

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Мойсеєнко Владислав Анатолійович

УДК 537.86, 537.87, 537.871.7

**НЕРЕЗОНАНСНЕ ОБЕРНЕННЯ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ СПІНОВИХ
ХВИЛЬ ТА КОРЕЛЯЦІЙНА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ПЛІВКАХ
ЗАЛІЗО-ІТРИЄВОГО ГРАНАТУ**

01.04.03 — радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, доцент
Прокопенко Олександр Володимирович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри нанофізики та наноелектроніки факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Каказей Гліб Миколайович,
Факультет фізики та астрономії Університету Порто (м. Порто, Португалія),
провідний дослідник

кандидат фізико-математичних наук
Недех Сергій Володимирович,
Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України,
заступник завідуючого відділом радіоспектроскопії

Захист відбудеться «23» травня 2016 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.31 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, м. Київ, проспект Академіка Глушкова 4Г, факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці імені М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 58.

Автореферат розісланий «8» квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д. ф.-м. н., проф.



Мартиш Є. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Актуальність теми роботи обумовлена необхідністю розробки та створення нового покоління систем обробки, збереження, передачі та прийому інформації з покращеними характеристиками на базі нових фізичних явищ. Одним з підходів до розв'язання таких задач є створення швидкодіючих енергоефективних інформаційних систем на основі магнітних функціональних матеріалів. Змінюючи напрямок елементарних магнітних моментів у таких матеріалах, можна помітно змінювати їх магнітні та електричні властивості. Відповідні ідеї є базовими для ряду новітніх напрямів у фізиці та електроніці, зокрема для спінтроніки, магنونіки, спін-орбітроніки тощо.

Одним з найкращих функціональних матеріалів для магنونіки є залізо-ітрієвий гранат (ЗІГ). ЗІГ, вирощений методом епітаксії, має рекордно низьке значення параметра затухання в сантиметровому діапазоні довжин хвиль. На його основі були розроблені такі нелінійні прилади, як обмежувачі потужності НВЧ сигналів, придушувачі шумів, регенеративні підсилювачі, активні та пасивні лінії затримки тощо. Притаманні ЗІГ сильно виражені нелінійні властивості (деякі нелінійні ефекти проявляються вже за потужностей вхідного НВЧ сигналу близько 1 мкВт) роблять його незамінним матеріалом для реалізації нелінійних пристроїв магنونіки.

Дослідження лінійної та нелінійної динаміки спінових хвиль (СХ) у тонких плівках ЗІГ дозволяє запропонувати на основі відповідних фізичних ефектів низку нових пристроїв для систем передачі, обробки та прийому інформації в сантиметровому діапазоні довжин хвиль, а також покращити характеристики вже існуючих пристроїв. Одним з цікавих явищ, що відбуваються в таких системах, є явище обернення хвильового фронту (ОХФ), відоме із загальної фізики для хвиль довільної природи. На сьогоднішній день добре дослідженим є випадок так званого резонансного ОХФ СХ у плівках ЗІГ, коли частоти прямої та зворотної СХ співпадають. Проте досі залишився не вивченим випадок нерезонансного ОХФ, що реалізується у випадку невиродженого параметричного підсилювача. Частотні ефекти, що виникають при використанні нерезонансного ОХФ, можна застосувати в пристроях магنونіки. Зокрема виявляється перспективним використання явища нерезонансного ОХФ для створення приладів кореляційної обробки інформації з покращеними характеристиками – з підвищеною ефективністю виділення сигналів з рівня шуму, з одночасним виконанням додаткових операцій, наприклад кодуванням сигналу, його перевіркою на завадостійкість тощо.

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи обумовлена необхідністю вивчення фізики нерезонансного ОХФ СХ у плівках ЗІГ, а також дослідження можливості використання цього явища для створення різноманітних пристроїв магнітної електроніки НВЧ. Важливо також те, що основні результати, отримані в дисертаційній роботі, досить легко перенести в інші області прикладної фізики, зважаючи лише на специфіку частотного діапазону та властивості матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу над дисертацією було виконано в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт 06БФ052-01 «Фундаментальні основи новітніх та ресурсозберігаючих технологій на основі радіофізики та електроніки» (№ держреєстрації: 0106U006625), 11БФ052-01 «Фундаментальні основи створення та методи дослідження нанорозмірних структур з керованими параметрами для потреб енергокомплексу» (№ держреєстрації 0111U006169). Дослідження також підтримувались Науково-технологічним центром в Україні (Science and Technology Center in Ukraine) проект №3066 «Нелінійний мікрохвильовий процесор на основі залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ)».

Мета роботи і завдання дослідження: експериментальне дослідження нерезонансного ОХФ спінових хвиль (СХ) у тонких плівках ЗІГ.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувалися такі **задачі:**

1. Експериментальне дослідження нерезонансного ОХФ магнітостатичних хвиль (МСХ) у плівках ЗІГ. Виявлення та вивчення можливості мікрохвильової фільтрації та спектрального аналізу вхідних сигналів.

2. Дослідження можливості розділення сигналів ЗОМСХ, що одночасно зафіксувалися реєструючим пристроєм, за допомогою електромагнітного накачування змінної частоти. Розробка ефективної числової моделі для моделювання процесу розділення сигналів та експериментальне дослідження величини зовнішнього магнітного поля, що відповідає граничній частоті спектра МСХ, за допомогою нелінійної взаємодії СХ.

3. Експериментальне вивчення параметричного перетворення частоти сигналу ПМСХ на керовану магнітним полем проміжну частоту за сталої частоти гетеродину. Дослідження явища ОХФ в умовах анізотропної дисперсії спектра ПМСХ.

4. Розробка та експериментальне вивчення кореляційного приймача на базі параметричної взаємодії зустрічних сигналів СХ у тонких магнітних плівках ЗІГ та кореляційного приймача з використанням резонансного та нерезонансного ОХФ СХ.

Об'єктом дослідження є процеси параметричної взаємодії СХ з параметричним електромагнітним накачуванням у випадку, коли частота сигналу відрізняється від половини частоти накачування.

Предметом дослідження було обрано сигнали ОХФ зворотних об'ємних магнітостатичних хвиль (ЗОМСХ) та поверхневих магнітостатичних хвиль (ПМСХ) в плівках ЗІГ.

Методи дослідження.

1. Метод параметричної взаємодії СХ з електромагнітним накачуванням при виявленні та дослідженні нерезонансного ОХФ у плівках ЗІГ.

2. Метод параметричної взаємодії спінових хвиль між собою при дослідженні злиття магнітонів з утворенням нових квазічастинок.

3. Метод мікрохвильової фільтрації при дослідженні розділення сигналів, що одночасно зафіксувалися реєструючим пристроєм.

4. Методи числового розв'язку систем диференціальних рівнянь при дослідженні роботи кореляційного приймача на базі плівок ЗІГ.

5. Метод повільних амплітуд при створенні аналітичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі уперше:

1. Запропоновано та експериментально досліджено нерезонансне ОХФ СХ паралельним параметричним накачуванням, коли частота сигналу не співпадає з його половиною частотою. Показано можливість спектрального аналізу вхідних сигналів та мікрохвильової фільтрації з використанням нерезонансного ОХФ ЗОМСХ у плівках ЗІГ.

2. Експериментально доведено можливість розділення двох мікрохвильових сигналів, що одночасно діють на детектор, з використанням нерезонансного ОХФ ЗОМСХ.

3. Виявлено параметричне перетворення частоти сигналу ПМСХ на керовану магнітним полем проміжну частоту, як результат ОХФ у невзаємному середовищі.

4. Експериментально досліджено кореляційний приймач НВЧ сигналів на базі параметричної взаємодії СХ з паралельним параметричним накачуванням. Запропоновано використовувати ОХФ СХ для створення обернених у часі сигнальних імпульсів. За допомогою нерезонансного ОХФ вивчено вплив шумових сигналів на роботу корелятора. Розроблено ефективну числову модель для розрахунку часових профілів сигналу кореляції.

5. Запропоновано методику для експериментального дослідження спектрів СХ у тонких плівках ЗІГ товщиною 5,1 мкм, 6,8 мкм, 7,1 мкм, 20,4 мкм та 30,3 мкм за допомогою нелінійної взаємодії СХ. Встановлено, що дана методика дозволяє знаходити величину зовнішнього магнітного поля, що відповідає граничній частоті спектра МСХ.

Практичне значення одержаних результатів.

Уперше показано можливість використання нерезонансного ОХФ СХ у плівках ЗІГ, що відкриває нові можливості для побудови нових і модернізації існуючих систем передачі, прийому та обробки інформації.

Нерезонансне ОХФ СХ дозволило виконувати декілька нових операцій над інформаційними сигналами, такі як: вузькосмугова фільтрація, селекція вхідних сигналів по частоті з послідуочим розділенням їх в часі, спектральний аналіз.

Кореляційний приймач на основі плівки ЗІГ, який дозволяє провести ефективно виділення сигналів з рівня шуму, є перспективним для використання у системах захисту інформації. За відсутності такого корелятора приймач може виділяти корисну інформацію з вхідного зашумленого сигналу лише на несучій частоті, а за допомогою дослідженого корелятора ця операція може бути реалізована на довільній частоті в межах деякої робочої смуги частот пристрою. В роботі було запропоновано декілька важливих технічних рішень, що дозволяють використовувати лише одну антену для вхідних та вихідних сигналів, а також

використовувати корелятор за умов, коли частота вхідного сигналу відрізняється від частоти накачування. Вперше було запропоновано методику для дослідження спектрів МСХ на основі такого корелятора.

Достовірність наукових результатів.

Достовірність одержаних у дисертаційній роботі результатів забезпечується використанням загальноприйнятих моделей для опису параметричної взаємодії хвиль та коливань. Експериментальні результати щодо нерезонансного обернення хвильового фронту спінових хвиль (розділ 3) порівнювалися з наявними теоретичними результатами, отриманими Чумаком А.В. (Київський національний університет ім. Т. Шевченка, Київ, Україна; Кайзерслаутернський технічний університет, м. Кайзерслаутерн, Німеччина). Результати розділу 4 присвячено кореляційному виділенню сигналів з рівня шуму, перевірено методом співставлення з наявними в літературі експериментальними результатами з дослідження кореляції сигналів у плівках ніобату літію М. Luukkala, J. Surakka (Факультет технічної фізики, Технологічний університет м. Гельсінкі, Отанамі, Фінляндія).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора полягає в проведенні усіх наведених у роботі експериментальних досліджень, написанні програм для числових розрахунків та моделювання, обговоренні отриманих результатів та підготовці текстів статей і тез доповідей.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1*, 23*] – розробка аналітичної теорії ОХФ в анізотропних середовищах, виявлення та проведення експериментальних досліджень конверсії частоти та параметричного перетворення частоти; [2*, 6*, 8*, 9*, 13*-16*, 19*] – числове моделювання процесів кореляційного виділення сигналів з рівня шуму, експериментальне дослідження 3-х типів кореляційних приймачів на основі плівок ЗП, запропоновано декілька важливих технічних рішень, що дозволяють використовувати лише одну антену для вхідних та вихідних сигналів, а також використовувати корелятор в умовах, коли частота вхідного сигналу відрізняється від частоти накачування; [3*, 7*, 10*-12*, 17*, 18*] – експериментальне дослідження нерезонансного ОХФ, спектрального аналізу, мікрохвильової фільтрації та розділення сигналів, що одночасно діють на реєструючу систему; [4*, 20*, 21*] – експериментальні дослідження спектрів ПМСХ та ЗОМСХ з використанням нелінійної взаємодії зустрічних СХ у плівках ЗП; [5*, 22*] – розробка теорії, числове моделювання процесу збудження МСХ у плівках ЗП різної товщини; запропоновано вирази для смуги пропускання пасивної лінії затримки на основі плівок ЗП для ПМСХ та ЗОМСХ, експериментально досліджено смугу пропускання плівок ЗП для співставлення з даними для смуги шумового сигналу в кореляційних приймачах.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на 15 конференціях, симпозіумах та семінарах:

1. XVII Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2007).
2. International conference «Functional Materials» (Партенит, Украина, 2007).
3. 52-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (Tampa, Florida,

- USA, 2007).
4. VII Харківська конференція молодих вчених “Радіофізика і електроніка” (Харків, Україна, 2007).
 5. 4-я Международная молодежная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008” (Севастополь, Україна, 2008).
 6. International Magnetic Conference (Madrid, Spain, 2008).
 7. XVIII Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Україна, 2008).
 8. IX International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 2009).
 9. V International Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, 2009).
 10. IX Харківська конференція молодих вчених “Електромагнетизм, фотоніка та біофізика” (Харків, Україна, 2009).
 11. 6-я Международная молодежная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010” (Севастополь, Україна, 2010).
 12. X International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 2010).
 13. VI International Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, 2010).
 14. XII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 2012).
 15. VIII International Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, 2012).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 роботи у вітчизняних та закордонних виданнях: 8 статей [1*–8*], 15 матеріалів і тез міжнародних конференцій [9*–23*].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел, що містить 94 посилання. Робота ілюстрована 44 рисунками і має загальний обсяг 152 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано на зв’язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичну цінність роботи, відображено апробацію результатів роботи та вказано кількість публікацій за матеріалами дисертації.

У **першому розділі «Огляд літератури»** наведено огляд літературних джерел, проаналізовано стан розвитку проблем, розглянутих у дисертаційній роботі, визначено коло невирішених або недостатньо розвинутих питань і виділено задачі, що вимагають подальшого розв’язання.

У другому розділі «Опис експериментальної установки та методики досліджень» проведено детальний опис багатофункціональної експериментальної установки з дослідження параметричної взаємодії СХ у тонких плівках ЗІГ з параметричним накачуванням, описано характер модернізацій установки і мету їх застосування.

У розділі описуються основні експериментальні методики, що використовуються для дослідження нерезонансного ОХФ СХ і кореляційних процесів. Детально описано експериментальний макет і систему спряження експериментальної установки з персональним комп'ютером з використанням протоколу *Ethernet*. Використання описаних вище маніпуляцій дозволило керувати експериментальною установкою та отримувати експериментальні дані дистанційно.

Типовий вигляд основної функціональної частини експериментальної установки (вимірювальної секції) зображено на Рис. 1. Вимірювальна секція призначена для збудження і прийому коливань та хвиль намагніченості, що поширюються в магнітовпорядкованих середовищах, таких як плівки ЗІГ, а також для підведення й фокусування електромагнітної енергії накачування в області розташування феритового зразка. Експериментальні дослідження ОХФ ЗОМСХ та ПМСХ проводились з використанням лінії затримки на базі планарного хвилеводу МСХ у вигляді тонкої феритової плівки. Товщина плівок ЗІГ, що використовувались у роботі, варіювалась від 4 мкм до 30,3 мкм.

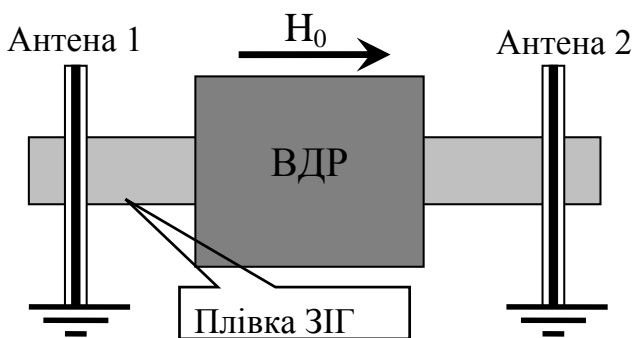


Рис. 1. Схема вимірювальної секції для дослідження взаємодії ЗОМСХ та ПМСХ з параметричним накачуванням у плівках ЗІГ.

Плівка монтувалась у відкритий діелектричний резонатор (ВДР) прямокутної форми з отвором. Виготовлявся ВДР з термостабільної НВЧ кераміки з діелектричною проникністю $\varepsilon = 80$ та малим тангенсом кута діелектричних втрат $tg \delta \sim 10^{-3}$. Величина навантаженої добротності ВДР була порядку 200. Сама плівка розміщувалась на двох, сформованих фотолітографічним методом, мікросмужкових антенах шириною 25 мкм, відстань між антенами складала 6 мм. Мікросмужкові антени

формувались на діелектричній підкладці з полікору (Al_2O_3), полікристалічний зразок цього матеріалу перед нанесенням мікросмужкових ліній спеціально шліфувався. Максимальне хвильове число СХ, які збуджуються антеною з шириною w , визначається з нерівності $k_0 \leq \pi/w$. Для плівки ЗІГ товщиною 5,1 мкм це максимальне хвильове число досягало 1256 см^{-1} . Вимірювальна секція розміщувалась між полюсами постійного магніту.

У третьому розділі «Нерезонансне обернення хвильового фронту» експериментально досліджено ряд операцій з обробки інформації, таких як: вузькосмугова фільтрація, селекція вхідних сигналів за частотою з наступним

розділенням їх у часі, спектральний аналіз. Реалізація вказаних операцій стала можливою за допомогою використання явища нерезонансного ОХФ. Основна ідея явища ОХФ полягає в наступному: сигнальна хвиля з частотою та хвильовим числом ω_s, k_s взаємодіє з хвилею накачування ω_p, k_p . В результаті взаємодії виникає холоста хвиля ω_i, k_i . При цьому виконуються закони збереження енергії та імпульсу відповідно. Якщо ж сигнальна хвиля взаємодіє з електромагнітними коливаннями накачування ($k_p \approx 0$), то холоста хвиля внаслідок законів збереження енергії та імпульсу виявляється оберненою хвилею. У резонансному випадку частота сигнальної хвилі дорівнює частоті оберненої хвилі.

Нерезонансне ОХФ реалізується, коли несуча частота сигналу ω_s , що розповсюджується в нелінійному середовищі, відрізняється від половини частоти накачування $\omega_p/2$ [1]. Завдяки ефективній частотній селективності ОХФ відбувається процес фільтрації вхідних сигналів з високим коефіцієнтом підсилення (декілька десятків децибел) і смугою, мінімальне значення якої визначається частотою релаксації Γ_k обернених хвиль [2]. Центральна частота такого ОХФ-фільтра для трихвильового параметричного процесу дорівнює половині частоти накачування $\omega_p/2$ й може керуватись вибором цієї частоти, а смуга фільтрації визначається тривалістю τ_p та потужністю P_p накачування.

Приклад спектрального аналізу вхідних сигнальних імпульсів за допомогою ОХФ наведено на Рис. 2. Єдина умова виконання такої операції: смуга ОХФ-фільтра повинна бути меншою за спектральну ширину імпульсу, що аналізується. Тут, як і в іншому випадку, видно гарне співпадіння теорії з експериментом.

Результати експериментального дослідження мікрохвильової фільтрації сигналів у шестисантиметровому діапазоні довжин хвиль з використанням нерезонансного ОХФ МСХ у плівках ЗІГ наведено на Рис. 3. Як бачимо, центральна частота, коефіцієнт підсилення і смуга пропускання фільтра визначаються параметрами накачування: центральна частота дорівнює половині частоти накачування, збільшення потужності накачування призводить до збільшення і коефіцієнта підсилення, і смуги пропускання; зі збільшенням тривалості імпульсу накачування коефіцієнт підсилення збільшується, а смуга пропускання – зменшується. Теорію нерезонансного ОХФ описано раніше у роботі [3].

У результаті експериментальних досліджень отримано мінімальну смугу пропускання порядку 2 МГц. З іншого боку досліджуваний фільтр можна розглядати, як кореляційний приймач зі стисненням імпульсу: вихідний імпульс фільтра, незалежно від форми вхідного сигналу, являє собою імпульс, тривалість якого визначається тривалістю імпульсу накачування.

Затримка вихідного сигналу визначається часом увімкнення накачування і може досягати ~ 1 мкс. У роботі показано можливість спектрального аналізу коротких (≤ 1 мкс) сигнальних імпульсів з роздільною здатністю ~ 1 МГц.

У системах прийому, обробки та передачі інформації може виникати ситуація, коли на детектор одночасно фіксує декілька інформаційних сигналів, простими методами фільтрації розділити їх неможливо, особливо коли їх несучі частоти співпадають. Для випадку сигналів різних частот можна скористатись

дисперсійними лініями затримки, хоча їх ефективність буде досить низькою. В даній частині дисертації було запропоновано і експериментально досліджено методику, яка базується на використанні ефекту нерезонансного ОХФ ЗОМСХ у тонких плівках ЗІГ.

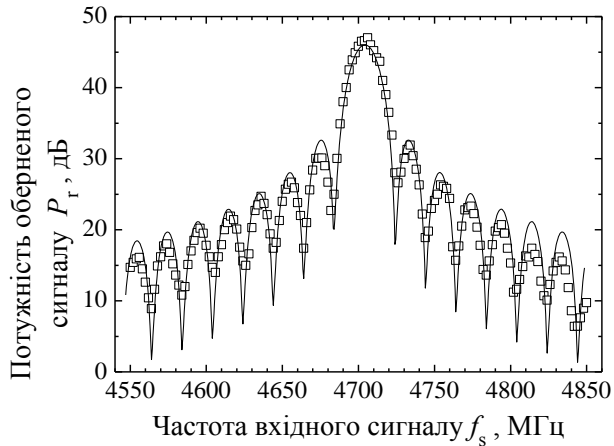


Рис. 2. Залежність відносної вихідної потужності ОХФ-фільтра P_r при зміні несучої частоти ω_s вхідного сигнального імпульсу тривалістю $\tau_s = 50$ нс. Плівка ЗІГ товщиною $d = 6,9$ мкм, $f_p = 9428$ МГц, $H_0 = 1022$ Е, $\tau_p = 50$ мкс, $V_k h_p = 5$ МГц.

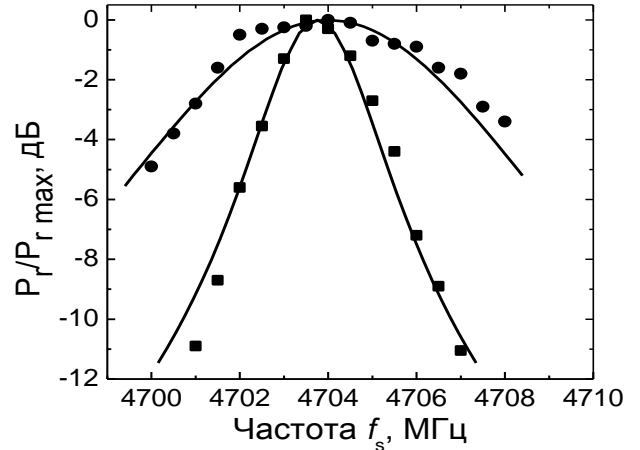


Рис. 3. Частотні характеристики ОХФ-фільтра на основі плівки ЗІГ товщиною 5 мкм для двох значень потужності і тривалості накачування: ■ - $V_k h_p = 1$ МГц, $\tau_p = 500$ нс; ● - $V_k h_p = 5$ МГц, $\tau_p = 100$ нс, суцільні лінії – розрахунок. Частота накачування $f_p = 9408$ МГц, $H_0 = 946$ Е, $\tau_s = 100$ мкс.

З огляду на те, що при ОХФ смуга підсилення залежить від потужності та тривалості накачування, зміна частоти буде призводити до селективного підсилення сигналів у феритовій плівці, що може трактуватись, як розділення сигналів. Окрім частотної модуляції, перебудова ОХФ-фільтра може здійснюватись дискретно, шляхом подачі на нього коротких імпульсів накачування різної частоти. Кількість каналів, які можна розрізнити, у смузі 200 МГц за тривалості імпульсу накачування $\tau_p \sim 10$ нс може перевищувати 100.

В експерименті використовувались сигнали від двох НВЧ генераторів Г4-81, ослаблення яких регулювалось прецизійними атенуаторами. НВЧ сигнали потрапляли на вхід суматора, вихід якого був навантажений на вхідну антену вимірювальної секції. Вхідна антена збуджувала в плівці ЗІГ складний сигнал ЗОМСХ, який складався з набору частот двох сигналів з несучими частотами f_{s1} та f_{s2} тривалістю τ_{s1} й τ_{s2} , відповідно. В момент проходження хвильового пакета вздовж плівки, на ВДР подавався імпульс накачування тривалістю τ_p , в результаті чого на вхідній і вихідній антенах виникав сигнал ОХФ та підсилений сигнал, відповідно. Після двох каскадів підсилення ці сигнали потрапляли на

напівпровідниковий детектор, а їх обвідна реєструвалась за допомогою цифрового осцилографа Tektronix TDS 3032B.

На Рис. 4 представлено експериментально отриману залежність потужності сигналу ОХФ P_{echo} від половинної частоти накачування у випадку монохроматичних сигналів ($\tau_s = \infty$). У результаті параметричного підсилення накачування частотних компонент складного вхідного сигналу отримано розділення сигналів з різницею в частоті 2 МГц.

У даному розділі дисертації також проводилось дослідження загального випадку ОХФ в анізотропному середовищі, при якому зворотна хвиля відрізняється від прямої не тільки розподілом намагніченості, а й законом дисперсії. Загалом хвиля, що притискається до металу, має більшу частоту, ніж хвиля з тим же хвильовим вектором, що поширюється в протилежному напрямку. Більш того, існує інтервал частот, в якому ПМСХ можуть поширюватись тільки в одному напрямку – вздовж металізованої поверхні.

Для однорідного накачування хвильові вектори сигнальної та оберненої хвиль дорівнюють один одному і направлені в протилежні боки. Це означає, що для анізотропного спектра завдяки нерівності дисперсійних законів ОХФ завжди, окрім неможливого в експерименті випадку при $k = 0$, відбувається зі зсувом частоти.

На Рис. 5 прямокутниками та трикутниками, відповідно, представлено експериментальні залежності частот сигнальної й оберненої хвиль, які беруть участь у процесі ОХФ, від постійного магнітного поля. Крім цього виявилось, що в даному випадку в межах точності експерименту (± 5 МГц) для взаємодіючих частот виконується резонансна умова $f_p = f_s + f_r$.

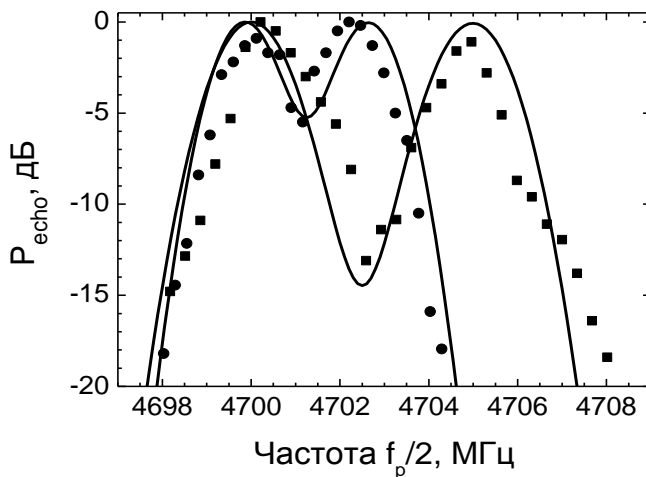


Рис. 4 Амплітудно-частотна характеристика для двох вхідних сигналів з $\Delta f_s = 2$ МГц (●) та 5 МГц (■). Теоретичні криві (суцільні лінії) розраховано при $V_k h_p = 22$ МГц.



Рис. 5. Залежності частот прямої f_s та оберненої f_r хвиль від зовнішнього магнітного поля; квадрати й трикутники – експериментальні точки, суцільні лінії – теорія.

Як і очікувалось, абсолютний зсув частоти $|\Delta f| = f_s - f_r$ збільшується зі зменшенням поля H_0 нижче критичного значення $H_c = 1042$ Е, де, згідно з теорією, він дорівнює 0. Цікаво відзначити, що в зображеному на Рис. 5 діапазоні магнітних полів експериментальні залежності $\Delta\omega = f(H_0)$ можуть бути з високим ступенем точності описані лінійною функцією $|\Delta f_s| = a(H_c - H_0)$ з коефіцієнтом пропорційності $a = 3,8$ МГц/Е. Максимальний зареєстрований зсув частоти складає ~ 800 МГц при $H_c - H_0 = 200$ Е. Дану властивість однобічно металізованих плівок ЗП можна використати для параметричного перетворення частоти сигналів ПМСХ на керовану магнітним полем проміжну частоту.

Специфіка ОХФ в анізотропному середовищі полягає в тому, що час затримки оберненого сигналу $t_{rev} \neq 2T_p$ (T_p – час затримки імпульсу накачування відносно сигналу), як це має місце у взаємних ОХФ і в усіх відомих процесах магнітостатичної луни. Цей ефект виникає завдяки різниці в групових швидкостях сигнальної v_s і оберненої v_r хвиль: групова швидкість оберненої хвилі менша, і час затримки t_{rev} більший ніж $2T_p$. Максимальний час затримки, отриманий в експериментах, складав 170 нс при $T_p = 70$ нс.

У четвертому розділі «Кореляційне виділення сигналів з рівня шуму за допомогою обернення хвильового фронту спінових хвиль» було експериментально досліджено 3 типи кореляційних приймачів на основі плівок ЗП. Задача сформульовано наступним чином: у систему потрапляє сигнал, співвідношення сигнал/шум (ССШ) для якого значно менше за 1. Цей сигнал є сумою корисного сигналу прямокутного профілю й адитивного гаусового шуму. Необхідно забезпечити обробку цього сигналу, щоб підвищити ССШ у вихідному сигналі до рівня, значно більшого за 1. Теоретично такі прилади досліджували на прикладі ніобату літію [4] та фериту [5].

Основною метою даного експерименту була демонстрація того, що запропонований кореляційний приймач можна використовувати для прийому корисного сигналу, амплітуда якого значно нижча за рівень шуму. Для демонстрації цього проведено експеримент, в якому на вхідну антену, крім корисного сигналу потужністю $P_s = 1,4$ мВт, модульованого 3-х символним кодом Баркера (див. Рис. 6 (а)), подавався також неперервний сигнал шуму потужністю $P_N = 14$ мВт, так що результуюче значення ССШ дорівнювало 0,1. Для створення обернених у часі імпульсів використовувався 3-х та 5-ти символний код Баркера. Для цього проводилась маніпуляція фази (від 0 до π) синусоїдальних коливань несучої частоти відповідно 3 та 5 разів протягом тривалості імпульсу.

У всіх експериментах з кореляційного виділення сигналів шум мав гаусів профіль з центральною частотою ~ 4700 МГц та спектральною шириною біля 200 МГц. Обвідну сумарного вхідного сигналу показано на Рис. 6 (б). Як можна бачити з малюнка, у зв'язку з низьким значенням ССШ корисний імпульсний сигнал не помітний на фоні шуму.

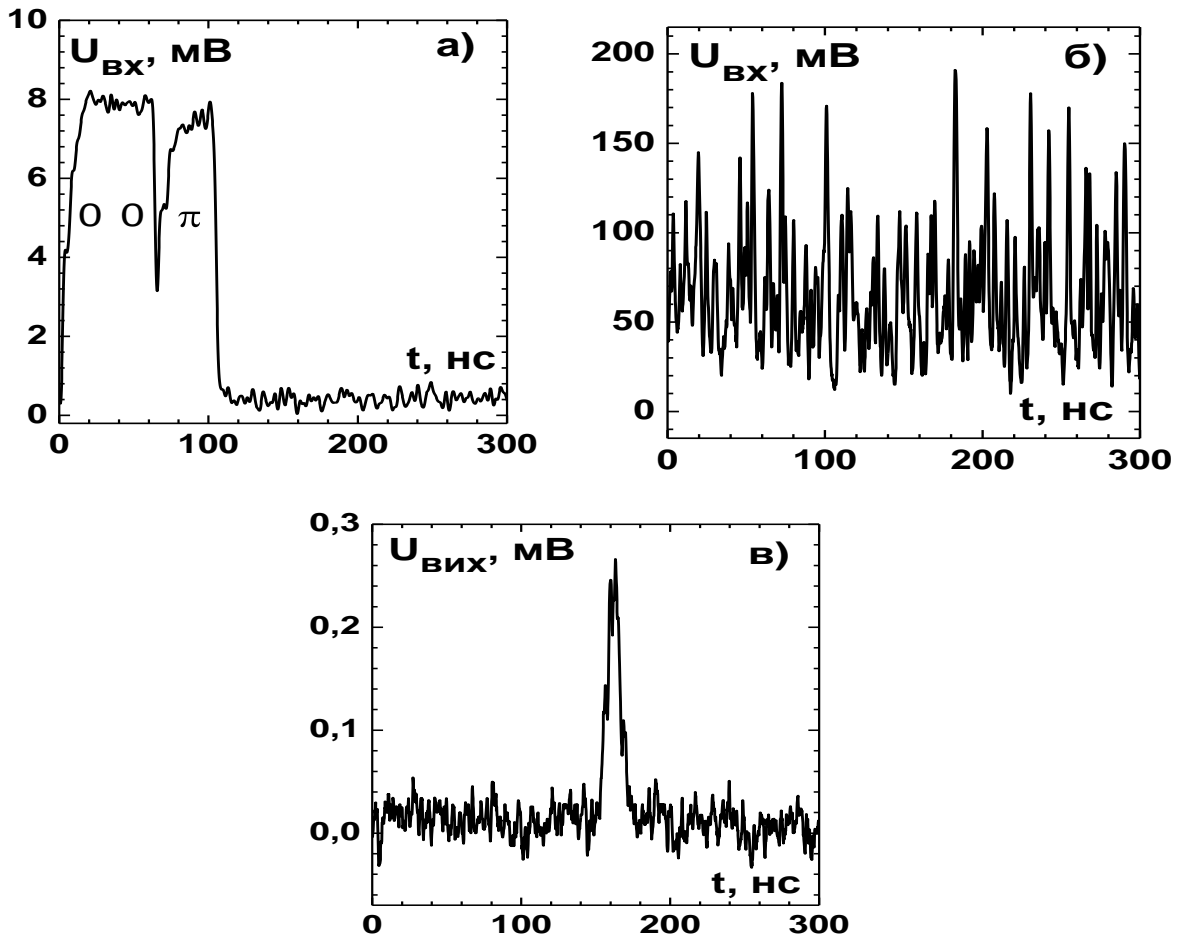


Рис. 6. Обвідні вхідного імпульсу, модульованого кодом Баркера (а), сумарного (модульований імпульс + шум) вхідного сигналу (б) та вихідного сигналу кореляції (в) для ССШ=0,1.

Опорний сигнал потужністю $P_{ref} = 7$ мВт подавався на другу вхідну антену. В результаті взаємодії досліджено обвідну вихідного сигналу кореляції (Рис. 6 (в)). Головний максимум кореляційного сигналу з піковою потужністю $P_{out} = 3$ мкВт добре помітний на фоні шуму, в той час, як додаткові максимуми, наявні в кореляційному сигналі без шуму, виявились прихованими в шумовому фоні. Головним результатом дослідження було підвищення ССШ у вихідному сигналі більш ніж на 20 дБ.

Уперше запропоновано та експериментально досліджено модель кореляційного приймача, в якому для створення обернених у часі імпульсів використовувався імпульс накачування, що створював сигнал ОХФ. Дана модель корелятора максимально наближена до автокорелятора. Перевагою даної моделі, беззаперечно, є використання всього однієї антени для подачі та зняття сигналів з корелятора. Було також досліджено кореляційний приймач, опорним сигналом в якому був імпульс накачування, а сигнал ОХФ виступав як сигнал кореляції. В даному випадку використовувалась одна антена для прийому й подачі імпульсів до корелятора. Недоліком такого приладу є необхідність використання генератора з частотою в 2 рази більшою за частоту вхідного сигналу.

Для того, щоб перевірити наскільки стабільно працюватиме запропонований кореляційний приймач, проведено наступні експериментальні дослідження. На першу вхідну антену корелятора подавався сигнал прямокутного профілю на частоті $f_{s1} = 4655$ МГц потужністю $P_{s1} = 10$ мВт, а на другу вхідну антену корелятора подавався такий самий сигнал, тільки частота f_{s2} його змінювалась відносно першого. На ВДР реєструвався сигнал результату їх взаємодії. Таким чином реалізувався нерезонансний кореляційний прийом сигналів. Результати числового моделювання та експериментальних досліджень, опрацьованих за вищеописаною схемою, наведено на Рис. 7. Так, для сигналів тривалістю $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 100$ нс зменшення відгуку корелятора на -3 дБ відбувається при розстроюванні вже на 5 МГц, а для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 50$ нс – більш ніж на 10 МГц. Варто також відзначити, що частотна смуга такої взаємодії визначається шириною смуги сигналу, тривалість якого менша, що важливо у випадку, коли в систему потрапляють сигнали різної тривалості.

Ще одним цікавим застосуванням кореляційної взаємодії зустрічних сигналів однакової частоти є можливість дослідження спектрів МСХ у тонких плівках ЗІГ. Це можливо в силу виконання закону збереження енергії, коли два магнони однакової частоти з протилежними хвильовими векторами анігілюють з утворенням фотона (електромагнітного випромінювання) накачування на сумарній частоті цих магنونів. Змінюючи при цьому зовнішнє магнітне поле, можна змінювати спектр, і таким чином у результаті кореляційної взаємодії відбувається сканування і аналіз спектра (дисперсійної залежності) за сталих частотах вхідних сигналів. Результати експерименту та числового моделювання представлено на Рис. 8.

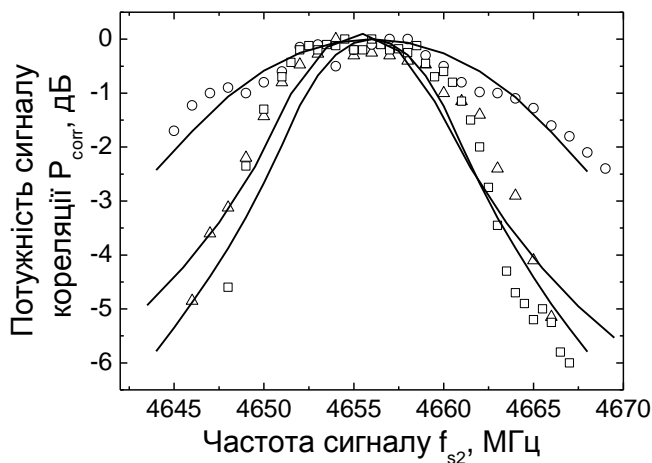


Рис. 7. Теоретичні та експериментальні залежності для нерезонансного кореляційного прийому сигналів. Суцільними лініями позначено результати числового моделювання. Експериментальні результати для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 50$ нс (\circ), для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 100$ нс (Δ), для $\tau_{s1} = 100$ нс й $\tau_{s2} = 1$ мкс (\square).

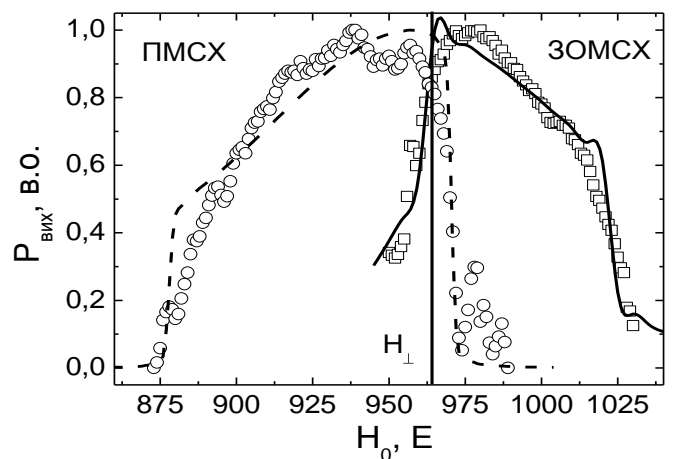


Рис. 8. Теоретичні та експериментальні залежності сигналу конволюції двох прямокутних імпульсів від зовнішнього магнітного поля для геометрій ЗОМСХ та ПМСХ.

З наведених кривих для тангенціально намагніченої плівки ЗІГ можна побачити, що дана методика дозволяє з похибкою в $2 E$ визначати магнітне поле, що відповідає граничній частоті спектра СХ за заданої геометрії поля. Для даної плівки воно складало $963 E$. Схожі дослідження з пошуку межі спектра проводились у роботі [6]. Проте в цій роботі межа спектра визначалась за зміною форми часового профілю сигналу МСХ, що пройшов крізь лінію затримки на основі плівки ЗІГ. А саме – для сигналів прямокутного профілю реалізувалась умова проходження тільки половини спектра сигналу $f_s = f_{\perp}$, відповідно, і половини енергії, що призводило до реєстрації на екрані осцилографа тільки половини прямокутного сигналу. Інша половина відсікалась межею існування спектра МСХ.

З Рис. 8 також видно, що на залежностях вихідного сигналу конволюції від зовнішнього магнітного поля присутня тонка структура в області поля H_{\perp} . Це можна пояснити тим, що теоретичний розрахунок спектрів МСХ проводився для феритового зразка, обмеженого тільки по осі z , а в експерименті використовувались зразки зі строго обмеженими розмірами у всіх трьох площинах. Дане наближення може призвести до того, що на межі спектрів різних типів хвиль може відбуватись взаємне проникнення хвиль в області спектра, де вони ніби не повинні існувати, проте можливе збудження вищих мод намагніченості зі значно меншим порогом. У зміні структури спектра може брати участь й кристалографічна анізотропія зразка.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально досліджено явище нерезонансного ОХФ СХ паралельним параметричним накачуванням, коли частота сигналу не співпадає з половинною частотою накачування. Показано можливість його використання для задач спектрального аналізу, мікрохвильової фільтрації та розділення мікрохвильових сигналів у плівках ЗІГ. Встановлено, що максимальне підсилення сигналів відбувається на половині частоти накачування, а смуга підсилення залежить від його потужності та тривалості. Отримано мінімальну смугу пропускання порядку 2 МГц ; вдалося реалізувати розділення імпульсних сигналів близьких частот з різницею за несучою частотою більше 20 МГц і монохроматичних – 2 МГц , що добре узгоджується з результатами числового моделювання.
2. Експериментально і теоретично досліджено ОХФ параметричним накачуванням за умов анізотропної дисперсії для випадку невзаємних ПМСХ. Виявлено, що ОХФ можливе лише з перетворенням частоти вниз, якщо пряма хвиля поширюється поблизу металізованої поверхні плівки. Максимальний зареєстрований зсув частоти досягав 800 МГц . Встановлено, що при заданому зовнішньому магнітному полі можлива стабілізація частоти оберненого сигналу при зміні частоти вхідного сигналу до 100 МГц .
3. Експериментально досліджено три різновиди кореляційних приймачів НВЧ сигналів на базі параметричної взаємодії СХ і запропоновано методику, що дозволяє використовувати лише одну антену корелятора як для вхідного, так і для вихідного сигналів. Показано, що в такій системі можна підвищити співвідношення сигнал/шум на 20 дБ . Запропоновано методику використання ОХФ СХ для створення обернених у часі сигнальних імпульсів.

4. Запропоновано та експериментально апробовано методику дослідження спектрів СХ у тонких плівках ЗІГ за допомогою нелінійної взаємодії СХ. Встановлено, що дана методика дозволяє з похибкою в 2 Е визначати магнітне поле, що відповідає граничній частоті спектра СХ для заданої геометрії поля.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуревич А. Г. Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – М.: Физматлит., 1994. - 464 с.
2. Данилов В.В. Спін-хвильова електродинаміка: підручник / Данилов В.В., Зависляк І.В., Нечипорук О.Ю. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2008 - 351 с.
3. Чумак А.В. Параметричне відновлення сигналу пружно розсіяних спінових хвиль та коливань: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / Чумак Андрій Васильович; КНУ імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет. –К. – 2008. –136 с.
4. Luukkala M. Acoustic Convolution and Correlation and the Associated Nonlinearity Parameters in LiNbO₃ / M. Luukkala, J. Surakka. // Journal of Applied Physics – 1972. – Vol. 43, No. 6. P. 2510-2518.
5. Кудінов Є.В. Конвольвер на магнітостатичних хвилях в епітаксильній феритовій плівці / Кудінов Є.В., Юрчак Н. С. // Наукові вісті НТУУ “КПІ” – 2005. –№ 1. С. 21-26.
6. Чумак А.В. Дослідження профілів вихідних імпульсів пасивної і активної ліній затримки сигналів на зворотніоб’ємних магнітостатичних хвилях / Чумак А.В., Васючка В.І., Коблянський Ю.В. // Вісник Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки – 2004, – вип 1, С. 353 - 360.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1*. Г. А. Мелков Обернення хвильового фронту з конверсією частоти в анізотропних середовищах / Г. А. Мелков, А. В. Чумак, В.І. Васючка, В.А. Мойсеєнко // Вісник Київського Університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2007. – № 1. – С. 275 – 279.
- 2*. V. Yu. Kobeliatskyi Correlation receiver with wave front reversal of magnetostatic waves / V. Yu. Kobeliatskyi, G. A. Melkov, V. A. Moiseienko, O. V. Prokopenko // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка – 2010. – № 13. – Р. 49-51.
- 3*. D. A. Bozhko Backward volume magnetostatic waves signals separation by electromagnetic pumping / D. A. Bozhko, G. A. Melkov, V. A. Moiseienko // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка – 2011. – № 16. – Р. 9-11.
- 4*. В. А. Мойсеєнко Дослідження спектрів МСХ в тонких плівках ЗІГ за допомогою нелінійної взаємодії спінових хвиль / В.А. Мойсеєнко, Г.А. Мелков // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія:

фізико-математичні науки – 2012. – № 1. – С. 279-284.

- 5*. В. А. Мойсеєнко Про збудження магнітостатичних хвиль мікросмужковими антенами / В.А. Мойсеєнко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки – 2012. – № 2. – С. 279-282.
- 6*. V. I. Vasyuchka Correlation receiver of below-noise pulsed signals based on parametric interactions of spin waves in magnetic films / V. I. Vasyuchka, G. A. Melkov, V. A. Moiseienko, A. V. Prokopenko, A. N. Slavin // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2009. – Vol. 321. – P. 3498 – 3501.
- 7*. V. I. Vasyuchka Non-resonant wave front reversal of spin waves used for microwave signal processing / V. I. Vasyuchka, G. A. Melkov, A. N. Slavin, A. V. Chumak, V. A. Moiseienko, B. Hillebrands // Journal of Physics D: Applied Physics – 2010. – Vol. 43. – P.325001 (4pp).
- 8*. V. A. Moiseienko Magnetostatic Correlator of Microwave Signals with the Internal Wave Front Reversal / V. A. Moiseienko, G. A. Melkov // Radioelectronics and Communications Systems – 2011, – Vol. 54, Issue 4, P. 204-207.
- 9*. Г. А. Мелков, В. И. Васючка, А. В. Чумак, В. А. Мойсеєнко. Использование активной линии задержки для корреляции импульсов магнитостатических волн. Материалы XVII международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (КрыМиКо'2007), 10-14 сентября, 2007. – Севастополь, Крым (Украина), 2007. – С. 450 - 451.
- 10*. G. A. Melkov, V. A. Moiseenko, V. I. Vasyuchka, A. V. Chumak, A. N. Slavin. Nonresonant wave front reversal. Proceedings of the International conference “Functional Materials”, (ICFM'2007), October 1-6, 2007. – Partenit, Crimea (Ukraine), 2007. – P. 313.
- 11*. G. A. Melkov, V. A. Moiseenko, V. I. Vasyuchka, A. V. Chumak, A. N. Slavin. Nonresonant wave front reversal of microwave spin waves. Proceedings of the 52-nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (MMM'2007), November 5-9, 2007. – Tampa, Florida (USA), 2007. – P. 88
- 12*. В. А. Мойсеєнко, В. І. Васючка, А. В. Чумак, Г. А. Мелков. Вузкосмуговий фільтр на магнітостатичних хвилях. Збірник праць VII Харківської конференції молодих вчених "Радіофізика і електроніка", 12-14 грудня, 2007. – Харків (Україна), 2007. – С. 65
- 13*. В. А. Мойсеєнко, В. И. Васючка, Д. В. Слободянюк, Г. А. Мелков. Корреляционная обработка информации в пленках железо-иттриевого граната. Сборник трудов 4-й международной молодежной научно-технической конференции “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2008), 21-25 апреля, 2008. – Севастополь (Украина), 2008. – С. 120.
- 14*. G.A. Melkov, V.I. Vasyuchka, V.A. Moiseienko, A.N. Slavin. Correlation receiver of below-noise pulsed signals based on the parametric interactions of spin waves in magnetic films. Proceedings of the International Magnetic Conference (Intermag 2008), May, 4-8, 2008. – Madrid (Spain), 2008. – P. 297.
- 15*. Г. А. Мелков, В. А. Мойсеєнко, А. В. Прокопенко, Д. В. Слободянюк. Использование корреляционной обработки информации в ферромагнитных пленках для выделения сигналов из уровня шума. Сборник трудов XVIII-й

- международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008), 8-12 сентября, 2008. Севастополь, Крым (Украина), 2008. – С. 501-502.
- 16*. V. A. Moiseienko, O. V. Prokopenko, Iu. V. Kobeliats'kyi, G. A. Melkov. Microwave correlator with wave front reversal of backward volume magnetostatic waves. Proceedings of the Ninth International Young Scientists' Conference on Applied Physics, June, 17-20, 2009, – Kyiv (Ukraine), 2009. – P. 32.
- 17*. G. A. Melkov, V. A. Moiseienko, D.A. Bozhko. Microwave division of backward volume magnetostatic waves in yttrium-iron garnet films. Proceedings of the V International Conference “Electronics and applied physics”, October, 21-24, 2009, – Kyiv (Ukraine), 2009. – P. 49
- 18*. В. А. Мойсеенко, Д. А. Божко, О. В. Прокопенко, Г. А. Мелков. Розділення сигналів зворотних об'ємних магнітостатичних хвиль за допомогою електромагнітної накачки. Збірник праць ІХ-ї Харківської конференції молодих вчених "Електромагнетизм, фотоніка та біофізика", 1-3 грудня, 2009, – Харків (Україна), 2009. – С. 56
- 19*. В. А. Мойсеенко, В. Ю. Кобеляцкий. Корреляционный приёмник на магнитостатических волнах с внутренним обращением сигнала. Сборник трудов 6-й Международной молодежной научно-технической конференции “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2010), 19-24 апреля, 2010, – Севастополь, Крым (Украина), 2010. – С. 204.
- 20*. O.V. Borysenko, V.Iu. Kobeliatskyi, V.A. Moiseienko, G.A. Melkov. Investigation of magnon spectrum in yttrium-iron garnet films using nonlinear interaction of backward volume magnetostatic wave signals. Proceedings of the X-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics, June, 16-19, 2010, – Kyiv (Ukraine), 2010. – P. 42-43.
- 21*. V. Iu. Kobeliatskyi, V. A. Moiseienko. Investigation of magnon spectrum in yttrium-iron garnet films using nonlinear interaction of surface magnetostatic wave signals. Proceedings of the VI International Conference “Electronics and applied physics”, October, 20-23, 2010, – Kyiv (Ukraine), 2010. – P. 60-61
- 22*. V. A. Moiseienko. About excitation of magnetostatic waves by microstrip antennas. Proceedings of the XII'th International Young Scientists' Conference on Applied Physics, May, 23-26, 2012, – Kyiv (Ukraine), 2012. – P. 67-68.
- 23*. V. A. Moiseienko, G. A. Melkov. Parametric frequency conversion of signal in a magnetic field regulated intermediate frequency. Proceedings of the VIII International Conference “Electronics and applied physics”, October, 24-27, 2012, – Kyiv (Ukraine), 2012. – P. 60.

АНОТАЦІЯ

Мойсеенко В.А. Нерезонансне обернення хвильового фронту спінових хвиль та кореляційна обробка інформації в плівках залізо-ітрієвого гранату. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 — радіофізика. — Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вивченню лінійних і нелінійних процесів взаємодії спінових хвиль (СХ) у плівках залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ). В дисертації вперше експериментально досліджено явище нерезонансного обернення хвильового фронту (ОХФ) СХ, коли частота сигналу не співпадає з половинною частотою накачування, і проаналізовано можливість використання цього явища для кореляційної обробки інформації в плівках ЗІГ.

Показано можливість спектрального аналізу вхідних сигналів і мікрохвильової фільтрації з використанням нерезонансного ОХФ зворотних об'ємних магнітостатичних хвиль (ЗОМСХ). Експериментально доведено можливість розділення двох мікрохвильових сигналів, що одночасно діють на детектор, з використанням нерезонансного ОХФ ЗОМСХ.

Запропоновано декілька конструкцій кореляторів НВЧ сигналів на основі цього явища та досліджено їх мікрохвильові властивості. Запропоновано використання ОХФ СХ для створення обернених у часі сигнальних імпульсів. За допомогою нерезонансного ОХФ вивчено вплив шумових сигналів на роботу корелятора. Вперше запропоновано методику дослідження спектрів МСХ на основі створеного корелятора.

Ключові слова: спінові хвилі, обернення хвильового фронту, параметричне накачування, залізо-ітрієвий гранат, кореляційна обробка інформації.

АННОТАЦИЯ

Мойсеенко В.А. Нерезонансное обращение волнового фронта спиновых волн и корреляционная обработка информации в плёнках железо-иттриевого граната. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика. — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко МОН Украины. Киев, 2016.

Диссертация посвящена изучению линейных и нелинейных процессов взаимодействия СВ в пленках ЖИГ. В диссертации впервые экспериментально исследовано явление нерезонансного ОВФ СВ, когда частота сигнала не совпадает с половинной частотой накачки, и проанализированы возможности использования этого явления для корреляционной обработки информации в пленках ЖИГ; рассмотрены особенности создания и практического использования новейших корреляционных устройств СВЧ.

Показана возможность спектрального анализа входных сигналов и микроволновой фильтрации с использованием нерезонансного ОВФ ООМСВ в пленках ЖИГ. Экспериментально доказана возможность разделения двух микроволновых сигналов, которые одновременно действуют на детектор, с использованием нерезонансного ОВФ ООМСВ.

Предложено несколько конструкций корелятора СВЧ сигналов на основе этого явления и исследованы их микроволновые свойства. Экспериментально исследован корреляционный приемник СВЧ сигналов на базе параметрического взаимодействия СВ с параллельной параметрической накачкой. Предложено использовать ОВФ СВ для создания обратных во времени сигнальных импульсов. С помощью нерезонансного ОВФ изучено влияние шумовых сигналов на работу

коррелятора. Впервые предложена методика для исследования спектров МСВ на основе изученного коррелятора.

Ключевые слова: спиновые волны, обращение волнового фронта, параметрическая накачка, железо-иттриевый гранат, корреляционная обработка информации.

ABSTRACT

Moiseienko V.A. Non-resonant wave front reversal of spin waves and correlation data processing in yttrium-iron garnet films. — Manuscript.

Thesis for Candidate of Science degree in Physics and Mathematics with the 01.04.03 specialization — RadioPhysics. — Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the study of linear and nonlinear processes of spin waves (SW) interactions in yttrium-iron garnet (YIG) films. A phenomenon of the non-resonant wave front reversal (WFR) of SW is studied experimentally for the first time and the possibility of its application for the correlation data processing in YIG films is analyzed. The features of the development and practical application of advanced correlation microwave devices involving the non-resonant WFR of SW in YIG films are considered.

A non-resonant WFR of SW (signal frequency differs from the half of pumping frequency) in YIG films induced by a parallel parametric pumping is proposed and experimentally studied. A possibility of spectral analysis of input signals and its microwave filtering using non-resonant WFR of backward volume magnetostatic waves (BVMSW) in YIG films is shown. A possibility of separation of two microwave signals simultaneously acting on the detector using non-resonant WFR of BVMSW is proven experimentally.

A parametric frequency conversion of surface magnetostatic waves (SMSW) signal frequency to an intermediate signal frequency controlled by a magnetic field as a result of the WFR in a non-reciprocal media is discovered.

Several designs of microwave correlators based on the WFR phenomenon are proposed and their microwave properties are investigated. Microwave correlation receiver based on the parametric interaction of SW with a parallel parametric pumping is experimentally investigated. An application of the WFR of SW for the creation of time-reversal signal pulses is proposed. Microwave properties of the correlator in the presence of noise are studied using the non-resonant WFR of SW.

A possibility of the creation of correlator having only one antenna for both input and output signals is considered. Also the correlation processing of input signals having variable frequency is analyzed. A method of MSW spectra study based on the application of the correlator is proposed.

An effective numerical model for calculating time profiles of correlation signal is developed. The obtained results can be used for the development of microwave analog data processing devices based on magnetic films.

Key words: spin wave, wave front reversal, parametric pumping, yttrium-iron garnet, correlation data processing.