



УКРАЇНА

(19) UA (11) 30765 (13) U

(51) МПК (2006)

G01N 27/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ РЕЛАКСАЦІЇ СПІНОВИХ ХВИЛЬ В МАГНІТНИХ ПЛІВКАХ

1

2

(21) u200712651

(22) 14.11.2007

(24) 11.03.2008

(72) ВАСЮЧКА ВІТАЛІЙ ІВАНОВИЧ, UA,  
КОБЛЯНСЬКИЙ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA,  
МЕЛКОВ ГЕННАДІЙ АНДРІЙОВИЧ, UA(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА, UA

(56)

(57) Спосіб визначення частоти релаксації спінових хвиль в магнітних плівках, що включає одночасну дію на матеріал направлених паралельно одне одному постійного однорідного магнітного поля і надвисокочастотного магнітного поля накачки і наступне дослідження наслідків впливу їх на амплітуди спінових хвиль феритових матеріалів, який **відрізняється** тим, що проводять дослідження параметричного підсилення накачкою

спінових хвиль, створюючи їх надлишкову кількість шляхом подачі додаткового надвисокочастотного сигнального імпульсу до моменту ввімкнення накачки, і визначають параметри релаксації амплітуди сигналу обертання хвильового фронту за вимірами у двох різних моментах часу, а частоту релаксації спінових хвиль  $\omega_{rk}$  визначають за формулою:

$$\omega_{rk} = \frac{[A_r(T_{p1}) / A_r(T_{p2})] dB}{17,36(T_{p2} - T_{p1})},$$

де  $A_r(t)$  - амплітуда вихідного сигналу, $\omega_{rk} = [A_r(T_{p1}) / A_r(T_{p2})] dB$  - відношення амплітуд вихідних сигналів, подане в децибелах,  $t = T_{p1}$  і  $t = T_{p2}$  - два моменти часу, коли проводять виміри.

Корисна модель відноситься до галузі магнітної НВЧ-електроніки і методів досліджень властивостей магнітних матеріалів і може бути використаний для неруйнівного контролю якості магнітних плівок, які застосовуються в аналогових приладах обробки НВЧ інформації, таких як магнітостатичні лінії затримки, системи подавлення шумів, конвольвери і корелятори.

На практиці для вимірювання частоти релаксації спінових хвиль  $\omega_{rk}$  і пов'язаної з нею

ширини лінії  $\Delta H_k = 2\omega_{rk} / \gamma$  ( $\gamma$  - гіромагнітне відношення,  $k$  - хвильове число) [1] запропоновано ряд спектрометричних методів аналізу, в тому числі метод магнітної ями [2] для пластин великих розмірів, метод прямокутного плівкового резонатору [3]. До недоліків цих методів слід віднести складність вимірювання характеристик релаксації для збуджень із складною просторовою структурою, вплив стану поверхні на частоту

релаксації хвиль  $\omega_{rk}$ , що не дозволяє пов'язати ширину лінії  $\Delta H_k$  з характеристиками феромагнітної плівки.

Найбільш близьким за своєю технічною сутністю і досягаемому результату до заявляемого способу визначення частоти релаксації спінових хвиль в магнітних плівках є спосіб, що базується на параметричному збудженні накачкою спінових

хвиль частоти  $\omega_k$  з теплового рівня [1]. На експерименті в умовах паралельності постійного поля  $\vec{H}_0$  та НВЧ магнітного поля накачки  $\vec{H}$

частоти  $\omega_p = 2\omega_k$  (паралельна накачка) вимірюють порогову потужність накачки  $P_{пор}$  параметричного збудження спінових хвиль. При цій потужності амплітуда підсилення накачкою з теплового рівня спінових хвиль та енергія, що була поглинута ними з накачки, досягає помітних у експерименті значень, в результаті чого починаються викривлення відбитого від резонатору із зразком, що досліджується, імпульсу накачки [4] та підвищується температура зразка [5]. Вимірюючи у такий спосіб порогова потужність  $P_{пор}$  через параметри резонатора (добротність, коефіцієнт зв'язку, об'єм, розподіл змінного магнітного поля) перераховується у значення порогової амплітуди накачки  $h_{пор}$  параметричного збудження спінових хвиль.

(13) U

(11) 30765

(19) UA

Саме порогова амплітуда поряд з частотою

накачки  $\omega_p$  та намагніченістю насичення зразка  $M_0$  визначають частоту релаксації та ширину лінії спінових хвиль [1]:

$$\omega_{rk} = \frac{\gamma \Delta H_k}{2} = \frac{2\pi\gamma M_0}{\omega_p} \gamma h_{пор}. \quad (1)$$

Цей спосіб обраний нами за спосіб-прототип. Основні його недоліки пов'язані з необхідністю точного вимірювання на експерименті великого числа допоміжних параметрів, а саме: порогової потужності НВЧ магнітного поля, добротності, коефіцієнта зв'язку і розподілу поля резонатору, перерахунку порогової потужності в порогову амплітуду і, нарешті, розрахунку параметрів релаксації. При цьому накопичується похибка, яка складає у кращому випадку декілька десятків відсотків. У деяких випадках, наприклад, при використанні для неруйнівного контролю відкритих діелектричних резонаторів, де через вплив зовнішніх граничних умов не існує однозначного зв'язку між полем в резонаторі та падаючою на нього потужністю, можливі лише відносні вимірювання [6]. Крім того, спосіб-прототип відноситься до непрямих методів вимірювання, оскільки дозволяє визначати частоту релаксації спінових хвиль не за характеристиками затухання сигналів у часі, а за величиною порогового поля накачки.

В основу корисної моделі поставлена задача створення прямого методу вимірювання частоти релаксації спінових хвиль по затуханню їхньої амплітуди зі збільшенням часового проміжку між подачею першого високочастотного імпульсу і ввімкненням другого високочастотного імпульсу великої потужності, що достатня для спостереження параметричної взаємодії електромагнітної накачки з спіновими хвилями у феромагнітних плівках. Це дозволить значно спростити процедуру експериментального визначення релаксаційних параметрів плівок і суттєво підвищити їх точність за рахунок виключення з процедури вимірів складних методів визначення допоміжних параметрів матеріалу і експериментальної установки.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення частоти релаксації спінових хвиль в магнітних плівках, який включає одночасну дію на матеріал направлених паралельно одне одному постійного однорідного магнітного поля і надвисокочастотного магнітного поля накачки і наступне дослідження наслідків впливу їх на амплітуди спінових хвиль феритових матеріалів, згідно з корисною моделю, що заявляється, проводять дослідження параметричного підсилення накачкою спінових хвиль, створюючи їх надлишкову кількість шляхом подачі додаткового надвисокочастотного сигнального імпульсу до моменту ввімкнення накачки, і визначають параметри релаксації амплітуди сигналу обернення хвильового фронту за вимірами у двох різних моментах часу, а частоту релаксації

спінових хвиль  $\omega_{rk}$  визначають за формулою:

$$\omega_{rk} = \frac{[A_r(T_{p1})/A_r(T_{p2})]_{dB}}{17,36(T_{p2} - T_{p1})}, \quad (2)$$

де  $A_r(t)$  - амплітуда вихідного сигналу,  $\omega_{rk} = [A_r(T_{p1})/A_r(T_{p2})]_{dB}$  - відношення амплітуд сигналів, що подане в децибелах,  $t = T_{p1}$  і  $t = T_{p2}$  - моменти часу, коли проводять виміри.

Сукупність нових ознак, а саме подача на вхідну антену додаткового сигнального імпульсу до ввімкнення накачки і послідовні вимірювання амплітуди сигналів обернення хвильового фронту в два близькі моменти часу, приводять до того, що необхідні експериментальні виміри можуть бути виконані простим атенуаторним компенсаційним методом з похибкою, що звичайно не перевищує декількох процентів. Тепер немає потреби визначати додаткові характеристики, такі як порогова потужність високочастотного магнітного поля, добротність, коефіцієнт зв'язку і розподіл поля резонатору, а також проводити додаткові перерахунки, як у випадку прототипу, і це суттєво спрощує процес вимірювання. Перевагою способу, що заявляється як Корисна модель, перед відомими, зокрема, методом магнітної ями [2] і прямокутного плівкового резонатору [3], є те, що вимірюється безпосередньо параметр релаксації

$\omega_{rk}$ , а не інші характеристики, зокрема, ширина лінії феромагнітного резонансу  $\Delta H_k$ .

Для пояснення суті способу, що заявляється як Корисна модель, необхідно розглянути особливості збудження магнітостатичних і спінових хвиль в феритовій плівці. Сигнальний імпульс за допомогою вхідної антени збуджує у зразку спектр магнітостатичних та спінових хвиль з хвильовими числами  $k$  в межах

$10^2 \text{ см}^{-1} \leq k \leq 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Нижня границя відповідає прямому збудженню антеною магнітостатичних хвиль, верхня - збудженню спінових хвиль в основному за рахунок двомагнітного розсіяння цих хвиль на неоднорідностях матеріалу, які завжди присутні у реальних зразках [1]. На експерименті створюються умови для підсилення та обернення хвильового фронту спінових хвиль

частоти  $\omega_k$  параметричною накачкою частоти

$\omega_p = 2\omega_k$  [7]. На відміну від способу-прототипу взаємодія накачки відбувається зі спіновими хвилями, які штучно створені шляхом подачі додаткового сигнального імпульсом частоти

$\omega_s \approx \omega_k = \omega_p/2$ , а не з тепловими спіновими хвилями.

Позначимо амплітуди цих хвиль, які встановилися в результаті дії сигналу, відповідно  $a_0$  та  $a_k$ . При цьому амплітуди  $a_0$ ,  $a_k$  можуть суттєво перевищувати тепловий рівень  $a_T$ :  $a_0, a_k \gg a_T$ ; через неефективність двомагнітного розсіяння у ідеальних кристалах звичайно  $a_0 \gg a_k$ . Після вимкнення сигнального імпульсу при  $t = 0$  амплітуди збуджених ним хвиль почнуть зменшуватися за експоненціальним законом, в результаті чого сумарна амплітуда

магнітостатичних і спінових хвиль в певний момент часу  $t$  буде мати вигляд

$$A = a_0 e^{-\omega_r t} + a_k e^{-\omega_k t}, \quad (3)$$

де  $\omega_r$  - частота релаксації магнітостатичних хвиль,  $\omega_k$  - частота релаксації спінових хвиль, яку необхідно визначити. Якщо тепер в момент  $t = T_p > 0$  на магнітну плівку буде подано короткий імпульс електромагнітної накачки достатньо великої потужності, він приведе до параметричного підсилення спінових хвиль і виникнення "холостих" обернених хвиль, котрі будуть розповсюджуватися у зворотному напрямку до вхідної антени і досягнуть її, незалежно від швидкості хвилі, у момент часу  $t = 2T_p$ . Таким чином, на вхідній антені при  $t = 2T_p$  виникне вихідний сигнал  $A_r$ , пропорційний амплітуді спінових хвиль, які досягли вхідної антени. У відповідності з (3)

$$A_r = G_0 a_0 e^{-\omega_r 2T_p} + G_k a_k e^{-\omega_k 2T_p}, \quad (4)$$

де  $G_0, G_k$  - коефіцієнти параметричного підсилення, які залежать від потужності та тривалості імпульсу накачки, звичайно  $G \sim 20$  дБ [7].

Через велике значення хвильового числа ( $k \leq 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) та близької до нуля швидкості розповсюдження [1], затухання спінових хвиль практично не залежить від стану поверхні зразка, для них відсутнє помітне радіаційне затухання, обумовлене випромінюванням електромагнітної енергії у зовнішні канали. Тому частота релаксації цих хвиль є власною характеристикою матеріалу і вона завжди суттєво нижча, ніж для всіх інших, у тому числі і магнітостатичних хвиль:  $\omega_k \ll \omega_r$  [1]. Через цю обставину, не дивлячись на те, що початкова амплітуда магнітостатичних хвиль  $a_0$  суттєво більша початкової амплітуди спінових хвиль ( $a_0 \gg a_k$ ), із збільшенням часу затримки  $T_p$  моменту ввімкнення імпульсу накачки другий доданок в (4) через присутність повільної експоненти стане суттєво більший за перший.

Таким чином, при великих  $T_p$  ( $T_p > \omega_r^{-1}$ ) амплітуда вихідного оберненого сигналу  $A_r$  на вхідній антені буде експоненційно зменшуватися з ростом  $T_p$  з показником експоненти, пропорційним частоті

релаксації спінових хвиль:  $A_r \sim e^{-2T_p \omega_k}$ . Із цієї залежності  $A_r(T_p)$  може бути визначена частота

релаксації спінових хвиль  $\omega_k$ . Для цього її потрібно побудувати в логарифмічному масштабі, де вона буде представляти пряму лінію з

тангенсом кута нахилу, рівним  $2\omega_k$ . При переході до децибел отримаємо практичну формулу (2).

Приклад конкретного використання способу, що заявляється, пояснимо за допомогою наступних фігур креслення.

На Фіг.1 показаний один із можливих варіантів приладу для визначення частоти релаксації спінових хвиль, який застосовується для неруйнівного контролю параметрів спінових хвиль феритових плівок.

На фіг.2 показана отримана на експерименті, проведеному на базі приладу, зображеному на

Фіг.1, залежність вихідної потужності сигналу обернення хвильового фронту магнітостатичних і дипольно-обмінних спінових хвиль від часу затримки подачі накачки відносно переднього фронту додаткового вхідного сигнального імпульсу в логарифмічному масштабі.

Прилад для визначення частоти релаксації спінових хвиль складається з гадоліній-галієвій підкладки 1 прямокутної форми, на якій епітаксially вирощують плівку залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) на нижній поверхні 2. Така структура з феритової плівки на підкладці звичайно використовується як хвилевід магнітостатичних хвиль (МСХ). Середня частина цієї структури розміщена всередині прямокутного відкритого діелектричного резонатора 3. Вузкий мікросмужковий перетворювач 4 (шириною  $W = 10$  мкм) розташований з одного боку резонатора 3 і використовується для збудження та прийому імпульсного сигналу магнітостатичних і короткохвильових дипольно-обмінних спінових хвиль (ДОСХ). Поглинач 5 розташований з другого боку діелектричного резонатора 3 і поглинає всі сигнали, які досягають другого кінця хвилеводу магнітостатичних хвиль (плівковий ЗІГ - хвилевід).

Плівковий хвилевід мав наступні розміри: товщина плівки ЗІГ, що вирощена на поверхні підкладки 1, - 7,4 мкм, ширина - 1,5 мм, довжина - 20 мм. Зовнішнє постійне магнітне поле  $H_0 = 1100$  Е було прикладене вздовж осі хвилеводу, що відповідає геометрії зворотних об'ємних магнітостатичних хвиль (ЗОМСХ) [1].

Спосіб визначення частоти релаксації спінових хвиль здійснюють наступним чином. Імпульсне електромагнітне поле накачки з несучою частотою

$\omega_p$ , в два рази більшою за несучу частоту

вхідного НВЧ сигналу  $\omega_s$  ( $\omega_p \approx 2\omega_s$ ), створюють за допомогою відкритого діелектричного резонатора 3 (довжина вздовж вісі  $D = 4$  мм) з термостабільної кераміки з діелектричною проникністю  $\epsilon = 80$ . НВЧ магнітне поле накачки в резонаторі 3 направлено паралельно постійному магнітному полю  $H_0$ . Резонатор 3 розміщують у отворі стандартного прямокутного хвилеводу з основною модою  $H_{10}$  (не показано на фіг.1). Цей прямокутний хвилевід використовують для подачі на резонатор від магнетрону мікрохвильового

імпульсу накачки з несучою частотою  $\omega_p / 2\pi = 9,4$

ГГц, тривалістю  $\tau_p = 5 \div 300$  нс та максимальною потужністю накачки  $P_p = 5$  Вт.

Вхідний прямокутний НВЧ імпульс з несучою

частотою  $\omega_s / 2\pi \approx 4,7$  ГГц, тривалістю  $\tau_s = 20$  нс та потужністю  $P_s < 1$  мВт подають на мікросмужковий перетворювач 4 у момент часу  $t=0$ . Цей імпульс збуджує у плівці ЗІГ, яка епітаксially вирощена на поверхні 2 підкладки 1, два хвильових пакета: пакет ЗОМСХ з великою довжиною хвилі з несучим хвильовим числом

$k \sim 10^2 \text{ см}^{-1}$  і груповою швидкістю  $v_{gm} = 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ , та пакет ДОСХ з несучим хвильовим числом  $k \sim 10^4$

$\text{см}^{-1}$  та груповою швидкістю  $v_{gm} \sim 10^3 \text{ см/с}$ .

Два збуджені хвильові пакети розділяються у просторі під час розповсюдження від перетворювача 4 до діелектричного резонатора 3 завдяки різниці у групових швидкостях та часу затухання згідно з різними параметрами релаксації.

В момент  $t = T_p$  до резонатору 3 прикладають імпульс накачки тривалістю  $\tau_p = 0$  не та несучою

частотою  $\omega_p = 2\omega_s$ . Завдяки параметричній взаємодії з накачкою сигнальні хвильові пакети підсилюються та продовжують розповсюджуватися до другого кінця плівки, де вони поглинаються поглиначем 5. В той же час, параметрична взаємодія з накачкою приводить до формування фазово-спряжених та обернених хвильових пакетів на "холостій" частоті  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ , що розповсюджуються у напрямку вхідного перетворювача 4. Незалежно від їх групової швидкості, всі спінові хвилі повернуться до вхідного перетворювача 4 одночасно у момент  $t \cong 2T_p$ : швидші хвилі пробігають більшу відстань, але час затримки для всіх хвиль однаковий і дорівнює  $T = 2T_p$ .

З рівняння (4) видно, що при затримці ввімкнення імпульсу накачки  $T_p < 2\omega_0^{-1}$ , пакет ЗОМСХ забезпечує головний внесок у вихідний сигнал завдяки великій різниці у початкових амплітудах пакетів. Однак, із збільшенням часу

затримки (при  $T_p > 2\omega_0^{-1}$ ) все більший відносний внесок у вихідний сигнал буде забезпечуватися за допомогою пакету ДОСХ, оскільки він має відносно малий параметр затухання.

Таким чином, залежність амплітуди вихідного сигналу  $A_r$  від часу затримки ввімкнення накачки  $T_p$ , накреслена у логарифмічному масштабі, матиме дві чітко визначені лінійні області з різними нахилами: одна (при малих часах затримки) має

нахил, пропорційний до параметру затухання  $\omega_0$  пакету ЗОМСХ, а друга (при великих часах затримки) має суттєво менший нахил,

пропорційний до параметру затухання  $\omega_{rk}$  пакету спінових хвиль.

Отримана типова експериментальна залежність вихідної потужності  $A_r$  від часу  $T_p$  подачі накачки показана на Фіг.2 при наступних

експериментальних параметрах:  $P_p = 5$  Вт,  $\tau_p = 50$

не,  $\tau_s = 20$  не. У хорошій якійсній відповідності до теоретичного виразу (4) ця залежність має дві відносно лінійні частини згідно з основним внеском пакету ЗОМСХ при малих значеннях  $T_p$  ( $60 < T_p < 120$  нс) та основним внеском пакету спінових хвиль при великих значеннях  $T_p$  ( $T_p > 150$  нс).

Параметр релаксації спінових хвиль  $\omega_{rk}$  визначається за формулою (2) з нахилу кривої  $A_r(T_p)$  у другій лінійній області на фіг.2; він складає  $1.9 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>, що відповідає ширині лінії спінових хвиль  $\Delta H_k = 0,22$  Е.

В таблиці приведені результати визначення параметрів релаксації  $\omega_{rk}$  і ширини лінії спінових хвиль  $\Delta H_k$  зразків плівок залізо-ітрієвого гранату різної товщини d.

Таблиця

№	d, мкм	$\omega_{rk}, 10^6 \text{с}^{-1}$	$\Delta H_k, \text{Е}$
1	7,4	1,9	0,22
2	23,8	2,2	0,25
3	24,5	2,4	0,27
4	30,2	2,2	0,25

Як видно з таблиці, в усіх випадках ширина лінії спінових хвиль  $\Delta H_k$  має величину близько 0,25 Е, яка визначається властивостями матеріалу, з якого зроблені плівки, - залізо-ітрієвого гранату, а не геометричними розмірами зразків і товщиною епітаксially вирошчених плівок. Це суттєво відрізняє спосіб, що пропонується, від відомих спектроскопічних методів, де наявна сильна залежність вимірювальних величин від товщини плівки.

При отриманні експериментальних даних визначали лише амплітуди сигналів обернення хвильового фронту в два близькі моменти часу за допомогою поляризаційного атенюатора з похибкою, що не перевищувала декілька процентів. В прототипі необхідно визначати сукупність параметрів установки і матеріалу: порогову потужність височастотного магнітного поля, добротність, коефіцієнт зв'язку і розподіл поля резонатору, і проводити додаткові перерахунки, що приводить до великої загальної похибки у десятки процентів.

Таким чином, спосіб визначення частоти релаксації спінових хвиль в магнітних плівках, що пропонується, дозволяє значно спростити процедуру

експериментального визначення релаксаційних параметрів плівок і суттєво підвищити точність результатів за рахунок виключення з процедури вимірів складних методів визначення допоміжних параметрів матеріалу і експериментальної установки.

Джерела інформації

1. Gurevich A. G., Melkov G. A. Magnetization Oscillations and Waves. CRC Press, N.Y., 1996.

2. Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Надеев М.М. Локальные измерения магнитной диссипации в ферродиелектрических пленках методом "магнитной ямы"// Тез.докл. Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. Москва, Изд-во МГУ, 1983. - С. 206-207.

3. Storey B.E., Tooke A.O., Cracknell A.P., Przyslaw J.A. The determination of the frequencies of magnetostatic modes in rectangular thin films of ferrimagnetic yttrium iron garnet// J.Phys.C : Solid State Phys. - 1977. - V.10, N 3. - P. 875-888.

4. Моносов Я.А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. Москва, "Наука", 1971.-210 с.

5. Опис до А.С. СРСР № 310202, МПК G 01g 33/02.

6. Опис до А.С. СРСР № 1652816, МПК<sup>5</sup> G 01 B15/00.

7. Melkov G.A., Vasyuchka V.I., Kobljanskyj Yu.V., Slavin A.N. Wave-front reversal in a medium with inhomogeneities and an anisotropic wave spectrum// Phys.Rev.B. - 2004. V. 70, N 22. - 224407 (7 pages).

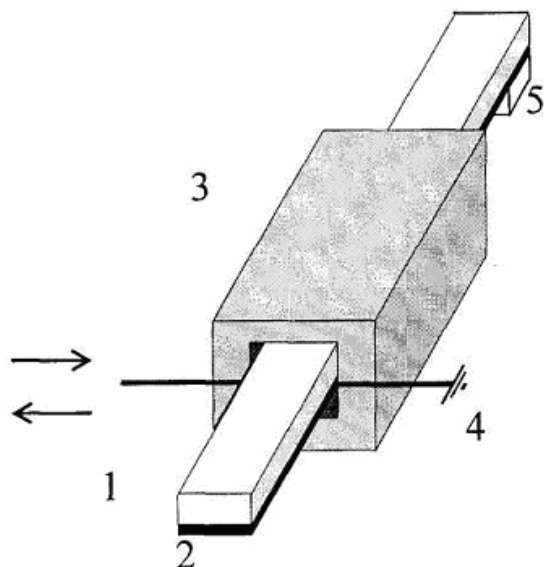


Fig. 1

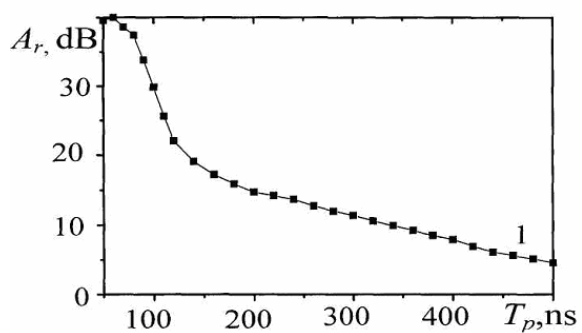


Fig. 2