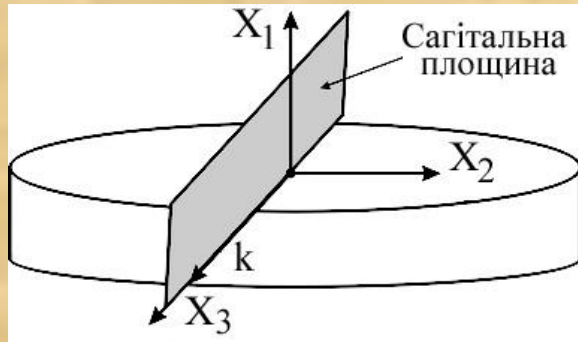


АКУСТОЕЛЕКТРОНІ КА

N°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

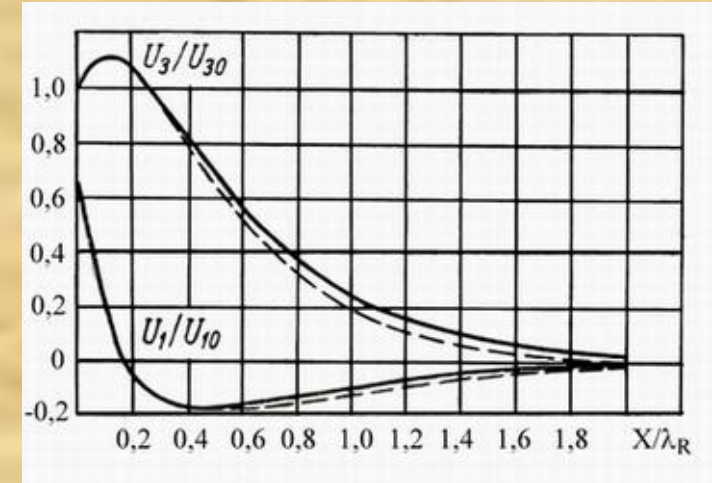
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзoeлектрика при $X_3 = 0$:

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

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



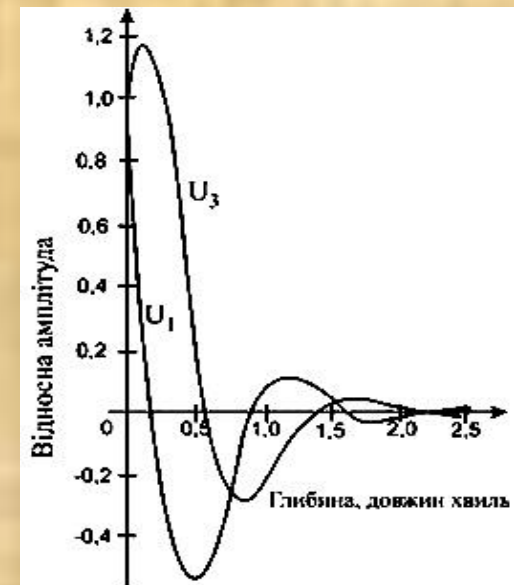
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзoeлектрика при $X_3 = 0$:

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

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

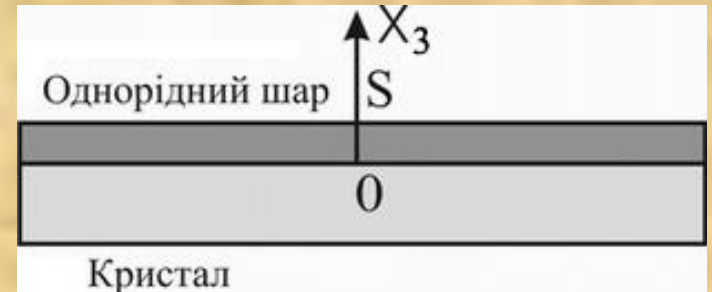
$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

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 $X_3 = 0$:

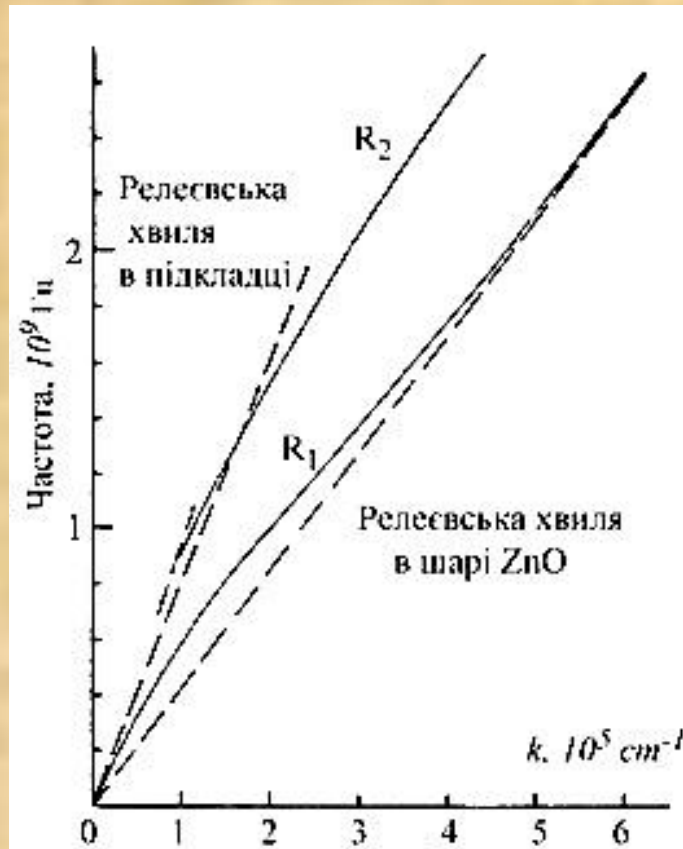
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

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 $X_3 = 0$:

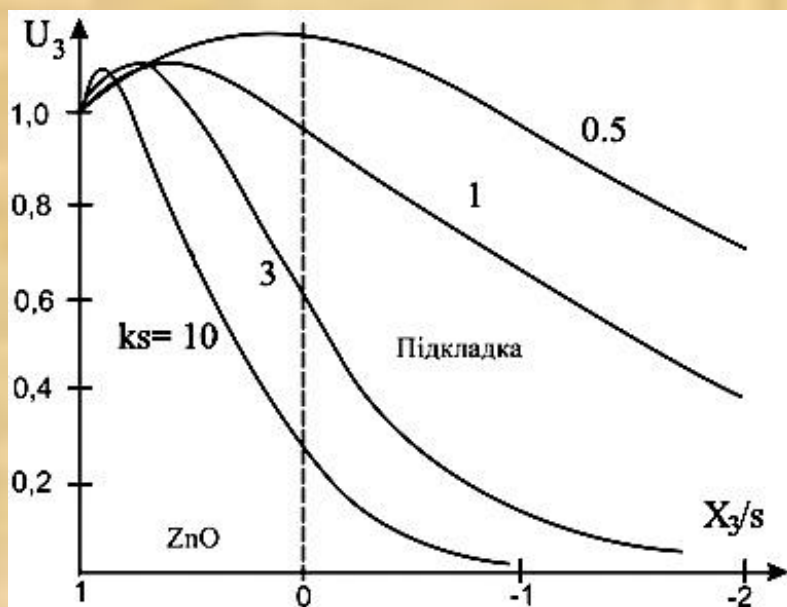
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

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

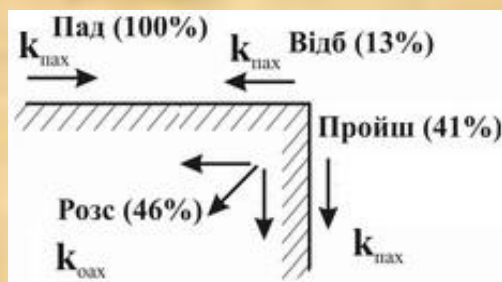
Відбиття поверхневих АХ

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**:

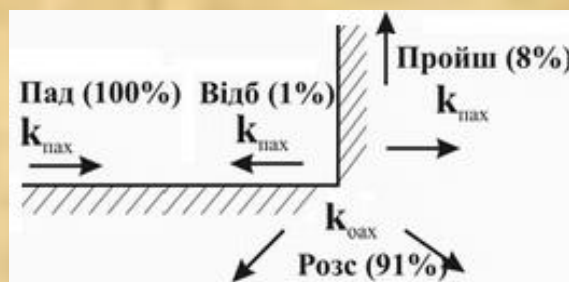
- **відбиття АХ від розриву поверхні**
- **дифракційні явища** (через обмежений поперечний розмір пучку хвиль)

Відбиття ПАХ від розриву поверхні

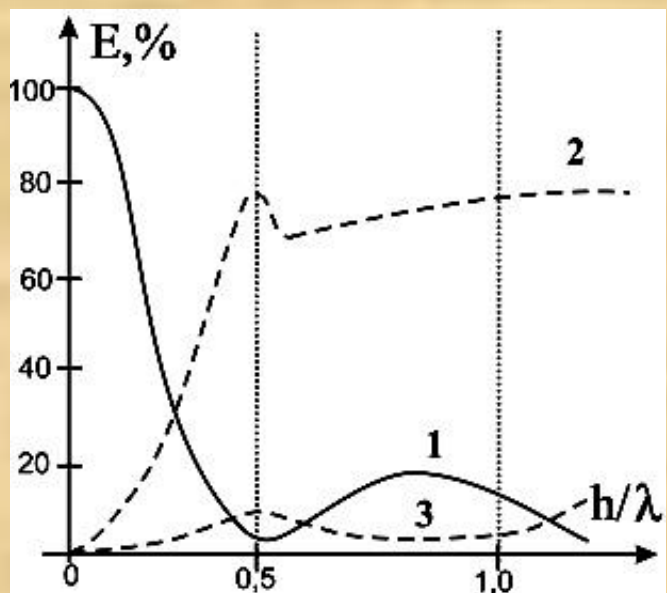
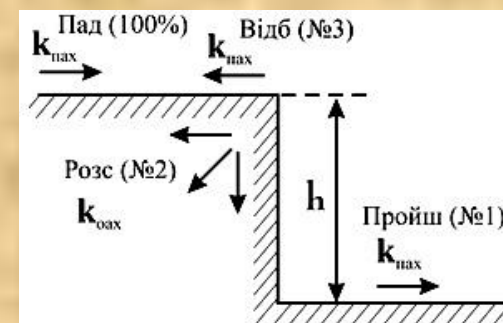
Кут 90



кут 270



сходинка



- 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 сходинки

Диференційні явища при поширенні ПАХ

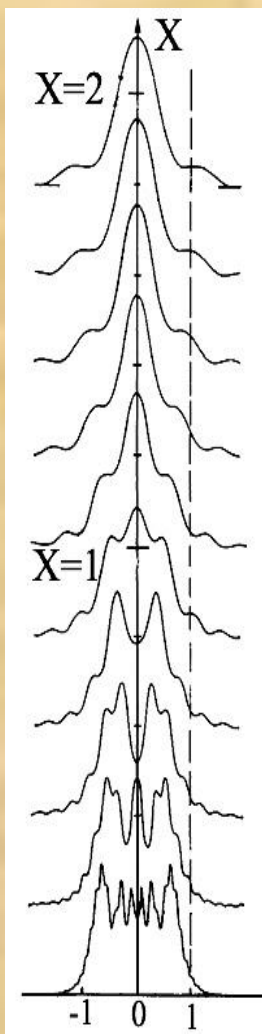
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при $X_3 = 0$:

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

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 $X_3 = 0$:

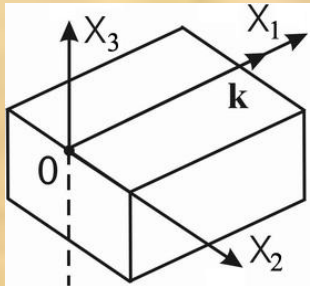
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

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

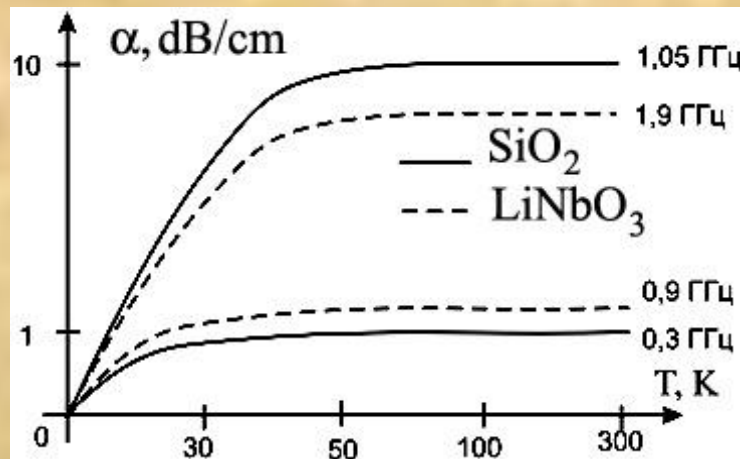
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзoeлектрика при $X_3 = 0$:

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

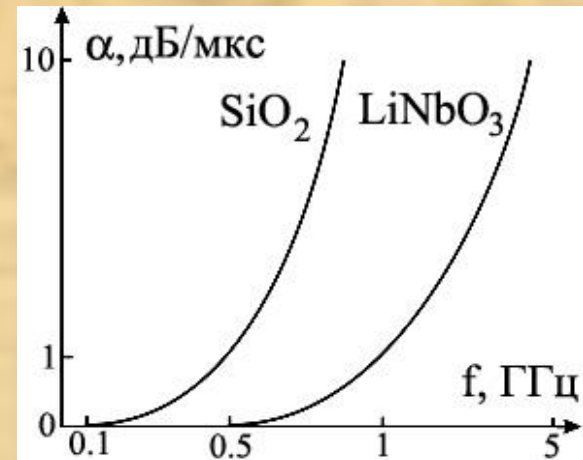
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

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

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

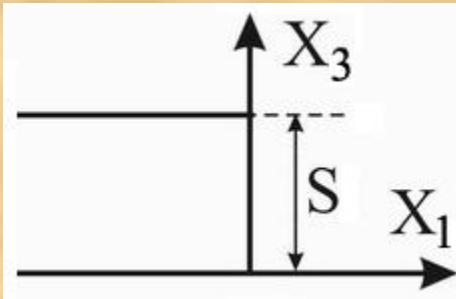


температурна залежність втрат енергії ПАХ при на різних частотах в найбільш популярних акустичних кристалах – кварцу та ніобату літію



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

Хвилі Лемба

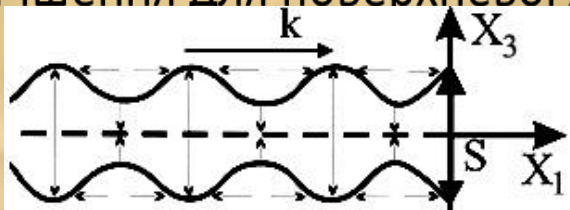


Поширюються в пластині твердого тіла з вільними границями, зміщення вузлів кристалічної ґратки в відбуваються як напрямку поширення хвилі, так і перпендикулярно до нього.

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

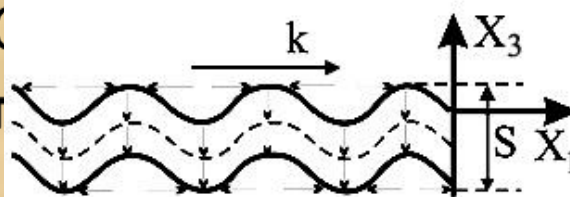
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

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



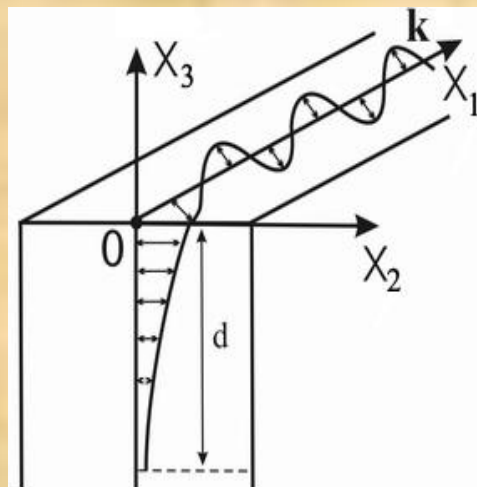
$$u_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\}$$

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



—Кристофеля, яке буде системою рівнянь **восьмого** степеня. 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 $X_3 = 0$:

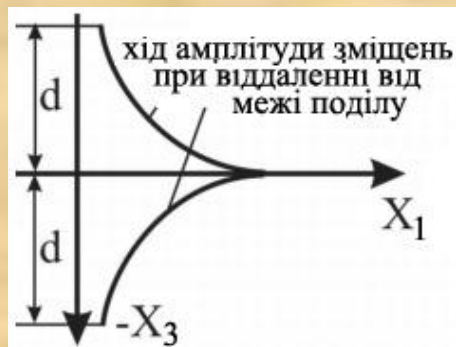
$$\begin{cases} \sigma_{3j} = 0 \\ \varphi_{na} = \varphi_{ia} \end{cases}$$

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'єзoeлектрика 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

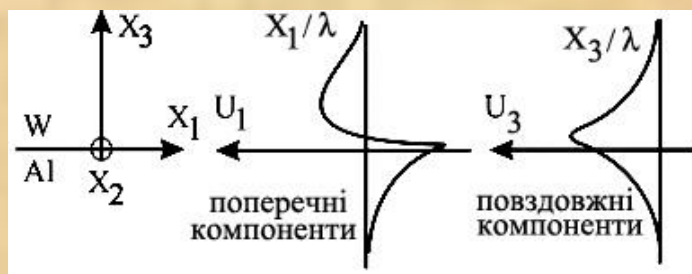
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзoeлектрика при $X_3 = 0$:

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

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

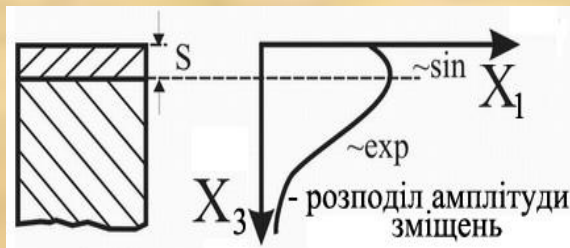
$$\begin{cases} U_i = U_i^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \\ \varphi = \varphi^0 \exp\{ik \cdot (n_i x_i - V_R t)\} \end{cases}$$

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

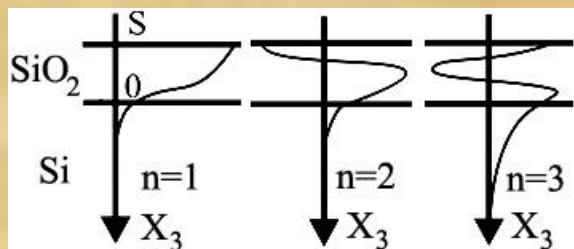
Граничні умови: відсутність механічних напружень та неперервність електричного потенціалу на вільній поверхні п'єзоелектрика при $X_3 = 0$:

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

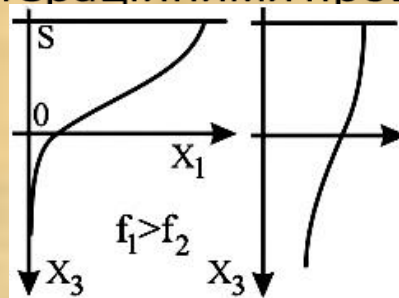
Рішення для поверхневої хвилі Релея будемо шукати у вигляді плоских хвиль:

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

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

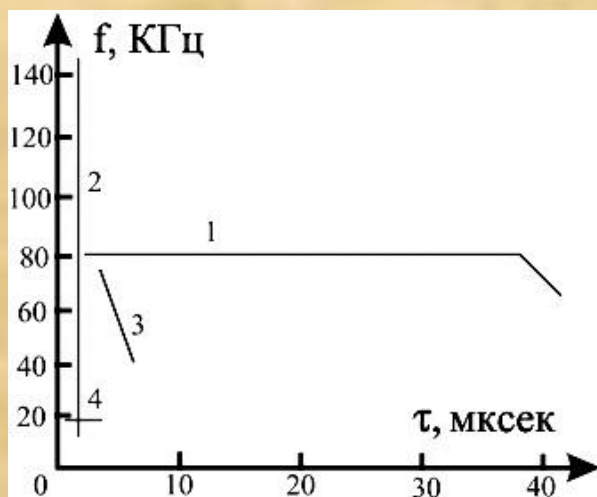
Тварини та птахи, в яких **виявлено ультразвукову локацію**:

- 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 перекривається 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!

