

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Реферат

« Нерезонансне обернення хвильового фронту спінових хвиль »

для участі у конкурсі на здобуття щорічної премії Президента України для
молодих вчених

Мойсеєнко Владислав Анатолійович
кандидат фізико-математичних наук,
провідний інженер НДЛ «Оптичної і
мікрохвильової обробки інформації та
теорії середовищ»
Факультету радіофізики, електроніки та
комп'ютерних систем
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

КИЇВ 2021

Зміст

1. Вступ
2. Нерезонансне обернення хвильового фронту
3. Кореляційне виділення сигналів з рівня шуму за допомогою нерезонансного обернення хвильового фронту спінових хвиль
4. Перелік цитованої літератури

Вступ

У даній роботі проведено експериментальне дослідження абсолютно нового фізичного явища нерезонансного обернення хвильового фронту спінових хвиль та проаналізовано прикладні аспекти застосування цього явища для побудови сучасних систем обробки, прийому та передачі інформації. Було отримано ряд науково-технічних результатів: експериментально досліджено явище нерезонансного обернення хвильового фронту (ОХФ) спінових хвиль (СХ) паралельною параметричною накачкою, коли частота сигналу не співпадає з половинною частотою накачки, і 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 накачки, а смуга підсилення залежить від потужності та тривалості накачки. 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; експериментально і теоретично досліджено ОХФ параметричною накачкою в умовах анізотропної дисперсії для випадку невзаємних поверхневих магнітостатичних хвиль (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; експериментально досліджено три різновиди кореляційних приймачів НВЧ сигналів на базі параметричної взаємодії СХ і запропоновано методику, що дозволяє використовувати всього 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 в часі сигнальних імпульсів; запропоновано та експериментально апробовано методику дослідження спектрів СХ у тонких плівках залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) за допомогою нелінійної взаємодії СХ. Встановлено, що дана методика дозволяє з похибкою в 2 Е визначати магнітне поле, що відповідає граничній частоті спектру СХ для заданої геометрії поля.

Розглянуті прикладні аспекти явища нерезонансного ОХФ СХ детально описані теоретично та експериментально й обґрунтована їх значимість для

потреб народного господарства, сучасних систем обробки інформації, радіолокаційних систем, систем супутникового зв'язку та наднового покоління магнітної енергонезалежної пам'яті. Висунуті ідеї легко знайдуть застосування та будуть впроваджені на вітчизняних підприємствах з розробки феритових пристроїв та систем, підприємствах ВПК України, а значний економічний ефект від впровадження понесе за собою не тільки ріст рейтингу держави на світовій арені, а й створення нових робочих місць та притягнення в країну закордонних інвестицій.

Результати досліджень проведені на високому науковому рівні й складають конкуренцію результатам отриманим в наукових школах США, Китаю та Європи. Дана ситуація може бути використана для розвитку стратегічного партнерства не тільки з провідними науковими центрами світу, а й науковими центрами держав, що розвиваються.

За результатами роботи поданої на конкурс було опубліковано 16 статей (8 в журналах з ненульовим імпаکت-фактором) та 31 тези конференцій, зокрема у англійських журналах з імпаکت-фактором – 9, загальна кількість посилань на публікації автора – 17 та h-індекс – 2 (згідно бази даних Scopus).

Нерезонансне обернення хвильового фронту

Було експериментально досліджено ряд операцій з обробки інформації, таких як: вузькосмугова фільтрація, селекція входних сигналів по частоті з послідовним розділенням їх в 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, \vec{k}_s взаємодіє з хвилею накачки ω_p, \vec{k}_p в результаті взаємодії виникає холоста хвиля ω_i, \vec{k}_i . При цьому виконуються закон збереження енергії та імпульсу відповідно. Якщо ж сигнальна хвиля взаємодіє з електромагнітними коливаннями накачки ($\vec{k}_p \approx 0$), 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 накачки $\omega_p/2$ [1]. Через високу частотну селективність ОХФ відбувається процес фільтрації входних 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 трьоххвильового параметричного процесу дорівнює половині частоти накачки $\omega_p/2$ й може керуватись вибором цієї частоти, а смуга фільтрації визначається тривалістю τ_p та потужністю P_p накачки.

Приклад спектрального аналізу входних сигнальних імпульсів за допомогою ОХФ наведено на Рис. 1. Єдина умова виконання такої операції:

смуга ОХФ-фільтра повинна бути меншою за спектральну ширину імпульса, що аналізується. Тут, як і в іншому випадку, видно хороше співпадіння теорії з експериментом.

Результати експериментального дослідження мікрохвильової фільтрації сигналів в сантиметровому діапазоні довжин хвиль з використанням нерезонансного ОХФ магнітостатичних хвиль (МСХ) в плівках ЗІГ приведено на Рис. 2. Як бачимо центральна частота, коефіцієнт підсилення і смуга пропускання фільтра визначаються параметрами накачки: центральна частота дорівнює половині частоти накачки, збільшення потужності накачки призводить до збільшення і коефіцієнта підсилення, і смуги пропускання, з ростом тривалості імпульсу накачки коефіцієнт підсилення збільшується, а смуга пропускання зменшується. Теорія нерезонансного ОХФ була описана раніше в роботі [3].

В результаті експериментальних досліджень було отримано мінімальну смугу пропускання порядку 2 МГц. З іншого боку досліджуваний фільтр можна розглядати, як кореляційний приймальний пристрій зі стисненням імпульсу: вихідний імпульс фільтра незалежно від форми вхідного сигналу являє собою імпульс, тривалість котрого визначається тривалістю імпульсу накачки.

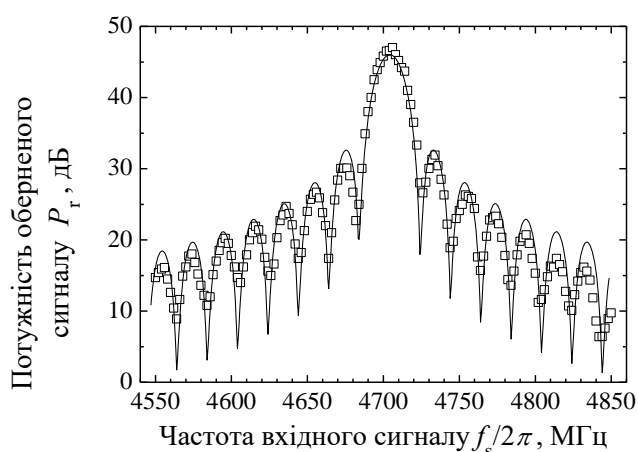


Рис. 1. Залежність відносної вихідної потужності ОХФ-фільтра P_r при зміні несучої частоти ω_s вхідного сигнального імпульсу тривалістю $\tau_s = 50$ нс. Плівка ЗІГ товщиною $d = 6,9$ мкм, $f_p = 9428$ МГц, $H_0 = 1022$ Е, $\tau_p = 50$ мкс, $V_k h_p = 5$ МГц.

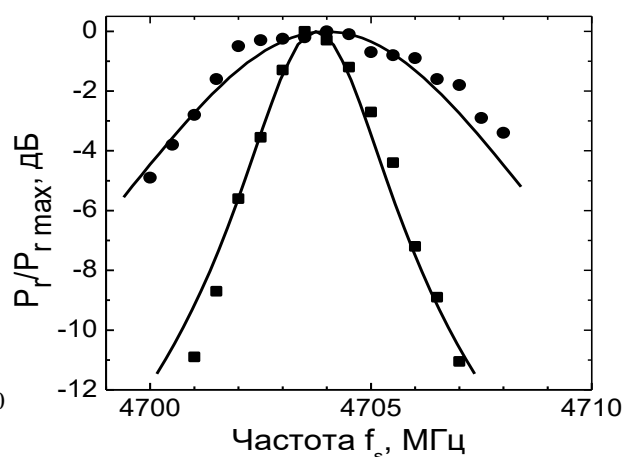


Рис. 2. Частотні характеристики ОХФ-фільтра на основі плівки ЗІГ товщиною 5 мкм для двох значень потужності і тривалості накачки: ■ - $V_k h_p = 1$ МГц, $\tau_p = 500$ нс; ● - $V_k h_p = 5$ МГц, $\tau_p = 100$ нс, суцільні лінії – розрахунок. Частота накачки $f_p = 9408$ МГц, $H_0 = 946$ Е, $\tau_s = 100$ мкс.

Затримка вхідного сигналу визначається часом ввімкнення накачки і може досягати ~ 1 мкс. У роботі було 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 приходять декілька інформаційних сигналів й 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 роботи було запропоновано і експериментально досліджено методику, яка базується на використанні ефекту нерезонансного ОХФ ЗОМСХ у тонких плівках ЗІГ.

З огляду на те, що при ОХФ смуга підсилення залежить від потужності та тривалості накачки, 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 накачки різної частоти. Число каналів, які можна розрізнити, у смузі 200 МГц при тривалості імпульсу накачки $\tau_p \sim 10$ нс може перевищувати 100.

В експерименті використовувались сигнали від двох НВЧ генераторів Г4-81, ослаблення котрих регулювалось прецезійними 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 ω_{s1} та ω_{s2} тривалістю τ_{s1} й τ_{s2} відповідно. В момент проходження хвильового пакету вздовж плівки, на ВДР подавався імпульс накачки 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. 3 представлено експериментально отриману залежність потужності сигналу ОХФ P_{echo} від половинної частоти накачки у випадку монохроматичних сигналів ($\tau_s = \infty$). В результаті параметричного підсилення накачкою частотних компонент складного вхідного сигналу, було отримано розділення сигналів з різницею в частоті 2 МГц.

У даній частині роботи також проводилось дослідження загального випадку ОХФ в анізотропному середовищі, при якому зворотна хвиля відрізняється від прямої не тільки розподілом намагніченості, а й законом дисперсії. В частковому випадку 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 однорідної накачки хвильові вектори сигнальної та оберненої хвиль рівні і направлені в протилежні боки. Це означає, що для анізотропного спектру, через нерівність дисперсійних законів, ОХФ завжди,

окрім неможливого в експерименті випадку при $k = 0$, відбувається зі зсувом частоти.

На Рис. 4 прямокутниками та трикутниками відповідно представлені 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 $\omega_p = \omega_s + \omega_r$.

Як і очікувалось, абсолютний зсув частоти $|\Delta\omega| = \omega_s - \omega_r$ збільшується зі зменшенням поля H_0 нижче критичного значення $H_c = 1042$ Е, де згідно з теорією він дорівнює 0. Цікаво відмітити, що в зображеному на Рис. 4 діапазоні магнітних полів експериментальні залежності $\Delta\omega = f(H_0)$ можуть бути з високим ступенем точності описані лінійною функцією $|\Delta\omega| = a(H_c - H_0)$ з коефіцієнтом пропорційності $a = 3,8$ МГц/Е. Максимальний зареєстрований зсув частоти складає ~ 800 МГц при $H_c - H_0 = 200$ Е. Дану властивість односторонньо металізованих плівок ЗІГ можна використати для параметричного перетворення частоти сигналів ПМСХ у керовану магнітним полем проміжну частоту.

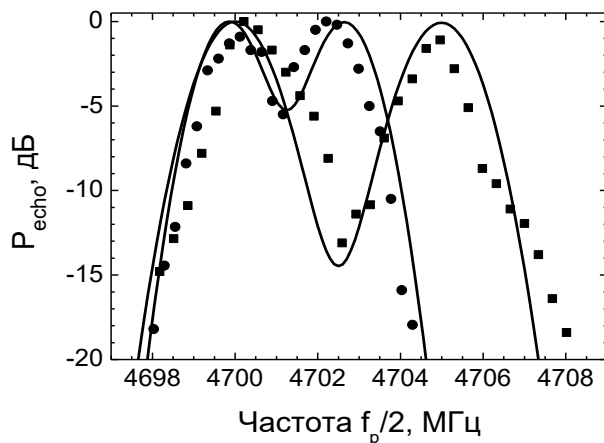


Рис. 3 Амплітудно-частотна характеристика для двох вхідних сигналів з $\Delta f_s = 2$ МГц (●) та 5 МГц (■). Теоретичні криві (суцільні лінії) розраховані при $V_k h_p = 22$ МГц.

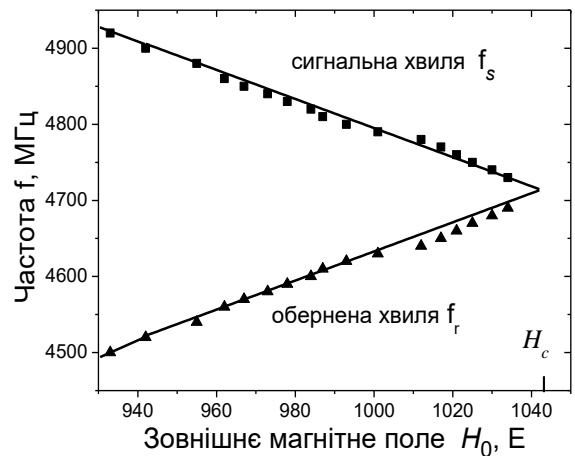


Рис. 4. Залежності частот прямої $f_s = \omega_s / (2\pi)$ та оберненої $f_r = \omega_r / (2\pi)$ хвиль від зовнішнього магнітного поля; квадрати й трикутники – експериментальні точки, суцільні лінії – теорія.

Специфіка ОХФ в анізотропному середовищі полягає в тому, що час затримки оберненого сигналу $t_{rev} \neq 2T_p$ (T_p – час затримки імпульсу накачки відносно сигналу), як це має місце у взаємних ОХФ і в усіх відомих процесах магнітостатичної луни. Цей ефект виникає через різницю в групових

швидкостях сигнальної v_s і оберненої v_r хвилі: 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.

Кореляційне виділення сигналів з рівня шуму за допомогою нерезонансного обернення хвильового фронту спінових хвиль

Було експериментально досліджено 3 типи кореляційних приймачів на основі плівок ЗГ. Задача була сформульована наступним чином: у систему приходить сигнал, співвідношення сигнал/шум (ССШ) для якого значно менше за 1 і 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 більше 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 було проведено експеримент, в якому на вхідну антену крім корисного сигналу потужністю $P_s = 1,4$ мВт модульованого трьох-символьним кодом Баркера (див. Рис. 5 (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 символьний код Баркера. Для цього проводилась маніпуляція фази (від 0 до π) синусоїдальних коливань несучої частоти відповідно 3 та 5 разів протягом тривалості імпульсу.

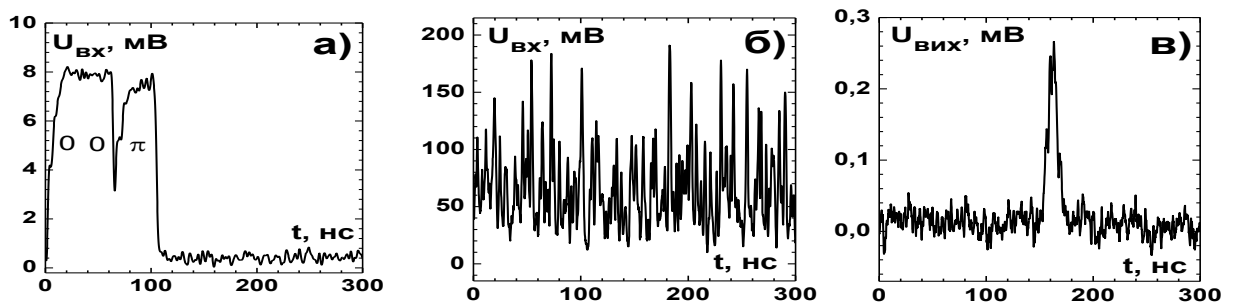


Рис. 5. Обвідні вхідного модульованого кодом Баркера імпульсу (а), сумарного (модульований імпульс + шум) вхідного сигналу (б) та вихідного сигналу кореляції (в) для ССШ=0,1.

У всіх експериментах з кореляційного виділення сигналів шум мав гаусівський профіль з центральною частотою ~ 4700 МГц та спектральною шириною біля 200 МГц. Обвідну сумарного вхідного сигналу показано на Рис. 5 (б), і як можна бачити з малюнка, у зв'язку з низьким значенням ССШ корисний імпульсний сигнал не помітний на фоні шуму. Розширений опис процесів наданий в роботі [6].

Опорний сигнал потужністю $P_{ref} = 7$ мВт подавався на другу вхідну

антенну. В результаті взаємодії було досліджено обвідну вихідного сигналу кореляції (Рис. 5 (в)). Головний максимум кореляційного сигналу з піковою потужністю $P_{out} = 3$ мкВт добре помітний на фоні шуму, в той час, як додаткові максимуми присутні в кореляційному сигналі без шуму виявились прихованими в шумовому фоні. Головним результатом дослідження було підвищення ССШ у вихідному сигналі більш ніж на 20 дБ.

Вперше було запропоновано та експериментально досліджено модель кореляційного приймача в котрому для створення обернених в часі імпульсів використовувався імпульс накачки, 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 накачки, а сигнал ОХФ виступав в ролі сигналу кореляції. В даному випадку використовувалась одна антена для прийому й подачі імпульсів в корелятор. Недоліком такого приладу є необхідність використання генератора з частотою в 2 рази більшою ніж частота вхідного сигналу.

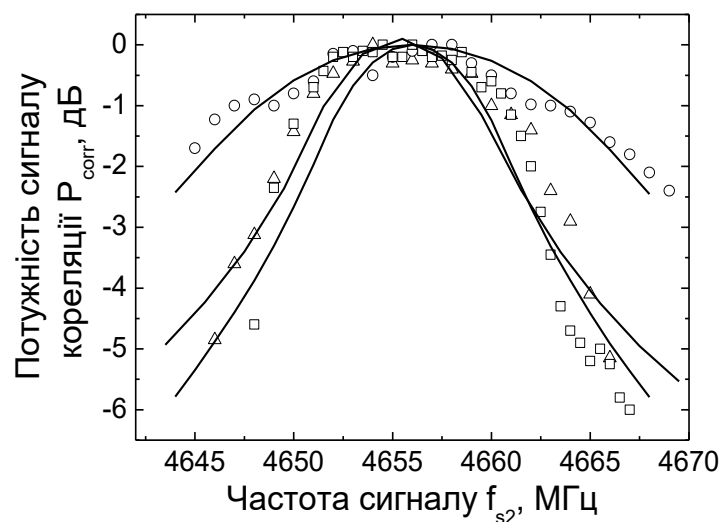


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності для нерезонансного кореляційного прийому сигналів. Суцільними лініями позначено результати числового моделювання. Експериментальні результати для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 50$ нс (\circ), для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 100$ нс (Δ), для $\tau_{s1} = 100$ нс й $\tau_{s2} = 1$ мкс (\square).

Для того щоб перевірити наскільки стабільно працюватиме запропонований кореляційний приймач було 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 же 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 пророблених за вищеописаною схемою приведено на Рис. 6. Так для сигналів тривалістю

$\tau_{s1} = \tau_{s2} = 100$ нс зменшення відгуку корелятора на -3 дБ відбувається при відлаштуванні вже на 5 МГц, а для $\tau_{s1} = \tau_{s2} = 50$ нс – більш ніж на 10 МГц. Варто також відмітити, що частотна смуга такої взаємодії визначається шириною смуги сигналу, тривалість котрого менша, що важливо коли в систему потрапляють сигнали різної тривалості. На базі описаних досліджень було розвинено міркування щодо процесів, що відбуваються в феритових плівках на системи мультифероїдних нановолокон [7] та магнітних напівпровідників [8]. Це дало поштовх для розвитку нового етапу в дослідженні даних структур.

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. O.V. Prokopenko, D.A. Bozhko, V.S. Tyberkevych, A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, O. Dzyapko, R.V. Verba, A.V. Talalarvskij, D.V. Slobodianiuk, Yu.V. Kobljanskyj, V.A. Moiseienko, S.V. Sholom, V.Yu. Malyshev «Recent trends in microwave magnetism and superconductivity» // Ukrainian Journal of Physics –2019 ISSN 2071-0194 Vol. 64, No. 10 P.888-926
7. Liu Ying, Zhou Peng, Fu Jiayu, Iyengar Madhavan, Liu Nannan, Du Pengcheng, Xiong Yuzan, Moiseienko Vladyslav, Zhang Wei, Zhang Jitao, Ma Zhijun, Qi Yajun, Novosad Valentine, Zhou Tiejun, Filippov Dmitry, Zhang Tianjin, Page Michael, Srinivasan Gopalan «Strain-mediated magneto-electric interactions in hexagonal ferrite and ferroelectric coaxial nanofibers» // MRS Communications –Volume 10, Issue 2 –June 2020 DOI: <https://doi.org/10.1557/mrc.2020.30> –pp. 230-241
8. M. Popov, Y. Liu, V. L. Safonov, I. V. Zavislyak, V. Moiseienko, P. Zhou, Jiayu Fu, Wei Zhang, Jitao Zhang, Y. Qi, Tianjin Zhang, T. Zhou, P. J. Shah, M. E. McConney, M. R. Page, and G. Srinivasan «Strong converse magnetoelectric effect in a composite of weakly ferromagnetic iron borate and ferroelectric lead zirconate titanate» // Phys. Rev. Applied 14, –2020 pp.034039 (8 pages)