

СПІН-ХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА

№6

**Прилади спін-хвильової
електроніки**

Переваги МСХ на ПАХ в см- та мм-діапазонах довжин хвиль

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніабаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується можливість керування властивостями хвилі.

2) збільшуються втрати ПАХ:

$$\alpha \left(\frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right) = \frac{8.7 \omega^2 \eta}{2 \rho V_R^3}$$

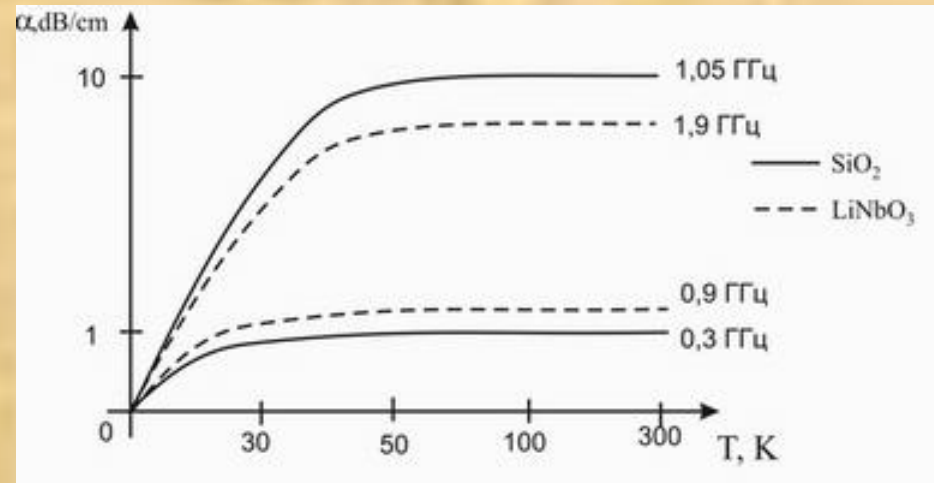
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніабаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



Висновок: на частотах понад 2 ГГц необхідно використовувати прилади на МСХ.

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Основні елементи МСХ-пристроїв

1. Феритовий зразок. Вимоги:

- мінімальні втрати при поширенні хвиль
- задані значення магнітних параметрів та товщини зразка
- однорідність в зоні поширення хвиль

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

 проволу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

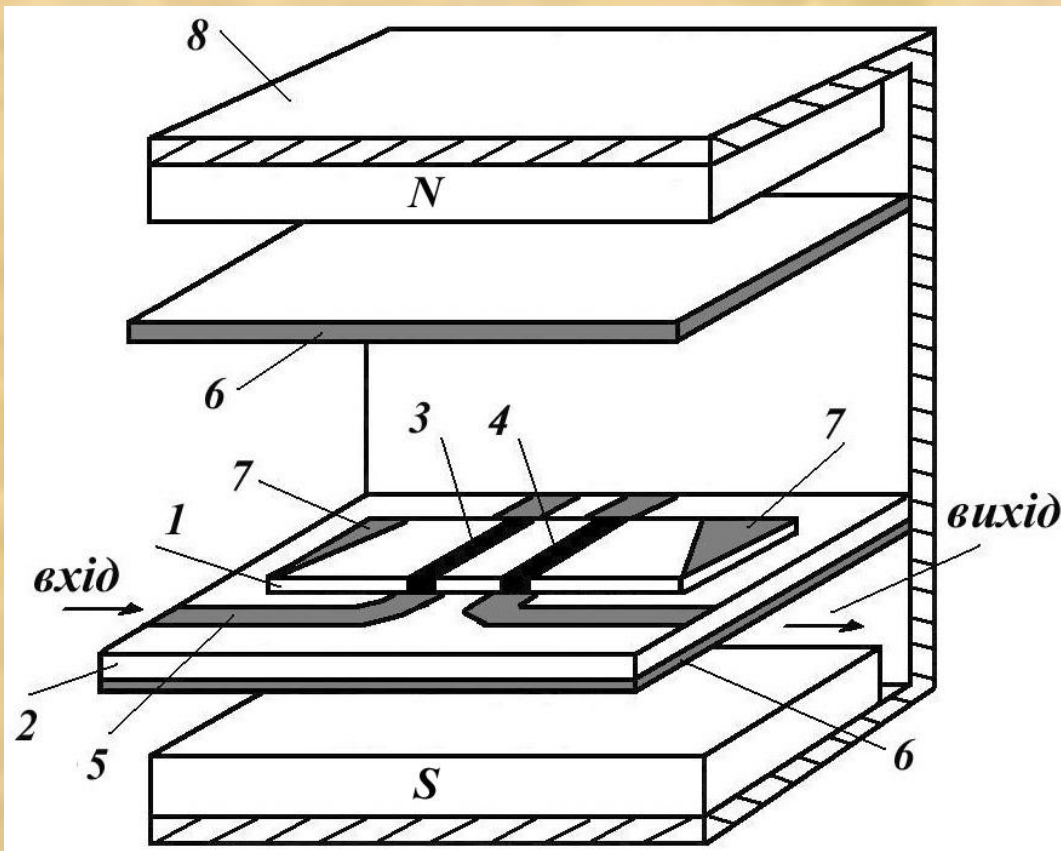


Для $f = 100 \text{ МГц}$ в ніобаті літію $\lambda_R = 35 \text{ мкм}$ (десятки тисяч атомних шарів),



для $f = 1 \text{ ГГц}$ маємо $\lambda_R = 3,5 \text{ мкм}$ (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



Конструкція типового пристрою на магнітостатичних хвилях: 1 – феритовий зразок, 2 – діелектрична підкладка, 3 та 4 – вхідний та вихідний перетворювачі хвиль, 5 – лінії зв'язку, 6 – металеві екрани, 7 – поглиначі енергії МСХ, 8 – магнітна система.

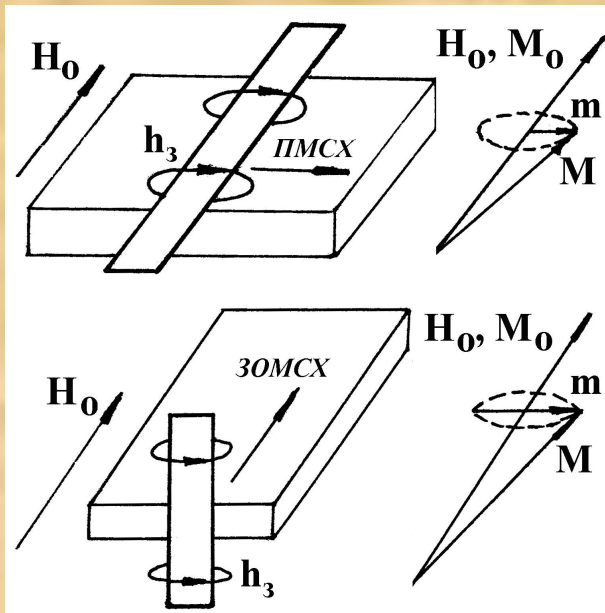
Взаємне перетворення електромагнітних та магнітостатичних хвиль

товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),
для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується
можливість керування властивостями хвилі.

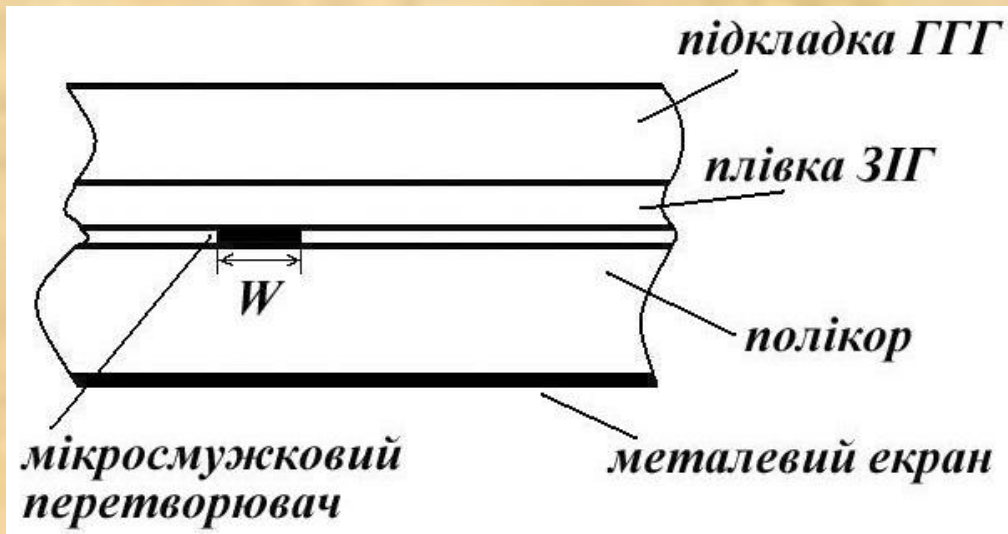
Збудження різних типів МСХ мікросмужкою з НВЧ струмом



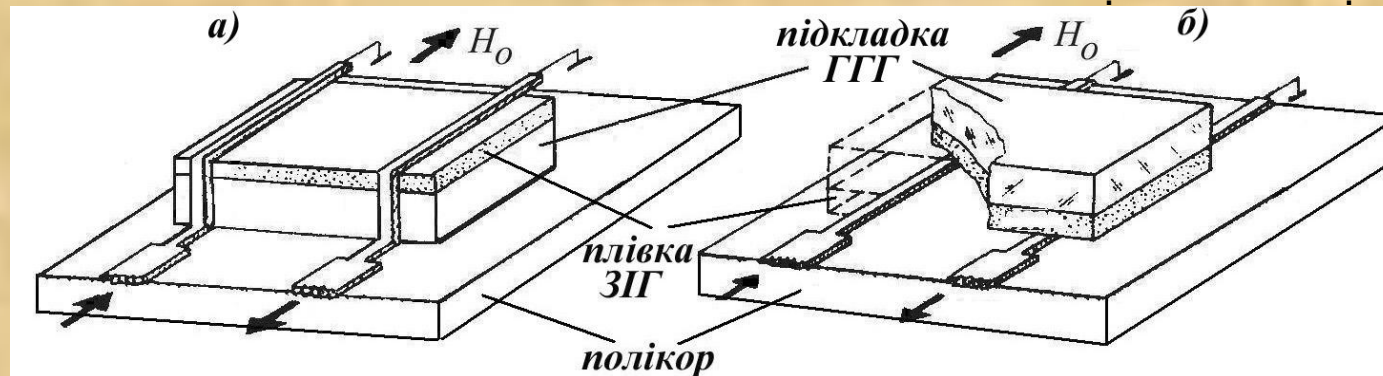
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

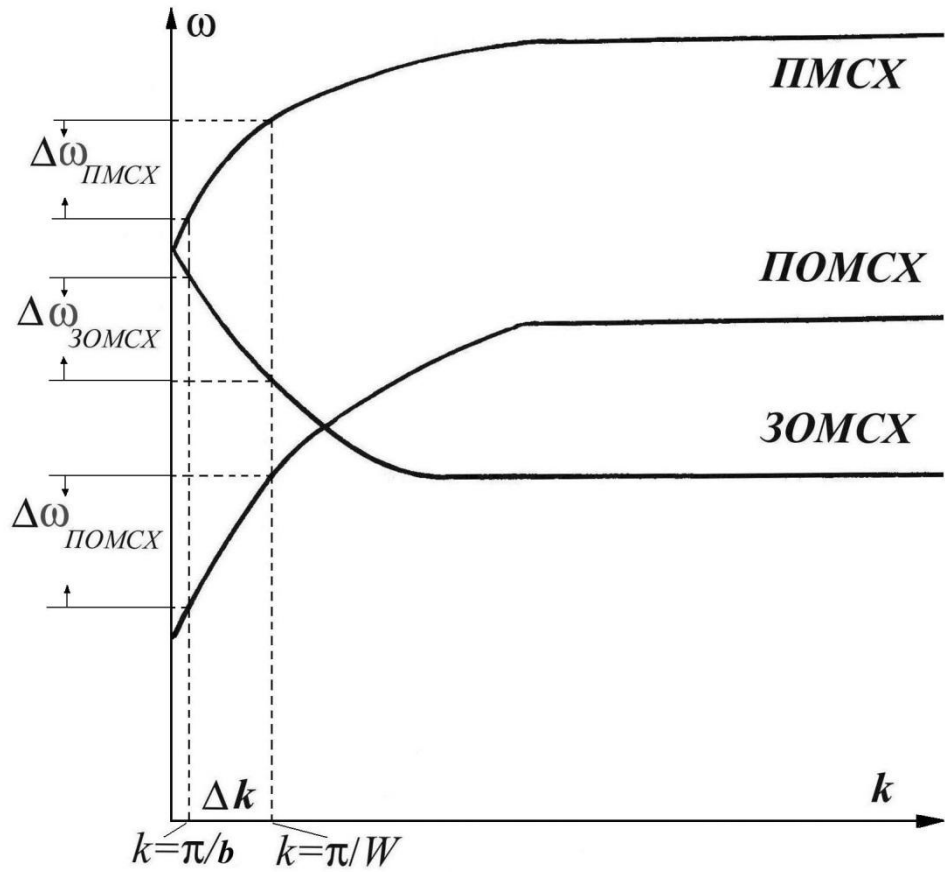
Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),
для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується
можливість керування властивостями хвилі.



- мікросмушковий перетворювач у вигляді металевого електрода шириною, який виготовляється методом фотолітографії з металевих плівок товщиною від 3-10 мкм, що наносять на діелектричну підкладку з полікору, сапфіру, кварцу; одностороння епітаксійна плівка ЗІГ на підкладці ГГГ притискується безпосередньо чи через діелектричну прокладку до електродів перетворювачів та полюсами



- конфігурації одноелектродних перетворювачів поверхневих МСХ з верхнім (а) та нижнім (б) розташуванням мікросмужок



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Фільтри на МСХ

Вимоги до сучасних фільтрів:

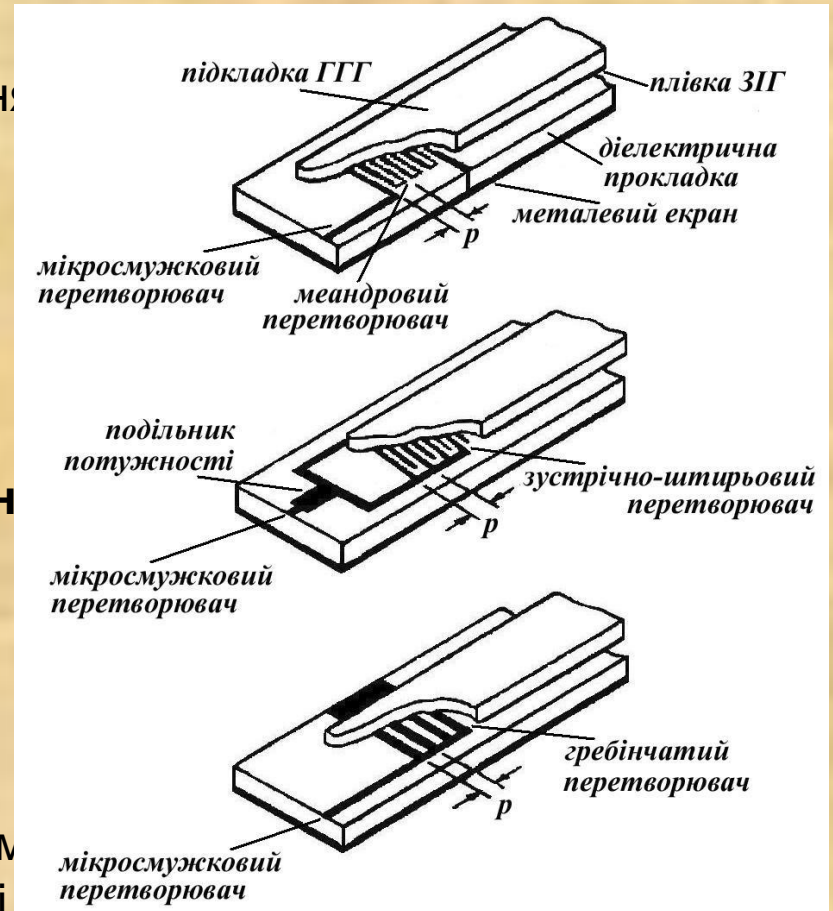
1) обмежена смуга пропускання
2) можливості електронного керування
роботи зміною величиною

3) забезпечення заданої форми
амплітудно-частотної і фазочастотної
характеристик

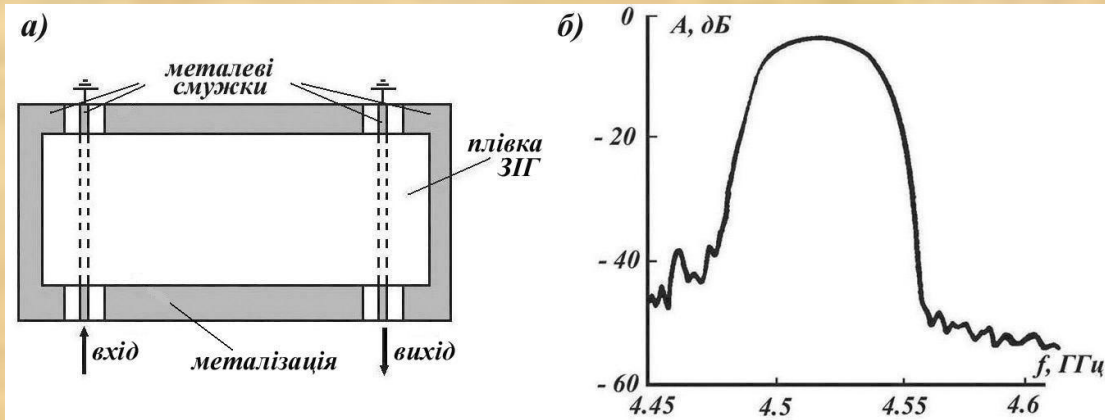
Щоб задовольнити ці вимоги необхідно
використовувати багатоелектродні
перетворювачі – меандровий, зустрічний,
штирьовий, гребінчастий

На форму АЧХ фільтра впливають:

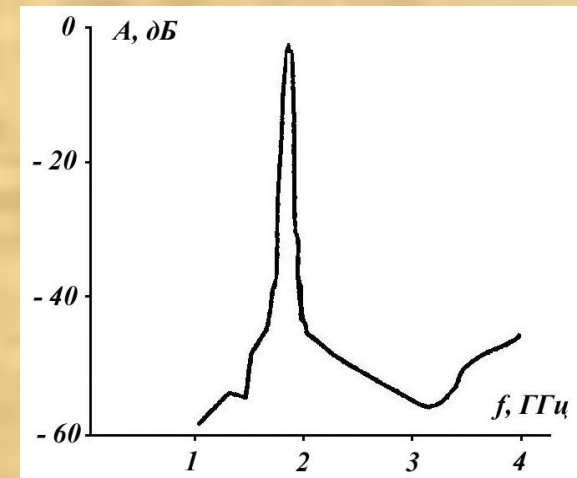
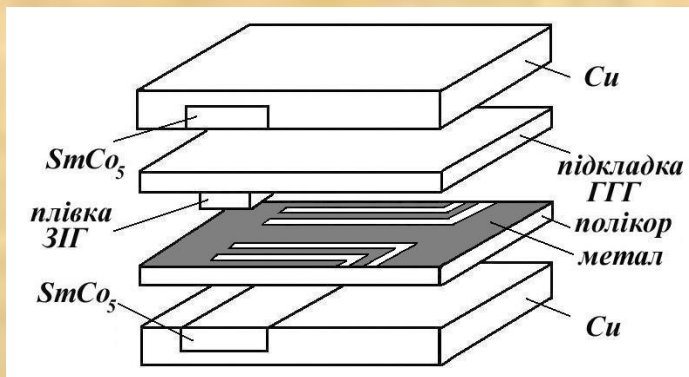
- кількість електродів
- тип МСХ, що збуджується
- товщина феритової плівки
- відстань між плівкою та перетворювачем
- величина втрат в феритовому матеріалі



Фільтри на епітаксійних плівках



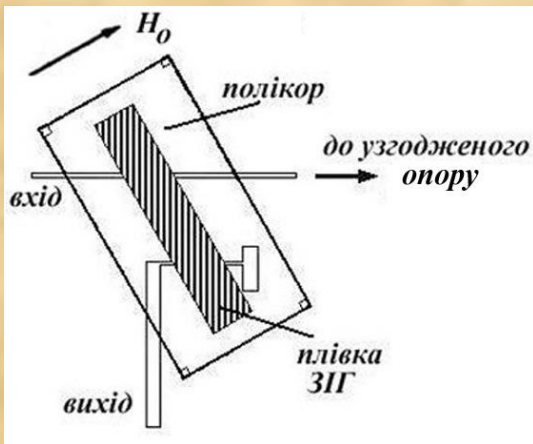
- фільтр на копланарній мікро-смужковій лінії, яку закорочено на кінцях та її АЧХ



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується можливість керування властивостями хвилі.



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



- плівка включається в лінію передачі в якості **неоднорідності**, параметри фільтра залежать від **положення фериту відносно мікро смужки**; товщина плівки ЗІГ 20 мкм, робоча смуга частот 2-3 ГГц, подавлення сигналу в смузі пропускання 26-28 дБ (втрати поза смугою 1 дБ).



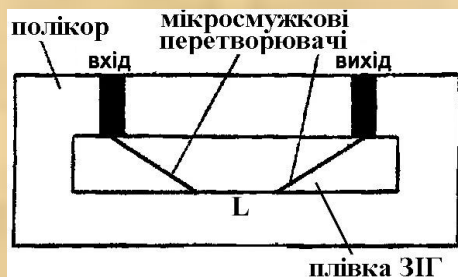
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.





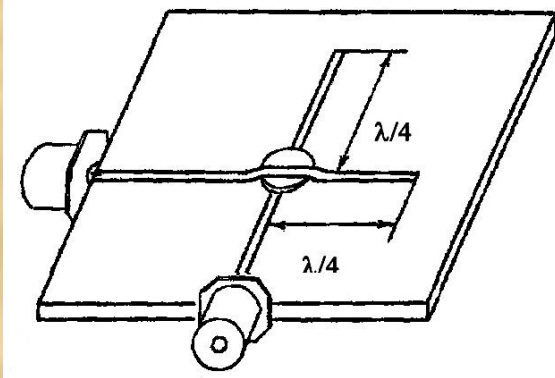
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100 \text{ МГц}$ в ніобаті літію $\lambda_R = 35 \text{ мкм}$ (десятки тисяч атомних шарів),

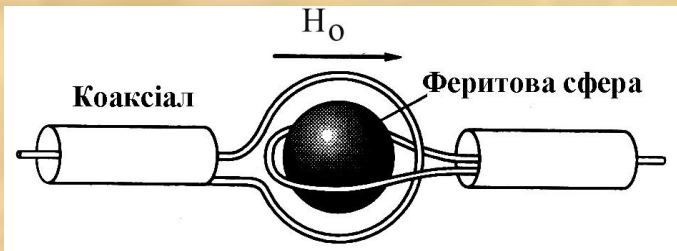
для $f = 1 \text{ ГГц}$ маємо $\lambda_R = 3,5 \text{ мкм}$ (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

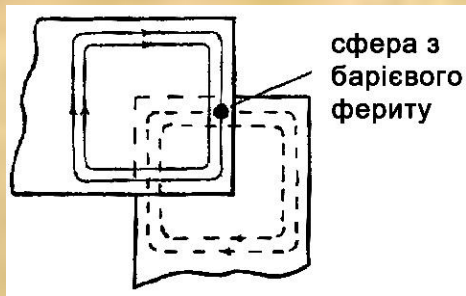


- ПМСХ-фільтр на схрещених ортогональних мікросмужках з розімкнутими кінцями, що перетинаються під прямим кутом. В точці перетину маємо пучність магнітного поля. Для плівки ЗІГ товщиною 15 мкм в формі диска з діаметром 2,5 мм навантажена добротність складала 10^4 та змінювалась при обертанні диска відносно верхньої смужки. Втрати на центральній частоті в діапазоні 2-4 ГГц рівні 6 дБ, ширина смуги пропускання 4,2 МГц.

Фільтри на монокристалічних зразках



- на виткових елементах зв'язку з резонатором; має малі вносимими втрати, АЧХ являє собою лоренцову криву. Робочі частоти 2-10 ГГц, смуга пропускання 20-500 МГц.



- фільтр на **ортогональних хвилеводах** працює в смузі частот 40-60 ГГц на кристалі барієвого гексафериту, вносимі втрати – 4,5дБ; ширина смуги пропускання – 325 МГц.

Багатоканальні фільтри

Це, як правило, набір **одноканальних фільтрів із спільним вхідним перетворювачем і окремими вихідними перетворювачами;**

центральні частоти фільтрів рознесено за заданим частотним планом.

Найбільш часто намагаються реалізувати **перекриття АЧХ сусідніх каналів на рівні - 3 дБ.**

Для **рознесення центральних частот** каналів використовують методи:

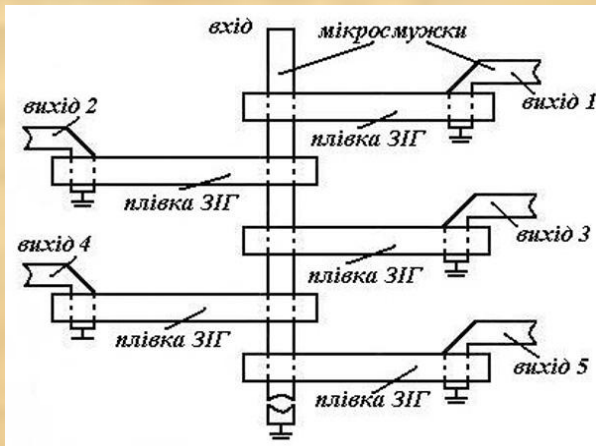
- застосування індивідуальних магнітних систем для кожного з

каналів

- застосування системи феритових хвилеводів різної ширини

- використання феритових плівок різної товщини чи з різними

магнітними параметрами.



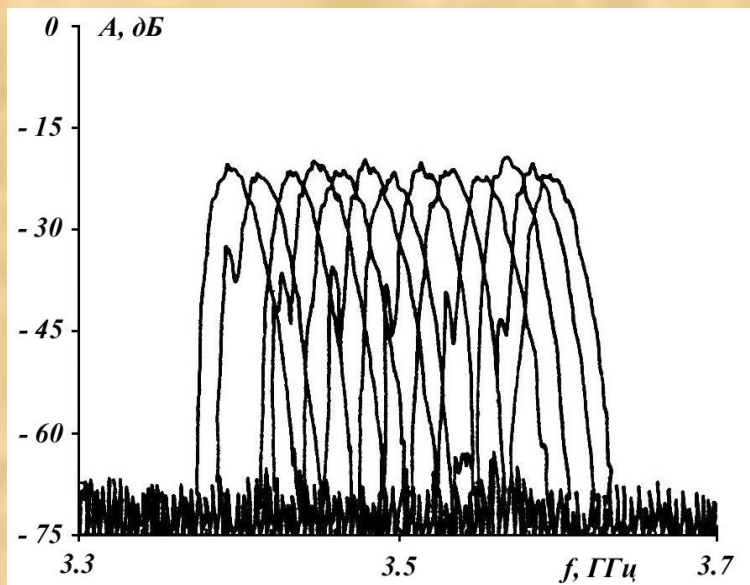
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



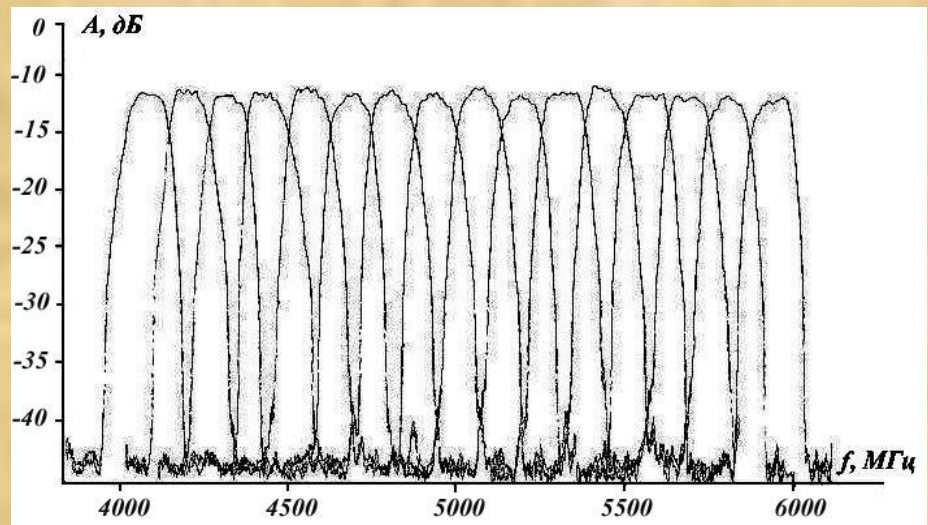
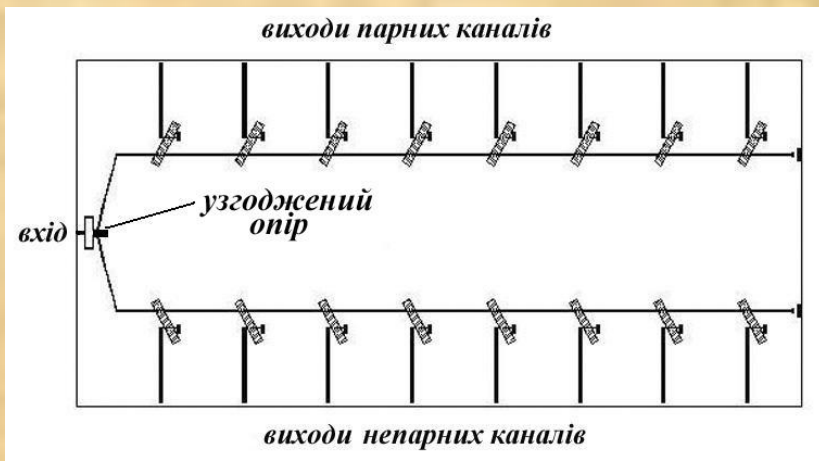
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



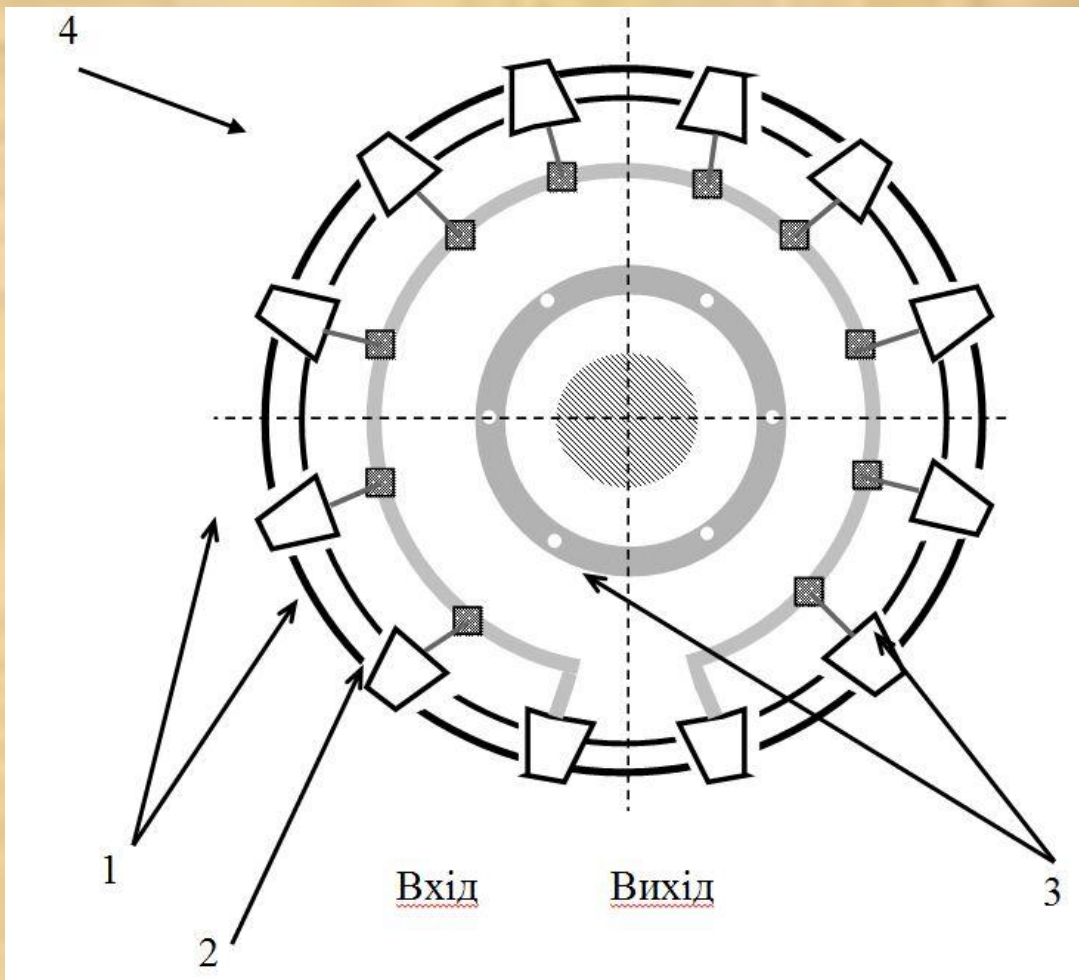
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

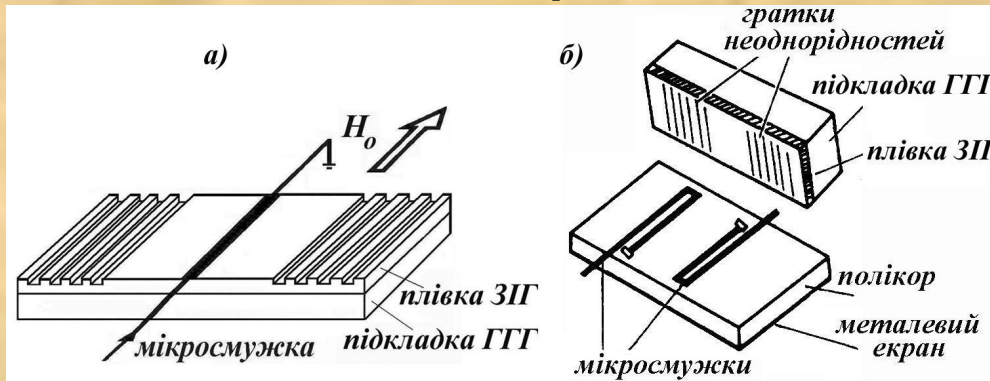


Створено **10-ти канальний фільтр на полікристалічних сферах ЗІГ** з індивідуальним керуванням магнітним полем в діапазоні частот 2,26-2,76 ГГц, ширина каналу 45-55 МГц, вхід загальний (1 - мікросмужка, 2 - одиночний фільтр на ортогональних витках зв'язку, 3 - металевий корпус, 4 - роз'єм n-того каналу). На такому ж принципі створено **22-канальний фільтр** в діапазоні частот 2-4 ГГц.

Резонатори на МСХ

Застосування:

- системи зв'язку (частотно-селективні елементи в НВЧ генераторах, фільтрах)
- радіовимірвальна апаратура
- вузькосмугові фільтри



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

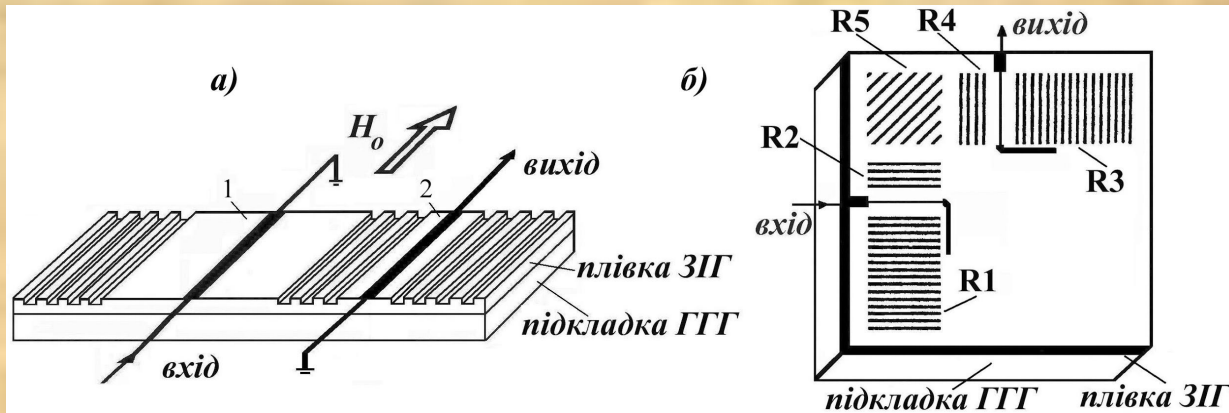
$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Для збільшення величини позасмугового ослаблення сигналу використовують резонатори на ПМСХ та ПОМСХ з двома резонаторними порожнинами.



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

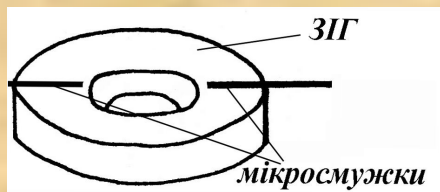
$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Кільцеві резонатори



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R/f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

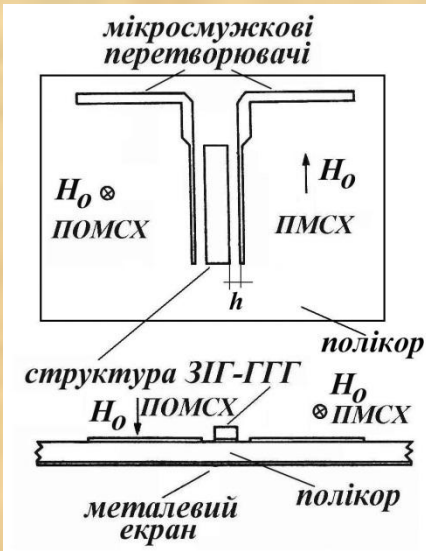
$$\lambda_R = V_R/f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Прямокутні резонатори



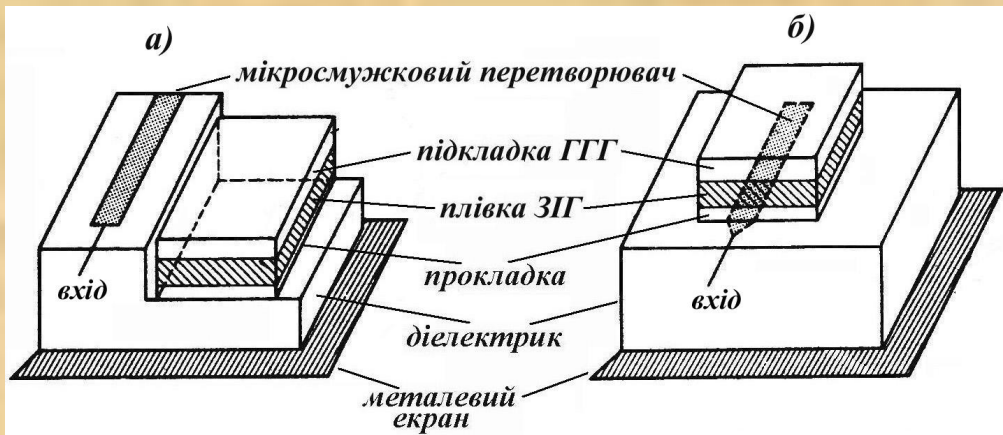
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніабаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.



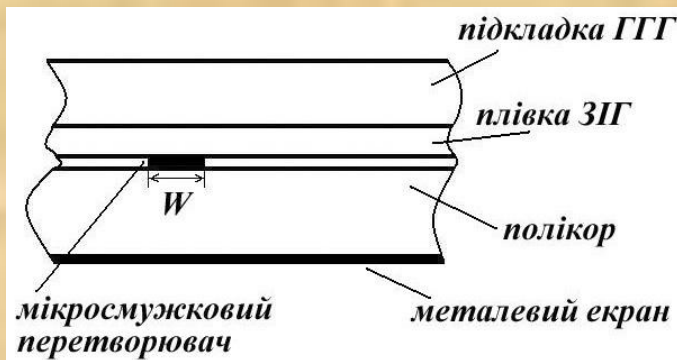
Одновходові прямокутні резонатори, які створюють як з боковим, так і центральним розташуванням мікросмушкового перетворювача по відношенню до плівки ЗІГ. Зміна коефіцієнта зв'язку при цьому досягається підбором ширини мікросмушки, лінійних розмірів плівки ЗІГ та відстані між плівкою і

Лінії затримки на магнітостатичних хвилях

Застосування:

- в приймачах для стискання лінійно-частотно модульованих імпульсів та розділення співпадаючих імпульсів
- для керування діаграмою спрямованості фазованих антенних ґраток
- створення коректорів відношення сигнал/шум радіолокаційних станцій.

Основні параметри та принципи



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніабаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),
для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

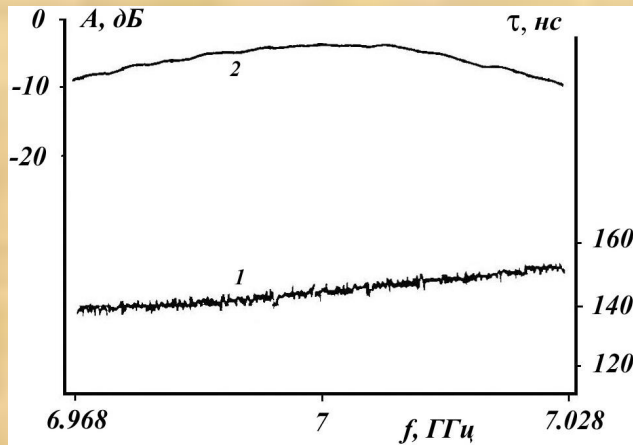
$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

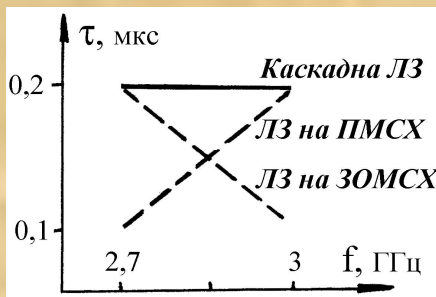
Бездисперсійні лінії затримки



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R/f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується можливість керування властивостями хвилі.

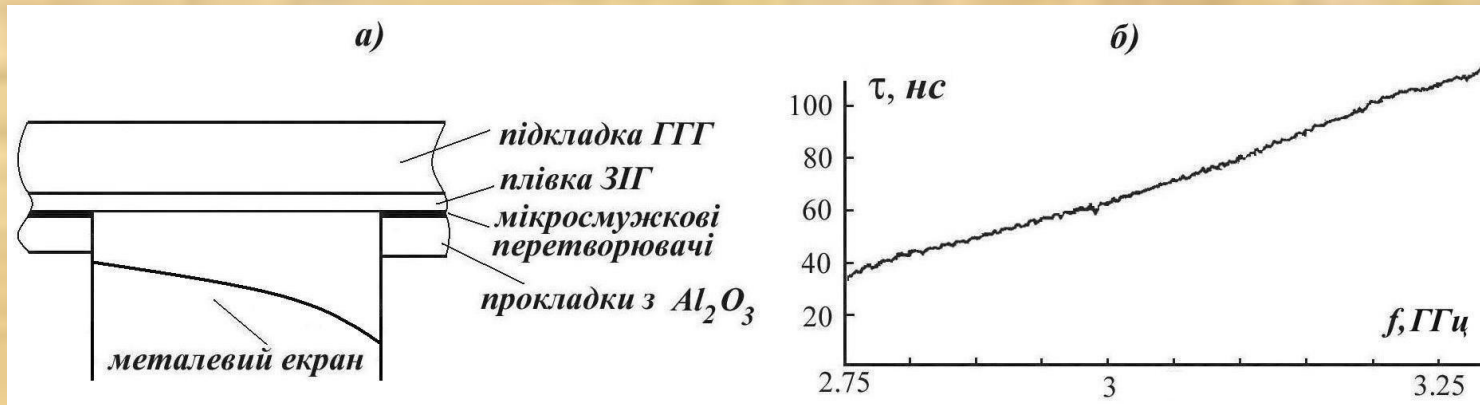


1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

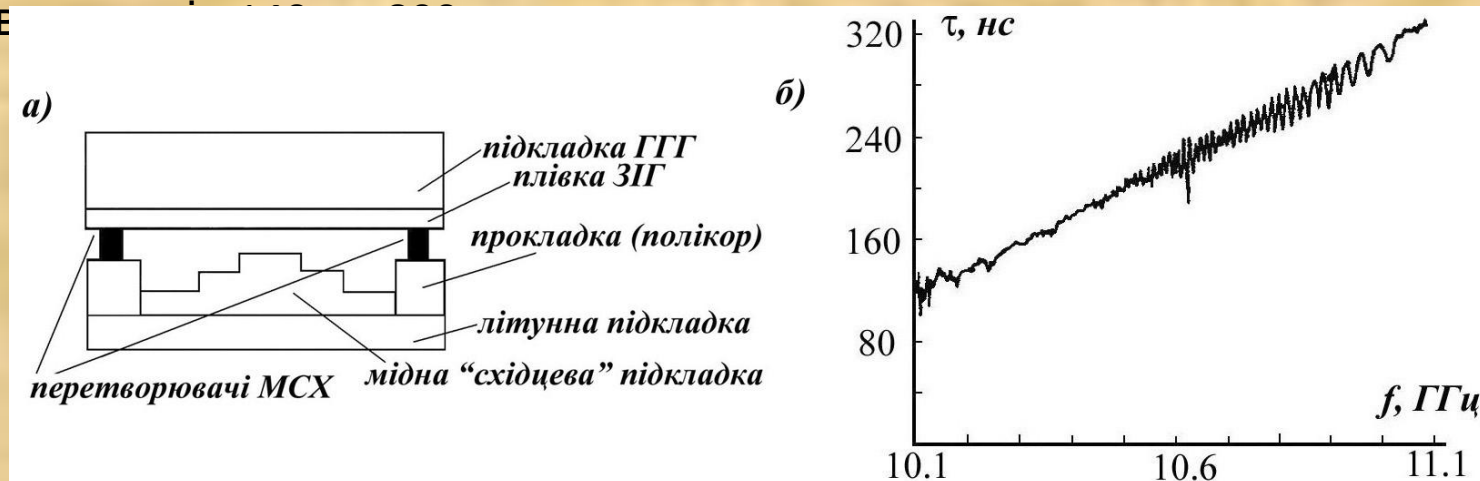
$$\lambda_R = V_R/f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується можливість керування властивостями хвилі.

Лінії затримки з лінійною дисперсією часу затримки



- ЛЗ на ПМСХ в структурі ЗІГ-діелектрик-метал при плавній зміні зазору між плівкою ЗІГ та екраном - дисперсія хвиль має лінійний характер в смузі частот 500 МГц; центральна частота 3 ГГц, величина зазору між феритом та металом змінює



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100 \text{ МГц}$ в ніабаті літію $\lambda_R = 35 \text{ мкм}$ (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1 \text{ ГГц}$ маємо $\lambda_R = 3,5 \text{ мкм}$ (тисячі атомних шарів) - зменшується

Генератори з електронною перестройкою частоти на МСХ

В керованих генераторах діапазону 0,5-40 ГГц, що виробляються у промислових масштабах, в якості частотно-задаючого елемента використовують сфери та плівки ЗІГ. Лінія затримки чи резонатор на МСХ включаються у коло зворотного зв'язку.

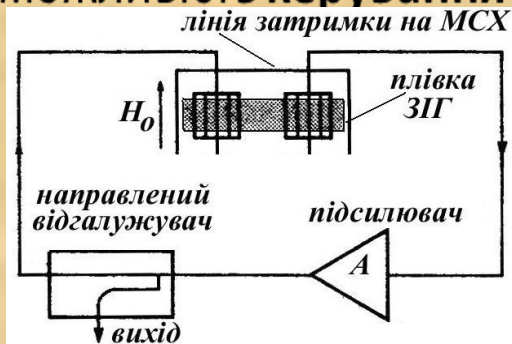
Умови генерації:

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

МОЖЛИВІСТЬ КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ХВИЛІ.

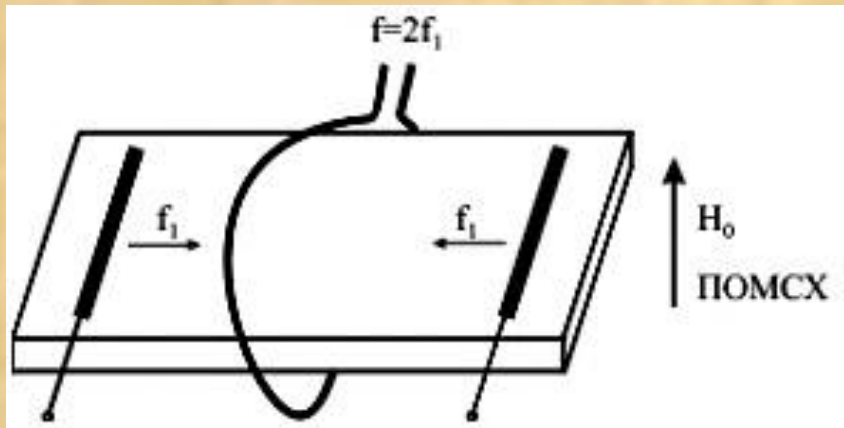


1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується
можливість керування властивостями хвилі.

Конвольвери на МСХ



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

МСХ-пристрої на квазіоптичних принципах

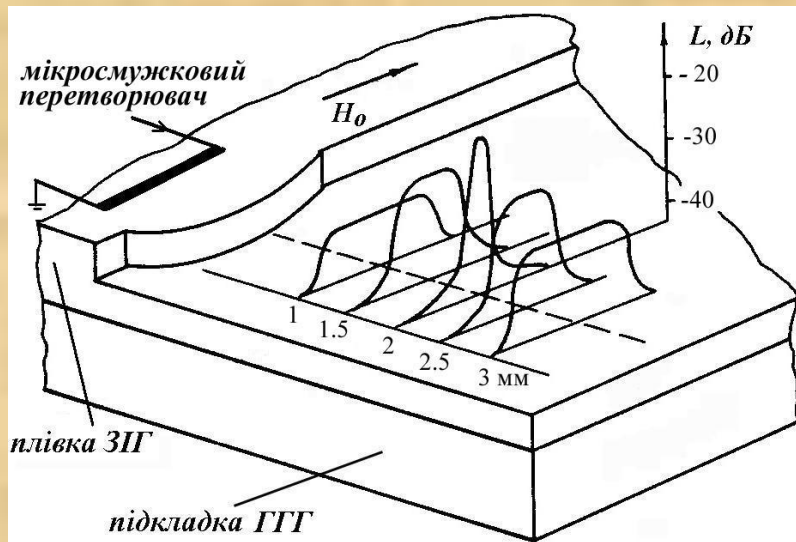
1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

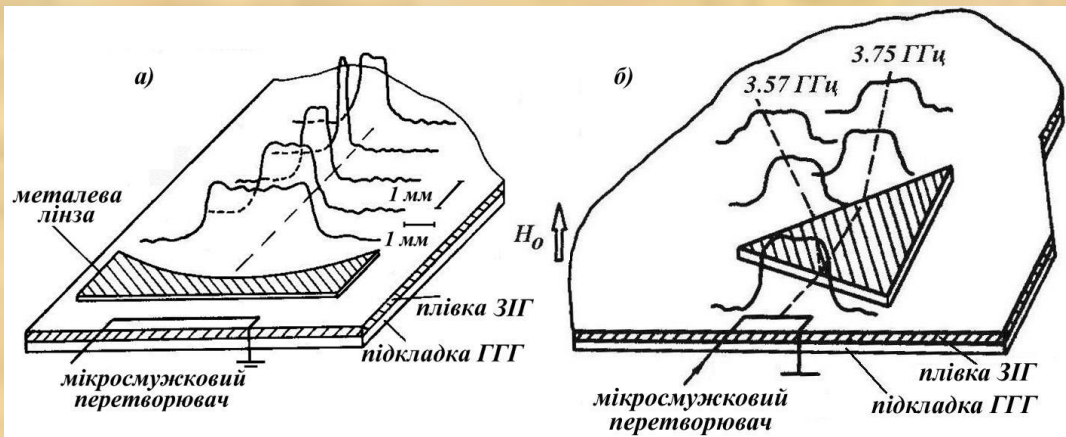
Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

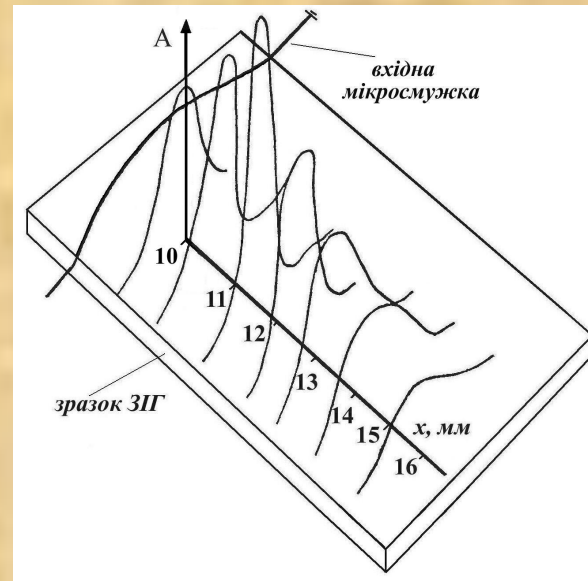
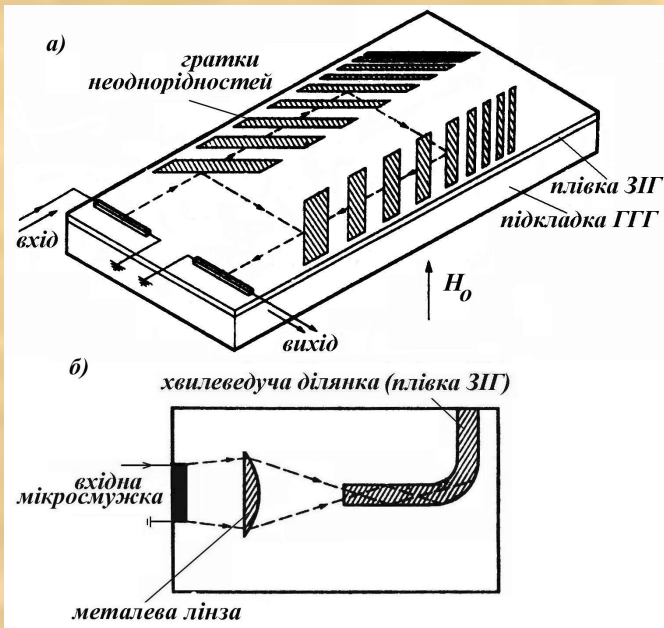
можливість керування властивостями хвилі.



- **фокусуюча лінза на ПМСХ** на фокусну відстань 2 мм, в якій хвилі фокусуються за допомогою східця певного профілю, утвореного хімічним травленням частини поверхні плівки ЗІГ.



- створені на прямих об'ємних МСХ **фокусуюча лінза (а)** з використанням металевої лінзи та **дисперсійна призма (б)** з нанесенням металевого покриття.



-діоптричні пристрої на ПОМСХ, сконструйовані з використанням відбиваючих ґраток з іонною імплантацією (а) та на класичних оптичних принципах (б)

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100 \text{ МГц}$ в ніобаті літію $\lambda_R = 35 \text{ мкм}$ (десятки тисяч атомних шарів), для $f = 1 \text{ ГГц}$ маємо $\lambda_R = 3,5 \text{ мкм}$ (тисячі атомних шарів) - зменшується можливість керування властивостями хвилі.

Термостабілізація пристроїв на МСХ

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

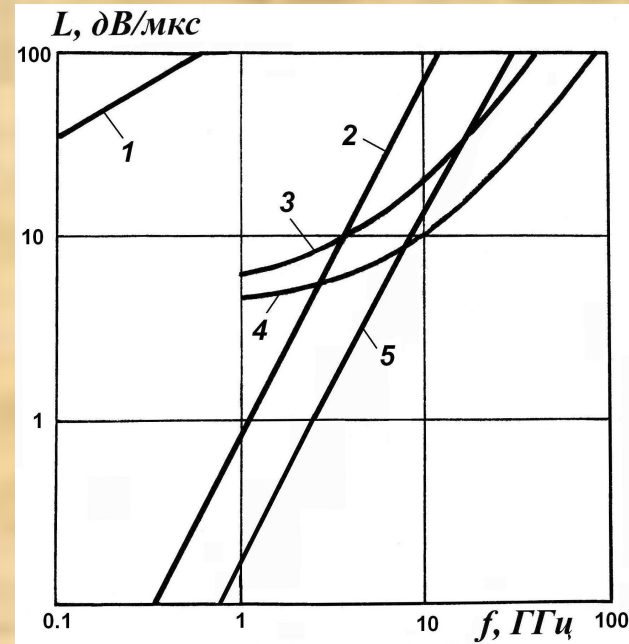
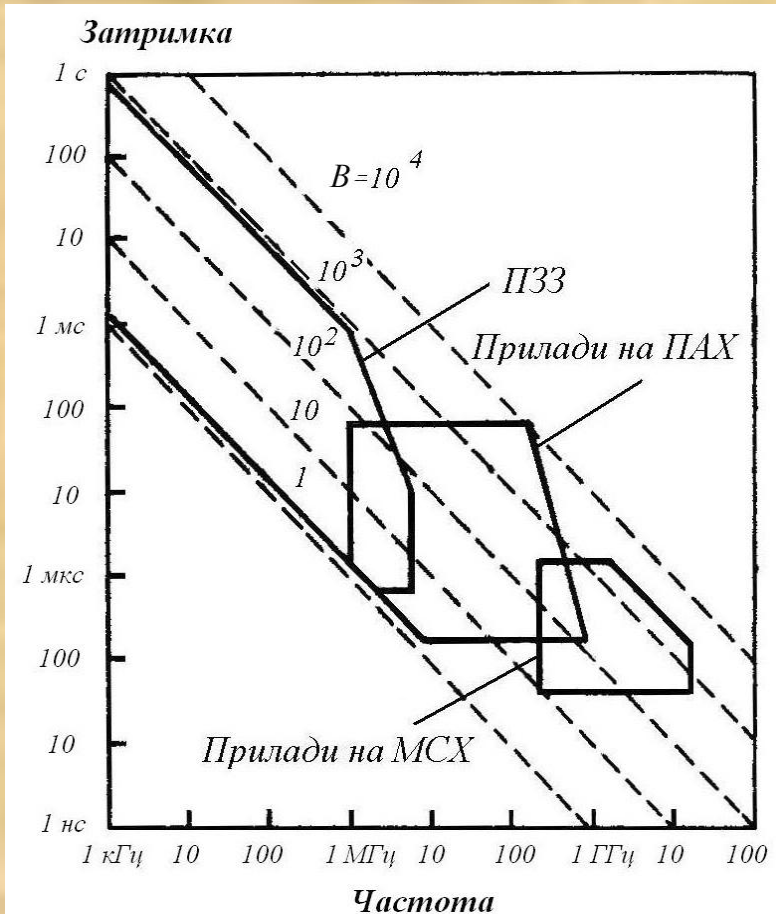
$$\lambda_R = V_R / f .$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Перспективи використання пристроїв на МСХ для аналогової обробки сигналів в НВЧ діапазоні



1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

1) товщина звукопроводу, в якому зосереджена енергія хвилі, зменшується:

$$\lambda_R = V_R / f.$$

Для $f = 100$ МГц в ніобаті літію $\lambda_R = 35$ мкм (десятки тисяч атомних шарів),

для $f = 1$ ГГц маємо $\lambda_R = 3,5$ мкм (тисячі атомних шарів) - зменшується

можливість керування властивостями хвилі.

Носії та частотний діапазон приладів функціональної електроніки

Назва діапазону частот	Частота	Носії сигналів	Матеріали поширення
ВЧ	30-300 МГц	ОАХ, ПАХ	$LiNbO_3, SiO_2, Bi_{12}GeO_{20}, BaTiO_3$
УВЧ	300-1000 МГц	ОАХ, ПАХ	$LiNbO_3, SiO_2, Bi_{12}GeO_{20}, BaTiO_3$
L	1-2 ГГц	ПАХ, МСХ, МСК	$LiNbO_3, SiO_2, Bi_{12}GeO_{20}, BaTiO_3,$ $Y_3Fe_5O_{12}, Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12},$ $Ca_{3-y}Bi_yFe_{5-x}V_xO_{12}$
S	2-4 ГГц	МСХ, МСК	$Y_3Fe_5O_{12}, Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$
C	4-8 ГГц	МСХ, МСК	$Y_3Fe_5O_{12}, Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$
X	8-12,5 ГГц	МСХ, МСК	$Y_3Fe_5O_{12}, Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12},$ літієва шпінель $Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$ ($4\pi M = 3660 \text{ Гс}, H_A = 300E$)
K_U K K_α	12,5-18 ГГц 18-26,5 ГГц 26,5-40 ГГц	МСХ, МСК	$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$, гексаферит $BaFe_{12}O_{19}$ ($4\pi M = 4770 \text{ Гс}, H_A = 17kE$)
Субмікронний	до 200 ГГц	МСХ, МСК	Гексаферит із заміщенням ($H_A = 40kE$)

Дякую за увагу!

