

В.В. Браїловський, А.П. Саміла, О.Г. Хандожко
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
кафедра радіотехніки та інформаційної безпеки

ТОПОЛОГІЯ НАПРУЖЕНОСТІ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ КОТУШКИ ДАВАЧА РАДІОСПЕКТРОМЕТРА

© Браїловський В.В., Саміла А.П., Хандожко О.Г., 2009

V.V. Brailovsky, A.P. Samila, O.G. Khandozhko

TOPOLOGY OF HIGH-FREQUENCY FIELD STRENGTH OF MICROWAVE SPECTROMETER SENSOR COIL

© Brailovsky V.V., Samila A.P., Khandozhko O.G., 2009

Досліджено топологію напруженості високочастотного поля котушок різної форми давача радіоспектрометра ЯМР і ЯКР. Найбільша область однорідного поля спостерігається в котушках із змінним кроком намотування витків. Розбіжність профілів залежності інтенсивності ЕПР і напруженості високочастотного поля B_1 пояснюється впливом крайового розсіювання напруженості поля на потокозчеплення магнітного поля котушки зі спіновою системою випробувального зразка ДФПГ.

Topology of high-frequency field strength of various-shaped coils of NMR and NQR microwave spectrometer sensor is investigated. The largest area of homogeneous field is observed in the coils with variable winding pitch. The discrepancy in dependence profiles of EPR intensity and high-frequency field strength B_1 is attributable to the effect of edge scattering of field strength on the flux linkage of coil magnetic field with the spin system of DPPH sample under test.

Постановка проблеми

Важливою технічною характеристикою радіоспектрометрів ядерного магнітного резонансу (ЯМР), ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР), електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) є їх чутливість, яка визначається найчастіше кількістю спінів в одиниці об'єму (один кубічний сантиметр) конкретної речовини. Але на практиці зручніше оцінювати відносну чутливість за величиною співвідношення сигнал/шум на виході спектрометра (S/N). Останнє визначається коефіцієнтом шуму вхідного каскаду радіоспектрометра і насамперед якістю приймальної котушки або резонатора. Для аналітичної оцінки співвідношення S/N спектрометрів, які працюють у метровому радіодіапазоні, можна застосувати формулу [1]:

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{w_0^3 \cdot h \cdot Q \cdot V_s}{2 \cdot m_0 \cdot k \cdot T \cdot F \cdot b_R} \cdot \frac{T_2}{T_1} \right)^{1/2} \cdot \frac{c_0}{g}, \quad (1)$$

де h – коефіцієнт заповнення; Q – добротність резонансного контуру; V_s – об'єм зразка; T_1 і T_2 – час ядерної спін-гратчатої та спін-спінової релаксації; m_0 – магнітна проникливість середовища; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; F – коефіцієнт шуму попереднього підсилювача; b_R – ширина смуги пропускання підсилювального тракту радіоспектрометра; c_0 – магнітна сприйнятливості досліджуваної речовини; g – гіромагнітне відношення для резонуючих ядер.

З формули (1) бачимо, що за усіх інших умов під час формування співвідношення S/N основну роль відіграє фактор якості приймальної котушки hQ . Збільшити добротність котушки

можна оптимальним поєднанням конструктивних особливостей: кількості витків, якості дроту, конфігурації форми, індуктивності для заданої частоти тощо.

Параметр h – коефіцієнт заповнення котушки зразком – залежить від об'єму котушки, заповненого речовиною. Насправді він залежить ще і від однорідності поля, в якому знаходиться зразок. Тому вводять деяке ефективне значення h' , яке залежить від розподілу високочастотного поля у зразку, що заповнює котушку. Це особливо важливо за імпульсного детектування сигналу резонансу, де максимальна інтенсивність сигналу відгуку значною мірою залежить від напруженості високочастотного поля в котушці (B_1) під час дії імпульсу тривалістю t_i і досягається за умови [2]:

$$gB_1 t_i = p / 2, \quad (2)$$

де $p / 2$ – кут повороту ядерних спінів.

У порошкоподібних зразках для ЯКР такий кут може становити 0,6бл. За наявності градієнта напруженості високочастотного поля у межах зразка під час формування сигналу відгуку спостерігається “розпливання” сумарного вектора намагніченості спінів, що призводить до розширення сигналу резонансу і зниження амплітуди його інтенсивності. Підвищення однорідності високочастотного поля особливо важливе за детектування слабких сигналів, які спостерігаються під час дослідження речовин з малою природною поширеністю магнітоактивних ядер. За неоднорідного високочастотного поля повне заповнення котушки досліджуваною речовиною не приводить до очікуваного підсилення сигналу згідно з формулою (1). Тому під час вибору конфігурації котушки і її виготовлення чинник якості hQ з урахуванням однорідності поля відіграє вирішальне значення в забезпеченні оптимальних умов отримання сигналу резонансу.

Здебільшого давачем сигналу ядерної індукції в радіоспектрометрах ЯКР і ЯМР використовують котушки соленоїдальної форми. Сигнал резонансу виникає за рахунок взаємодії ядерних магнітних моментів з високочастотним полем котушки B_1 . Індукція магнітного поля в середовищі з абсолютною магнітною проникливістю m_a у точці на аксіальній осі стосовно “тонкого” соленоїда дорівнює [3]:

$$B_x = m_a IN (\cos a_1 - \cos a_2) / 2L, \quad (3)$$

де I – струм в соленоїді; N – кількість витків намотки; L – довжина намотки; a_1 і a_2 – кути, під якими видно краї соленоїда. Різниця косинусів кутів виражає залежність величини поля від відстані до центра котушки (рис. 1).

У спектрометрах ЯМР високої роздільної здатності застосовують котушки, довжина яких значно перевищує розміри зразка. При цьому коефіцієнт заповнення h може становити 0,07 і зразок по відношенню до об'єму котушки можна вважати майже точковим [4]. У цьому випадку можна вважати $\cos a_1 - \cos a_2 \approx 2$, а поле всередині котушки досягає максимальної однорідності:

$$B_x = m_a IN / L. \quad (4)$$

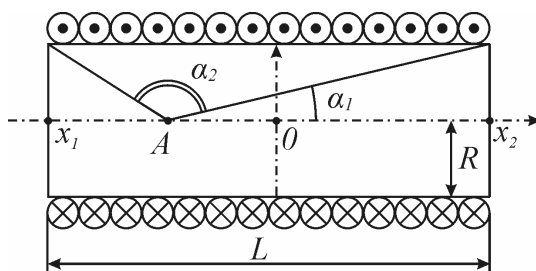


Рис. 1. Поздовжній переріз соленоїда по осі аксіальної симетрії

У разі детектування протонного сигналу формула (4) може бути прийнятною, оскільки інтенсивність резонансу 1H висока і це компенсує малий коефіцієнт заповнення. Для ЯКР такі умови не завжди сприятливі, особливо за детектування резонансу азоту. Через малу інтенсивність сигналу доводиться використовувати порівняно великі об'єми котушок і максимально можливі h , тобто фактично повністю заповнювати об'єм котушки речовиною. Це висуває особливі вимоги до однорідності напруженості високочастотного поля B_1 в котушці давача радіоспектрометра. Для котушки соленоїдадньої форми поле максимальне у центрі геометричної симетрії і знижується при наближенні до її країв ($\cos a'_1 = \cos a'_2 = \cos a'$):

$$B_x = m_a IN \cos a' / L. \quad (5)$$

Результуюче значення розподілу напруженості високочастотного поля на аксіальній осі котушки в межах від x_1 до x_2 можна записати так [3]:

$$\bar{B}_x = \frac{m_a IN}{2L} \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} \left[\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x_2\right)^2 + R^2} - \sqrt{\left(\frac{L}{2} + x_1\right)^2 + R^2} - \sqrt{\left(\frac{L}{2} - x_2\right)^2 + R^2} + \sqrt{\left(\frac{L}{2} - x_1\right)^2 + R^2} \right]. \quad (6)$$

При розташуванні зразка симетрично щодо центра ($x_2 = |-x_1| = x$):

$$\bar{B}_x = \frac{m_a IN}{2L} \cdot \frac{1}{x} \left[\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + R^2} - \sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + R^2} \right]. \quad (7)$$

Експериментальні результати та їхнє обговорення

У цій роботі наведено результати дослідження топології напруженості високочастотного поля у приймальній котушці автодинного спін-детектора радіоспектрометра ЯКР з метою покращання однорідності розподілу напруженості високочастотного поля. Експериментальні вимірювання високочастотного поля проведені в котушках циліндричної форми, виконаних у трьох модифікаціях намотування з рівними об'ємами робочого простору ($V=7,94 \text{ см}^3$, $R=0,85 \text{ см}$) (рис. 2).

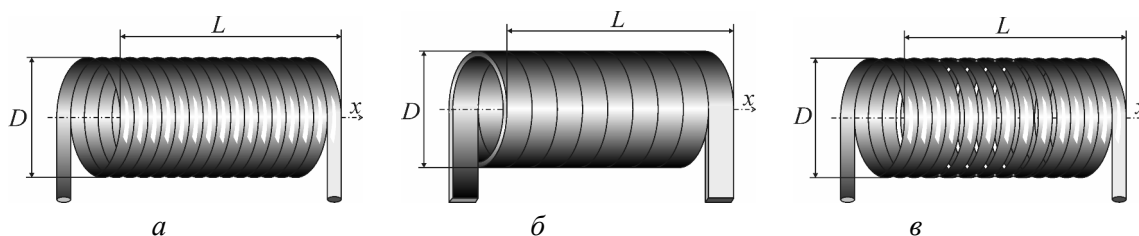


Рис. 2. Зовнішній вигляд досліджуваних котушок:

a – котушка з дроту круглого перерізу; *б* – котушка з плоскої шинки; *в* – котушка із змінним кроком

Для зняття топології розподілу поля використовувався двокоординатний пристрій з котушкою – пробником об'єму $\sim 1 \text{ мм}^3$. За допомогою останнього можна було контролювати у котушці поздовжню (B_x) та радіальну (B_r) компоненти високочастотного поля. Напруга, наведена на вимірювальну котушку, контролювалася вольтметром ВЗ-48 А. Виміри проводились на частоті 20 МГц. На рис. 3 показано відносний розподіл напруженості високочастотного поля $B_1(x)/B_1(0)$ для трьох наведених вище варіантів котушок.

З результатів вимірювань випливає, що найбільша область з однорідним розподілом поля $h(C)$ розміщена уздовж осі симетрії в котушці, виконаній із змінним кроком намотування і становить $\approx 73 \%$ від довжини котушки. При цьому центральна частина котушки (7 витків) намотана з кроком $3r$, де r – радіус дроту намотування, а по краях соленоїда додано по 4 витки суцільного намотування з метою компенсації зниження рівня високочастотного поля. Очевидно, що для досягнення максимальної компенсації крайового ефекту необхідно збільшувати густину витків

на кінцях соленоїда, що повинно приводити до виникнення другого шару намотування. Оскільки останнє призводить до зменшення коефіцієнта заповнення, то необхідно забезпечувати компромісне рішення між однорідністю B_1 і коефіцієнтом заповнення h , враховуючи співвідношення сигнал/шум на виході радіоспектрометра.

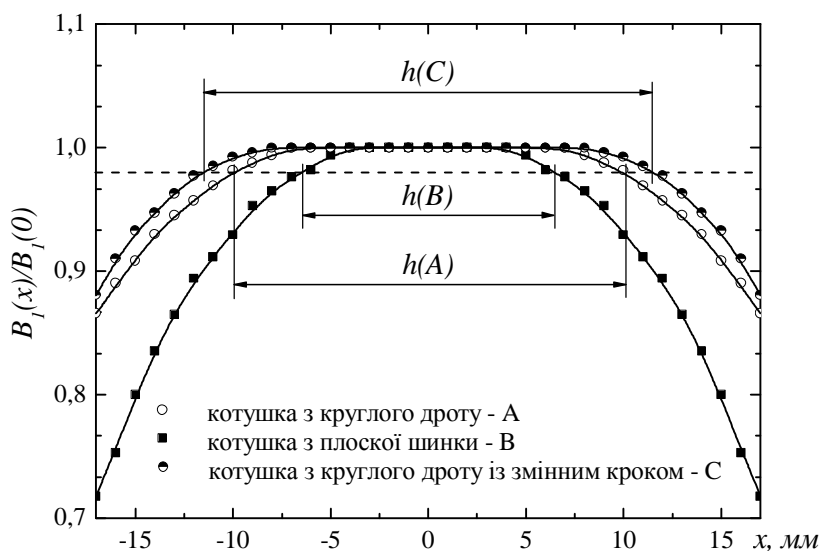


Рис. 3. Розподіл високочастотного поля вздовж аксіальних осей соленоїдальних котушок: $B_1(x)$ – поточні значення напруженості високочастотного поля; $B_1(0)$ – напруженість поля в центрі симетрії соленоїда; $h(A)$, $h(B)$ та $h(C)$ – зони з неоднорідністю високочастотного поля $\approx 2\%$ для котушок А, В та С

Котушку із змінним кроком (рис. 2, в) було підключено до радіоспектрометра з метою дослідження залежності інтенсивності сигналу від розташування в котушці випробувальної речовини. Останню використовували як дифенілпікрилгідрозіл (ДФПГ), що застосовується для калібрування резонансних спектрів в ЕПР. Завдяки високій інтенсивності сигналу ДФПГ в малій кількості можна застосувати для створення майже “точкового” давача величини напруженості поля B_1 у котушках спін-детекторів ЯКР та ЯМР. У нашому випадку об’єм ДФПГ становив $\sim 10 \text{ мм}^3$.

Основну частину установки радіоспектрометра, що використовувалась для проведення вимірів, зображено на рис. 4.

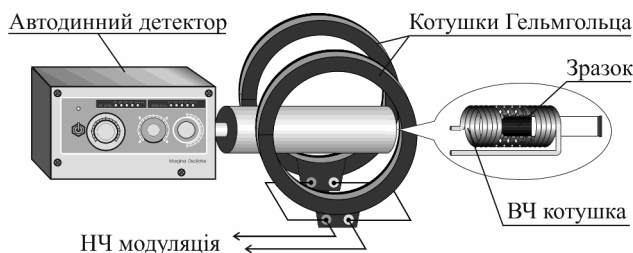


Рис. 4. Схема вхідної частини радіоспектрометра

На рис. 5 (вставка) показано зображення ЕПР-сигналу лоренцевої форми, одержане за допомогою осцилографа Tektronix TDS1012. Два піки з’являються за рахунок того, що умови резонансу виконуються двічі за період модуляції магнітного поля у котушках Гельмгольца. Вимірювання інтенсивності сигналу проводилось за кімнатної температури на частоті порядку 20 МГц. При цьому зразок ДФПГ переміщувався вздовж аксіальної осі досліджуваної котушки з кроком 1 мм. Під час вимірювання вважалося, що залежність інтенсивності резонансного сигналу парамагнітних центрів в ДФПГ від напруженості високочастотного поля є лінійною [4], тобто насичення лінії відсутнє.

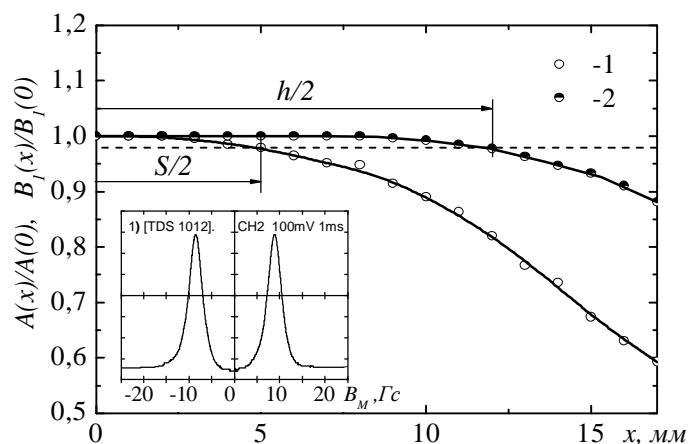


Рис. 5. Порівняльні залежності середньоквадратичної величини сигналу ЕПР (крива 1) та розподілу напруженості високочастотного поля (крива 2) від розміщення датчиків на осі циліндричної котушки

Як бачимо з рис. 5, за наближення до країв котушки профіль залежності відносної інтенсивності сигналу $A(x)/A(0)$ не повторює відносну зміну $B(x)/B(0)$: зменшення амплітуди починається раніше, ніж пониження напруженості поля B_x . Можливо це зумовлено малими розмірами випробувального зразка і відповідно невеликим h , що викликає вплив крайового розподілу напруженості B_1 на потікозчеплення магнітного поля котушки зі спіновою системою випробувального зразка [3]. У цьому випадку для досягнення максимального значення сигналу потрібно брати об'єм зразка, який повністю заповнює область котушки з допустимою однорідністю B_1 .

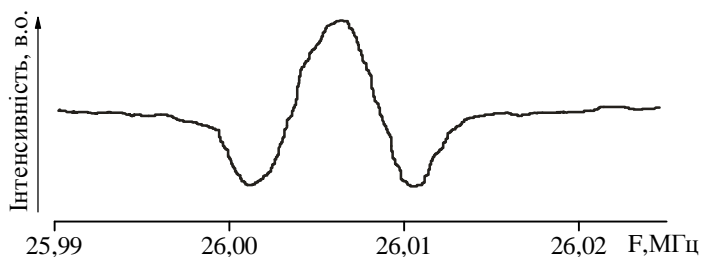


Рис. 6. Спектр ЯКР в Cu_2O за кімнатної температури

За допомогою автодинного спін-детектора, в якому була застосована котушка із змінним кроком намотування (рис. 2, в), вивчався ЯКР ^{63}Cu в сполуці Gu_2O . Ця сполука завдяки сильній температурній залежності (резонансна частота $\sim 3,18$ кГц/К в області 77–300 К) [5] може бути застосована як термометрична речовина у вторинних еталонах температури. Для досліджень використовувалися зразки об'ємом близько 2 cm^3 у вигляді дрібнодисперсного порошку. Мета досліджень полягала у визначенні ширини резонансної лінії від умов приготування зразка. Це пов'язано з тим, що на точність вимірювання температури насамперед впливає ширина лінії і за її зменшення точність визначення температури збільшується. На рис. 6 зображений спектр ЯКР ^{63}Cu в Gu_2O , записаний на частоті 26,006 МГц за $T = 293 \text{ K}$.

Висновки

Досліджено топологію напруженості високочастотного поля для трьох типів котушок соленоїдальної форми датча радіоспектрметра ЯМР і ЯКР: *a* – котушки з дроту круглого перерізу; *b* – котушки з плоскої шинки; *в* – котушка із змінним кроком намотування. Знайдено, що найбільша область однорідного розподілу поля є у соленоїдальних котушках із змінним кроком намотування витків. Це досягається за рахунок компенсації послаблення напруженості поля на краях котушки. Вплив крайового розсіювання напруженості поля на потікозчеплення поля котушки із спіновою

системою малих зразків призводить до розбіжності профілів залежностей інтенсивності резонансного сигналу і V_1 .

1. Шнайдер Г., Дулленкоф П. // Приборы для научн. исслед. – 1977. – Т. 48, № 1. – С. 68–73.
2. Гречишкин В.С., Синяевский Н.Я // Успехи физ. наук. – 1993. – Т. 163, № 10. – С. 96–119.
3. Парселл Э. Электричество и магнетизм. – М., 1971.
4. Леше А. Ядерная индукция. – М., 1963.
5. Matthias Weller. NMR/NQR studies at very low temperatures and high pressures in strongly correlated electron systems // Diss. ETH. – 2008. – №. 17290.

УДК 539.293

В.В. Гоблик, В.А. Павлиш, І.В. Ничай

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

РОЗПОДІЛ ПОЛЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЛАСТИНИ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ ЗМІНИ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ

© Гоблик В.В., Павлиш В.А., Ничай І.В., 2009

V.V. Hoblyk, V.A. Pavlysh, I.V. Nychai

DISTRIBUTING OF THE FIELD OF DIELECTRIC PLATE WITH COMPLEX PROFILE OF DIELECTRIC PERMITTIVITY CHANGE

© Hoblyk V.V., Pavlysh V.A., Nychai I.V., 2009

Для дослідження особливостей формування поля діелектричної пластини зі складним профілем зміни діелектричної проникності наведено математичну модель у вигляді гіллястого ланцюгового дробу. Представлено результати просторового розподілу поля над структурою для різних значень її конструктивних параметрів та параметрів функції, яка описує її діелектричну проникність.

In given paper the mathematical model in form of branched continual fraction for research of features of forming of the field of periodically nonuniform dielectric plate with complex profile of dielectric permittivity change is considered. The numerical results of spatial distribution of the field for the different parameters of function that describe dielectric permittivity of plate are represented.

Вступ

Дослідження закономірностей формування просторово-кутового розподілу поля періодично-неоднорідною діелектричною пластиною (ДП) та особливостей хвильових процесів, що підтримуються такою пластиною, має важливе науково-практичне значення для широкого кола завдань створення елементів сучасних інфокомунікаційних систем з поліпшеними параметрами. Структури з просторовою періодичністю параметрів матеріалів як об'єкт дослідження цієї роботи лежать в основі побудови фотонних, фононних та плазмонних кристалів, просторових фільтрів, комутаторів та маршрутизаторів інформаційних каналів, засобів обробки інформації тощо [1–5].

Особливості формування просторового розподілу поля одновимірних періодично-неоднорідних структур з однократною періодичністю модуляції їх параметрів досліджувались частково в [6–7] з