

АНАЛОГ СИГНАЛА ОДНОИМПУЛЬСНОГО ЭХА В КОБАЛЬТЕ, ФОРМИРУЕМЫЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ВИДЕОИМПУЛЬСА

Г. И. Мамниашвили *, Т. О. Гегечкори

УДК 539.143.43

Институт физики им. Э. Андроникашвили
Тбилисского государственного университета им. Ивана Джавахишвили,
Тбилиси, Грузия; e-mail: mgrigor@rocketmail.com

(Поступила 2 июля 2021)

Показано, что аналог сигнала одноимпульсного эха — краевое магнитное эхо — возникает при совместном воздействии дополнительного магнитного видеопульса и заднего фронта достаточно длинного радиочастотного импульса на ядерную спиновую систему в доменных границах кобальта. Он формируется за счет искажения переднего фронта эффективного радиочастотного импульса при смещении доменных границ под воздействием магнитного видеопульса. Это искажение возникает при превышении амплитудой магнитного видеопульса порогового значения, приводящем к началу смещения доменных границ, и обусловлено анизотропией локального сверхтонкого поля на ядрах доменной границы. Экспериментально установлена роль смещений доменных границ в формировании сигналов одноимпульсного эха в кобальте. Дана оценка характеристик центров закрепления доменных границ (центров пиннинга) этим методом, совпадающая с характеристикой центров закрепления доменных границ, определяемой по воздействию магнитного видеопульса на сигнал двухимпульсного эха.

Ключевые слова: ЯМР, магниты, одноимпульсное эхо, двухимпульсное эхо, магнитный видеопульс, стимулированное эхо, механизм искажений, нерезонансный механизм, анизотропия сверхтонкого поля.

It is shown that an analogue of single-pulse echo signal (edge magnetic echo) arises when an additional magnetic videopulse and the trailing edge of a sufficiently long radio-frequency pulse are simultaneously applied to the nuclear spin system in the domain walls of cobalt. It is formed by the mechanism of distortion of the leading edge of the effective radio-frequency pulse when the domain walls are displaced under the influence of a magnetic videopulse. This distortion occurs when the amplitude of the magnetic videopulse exceeds the threshold value leading to the onset of the displacement of domain walls, and is caused by the anisotropy of the local hyperfine field on the nuclei of domain walls. The role of displacements of domain walls in the formation of single-pulse echo signals in cobalt has been experimentally established. This also makes it possible to estimate the characteristics of the centers of domain wall fixing (pinning centers) by this method. The estimation coincides with the characteristics of domain wall pinning centers, determined by the effect of a magnetic videopulse on the two-pulse echo signal.

Keywords: NMR, magnets, single-pulse echo, two-pulse echo, magnetic videopulse, stimulated echo, distortion mechanism, nonresonant mechanism, hyperfine field anisotropy.

Введение. Одноимпульсное эхо (ОИЭ) представляет собой резонансный отклик неоднородно уширенной ядерной спиновой системы при приложении одиночного радиочастотного (РЧ) импульса, возникающий в момент времени, приблизительно равный длине РЧ-импульса после его окончания. ОИЭ открыто Блумом в 1955 г. для протонов в воде, помещенных в неоднородное магнитное поле. Механизм его образования гораздо более сложный, чем классического двухимпульсного эха Хана (ДИЭ) [1].

ANALOGUE OF A SINGLE-PULSE ECHO SIGNAL IN COBALT FORMED UNDER THE ACTION OF AN ADDITIONAL MAGNETIC VIDEO PULSE

G. I. Mamniashvili *, T. O. Gegechkori (Ivane Javakhishvili Tbilisi State University Andronikashvili Institute of Physics, Tbilisi, Georgia; e-mail: mgrigor@rocketmail.com)

Механизмы формирования ОИЭ можно разделить на два класса: первый относится к так называемым механизмам краевого типа, когда фронты РЧ-импульса действуют аналогично двум резонансным РЧ-импульсам в методе ДИЭ Хана, второй — механизмы формирования ОИЭ внутренней природы [2].

Важная роль фронтов РЧ-импульсов для краевых механизмов связана с тем, что в эти моменты времени изменяется направление эффективного магнитного поля $H_{\text{эф}}$ во вращающейся системе координат. Эти изменения возникают в случае нерезонансного механизма в основном из-за нерезонансных эффектов, когда несущая частота идеального РЧ-импульса отстроена от центральной частоты на величину, сравнимую или большую ширины неоднородно уширенной линии ЯМР. Аналогичный эффект имеет место для механизма искажений фронтов РЧ-импульса, которые неизбежно возникают при генерации РЧ-импульсов из-за неидеальных свойств компонентов электронных схем [3]. В обоих случаях угол отклонения $H_{\text{эф}}$ от равновесного направления вектора ядерной намагниченности $\mathbf{m}$ во вращающейся системе координат играет роль угла поворота $\mathbf{m}$ вокруг $H_{\text{эф}}$ в методе ДИЭ Хана [4].

Внутренние механизмы формирования ОИЭ обусловлены разными типами нелинейностей спиновых систем, например, ядерные спиновые системы в слабоанизотропных магнетиках при низких температурах обладают большим динамическим сдвигом частоты. В этих системах резонансная частота ядерных спинов зависит от угла отклонения спинов от их равновесных направлений и эффективен так называемый частотно-модулированный механизм образования ОИЭ [5]. Еще один внутренний механизм образования ОИЭ, так называемый многоимпульсный, предложен для систем с нелинейной динамикой ядерных спинов при возбуждении РЧ-импульсами при одновременном наличии большого неоднородного уширения линии ЯМР типа Лармора и Раби и неравновесности ядерной спиновой системы перед последовательностью РЧ-импульсов [2]. Такая ситуация реализуется при определенных условиях в рассматриваемых ниже случаях многодоменных ферромагнетиков в нулевом внешнем магнитном поле.

В [6] показано, что свойства ОИЭ в феррите лития можно охарактеризовать в рамках многоимпульсного нерезонансного механизма в условиях неравновесности спин-системы перед каждым РЧ-импульсом в серии возбуждающих РЧ-импульсов. ОИЭ в кобальте впервые экспериментально наблюдал Стирнс [7] вопреки теоретическим оценкам, указывающим на его отсутствие. Особенно интенсивные сигналы ОИЭ наблюдались в гексагональной фазе с плотной упаковкой, характеризующейся сильной анизотропией сверхтонкого поля (СТП). В [3, 8] для объяснения эффекта ОИЭ предложен механизм образования ОИЭ за счет искажений фронтов РЧ-импульса, возникающих из-за переходных процессов в радиотехнических цепях при включении и выключении РЧ-импульса. В этом случае фронты РЧ-импульса играют роль пары РЧ-импульсов в методе ДИЭ Хана и возникновение ОИЭ можно объяснить в соответствии с экспериментом.

Для изучения роли неоднородного уширения линии ЯМР, обусловленного большой анизотропией СТП в кобальте, в механизме формирования ОИЭ в кобальте в [9] проведено сравнительное исследование сигналов ОИЭ в феррите лития и кобальте. Для объяснения экспериментальных результатов предложен альтернативный внутренний механизм искажения фронтов РЧ-импульса, учитывающий роль сильной анизотропии СТП в кобальте. Предположено, что при отклонении электронной намагниченности $\mathbf{M}$ от равновесного направления при включении и выключении РЧ-импульса в области фронтов РЧ-импульса возникают значительные искажения осциллирующего локального РЧ-поля, обусловленные сильной анизотропией СТП. В [9] показано, что ОИЭ в кобальте может формироваться механизмом искажений, обусловленным в основном анизотропией СТП, эффективным выше определенной пороговой мощности РЧ-импульса. Ниже этого порогового значения ОИЭ формируется многоимпульсным нерезонансным механизмом, как в литиевом феррите, где аналогичный механизм искажений не эффективен из-за сравнительно слабой анизотропии СТП. В [10] влияние импульсного магнитного поля на ДИЭ ядер, расположенных в доменных границах магнетиков, объяснялось анизотропией СТП. Показано, что уменьшение амплитуды эхо-сигнала при включении магнитного видеоимпульса (МВИ) между возбуждающими РЧ-импульсами или между вторым РЧ-импульсом и сигналом эха связано с нарушением фазовой когерентности в системе прецессирующих ядерных моментов за счет изменения собственных ядерных частот, вызываемого анизотропией СТП, под действием МВИ. Неоднородный сдвиг частоты ЯМР, возникающий из-за анизотропии СТП, при обратимом смещении доменных границ под действием МВИ может оказаться существенно больше амплитуды РЧ-импульсов в частотных единицах. В этом случае при совместном воздействии РЧ и МВИ возникает скачкообразное изменение направления $H_{\text{эф}}$ во вращающейся системе координат,

что приводит к появлению дополнительных сигналов эха, формируемых стимулированным механизмом [11,12].

Цель настоящей работы — формирование аналога сигнала ОИЭ в кобальте при совместном воздействии МВИ и заднего фронта РЧ-импульса (сигнала краевого магнитного эха (КМЭ)). КМЭ формируется механизмом искажений переднего фронта эффективного РЧ-импульса за счет обусловленной анизотропией СТП неоднородного сдвига частоты ЯМР при смещении доменных границ под воздействием МВИ.

Эксперимент. Измерения проведены на фазово-некогерентном спектрометре спинового эха [13] в интервале 40—220 МГц с использованием стандартного самовозбуждающегося генератора. Частота осциллятора плавно перестраивается с помощью различных катушек индуктивности и подстроечных конденсаторов. При длине импульсов 0.1—50 мкс максимальная амплитуда получаемого на образце РЧ-поля ~ 3.0 Э, крутизна фронтов не хуже 0.15 мкс. Мертвое время приемника ~ 1 мкс.

Схема эксперимента по импульсному воздействию приведена в [13]. Импульсное магнитное поле создавалось стробируемым стабилизатором тока регулируемой амплитуды и дополнительной медной катушкой, позволяющей получать импульсы магнитного поля ~ 500 Э при размерах образца ~ 10 мм.

Микророшки кобальта получены сплавным методом [8] со средним размером зерен 10 мкм. Характерные параметры РЧ-импульсов: длительность — единицы микросекунд, задержка между ними — десятки микросекунд, несущая частота 217 МГц совпадает с частотой ядер в центре доменных границ гранецентрированной кубической фазы кобальта.

Результаты и их обсуждение. Поскольку внешнее РЧ-поле воздействует на ядра посредством электронных магнитных моментов $\mathbf{M}$, объяснение явлений должно основываться на представлении о том, какое движение электронная намагниченность в доменных границах совершает под действием МВИ. Смещение доменных границ, даже незначительное, может сопровождаться большим поворотом $\mathbf{M}$: в кобальте при амплитуде МВИ ~ 200 Э сдвиг доменных границ может быть порядка ее толщины, тогда некоторые моменты внутри 180° -ной доменной границы совершат полный поворот. При этом поворот $\mathbf{M}$ внутри доменной границы пропорционален смещению доменной границы. Этот процесс сопровождается изменением локальных СТП на ядрах в пределах доменной границы вследствие анизотропии СТП в кобальте [13]. Амплитуду МВИ, при которой начинается спад интенсивности эха, обусловленный началом движения доменных границ, естественно связать со степенью закрепления или силой пиннинга доменных границ. Из рис. 1 видно существенное возрастание силы пиннинга при переходе от микро- к нанопорошкам кобальта.

При асимметричном воздействии МВИ между РЧ-импульсами или между РЧ-импульсами и сигналом эха его ослабление связано в основном с анизотропией СТП, нарушающей фазовую когерентность прецессирующих ядерных спинов, что уменьшает эффективность процесса дефазировки [10].

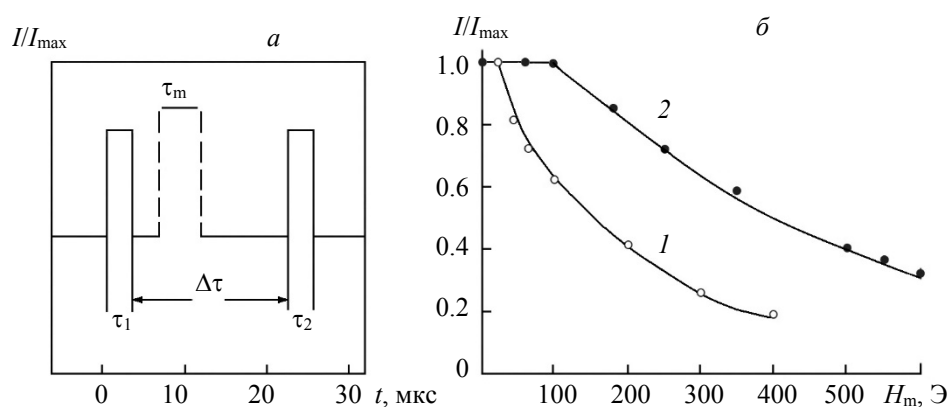


Рис. 1. Асимметричное положение МВИ относительно второго РЧ-импульса (а); зависимость интенсивности эха от амплитуды магнитного видеопульса H_m в случае микророшка (1) и нанокластеров (2) кобальта [13] (б)

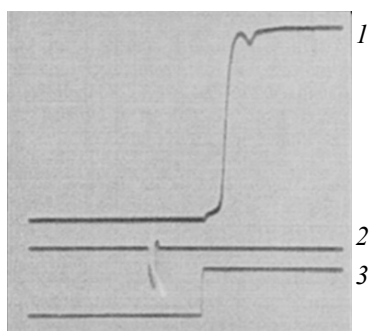


Рис. 2. Сигнал КМЭ (1), сформированный в кобальте совместным действием МВИ (2) и заднего фронта длинного РЧ-импульса (3)

Исследуем свойства аналогов сигнала ОИЭ, возникающих вследствие воздействия дополнительного МВИ. До сих пор рассматривался сигнал так называемого магнитного эха, формируемого стимулированным механизмом при совместном воздействии МВИ и двух фронтов РЧ-импульса [11, 12]. Исследуем аналог сигнала ОИЭ, возникающий при совместном воздействии дополнительного МВИ и заднего фронта длинного РЧ-импульса, — так называемый сигнал КМЭ (рис. 2, кривая 1). Покажем, что КМЭ является аналогом ОИЭ, формируемого механизмом искажения фронтов РЧ-импульса, возникающего вследствие смещения доменных границ и обусловленного анизотропией СТП [9]. Для этого удобно использовать длинный РЧ-импульс, чтобы избежать интерференции с другими типами откликов, возникающих при совместном воздействии МВИ и РЧ-импульсов. Схема комбинированного воздействия МВИ и заднего фронта РЧ-импульса и сигнал КМЭ показаны на рис. 2. Сигнал КМЭ формируется механизмом искажений, так как он не исчезает в пределах совместного однократного возбуждения комбинацией РЧ и МВИ, что имеет место для сигнала ОИЭ в литиевом феррите или кобальте при мощности РЧ-импульса ниже пороговой [9]. Сигнал КМЭ появляется при превышении амплитуды МВИ некоторого порогового значения, совпадающего с силой пиннинга при воздействии МВИ на ДИЭ (рис. 3, а, кривая 2).

На рис. 3, б приведены амплитудные зависимости КМЭ от расстояния между МВИ и задним фронтом РЧ-импульса τ и ОИЭ от длины РЧ-импульса τ . Отметим, что время релаксации сигнала КМЭ совпадает с временем релаксации ОИЭ, формируемого механизмом искажений в кобальте: $T_2^{\text{КМЭ}} = T_2^{\text{ОИЭ}} = 30$ мкс [9]. На основании экспериментальных результатов можно сделать вывод, что КМЭ формируется механизмом искажений соответствующих фронтов эффективного РЧ-импульса. При этом определяющую роль играет искажение фронта РЧ-импульса воздействием МВИ, возникающее при достаточно быстром смещении доменных границ вследствие анизотропии СТП.

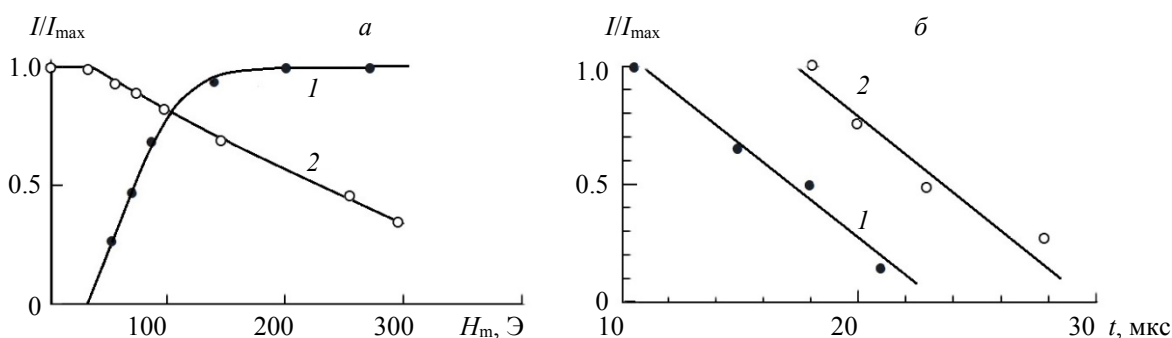


Рис. 3. Зависимость сигнала КМЭ, сформированного совместным воздействием МВИ и заднего фронта длинного РЧ-импульса (1) и сигнала ДИЭ от амплитуды H_m МВИ длиной $\tau_m = 1$ мкс (2) (а); зависимость амплитуды ОИЭ от длительности РЧ-импульса τ (1) и амплитуды сигнала КМЭ (2), сформированного МВИ и задним фронтом длинного РЧ-импульса, от временного интервала τ между МВИ и задним фронтом длинного РЧ-импульса (б)

Амплитуда МВИ, при которой появляется сигнал КМЭ, коррелирует с амплитудой МВИ, действующего на ДИЭ, при которой начинается его уменьшение, при превышении амплитудой МВИ H_m силы пиннинга H_0 . Экспериментальные зависимости сигналов КМЭ и ДИЭ можно объяснить, приняв, что при воздействии МВИ доменная граница обратимо смещается на расстояние Δx пропорционально амплитуде МВИ: $\Delta x \sim \nu \tau_m = S (H_m - H_0) \tau_m$, когда амплитуда МВИ превышает силу пиннинга H_0 [14]. На ядрах в слое Δx при комбинированном воздействии РЧ и МВИ скачкообразно изменяются величины и направления эффективного магнитного поля $H_{\text{эф}}$ во вращающейся системе координат из-за соответствующих изменений локального СТП и фактора η : $H_{\text{эф}} = (\Delta \omega_j \mathbf{z} + \omega_1 \mathbf{y}) / \gamma_n$, γ_n — ядерное гиромагнитное отношение; $\mathbf{z}$ и $\mathbf{y}$ — единичные векторы во вращающейся системе координат, $\Delta \omega = (\omega_{\text{ЯМР}} - \omega_{\text{РЧ}})$ — расстройка j -й изохроматы, $\omega_1 = \gamma_n \eta H_1$ — амплитуда РЧ-поля в единицах частоты, η — фактор усиления РЧ-поля [5]. Согласно нерезонансной модели формирования ОИЭ [11], воздействие МВИ эквивалентно воздействию переднего фронта РЧ-импульса. При этом роль второго фронта РЧ-импульса играет задний фронт используемого длинного РЧ-импульса. В этом случае амплитуда КМЭ пропорциональна числу ядер в слое Δx , формируемом при смещении доменных границ: $I_{\text{КМЭ}} \sim \Delta x / L$, где L — ширина возбуждаемого участка доменных границ при воздействии РЧ-импульса. При этом скачкообразное изменение частоты ЯМР во вращающейся системе координат $\Delta \omega_j' = (\Delta \omega_j^2 + \omega_1^2)^{1/2}$ должно удовлетворять условию $\Delta \omega_j' \tau_m \ll 1$ или период прецессии ядер во вращающейся системе координат должен быть больше длительности МВИ τ_m .

При воздействии МВИ на ДИЭ в интервале между РЧ-импульсами условие $\Delta \omega_j' \tau_m \ll 1$ не выполняется, так как РЧ-импульсы отсутствуют в момент воздействия МВИ и ядра прецессируют в локальном СТП с частотой $\omega_j = \gamma_n H_{\text{СТП}}$. Следовательно, должно выполняться условие $\omega_j \tau_m \ll 1$, требующее наносекундной длительности МВИ τ_m , как при наблюдении инверсного эха [15], для наблюдения дополнительных сигналов эха, формирующихся при воздействии МВИ в промежутке между РЧ-импульсами, которое в нашем случае не выполняется. Поэтому воздействие МВИ на ДИЭ ведет только к уменьшению интенсивности ДИЭ, пропорциональному смещению доменных границ: $I_{\text{ДИЭ}} \sim (L - \Delta x) / L$, из-за потери фазовой когерентности ядер в этом слое. Это объясняет полученные экспериментальные зависимости сигналов КМЭ и ДИЭ при воздействии МВИ.

Явление ЯМР спинового эха может быть использовано для хранения и обработки больших объемов информации [16—19]. Примерами являются функциональные электронные устройства, спиновые процессоры и разработка квантовых компьютеров. Спиновые процессоры на основе спинового эха ЯМР также могут применяться для аналоговой обработки РЧ-импульсов для увеличения скорости обработки широкополосных сигналов в режиме реального времени, чего трудно достичь с помощью традиционных методов цифровой инженерии процессов [20]. Эхо-процессор на основе ЯМР спинового эха в магнитных материалах может играть роль такого аналогового процессора. Важность применения магнитного материала заключается в том, что внешнее магнитное поле не требуется и присутствует значительное усиление сигнала спинового эха от эффекта РЧ-усиления [5]. Метод ОИЭ может дать практически ту же информацию о спиновой системе, что и метод ДИЭ. Свойства ОИЭ и условия его наблюдения должны учитываться в спиновых процессорах на основе ЯМР спинового эха. Кроме того, при достаточной интенсивности сигнала можно разработать устройство для обработки РЧ-импульсов на основе явления ОИЭ. Преимущество такой системы — отсутствие необходимости считывать импульсы в РЧ-последовательности, поэтому устраняются сложности, связанные с синхронизацией записывающих и считывающих импульсов.

В последние десятилетия исследования в области магнетизма смещаются от объемных материалов к более мелким магнитным структурам, таким как суперпарамагнитные порошки, микро- и нанопроволоки, магнитные двумерные системы толщиной несколько атомных слоев и многослойные структуры. Интерес к магнитным наноструктурам обусловлен физическими явлениями, происходящими в системах с уменьшенными размерами, такими как гигантское магнитосопротивление. Эти явления применяются, например, в головках чтения и записи информации, магнитных дисках, магнитных запоминающих устройствах с произвольным доступом и различных датчиках. ЯМР является мощным микроскопическим инструментом для изучения магнитных наноструктур и для исследования в локальном масштабе корреляции между типом наноструктуры и магнитными свойствами образца. Поэтому изготовление и изучение структур с характерными размерами порядка нанометров — одна из актуальных тем фундаментальных и прикладных исследований. В частности, для этих целей

может быть полезной ЯМР-методика оценки силы пиннинга и мобильности доменных границ, используемая в настоящей работе и [13, 21, 22].

Заключение. Показана возможность генерирования аналога сигнала одноимпульсного эха, формируемого механизмом искажений, за счет внутреннего механизма, связанного со смещением доменных границ под воздействием магнитного видеоимпульса из-за анизотропии локального сверхтонкого поля. Передний фронт соответствующей ему части эффективного радиочастотного импульса формируется при воздействии магнитного видеоимпульса, задний — задним фронтом радиочастотного импульса. Приведена качественная модель, позволяющая объяснить данное явление. Сигнал краевого магнитного эха возникает при превышении амплитуды магнитного видеоимпульса силы пиннинга доменных границ, что дает возможность оценки степени закрепления или силы пиннинга доменных границ в многодоменных магнетиках этим методом.

- [1] A. L. Bloom. Phys. Rev., **98**, N 4 (1955) 1105—1111
- [2] L. N. Shakhmuratova, D. K. Fowler, D. H. Chaplin. Phys. Rev. A, **55** (1997) 2955—2967
- [3] В. И. Цифринович, Э. С. Мушаилов, М. В. Бакшеев, А. М. Бессмертный, Е. А. Глозман, В. К. Мальцев, О. В. Новоселов, А. Е. Рейнгардт. ЖЭТФ, **88**, № 4 (1985) 1481—1489
- [4] В. П. Чекмарёв, М. И. Куркин, С. И. Голощапов. ЖЭТФ, **76**, № 5 (1979) 1675—1684
- [5] А. С. Боровик-Романов, Ю. М. Буньков, Б. С. Думеш, М. И. Куркин, М. П. Петров, В. П. Чекмарев. УФН, **142**, № 4 (1984) 537—570
- [6] А. М. Ахалкаци, Г. И. Мамниашвили, Т. О. Гегечкори, Ш. О. Бен-Эзра. Физ. мех. матер., **94**, № 1 (2002) 40—46
- [7] M. B. Stearns. AIP Conf. Proc., **10**, N 1 (1973) 1644—1647
- [8] I. A. Kilipari, V. I. Tsifrinovich. Phys. Rev. B, **57**, N 18 (1997) 11554—11564
- [9] G. I. Mamniashvili, T. O. Gegechkori, A. M. Akhalkatsi, T. A. Gavasheli. J. Supercond. Nov. Magn. **28**, N 3 (2015) 911—916
- [10] Л. А. Рассветалов, А. Б. Левицкий. ФТТ, **23**, № 11 (1981) 3354—3359
- [11] A. M. Akhalkatsi, G. I. Mamniashvili, T. I. Sanadze. Appl. Magn. Reson., **15** (1998) 393—399
- [12] В. С. Кузьмин, В. М. Колесенко. Журн. прикл. спектр., **71**, № 1 (2004) 15—21 [V. S. Kuz'min, V. M. Kolesenko. J. Appl. Spectr., **71**, N 1 (2004) 14—21]
- [13] T. A. Gavasheli, G. I. Mamniashvili, Z. G. Shermadini, T. I. Zedginidze, T. G. Petriashvili, T. O. Gegechkori, M. V. Janjalia. J. Magn. Magn. Mater., **500** (2020) 1555310
- [14] J. K. Galt. Bell Syst. Tech., **33** (1954) 1023—1054
- [15] В. А. Игнатченко, В. К. Мальцев, А. Е. Рейнгардт, В. И. Цифринович. Письма в ЖЭТФ, **37**, № 9 (1983) 439—440
- [16] M. Petrov, G. Smolensky, S. Stepanov, A. Petrov. IEEE Transact. Magn., **13**, N 1 (1977) 934—935
- [17] М. Нестеров, И. Плешаков, Я. Фофанов. Науч. приборостроение, **16**, № 2 (2006) 3—21
- [18] И. В. Плешаков, П. С. Попов, В. И. Дудкин, Ю. И. Кузьмин. Радиотехника и электроника, **62**, № 6 (2017) 561—565
- [19] И. В. Плешаков, П. С. Попов, Ю. И. Кузьмин, В. И. Дудкин. Изв. вузов. Радиофизика, **59**, № 2 (2016) 180—188
- [20] L. A. Rassvetalov. Proc. Int. Soc. Opt. Eng., Yashkar-Ola, **3239** (1997) 399—405
- [21] И. В. Плешаков, П. С. Попов, Ю. И. Кузьмин, В. И. Дудкин. Письма в ЖТФ, **42**, № 2 (2016) 9—15
- [22] T. A. Gavasheli, G. I. Mamniashvili, T. O. Gegechkori. J. Phys. Conf. Ser., **829**, N 1 (2017) 0012022