



Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України



Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

МІКРОХВИЛЬОВИЙ ВІДГУК МАТЕРІАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ В ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ, МЕТОДИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ю.О.АВЕРКОВ, О.А.БАРАННИК, О.І.ГУБІН, О.А.ЛАВРИНОВИЧ,
Ю.В.ПРОКОПЕНКО, М.Т.ЧЕРПАК, В.О.ШКЛОВСЬКИЙ, **В.М.ЯКОВЕНКО**

*Висувається Інститутом радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України*

на здобуття Національної премії України ім. Бориса Патона у галузі науки і техніки у 2024 р.



Авторський колектив



П. І. Б.	Наукове звання, ступінь, посада	Установа
Аверков Юрій Олегович	с.н.с., д.ф.-м.н., завідувач відділу	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Баранник Олександр Анатолійович	с.д., д.ф.-м.н., старший науковий співробітник	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Губін Олексій Іванович	с.д., к.ф.-м.н., старший науковий співробітник	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Лавринович Олександр Антонович	с.н.с., к.ф.-м.н., старший науковий співробітник	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Прокопенко Юрій Володимирович	с.н.с., д.ф.-м.н., провідний науковий співробітник	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Черпак Микола Тимофійович	проф., д.ф.-м.н., головний науковий співробітник	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
Шкловський Валерій Олександрович	проф., д.ф.-м.н., в.о. завідувача кафедри	Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна МОН України
Яковенко Володимир Мефодійович	проф., д.ф.-м.н., головний науковий співробітник, академік НАН України	Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України



Основні кількісні характеристики наукової роботи



Кількість публікацій за роботою				
Монографії	Одноосібні:			1
	Колективні:			7
	серед них:	Посібники		1
		Інші книжки (словник)		1
Статі	в журналах, включених до категорії "А":			255
	у т.ч. у зарубіжних виданнях:			115
	в журналах, включених до категорії "Б":			3
Тези конференцій				33
Патенти на винахід	України			5
	Інші країни (США)			2
Загальна кількість публікацій				306
Кількість посилань на публікації згідно з базами даних:	Web of Science	2103	h-індекс за роботою	26
	Scopus	2754		29
	Google Scholar	3530		31



Вступ

1. Взаємодія заряджених частинок, що рухаються, з твердотільними структурами.
2. Мікрохвильова електродинаміка квазіоптичних твердотільних резонаторів.
3. Мікрохвильовий поверхневий імпеданс і комплексна провідність нетрадиційних надпровідників. Нові підходи до експериментальних досліджень.
4. Надпровідні структури з електричним струмом у мікрохвильовому полі.
5. Ультратонкі плівки нормальних металів і графена у мікрохвильовому полі КДР.
6. Мікрохвильова діелектрометрія біохімічних рідин малих об'ємів.
7. Широкосмугове квантове (мазерне) підсилення у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Ефект бістабільності у мазерному середовищі.
8. Нові радіофізичні прилади на основі досліджених середовищ і електродинамічних структур.

Висновки

Список публікацій



Під матеріальними середовищами ми маємо на увазі середовища, які характеризуються комплексними коефіцієнтами в матеріальних рівняннях, а саме, провідністю, діелектричною і магнітною проникністю. Взаємодія матеріальних середовищ з електромагнітними (ЕМ) полями визначається цими коефіцієнтами. *Мікрохвильовий (МХ) діапазон полів включає орієнтовно частоти від $3 \cdot 10^8$ Гц до $3 \cdot 10^{11}$ Гц.* Він є надзвичайно важливим с точки зору широких можливостей вивчення фундаментальних фізичних властивостей середовищ та застосування результатів дослідження у багатьох галузях промисловості, сільського господарства і медицини. Актуальним залишається розвиток МХ техніки в галузях радіо-і телекомунікації, особливо, в системах оборонної техніки.

Наведено отримані у роботі найважливіші результати теоретичних і експериментальних досліджень низки матеріальних середовищ та електродинамічних систем для вивчення цих середовищ.

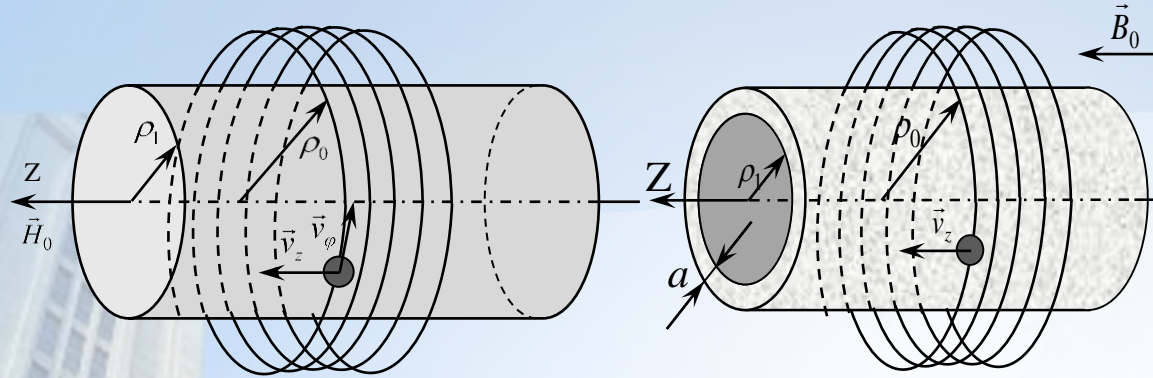


Рис. 1 – Збуджувальні циліндричні структури із:

- діелектрика;
- діелектрика+2D-газу;
- напівпровідника;
- напівпровідника+2D-газу;
- 2D-плазмової трубки

$$\frac{dW}{dt} = e \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \left(v_z - \frac{nq_z v_\phi}{\rho_0 q^2} \right) E_{zm}^e(\rho_0, q_z, \omega) - i \frac{\omega v_\phi}{cq} H_{zm}^{e'}(\rho_0, q_z, \omega) + \frac{\Delta_{1m}}{\Delta_m} \left(v_z - \frac{mq_z v_\phi}{\rho_0 q^2} \right) H_m(q\rho_0) - i \frac{\Delta_{2m}}{\Delta_m} \frac{\omega v_\phi}{cq} H_m'(q\rho_0) \right\} dq_z d\omega$$

Рис. 2 – Збудження косих магнітоплазмонів.

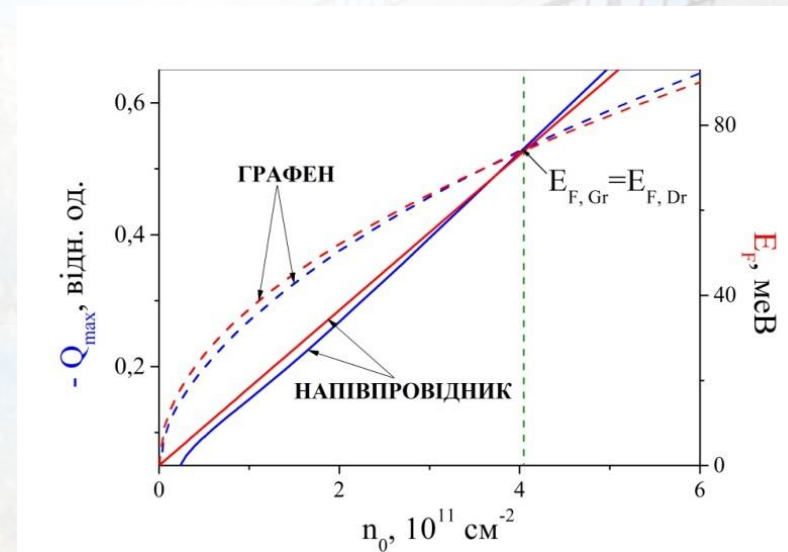
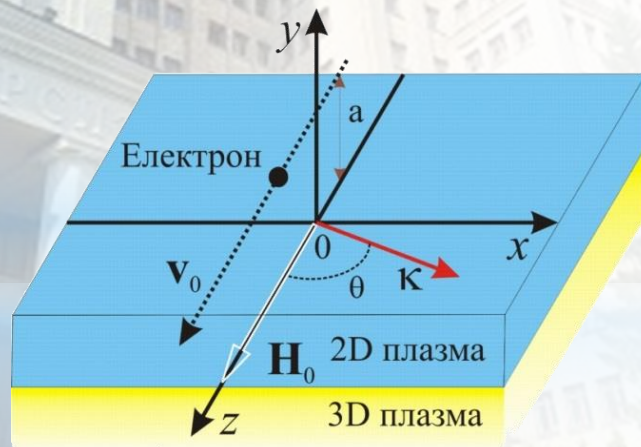


Рис. 3 – Залежності величини максимуму спектральної щільності Q_{max} (сині криві) та енергії Фермі E_F (червоні криві) від 2D концентрації електронів n_0 для графену і напівпровідника.

З аналізу залежності $Q_{max}(n_0)$ можна встановити якісний характер закону дисперсії електронів у 2D плазмі: лінійний для моношару графена і квадратичний для напівпровідника.



Рис. 4 – Передбачення ефекту абсолютної нестійкості пучка електронів, що рухається вздовж лівостороннього (диспергуючого) середовища циліндричної конфігурації.

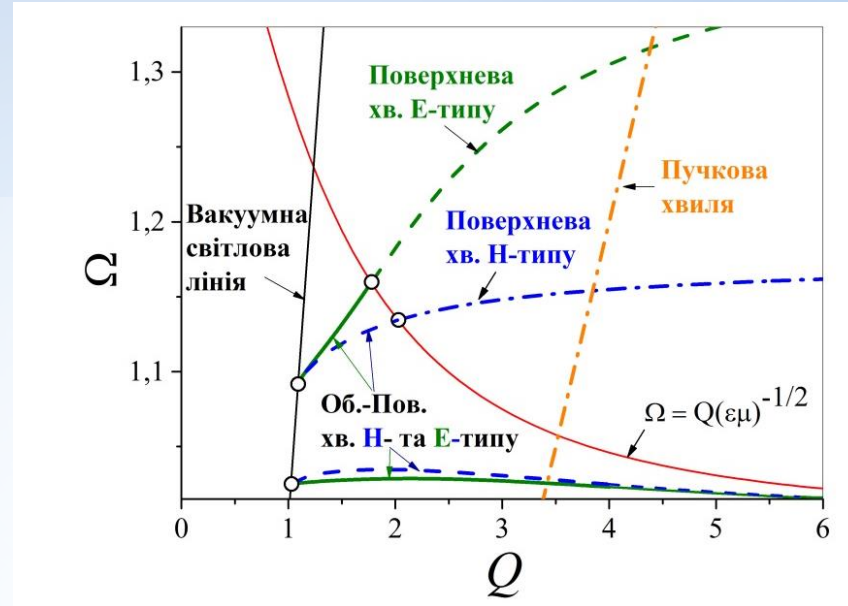


Рис. 5 – Збудження об'ємно-поверхневих хвиль з негативною дисперсією в області частот, де $\epsilon < 0$ і $\mu < 0$ при $n = 0$.

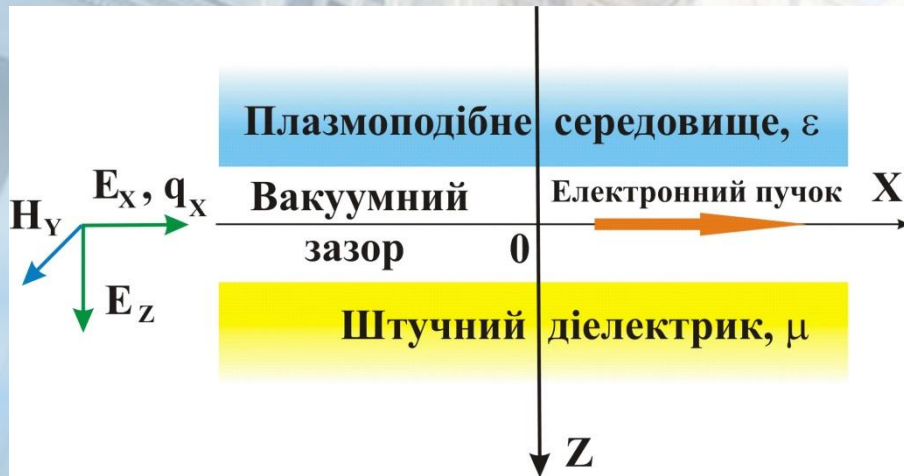


Рис. 6 – Передбачення ефекту абсолютної нестійкості пучка електронів, що рухається вздовж лівостороннього інтерфейсу. Збуджуються поверхневі хвилі ТМ-типу з негативною дисперсією.

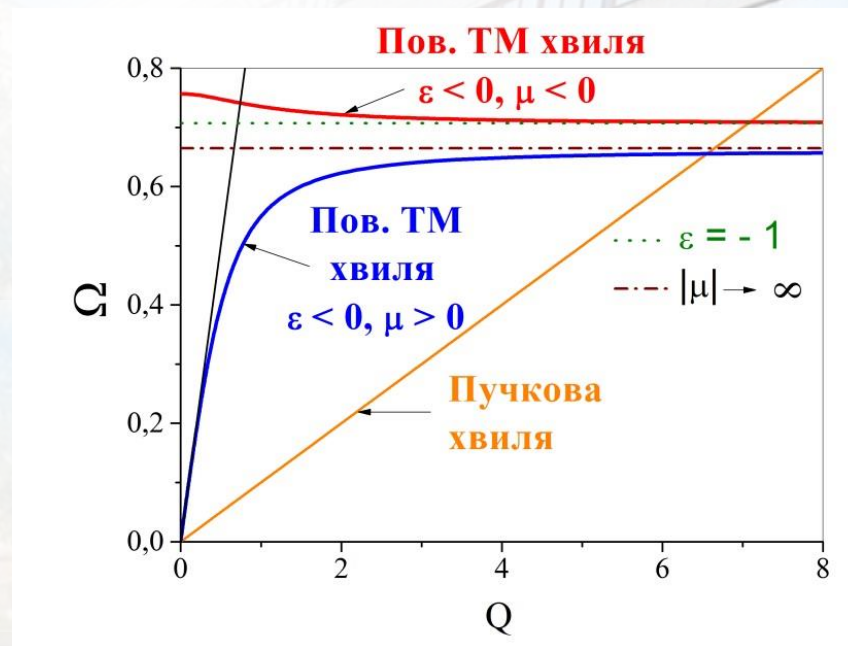


Рис. 7 – Спектр збуджуваних хвиль.

Рис. 8 – Збудження косих поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль.

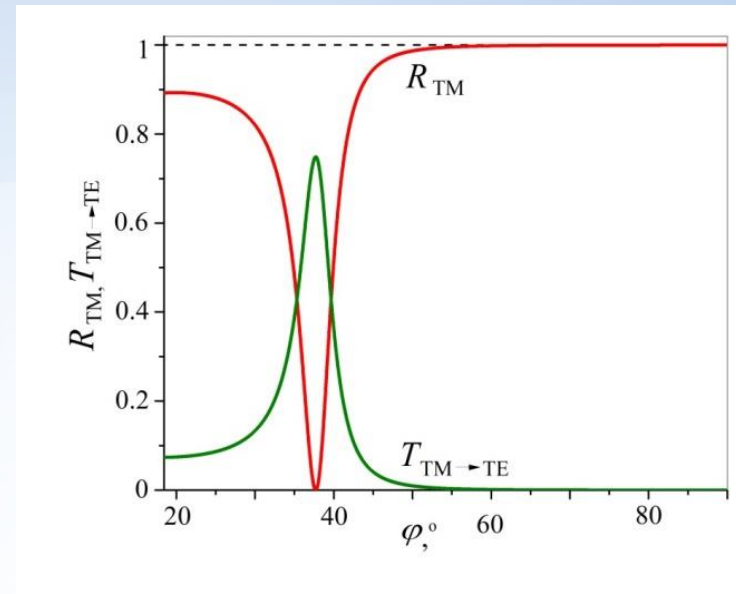
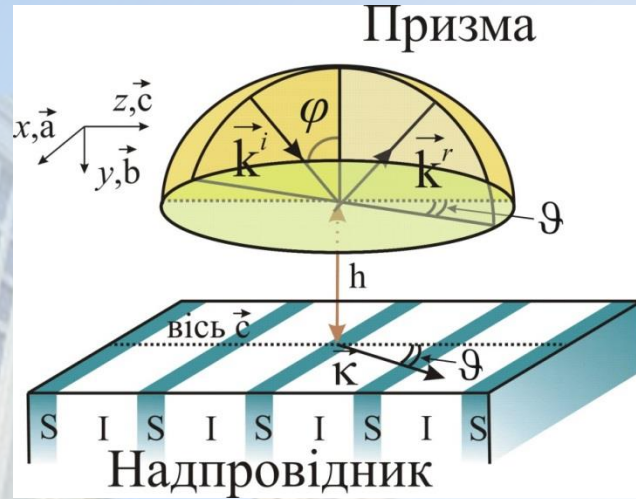


Рис. 9 – Залежності коефіцієнта відбиття R_{TM} та коефіцієнта трансформації хвилі $T_{TM \rightarrow TE}$ від кута падіння φ у призмі.

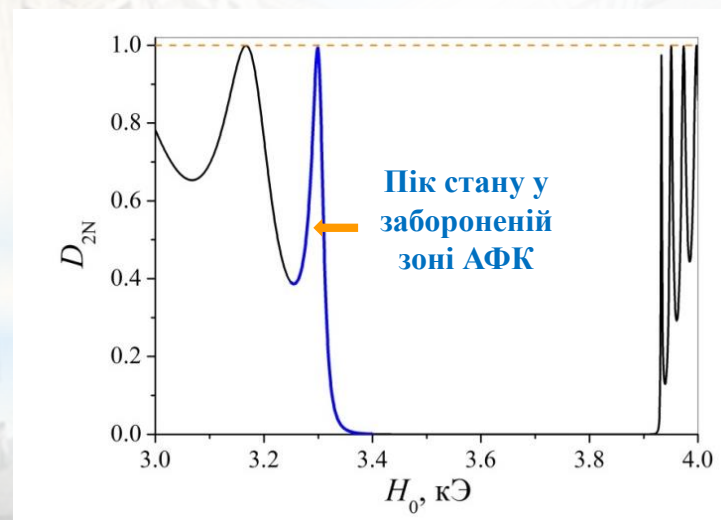
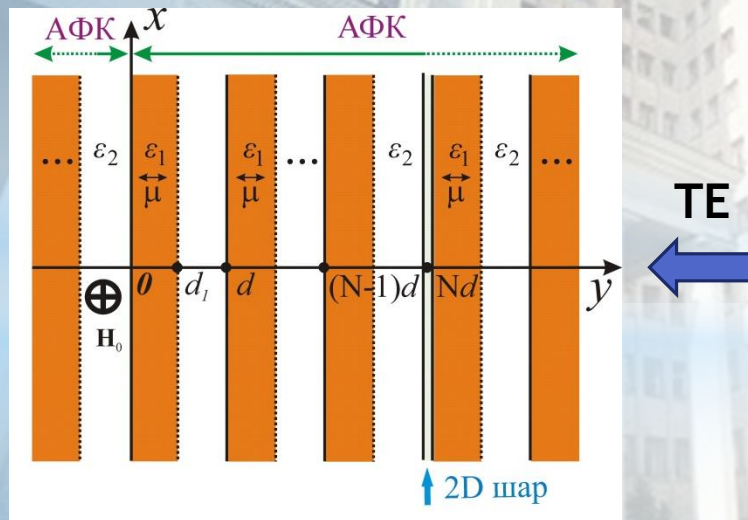
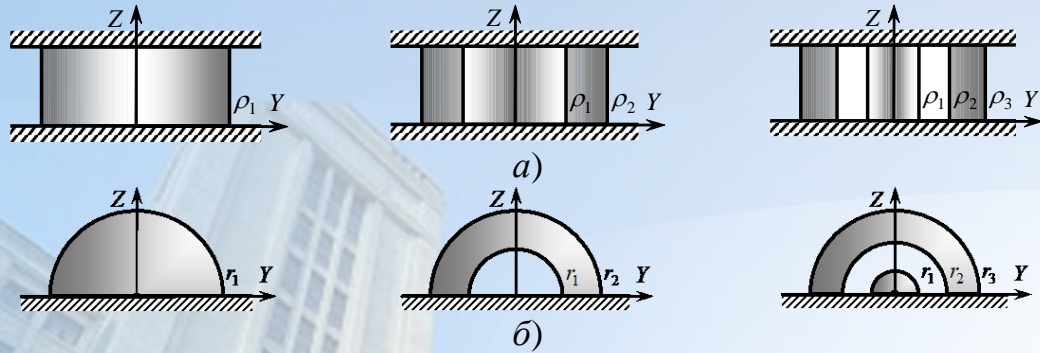


Рис. 10 – Збудження поверхневих електромагнітних станів в антиферомагнітному фотонному кристалі з 2D-шаром у середині. Встановлення характеру закону дисперсії носіїв заряду в 2D шарі.

- Передбачено існування косих поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль
- Передбачено ефект повної трансформації поляризації падаючої хвилі в ортогональній поляризацію відбитої хвилі.



Перетин резонаторних структур, що обмежені провідними площинами, з циліндричними (а) та сферичними (б) поверхнями

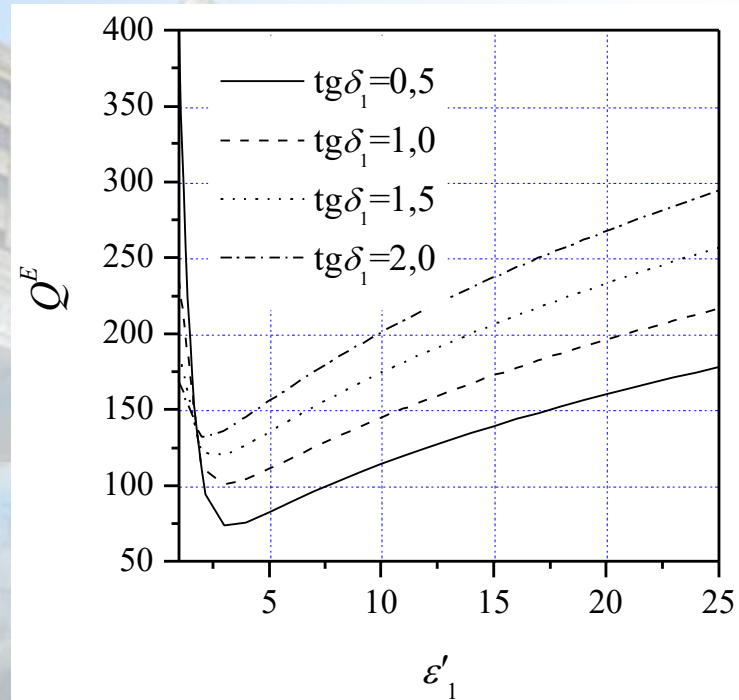
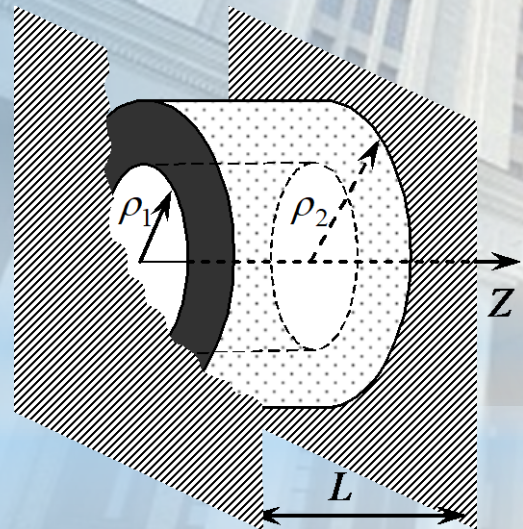


Рис. 11 – Залежності зміщення добротності КДР з модою $\text{TM}_{36\ 1\ 0}$ від діелектричної проникності внутрішнього шару.

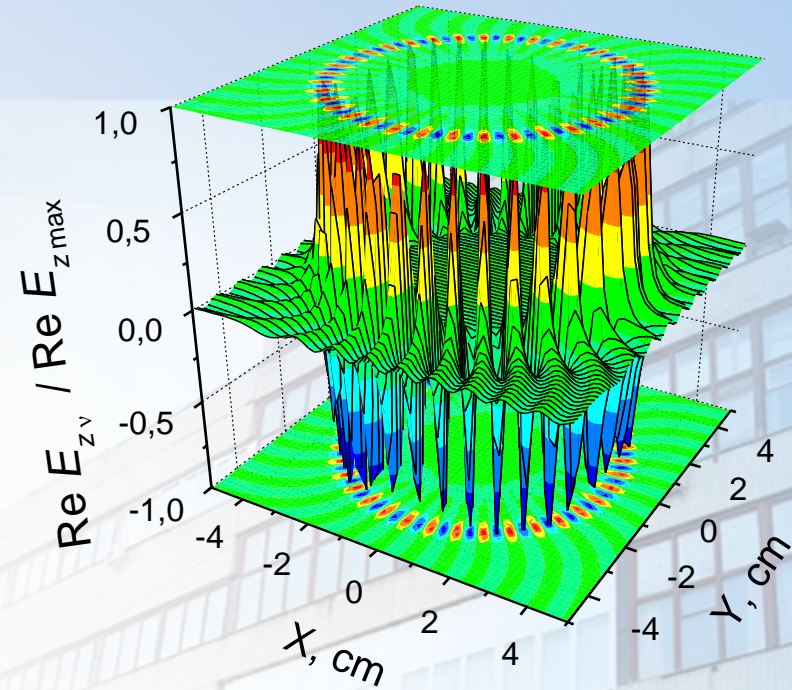


Рис. 12 – Розподіл $E_{z\ v}$ компоненти $\text{HE}_{36\ 1\ 1}$ моди у КДР.

У разі великих значень $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$ спостерігається зростання добротності резонатора у разі заповнення його внутрішнього шару речовинами з великими втратами ($\text{tg} \delta_1 > \text{tg} \delta_2$)

Техніка вимірювання МХ поверхневого імпедансу надпровідників



Матеріали:

1. Плівки $YBa_2Cu_3O_{7-\sigma}$
2. Монокристал $Ba(Fe_{0.926}Co_{0.074})_2As_2$
3. Плівка $FeSe_{1-x}Te_x$
4. Монокристал $(Li_{1-x}Fe_x)OHFeSe$
5. Плівка Nb
6. Монокристал MgB_2

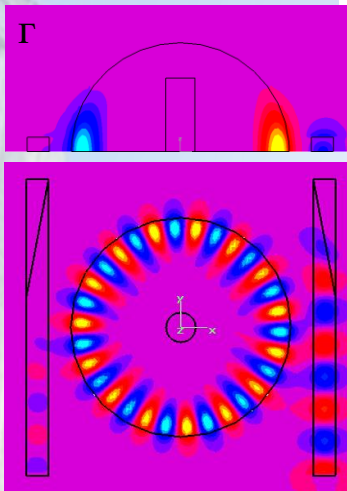
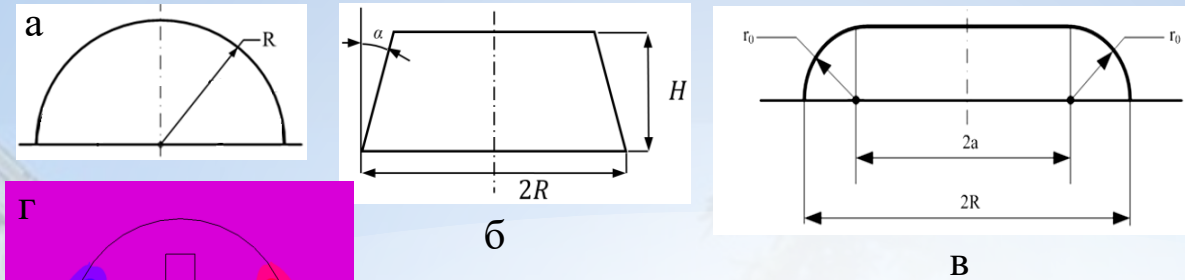


Рис. 13 – Квазіоптичні діелектричні резонатори з локалізацією хвилі ШГ біля основи резонатора: у формі: а) півкулі, б) зрізаного конуса, в) з асферичною поверхнею. г) розподіл поля (E_z -компонента)

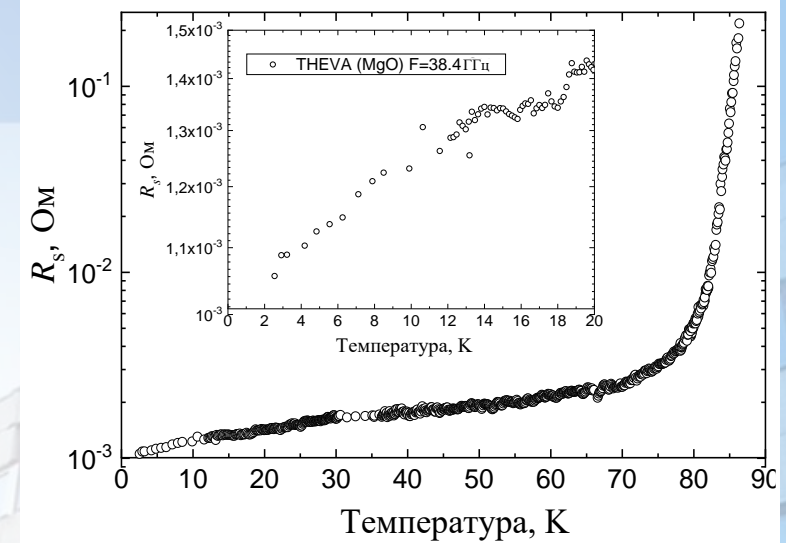


Рис. 14 – Температурна залежність поверхневого опору $R_s(T)$

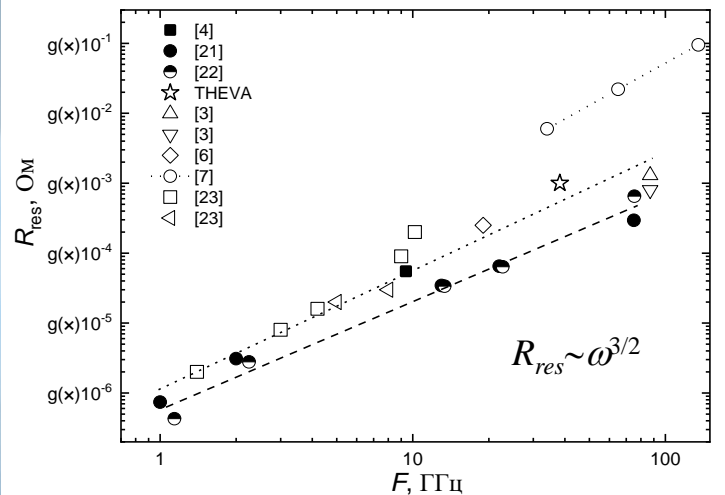


Рис. 15 – Частотна залежність залишкового опору $R_{res}(F)$

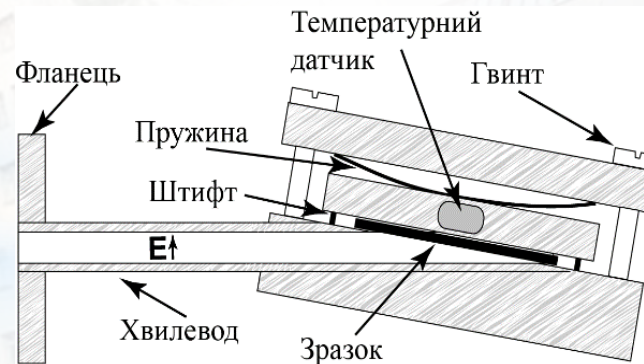
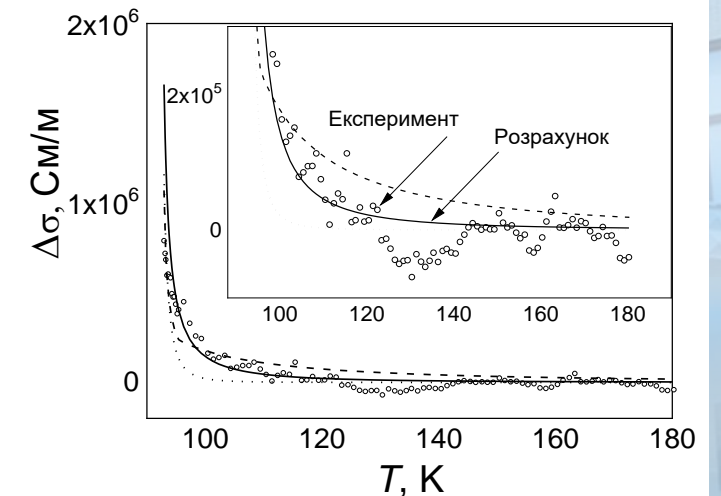


Рис. 16 – Температурна залежність флуктуаційної частини провідності $\Delta\sigma$



Техніка вимірювання МХ поверхневого імпедансу надпровідників



Матеріали:

1. Плівки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$
2. Монокристал $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$
3. Плівка $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$
4. Монокристал $(\text{Li}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{OHFeSe}$
5. Плівка Nb
6. Монокристал MgB_2

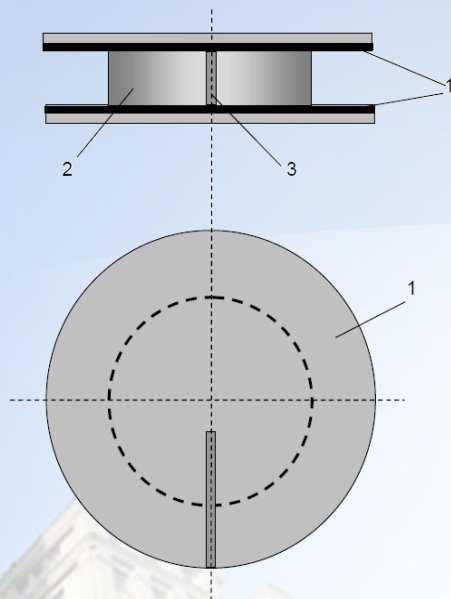


Рис. 17 – КДР з ТПС і радіальною щілиною із надпровідним зразком: 1- ТПС, 2-сапфіровий диск і 3 -щілина зі зразком

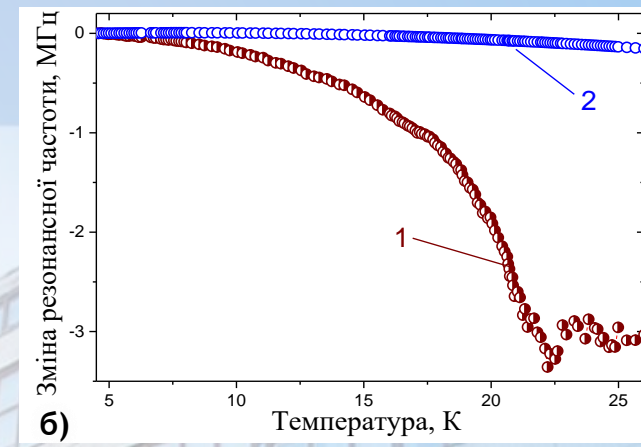
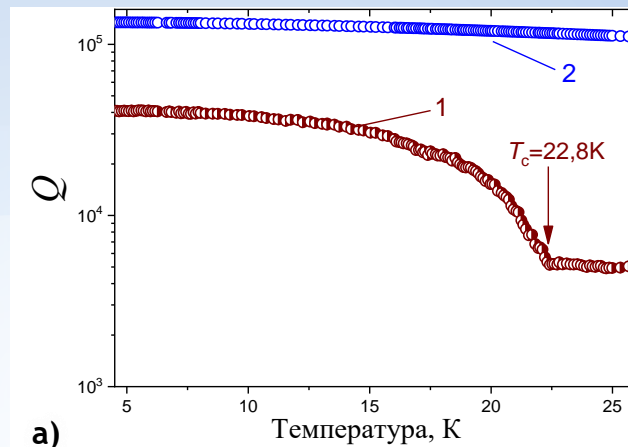


Рис. 18 – Температурна залежність добротності $Q(T)$ (а) і зміни резонансної частоти $\Delta F(T)$ (б) резонатора

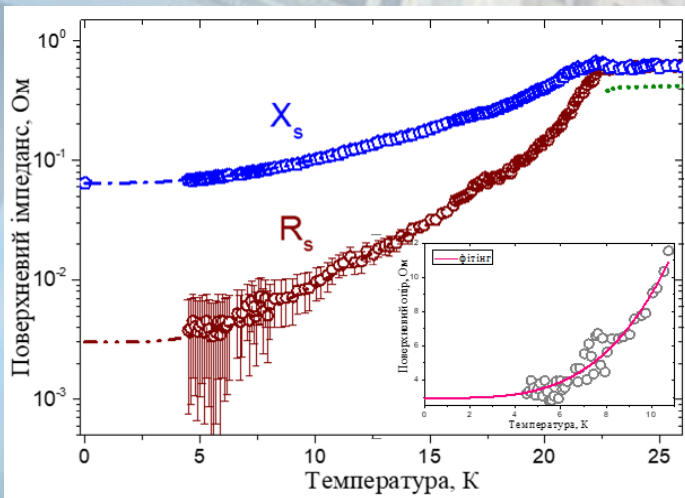


Рис. 19 – Температурна залежність поверхневого імпедансу

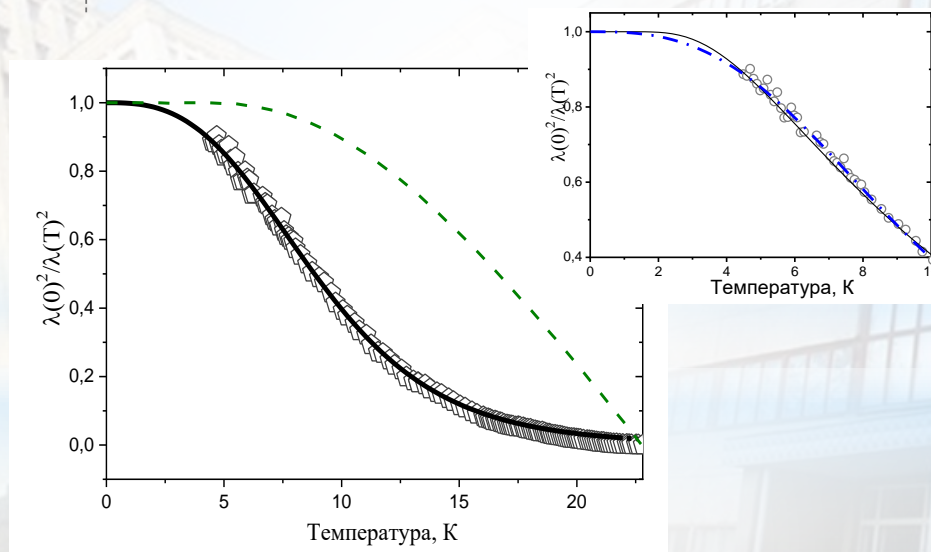


Рис. 20 – Температурна залежність щільності надпровідної компоненти монокристала $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$.

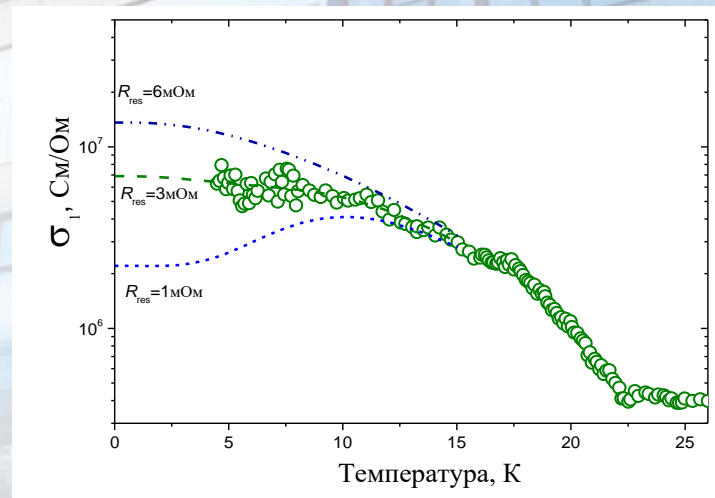


Рис. 21 – Температурна залежність дійсної частини комплексної провідності

Техніка вимірювання МХ поверхневого імпедансу надпровідників



Матеріали:

1. Плівки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$
2. Монокристал $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$
3. Плівка $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$
4. Монокристал $(\text{Li}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{OHFeSe}$
5. Плівка Nb
6. Монокристал MgB_2

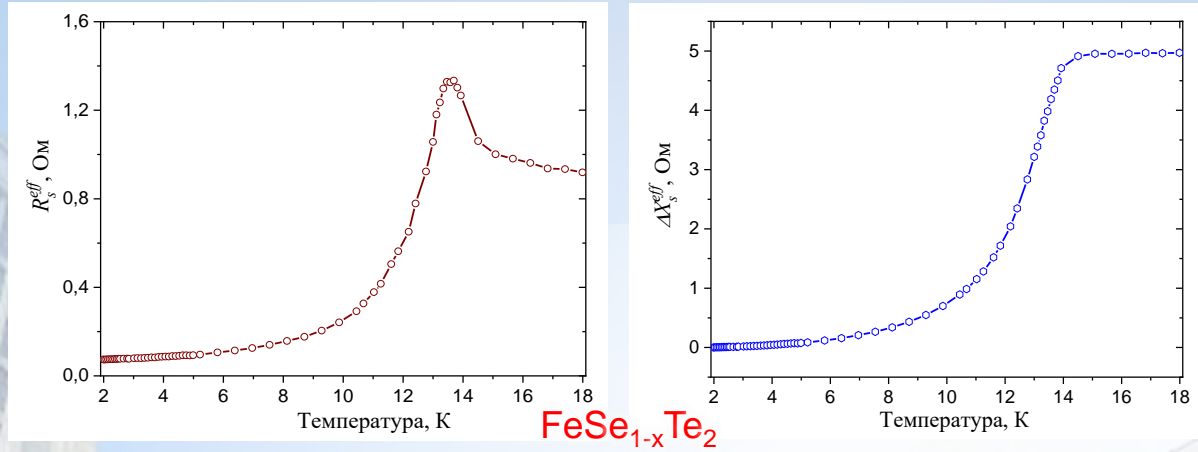


Рис. 22 – Температурна залежність ефективного поверхневого опору R_s^{eff} і зміни поверхневого реактанса ΔX_s^{eff}

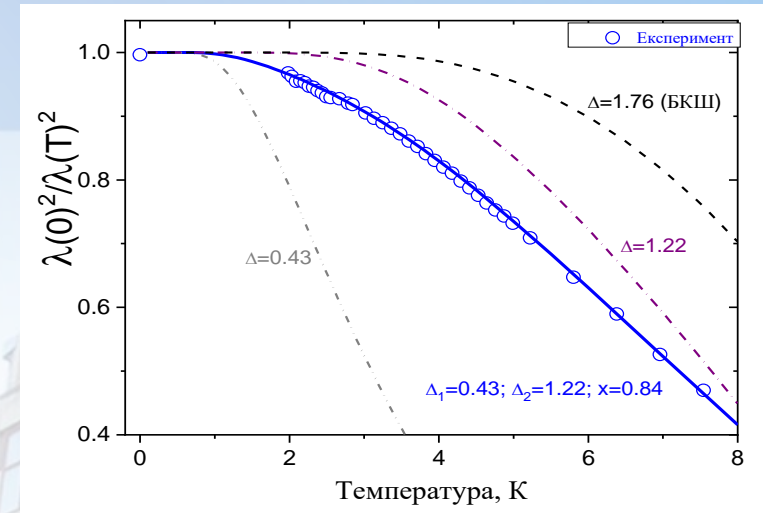


Рис. 23 – Температурна залежність щільності надпровідної компоненти $[\lambda_L(0)/\lambda_L(T)]^2$.

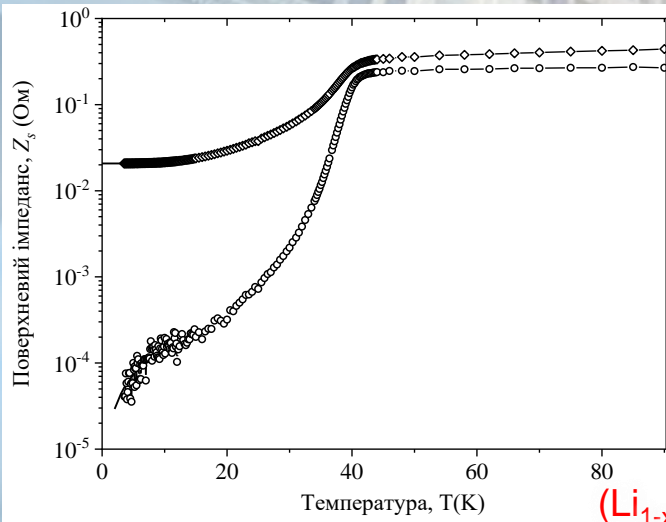


Рис. 24 – Дійсна (кружечки) та уявна (квадратики) частини МХ поверхневого імпедансу

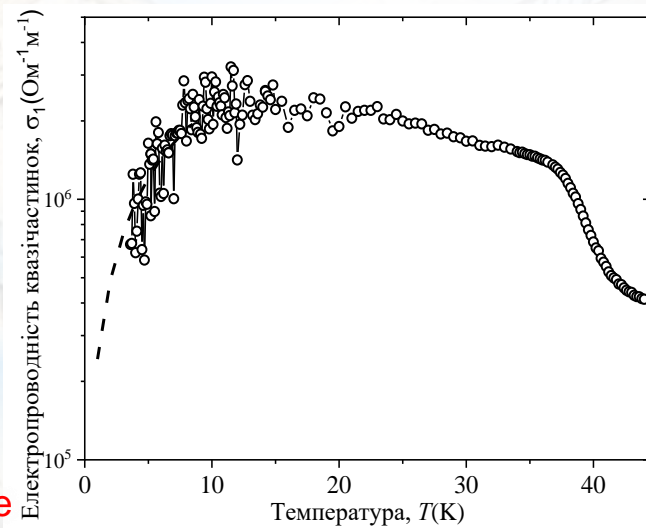


Рис. 25 – Температурна залежність електропровідності квазічастинок σ_1

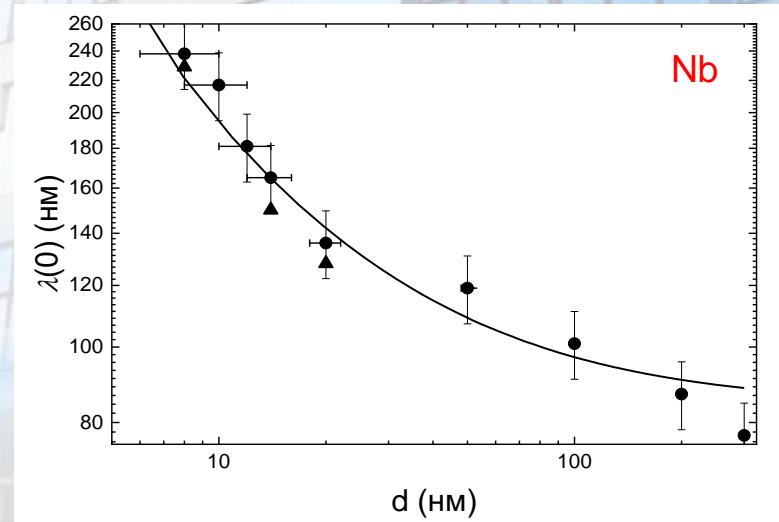


Рис. 26 – Залежність глибини проникнення при нульовій температурі $\lambda(0)$ від товщини плівки ніобію d .

Надпровідні структури з електричним струмом у мікрохвильовому полі

Температурно залежне МХ поглинання вихорами у надпровідниках із потенціалом пінінгу (ПП) типу пральної дошки (ПД)

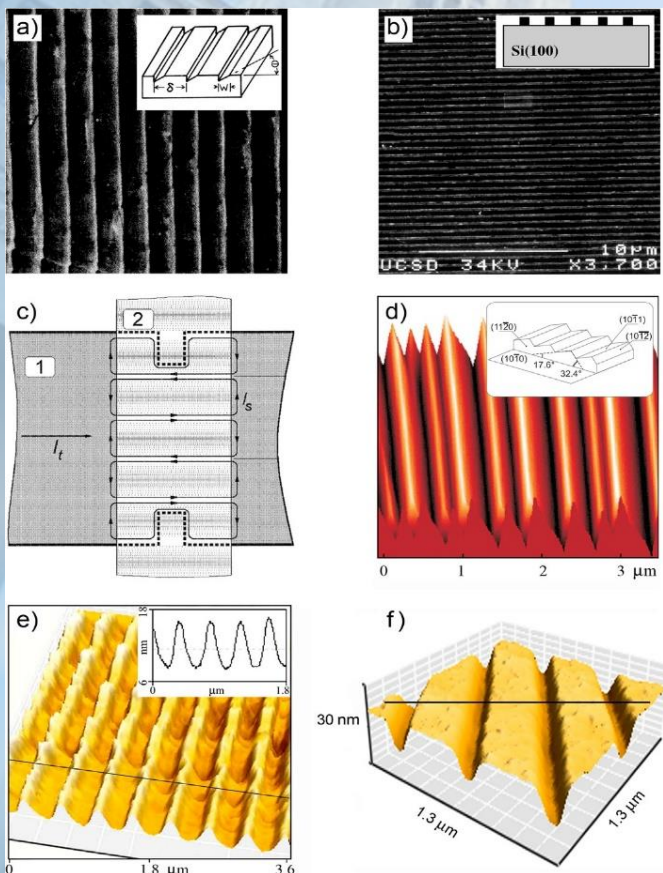


Рис. 27 – Приклади ПП ПД

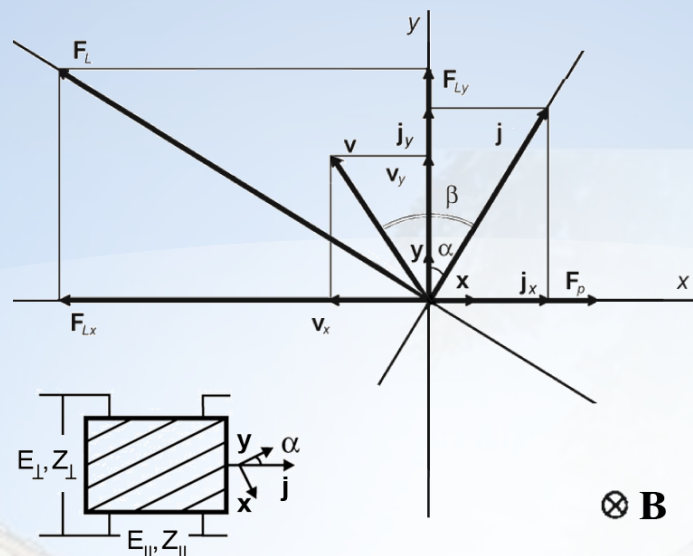


Рис. 28 – Система координат xu з каналами ПП ПД, паралельними вектору y . Вектор $j = j_0 + j_1 \exp i\omega t$ спрямовано під кутом α відносно y . β – кут між векторами v і j . F_p -середня сила пінінгу, а F_L -сила Лоренца для вихору.

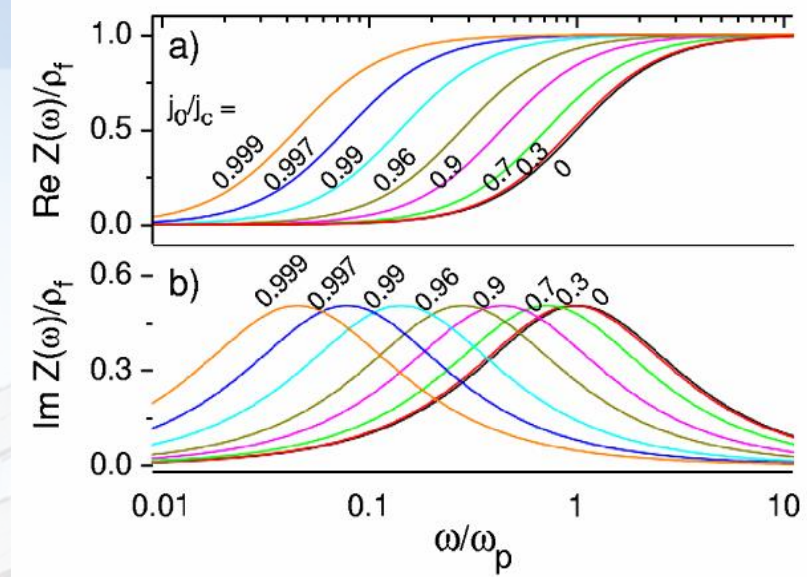


Рис. 29 – Частотні залежності дійсної (Re) та уявної (Im) частин імпедансу змінного струму для потенціалу пінінга $U_p(x) = (U_p/2)(1 - \cos kx)$ при низці значень густини постійного струму j_0

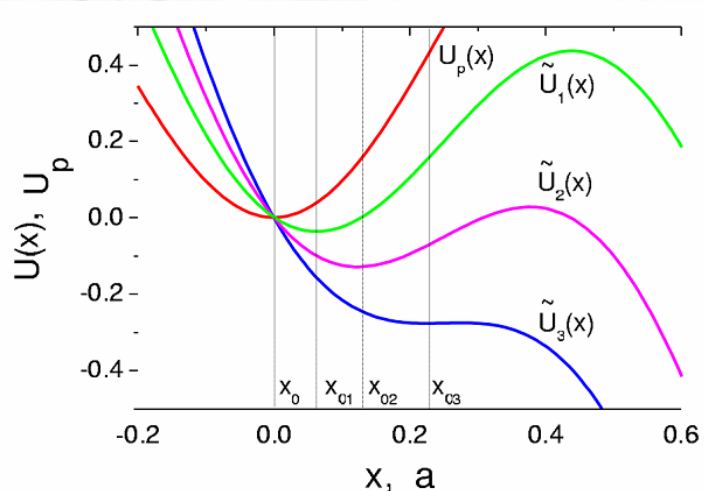


Рис. 30 – Модифікація ефективного ПП $U_tilde_1(x) = U_p(x) - f_0 x$, де $U_p(x) = (U_p/2)(1 - \cos kx)$ є ПП ПД, зі збільшенням f_0 ($0 = f_0 < f_01 < f_02 < f_03 = f_c$).

метаматеріалі

Рис. 31 – (а) Експеримент. геометрія. (b) Визначення частоти депінігу f_d при -3 дБ є прикладом критерію для зразка із симетричними канавками (зразок S). Фітинг частотної характеристики ΔS_{21} показано суцільними лініями. Згортання фільтра $-10 \log_{10}[(f/f_d)^n]$ зображені прямими з показниками n .

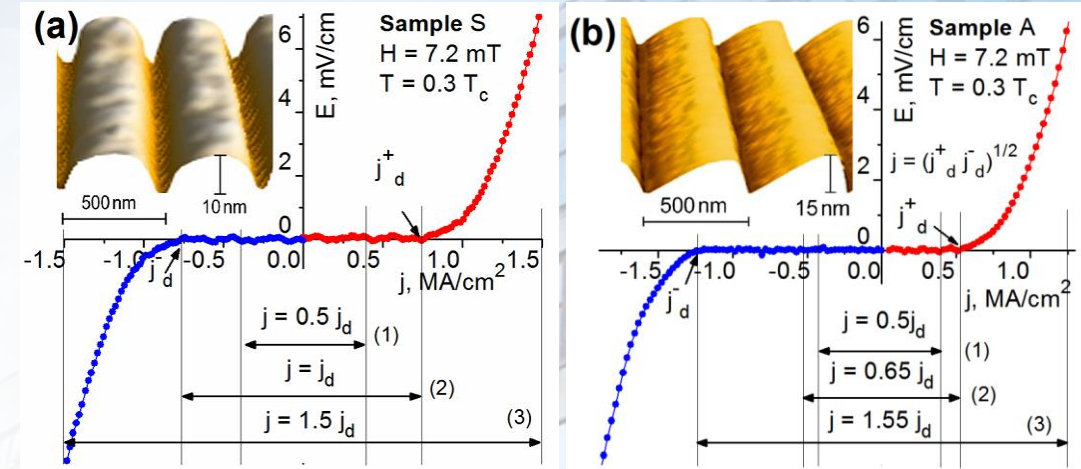
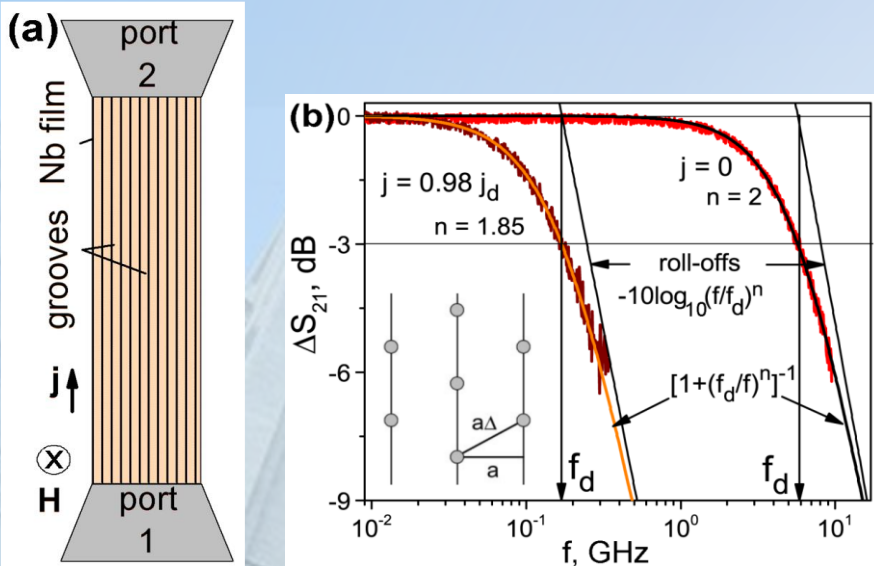


Рис. 32 – Вольт-амперні криві для зразків S (a) і A (b) при $T = 0,3T_c$ і $H = 7,2$ мТл відповідно. Амплітуди квазістатичного змінного струму, використані для представлення різних режимів модуляції на рис. 33, показано горизонтальними лініями.

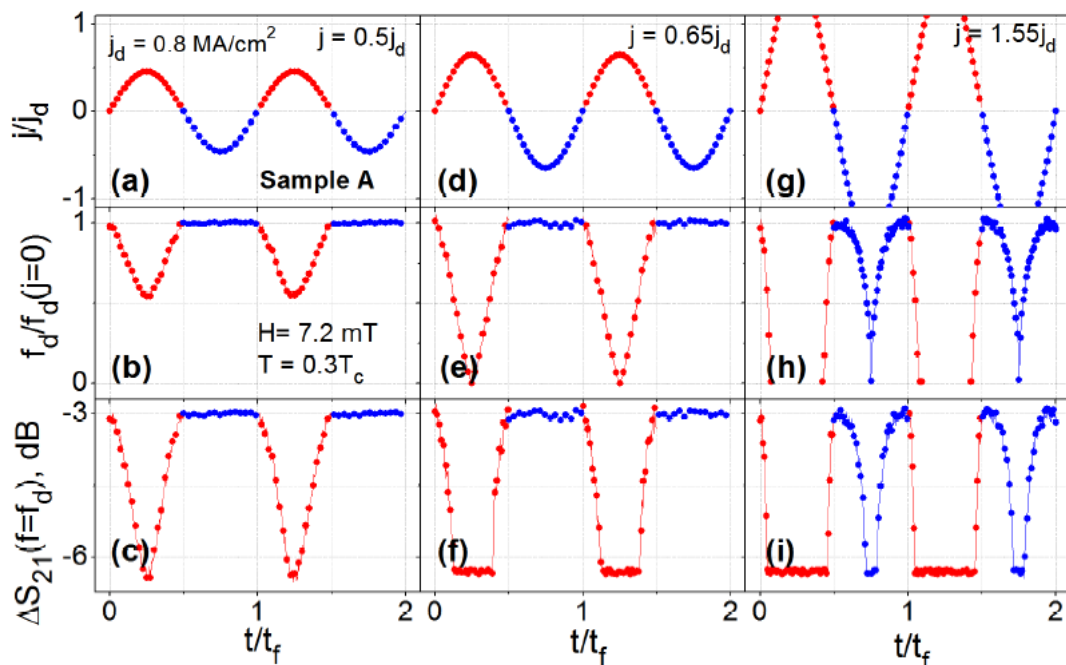


Рис. 33 – Модуляція МХ втрат у мікросмужці А при $H = 7,2$ мТл, $T = 0,3T_c$ і потужності збудження $P = -20$ дБм. Адіабатичний змінний струм (3 Гц) у докритичному (a), близькокритичному (d) і надкритичному (g) режимах призводить до зниження частоти депінігу [панелі (b), (e) і (h)], відповідно] та появи втрат на 3,02 ГГц через вихори $\Delta S_{21}(f = f_d(j = 0))$ [панелі (c), (f) та (i) відповідно].

Виявлення лавиноподібного переходу ВТНП мікрохвильової лінії передачі з нелінійним імпедансом в сильно дисипативний стан

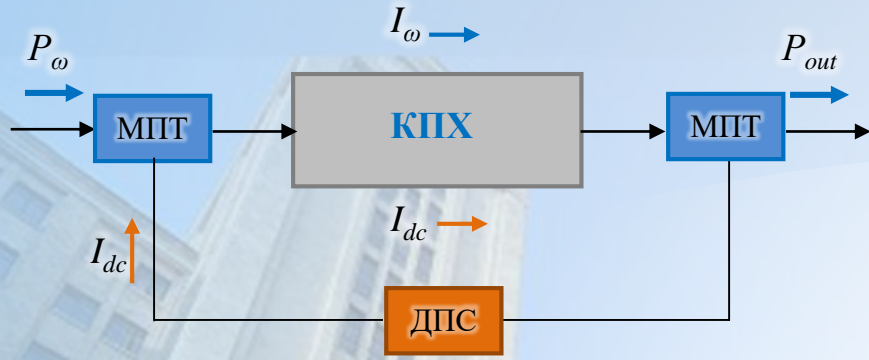


Рис. 33 – Схема подачі постійного струму на КПХ (МПТ-мікрохвильовий планарний трійник; ДПС – джерело постійного струму).

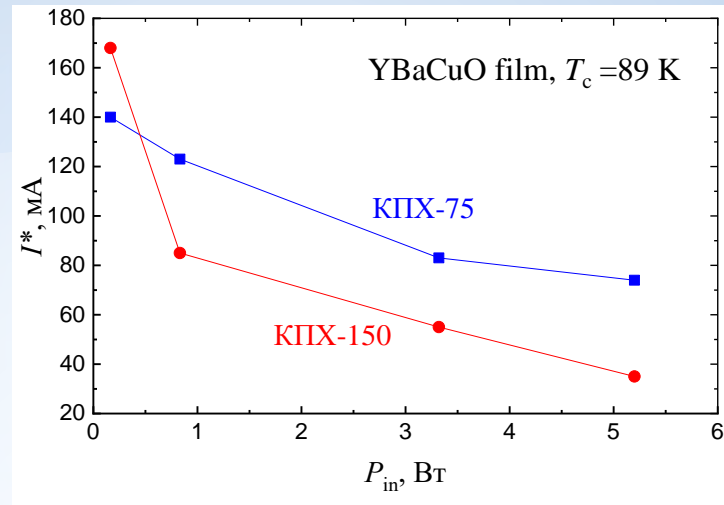


Рис. 35 – Залежність постійного струму $I^*=I_{dc}$ відповідного лавиноподібного ефекту від потужності вхідного сигналу P_{in} для КПХ з різною товщиною плівки (75 та 150 нм).

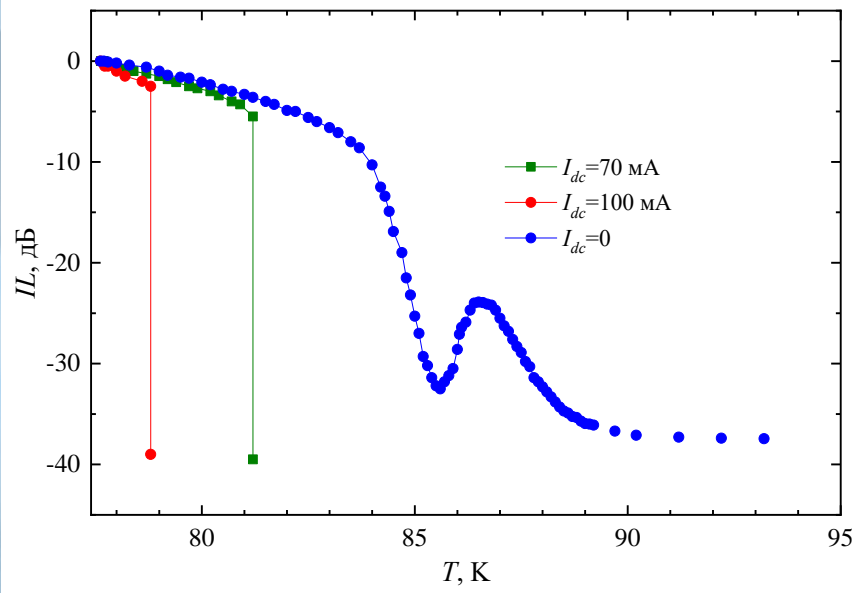
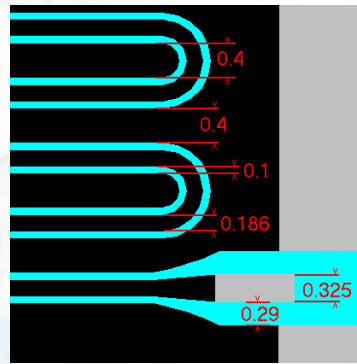


Рис. 34 – Залежність внесених втрат IL від T при потужності вхідного сигналу $P_{in} = 832$ мВт та різних значеннях постійного струму I_{dc} (0; 70; 100 мА).



Топологія копланарного хвильоводу

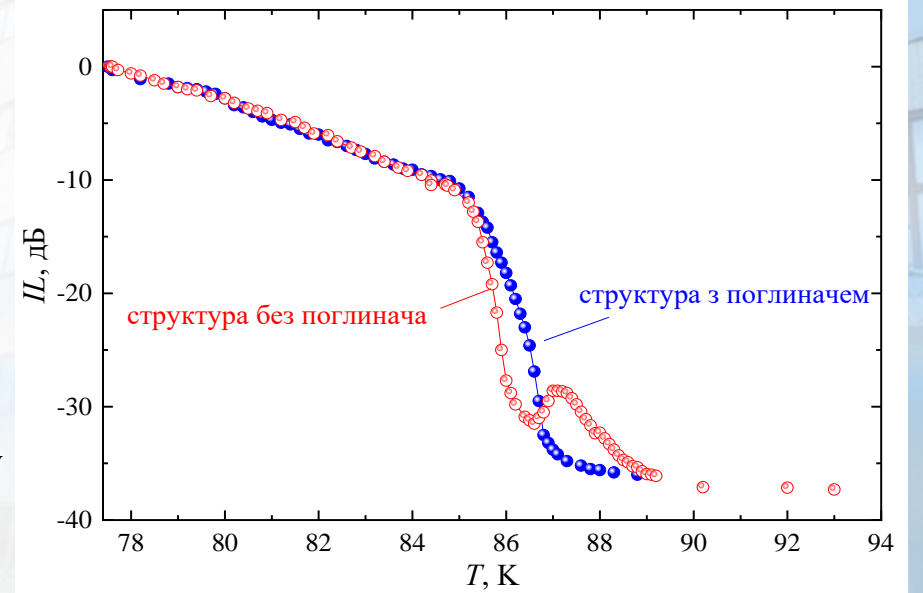


Рис. 36 – Залежність $IL(T)$ від вхідної потужності $P_{in} = 832$ мВт: структура без поглиначів та структура з поглиначем

Відгук КДР з плівкою міді. Ефекти переходу від мікрометрових до нанометрових товщин

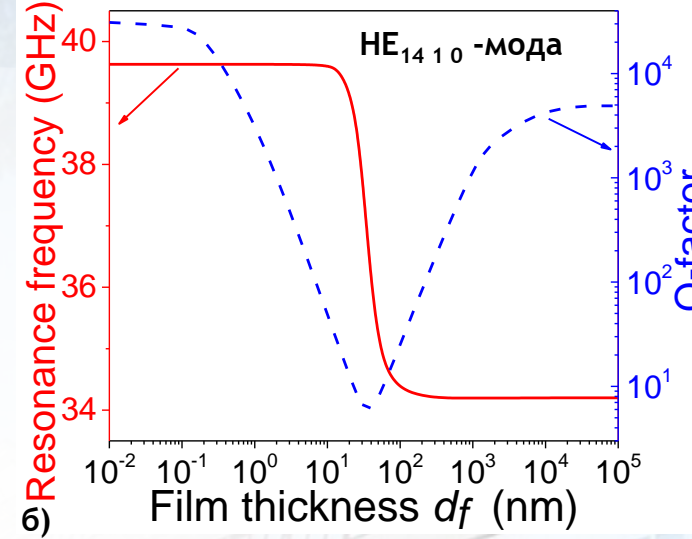
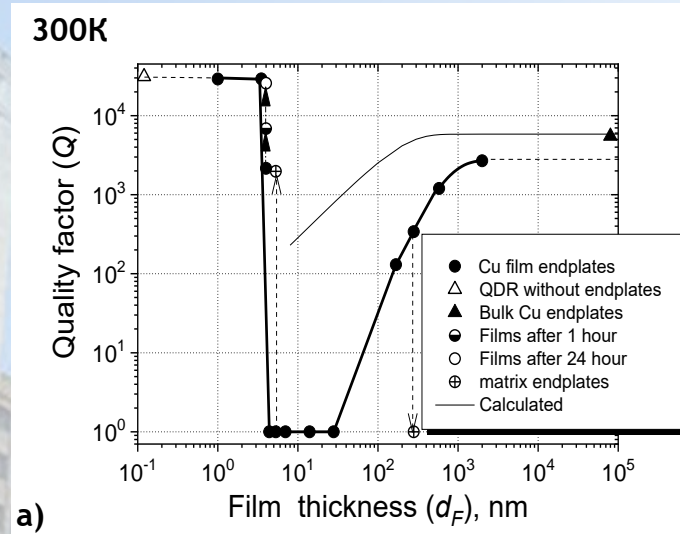
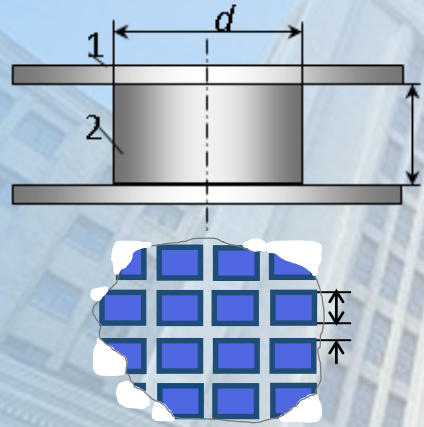


Рис. 38 – Залежність добротності КДР с ТПС (експеримент (а) і чисельне моделювання (б)) та власної частоти (чисельне моделювання (б))

Рис. 37 – Сапфіровий КДР з мідними ТПС (а) та матрична структура Cu плівки (б)

Графен у мікрохвильовому полі КДР. Визначення провідності графену.

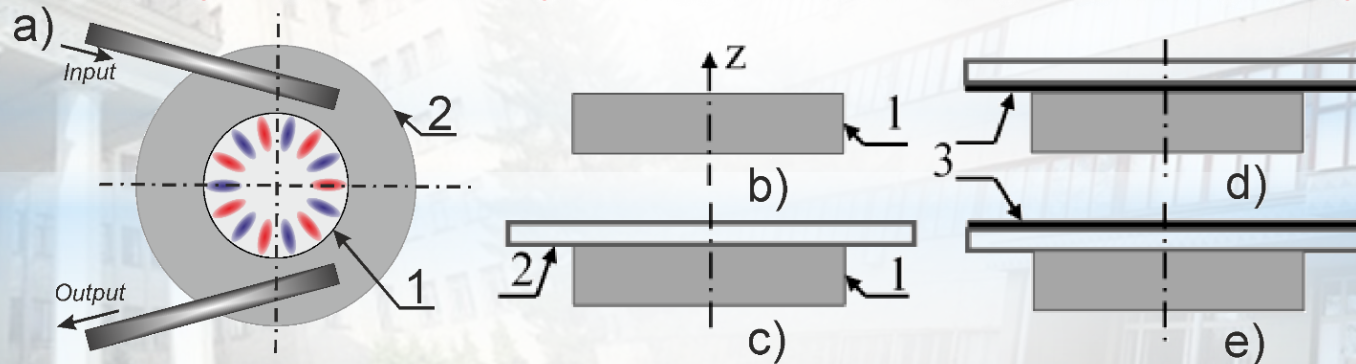


Рис. 39 – (а) КДР, збуджений діелектричними хвилеводами: вхід і вихід, резонаторні структури, що складаються з сапфірового диска 1, кварцової підкладки 2 і графенової плівки 3. Тут (b) і (c) представляють сапфіровий диск і сапфіровий диск з кварцовою підкладкою без графена, (d) і (e) відображують ситуації, коли графен розташований у нижній і верхній частині кварцової підкладки відповідно

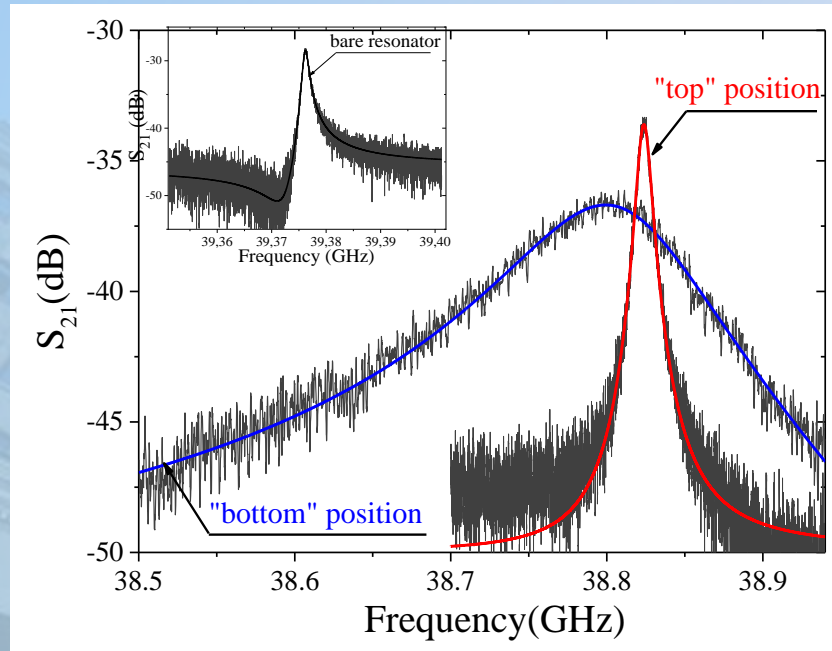


Рис. 40 – Залежність коефіцієнта S_{21} від частоти для моди $HE_{141\delta}$ в КДР з графеном

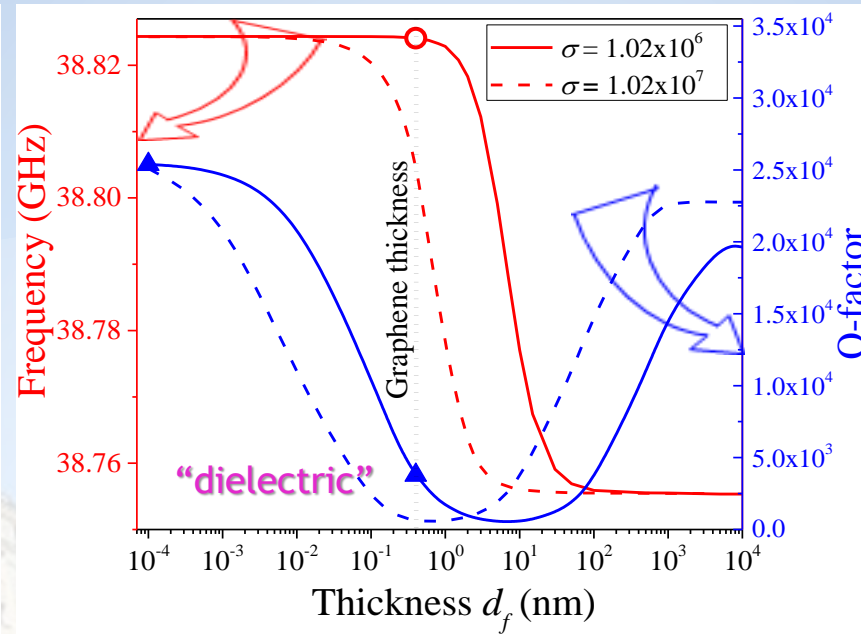


Рис. 41 – Виміряна частота f_g (\circ) і Q-фактор Q_g (\blacktriangle) КДР для конфігурації «графен зверху». Суцільні та штрихові лінії представляють чисельне моделювання залежності f_g та Q від товщини плівки для провідності плівки і $1,02 \times 10^7$ С/м відповідно. Суцільна лінія ($1,02 \times 10^6$ С/м) відповідає експериментальним точкам. Крайня точка зліва f відповідає добротності резонатора з підкладкою без графену, мода $HE_{141\delta}$

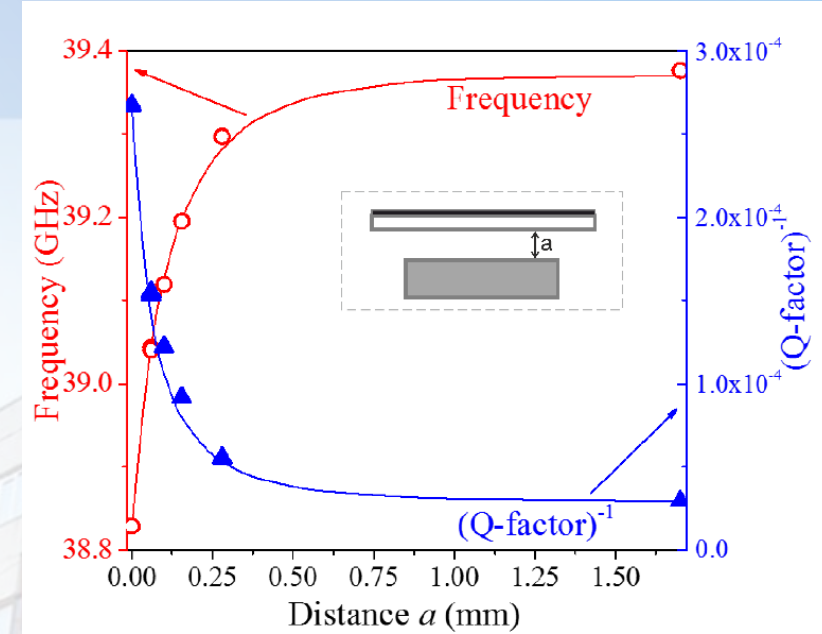


Рис. 42 – Частота резонатора f_g (\circ) та обернена добротність Q_g (\blacktriangle) з графеном у положенні «верх» як функція відстані a між площиною сапфірового диска та підкладкою, $\sigma = 1,02 \times 10^6$ С/м. Світлі кружечки та заліті трикутники - експеримент, а лінії – результати розрахунків.

Значення електропровідності, отримані за допомогою COMSOL Multiphysics для різних мод і положень підкладки

Мода	$HE_{121\delta}$		$EH_{111\delta}$	
	верх	низ	верх	низ
σ (S/m)	$1,069 \times 10^6$	$9,57 \times 10^5$	$1,151 \times 10^6$	$9,89 \times 10^5$

Середнє значення $\sigma = (1,04 \pm 0,11) \times 10^6$ С/м

Мікрохвильова діелектрометрія біохімічних рідин малих об'ємів

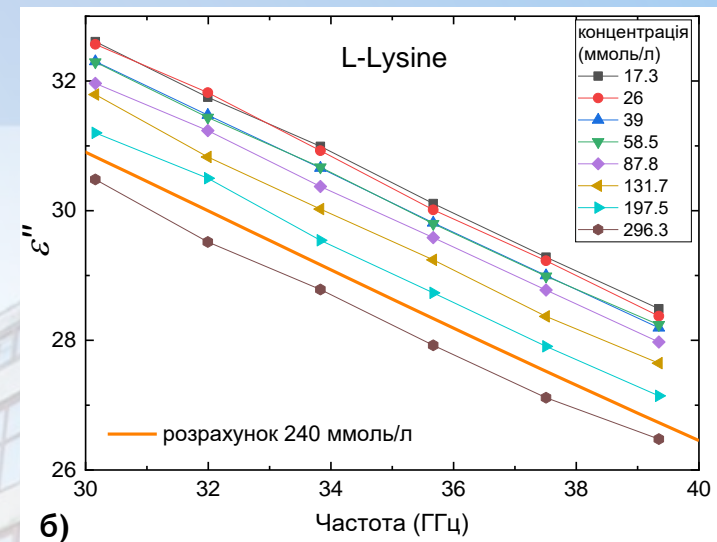
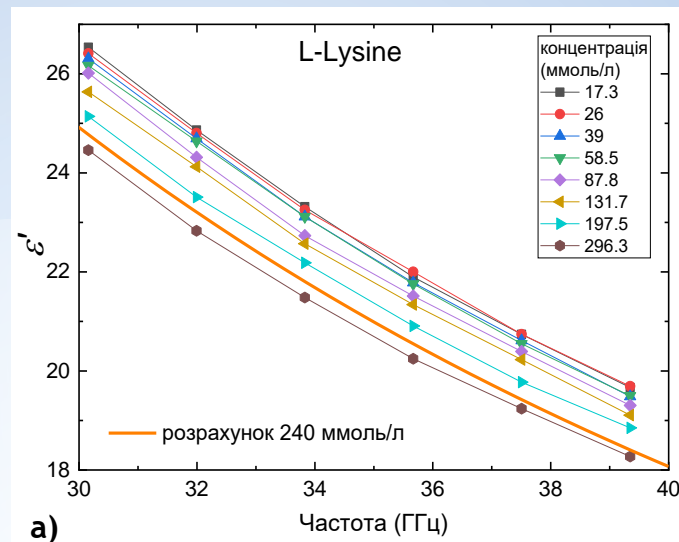
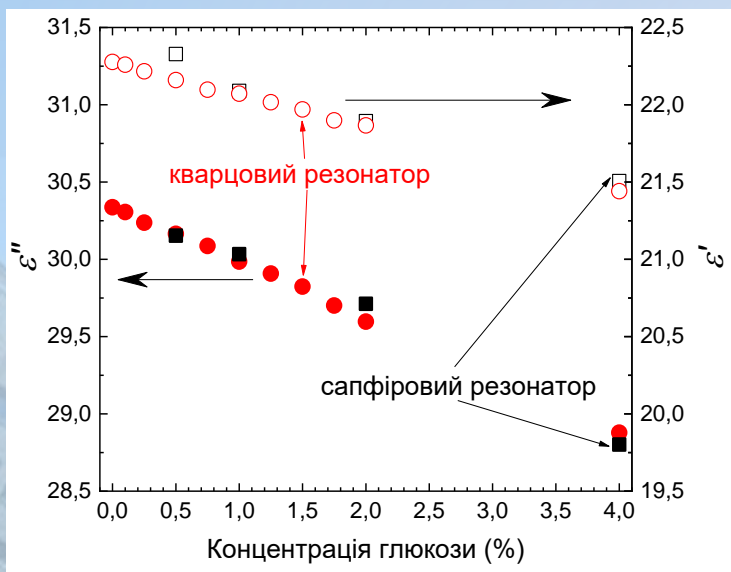


Рис. 43 – Залежність діелектричної проникності глюкози від її концентрації у водному розчині

Рис. 44 – Залежності комплексної діелектричної проникності розчинів лізину у воді

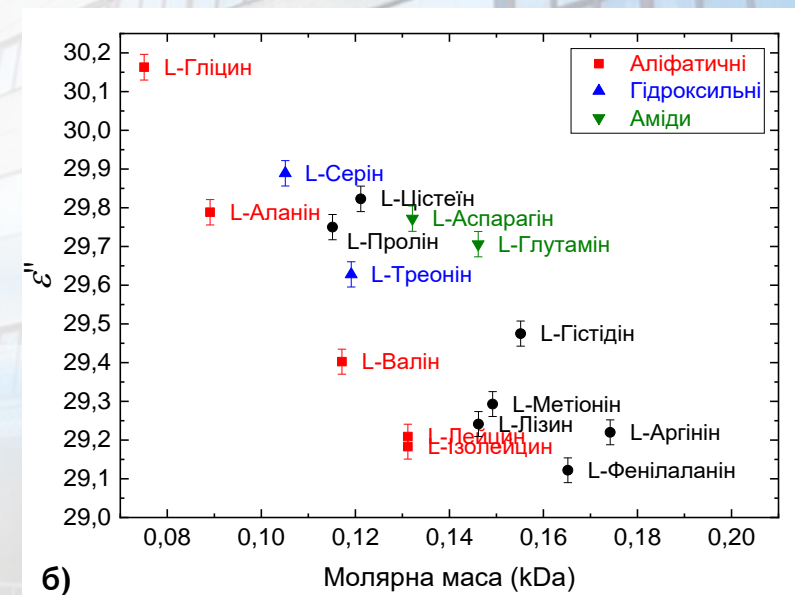
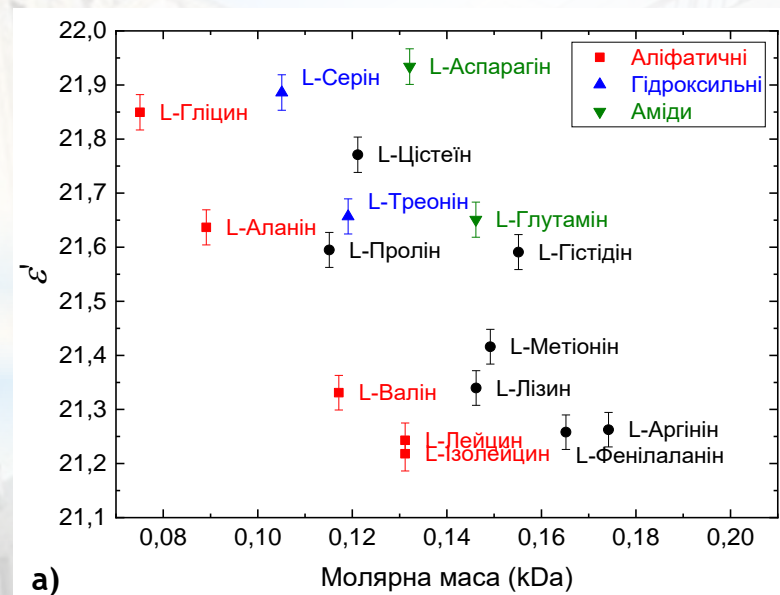
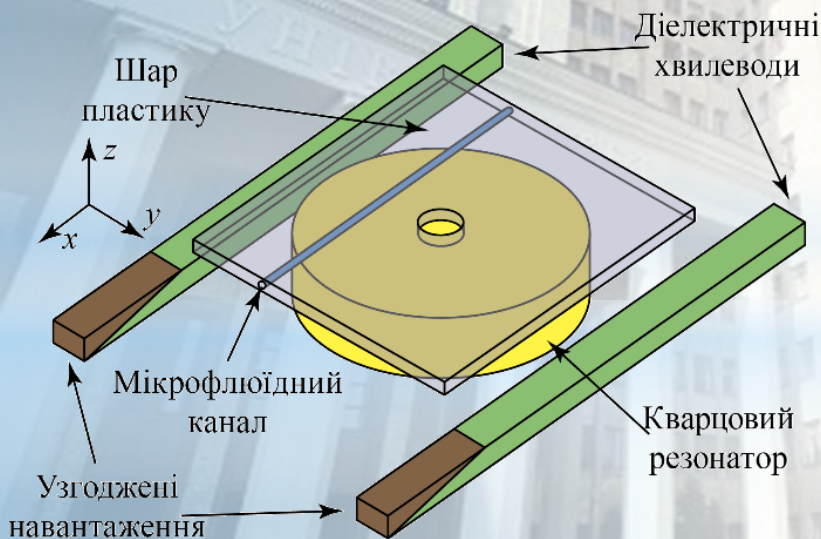


Рис. 45 – Залежності комплексної діелектричної проникності амінокислот для концентрацій 131,7 18 ммоль/л у водних розчинах, від молярної маси, виміряних на частоті 35,668 ГГц



Квантове (мазерне) підсилення у мм діапазоні довжин хвиль з широкою (миттєвою) смугою підсилення. Ефект бістабільності у мазерному середовищі

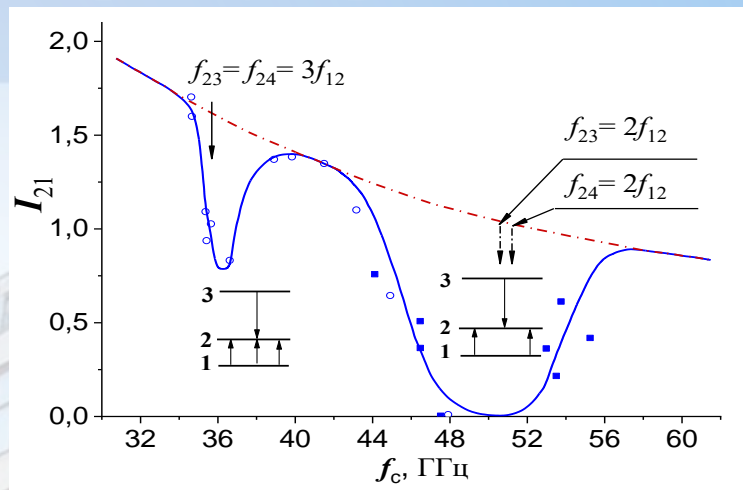
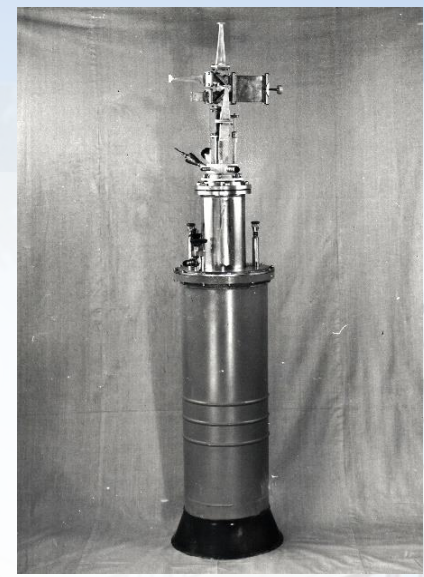
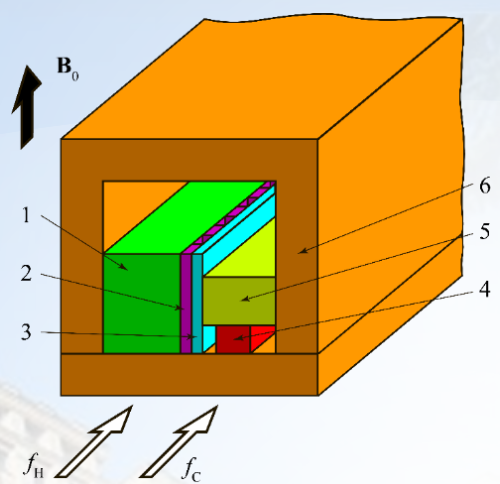
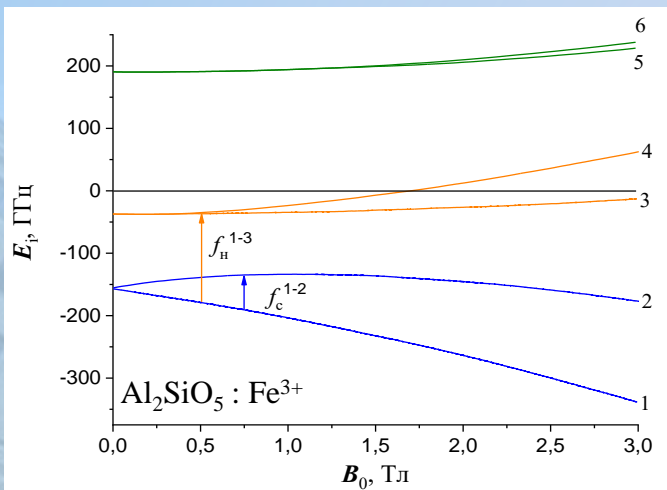


Рис. 46 – Схема енергетичних рівнів у андалузиті. Трьохрівнева схема накачки при 90-градусній орієнтації кристалу по відношенню до напрямку зовнішнього магнітного поля; два магнітних комплекси іонів Fe^{3+} в андалузиті (вставка).

Рис. 47 – Поперечний переріз періодичної сповільнювальної структури: 1- активний кристал; 2- штирова гребінка; 3- тонка діелектрична пластина; 4- феритовий елемент; 5- діелектрик; 6 - екран сповільнювальної структури (корпус); та фото квантового підсилювача.

Рис. 48 – Частотна залежність коефіцієнту інверсії в $Al_2SiO_5 : Fe^{3+}$ при $\theta = 90^\circ$, $T = 1,7 K$

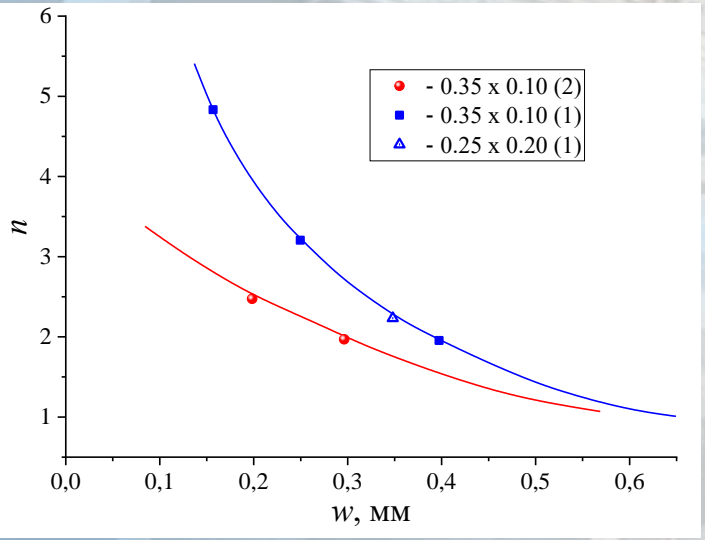


Рис. 49 – Розширення лінії ЕПР в $Al_2SiO_5 : Fe^{3+}$ в залежності від відстані w до гексаферитової пластинки.

**$G = 20 - 30$ дБ; $\Delta f = 470 - 240$ МГц;
 $T_{ш} \approx 20K$; $P_H = 500 - 300$ мВт**

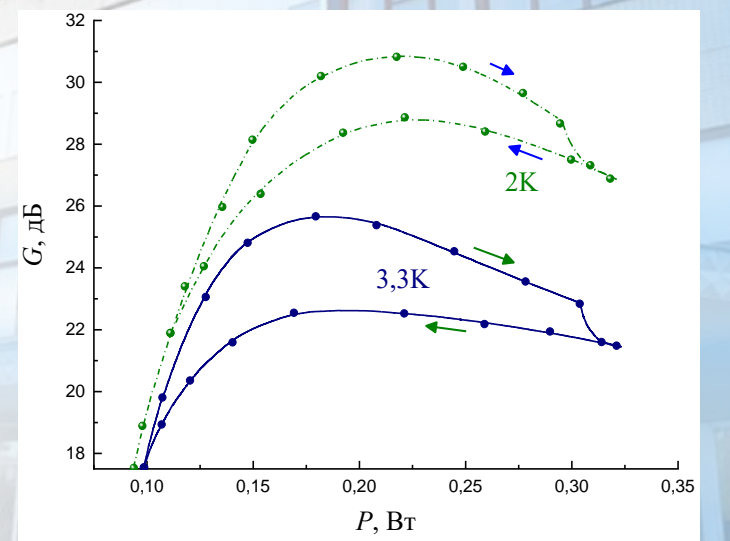


Рис. 50 – Незалежні гілки інверсійних станів спіт-системі у квантовому підсилювачі. Стрілки указують напрямок зміни потужності накачки.

Нові радіофізичні прилади на основі досліджених середовищ і електродинамічних структур

1. Квазіоптичний діелектричний резонатор у складі комірок для вимірювання поверхневого імпедансу плівок надпровідників у мм діапазоні хвиль

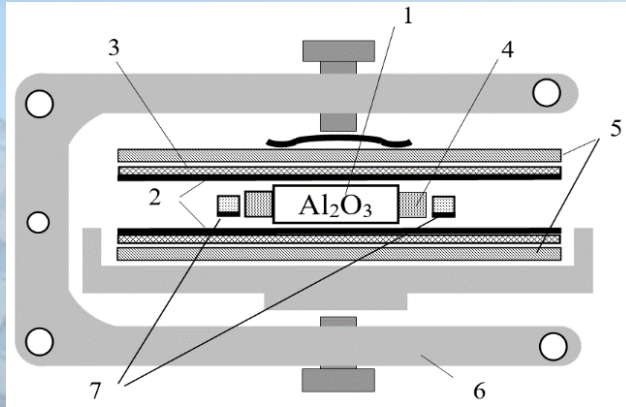
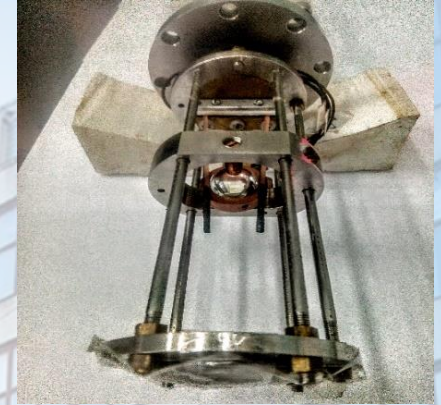


Рис. 51 – а) Комірка для прямого вимірювання R_s (1-діелектричний диск, 2-ВТНП плівка, 3-підкладка, 4-пінопластова обойма, 5-мідні диски, 6-дюралева каретка, 7-дзеркальні діелектричні хвилеводи); б) фотографія нижньої частини хвилевідної вставки в криостат у складі з напівсферичним сапфіровим КДР з однією ВТНП плівкою (в центрі фотографії).



2. Вимірювальний квазіоптичний діелектричний резонатор з використанням відбитої хвилі

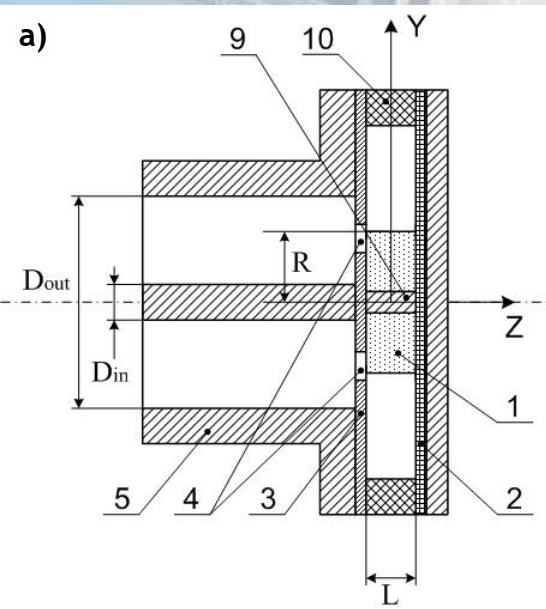


Рис. 52 – а) Вимірювальний резонатор з ШГ; 1 – діелектричне тіло обертання (резонатор), 2 і 3 – торцеві пластини з високою провідністю (2 може бути досліджуваною плівкою), 4 – отвори зв'язку, 5 – коаксіальний хвилевід, 9 – штифт, 10 – компартмент; б) поперечний переріз коаксіального хвилевода.

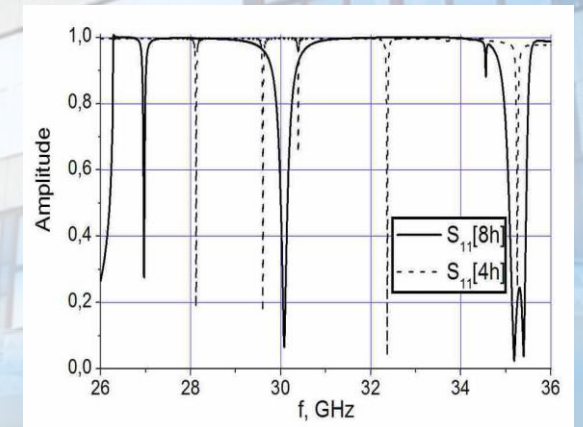
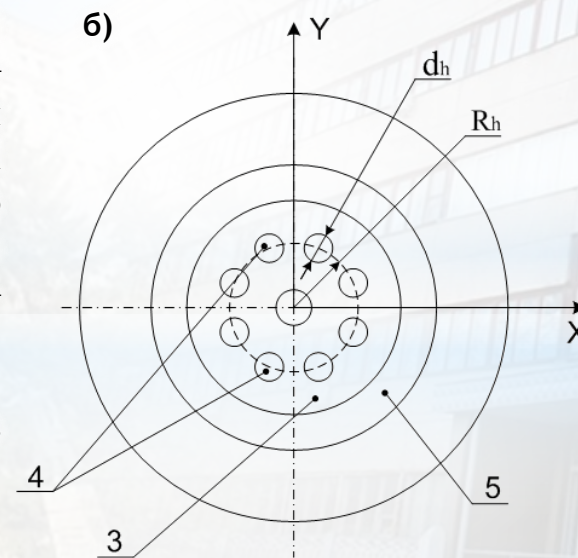


Рис. 53 – Спектр коефіцієнту відбиття двох резонаторів з високо- та низькопровідними торцевими пластинами із 4-ма та 8-ма отворами зв'язку

3. Мікросмушковий квазіоптичний резонатор

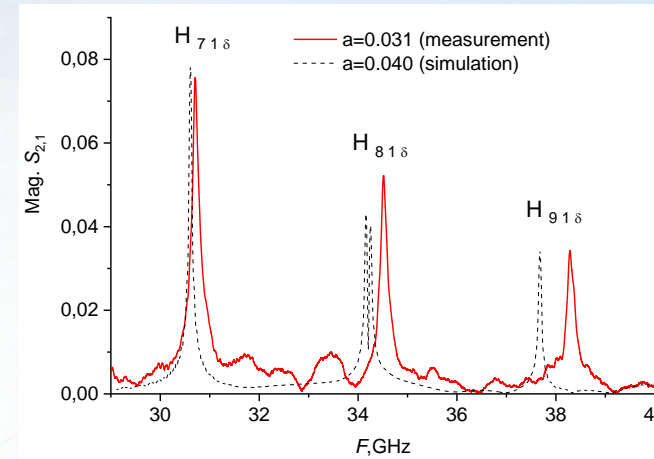
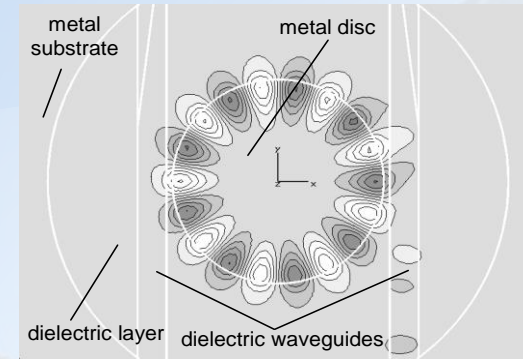
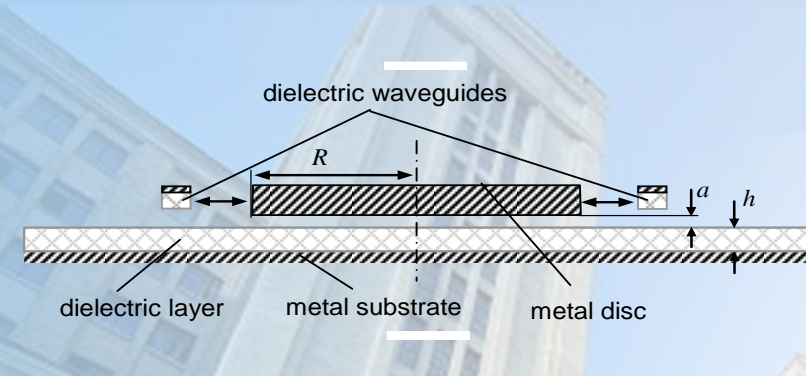


Рис. 55 – Частотний спектр мікросмушкового квазіоптичного резонатора, результат обчислення і експеримент

Рис. 54 – Вид збоку мікросмушкового квазіоптичного резонатора (а) і розподіл МХ поля у підкладці (діелектрик) під металевим диском (б).

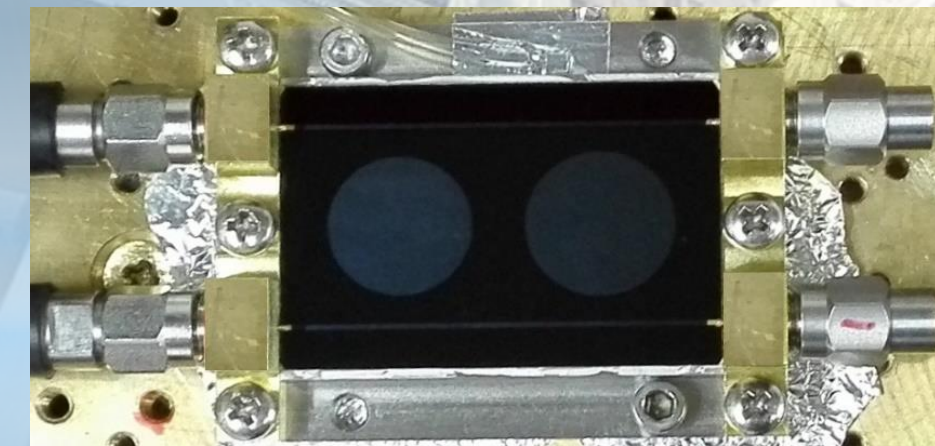
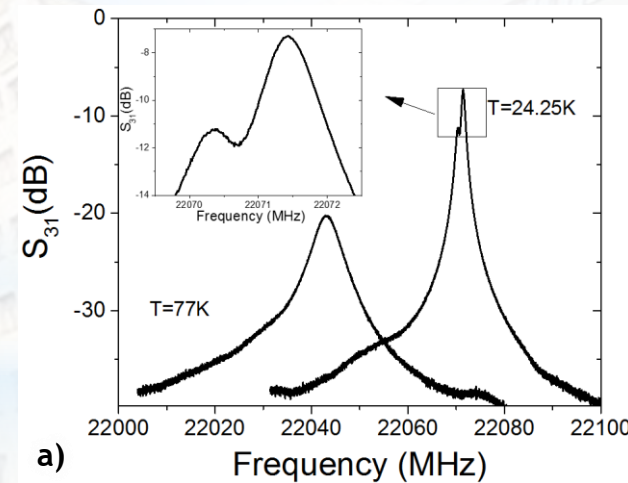
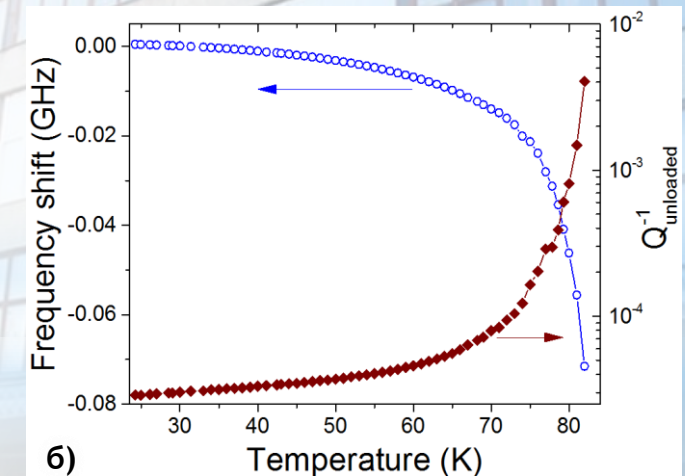


Рис. 56 – Фото експериментального прототипу пристрою з 2 квазіоптичними мікросмушковими резонаторами та 2 мікросмушковими лініями.



а)



б)

Рис. 57 – Температурна залежність мікрохвильового відгуку мікросмушкового КДР на основі надпровідної плівки $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (а) і приклади запису резонансної лінії резонатора при двох значеннях температури, S_{31} – коефіцієнт передачі вхід-вихід резонатора (б).

4. Смого-пропускний ВТНП фільтр

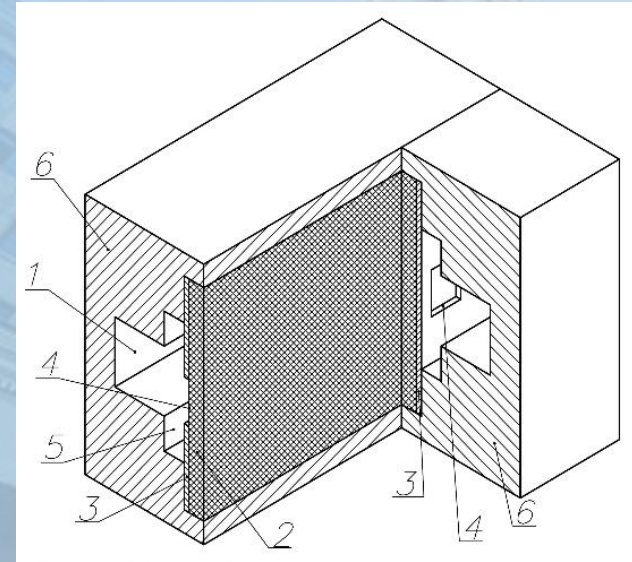


Рис. 58 – Загальний вигляд смого-пропускного фільтра

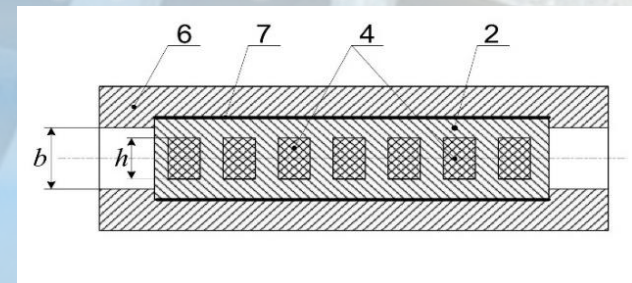


Рис. 60 – переріз смого-пропускного фільтра в осьовій площині хвилеводу

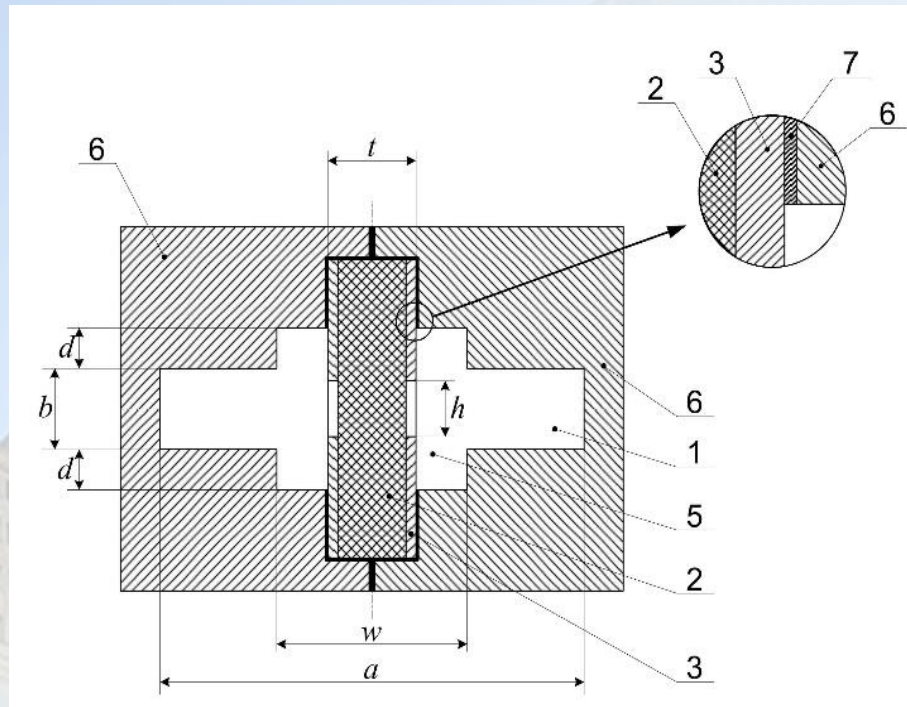


Рис. 59 – Переріз смого-пропускного фільтра в поперечній площині хвилеводу

1-хвилевід прямокутного перетину $a \times b$, 2- діелектрична підкладка, 3-ВТНП плівка, 4- резонансне вікно, 5- канавка, 6- металевий корпус, 7-теплопровідний шар.

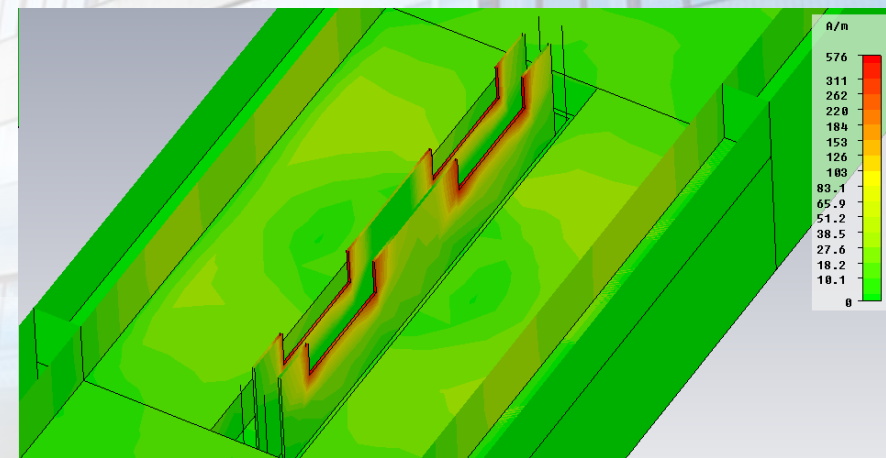
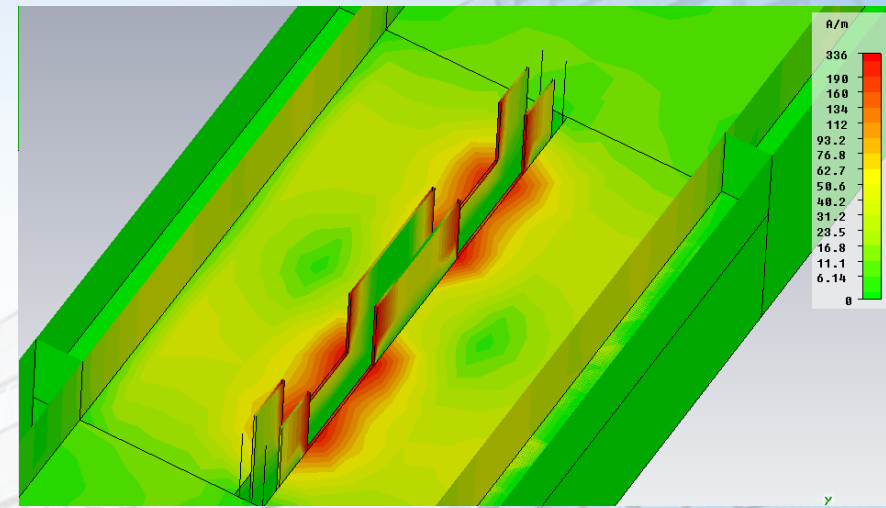


Рис. 61 – Розподіл поверхневих МХ струмів в стінках хвилеводу і ВТНП шарах для Е-площинних ВТНП вставок в прямокутному (а) і хрестоподібному (б) хвилеводах

Нові радіофізичні прилади на основі досліджених середовищ і електродинамічних структур

5. Макет діелектрометра з КДР у складі з мікрофлюїдним чіпом.

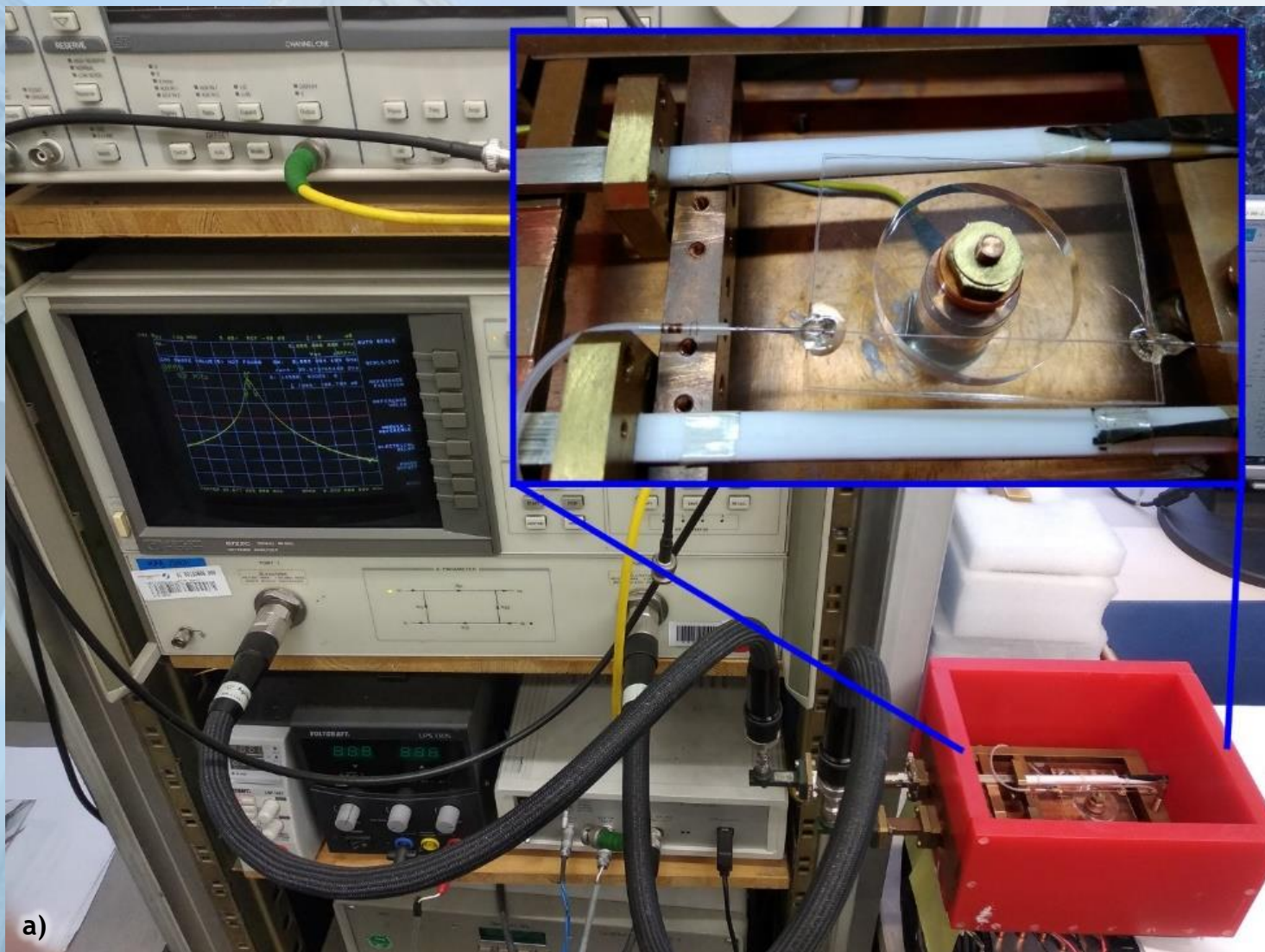
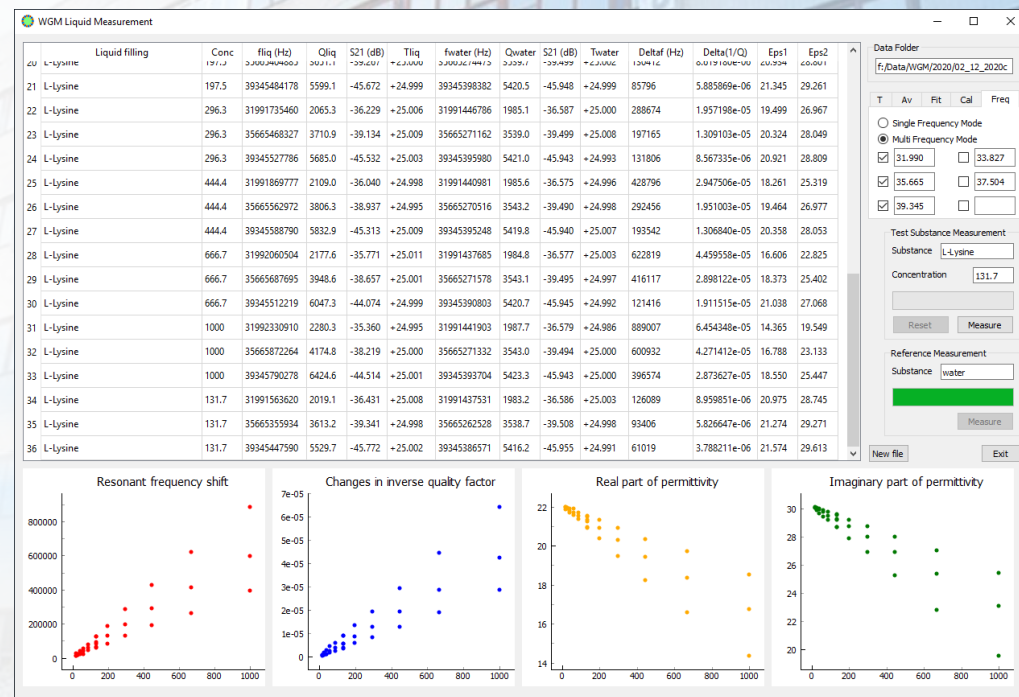


Рис. 62 – Макет діелектрометра у складі вимірювальної комірки у термоізолюваному боксі, температурного контролера та векторного аналізатора мереж (а) та скріншот програми для вимірювання (б).



Нові радіофізичні прилади на основі досліджених середовищ і електродинамічних структур

6. Генерування електромагнітного випромінювання в електродинамічній системі на основі циліндричних КДР

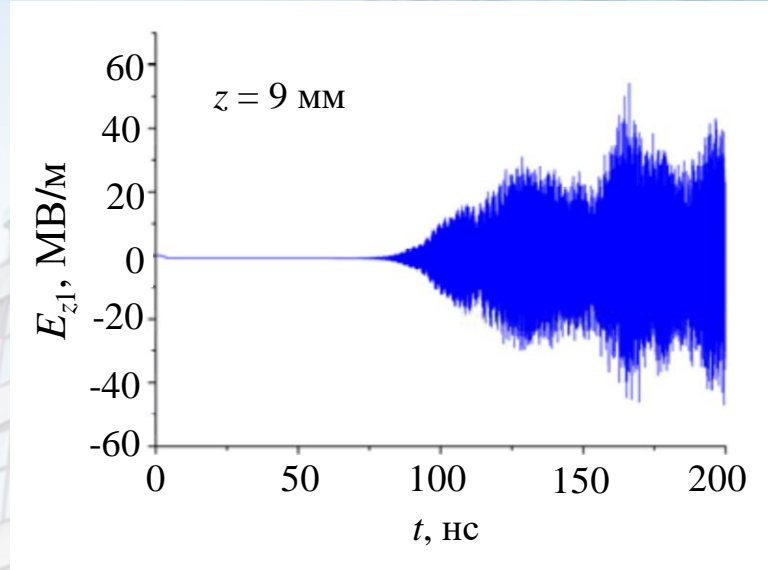
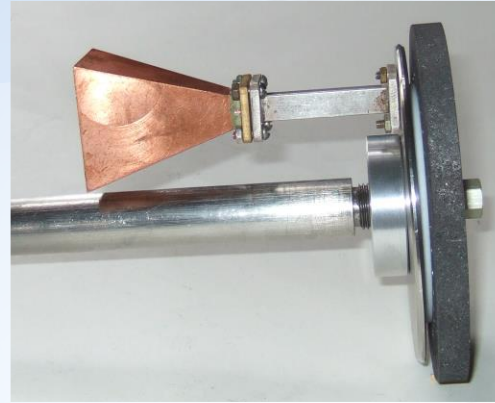
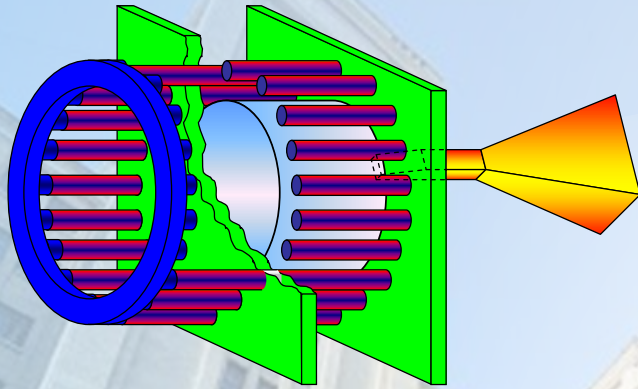


Рис. 65 – Аксіальна компонента електричного поля на виході із КДР у стаціонарному режимі автоколивальної системи

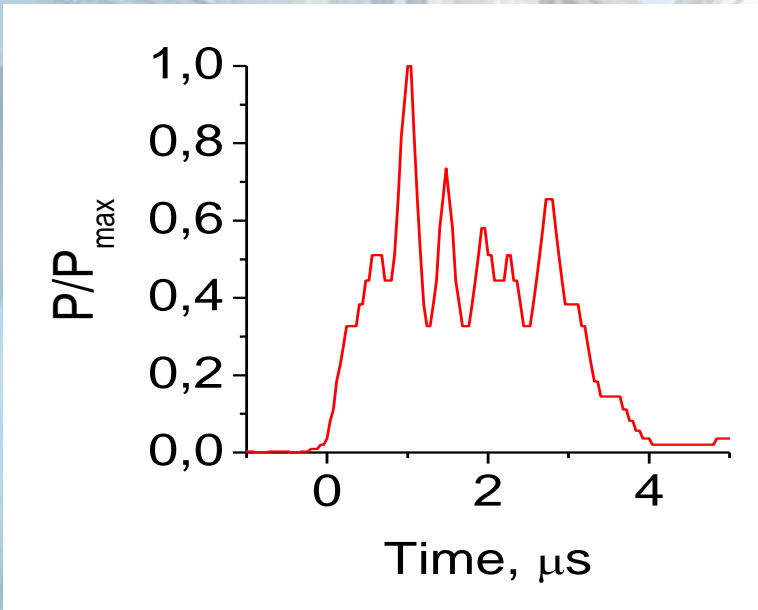


Рис. 63 – Імпульс МХ випромінювання

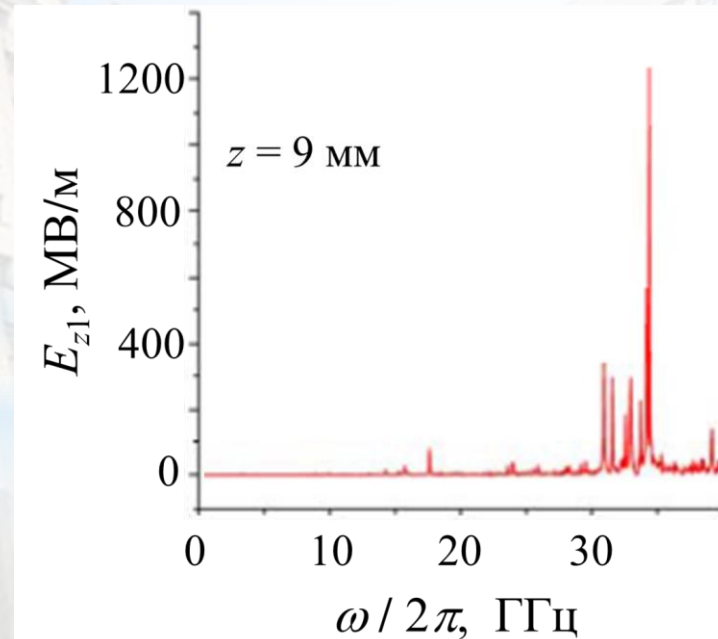


Рис. 64 – Спектр коливань, що збуджуються в КДР

Вперше отримано електромагнітне випромінювання в електродинамічній системі на основі циліндричного КДР, що збуджується багатострумінним пучком електронів



Узагальнюючі висновки наукової роботи



Результати теоретичних та експериментальних досліджень низки матеріальних середовищ (твердотільна плазма, надпровідники, метаматеріали (у тому числі флюксонні), графени, біохімічні рідини, мазерні кристали, навколишнє середовище), проведених на основі єдиного методологічного підходу з використанням МХ відгуку зазначених середовищ в електродинамічних структурах, розширюють і дають нові знання про ці середовища.

Створені нові розділи в МХ фізиці: 1) електродинаміка взаємодії потоків заряджених частинок з ЕМ полями коливань та хвиль, які вони збуджують в твердотільних структурах, 2) електродинаміка високочастотних твердотільних резонаторів, 3) фізика флюксонних метаматеріалів.

Отримали розвиток експериментальні методи дослідження МХ відгуку середовищ на основі нових електродинамічних структур (КДР з різною формою поверхні тіла обертання, нерезонансний метод з відбиттям плоскої хвилі при ковзних кутах падіння, КДР діелектрометрія біохімічних рідин малих об'ємів (<1мкл)).

Виявлено нові особливості та ефекти при взаємодії МХ поля з конденсованими середовищами (частотна залежність залишкового поверхневого опору купратного надпровідника, аномальна температурна залежність дійсної частини комплексної провідності нетрадиційних надпровідників типу пніктидів та халькогенідів з іонами Fe, лавиноподібний перехід МХ копланарної лінії передачі на основі ВТНП с постійним струмом в сильнодисипативний стан, бістабільність в мазерній системі, автоколивання в структурі КДР з електронними пучками).

Отримані результати уже на сьогодні стали науковим підґрунтям для створення нових мікрохвильових приладів.

Автори також впевнені, що проведені дослідження не тільки дають нові знання, але в певних напрямках виявляють нові проблеми, які можуть стати важливими або навіть вирішальними у майбутньому розвитку як МХ фізики, так і багатьох інших галузей знань і техніки, включаючи комунікацію, оборону, біотехнології, медицину і можливі нові платформи для реалізації квантових обчислень.