

УДК 621.373.52:539.1.078
DOI: 10.31891/2219-9365-2021-68-2-1

САМІЛА А. П., САФРОНОВ І. С., ГРЕСЬ О. В.
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОДИННОГО СЕНСОРА ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ З ПІДВИЩЕНОЮ ЛІНІЙНІСТЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ В УМОВАХ ЧАСТОТНОЇ ТА МАГНІТНОЇ МОДУЛЯЦІЙ

Проведено аналіз роботи автодинного сенсора ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) з підвищеною лінійністю перетворення в режимі частотної модуляції. Встановлено, що для отримання оптимальних результатів функція частотної модуляції повинна бути квадратно-прямокутної форми з перемінним знаком відносно нульового рівня. Встановлено, що кращі умови реєстрації резонансного сигналу досягаються з використанням імпульсного магнітного поля також біполярної форми. Проведено SPICE моделювання часових залежностей напруженостей магнітних полів квадратно-прямокутної та біполярної форм в зоні розташування досліджуваного зразка в котушці автодинного ЯКР-сенсора під час проходження умов резонансу, а також гармонічний аналіз модулюючих сигналів. Експериментально підтверджено ефективність застосування методик модуляції Зеємана та безмодуляційного проходження через резонанс в неперервній спектроскопії ЯКР та проведено співставлення отриманих спектрів.

Ключові слова: ядерний квадрупольний резонанс, автодинний сенсор, модуляція, спектр, неперервна спектроскопія.

A. SAMILA, I. SAFRONOV, O. HRES
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

SOME FEATURES OF THE OPERATION MODES OF A CONTINUOUS WAVE NUCLEAR QUADRUPOLE RESONANCE SENSOR WITH INCREASED LINEARITY OF CONVERSION UNDER CONDITIONS OF FREQUENCY AND MAGNETIC MODULATIONS

Despite the fact that in modern radiostereoscopy of nuclear quadrupole resonance (NQR), a mainly pulse method of registration of resonant signals is used, a continuous wave method, the basis of which is the method of marginal oscillator detection of spin resonances, is still quite relevant. In particular, the ability to reconfigure the frequency of the resonance while maintaining high sensitivity in a wide frequency range allows you to successfully use marginal oscillator sensors both when registering the NQR spectra and dimensional resonances and in the development of sensitive sensors of physical quantities.

In this article the analysis of the operation of the marginal oscillator NQR sensor with an increased linearity of the conversion in frequency modulation mode is carried out. It has been established that to obtain optimal results, the frequency modulation function must be squarely rectangular shape with a variable sign relative to the zero level. It has been established that the preferred conditions for registering the resonant signal are achieved using a bipolar form of the pulsed magnetic field. The SPICE modeling of the time dependences of the tensions of magnetic fields of square-rectangular and bipolar forms in the location zone of the studied sample in the coil of the marginal oscillator NQR during the resonance conditions, as well as the harmonic analysis of the modulating signals is carried out. The effectiveness of the application of Zeeman modulation and non-modulation resonance transmission techniques in continuous wave NQR spectroscopy has been experimentally confirmed and the obtained spectra have been compared.

The analysis of the operation of the continuous wave NQR sensor with increased linearity of conversion allowed us to conclude that the considered scheme provided sufficient sensitivity and the S/N ratio in the operating frequency range for NQR studies. The possibility of using the unmodulated passage of the resonance line in continuous NQR by fast scanning by a magnetic field is confirmed, which enables express search of spectra of unknown substances and allows to significantly reduce the experiment time.

Keywords: nuclear quadrupole resonance, marginal oscillator, modulation, spectrum, continuous wave spectroscopy.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Існують неперервні та імпульсні методи спостереження сигналів ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) в діапазоні частот від ~2 МГц до 1000 МГц [1–5]. Не дивлячись на те, що в сучасній радіоспектроскопії застосовується, головним чином, імпульсний метод реєстрації резонансних сигналів, неперервний метод ЯКР, основою якого є методика автодинного детектування спінових резонансів, ще досить актуальний [6,7]. Зокрема, можливість переналаштування частоти резонансу при збереженні високої чутливості в широкому діапазоні частот дозволяє успішно використовувати автодинні сенсори, як при реєстрації спектрів ЯКР [8] і розмірних резонансів [9], так і при розробленні чутливих сенсорів фізичних величин [10].

Виклад основного матеріалу

Принцип роботи автодинного сенсора ЯКР ґрунтується на детектуванні надслабкого поглинання енергії високочастотного (ВЧ) електромагнітного поля досліджуваною речовиною, внаслідок ефекту ЯКР. Чутливим датчиком такого сенсора є автодин – генератор слабких ВЧ коливань, амплітуда яких залежить від внесення втрат в коливальний контур. На частоті ЯКР ядерна спінова система досліджуваного зразка, розміщеного в котушці коливального контуру автодину, поглинає енергію електромагнітного поля, що

призводить до зменшення добротності контуру та викликає зміну амплітуди ВЧ коливань на ньому. Сучасні методи цифрового оброблення слабких сигналів (вузькосмугова синхронна фільтрація, багатоканальне накопичення, усереднення, та інші) уможливають підвищення співвідношення сигнал/шум (С/Ш) на виході автодинного сенсора, що своєю чергою, дозволяє суттєво розширити можливості його прикладного застосування.

Основні функціональні блоки простого автодинного ЯКР-сенсора регенеративного типу показані на схемі, рис. 1 [7,8,10]. Досліджуваний зразок розміщують в котушці індуктивності коливального LC -контур (1) автодину (2). Частота генерованих коливань в контурі може плавно змінюватись при зміні ємності C . При виконанні умов резонансу $\Delta E = h\nu$ (ΔE – різниця енергій квадрупольних рівнів) відбувається поглинання радіочастотної енергії зразком, що викликає зміну активної складової провідності LC -контур та його добротності Q . В неперервних методах для спостереження сигналів ЯКР застосовують частотну або магнітну модуляцію (модуляцію Зеємана) умов резонансу з наступним детектуванням та підсиленням огинаючої зміни ВЧ напруги на LC -контурі автодину [10]. Такий регенеративний сенсор ЯКР стабільно працює в широкому діапазоні частот до 800 МГц.

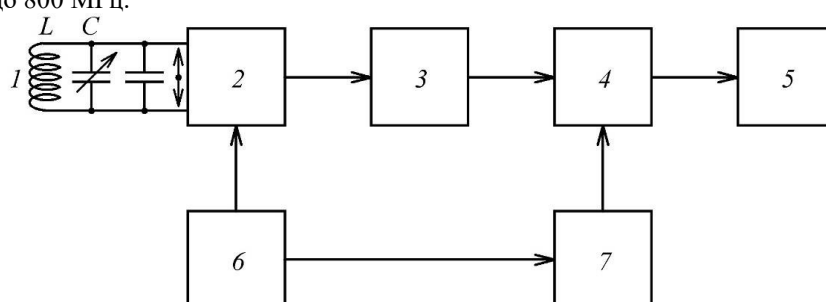


Рис. 1. Спрощена функціональна схема регенеративного сенсора ЯКР: коливальний контур (1), автодин (2), низькочастотний підсилювач (3), фазочутливий детектор (4), ресструючий пристрій (5), модулятор (6), фазоповертач опорної напруги (7)

Аналіз роботи автодинного ЯКР-сенсора в режимах частотної та Зеєман модуляцій. Розглянута на рис. 1 схема забезпечувала достатню чутливість та відношення С/Ш в робочому діапазоні частот для проведення досліджень ЯКР, проте, було виявлено ряд недоліків при роботі в режимі частотної модуляції умов резонансу.

Нехай лінія поглинання характеризується функцією $q(\nu)$, де $\nu = \nu' - \nu_0$, а ν_0 – частота, що відповідає екстремальному значенню $q(\nu)$. Оскільки частотна модуляція у випадку спостереження ЯКР і магнітна модуляція у випадку спостереження ядерного магнітного резонансу еквівалентні, то без додаткового аналізу можна написати формулу, аналогічну формулі Ендрю [11], яка враховує спотворення лінії за рахунок скінченної амплітуди частотної модуляції:

$$S_2^* = S_2^0 + \frac{\nu_M^2}{4}, \quad (1)$$

де S_2^* – другий момент лінії поглинання, що спостерігається в експерименті, S_2^0 – істинний другий момент, ν_M – амплітуда частотної модуляції. Формула (1) отримана в припущенні, що перед фазовим детектором (4 на рис. 1) під'єднано селективний підсилювач, налаштований на першу гармоніку сигналу, а амплітуда модуляції значно менша ширини резонансної лінії. Під другим моментом лінії поглинання приймається наступна інтегральна характеристика контуру лінії:

$$S_2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu^2 q(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} q(\nu) d\nu}. \quad (2)$$

Якщо контур лінії спостерігається експериментально, то її другий момент можна розрахувати методом числового інтегрування.

При виділенні другої гармоніки сигналу буде записуватись друга похідна лінії поглинання. В цьому випадку з допомогою фільтра, налаштованого на першу гармоніку, можна сильно ослабити паразитну амплітудну модуляцію. При цьому необхідно подвоїти частоту опорної напруги, яка подається на фазовий детектор. Розклавши форм-фактор в ряд Тейлора і виділивши коефіцієнт за другою гармонікою, одержимо

$$S_2^* = S_2^0 + \frac{v_M^2}{6} \cdot \quad (3)$$

Отже, при реєстрації другої похідної спотворення за рахунок кінцевої амплітуди модуляції стають навіть меншими, ніж при записі першої похідної. Якщо виділяти третю гармоніку, то відповідає необхідність у використанні подвоювача частоти опорної напруги. Функція спотворення в даному випадку набуде вигляду

$$S_2^* = S_2^0 + \frac{v_M^2}{8} \cdot \quad (4)$$

Застосовуючи частотну модуляцію умов резонансу, синхронне детектування резонансних спектрів здійснюють, як правило, на другій гармоніці модуляційної частоти. При скануванні більш широких ліній з'являється синхронна завада, яка призводить до нахилу базової лінії і спотворення спектру. Вплив апаратних факторів на відтворення форми резонансної лінії детально розглянуто в роботах [12].

Для отримання оптимальних результатів функція частотної модуляції повинна бути квадратно-прямокутної форми з перемінним знаком відносно нульового рівня. Така особлива форма керуючої напруги дозволяє значно послабити рівень 2-ї гармоніки сигналу, на якій зазвичай відбувається синхронне детектування. Але кращі умови реєстрації резонансного сигналу досягаються з використанням імпульсного магнітного поля також біполярної форми. Цей метод дає змогу модулювати резонансні умови в спектрометрі за рахунок модуляції Зеемана, тобто періодичного розщеплення сигналу ЯКР магнітним полем. Внаслідок того, що при модуляції Зеемана відсутні спотворення, визначувані формулами (1) або (3) і (4), ця методика спостереження явища прийнятніша з точки зору відтворення форми, ніж використання частотної модуляції. Необхідно відмітити, що виникаюча асиметрія лінії приводить до зміщення початку відліку.

На рис. 2 зображено результати SPICE моделювання часових залежностей напруженостей магнітних полів квадратно-прямокутної та біполярної форм в робочій зоні (зоні розташування досліджуваного зразка в котушці) автодинного ЯКР-сенсора під час проходження умов резонансу, а також гармонічний аналіз модулюючих сигналів. При дії магнітного поля $+H$ і $-H$ (інтервали $t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$) сигнал ЯКР пригнічується унаслідок розщеплення квадрупольних рівнів енергії і виникає за його відсутності ($t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$) (рис. 2). За період циклу зміни магнітного поля T сигнал ЯКР пригнічується двічі. Для моделювання використано програмний пакет NI Multisim.

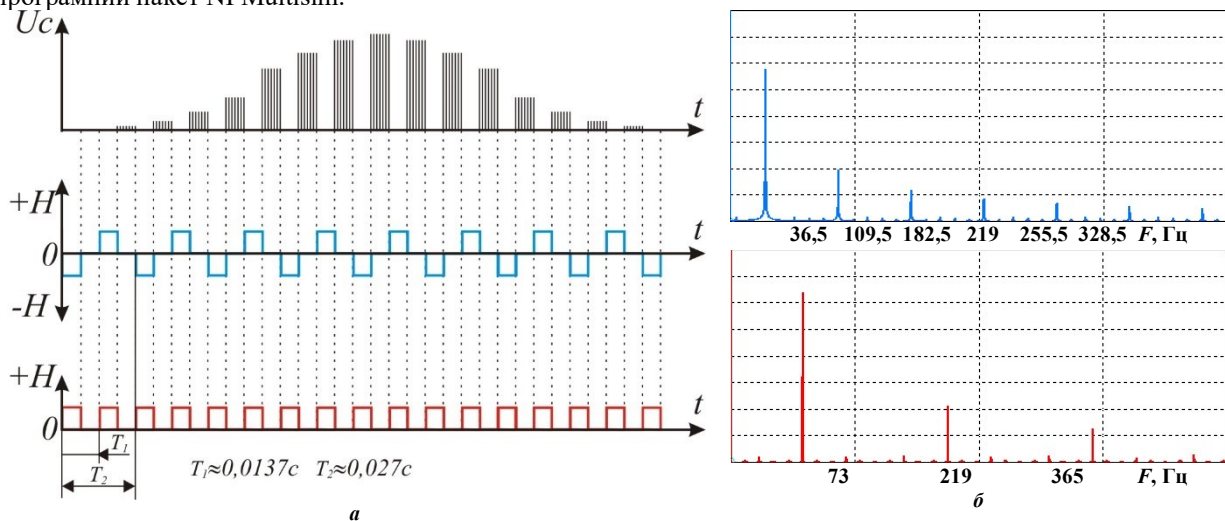


Рис. 2. Результати моделювання залежності сигналу відгуку U_c від форми імпульсів (а) та спектри біполярного магнітного поля прикладеного до зразка (б) для автодинного ЯКР-сенсора

Для апробації методу шляхом експериментальних досліджень ЯКР у шаруватому напівпровідниковому кристалі InSe використовувався модернізований симетричний автодинний ЯКР-сенсор із застосуванням магнітної біполярної модуляції системою котушок Гельмгольца [13]. На рис. 3 зображено вплив виду модуляції умов резонансу (а – частотна модуляція, б – модуляція Зеемана) на нахил базової лінії на прикладі спостереження однієї із компонент мультиплетного спектру ЯКР ^{115}In в InSe. Амплітуда імпульсного магнітного поля в котушках Гельмгольца встановлювалась експериментально і досягала 100 Гс, частота модуляції становила 73 Гц. Час реєстрації спектру склав 5 хвилин.

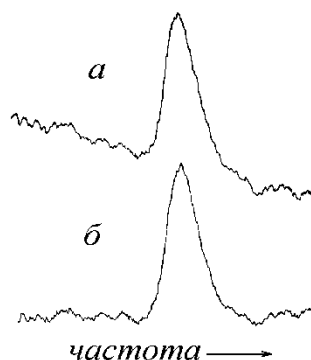


Рис. 3. Приклад реєстрації фрагменту мультиплетного спектру ЯКР ^{115}In в InSe модернізованим симетричним автодинним сенсором: спектр із нахилою базовою лінією (частотна модуляція) (а), спектр без нахилу базової лінії (модуляція Зеемана) (б)

Безмодуляційне проходження резонансної лінії в ЯКР. Застосування методу неперервного усереднення для покращення співвідношення С/Ш у радіоспектроскопії ЯКР дозволяє суттєво зменшити час реєстрації спектрів. Виграш у часі тим більший, чим більше спектральний розподіл шуму відрізняється від "білого" і описується законом $1/f$. Більше того, виграш також спостерігається при скануванні широких ліній, тобто якщо забезпечити широкосмуговість каналу підсилення для збереження інформації про особливості форми спектру. Ця особливість була доведена у роботі [14]. При широкій смузі пропускання каналу підсилення скорочується час сканування спектру і за певний відрізок часу можна зробити якомога більше реалізацій та, відповідно, цифрових накопичень резонансних ліній.

Для перевірки виконання закону \sqrt{n} були проведені експериментальні та теоретичні дослідження співвідношення С/Ш при різних значеннях n . Початкове значення відношення задавалось на рівні $S/N = 1$ при $n = 1$. При визначенні співвідношення С/Ш використовувався графічний метод. Середнє значення корисного сигналу S знаходилось графічним методом за декількома точками на графіку, на якому був зображений зашумлений сигнал при заданій кількості ітерацій. Потім розраховувалось відношення С/Ш при даній кількості розгортки n . Значення S та N визначалися у відносних одиницях.

В результаті усереднення за лінійним алгоритмом були отримані наступні дані.

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{3}{1} = 3 \text{ при } n = 10, \sqrt{n} = 3,16 \\ \frac{S}{N} &= \frac{14}{1,8} = 7,78 \text{ при } n = 50, \sqrt{n} = 7,07 \\ \frac{S}{N} &= \frac{30}{4} = 7,5 \text{ при } n = 100, \sqrt{n} = 10 \\ \frac{S}{N} &= \frac{45}{5} = 9 \text{ при } n = 150, \sqrt{n} = 12,25 \\ \frac{S}{N} &= \frac{60}{5} = 12 \text{ при } n = 200, \sqrt{n} = 14,14 \\ \frac{S}{N} &= \frac{80}{5,5} = 14,5 \text{ при } n = 250, \sqrt{n} = 15,81. \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 4 зображено графік залежності С/Ш від кількості розгортки n при лінійному усередненні сигналу. Відхилення експериментальної залежності від теоретичної можливо пояснити відмінністю спектрального розподілу густини реального шуму від "білого" унаслідок наявності шумів типу $1/f$.

Швидке сканування частоти в ЯКР, особливо при використанні автодинних датчиків викликає певні труднощі. Це обумовлено сильною амплітудною модуляцією сигналу, що виникає при скануванні частоти. Паразитна завада при слабких сигналах утруднює спроби застосувати частотне сканування для усереднення ЯКР спектрів за допомогою швидкого проходження. Однак, при добре продуманій конструкції автодинного датчика, магнітне поле не створює помітних перешкод на вихідний сигнал, що підтверджується застосуванням модуляції Зеемана.

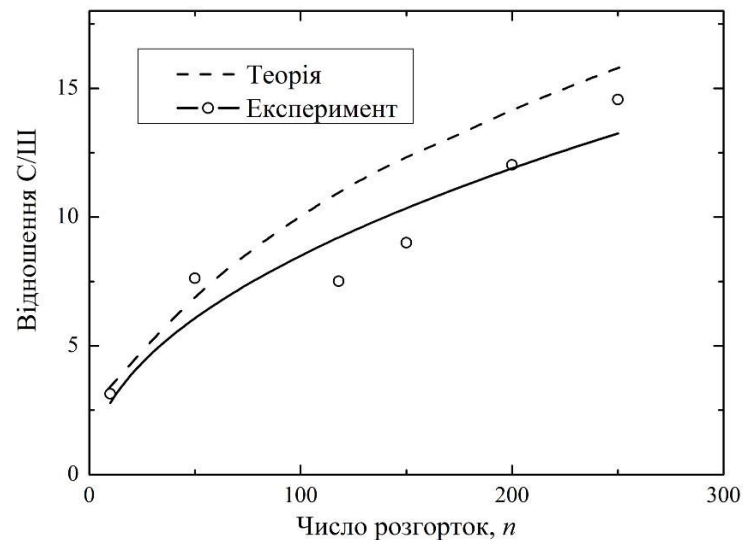


Рис. 4. Графік залежності відношення С/Ш від кількості розгортки сигналу n при лінійному усередненні сигналу

Використовуючи явище ефекту Зєсмана – розщеплення квадрупольних рівнів унаслідок дії магнітного поля можна застосувати цей факт для сканування умов резонансу. Відсутність синхронної завади дозволяє застосувати великі швидкості сканування і, відповідно, здійснити багато реалізацій спектру за певний короткий проміжок часу. Недоліком методу є наявність спотворень форми резонансної лінії унаслідок впливу магнітного поля, тому такий спосіб спостереження ЯКР зручний для експрес-пошуку спектрів невідомих речовин. Тут більш вагомим фактором є суттєва економія часу при збереженні сприйнятливості співвідношення С/Ш. Співставлення методів ілюструється на рис. 5. Форма сигналу на рис. 5,б відображає два дзеркально розташованих сигнали спектру, зображеного на рис. 5,а внаслідок симетричного розщеплення квадрупольних рівнів магнітним полем.

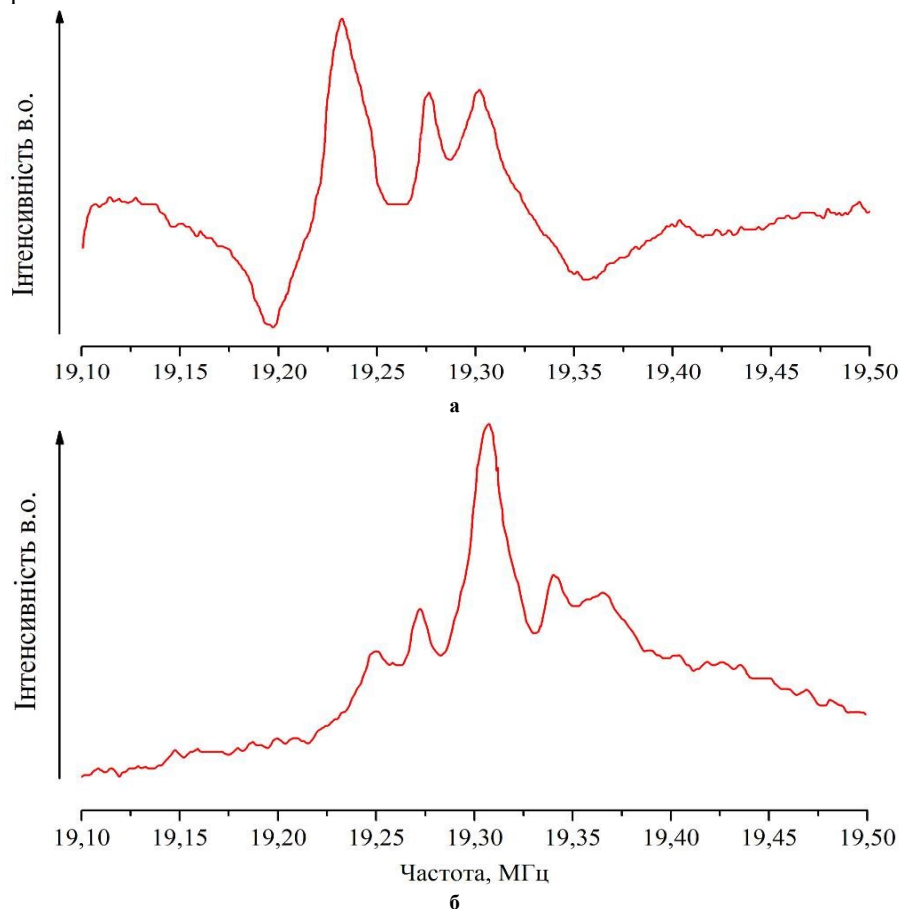


Рис. 5. Повільне проходження спектру ЯКР за допомогою модуляції Зєсмана на частоті 73 Гц (а). Час реєстрації 7 хвилин. Швидке сканування магнітним полем того ж діапазону частот (б). Час реєстрації 50 секунд. Частота резонансу 19,312 МГц

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведений аналіз роботи автодинного ЯКР-сенсора з підвищеною лінійністю перетворення дозволив зробити висновок, що розглянута схема забезпечувала достатню чутливість та відношення С/Ш в робочому діапазоні частот для проведення досліджень ЯКР, проте, було виявлено ряд недоліків при роботі в режимі частотної модуляції умов резонансу, найбільш суттєвим із яких є виникнення синхронної завади при скануванні широких ліній, що призводить до нахилу базової лінії і спотворення спектру. Унеможливлення таких спотворень при реєстрації резонансного сигналу досягається з використанням імпульсного магнітного поля біполярної форми – модуляції Зеємана, тобто періодичного розщеплення сигналу ЯКР магнітним полем. Ефективність застосування модуляції Зеємана підтверджена, як результатами SPICE моделювання часових залежностей напруженостей магнітних полів, так і результатами експериментальних досліджень ЯКР ^{115}In в InSe . Підтверджено можливість застосування безмодуляційного проходження резонансної лінії в неперервному ЯКР шляхом швидкого сканування магнітним полем, що уможливило експрес-пошук спектрів невідомих речовин та дозволяє суттєво зменшити час експерименту.

Література

1. Гречишкин В.С. Новые физические технологии: обнаружение взрывчатых и наркотических веществ методом ядерного квадрупольного резонанса. / В.С. Гречишкин, Н.Я. Синяевский // Успехи физических наук. – 1997. - Т.167, №4. – С.413-427.
2. Бержанский В.Н. Импульсный когерентный спектрометр ядерного магнитного резонанса для магнитоупорядоченных веществ. / В.Н. Бержанский, С.Н. Полулях, Ю.В. Тупицын // ПТЭ. – 2005. - №6. – С.41-46.
3. Михальцевич В.Т. Применение техники адиабатического размагничивания для детектирования взрывчатых веществ методом ядерного квадрупольного резонанса. / В.Т. Михальцевич, А.В. Беляков // ПТЭ. – 2005. - №3. – С.132-135.
4. Kraus Robert H. Ultra-low field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging to discriminate and identify materials. / Robert H. Kraus, Andrei N. Matlashov, Michelle A. Espy, Petr L. Volegov. United States Patent №.7688069. - 2010.
5. Itozaki Hideo. Mine detector with NQR-SQUID. / Hideo Itozaki, Kyoko Kawagishi, Tadayuki Kondo, Tadashi Shimizu, Kenjiro Hashi. United States Patent №.7394250. - 2008.
6. Усанов Д.А. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций. / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль, А.Э. Постельга // ПТЭ. – 2004. - №5. – С. 130-134.
7. O.S. Stoican. Characteristics of a Marginal Oscillator in the Stabilized Frequency Regime // Sixth International Conference of The Balkan Physical Union. AIP Conf. Proc. - April 23, 2007. - Volume 899. p.852.
8. Schiano Jeffrey L. Continuous wave nuclear quadrupole resonance spectrometer. / Schiano Jeffrey L. United States Patent №.7768262. – 2010.
9. Blinc R. NMR lineshape and phase solution effects in incommensurate Rb_2ZnCl_4 . / Blinc R. [et al.] // J. Phys. C: Solid State Phys – 1982. – Vol.15, №1. – P.547.
10. Samila A., Safronov I., Hotra O. Structural and functional synthesis of the continuous wave NQR temperature sensor with increased conversion linearity. Solid State Nuclear Magnetic Resonance. 2020. Vol. 110. P. 101700-1-9.
11. Гречишкин В.С. Локальный ЯКР в твердых телах. / В.С. Гречишкин, Н.Я. Синяевский // Успехи физических наук. - 1993. - Т.163, №10. – С.95-119.
12. Haruo Niki. Construction of Apparatus for NQR Experiment. / Niki Haruo, Ikushima Yasuo, Kikuchi Yasuhide and Igel Ryokan. // Bull. College of Science. Univ. of the Ryukyus – 1983. - No36. – P.27-51.
13. Самила А.П. Зеэман-модулятор с прецизионной формой выходного тока / А. П. Самила, А. Г. Хандожко, В. А. Хандожко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. - № 1. - С. 40–43.
14. Исаев-Иванов В.В. Безмодуляционный метод регистрации сигналов ЭПР. / В.В. Исаев-Иванов, В.В. Лавров, В.Н. Фомичев // ДАН СССР. - 1976. – Т.229, No1. – С.70-72.

References

1. Grechishkin V.S. Novye fizicheskie tehnologii: obnaruzhenie vzryvchatykh i narkoticheskikh veshstv metodom yadernogo kvadрупольного rezonansa. / V.S. Grechishkin, N.Ya. Sinyavskij // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1997. - T.167, №4. – S.413-427.
2. Berzhanskij V.N. Impul'snyj kogerentnyj spektrometr yadernogo magnitnogo rezonansa dlya magnitoporyadochennykh veshstv. / V.N. Berzhanskij, S.N. Polulyah, Yu.V. Tupicyn // PTE. – 2005. - №6. – S.41-46.
3. Mihalcevic V.T. Primenenie tehniki adiabaticeskogo razmagnichivaniya dlya detektirovaniya vzryvchatykh veshstv metodom yadernogo kvadрупольного rezonansa. / V.T. Mihalcevic, A.V. Belyakov // PTE. – 2005. - №3. – S.132-135.
4. Kraus Robert H. Ultra-low field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging to discriminate and identify materials. / Robert H. Kraus, Andrei N. Matlashov, Michelle A. Espy, Petr L. Volegov. United States Patent №.7688069. - 2010.
5. Itozaki Hideo. Mine detector with NQR-SQUID. / Hideo Itozaki, Kyoko Kawagishi, Tadayuki Kondo, Tadashi Shimizu, Kenjiro Hashi. United States Patent №.7394250. - 2008.
6. Usanov D.A. Sverhvysochastotnyj avtodinnyj izmeritel parametrov vibracij. / D.A. Usanov, Al.V. Skripal, An.V. Skripal, A.E. Postelga // PTE. – 2004. - №5. – С. 130-134.

-
7. O.S. Stoican. Characteristics of a Marginal Oscillator in the Stabilized Frequency Regime // Sixth International Conference of The Balkan Physical Union. AIP Conf. Proc. - April 23, 2007. - Volume 899. p.852.
 8. Schiano Jeffrey L. Continuous wave nuclear quadrupole resonance spectrometer. / Schiano Jeffrey L. United States Patent №.7768262. – 2010.
 9. Blinc R. NMR lineshape and phase solution effects in incommensurate Rb₂ZnCl₄. / Blinc R. [e. a.] // J. Phys. C: Solid State Phys – 1982. – Vol.15, №1. – P.547.
 10. Samila A., Safronov I., Hotra O. Structural and functional synthesis of the continuous wave NQR temperature sensor with increased conversion linearity. Solid State Nuclear Magnetic Resonance. 2020. Vol. 110. P. 101700-1–9.
 11. Grechishkin B.C. Lokalnyj YaKR v tverdyh telah. / B.C. Grechishkin, N.Ya. Sinyavskij // Uspehi fizicheskikh nauk. - 1993. - T.163, №10. – S.95-119.
 12. Haruo Niki. Construction of Apparatus for NQR Experiment. / Niki Haruo, Ikushima Yasuo, Kikuchi Yasuhide and Igel Ryokan. // Bull. College of Science. Univ. of the Ryukyus – 1983. - No36. – P.27-51.
 13. Samila A.P. Zeeman-modulyator s precizionnoj formoj vyhodnogo toka / A. P. Samila, A. G. Handozhko, V. A. Handozhko // Shidno-Yevropejskij zhurnal peredovih tehnologij. – 2011. - № 1. - S. 40–43.
 14. Isaev-Ivanov V.V. Bezmodulyacionnyj metod registracii signalov EPR. / V.V. Isaev-Ivanov, V.V. Lavrov, V.N. Fomichev // DAN SSSR. - 1976. – T.229, No1. – S.70-72.