

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

УДК 538.245

СЕРГА Олександр Олександрович

ВІДЛУННЯ МАГНІТОСТАТИЧНИХ ХВИЛЬ В  
ЕПІТАКСІАЛЬНИХ  
ПЛІВКАХ ФЕРИТУ-ГРАНАТУ ІТРІЮ

Спеціальність 01.04.03 - радіофізика

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеню  
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1995



Робота виконана на кафедрі квантової фізики  
факультету Київського університету ім. Тараса Шевченка.

Дисертація є рукописом.

Науковий керівник

Кандидат фізико-математичних наук  
доцент О.В. ТИЧИНСЬКИЙ

Офіційні опоненти

Доктор фізико-математичних наук  
професор О.М. ПОГОРІЛИЙ

Кандидат фізико-математичних наук  
М.Г. БАЛІНСЬКИЙ

Провідна організація

Інститут фізики АН України

Захист дисертації відбудеться "20" листопада 1995 року в ауд. 46  
на засіданні Спеціалізованої Ради Д 01.01.17 при Київському  
університеті ім. Тараса Шевченка за адресою: 252127, Україна,  
м.Київ, вул.Софії Ковалевської, 1, радіофізичний факультет. 616 30

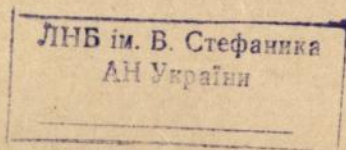
Відгуки на автореферат в двох примірниках, завірені печаткою  
організації, просимо надсилати за адресою: 252127, Україна,  
м.Київ, вул.Софії Ковалевської, 1, радіофізичний факультет,  
вченому секретарю спеціалізованої ради Д 01.01.17.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці  
Київського університету ім. Тараса Шевченка (252017,  
Україна, м.Київ, вул. Володимирська, 62)

Автореферат розіслано "20" січня 1995р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
Д 01.01.17

Шкавро А.Г.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Незважаючи на те, що основна маса робіт по магнітостатичному відлунню присвячена процесам в об'ємних зразках фериту-гранату ітрію  $Y_3Fe_5O_{12}$  (ФГІ), починаючи з середини 80-х років увагу дослідників привертає відлуння в такому матеріалі функціональної електроніки як епітаксіальні плівки ФГІ, вирощені на підкладці з галій-гадолінієвого гранату  $Gd_3Ga_5O_{12}$  (ГГГ) [1-3]. Зацікавленість ґрунтується на можливості застосування явища як методу неруйнівного контролю релаксаційних параметрів вищезгаданих плівок [4,5]. З точки зору практики також перспективна можливість об'єднання в одній плівці таких функцій, як обробка імпульсної інформації безпосередньо на надвисоких частотах з використанням магнітостатичної луни та підсилення отриманого вихідного сигналу мазером на основі активної ферит-парамагнітної структури.

Проте очевидно, що лише знання природи магнітостатичної луни в плівках ФГІ, визначення конкретних об'єктів відлуння - типів магнітостатичних збуджень в даній системі дозволяють коректно застосовувати явище до визначення параметрів епітаксіальних плівок ФГІ та роблять можливою подальшу роботу над квантовим підсиленням луни. Але до теперішнього часу дане питання залишалось непроясненим. Невиясненими були і джерела швидкої оборотної фазової релаксації збуджень намагніченості в плівках ФГІ. Результати відомих робіт [1,3] щодо необхідного ступеню неоднорідності поля підмагнічування та характеру залежності амплітуди луни від міжімпульсного інтервалу розрізняються корінним чином. Безрезультатними залишились спроби ресстрації підсиленої луни. Вузький діапазон частот (1-4 ГГц) в якому спостерігалось відлуння значно утруднює як аналіз природи явища так і подальшу роботу над його практичним застосуванням.

Науковою задачею роботи було визначення зв'язку механізму генерації магнітостатичної луни в епітаксіальних плівках ФГІ з конкретними типами магнітостатичних хвиль (МСХ), роз'яснення природи оборотної фазової релаксації в цій системі, дослідження тих властивостей відлуння, які дозволяють зробити висновок про природу явища та розширюють можливості його практичного за-

стосування. В зв'язку з цим у роботі розв'язуються наступні питання:

1. Вивчення можливості та умов генерації магнітостатичного відлуння в плівках ФГІ в сантиметровому діапазоні довжин електромагнітних хвиль.
2. Дослідження в широкому діапазоні частот (використовуючи результати п.1) амплітудних залежностей сигналів відгуку від орієнтації зразків в зовнішньому магнітному полі, стану поверхні плівки, пружних деформацій зразків.
3. Дослідження особливостей генерації луни за умов суттєво нерезонаторного режиму.
4. Вивчення можливостей отримання в плівках ФГІ підсиленого відлуння.
5. Узагальнення отриманих результатів і формулювання на їх основі висновків про природу магнітостатичного відлуння в епітаксціальних плівках ФГІ та перспективу ефективного підсилення сигналу луни.

Наукова новизна. В роботі вперше:

1. Отримано магнітостатичне відлуння в плівках ФГІ на частотах 9.2-9.4 ГГц. Визначено умови та особливості генерації відгуку в даному діапазоні частот.
2. Виявлено зв'язок амплітуди відлуння в сантиметровому діапазоні з величиною та характером пружних деформацій плівок в полях підмагнічування різної степені неоднорідності.
3. Встановлено, що магнітостатичне відлуння в плівках ФГІ є відлунням повільних МСХ, які розповсюджуються поблизу критичних кутів поверхневих магнітостатичних хвиль (ПМСХ) та мають неперервну нелінійну дисперсійну характеристику. Природа оборотної фазової релаксації в цій системі полягає в швидкому дисперсійному розпливанні цугів згаданих хвиль.
4. Виявлено ефект регенерації сигналу луни магнітостатичних хвиль в плівках ФГІ, який полягає в тому, що при подачі після сигналу подвійної луни потужного імпульсу накачки, амплітуда знов утвореного ними відлуння значно (на 16 дБ і більше) перевищує початковий сигнал луни. Встановлено, що сигнал подвійної луни може бути безпосередньо підсилений шляхом подачі імпульсу накачки перед моментом його формування.

### Наукове та практичне значення.

В роботі встановлені типи МСХ, що відповідають за генерацію відлуння в плівках ФГІ та механізм швидкої оборотної фазової релаксації збуджень в даній системі. Виявлено новий ефект регенерації подвійної луни. Зв'язок магнітостатичного відлуння з конкретними типами МСХ, дозволяє проводити коректний аналіз отриманих за методикою феримагнітного відлуння релаксаційних характеристик плівок ФГІ. Отримані результати можуть бути використані при розробці активних та пасивних пристроїв функціональної електроніки НВЧ на основі явища луни в епітаксціальних плівках ФГІ.

### Основні положення, що виносяться на захист.

1. Механізм формування магнітостатичного відлуння в плівках ФГІ та його зв'язок з повільними МСХ, що розповсюджуються поблизу критичних кутів ПМСХ.
2. Вплив пружних деформацій плівок ФГІ та градієнту зовнішнього магнітного поля на генерацію луни магнітостатичних хвиль.
3. Ефект регенерації луни магнітостатичних хвиль в плівках ФГІ.

### Апробація роботи. Результати роботи представлялись на:

1. VI науковому семінарі "Фізика магнітних явищ" (Донецьк, 1993р.)
2. Семінарі "Магнітоелектронні пристрої НВЧ" (Київ, 1993 р.)
3. VI Школі по спінохвильовій електроніці НВЧ (Саратов, 1993 р.)
4. Європейській конференції по магнітних матеріалах та їх застосуванню - ЕММА 93 (Кошице, 1993 р.)
5. Міжнародній конференції з магнетизму - InterMag 94 (Варшава, 1994р.)
6. VII науковому семінарі "Фізика магнітних явищ" (Донецьк, 1994 р.)

Публікації. Результати дисертації викладено в 9 друківаних працях, наведених в кінці автореферата.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури з 73 найменувань. Дисертація викладена на 92 сторінках і містить 31 малюнок.

## З М І С Т Р О Б О Т И

У вступі обгрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи та основні положення, що виносяться на захист. Освітлені наукова новизна та практичне значення роботи.

В першому розділі подано векторну модель формування двохімпульсного та трьохімпульсного відлуння в феритах, наведено загальну теорію магнітостатичного відлуння.

В п. 1.1. розглядається проста векторна модель формування двохімпульсного та трьохімпульсного відлуння в феритах.

В п. 1.2. подано теорію відлуння в феритах, що ґрунтується на розв'язку рівняння Ландау-Ліфшиця руху магнітного моменту з урахуванням нелінійних складових. Розглядаються магнітостатичні хвилі з такими швидкими варіаціями намагніченості, що дозволяють не враховувати граничні умови. Затухання вводиться через комплексну резонансну частоту. На основі отриманого рівняння руху для амплітуд магнітостатичних мод розв'язана задача процесу, що виникає при збудженні системи послідовністю двох імпульсів. Показано: луна - наслідок нелінійної взаємодії коливань намагніченості викликаних першим імпульсом з високочастотним магнітним полем другого. Враховуючи висновки четвертого розділу про генерацію луни в плівках ФГІ повільними МСХ, які не відчувають граничних умов на краях зразка, наведена теорія уявляється придатною для застосування в випадку відлуння в плівках.

Другий розділ присвячено опису експериментальних установок та робочих секцій, що використовувались в сантиметровому та дциметровому діапазонах довжин електромагнітних хвиль. В сантиметровому діапазоні найкраще зарекомендувала себе секція у вигляді ввімкненого на прохід між генератором та приймачем відрізка 3-см хвилевода з діафрагмою, в отвірі якої розміщувався зразок.

В третьому розділі подано результати реєстрації луни в плівках ФГІ в сантиметровому діапазоні. Як і в дециметровому діапазоні луна спостерігається поблизу частоти феромагнітного резонансу. Обов'язкова наявність неоднорідності високочастотного магнітного поля, а також оптимальної для кожного зразка неод-

норідності поля підмагнічування порядку 6-20  $E/мм$ . При зростанні градієнту поля підмагнічування понад оптимальний, амплітуда луни монотонно зменшується. При градієнті  $\approx 1,5 E/мм$  на сигнал відлуння накладаються паразитні сигнали, що з'являються за збуджуючими імпульсами, і про наявність луни можна судити лише по зміні їх амплітуди при варіаціях часу затримки. Отриманий результат суттєво відрізняється від даних [3], де необхідний для спостереження луни градієнт зовнішнього поля складає близько 90-200  $E/мм$ . Те, що в дециметровому діапазоні не відмічено необхідності в неоднорідності поля підмагнічування, пояснюється вищою амплітудою сигналу луни в цьому діапазоні довжин хвиль.

Втрати, що вносились  $\eta = 10 \lg(P/P_0)$ , де  $P$  і  $P_1$  - відповідно потужності луни та першого збуджуючого імпульсу, становили для деяких зразків на частоті 9400  $МГц \approx -50дБ$  при затримці 500  $нс$ . Настільки значні втрати (в дециметровому діапазоні при тих же затримках згідно з [1]  $\eta = 25дБ$ ) пов'язані з малим коефіцієнтом зв'язку з зовнішнім змінним магнітним полем та більшими втратами МСХ в сантиметровому діапазоні. На відміну від [3] не виявлено, як до речі і в дециметровому діапазоні, "мертвого" міжімпульсного інтервалу  $t_{12} = t_0$  протягом якого система феримагнітних спінів не здатна до генерації відлуння. Відповідно до [3]  $t_0 = 350нс$ , в той час як автор спостерігав відгук спінової системи до  $t_{12} = 70нс$  і менше без тенденції до зменшення амплітуди сигналу.

Зв'язок амплітуди сигналу луни з величиною міжімпульсного інтервалу задовільно описується залежністю

$$P_{2t_{12}} = P_0 \exp(-4t_{12}/T_2),$$

де  $T_2$  - час поперечної релаксації,  $P_{2t_{12}}, P_0$  - потужність сигналу відлуння в моменти часу  $2t_{12}$  і 0 відповідно. Останнє дозволяє використовувати метод відлуння до визначення параметрів релаксації плівок ФГІ в сантиметровому діапазоні.

В одному ряду з неоднорідністю зовнішнього поля стоїть вплив пружних деформацій зразків плівок ФГІ на амплітуду згенерованого в них відлуння. При стисканні плівки амплітуда луни зменшується, при розтязі зростає до 13  $дБ$  якщо зразок

поміщено в поле підмагнічування з неоднорідністю, яка значно перевищує оптимальну і зменшується в інших випадках.

Зростання частоти генерації луни при розтязі плівок та її зниження при стиску свідчить про участь в процесі поверхневих магнітостатичних хвиль [6].

В четвертому розділі викладено теоретичне обґрунтування та експериментальні результати, що свідчать про зв'язок відлуння в плівках ФГІ та магнітостатичних хвиль з низькою груповою швидкістю в області частоти феромагнітного резонансу. В якості останніх розглядаються поверхневі та об'ємні МСХ, що розповсюджуються поблизу критичних кутів ПМСХ.

П.4.1. На підставі дослідів по спостереженню луни при її збудженні та прийомі однією малою в порівнянні з розмірами зразка антеною робиться припущення про участь в процесі повільних ( $V_{zp} \leq l/2\tau_{12} \cong 0,1 \text{ см/мкс}$ , де  $l$  - характерний розмір антени) магнітостатичних хвиль. При таких швидкостях цуги МСХ, збуджені першим імпульсом, затримуються в околі антени на час достатній для того, щоб провзаємодіяти з НВЧ полем другого імпульсу та навести в антені сигнал віддуку - луни. При довжинах хвиль набагато менших за характерні розміри зразка повільні МСХ не відчують граничних умов на краях плівки і можуть бути збуджені у всій частотній смузі, що відповідає спектру падаючих імпульсів. В той же час для забезпечення хорошого зв'язку з антенними системами довжина повільних МСХ не повинна бути занадто малою (звичайно хвильове число  $k < 200 \text{ см}^{-1}$ ). Джерело швидкої фазової релаксації цугів даних хвиль - дисперсія. Час дисперсійної фазової релаксації оцінюється з виразу

$$T^* > \tau_{1,мп}^2 / \left( \frac{\partial \ln(V_{zp})}{\partial \omega} \right), \text{ де } \tau_{1,мп} - \text{тривалість збуджуючих імпульсів.}$$

Викладеним умовам задовільняють МСХ, що розповсюджуються поблизу критичних кутів ПМСХ [7]. Їх частотний діапазон окрім того безпосередньо прилягає до частоти феромагнітного резонансу де і спостерігається луна. В наших експериментах в дециметровому діапазоні тривалості імпульсів збудження, сигналів індукції та сигналу відлуння складали звичайно 0,1 мкс, 0,2 мкс та 0,1 мкс відповідно. Тривалості сигналів відлуння та індукції можна

використати для оцінки дослідної величини  $T^*$ , поклавши  $T_{\text{експ}}^* \approx 0,1 - 0,2 \text{ мкс}$ . При наближенні до критичного кута ( $\theta_{\text{кр}} = 19,65^\circ$  за прийнятих при розрахунку умов  $4\pi M = 1207,6 \text{ Гс}$ ,  $s = 20,55 \text{ мкм}$ ,  $H_0 = 154 \text{ Е}$ )  $T^*$  для ПМСХ зменшується і досягає (для  $50 \text{ см}^{-1} \leq k \leq 150 \text{ см}^{-1}$ ) значень  $T_{\text{експ}}^*$  за кутів між полем підмагнічування та напрямком розповсюдження ПМСХ менших ніж  $25 - 30^\circ$ .

П. 4.2. Описуються експерименти по визначенню залежності амплітуди луни від кута  $\varphi$  між полем підмагнічування та площиною плівки в сантиметровому і дециметровому діапазонах довжин хвиль. В сантиметровому діапазоні відлуння не реєструється в області  $\pm 50^\circ$  навколо напрямку нормального намагнічування. На частоті 1300 МГц ця область звужується до  $\pm 2^\circ$ . Перед зривом тут спостерігається зростання амплітуди луни в 1,5 раза в порівнянні з дотичним намагнічуванням. Розрахунок групової швидкості повільних МСХ при переході від дотичного до нормального намагнічування свідчить про її швидке зростання понад  $0,1 \text{ см/мкс}$  в відмічених областях, що узгоджується з припущеннями П. 4.1.

До короткохвильових повільних МСХ, збуджених в різних точках зразка, можна застосувати наближення слабо пов'язаних областей і знехтувати дипольним усередненням резонансної частоти. Як наслідок буде спостерігатись частотний зсув дисперсійних характеристик таких хвиль, викликаний відмінністю матеріальних параметрів плівки в площині зразка. При цьому частина дисперсійних характеристик опиняється поза частотною смугою збуджуючих імпульсів і відповідаючі їм МСХ не вносять вклад в генерацію луни. Зменшення в дециметровому діапазоні вищезгаданого зсуву до нуля при  $\varphi \cong 85 - 86^\circ$  веде до узгодження спектрів збуджуючих імпульсів та ширини частотної смуги збудження МСХ, що і викликає зростання амплітуди луни перед зривом.

Відсутність сигналів луни за нормального намагнічування також могла б бути пов'язана з відбором енергії зовнішнього НВЧ поля на збудження обмінних спінових хвиль, ефективність генерації яких в цих умовах збільшується в зв'язку з ростом ступеню закріплення спінів на поверхні плівок. Хімічна поліровка вільної

поверхні плівки, зменшуючи ступінь закріплення спінів на ній, а отже ефективність збудження спінових хвиль, повинна таким чином впливати на вигляд отримуваних кутових залежностей. Результатом експериментів по хімічній поліровці стало лише зростання часу релаксації та амплітуди сигналів луни (в 1,5-2 рази) внаслідок згравлення збагаченого швидкорелаксуєчими домішками поверхневого шару плівок. Зміни ширини областей зриву генерації луни не зареєстровано, з чого випливає, що зростання ефективності збудження спінових хвиль при переході до нормального намагнічування не є причиною зменшення амплітуди луни.

Звертається увага на цікавий факт існування, так званого, "високопольового відлуння" в дециметровому діапазоні.

П. 4.3. Описуються досліди по встановленню зв'язку амплітуди сигналу відлуння з кутом між напрямками зовнішнього магнітного поля і хвильового вектора МСХ. Досліди виконано в великих (діаметр 6 см) зразках за умов суттєво нерезонаторного режиму збудження МСХ. Антена - мікросмужкова лінія шириною 0,4 мм і довжиною 7 см. При зростанні товщини плівки, а отже і групової швидкості МСХ, на отриманих залежностях поблизу критичних кутів ПМСХ виділяються і стають все більш вираженими максимуми амплітуди луни. Такий результат впливає зі звуження областей кутів в яких задовільняється умова низької групової швидкості.

П. 4.4. В висновках до четвертого розділу відмічається, що результати експериментальних досліджень підтверджують зв'язок луни в плівках ФГІ та повільних МСХ з  $k < 200 \text{ см}^{-1}$ , що розповсюджуються поблизу критичних кутів ПМСХ.

Дослідженню процесів відлуння при використанні трьох та більшої кількості збуджуючих імпульсів присвячено п'ятий розділ.

Виявлено нове явище регенерації подвійної луни. При подачі імпульсу накачки після появи сигналу луни знов утворене ними відлуння перевищує початкове більш ніж на 16 дБ. Зменшення міжімпульсного інтервалу (в наших дослідах до 100 нс) веде до монотонного зростання коефіцієнту підсилення, що якісно відрізняється від поведінки раніш відомого підсиленого відлуння в об'ємних зразках та результатів [3]. Коефіцієнт підсилення обернено пропорційно пов'язаний з амплітудою початкової луни. Шляхом

подачі ще одного імпульсу накачки можлива повторна регенерація сигналу луни.

Вперше вдалося отримати підсилення сигналу подвійної луни при подачі імпульсу накачки перед моментом його формування.

Вперше в плівках ФГІ отримано трьохімпульсну луно, яка була використана для визначення часу повздовжньої релаксації. Порівняння вимірених часів поперечної та повздовжньої релаксації ( $T_1 \cong T_2$ ) свідчить про незбереження величини сумарного вектора намагніченості (в протилежному разі  $T_2 = 2T_1$  [8]) в виконаних експериментах, а отже про відчутний вклад невластних процесів релаксації в розраховану за їх даними ширину лінії феромагнітного резонансу.

Підсилення трьохімпульсного відлуння не спостерігалось

#### Основні результати та висновки.

1. Вперше отримано генерацію луни в плівках ФГІ в сантиметровому діапазоні частот та визначено умови її стабільного спостереження. Встановлено, що така генерація має місце в околі частоти феромагнітного резонансу і можлива лише за умови суттєво неоднорідного високочастотного магнітного поля та (на відміну від 10-см діапазону) при наявності деякого (оптимального для кожного окремого зразка, але  $\leq 20E / \text{мм}$ ) градієнта поля підмагнічування.

2. Виявлено зв'язок амплітуди відлуння в сантиметровому діапазоні з пружними деформаціями плівки ФГІ, який проявляється в зростанні амплітуди до 14 дБ при розтязі плівки в градієнті поля підмагнічування, що перевищує оптимальний для даного зразка. За оптимальної неоднорідності поля підмагнічування розтяг плівки призводить до спаду амплітуди луни. Стиск плівки за будь-яких умов викликає зменшення сигналу луни.

3. В широкому діапазоні частот зареєстровано зрив генерації відлуння за нормального намагнічування плівки. Область кутів, в якій генерація луни не спостерігалась, розширюється від  $\pm 2^\circ$  до  $\pm 50^\circ$  при зростанні робочої частоти від 1300 МГц до 9400 МГц. В 10-см діапазоні зриву луни передує зростання її амплітуди в 1,5-2 рази та поява так званої високопольової луни.

4. При дотичному намагнічуванні отримано залежності амплітуди луни від кута між підмагнічуючим полем і напрямком хвильового вектора МСХ в великих зразках-"шайбах" (за умови суттєво нерезонаторного режиму) з товщиною плівки ФГІ від 0,95 до 20 мкм. Для плівки з товщинами більшими за 6 мкм на даній залежності навколо критичних кутів ПМСХ чітко вирізняються області зростання амплітуди відлуння. Амплітудні піки стають все більш вираженими при збільшенні товщини плівки. Для плівки тоншої 1 мкм інтенсивність сигналу відлуння майже не залежить від зміни напрямку хвильового вектора МСХ.

5. Отримані кутові залежності та факт локалізації області генерації відлуння дозволяють пов'язати відлуння в плівках ФГІ зі збудженням повільних магнітостатичних хвиль ( $V_{\text{сп}} \leq 0,1 \text{ см / мкс}$ ) з хвилевими числами  $\leq 200 \text{ см}^{-1}$ , що розповсюджуються поблизу критичних кутів ПМСХ. Будучи досить довгохвильовими ці МСХ добре зв'язані зі змінним магнітним полем збуджуючої системи. Пути таких хвиль, затримуючись поблизу збуджуючої антени, мають можливість провзаємодіяти з високочастотним полем другого збуджуючого імпульса і навести в антені сигнал відгуку. За умови, що їх довжина набагато менша за поперечні розміри зразка ці МСХ мають неперервну дисперсійну характеристику, а дисперсійне розпливання їх цугів пояснює природу швидкого оборотного розфазування збуджуючих імпульсів в плівках ФГІ. Виконані розрахунки часу дисперсійного оборотного розфазування цугів повільних ПМСХ, даючи величину меншу 200 нс, співпадають з експериментальними даними.

Всі отримані кутові залежності амплітуди відлуння знаходять пояснення в зростанні ефективності генерації луни при вибіркового збудженні повільних МСХ та в неможливості такої генерації при переході повільних типів МСХ в швидкі прямі об'ємні магнітостатичні хвилі.

Зростання амплітуди луни перед зривом в дециметровому діапазоні пояснюється досягненням узгодження спектрів збуджуючих імпульсів та ширини частотної смуги збудження МСХ за рахунок зменшення частотного зсуву дисперсійних характеристик МСХ, викликаного неоднорідністю параметрів плівки по площині зразка.

6. Зв'язок луни з конкретними типами МСХ дозволяє коректно оцінити результати експериментів по застосуванню

явища відлуння для вимірювання релаксаційних характеристик плівок ФГІ, а локалізація області генерації (особливо при вибірковому збудженні МСХ під критичними кутами до поля підмагнічування) робить можливим неруйнівний контроль релаксаційних характеристик плівок в окремих областях зразків-"шайб".

7. Порівняння вимірених часів поперечної та повздожньої релаксації ( $T_1 \cong T_2$ ) свідчить про незберження величини сумарного вектора намагніченості в виконаних експериментах, а отже про відчутний вклад невластних процесів релаксації в розраховану за їх даними ширину лінії феримагнітного резонансу.

8. Виявлено ефект регенерації сигналу луни магнітостатичних мод в плівках ФГІ, який полягає в тому, що при подачі після вже згенерованого сигналу подвійної луни потужного імпульсу накачки, амплітуда утвореного ними відлуння значно (до 16 дБ і більше) перевищує початковий сигнал луни. Можливе подальше підсилення утвореної луни. Збільшення амплітуди подвійного відлуння фіксується також при подачі сигналу накачки безпосередньо перед його появою.

9. Коефіцієнт підсилення регеноерованої луни обернено пропорційно пов'язаний з амплітудою початкового відлуння та монотонно спадає з ростом міжімпульсного інтервалу. Останнє корінним чином відрізняється від поведінки досліджуваної раніш підсиленої луни в об'ємних зразках ФГІ, що має максимум на залежності коефіцієнта підсилення сигнального імпульсу від міжімпульсного інтервалу.

Таким чином проведені експерименти виявили ряд нових фізичних особливостей поведінки магнітостатичного відлуння в плівках ФГІ, а також дозволили пов'язати явище з конкретними типами магнітостатичних хвиль, що важливо як з наукового боку так і з точки зору практичного застосування.

#### Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

1. О.О.Серга, О.В.Тичинський "Анізотропія електронної спінової луни в епітаксіальних плівках фериту-гранату ітрію" // Укр. фіз. журн., т.38, №5, ст.763-766, 1993.

2. А.А.Серга, А.В.Тычинский "Особенности генерации электронного спинового эха в эпитаксиальных пленках ЖИГ в 3-см диапазоне" // Радиотехника и электроника, 1994.

3. А.А.Серга, А.В.Тычинский "Эхо магнитостатических мод в пленках ЖИГ" // Письма в ЖЭТФ, т.59, вып.6, стр. 409-412, 1994.

4. А.А.Серга, А.В.Тычинский "Генерация магнитостатического эха в пленках ЖИГ в 3-см диапазоне" // VI научный семинар "Физика магнитных явлений", Донецк, май 1993 г., тезисы докладов, стр.55.

5. А.А.Серга, А.В.Тычинский "Влияние градиента поля подмагничивания и упругих деформаций на ферримагнитное эхо в пленках ЖИГ в 3-см диапазоне" // Магнитоэлектронные устройства СВЧ, тезисы докладов семинара, Киев, июнь 1993 г., ст. 11-12.

6. А.А.Серга, А.В.Тычинский "О генерации ферримагнитного эха в пленках ЖИГ распространяющимися вблизи критических углов поверхностными МСВ" // VI Школа по спинволновой электронике СВЧ, Саратов, 1993, тезисы докладов.

7. A.A.Serga, A.V.Tychinsky "Ferrimagnetic Echo in YIG Film at L- and X-band" // Digests of European Magnetic Materials & Applications Conference, Kosice, August 24-27, 1993, p.314.

8. A.A.Serga, A.V.Tychinsky "Regeneration of Ferrimagnetic Echo in YIG Films" // International Conference on Magnetism 1994, 22-26 August, Warsaw, Poland, p.437.

9. А.А.Серга, А.В.Тычинский "Регенерация эха магнитостатических мод в пленках ЖИГ" // VII научный семинар "Физика магнитных явлений", Донецк, 1994, тезисы докладов.

#### Цитована література:

1. В.В.Данилов, А.В.Тычинский "Магнитостатическое эхо в ферритовых пленках" // Письма в ЖЭТФ, т.38, №6, стр.269-271, 1983.

2. F.Bucholtz and D.C.Webb // Proc. 1983 Ultrasonic Symposium, IEEE Publ. 83CH1947-1, p.221.

3. F.Bucholtz, D.C.Webb, and C.W.Young "Ferrimagnetic echoes of magnetostatic surface wave modes in ferrite films" // J.Appl.Phys., vol.56, n.6, pp.1859-1865, 1984.

4. Bedyukh A.R., Danilov V.V., Nechiporuk A.Yu., Tychinsky A.V. "Magnetostatic surface wave relaxation in epitaxial garnet films" // Proceedings of the International Symposium Surface Waves in Solids and Layered Structures (ISSWAS), Novosibirsk, July 1986, vol.2, pp.277-280.

5. Данилов В.В., Литовченко П.Г., Руденко Г.Г. "Влияние ре-акторного излучения на магнитные свойства пленок железо-ит-триевого феррит граната" // Труды международной конференции по радиационному материаловедению, Алушга, Май 1990, т.10, ст.50-52, Харьков, 1991.

6. Н.И.Ляшенко, В.М.Талалаевский, М.Ю.Хвастухин, Л.В.Чевнюк "Влияние упругих напряжений на спектры магнито-статических волн в эпитаксиальных пленках железоиттриевого граната" // УФЖ, т.34, №12, ст. 1859-1860, 1989.

7. Damon R.W., Eshbach J.R. "Magnetostatic Modes of Ferromagnetic Slab" // J.Phys.Chem.Solids, vol.19, п.3/4, pp.308-320, 1961.

8. Sparks M., Ferromagnetic Relaxation Theory, NY.: McGraw-Hill.

**Summary:** Experimental results are reported on the magnetostatic echo observation in epitaxial garnet films of yttrium iron garnet (YIG) at L- and X-band. The results support the theoretical conclusions that the echo process in YIG films is associated with slow magnetostatic waves (MSW) which are propagating near critical angles of surface MSW. New phenomenon of the echo regeneration which consists in the amplification of an echo signal generated by the usual two-pulse echo and the external pump microwave pulse is described. The direct amplification of the two-pulse echo by the pump pulse is also possible.

**Резюме:** Представлены экспериментальные результаты наблюдения магнитостатического эха в эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Результаты подтверждают теоретические выводы о связи эхо процесса в пленках ЖИГ с медленными магнитостатическими волнами (МСВ), распространяющимися вблизи критических углов поверхностных МСВ. Описывается новое явление регенерации эха, состоящее в том, что амплитуда эха, образованного сигналом ранее сгенерированного двухимпульсного эха и импульсом накачки, существенно превышает амплитуду исходного сигнала. Возможно также непосредственное усиление эха импульсом накачки.

**Ключові слова:** луна, магнітостатичні хвилі, ферит-гранат ітрію, плівки, нелінійність, НВЧ.

AB 31.766

Післ. до друку 4 01.95 Формат 60x84/6 Папір 87г/м. Друк. офс.  
Друк. офс Умовн. друк. арк. 0,7 Обл.-вид. арк. 0,5 Тир. 100  
Зам. 5-2001

Київська книжкова друкарня наукової книги, Київ, Б. Хмельницького, 19