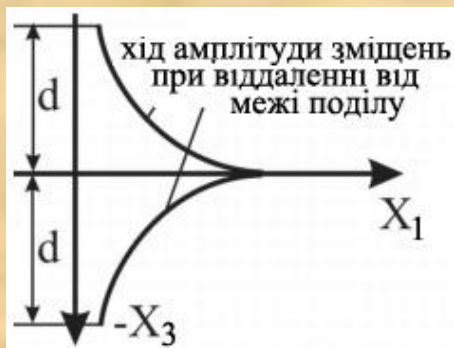
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



# Хвилі Стоунлі



**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами

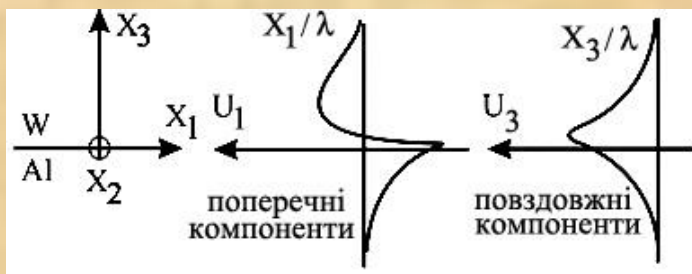
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

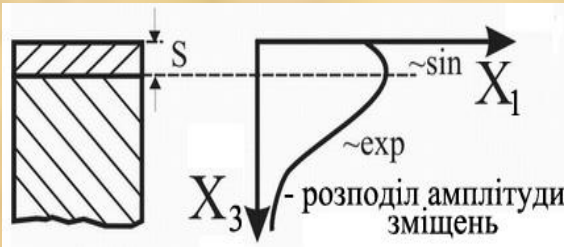
Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



Розподіл повздовжніх та поперечних зміщень хвилі Стоунлі, яка поширюється межею поділу шарів **алюмінію та вольфраму**. Практичний інтерес хвилі Стоунлі мають з причини можливості їх використання в приладах, де **поверхня поділу не зазнає впливу атмосфери**.



# Хвилі Лява



Поширюються в структурі напівнескінченне середовище **тонка плівка** (пластина). Це хвилі з **горизонтальною поляризацією**, вузли кристалічної ґратки зміщуються **перпендикулярно** до хвильового вектора та **паралельно** площині поділу.

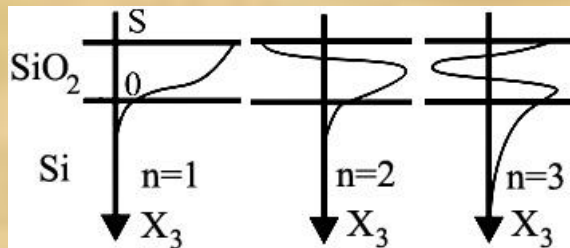
**Граничні умови:** відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при  $X_3 = 0$ :

$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

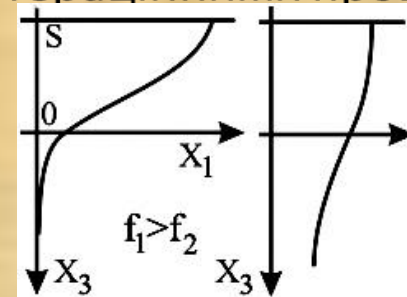
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

Отримуємо рівняння Гріна–Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого порядку!** Далі пошук швидкості ПАХ Релея  $V_R$  йде ітераційними процедурами



зміна за товщиною амплітуди різних мод хвиль Лява (плівка кварцу на підкладці кремнію): на заданій частоті, **проникнення хвилі в підкладку збільшується із збільшенням номеру моди**



з ростом частоти збільшується частка енергії, що поширюється в плівці: на низьких частотах хвиля Лява являє собою типову ПАХ, на високих - ПАХ ПАХ

# Ультразвукова локація

**Ультразвукова локація** - виявлення та дослідження об'єктів шляхом аналізу випромінених ними чи відбитих від них ультразвукових хвиль.

**Пасивна локація** - визначення напрямку на об'єкт та його місцезнаходження відбувається за допомогою створеного ним самим звукового поля.

**Активна локація** - визначення напрямку на об'єкт та його місцезнаходження відбувається за допомогою відбитого від об'єкта сигналу (останній попередньо опромінюється ультразвуковими пристроями).

## Локація у тварин

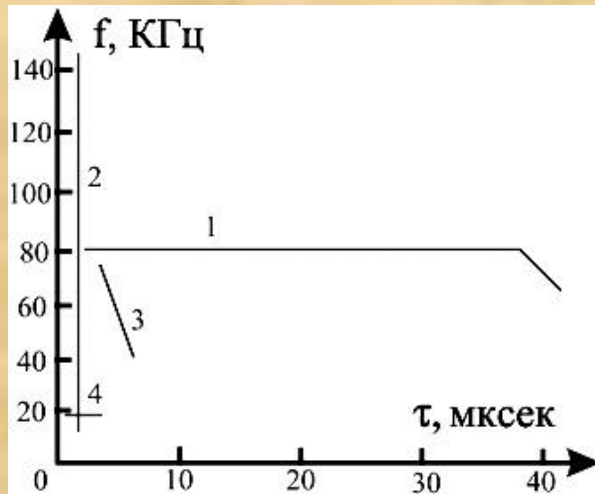
Тварини та птахи, в яких **виявлено ультразвукову локацію**:

- кажани, які в основному ведуть нічний спосіб життя
- птахи гуахаро, які живуть в темних печерах
- деякі землерийки
- кіти
- дельфіни.

**Мета локації** у тварин:

- орієнтація в просторі (сигнали випромінюються рідко)
- виявлення та переслідування здобичі (частота слідування сигналів зростає)

# Ультразвукова локація



**Сонограма ЕХО** - локаційних сигналів тварин: 1 – великий підковоніс, 2 – дельфін, 3 – гладконосий кажан, 4 – мадагаскарська землерийка.

У **великого підковоноса** (землерийка) імпульс сталої частоти  $81\div 82$  кГц триває  $40\div 100$  мксек та за останні  $1\div 3$  мксек спадає до  $60\div 70$  кГц. У **дельфіна** тривалість імпульсу дуже мала  $0.04\div 0.1$  мксек із частотним спектром  $30\div 150$  кГц. Для **гладконосого кажана** сигнал триває з частоти  $75$  кГц впродовж  $2\div 5$  мксек і за цей час лінійно спадає до  $45$  кГц.

**Мадагаскарська землерийка** випромінює імпульсні сигнали тривалістю до  $3.5$  мксек з частотою  $20$  кГц.

**Ширина діаграми спрямованості:**

- у кажанів  $30\text{-}50^\circ$
- у дельфінів  $10\text{-}15^\circ$

З причини **малості тривалості** сигналів, що випромінюють тварини, сам сигнал не перекриваються з його відгуком в часі: **імпульси, розділені інтервалами від  $0.1$  мксек та більше, сприймаються як роздільні та не маскують один одного.**

Дякую за увагу!

