

УДК 537.635

*Н.С. Клѣхта, И.В. Плешаков, В.И. Дудкин*

## **ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОТКЛИКАМИ ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ В МАГНЕТИКЕ С ДОМЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ**

*N.S. Klekhta, I.V. Pleshakov, V.I. Dudkin*

St. Petersburg State Polytechnical University,  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

### **PULSE OPERATION OF THE NUCLEAR SPIN SYSTEM RESPONSES IN A MAGNETIC MATERIAL WITH DOMAIN WALLS**

Рассмотрены вопросы, связанные с воздействием импульсов магнитного поля на формирование сигнала ядерного спинового эха в феррите. Представлена качественная модель наблюдавшихся эффектов, показана важная роль доменных границ. Результаты работы должны быть полезны при совершенствовании методов исследования магнитоупорядоченных веществ.

**ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС. СПИНОВОЕ ЭХО. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.**

The questions related with the action of magnetic field pulses on the spin echo formation in a ferrite are discussed. The qualitative model of the observed phenomena is developed; the importance of the domain walls is shown. The results of the work should be useful for the improvement of the magnetic materials research technique.

**NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE. SPIN ECHO. MAGNETIC MATERIALS. PULSE ACTION.**

В настоящей работе рассматривается импульсное воздействие на сигналы нестационарного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), наблюдаемого в некотором магнитном материале, находящемся в многодоменном состоянии. С точки зрения общего подхода это может быть любое соединение, обладающее магнитным порядком; важным здесь является то, что оно содержит доменные границы (ДГ). Такие исследования актуальны [1, 2] и представляют интерес, прежде всего потому, что дают дополнительную информацию о строении ДГ, то есть относятся к радиоспектроскопическим методам физики магнитных явлений. Кроме того, вплоть до настоящего времени спиновое эхо в магнитных материалах (в этом виде регистрируется ЯМР в нашем случае) рассматривается как эффект, на основе которого можно создавать устройства обработки информации [3]; развитие в этой области различных способов управления выходными сигналами эхо-процессоров является одной из первостепенных задач [3, 4].

Хотя действие импульсного магнитного поля на ЯМР проявится в любом случае, при наличии ДГ оно, как будет показано далее, оказывается наиболее эффективным. Более того, рассматривать сколько-нибудь существенное влияние видеоимпульсов на ядерную спиновую систему большинства магнетиков можно только в том случае, если они обладают доменной структурой (отметим, однако, что такая структура есть наиболее распространенное состояние данного типа веществ). Поэтому в качестве конкретного образца, на котором выполнен эксперимент, нами был выбран феррит – поликристалл с ферримагнитным типом упорядочения и такими размерами зерен, при которых доменная структура заведомо считается сформированной.

#### **Образцы и методика эксперимента**

В качестве наиболее удобного модельного объекта, позволяющего проверить принципы



методики, связанной с воздействием импульсного магнитного поля на сигнал ЯМР через систему ДГ, использовался литий-цинковый феррит состава  $\text{Li}_{0,425}\text{Fe}_{2,425}\text{Zn}_{0,150}\text{O}_4$ . Он является типичным представителем материалов данного типа, широко применяемых в электронике, и достаточно хорошо исследован средствами радиоспектроскопии. Образец состоял из колец, изготовленных по керамической технологии при обогащении (до 85 %) изотопом  $^{57}\text{Fe}$ , на котором наблюдался ЯМР.

Отклики спиновой системы регистрировались в виде эхо-сигналов на стандартном импульсном радиоспектрометре [5], дополненном устройством воздействия на образец видеоимпульсами магнитного поля. Его блок-схема и геометрия эксперимента представлены на рис. 1. Эхо наблюдалось при комнатной температуре и возбуждалось двух- или трехимпульсными последовательностями радиочастотных (РЧ) импульсов на несущей частоте 68 МГц. Последовательность формировалась в канале, содержащем программатор, модулятор и генератор РЧ импульсов, поступающих через

аттенюатор на катушку, входящую в состав резонансного контура и намотанную на образец. Сигнал от образца наводился в той же катушке, далее он проходил усилительную систему (предусилитель, усилитель и детектор) и отображался на экране цифрового осциллографа. Вид последовательности и возбужденных ею откликов показан на вставке рис. 1. Параллельно РЧ магнитному полю другой катушкой, намотанной на кольцо и питаемой от генераторов видеоимпульсов, создавалось импульсное магнитное поле  $h_v$  (см. вторую вставку рис. 1). Его максимальная величина составляла 1,4 мТл, длительность импульсов регулировалась в пределах 1 – 10 мкс, а полярность могла быть любой.

В ряде экспериментов образец намагничивался в постоянном поле  $H_0$  (0 – 0,3 Тл), ориентированном параллельно оси кольца, т. е. таким образом, что бы оно было перпендикулярно  $h_v$  и полю РЧ импульсов  $h_{rf}$  (см. вторую вставку рис. 1).

Как видно из осциллограммы, приведенной на первой вставке, наблюдался полный набор нестационарных откликов, типичных для

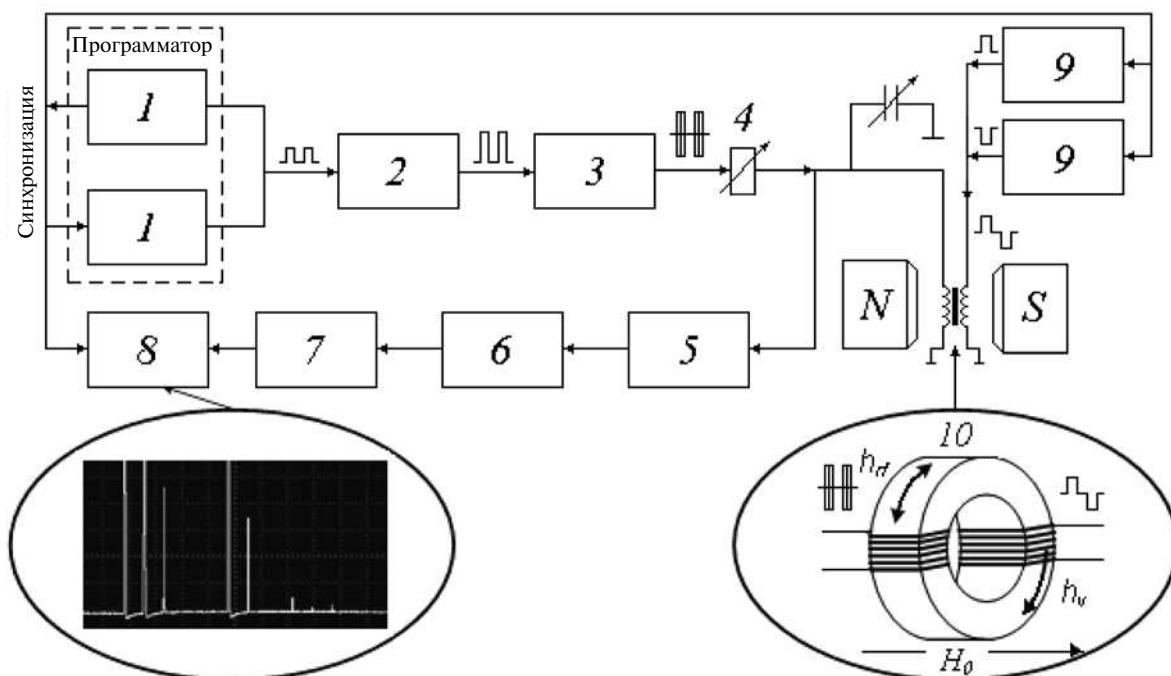


Рис. 1. Структурная схема радиоспектрометра ЯМР:

1 – генераторы видеоимпульсов Г5-54; 2 – модулятор; 3 – генератор радиочастотных импульсов; 4 – аттенюатор; 5 – антенный предусилитель 2820VF; 6 – супергетеродинный приемник; 7 – детектор; 8 – осциллограф; 9 – генераторы видеоимпульсов Г5-15; 10 – образец.

В овалах показана осциллограмма импульсов возбуждения и сигналов спинового эха, а также геометрия эксперимента

случая возбуждения спиновой системы трехимпульсной последовательностью [5]: двухимпульсное эхо, стимулированное эхо и тройка вторичных эхо-сигналов. Выполненные нами опыты заключались в изучении действия одного или двух импульсов магнитного поля, подаваемых в различные моменты времени, на амплитуды двухимпульсного и стимулированного эха.

### Модель действия импульса магнитного поля на спиновую систему

Заметное влияние на спиновое эхо наблюдается уже при амплитудах импульсов порядка нескольких десятых долей миллитесла. Очевидно, что при столь малой величине поля воздействие на ядерную спиновую систему не может быть непосредственным, и даже не может быть опосредовано через электронную намагниченность по обычному механизму ЯМР в магнетике, [6, 7]. В работе [8] было показано, что в феррите состава  $\text{Li}_{0,425}\text{Fe}_{2,425}\text{Zn}_{0,150}\text{O}_4$ , помещенном в статическое магнитное поле, снижение интен-

сивности сигнала ЯМР происходит, начиная приблизительно со значения  $H_0 = 50$  мТл, т. е. природа рассматриваемого нами эффекта не связана с уменьшением коэффициента усиления ЯМР или полного объема границ в момент подачи видеоимпульса. Однако во время небольшого обратимого смещения ДГ, вызванного импульсом, локальные поля на ядрах расположенных в ней атомов изменяются, причем это изменение, как и в случае смещения, учитываемого при выводе выражений для внутриграницного коэффициента усиления [9], неоднородно по толщине границы. Это означает, что к частоте прецессии  $i$ -й изохроматы  $\omega_i$  на протяжении интервала  $\tau_{V1}$  добавляется величина  $\delta\omega_i$ , зависящая от координаты, в направлении которой происходит сдвиг (рис. 2). Таким образом, в систему собственных колебаний ядер вносится возмущение, нарушающее фокусировку изохромат в момент формирования эхо-сигнала. Поскольку последний происходит преимущественно от ДГ [8], полный отклик системы уменьшается.

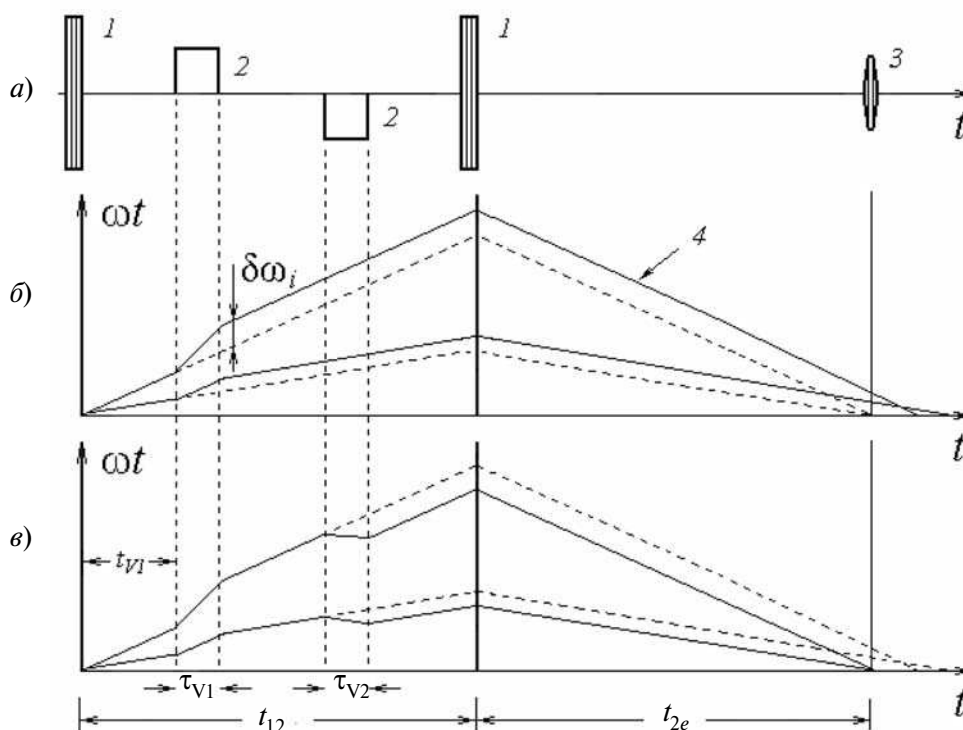


Рис. 2. Действие импульсов магнитного поля на сигнал двухимпульсного эха: *a* – импульсные последовательности и отклик; *б* – действие одиночного видеоимпульса, разрушающее сигнал; *в* – восстановление сигнала в последовательности разнополярных импульсов; 1, 2 – радиочастотные и видеоимпульсы соответственно; 3 – эхо-сигнал; 4 – линия, изображающая эволюцию  $i$ -й изохроматы



В дальнейшем предполагается более строгое рассмотрение поведения спинов ДГ в условиях импульсного воздействия, основанное на соответствующих уравнениях движения, но уже на данном этапе можно дать качественную картину изучаемых явлений. Для описания поведения спинов удобно ввести упрощенную модель, названную нами «оптической аналогией», суть которой иллюстрируется рис. 2. Изображено поведение фаз отдельных изохромат  $\omega_i$  в зависимости от времени  $t$ . Считается, что РЧ импульсы последовательности, возбуждающей сигналы эха, гораздо короче межимпульсных интервалов, и могут рассматриваться как  $\delta$ -импульсы. После первого из них неоднородно уширенная ядерная спиновая система начинает свободную прецессию, что на диаграмме проявляется как «разбегание» изохромат, подобное поведению оптических лучей некоторого источника. Второй импульс «фокусирует» изохроматы, играя роль собирающей линзы. Здесь следует отметить, что на полной фазовой плоскости эволюция спинов после второго импульса должна демонстрироваться ниже оси абсцисс, поскольку именно это соответствует их перевороту, необходимому для образования эха [5], однако симметрия картины позволяет показать «лучи» в верхней полуплоскости без нарушения понимания сущности процесса.

Если в межимпульсном интервале включается видеоимпульс магнитного поля длительностью  $\tau_{V1}$ , действующий так, как описано выше, крутизна траекторий на его протяжении изменяется на величину, зависящую от номера данной изохроматы. Из рис. 2, б видно, что это приводит к дефокусировке и, следовательно, к разрушению отклика.

Описание явления и его трактовка, сходные с приведенными выше, позволяют понять, каким образом действует видеоимпульс отрицательной полярности, если положить, что дополнительные набег фазы  $\delta\omega_i$ , происходящие на его протяжении, имеют знаки, противоположные тем, которые создавались предыдущим положительным видеоимпульсом. Пояснение приведено на рис. 2, в, из которого очевидно, что действие второго импульса является восстанавливающим. С точки зрения оптической аналогии первый импульс мож-

но представить пластинкой со случайно распределенным коэффициентом преломления, а второй — пластинкой с таким распределением, которое в точности компенсирует возмущение, вносимое первой. В силу того, что направление прецессии изохромат на интервале  $t_{2e}$  имеет иной знак, чем на интервале  $t_{12}$ , поданный здесь видеоимпульс будет восстанавливающим, если он имеет тот же знак, что и видеоимпульс, воздействующий на систему в момент времени до подачи второго РЧ импульса.

Схема, показанная на рис. 2, дает пояснение к двухимпульсной методике наблюдения эха. Нетрудно рассмотреть также трехимпульсный случай, принимая во внимание то обстоятельство, что после второго РЧ импульса ядерные магнитные моменты переводятся в состояние, релаксирующее с характерным временем  $T_1 \gg T_2$  ( $T_1, T_2$  — времена продольной и поперечной релаксации соответственно). На диаграмме это изобразится в виде «линзы», создающей параллельный пучок, и далее фокусирующийся третьим РЧ импульсом. Построение, основанное на оптической аналогии, показывает, что влияние видеоимпульсов на стимулированное эхо на интервале между первым и вторым радиочастотными импульсами носит такой же характер, как при рассмотрении двухимпульсного сигнала, однако должно проявляться гораздо слабее на интервале между вторым и третьим РЧ импульсами.

Возможность подавления и восстановления сигналов в спиновых эхо-процессорах на основе магнетиков отмечалась и ранее (см., например, работы [3, 10]), однако в настоящей статье подчеркивается принципиальная роль наличия ДГ в тех, по крайней мере, случаях, когда поле магнитной анизотропии материала  $H_A$  достаточно велико. Действительно, смещая границу хотя бы на половину ее толщины, т. е. заведомо находясь в области обратимого намагничивания (что соответствует использованному в работе величинам  $h$ ), можно повернуть электронную намагниченность и связанное с ней сверхтонкое поле [9] на угол около  $90^\circ$ . Таким образом, даже при небольших значениях  $h_V$  влияние на  $\omega_i$  оказывается очень существенным. Внутри же домена этот угол, как правило, невелик (исследованные в работе [3] тонкие кобальтовые пленки с малой наведенной ани-

зотропией относятся к специальному случаю). Его можно оценить как величину, примерно равную  $H_A/h_V$ , что при магнитных параметрах нашего феррита [11] и  $h_V = 1,4$  мТл дает приблизительное значение в  $1,5^\circ$ .

### Экспериментальное подтверждение модели

Развитая здесь качественная модель подтверждается экспериментально. Подавление эхосигнала одиночным видеоимпульсом магнитного поля наблюдалось как для двухимпульсного (рис. 3,а), так и для стимулированного (рис. 3,б) откликов спиновой системы, причем в последнем случае действие видеоимпульса на интервале между вторым и третьим РЧ импульсами было

существенно меньше, чем на интервале между первым и вторым. Достигалась значительная величина подавления: при наилучших условиях она составляла около 80 %. Как и в работе [12], этот параметр зависел от внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ , постепенно уменьшаясь с приближением к состоянию насыщения образца, что непосредственно указывает на связь эффекта с ДГ. Восстановление эха в двухимпульсной последовательности регистрировалось в соответствии с ожидаемым согласно выдвинутой модели, а именно: при подаче разнополярных видеоимпульсов – на интервале между РЧ импульсами, а при подаче однополярных – на интервале между вторым РЧ импульсом и эхосигналом. Отметим, что действие восстанавливающего импульса подтверждает правильность принятого нами объяснения характера происходящих процессов, поскольку прямо указывает на их недиссипативный характер.

Очевидным следствием модели, вытекающим из геометрии «лучей», изображающих изохроматы (см. рис. 2,в), является предсказание, что максимальное подавление должно происходить при одинаковых длительностях видеоимпульсов. Это также обнаружено нами на опыте. На рис. 4 приведены зависимости амплитуды двухимпульсного эхосигнала от  $\tau_{V2}$  при фиксированной длительности  $\tau_{V1}$  в усло-

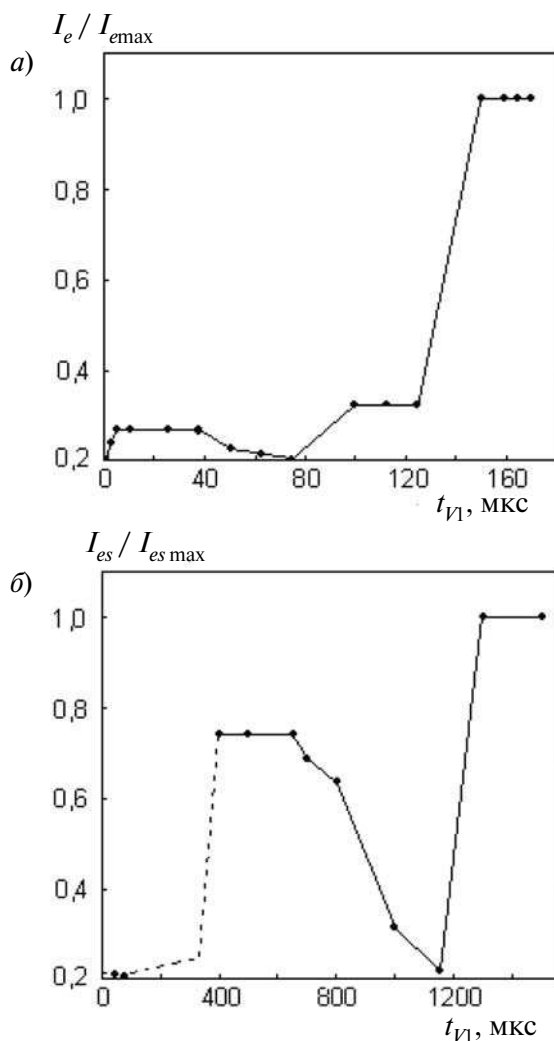


Рис. 3. Зависимости амплитуд двухимпульсного (а) и стимулированного (б) эхосигналов от времени задержки видеоимпульса; в обоих случаях  $t_{12} = 185$  мкс,  $t_{23} = 790$  мкс

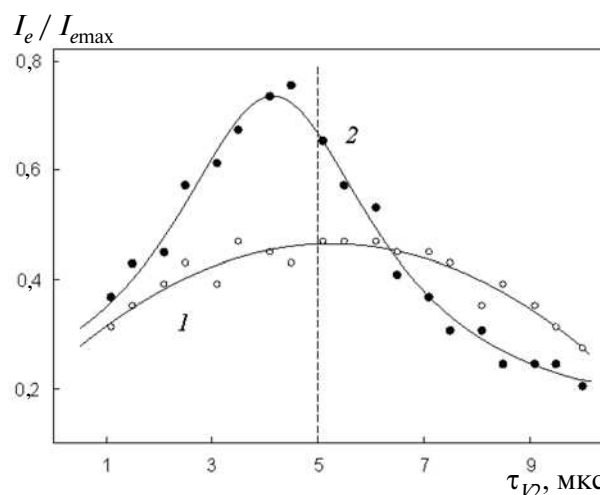


Рис. 4. Зависимости амплитуды восстановленного двухимпульсного эхосигнала от длительности второго видеоимпульса при фиксированной длительности первого ( $\tau_{V1} = 5$  мкс) в двух вариантах действия на образец восстанавливающей последовательности видеоимпульсов: разнополярном (1) и однополярном (2)



виях действия на образец восстанавливающей последовательности видеопульсов (в двух вариантах: одно- и разнополярном). Из рисунка видно, что максимальное восстановление действительно достигается при  $\tau_{11} = \tau_{12}$ , причем уровень восстановленного отклика может приближаться к исходному.

Таким образом, в настоящей работе исследован характер действия импульсов магнитного поля на формирование откликов ядерной спиновой системы (двухимпульсного и стимулированного

эхо-сигналов) в феррите. Обнаружены особенности этого явления, связанные с восстановлением подавленного сигнала в разных последовательностях. Выявлена важная роль доменной структуры, и показано, что в случае вещества с большими полями анизотропии влияние импульсного магнитного поля на сигналы ЯМР должно происходить преимущественно по механизму, связанному со смещением доменных границ. Установленные закономерности должны быть полезны при совершенствовании радиоспектроскопических методов исследования магнитоупорядоченных веществ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мамниашвили, Г.И.** Особенности влияния импульсов постоянного магнитного поля на ядерное спиновое эхо в магнетиках [Текст] / Г.И. Мамниашвили, Т.О. Гегечкори, А.М. Ахалкаци, Ц.А. Гавашели // Физика низких температур. – 2012. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 598 – 605.
2. **Oliveira, I.S.** A model for domain and domain wall NMR signals in magnetic materials [Text] / I.S. Oliveira, A.P. Guimarães // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1997. – Vol. 170. – № 3. – P. 277 – 284.
3. **Баруздин, С.А.** Нелинейное эхо и обработка сигналов [Текст] / С.А. Баруздин. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 186 с.
4. **Нестеров, М.М.** Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов [Текст] / М.М. Нестеров, И.В. Плешаков, Я.А. Фофанов // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16. – № 2. – С. 3 – 21.
5. **Леше, А.** Ядерная индукция [Текст] / А. Леше – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 684 с.
6. **Петров, М.П.** Электронно-ядерные взаимодействия [Текст]: В кн. «Физика магнитных диэлектриков» / М.П. Петров. – М.: Мир, 1974. – С. 177–284.
7. **Kurkin, M.I.** Problems of nuclear magnetism in magnetically ordered materials [Text] / M.I. Kurkin // Physics of Metals and Metallography. – 2000. – Vol. 89. – № 1. – P. 48 – 57.
8. **Плешаков, И.В.** Анализ поведения сигнала ядерного спинового эха в намагничиваемом феррите [Текст] / И.В. Плешаков, С.И. Голощапов, Ю.И. Кузьмин [и др.] // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22. – № 3. – С. 17 – 24.
9. **Zalesskij, A.V.** Application of the NMR technique to studies of the domain structure of ferromagnets [Text] / I.S. Zalesskij, A.V. Zheludev // Atomic Energy Review. – 1976. – Vol. 14. – № 1. – P. 133 – 63.
10. **Апушкинский, Е.Г.** К вопросу миниатюризации устройств обработки информации на основе ядерного спинового эха [Текст] / Е.Г. Апушкинский, А.В. Казак, О.А. Нестеров // Вопросы радиоэлектроники. – 1982. – Сер. ТПО. – Вып. 1. – С. 13 – 22.
11. **Найден, Е.П.** Магнитные свойства и параметры структуры наноразмерных порошков оксидных ферромагнетиков [Текст] / Е.П. Найден, В.А. Журавлев, В.И. Итин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 857 – 863.
12. **Плешаков, И.В.** Исследование действия импульсного магнитного поля на сигнал ядерного спинового эха в феррите [Текст] / И.В. Плешаков, Н.С. Клѣхта, Ю.И. Кузьмин // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – № 18. – С. 60 – 67.

---

**КЛѢХТА Николай Сергеевич** – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
klekhhta@mail.ru

**ПЛЕШАКОВ Иван Викторович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

1195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
ivanple@yandex.ru

**ДУДКИН Валентин Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

1195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013