

## ТРАНСПОРТНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ

*А.Б. Грановский<sup>1</sup>, Ю.Е. Калинин<sup>2</sup>, А.В. Ситников<sup>2</sup>, О.В. Стогней<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РФ 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

тел.: 8(495)939-47-87; e-mail: granov@magn.ru

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет

РФ 394026, Воронеж, Московский пр., 14

тел.: 8(473)246-66-47; e-mail: kalinin48@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.20.006

Заключение совета рецензентов: 14.09.15 Заключение совета экспертов: 21.09.15 Принято к публикации: 28.09.15

В области наногранулированных композитов ферромагнетик-полупроводник и мультислойных структур на их основе обсуждается ряд интересных эффектов, таких как гигантское магнитосопротивление, аномальный эффект Холла и др., природа которых до конца не исследована. В многослойных системах гранулированный суперпарамагнетик – полупроводник (металл) в определенном диапазоне толщин полупроводниковой прослойки экспериментально наблюдается новое физическое явление – упорядочение магнитных моментов гранул, природа которого пока теоретически не объяснена. Рассмотрены также весьма перспективные с практической точки зрения высокочастотные магнитные свойства. В слоевых композитах ферромагнетик-пьезоэлектрик наряду с магнитоэлектрическим эффектом наблюдается возникновение нечетной магнитной термо-ЭДС, что важно при разработке датчиков магнитного поля, которые могут не только измерять напряженность магнитного (или электрического) поля, но и его полярность.

Ключевые слова: магнитные и электрические свойства, нанокompозиты, многослойные структуры, магнитное упорядочение, магнитосопротивление, эффект Холла.

## TRANSPORT AND MAGNETIC PHENOMENA IN NANOHETEROGENEOUS STRUCTURES

*A.B. Granovsky<sup>1</sup>, Yu.E. Kalinin<sup>2</sup>, A.V. Sitnikov<sup>2</sup>, O.V. Stognei<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

1 Leninskie gory, Moscow, 119991 Russian Federation

ph.: 8(495)939-47-87, e-mail: granov@magn.ru

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University

14 Moskovsky ave., Voronezh, 394026 Russian Federation

ph.: 8(473)246-66-47, e-mail: kalinin48@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.20.006

Referred 14 September 2015 Received in revised form 21 September 2015 Accepted 28 September 2015

A number of interesting effects such as giant magnetoresistance, the anomalous Hall effect and some others are observed in nanogranulated ferromagnet-semiconductor composites and multilayer-structures based on the composites. The nature of the effects is not fully investigated up to now. In some cases there is the discovery of new effects. For example, in granular superparamagnetic / semiconductor (metal) multilayer systems a new physical phenomenon (the ordering of the granules magnetic moments) was experimentally observed in a certain range of thickness of the semiconductor layers. The physical nature of the phenomenon has no theoretical explanation. Besides that these multilayer systems exhibit a very promising for practical application magnetic properties in high-frequency region. The odd magnetic thermoelectric power is expected to appearance in the laminate ferromagnetic-piezoelectric composite. This odd effect is important in the development of magnetic field sensors, which can not only measure the magnetic (or electric) field but also can measure its polarity.

Keywords: magnetic and electrical properties, nanocomposites, multilayer structures, magnetic ordering, magnetoresistance, Hall effect.



Александр Борисович  
Грановский  
Alexander B. Granovsky

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, профессор физики магнетизма физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

**Образование:** физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

**Область научных интересов:** физика магнитных явлений.

**Публикации:** 233.

**Information about the author:** DSc, professor of the Magnetism department, Lomonosov Moscow State University.

**Education:** Lomonosov Moscow State University.

**Research area:** physics of magnetic phenomena.

**Publications:** 233.



Юрий Егорович  
Калинин  
Yury E. Kalinin

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики твердого тела Воронежского государственного технического университета.

**Образование:** Воронежский политехнический институт (1976).

**Область научных интересов:** многослойные структуры, магнитные и электрические свойства, комплексная магнитная проницаемость, композиты.

**Публикации:** 322.

**Information about the author:** DSc, prof., Head of the Solid State Physics department, Voronezh State Technical University.

**Education:** Voronezh Polytechnic Institute (1976).

**Research area:** multilayer structures, magnetic and electrical properties, complex magnetic permeability, composites.

**Publications:** 322.



Александр Викторович  
Ситников  
Aleksandr V. Sitnikov

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики твердого тела Воронежского государственного технического университета.

**Образование:** Воронежский политехнический институт (1983).

**Область научных интересов:** многослойные структуры, магнитные и электрические свойства, комплексная магнитная проницаемость, композиты.

**Публикации:** 266.

**Information about the author:** DSc, prof. of the Solid State Physics department, Voronezh State Technical University.

**Education:** Voronezh Polytechnic Institute (1983).

**Research area:** multilayer structures, magnetic and electrical properties, complex magnetic permeability, composites.

**Publications:** 266.



Олег Владимирович  
Стогней  
Oleg V. Stogney

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики твердого тела Воронежского государственного технического университета.

**Образование:** Воронежский политехнический институт (1987).

**Область научных интересов:** многослойные структуры, магнитные и электрические свойства, комплексная магнитная проницаемость, композиты.

**Публикации:** 101.

**Information about the author:** DSc, prof. of the Solid State Physics department, Voronezh State Technical University.

**Education:** Voronezh Polytechnic Institute (1987).

**Research area:** multilayer structures, magnetic and electrical properties, complex magnetic permeability, composites.

**Publications:** 101.

## Введение

В текущем столетии стремительно развиваются исследования физических явлений в различных наноструктурированных материалах. Особое место среди них занимают наноструктурированные гетерогенные среды, к которым относятся нанокompозиты, однослойные и многослойные структуры, содержащие наночастицы, а именно: наногранулированные пленки металл-металл, металл-диэлектрик, металл-полупроводник и др. Широкий выбор компонент и геометрических параметров наночастиц и слоев, наличие интерфейсов, связанных как с поверхностями раздела наночастиц и окружающей их среды, так и с поверхностями раздела слоев, ярко выраженные классические и квантовые размерные эффекты, различные квантовые явления обуславливают актуальность исследования свойств этих материалов. К таким сравнительно новым феноменам относятся: эффекты близости в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик или ферромагнетик-полупроводник, упругое и неупругое резонансное туннелирование, образование кулоновской щели в спектре носителей тока, гигантское и туннельное магнитосопротивление, гигантский аномальный эффект Холла, магниторефрактивный эффект, магнитоплазменные эффекты усиления магнитооптических явлений и др.

Гранулированные нанокompозиты ферромагнетик-диэлектрик представляют собой искусственно созданные среды, состоящие из металлических гранул размером 2–10 нм, случайным образом распределенных в объеме диэлектрической матрицы. Такие композиты, благодаря уникальной наноструктуре и несложным технологическим приемам, позволяющим легко изменять концентрацию и размеры частиц, представляют собой почти идеальные системы для исследования многих физических свойств наноструктурированных материалов, а также применения этих материалов на практике. Впервые нанокompозитные структуры (cermets в англоязычной литературе) были получены в начале 70-х годов XX века как тонкопленочные высокоомные резистивные слои для микроэлектроники, и в этом же десятилетии были сформулированы основные модельные представле-

ния об электрических и магнитных свойствах композитов [1–5]. Повторный интерес к таким материалам проявился в 90-х годах XX века, когда возникла потребность в магнитных материалах для записывающей аппаратуры.

Исследования магнитных свойств нанокompозитов ферромагнитных гранул в диэлектрической матрице показали [6], что если объемная доля металла ниже перколяционного перехода, гранулы являются однодоменными, а композит в целом при комнатной температуре проявляет суперпарамагнитные свойства. В случае если объемная доля металла превышает порог перколяции, то гранулы образуют связанную фрактальную сетку, и композит проявляет магнитно-мягкие свойства в диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Кроме того, было установлено, что композиты с ферромагнитными гранулами характеризуются наличием гигантского магнитосопротивления [7–9] (8 % при комнатной температуре [10]), а также аномальным эффектом Холла [11], высокими значениями магниторефрактивного эффекта [12–13] и эффекта Керра [14–15].

Настоящая работа посвящена краткому анализу современного состояния научных исследований гетерогенных систем такого рода.

## 1. Транспортные явления в гетерогенных наносистемах

Достаточно большое количество исследований было посвящено механизмам электрической проводимости в нанокompозитах, поскольку они существенно влияют на магнитотранспортные и магнитные характеристики материалов, а электрические свойства наногранулированных композитов радикальным образом зависят от соотношения металлической и диэлектрической фаз в материале. Существуют два принципиально разных режима проводимости в композитах, определяемых объемным соотношением диэлектрической и металлической фаз и, соответственно, структурой материала: металлический режим и неметаллический [16–17].

Металлический режим проводимости реализуется тогда, когда объемная доля металлической фазы в материале превышает порог протекания, т.е. размеры

и количество гранул в единице объема возрастают настолько, что происходит формирование проводящих кластеров и сплошных металлических каналов (цепочек из взаимно контактирующих друг с другом гранул), пронизывающих весь материал и обеспечивающих преимущественно металлический тип проводимости. Между каналами существуют диэлектрические области, которые увеличивают общий уровень электросопротивления материала, но не влияют на механизм проводимости в целом. В этом режиме материал ведет себя как металлический проводник, хотя те его свойства, которые зависят от длины свободного пробега электрона, значительно изменены вследствие сильного рассеяния на границах гранул. Например, электрическая проводимость таких композитов в несколько раз меньше значений, характерных для чистых металлов или металлических сплавов [6].

Неметаллический режим проводимости реализуется тогда, когда объемная доля металлической фазы в композите меньше порога протекания. Структура такого материала состоит из электрически изолированных друг от друга металлических наногранул, разделённых диэлектрическими прослойками. Диэлектрический режим характеризуется высокими значениями удельного электрического сопротивления  $\rho$ , увеличивающимися на несколько порядков при уменьшении доли металла в композите от порога протекания до 0 %. При охлаждении электрическое сопротивление композитов возрастает, и в интервале температур 4,2 ÷ 300 К оно может измениться на нескольких порядков.

Как с фундаментальной, так и с практической точки зрения наибольший интерес представляет именно неметаллический режим проводимости. В этом случае для описания электрических свойств нанокompозитов предложено несколько механизмов проводимости, которые реализуются в различных температурных интервалах. Наиболее ранней моделью, которая объясняет механизм электропереноса в гранулированных композитах металл-диэлектрик, находящихся до порога протекания, – была модель активированного туннелирования электронов, предложенная в работах Шенга и Абельса с сотрудниками [3, 18–19]. В ней предполагается, что перенос заряда осуществляется за счет туннелирования электронов непосредственно из одной гранулы в другую через диэлектрические барьеры, точно так же как это происходит при туннелировании через тонкую диэлектрическую прослойку между металлическими слоями. Туннельная проводимость экспоненциально зависит от параметров барьера, разделяющего металлические гранулы:

$$\sigma \propto \exp(-2(2\pi / \hbar)(2m\phi)^{1/2} s), \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $m$  – эффективная масса электрона;  $\phi$  – эффективная высота барьера;  $s$  – ширина барьера, равная кратчайшему расстоянию между границами гранул. Вклад температурного фактора вносится за счет изменения заряда гранул, возни-

кающего при туннелировании электронов. Поскольку размеры гранул в нанокompозитах малы и составляют единицы нанометров, то при переходе единичного электрона из одной гранулы в другую нарушается их электронейтральность, и электрону при туннелировании необходимо преодолеть энергетический барьер, величина которого пропорциональна энергии создания пары электрически заряженных гранул. Таким образом, несмотря на то, что механизмом электропереноса является туннелирование, принять участие в этом процессе могут лишь электроны, термически активированные выше барьера, который обусловлен кулоновским взаимодействием, так называемой кулоновской блокадой. Число термически активированных электронов, обладающих требуемой (кулоновской) энергией ( $E_C$ ), пропорционально бoльцмановскому фактору [18].

$$N \sim \exp(-E_C / kT), \quad (2)$$

где  $k$  – константа Больцмана;  $T$  – температура. Кулоновская энергия гранулы

$$E_C = \frac{e^2}{\varepsilon} \frac{s}{D^2(1/2 + s/D)}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $D$  – диаметр гранулы. В модели Шенга-Абельса постулировалось, что гранулы являются сферическими, а минимальное расстояние между ними пропорционально диаметру гранул, т.е.  $s/D = \text{const}$  для данного соотношения металлической и диэлектрической фаз [3].

Эти два процесса – туннелирование электронов между гранулами и необходимость приобретения электроном некоторой энергии  $E$  такой, что  $E_C \leq E$  – были приняты во внимание, что позволило получить следующее аналитическое выражение для электросопротивления наногранулированного композита:

$$\rho = \rho_0 \left( \exp(2\sqrt{C/k_B T}) \right), \quad (4)$$

где

$$C = (2\pi / \hbar)(2m\phi)^{1/2} s E_C \quad (5)$$

является энергией активации туннелирования.

Ранние экспериментальные результаты по температурной зависимости для композитов, содержащих простую металлическую фазу (Co-Al-O [10, 20–21] и Fe-SiO<sub>2</sub> [8, 20]), показали, что такой вид ( $\ln \rho \sim T^{-1/2}$ ) действительно наблюдается и подтверждает адекватность предложенной модели.

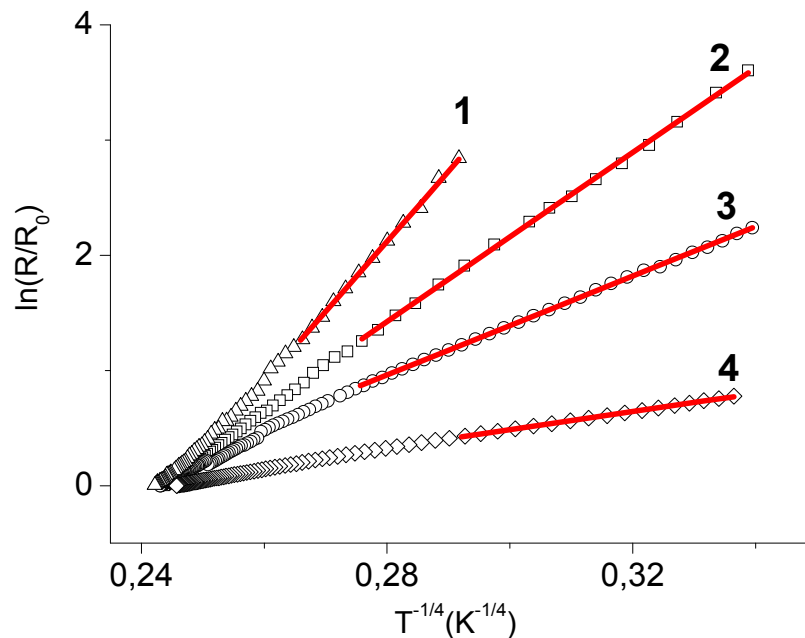
Несмотря на хорошее качественное описание температурной зависимости проводимости в рамках модели термоактивационного туннелирования, количественные оценки, полученные на базе модели, оказываются завышенными на несколько порядков от носителя значений, определяемых эксперимен-

тально, поэтому предпринимались попытки построения более совершенных моделей, описывающих электрические свойства гранулированных композитов. В основе подходов лежат расчеты критических путей протекания электронов проводимости по случайной сетке из активных резисторов, моделирующих гранулированную структуру вблизи порога протекания. Оценка средних значений кулоновской энергии, расстояний между гранулами и их диаметрами (эти параметры рассматриваются независимо друг от друга), а также учет координационного числа (числа ближайших гранул, между которыми возможно туннелирование) позволили получить более точное выражение для проводимости в гранулированных композитах [23–24]. Расчетные значения оказываются соизмеримыми с экспериментальными, однако основная концепция модели термоактивационного туннелирования остается без изменений. К настоящему моменту данная модель электропереноса является наиболее популярной, поскольку позволяет вполне адекватно объяснить явление гигантского магнитосопротивления, наблюдающегося в гранулированных композитах [7–10].

Тем не менее модель термоактивационного туннелирования и её более поздние модификации не объясняют температурную зависимость электросопротивления композитов во всем интервале  $4,2 \div 300$  К. На практике во многих работах [25–27] наблюдалось отклонение температурной зависимости от предсказанной теоретически. Более того, в ряде эксперимен-

тов [28] при приближении к гелиевым температурам наблюдается абсолютное несоответствие с данной моделью, выражающееся в своеобразном насыщении электросопротивления композитов (отсутствие экспоненциального роста электросопротивления при понижении температуры). Не ясно также, какое влияние материал диэлектрической матрицы и материал металлической фазы оказывают на абсолютное значение электросопротивления композитов, хотя эти параметры являются важными для практического применения гранулированных нанокомпозитов. Поэтому в дальнейшем для объяснения экспериментальных результатов в гранулированных системах стали применять и другие модели.

В частности, проведенные авторами работ [29–30] исследования транспортных свойств в нанокомпозитах металл-диэлектрик показали, что при малой концентрации металлической фазы электрическая проводимость осуществляется не только за счет непосредственного туннелирования электронов между гранулами, но и посредством так называемой прыжковой проводимости. Установлено, что в доперколяционных композитах металл-диэлектрик в области низких температур ( $77 \div 180$  К) доминирующим механизмом переноса заряда является прыжковый механизм по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми с переменной длиной прыжка. Экспериментально это подтверждается тем, что электрическая проводимость подчиняется закону  $1/T$  в низкотемпературном интервале  $80 \div 180$  К (рис. 1) [31].



**Рис. 1.** Температурные зависимости электрического сопротивления в координатах  $\ln(R/R_0) \propto (1/T)^{1/4}$  композитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{CaF}_2)_{100-x}$ , полученных в среде аргона, при разных концентрациях металлической фазы  $x$ , ат. %: 1 – 25; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 45

**Fig. 1.** The temperature dependence of the electrical resistance of  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{CaF}_2)_{100-x}$  composites plotted in  $\ln(R/R_0)$  vs  $(1/T)^{1/4}$  coordinates. The samples were obtained in argon at different concentrations of the metallic phase  $x$ , at. %: 1 – 25; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 45

Электрическую проводимость в этом случае можно описать следующим уравнением [41]:

$$\sigma = e^2 R^2 v_{ph} g \exp\left(-\frac{B}{T}\right)^{1/4}, \quad (6)$$

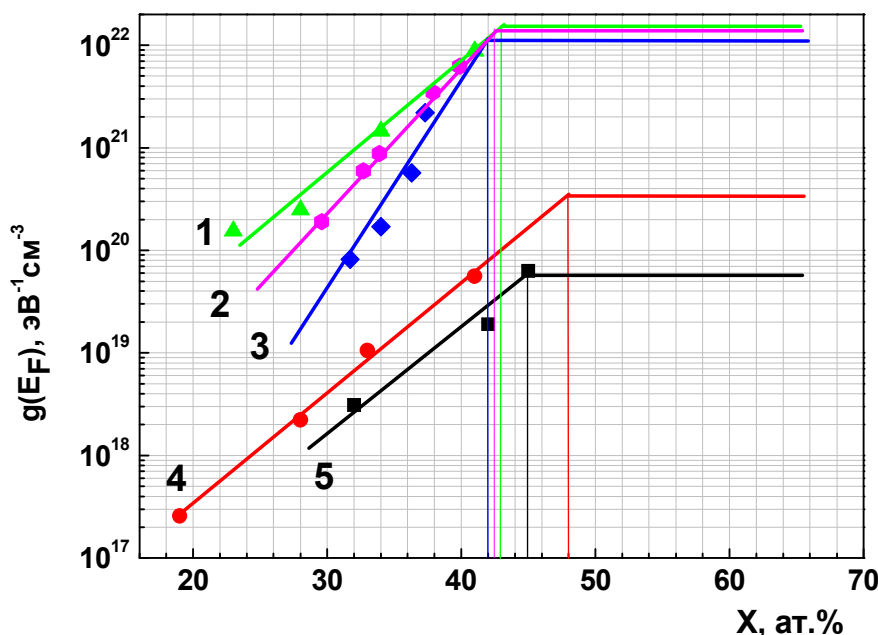
где

$$B = \frac{16}{a^3 k g(E_F)}, \quad (7)$$

$e$  – заряд электрона;  $R$  – расстояние прыжка;  $v_{ph}$  – фактор спектра фононов взаимодействия;  $T$  – абсолютная температура;  $g(E_F)$  – плотность состояний на уровне Ферми;  $a$  – радиус локализации волновой функции электрона;  $k$  – постоянная Больцмана.

Анализ экспериментальных данных по температурным зависимостям электрической проводимости в этом интервале температур позволяет оценить плотность состояний на уровне Ферми как для отдельных составов композитов, так и для металлических гранул [33–34]. Авторами в ранних работах [28–29] была предпринята такая попытка при условии,

что перенос заряда лимитируется прыжками носителей через локализованные состояния диэлектрической матрицы, расположенные между металлическими гранулами. В этом случае в качестве радиуса локализации электрона принимался размер дефекта аморфной матрицы (типа оборванной связи), равный  $\alpha \sim 0,8$  нм, но полученные значения эффективной плотности электронных состояний на уровне Ферми  $g(E_F)$  оказывались завышенными, и справедливость данного механизма вызывала серьезные сомнения. Однако в последующих работах было высказано предположение, что перенос носителей заряда в нанокompозитах с аморфной структурой лимитируется прыжками электронов между изолированными гранулами, расположенными хаотично в диэлектрической матрице, тогда в качестве радиуса локализации волновой функции электрона для оценки эффективной плотности электронных состояний на уровне Ферми нужно брать средний размер металлических гранул в нанокompозите, т.е.  $\alpha \sim 2 \div 3$  нм (средний размер гранул в исследованных композитах  $4 \div 6$  нм). Используя такой подход, авторы получили интересный результат (рис. 2).



**Рис. 2.** Концентрационные зависимости эффективной плотности электронных состояний на уровне Ферми нанокompозитов: 1 –  $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ ; 2 –  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x[\text{Pb}_{0,81}\text{Sr}_{0,04}(\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5})_{0,15}(\text{Zr}_{0,575}\text{Ti}_{0,425})\text{O}_3]_{100-x}$ ; 3 –  $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ ; 4 –  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и 5 –  $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

**Fig. 2.** The concentration dependence of the effective density of electron states at the Fermi level for different nanocomposites: 1 –  $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ ; 2 –  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x[\text{Pb}_{0,81}\text{Sr}_{0,04}(\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5})_{0,15}(\text{Zr}_{0,575}\text{Ti}_{0,425})\text{O}_3]_{100-x}$ ; 3 –  $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ ; 4 –  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и 5 –  $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

Оказалось, что в композитах с одним составом гранул и разными матрицами оценки эффективной плотности электронных состояний на уровне Ферми, которые сделаны для составов, находящихся вблизи порога перколяции, дают одинаковые значения, в то время как при уменьшении концентрации металли-

ческой фазы эти значения расходятся: для композитов с матрицей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  снижение зависимости  $g(E_F) - x$  происходит быстрее, чем у композитов с матрицей  $\text{SiO}_2$ . Еще более интересные закономерности обнаружены у композитов, имеющих одну и ту же матрицу, но разные составы. Значение  $g(E_F)$ , рас-

считанное для композитов с различным элементным составом гранул, растет в соответствии с приведенной последовательностью:  $\text{CoNbTa} \rightarrow \text{CoFeB} \rightarrow \text{CoFeZr} \rightarrow \text{Co}$  [35].

Аналогичные закономерности характерны и для многослойных наноструктур металл-полупроводник, где эффективная плотность электронных состояний изменяется в зависимости от толщины полупроводниковой прослойки [36]. Поэтому задачи последующих исследований: установить области реализации прыжковой проводимости в новых нанокompозитах и многослойных наноструктурах и определить в них плотности электронных состояний на уровне Ферми, что в дальнейшем позволит понять, какое влияние они оказывают на другие физические явления.

Повышение температуры сопровождается сменой механизма проводимости от закона Мотта ( $\ln(\sigma) \propto (1/T)^{1/4}$ ) к неупругому резонансному тунелированию электронов от гранулы к грануле, что позволяет оценить среднее число локализованных состояний, участвующих в электронном транспорте [33], в прослойке между металлическими слоями в многослойных структурах [36] или в диэлектрической матрице композита между металлическими гранулами, и зависимость этих состояний от температуры изотермических отжига [34].

Наконец, при более высоких температурах в нанокompозитах и многослойных структурах ожидается реализация прыжкового механизма проводимости, наблюдаемого в многослойных структурах  $\text{Co}_{0,45}\text{Fe}_{0,45}\text{Zr}_{0,1}/\text{a-Si}$  [36] между ближайшими соседями, что даст возможность оценить энергию активации прыжка электронов в матрице композита или прослойке, также представляющую фундаментальный параметр.

## 2. Магнитные явления в гетерогенных наносистемах

Исследования магнитных свойств широкого класса нанокompозиционных материалов показали, что определяющее влияние на формирование их параметров имеет концентрация фаз и структура кластеров ферромагнитных наногранул, сформированная в процессе роста пленки [37]. Если сетка металлических гранул изотропна, то после порога протекания формируется хорошая магнитно-мягкая структура композита с высокими значениями магнитной проницаемости в ВЧ- и СВЧ-диапазонах частот [38]. До порога протекания композиты ферромагнетик-диэлектрик находятся в суперпарамагнитном состоянии. Такие системы, обладая наноразмерной гетероструктурой, в которой магнитные гранулы диаметром несколько нанометров окружены диэлектриком, имеют высокое удельное сопротивление, зависящее от соотношения проводящей и диэлектрической фаз. Как правило, в качестве ферромагнитной фазы композитов применяются либо переходные металлы  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ , либо сплавы на их основе. В качестве диэлек-

трической матрицы чаще всего используются окислы  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Hf}$  и т. д. или фториды, например  $\text{MgF}_2$ . В ряде публикаций сообщалось о хороших высокочастотных свойствах таких композитов. Так, в работе [39] для композита состава  $\text{Co}_{59}\text{Al}_{11}\text{O}_{30}$  эффективная магнитная проницаемость имеет значение порядка 120 на частоте 500 МГц, удельное электрическое сопротивление сотни мкОм·см, намагниченность насыщения до 1,07 Тл и коэрцитивность 5,8 Э. Для подобной системы в [40] приводятся аналогичные данные:  $\rho \sim 500 \div 1\,000$  мкОм·см,  $B_S \sim 10$  кГс, поле анизотропии  $H_a \sim 80$  Э, действительная часть магнитной проницаемости ( $\mu'$ ) постоянно до частоты 500 МГц. Исследования композитов  $\text{Co-Cr-O}$  [41] показали для состава  $\text{Co}_{75,5}(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{24,5}$  хорошие магнитомягкие свойства:  $H_C \sim 0,39$  Э,  $H_a \sim 80$  Э,  $B_S \sim 11,8$  кГс и постоянное значение  $\mu' \sim 141$  до частоты 800 МГц с частотой естественного ферромагнитного резонанса порядка 2,9 ГГц. Применение в качестве матрицы окиси  $\text{Hf}$  позволяет получить композиты с высоким значением удельного электрического сопротивления при хороших высокочастотных магнитных свойствах [42–45].

Кроме окисных диэлектрических матриц изучались фторсодержащие диэлектрики. Так, в [46] для состава  $\text{Co}_{45}(\text{MgF}_2)_{55}$  использовалось соединение  $\text{MgF}_2$  при  $H_C \sim 0,7$  Э и  $M_S \sim 0,7$  Тл; восприимчивость, равная 26, не изменяла своего значения до частоты 300 МГц.

Использование в качестве ферромагнитной фазы композитов магнитомягких сплавов или составов, имеющих высокое значение намагниченности насыщения, позволило увеличить значение магнитной проницаемости гетерогенных систем, а также увеличить частоту естественного ферромагнитного резонанса [47–52]. Например, в работе [47] в композите  $(\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35})_{91,2}(\text{Zr}_2\text{O}_5)_{8,8}$  эффективная проницаемость составляла  $\sim 400$  при  $B_S \sim 23$  кГс,  $H_C \sim 5$  Э,  $H_a \sim 12$  Э,  $\rho \sim 36$  мкОм·см и  $f_{\text{рез}} \sim 1$  ГГц.

В большинстве случаев исследуемые композиты с хорошими магнитными параметрами имели кристаллическую структуру магнитной фазы, поэтому применение гетероструктур ферромагнитных сплавов в качестве материала металлической компоненты весьма ограничено, поскольку они склоны к аморфизации. Наиболее часто используется состав аморфного сплава  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  [53–54]. Так, в работе [53] композит  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$  имел значения действительной ( $\mu' \sim 40$ ) и мнимой ( $\mu'' \sim 50$ ) частей комплексной магнитной проницаемости на частоте 2 ГГц и  $f_{\text{рез}} \sim 2,8$  ГГц.

В последние годы появилось много теоретических работ, рассматривающих процессы динамического перемагничивания композиционных материалов [49, 55–61]. Как правило, выражения для действительных и мнимых частей комплексной магнитной проницаемости могут быть получены с помощью уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнений Максвелла, а также с учетом того факта, что изме-



нение намагниченности вызвано вращением векторов намагничивания, а не движениями границ доменов. При этом в приложении композитов обычно рассматривается ансамбль не взаимодействующих или слабо взаимодействующих однодоменных ферромагнитных частиц с одноосной магнитной анизотропией и коррелированным расположением осей легкого намагничивания (ОЛН) гранул. Обычно для расчетов частотного спектра  $\mu'$  и  $\mu''$  в теоретических расчетах берется константа кристаллографической анизотропии элемента или сплава, входящего в композит в качестве металлической ферромагнитной фазы. В экспериментальных работах используется поле анизотропии, полученное из кривых намагниченности образцов.

Независимо от элементного состава диэлектрической или металлической фазы кривые намагничивания композитов подчиняются общим закономерностям. На рис. 3 приведены кривые намагничивания аморфных композитов с гранулами из сплавов  $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$  и  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ , измеренные при комнатной температуре и ориентации намагничивающего поля параллельно плоскости пленки.

Анализ результатов магнитостатических исследований гранулированных пленок, выполненных при намагничивании параллельно плоскости пленок при комнатной температуре, показал, что все образцы можно разбить на три группы:

1) В образцах с содержанием ферромагнитной фазы заметно ниже порога перколяции ( $x < 40$  ат.%) кривые перемагничивания соответствуют равновесному суперпарамагнитному режиму, при котором форма кривых и их наклон в нулевом магнитном поле модифицируются в зависимости от концентрации ферромагнитной фазы и температуры, при которой проводились измерения. В этом случае каждая гранула является монодоменом с магнитным моментом, совершающим под действием тепловой энергии флуктуационные переориентации вдоль локальных осей легкого намагничивания с частотой  $109 \div 1\,012$  Гц.

2) Для композитов в диапазоне концентраций в окрестности порога перколяции и небольших полей ( $\sim 2$  кЭ) наклон зависимости намагниченности образца  $m$ , нормированной на намагниченность насыщения,  $m_s$ , от магнитного поля, приложенного в плоскости пленки, практически не зависит от концентрации ферромагнитной фазы и температуры. Эта зависимость в достаточно широком интервале малых полей линейна с дальнейшим перегибом и выходом на насыщение. Установлено, что форма кривых перемагничивания не зависит от направления магнитного поля в плоскости пленок, т. е. какая-либо заметная внутрислойная анизотропия пленок отсутствует. Таким образом, перемагничивание композитов в плоскости пленки имеет вид, типичный для намагничивания в «трудном» направлении. Это позволяет утверждать, что у образцов данной группы имеется одноосная анизотропия с легкой осью намагничивания, перпендикулярной плоскости пленки. Отметим, что поле анизотропии,

определенное из экстраполяции линейного по полю участка зависимости намагниченности в плоскости до пересечения со значением намагниченности насыщения, для образца с  $x = 48$  ат.% превышает 2 кОе.

В этой области концентраций процесс перемагничивания определяется только вращением вектора намагниченности гранул, поскольку движение доменных границ невозможно в результате морфологии их распределения в диэлектрической матрице. Вращение вектора намагниченности происходит с гораздо большей скоростью по сравнению с движением доменных границ, что способствует сохранению высоких значений магнитной проницаемости в более высокочастотном диапазоне по сравнению с гомогенными ферромагнетиками, в том числе и с аморфной структурой, которые перемагничиваются посредством движения доменных границ.

3) Для более высоких концентраций ферромагнитной фазы кривые перемагничивания зависят от состава композитов. Для композитов  $(\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$  кривые сохраняют линейность в малых полях и все характерные признаки так называемого трудного намагничивания. Однако эффективное поле анизотропии, определяемое упомянутым выше способом, с ростом концентрации ферромагнитной фазы уменьшается. В этом диапазоне концентраций снижение величины поля перпендикулярной анизотропии можно связать с нарастающим межгранульным взаимодействием, которое приводит к формированию коллективного состояния. Его магнитные свойства начинают при этом доминировать над свойствами отдельных гранул.

Для композитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$  этой группы, для которых характерно расположение вектора намагниченности в плоскости пленки, кривые намагничивания выходят в насыщение в полях несколько эрстед.

Для композитов этой группы, расположенных за порогом протекания, возникает нарастающее межгранульное взаимодействие, приводящее к формированию коллективного состояния, магнитные свойства которого начинают доминировать над свойствами отдельных гранул. При этом макроскопические магнитные свойства в существенной степени будут определяться энергией магнитной анизотропии уже самой композитной пленки. Формирование гетерогенной структуры пленки происходит при ее росте в результате процессов самоорганизации, а самоорганизация гранулированной среды в процессе роста пленки анизотропии – сложный процесс, зависящий от многих технологических параметров. Основным требованием для реализации данного процесса при росте пленки из паровой фазы является отсутствие взаимной растворимости и химических соединений между образующимися фазами. Если учитывать, что состав фаз гетерогенных систем содержит различные атомы и их химические соединения, а распыление происходит ионно-плазменным методом, то моделирование процесса самоорганизации гетерогенной

структуры – достаточно сложная задача. Пространственная структура металлических гранул и кластеров зависит от многих параметров, и изотропное их распределение в объемном композите скорее исключение, чем правило. Поэтому однозначное установ-

ление природы магнитной анизотропии в тонкопленочных композитах требует не только проведения исследований магнитных свойств, но и данных, полученных с помощью электронной микроскопии и других методов.

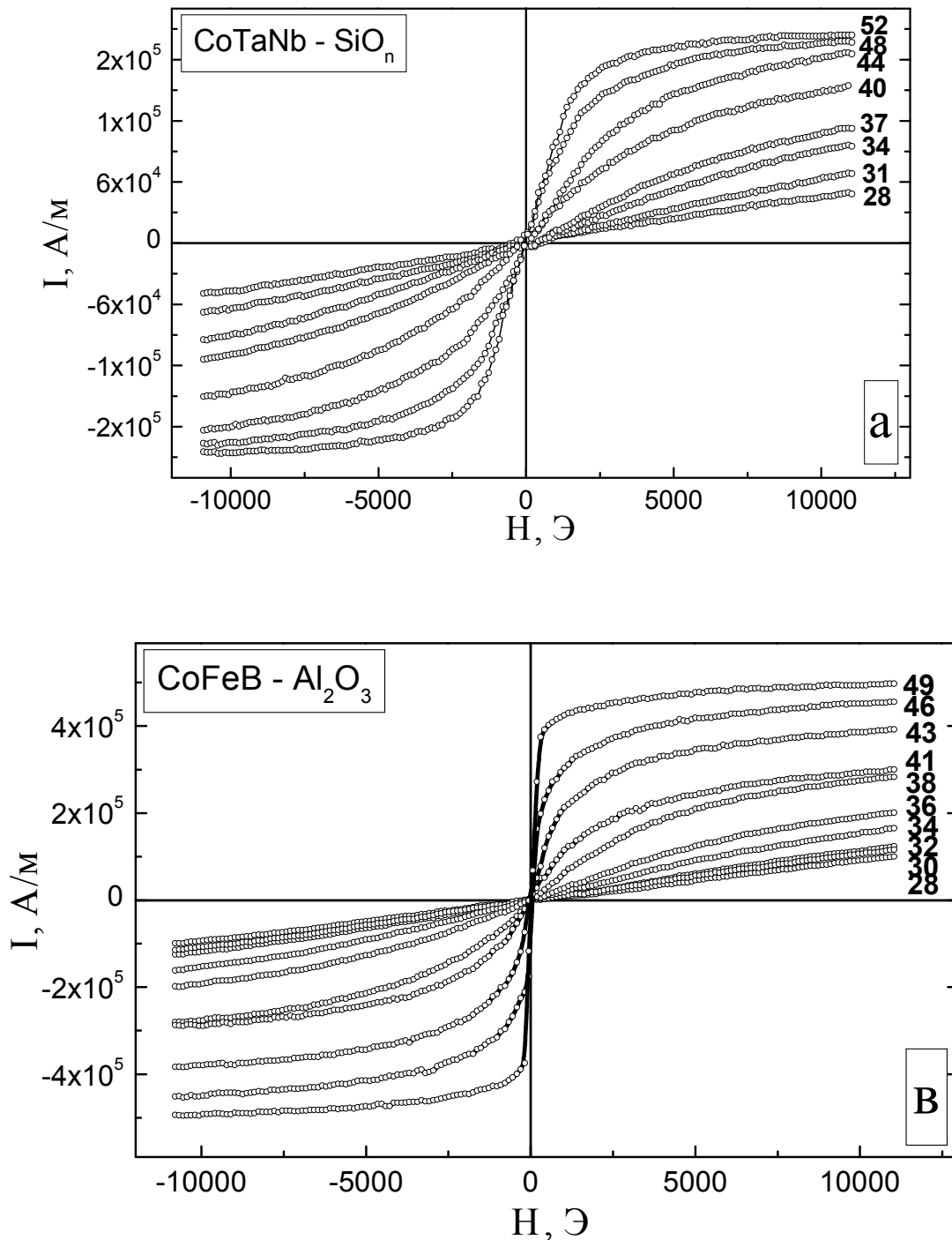


Рис. 3. Кривые намагничивания гранулированных композитов при  $T = 300$  K: а –  $(\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$ ; б –  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$ . Цифры у кривых обозначают содержание металлической фазы в % (ат.)

Fig. 3. The magnetization curves of granular composites measured at 300 K: а –  $(\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$ ; б –  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$ . The numbers on the curves indicate the metal phase concentration in atomic %



В последние годы учёные проявляют большой интерес и к исследованиям мультислойных систем ферромагнитный металл-полупроводник в связи с осцилляцией магнитных взаимодействий между металлическими слоями от толщины полупроводниковой прослойки [62–67]. Физические свойства наномультислойных систем, где толщина слоев порядка нескольких нанометров, во многом определяются структурой [68] и интерфейсными явлениями между различными фазами. Главными трудностями при интерпретации полученных результатов в подобных структурах являются их критичность к качеству поверхности подложки и микродефектам при получении, что может быть причиной непосредственного контакта между металлическими слоями, а также процессы диффузии на границе раздела разнородных фаз, приводящие к образованию соединений металл-полупроводник [69].

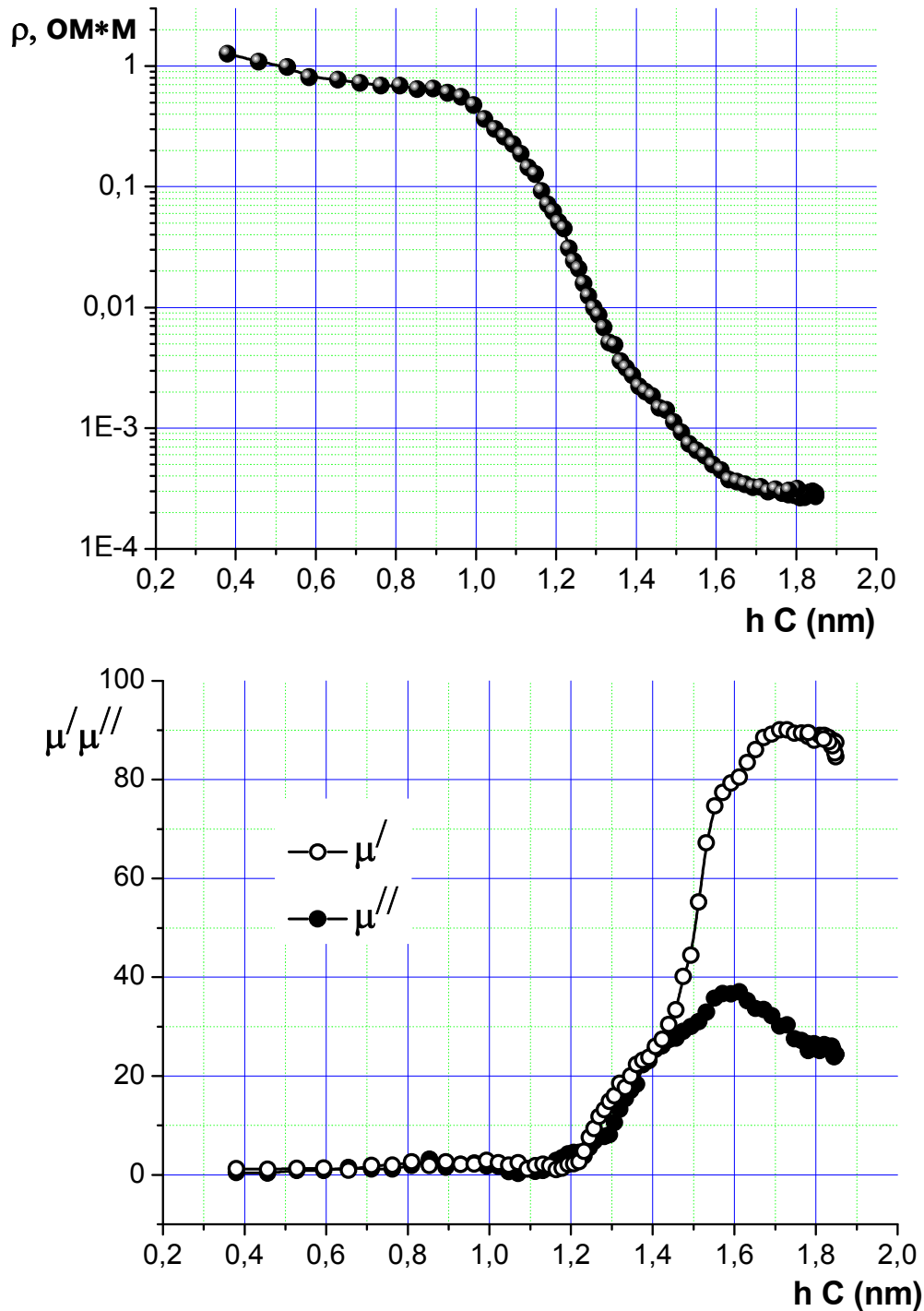
Не менее любопытные закономерности имеют многослойные пленки «суперпарамагнитный композит с полупроводниковой прослойкой». Предварительные исследования авторов работы показали, что если толщина композиционного слоя составляет несколько нанометров и состав его находится до порога перколяции (ферромагнитные гранулы не соприкасаются), то полупроводниковая прослойка усиливает взаимодействие между ферромагнитными частицами настолько, что структура становится магнитоупорядоченной при комнатной температуре [68–73]. На представленной зависимости удельного электрического сопротивления многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33,9}(\text{SiO}_2)_{66,1}]/[\text{C}]\}_{46}$  от толщины углеродной прослойки имеется достаточно узкий диапазон толщин прослойки полупроводника, в котором наблюдается значительное (на несколько порядков) изменение  $\rho(h)$  (рис. 4а). Именно в этом диапазоне наступает магнитное упорядочение композиционных слоёв плёнок, проявляющееся в возрастании значений действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей комплексной магнитной проницаемости (рис. 4б).

В настоящее время существует две точки зрения на наблюдаемое явление. Первая связана с увеличением температуры бифуркации и температуры перехода в суперпарамагнитное состояние при введении в суперпарамагнитный композит проводящих прослоек [69]. Вторая базируется на возникновении сильного обменного взаимодействия между магнит-

ными моментами гранул через электроны проводимости проводящей прослойки [74–75]. Поэтому комплексные экспериментальные исследования различных гетерогенных систем с разной толщиной суперпарамагнитных слоев и проводящих прослоек позволяют в дальнейшем однозначно установить механизм магнитного упорядочения в такого рода гетерогенных системах. Таким образом, теоретически в данных системах главный научный интерес вызывает взаимодействие квазидвумерных моногранульных пленок из ферромагнитных гранул в диэлектрической матрице, находящихся в суперпарамагнитном состоянии, через проводящую прослойку. Подобная структура может обладать уникальными магнитными и магнитооптическими свойствами [76–78].

Особое значение имеют термоэлектрические явления в гетерогенных системах, которые весьма чувствительны к составу и структуре (электронному спектру, типу носителей тока, характеру их взаимодействия с ионной и магнитной подсистемами и т.п.) сплавов, а также действию внешних полей [79–80]. В отличие от таких процессов переноса, как проводимость, в термоэлектрических явлениях решающее влияние могут оказывать вклады в рассеяние электронов второго и более высоких порядков. Чрезвычайно сильное влияние магнитных полей на термо-ЭДС, по-видимому, тесно связано с анизотропией рассеяния. Квантовые осцилляции термо-ЭДС могут быть на несколько порядков больше величин соответствующих осцилляций магнитосопротивления [81–82].

Несмотря на имеющиеся достижения в изучении физических свойств нанокompозитов, механизмы, лежащие в основе многих явлений, например эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС), как в многослойных структурах, так и в гранулированных материалах, до сих пор однозначно не идентифицированы. При этом из-за фокусировки на эффекте ГМС учёные игнорировали изменения в других транспортных свойствах и потеряли важнейшую информацию, которая может сузить диапазон возможных механизмов. В частности, термо-ЭДС под действием магнитного поля проявляет такие изменения, что к нему, по аналогии с ГМС, тоже применим термин «гигантская магнитотермо-ЭДС» (ГМТЭДС) [83–85].



**Рис. 4.** Зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho$  и действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей комплексной магнитной проницаемости (на 50 МГц) от толщины прослойки С для  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33,9}(\text{SiO}_2)_{66,1}]/[\text{C}]]_{46}$

**Fig. 4.** Dependence of the electrical resistivity  $\rho$  as well as the real  $\mu'$  and imaginary  $\mu''$  parts of the complex magnetic permeability (measured at 50 MHz) on the thickness of the carbon layer in  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33,9}(\text{SiO}_2)_{66,1}]/[\text{C}]]_{46}$  structure

Особое место среди магнитотранспортных свойств занимает аномальный эффект Холла (АЭХ) (см. обзор [86]). Хотя этот эффект изучают уже 130 лет, его поведение в высокорезистивных системах, и особенно в нанокompозитах вблизи порога перколяции (см [87] и ссылки в этой работе), а также при прыжковой проводимости остается загадочным. Особую значимость исследования АЭХ приобрели в

последнее время в связи с новыми интерпретациями механизмов АЭХ [86] и с тем, что природа АЭХ и спинового эффекта Холла [86] тождественна. Именно со спиновым эффектом Холла связывают новый этап развития спинтроники и создания бездиссипативных спиновых токов [88]. Измеренные кривые полевых зависимостей сопротивления Холла для композитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al-O})_{100-x}$  приведены на

рис. 5, а на рис. 6 представлены концентрационные зависимости коэффициентов аномального эффекта Холла (АЭХ) и нормального эффекта Холла (НЭХ)

(на вставке – зависимость коэффициента АЭХ от сопротивления).

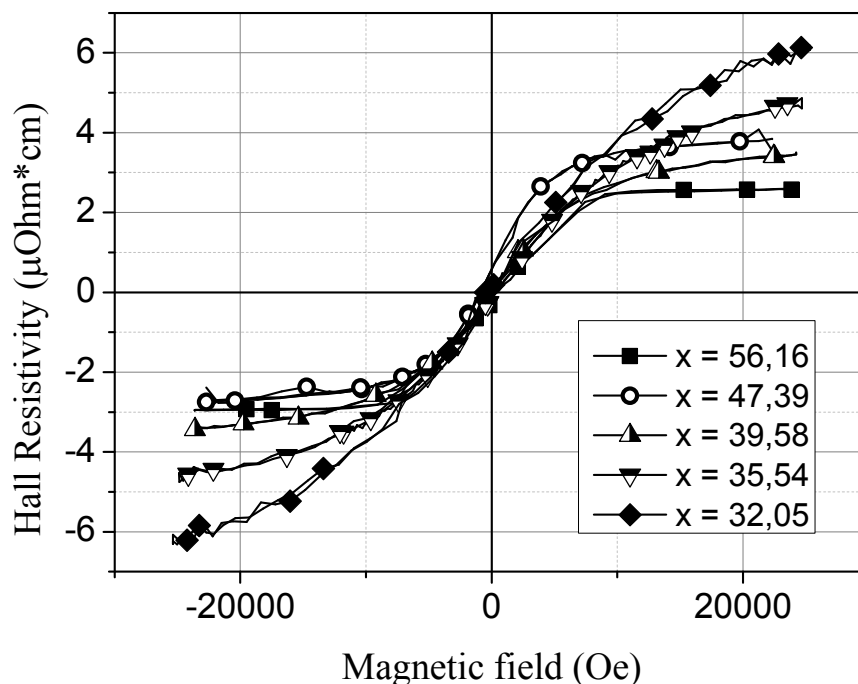


Рис. 5. Зависимости сопротивления Холла для различных образцов композитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{AlO})_{100-x}$  от напряженности внешнего магнитного поля

Fig. 5. The field dependences of the Hall resistance for different samples of  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{AlO})_{100-x}$  composite

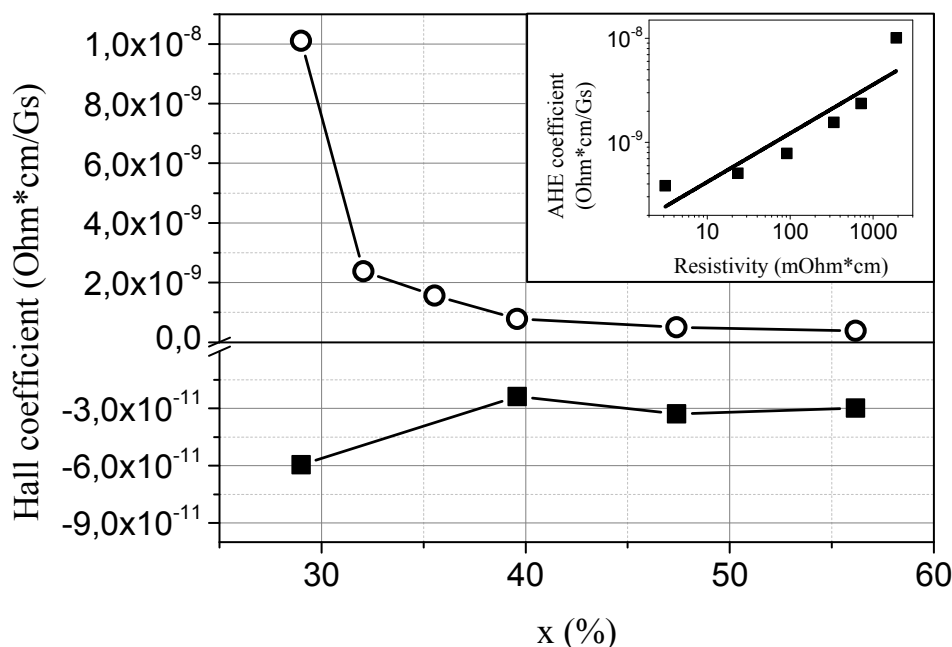


Рис. 6. Зависимости коэффициента нормального эффекта Холла (чёрные квадраты) и коэффициента аномального эффекта Холла (белые круги) от концентрации металлической фазы. На вставке приведена зависимость константы АЭХ от сопротивления

Fig. 6. The concentration dependence of a coefficient of the normal Hall effect (black squares) and coefficient of the anomalous Hall effect (white circles). The inset shows the dependence of the coefficient of anomalous Hall effect vs. the composite resistance

Очевидно, что экспериментальное исследование АЭХ значительно проще, чем спинового эффекта Холла. Оба эффекта связаны с действием спин-орбитального взаимодействия (СОВ) на рассеяние носителей тока. В наноструктурах у поверхности раздела слоев СОВ может быть не только усилено, как это впервые указал Рашба [89], но оно даже может изменять энергетический спектр носителей тока, характер рассеяния и туннелирования [90, 91]. При этом в туннельных зазорах предсказано возникновение постоянно протекающих токов [90]. Роль СОВ Рашбы в наноструктурах практически не изучена, хотя если имеет место усиление СОВ, то оно должно проявляться во многих магнитных явлениях, например в магнитооптике. В новых работах необходимо провести детальное исследование АЭХ в нанокompозитах в широком диапазоне концентраций и поиск проявлений СОВ Рашбы в других явлениях, где необходимо получить ответ на вопрос о природе гигантского АЭХ и об особенностях АЭХ при прыжковом переносе.

Поскольку первоначальный интерес к многослойным структурам возник вследствие открытия в них гигантского магниторезистивного эффекта, благодаря которому многослойные магнитные структуры уже нашли практическое применение [92–97], повышенное внимание учёным необходимо уделить исследованию влияния состава и аморфной структуры слоев на спин-туннельный эффект мультислой и гранулированных нанокompозитов. В частности, при изучении магниторезистивного эффекта в гранулированных нанокompозитах ферромагнетик-диэлектрик была установлена прямая пропорциональная зависимость значения магниторезистивного эффекта от значения магнитострикции ферромагнитных гранул композита [98]. Следует отметить, что только авторам статьи [98] удалось обнаружить такой эффект благодаря исследованию нанокompозитов, которые содержат ферромагнитные гранулы с аморфной структурой, расположенные в диэлектрической матрице. В них, модифицируя состав ферромагнитного сплава, можно изменять значение магнитострикции в широких пределах. При этом было установлено, что значение магнитострикции ферромагнитных гранул влияет и на экваториальный эффект Керра [98]. Предполагается, что такая закономерность обусловлена разной плотностью электронных состояний на уровне Ферми для различных составов гранул и другими причинами [99], однако, до конца физическая природа такой взаимосвязи не ясна [100]. Предлагаемые исследования магниторезистивного эффекта в многослойных пленках и нанокompозитах, состоящих из аморфных ферромагнитных сплавов с различной величиной магнитострик-

ции и диэлектрической прослойки, позволят выяснить причины такой взаимосвязи.

### Заключение

Рассмотрены основные результаты исследований транспортных и магнитных свойств в наногетерогенных структурах (нанокompозитах металл-диэлектрик и многослойных структурах на их основе). Анализ температурных зависимостей электрической проводимости показал, что при содержании металлической фазы ниже порога протекания в области температур  $77 \div 180$  К доминирующим механизмом переноса заряда является прыжковый механизм проводимости с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Дальнейшее повышение температуры сопровождается сменой механизма проводимости от закона Мотта к степенной зависимости.

Исследования магнитных свойств широкого класса нанокompозиционных материалов показали, что до порога протекания композиты ферромагнетик-диэлектрик находятся в суперпарамагнитном состоянии. Если сетка металлических гранул изотропна, то после порога протекания формируется хорошая магнитно-мягкая структура композита с высокими значениями магнитной проницаемости. В многослойных пленках «суперпарамагнитный композит с полупроводниковой прослойкой» наблюдается физическая закономерность: если толщина композиционного слоя составляет несколько нанометров и состав его находится до порога перколяции (ферромагнитные гранулы не соприкасаются), то полупроводниковая прослойка усиливает взаимодействие между ферромагнитными частицами настолько, что структура становится магнитоупорядоченной при комнатной температуре.

Приведены результаты исследования магнитосопротивления, магнитной термо-ЭДС и эффекта Холла в наногетерогенных системах.

### Список литературы

1. Neugebauer C.A. Resistivity of Cermet Films Containing Oxides of Silicon // *Thin Solid Films*. 1970. Vol. 6. P. 443–447.
2. Gittleman J.L., Goldstain Y., Bozowski S. Magnetic properties of Granular Nickel Films // *Physical Review B*. 1972. Vol. B5. P. 3609–3621.
3. Abeles B., Sheng P., Coutts M.D., Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films // *Advances in Physics*. 1975. Vol. 24. P. 407–461.
4. Эфрос А.Л., Шкловский Б.И. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // *УФН*. 1974. Т. 117, № 3. С. 2–14.
5. Efros A.L., Shklovski B.I. Conduction of nanostructured metall – insulator // *Phys. Stat. Solid. B*. 1976, No. 76. P. 475–490.

6. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M., Efetov K.B. Granular electronic systems // *Rev. Mod. Phys.* 2007. Vol. 79, No 2. P. 469–520.

7. Zhanhu Guo, a\_Sung Park, Thomas Hahn H. Giant magnetoresistance behavior of an iron/carbonized polyurethane nanocomposite // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. P. 053111–053113.

8. Meilikhov E.Z., Raquet B., Rakoto H. Magnetoresistance of a ferromagnetic metal nanocomposite with nonspherical granules // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2001. Vol. 92, No. 5. P. 816–819.

9. Kasiuk J.V., Fedotova J.A. et al. Correlation between local Fe states and magnetoresistivity in granular films containing FeCoZr nanoparticles embedded into oxygen-free dielectric matrix // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 586. P. S432–S435.

10. Fujimori H., Mitani S., Ohnuma S. Tunnel-type GMR in metal-nonmetal granular alloy thin films // *Material. Sci. Eng.* 1995. Vol. B31. P. 219–223.

11. Meier H., Kharitonov M.Y., Efetov K.B. Anomalous hall effect in granular ferromagnetic metals and effects of weak localization // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2009. Vol. 80, No. 4. P. 045122–045132.

12. Granovskii A.B., Gan'shina et. al Magnetorefractive effect in nanostructures, manganites and magnetophotonic crystals based on these materials // *J. Comm. Tech. and Electronics*. 2007. Vol. 52. P. 1065–1071.

13. Грановский А.Б., Быков И., Ганьшина Е.А., Гуцин В.С., Козлов А., Юрасов А.Н., Калинин Ю.Е. Магниторефрактивный эффект в магнитных наноккомпозитах // *ЖЭТФ*. 2003. Т. 123, Вып. 6. С. 1256–1267.

14. Buravtsova V.E., Gan'shina E.A., Ivanova O.S., Kalinin Yu.E., Kirov S.A., Pkhongkhiron S., Sitnikov A.V. Evolution of magneto-optical properties of  $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  nanocomposites with a change in the oxygen pressure during their preparation // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2007. Vol. 71. P. 1539–1540.

15. Polyakov V.V., Polyakova K.P., Seredkin V.A., Patrino G.S. Magneto-Optical Kerr Effect Enhancement in Co-Ti-O Nanocomposite Films // *Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 190. P. 506–509.

16. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M. Coulomb effects and hopping transport in granular Metals // *Phys. Rev. B*. 2005. Vol. 72. P. 125121–125141.

17. Болтаев Л.П., Пудонин Ф.А. Влияние слабого электрического поля на проводимость в тонких металлических пленках // *ЖЭТФ*. 2006. Т. 130, Вып. 3(9). С. 500–505.

18. Abeles B., Cohen R.W., Cullen G.W. Enhancement of Superconductivity in Metal Films // *Phys. Rev. Lett.* 1966. Vol. 17. P. 632–634.

19. Sheng P., Abeles B., Arie Y. Hopping conductivity in granular Metals // *Phys. Rev. Lett.* 1973. Vol. 31, No.1. P. 44–47.

20. DongLiang Peng, JunBao Wang, LaiSen Wang, XiaoLong Liu, ZhenWei Wang, YuanZhi Chen. Electron

transport properties of magnetic granular films // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2013. Vol. 56, No.1. P. 15–28.

21. Timopheev A.A., Ryabchenko S.M., Kalita V.M., Lozenko A.F., Trotsenko P.A., Stognei O.V., Sitnikov A.V. Growth-induced perpendicular anisotropy of grains in Co-Al-O nanogranular ferromagnetic films // *Physics of the Solid State*. 2011. Vol. 53, No. 3. P. 494–503.

22. Lin C.-H., Wu G.Y. Hopping conduction in granular metals // *Physica B*. 2000. Vol. B 279. P. 341–346.

23. Beloborodov I.S., Glatz A., Vinokur V.M. Electron transport in nanogranular ferromagnets // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99. P. 066602–066606.

24. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinok V.M. Coulomb effects and hopping transport in granular metals // *Phys. Rev. B*. 2005. Vol. 72. P. 125121–125125.

25. Gridnev S.A., Gorshkov A.G., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E. Charge transfer and dielectric properties of granular nanocomposites  $\text{Co}_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  // *Physics of the Solid State*. 2006. Vol. 48. P. 1186–1188.

26. Zolotukhin I.V., Kalinin Yu.E., Ponomarenko A.T., Shevchenko V.G., Sitnikov A.V., Stognei O.V., Figovsky O. Metal-dielectric nanocomposites with amorphous structure // *J. Nanostructured Polymers and Nanocomposites*, 2006. Vol. 2. No. 1. P. 23–34.

27. Донцова Н.А., Калинин Ю.Е., Каширин М.А., Ситников А.В. Электрические и магниторезистивные свойства наногранулированных пленок  $\text{CoFeB-CaF}_2$  // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 77, № 10. С. 1537–1540.

28. Луцев Л.В., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Электронный транспорт в магнитном поле в гранулированных пленках аморфной двуокиси кремния с ферромагнитными наночастицами // *ФТТ*. 2002. Т. 44, № 10. С. 1802–1810.

29. Калинин Ю.Е., Ремизов А.Н., Ситников А.В. Электрические свойства аморфных наноккомпозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  // *ФТТ*, 2004. Т. 46, Вып. 11. С. 2076–2082.

30. Zolotukhin I.V., Kalinin Yu.E., Ponomarenko A.T. et al. Metal-dielectric nanocomposites with amorphous structure // *J. Nanostructured Polymers and Nanocomposites*. 2006. Vol. 2. No. 1. P. 23–34.

31. Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Звездин А.К. и др. Электрические свойства аморфных гранулированных наноккомпозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x[\text{Pb}_{0.81}\text{Sr}_{0.04}(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})_{0.15}(\text{Zr}_{0.575}\text{Ti}_{0.425}\text{O}_3)]_{1-x}$  // *Перспективные материалы*, 2007. № 3. С. 41–48.

32. Калинин Ю.Е., Ремизов А.Н., Ситников А.В., Самцова Н.П. Структура и электрические свойства аморфных наноккомпозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  // *Перспективные материалы*. 2003. № 3. С. 62–67.

33. Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Физические свойства наноккомпозитов металл-диэлектрик с аморфной структурой // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE)*. 2007. № 10. С. 9–21.

34. Калинин Ю.Е., Королев К.Г., Ситников А.В. Электрические свойства многослойных металл-



полупроводник с аморфной структурой // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, Вып. 6. С. 61–67.

35. Исхаков Р.С., Комогорцев С.В., Денисова Е.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Фрактальная магнитная микроструктура в пленках нанокмпозитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$  // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86, Вып. 7. С. 534–538.

36. Ohnuma S.H., Hono K., Onoder H., Ohnuma S., Fujimori H., Pedersen J.S. Microstructures and magnetic properties of C-Al-O granular thin films // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. No. 2. P. 817–823.

37. Ohnuma S.H., Fujimori H., Mitani S., Masumoto T. High frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79. P. 5130–5135.

38. Morikawa T., Suzuki M., Taga Y. Soft-magnetic properties of Co-Cr-O granular films // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 6664–6666.

39. Sasaki Y., Morita S., Hatanai T., Makino A., Sato T., Yamasawa K. High-frequency soft magnetic properties of nanocrystalline Fe-(Co)-Hf-O films with high electrical resistivity and their applications to micro DC-DC converter // NanoStructured Mat. 1997. Vol. 8. P. 1025–1029.

40. Li Liangliang, Crawford Ankur M., Wang Shan X., Marshall Ann F., Mao Ming, Schneider Thomas, Bubber Randhir. Soft magnetic granular material Co-Fe-Hf-O for micromagnetic device applications // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97, No. 10. P. 907–910.

41. Liangliang Li, Dok Won Lee, Ming Mao, Thomas Schneider, Randhir Bubber, Kyu-Pyung Hwang, Yongki Min, Shan X. Wang. High-frequency responses of granular CoFeHfO and amorphous CoZrTa magnetic materials // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 123912 – 123916.

42. Guangduo Lu, Huaiwu Zhang, John Q. Xiao, Feiming Bai, Xiaoli Tang, Yuanxun Li, Zhiyong Zhong. Influence of sputtering power on the high frequency properties of nanogranular FeCoHfO thin films // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. P. 07A327–07A330.

43. Coonley K.D., Mehas G.J., Sullivan C.R., Gibson U.J. Evaporatively deposited Co-MgF<sub>2</sub> granular materials for thin-film inductors: M.S. thesis, Dartmouth College, 1999.

44. Ohnuma S.H., Fujimori H., Masumoto T., Xiong X.Y., Ping D.H., Hono K. FeCo-Zr-O nanogranular soft-magnetic thin films with a high magnetic flux density // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82, No. 6. P. 946–948.

45. Shihui Ge, Yang Xiaolin, Kim Kwang Youn, Xi Li, Kou Xiaoming, Yao Dongsheng, Li Binsheng, Wang Xinwei Study on mechanism of soft magnetic properties for high-frequency application in Ni<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>-SiO<sub>2</sub> granular films // Phys. Stat. Sol. A. 2005. Vol. 202. No. 10. P. 2021–2027.

46. Kotov L.N., Turkov V.K., Vlasov V.S., Lasek M.P., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Conductive, magnetic and structural properties of multilayer films // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2013. Vol. 47. P. 012027 (1–4).

47. Kanai S., Gajek M., Worledge D.C., Matsukura F., Oh H. Electric field-induced ferromagnetic resonance in a CoFeB/MgO magnetic tunnel junction under dc bias voltages // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 242409–242413.

48. Sankey J.C., Braganca P.M., Garcia A.G.F., Krivorotov I.N., Buhrman R.A., Ralph D.C. Spin-Transfer-Driven Ferromagnetic Resonance of Individual Nanomagnets // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 227601–227608.

49. Wei Y., Brucas R., Gunnarsson K., Celinski Z., Svedlindh P. Positive correlation between coercivity and ferromagnetic resonance extrinsic linewidth in Fe-CoV/SiO<sub>2</sub> films // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. P. 072404–0724011.

50. Lianwen Deng, Zekun Feng, Jianjun Jiang, Huahui He. Percolation and microwave characteristics of CoFeB-SiO<sub>2</sub> nano-granular films // J. Magn. and Magn. Mater. 2007. Vol. 309. P. 285–289.

51. Yanga F.F., Yana S.S., Yub M.X. et al. Enhanced high-frequency electromagnetic properties of Fe-CoB-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayered granular films // Physica B: Condensed Matter. 2012. Vol. 407. P. 1108–1113.

52. Buznikov N.A., Iakubov I.T., Rakhmanov A.L., Sboychakov A.O. High-frequency magnetic permeability of nanocomposite film // J. Magn. and Magn. Mater. 2005. Vol. 293. P. 938–946.

53. Menéndez E., Dias T., Geshev J., Lopez-Barbera J.F., Nogués J., Steitz R., Kirby B.J., Borchers J.A., Pereira L.M.C., Vantomme A., Temst K. Interdependence between training and magnetization reversal in granular Co-CoO exchange bias systems // Phys. Rev. B. 2014. Vol. 89. P. 144407–144414.

54. Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Osipov A.V., Maklakov S.A., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Starostenko S.N. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies // AIP Advances. 2014. Vol. 4. P. 107143–107149.

55. Haiwen Xi, Kai-Zhong Gao, Yiming Shi and Song Xue. Precessional dynamics of single-domain magnetic nanoparticles driven by small ac magnetic fields // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39. P. 4746–4752.

56. Wu L.Z., Ding J., Jiang H.B., Chen L.F., Ong C.K. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites // J. Magn. and Magn. Mat. 2005. Vol. 285. P. 233–239.

57. Neige J., Lepetit T., et al. Evidence of an embedded vortex translation mode in flake-shaped ferromagnetic particle composites // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P. 242401–242407.

58. Nguyen N. Phuoc, Ong C.K. Thermal stability of high frequency properties of gradient-composition sputtered FeCoHf films with and without stripe domains // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. P. 023901.

59. Buravtsova V.E., Ganshina E.A., Kirov S.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Magneto-optical Properties of Layer-by-Layer Deposited Ferromagnet-Dielectric Na-



nocomposites // Materials Sciences and Applications. 2013. Vol. 4. P. 16–23.

60. Burgler D.E., Buchmeier M., Cramm S., Eisebitt S., Gareev R.R., Grunberg P., Jial C.L., Pohlmann L.L., Schreiber R., Siegel M., Qin Y.L., Zimina A. Exchange coupling of ferromagnetic films across metallic and semiconducting interlayers // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. 443–450

61. Васильковский В.О., Патрин Г.С., Великанов Д.А., Свалов А.В., Савин П.А., Ювченко А.А., Щеголева Н.Н. Магнетизм слоев Co в составе многослойных пленок Co/Si // ФТТ. 2007. Т. 49, Вып. 2. С. 291–296.

62. Домашевская Э.П., Чернышев А.В., Ситников А.В. и др. XANES-исследования межатомных взаимодействий в многослойных наноструктурах  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{a-Si})_{40}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$  // ФТТ. 2013. Т. 55. С. 1202–1210.

63. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Т. 12, № 2. С. 1696–1699.

64. Guo Y., Yu X.W., Li Y.X. Spin filtering and spin-polarization reversal in multilayered ferromagnetic metal/semiconductor heterostructures // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 053902–053907.

65. Аронзон Б.А., Грановский А.Б., Давыдов А.Б., Докукин М.Е., Калинин Ю.Е., Николаев С.Н., Рыльков В.В., Ситников А.В., Тугушев В.В. Планарный эффект Холла и анизотропное магнитосопротивление в слоистых структурах  $\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}$  с перколяционной проводимостью // ЖЭТФ. 2006. Т. 130, Вып. 1(7). С. 127–136.

66. Szuszkiewicz W., Fronc K., Baran M., Szymczak R., Ott F., Hennion B., Dynowska E., Paszkowicz W., Pelka J.B., Zuberek R., Jouanne M., Morhange J.F. Interlayer Magnetic Coupling for Fe/Si Multilayers // J. Superconductivity: Inc. Nov. Magn. 2003. Vol. 16, No. 1. P. 1152–1158.

67. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Т. 12, № 2. С. 1696–1699.

68. Дунец О.В., Калинин Ю.Е., Каширин М.А., Ситников А.В. Электрические и магнитные свойства мультислойных структур на основе композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$  // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. С. 114–120.

69. Иванов А.В., Калинин Ю.Е., Нечаев В.Н., Ситников А.В. Электрические и магнитные свойства мультислойных структур  $[(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/(\alpha\text{-SiH})]_n$  // ФТТ. 2009. Т. 60, Вып. 12. С. 2331–2336.

70. Komogortsev S.V., Denisova E.A., Sitnikov A.V. et al. Multilayer nanogranular films  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{50}(\text{SiO}_2)_{50}/\text{a-Si:H}$  and  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{50}(\text{SiO}_2)_{50}/\text{SiO}_2$ : Magnetic properties //

Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 113. P. 17C105–170109.

71. Ситников А.В. Электрические и магнитные свойства наногетерогенных систем металл-диэлектрик: Диссертация на соискание ученой степени д-ра. физ.-мат. наук. Воронеж: ВГТУ, 2009. 318 с.

72. Дядькина Е.А., Воробьев А.А., Уклеев В.А., Лотт Д., Ситников А.В., Калинин Ю.Е., Геращенко О.В., Григорьев С.В. Морфология, магнитные и проводящие свойства гетерогенных слоистых магнитных структур  $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\text{a-Si:H}]_{36}$  // ЖЭТФ. 2014. Т. 145, Вып. 3. С. 472–480.

73. Chekrygina Ju., Devizenko A., Kalinin Yu., Kirov S., Lebedeva E., Shipkova I., Sitnikov A., Syr'ev N., Vyzulin S. Magnetic and Magnetoresonance Properties of Multilayered Systems Based on  $(\text{CoFeB})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  Composite Layers // Solid State Phenomena. 2014. Vol. 215. P. 272–277.

74. Ганьшина Е.А., Перов Н.С., Пхонгхирун С., Мигунов В.Е., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Усиление магнитооптического отклика в многослойной системе нанокompозит-гидрогенизированный аморфный кремний // Известия РАН. Сер. Физическая. 2008. № 10. С. 1455–1457.

75. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Шипкова И.Г. Комплексный анализ статических и динамических магнитных характеристик мультислойных наноструктур  $\text{CoFeZr}/\alpha\text{-Si}$  // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, Астрономия. 2009. № 2. С. 32–36.

76. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Шипкова И.Г. ФМР, магнитные и резистивные свойства мультислойных наноструктур  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$  // Известия РАН. Сер. Физическая. 2010. Т. 74, № 10. С. 1441–1443.

77. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Чекрыгина Ю.И., Шипкова И.Г. ФМР, магнитные и резистивные свойства наноструктур с гранулированными магнитными слоями // Нанотехника. 2010. № 3(23). С. 16–21.

78. Vashuk M.V., Gan'shina E.A., Phonghirun S., Tulskey I.I., Shcherbak P.N., Kalinin Yu.E. Optical and magneto-optical properties of  $\{\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}\}_n$  multilayers // Non-crystall. Solids. 2007. Vol. 353. P. 962–964.

79. Glatz A., Beloborodov I.S. Thermoelectric and Seebeck coefficients of granular metals // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. P. 235403.

80. Glatz A., Beloborodov I.S. Thermoelectric properties of granular metals // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. P. 041404(R)–041408(R).

81. Tsypliyatyev O., Kashuba O., Fal'ko V.I. Thermally excited spin current and giant magnetothermopower in metals with embedded ferromagnetic nanoclusters // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74. P. 132403–132406.

82. Dubi Y., M. Di Ventra. Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions // *Rev. Mod. Phys.* 2011. Vol. 83. P. 131–155.

83. Wang K., Wang L., Petrovic C. Large magnetothermopower effect in Dirac materials (Sr/Ca)MnBi<sub>2</sub> // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. P. 112111–112116.

84. Tsyplatyev O., Kashuba O., Fal'ko V. Giant magnetothermopower and magnetoresistance in metals with embedded ferromagnetic nanoclusters // *J. Appl. Phys.* 2007. Vol. 101. P. 014324–014329.

85. López-Monís C., Matos-Abiague A., Fabian J. Tunneling magnetothermopower in magnetic tunnel junctions // *Phys. Rev. B.* 2014. Vol. 89. P. 054419–054422.

86. Nagaosa N., Sinova J., Onoda S. et al. Anomalous Hall effect // *Rev. Mod. Phys.* 2010. Vol. 82. P. 1539–1579.

87. Mikhailovsky Yu.O., Metus D.E., Kazakov A.P. et al. Anomalous Hall effect in (Co<sub>41</sub>Fe<sub>39</sub>B<sub>20</sub>)<sub>x</sub>(Al–O)<sub>100–x</sub> // *JETP Lett.* 2013. Vol. 97. P. 473–479.

88. Hoffman A. Spin Hall Effect // *IEEE transactions on magnetics.* 2013. Vol. 49, No. 10. P. 5172.

89. Rashba E.I. Properties of semiconductors with an extremum loop .1. Cyclotron and combinational resonance in a magnetic field perpendicular to the plane of the loop // *Sov. Phys. Solid. State.* 1960. Vol. 2. P. 1109–1135.

90. Vedyayev A.V., Titova M.S., Ryzhanova N.V. et al. Anomalous and spin Hall effects in a magnetic tunnel junction with Rashba spin-orbit coupling // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103. P. 032406–032411.

91. Vedyayev A.V., Ryzhanova N.V., Strelkov N., Dieny B. Anomalous Hall effect in magnetic tunnel junction // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110. P. 247204–247206.

92. Geng H., Wei J.Q., Nie S.J. et al. Soft magnetic property and high-frequency permeability of [Fe<sub>80</sub>Ni<sub>20</sub>–O/SiO<sub>2</sub>]<sub>n</sub> multilayer thin films for applications in GHz range // *Materials Letters.* 2013. Vol. 92. P. 346–349.

93. Geng H., Wei J.Q., Wang Z.W. et al. Soft magnetic property and high-frequency permeability of [Fe<sub>80</sub>Ni<sub>20</sub>–O/TiO<sub>2</sub>]<sub>n</sub> multilayer thin films // *Journal of Alloys and Compounds.* 2013. Vol. 576. P. 13–17.

94. Thomson T. Magnetic properties of metallic thin films in: Barmak K. and Coffey K. (Eds.) *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*, Elsevier. 2014. P. 454–546.

95. Sarkar J. Ferromagnetic Sputtering Targets and Thin Films for Silicides and Data Storage, in: Sarkar J. *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*. Elsevier. 2013. 603 p.

96. Barmak K., Coffey K. (Eds.) *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. Elsevier. 2014. 634 p.

97. Shi D., Guo Z., Bedford N. Nanomagnetic Materials, in: D. Shi (Ed.) // *Nanomaterials and Devices*. Elsevier. 2015. P. 105–159.

98. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Гушин В.С., Калинин Ю.Е. и др. Гигантское магнитосопротивле-

ние и магнитооптические свойства гранулированных нанокомпозитов металл-диэлектрик // *Известия РАН. Сер. Физ.* 2003. Т. 67, № 7. С. 918–920.

99. Kadigrobov A.M., Fistul M.VOL., Efetov K.B. Magnetotransport along a barrier: multiple quantum interference of edge states // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics.* 2006. Т. 73, No 23. С. 235313–235321.

100. Гряднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. *Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.

## References

1. Neugebauer C.A. Resistivity of Cermet Films Containing Oxides of Silicon. *Thin Solid Films*, 1970, vol. 6, pp. 443–447 (in Eng.).

2. Gittleman J.L., Goldstein Y., Bozowski S. Magnetic properties of Granular Nickel Films. *Physical Review B*, 1972, vol. B5, pp. 3609–3621 (in Eng.).

3. Abeles B., Sheng P., Coutts M.D., Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films. *Advances in Physics*, 1975, vol. 24, pp. 407–461 (in Eng.).

4. Ėfros A.L., Shklovsky B.I. Teoriâ protekaniâ i provodimost' sil'no neodnorodnyh sred. *UFN*, 1974, vol. 117, no. 3, pp. 2–14 (in Russ.).

5. Efros A.L., Shklovski B.I. Conduction of nanostructured metall-insulator. *Phys. Stat. Solid.*, vol. 1976, no. 76, pp. 475–490 (in Eng.).

6. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M., Efetov K.B. Granular electronic systems. *Rev. Mod. Phys.*, 2007, vol. 79, no 2, pp. 469–520 (in Eng.).

7. Zhanhu Guo, a Sung Park, Thomas Hahn H. Giant magnetoresistance behavior of an iron/carbonized polyurethane nanocomposite. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, pp. 053111–053113 (in Eng.).

8. Meilikhov E.Z., Raquet B., Rakoto H. Magnetoresistance of a ferromagnetic metal nano-composite with nonspherical granules. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2001, vol. 92, no. 5, pp. 816–819 (in Eng.).

9. Kasiuk J.V., Fedotova J.A. et al. Correlation between local Fe states and magnetoresistivity in granular films containing FeCoZr nanoparticles embedded into oxygen-free dielectric matrix. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 586, pp. S432–S435 (in Eng.).

10. Fujimori H., Mitani S., Ohnuma S. Tunnel-type GMR in metal-nonmetal granular alloy thin films. *Master. Sci. Eng.*, 1995, vol. B31, pp. 219–223 (in Eng.).

11. Meier H., Kharitonov M.Y., Efetov K.B. Anomalous hall effect in granular ferromagnetic metals and effects of weak localization. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 2009, vol. 80, no. 4, pp. 045122–045132 (in Eng.).

12. Granovskii A.B., Gan'shina et. al Magnetorefractive effect in nanostructures, manganites and magnetopho-



tonic crystals based on these materials. *J. Comm. Tech. and Electronics*, 2007, vol. 52, pp. 1065–1071 (in Eng.).

13. Granovsky A.B., Bykov I., Gan'shina E.A., Gushchin V.S., Kozlov A., Yurasov A.N., Kalinin Yu.E. Magnitorefektivnyj effekt v magnitnyh nanokompozitah. *ŽETF*, 2003, vol. 123, issue 6, pp. 1256–1267 (in Russ.).

14. Buravtsova V.E., Gan'shina E.A., Ivanova O.S., Kalinin Yu.E., Kirov S.A., Pkhongkhirun S., Sitnikov A.V. Evolution of magneto-optical properties of  $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  nanocomposites with a change in the oxygen pressure during their preparation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2007, vol. 71, pp. 1539–1540 (in Eng.).

15. Polyakov V.V., Polyakova K.P., Seredkin V.A., Patrino G.S. Magneto-Optical Kerr Effect Enhancement in Co-Ti-O Nanocomposite Films. *Solid State Phenomena*, 2012, vol. 190, pp. 506–509 (in Eng.).

16. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M. Coulomb effects and hopping transport in granular Metals. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 72, pp. 125121–125141. (in Eng.).

17. Boltaev L.P., Pudonin F.A. Vliânie slabogo èlektričeskogo polâ na provodimost' v tonkih metalličeskikh plenkah. *ŽETF*, 2006, vol. 130, issue 3(9), pp. 500–505 (in Russ.).

18. Abeles B., Cohen R.W., Cullen G.W. Enhancement of Superconductivity in Metal Films. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, vol. 17, pp. 632–634 (in Eng.).

19. Sheng P., Abeles B., Arie Y. Hopping conductivity in granular Metals. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, vol. 31, no. 1, pp. 44–47 (in Eng.).

20. DongLiang Peng, JunBao Wang, LaiSen Wang, XiaoLong Liu, ZhenWei Wang, YuanZhi Chen. Electron transport properties of magnetic granular films. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, vol. 56, no. 1, pp. 15–28 (in Eng.).

21. Timopheev A.A., Ryabchenko S.M., Kalita V.M., Lozenko A.F., Trotsenko P.A., Stognei O.V., Sitnikov A.V. Growth-induced perpendicular anisotropy of grains in Co-Al-O nanogranular ferromagnetic films. *Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 494–503 (in Eng.).

22. Lin C.-H., Wu G.Y. Hopping conduction in granular metals. *Physica B*, 2000, vol. B 279, pp. 341–346 (in Eng.).

23. Beloborodov I.S., Glatz A., Vinokur V.M. Electron transport in nanogranular ferromagnets. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 99, pp. 066602–066606 (in Eng.).

24. Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinok V.M. Coulomb effects and hopping transport in granular metals. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 72, pp. 125121–125125 (in Eng.).

25. Gridnev S.A., Gorshkov A.G., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E. Charge transfer and dielectric properties of granular nanocomposites  $\text{Co}_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ . *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, pp. 1186–1188 (in Eng.).

26. Zolotukhin I.V., Kalinin Yu.E., Ponomarenko A.T., Shevchenko V.G., Sitnikov A.V., Stognei O.V., Figovsky O. Metal-dielectric nanocomposites with amorphous structure. *J. Nano-structured Polymers and Nanocomposites*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 23–34 (in Eng.).

27. Doncova N.A., Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Sitnikov A.V. Èlektričeskie i magnitirezistivnye svojstva nanogranulirovannyh plenok  $\text{CoFeB-CaF}_2$ . *Izvestiâ RAN. Seriâ fizičeskââ*, 2013, vol. 77, no. 10, pp. 1537–1540 (in Eng.).

28. Lucev L.V., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Èlektronnyj transport v magnitnom pole v granulirovannyh plenkah amorfnoj dvoukisi kremniâ s ferromagnitnymi nanočasticami. *FTT*, 2002, vol. 44, no. 10, pp. 1802–1810 (in Russ.).

29. Kalinin Yu.E., Remizov A.N., Sitnikov A.V. Èlektričeskie svojstva amorfnyh na-nokompozitov  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ . *FTT*, 2004, vol. 46, issue 11, pp. 2076–2082 (in Russ.).

30. Zolotukhin I.V., Kalinin Yu.E., Ponomarenko A.T. et al. Metal-dielectric nanocomposites with amorphous structure. *J. Nanostructured Polymers and Nanocomposites*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 23–34 (in Eng.).

31. Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Zvezdin A.K. et al. Èlektričeskie svojstva amorfnyh granulirovannyh nanokompozitov  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x[\text{Pb}_{0.81}\text{Sr}_{0.04}(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})_{0.15}(\text{Zr}_{0.575}\text{Ti}_{0.425})\text{O}_3]_{1-x}$ . *Perspektivnye materialy*, 2007, no. 3, pp. 41–48 (in Russ.).

32. Kalinin Yu.E., Remizov A.N., Sitnikov A.V., Samcova N.P. Struktura i èlektričeskie svojstva amorfnyh nanokompozitov  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ . *Perspektivnye materialy*, 2003, no. 3, pp. 62–67 (in Russ.).

33. Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Fizičeskie svojstva nanokompozitov metall–dièlektrik s amorfnoj strukturoj. *International Scientific Journal "Alternativnââ ènergetika i èkologîâ" (ISJAE)*, 2007, no. 10, pp. 9–21 (in Russ.).

34. Kalinin Yu.E., Korolev K.G., Sitnikov A.V. Èlektričeskie svojstva mnogosloek metall-poluprovodnik s amorfnoj strukturoj. *Pis'ma v ŽTF*, 2006, vol. 32, issue 6, pp. 61–67 (in Russ.).

35. Ishakov R.S., Komogorcev S.V., Denisova E.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Fraktal'naâ magnitnaâ mikrostruktura v plenkah nanokompozitov  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ . *Pis'ma v ŽETF*, 2007, vol. 86, issue 7, pp. 534–538 (in Russ.).

36. Ohnuma S.H., Hono K., Onoder H., Ohnuma S., Fujimori H., Pedersen J.S. Microstructures and magnetic properties of C-Al-O granular thin films. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, no. 2, pp. 817–823 (in Eng.).

37. Ohnuma S.H., Fujimori H., Mitani S., Masumoto T. High frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, pp. 5130–5135 (in Eng.).

38. Morikawa T., Suzuki M., Taga Y. Soft-magnetic properties of Co-Cr-O granular films. *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 83, pp. 6664–6666 (in Eng.).

39. Sasaki Y., Morita S., Hatanai T., Makino A., Sato T., Yamasawa K. High-frequency soft magnetic properties of nanocrystalline Fe-(Co)-Hf-O films with high electrical resistivity and their applications to micro DC-



DC converter. *NanoStructured Mat.*, 1997, vol. 8, pp. 1025–1029 (in Eng.).

40. Li Liangliang, Crawford Ankur M., Wang Shan X., Marshall Ann F., Mao Ming, Schneider Thomas, Bubber Randhir. Soft magnetic granular material Co-Fe-Hf-O for micromagnetic device applications. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 97, no. 10, pp. 907–910 (in Eng.).

41. Liangliang Li, Dok Won Lee, Ming Mao, Thomas Schneider, Randhir Bubber, Kyu-Pyung Hwang, Yongki Min, Shan X. Wang. High-frequency responses of granular CoFeHfO and amorphous CoZrTa magnetic materials. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, pp. 123912 – 123916 (in Eng.).

42. Guangduo Lu, Huaiwu Zhang, John Q. Xiao, Feiming Bai, Xiaoli Tang, Yuanxun Li, Zhiyong Zhong. Influence of sputtering power on the high frequency properties of nanogranular FeCoHfO thin films. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 109, pp. 07A327–07A330 (in Eng.).

43. Coonley K.D., Mehas G.J., Sullivan C.R., Gibson U.J. Evaporatively deposited Co-MgF<sub>2</sub> granular materials for thin-film inductors: M.S. thesis, Dartmouth College, 1999 (in Eng.).

44. Ohnuma S.H., Fujimori H., Masumoto T., Xiong X.Y., Ping D.H., Hono K. FeCo-Zr-O nanogranular soft-magnetic thin films with a high magnetic flux density. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, vol. 82, no. 6, pp. 946–948 (in Eng.).

45. Shihui Ge, Yang Xiaolin, Kim Kwang Youn, Xi Li, Kou Xiaoming, Yao Dongsheng, Li Binsheng, Wang Xinwei Study on mechanism of soft magnetic properties for high-frequency application in Ni<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>-SiO<sub>2</sub> granular films. *Phys. Stat. Sol. A*, 2005, vol. 202, vol. 10, pp. 2021–2027 (in Eng.).

46. Kotov L.N., Turkov V.K., Vlasov V.S., Lasek M.P., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Conductive, magnetic and structural properties of multilayer films. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 47, pp. 012027 (1–4) (in Eng.).

47. Kanai S., Gajek M., Worledge D.C., Matsukura F., Oh H. Electric field-induced ferro-magnetic resonance in a CoFeB/MgO magnetic tunnel junction under dc bias voltages. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, pp. 242409–242413 (in Eng.).

48. Sankey J.C., Braganca P.M., Garcia A.G.F., Kriworotov I.N., Buhrman R.A., Ralph D.C. Spin-Transfer-Driven Ferromagnetic Resonance of Individual Nanomagnets. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, pp. 227601–227608 (in Eng.).

49. Wei Y., Brucas R., Gunnarsson K., Celinski Z., Svedlindh P. Positive correlation between coercivity and ferromagnetic resonance extrinsic linewidth in Fe-

CoV/SiO<sub>2</sub> films. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, pp. 072404 –0724011 (in Eng.).

50. Lianwen Deng, Zekun Feng, Jianjun Jiang, Huahui He. Percolation and microwave characteristics of CoFeB-SiO<sub>2</sub> nano-granular films. *J. Magn. and Magn. Mater.*, 2007, vol. 309, pp. 285–289 (in Eng.).

51. Yanga F.F., Yana S.S., Yub M.X. et al. Enhanced high-frequency electromagnetic properties of FeCoB-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayered granular films. *Physica B: Condensed Matter*, 2012, vol. 407, pp. 1108–1113 (in Eng.).

52. Buznikov N.A., Iakubov I.T., Rakhmanov A.L., Sboychakov A.O. High-frequency magnetic permeability of nanocomposite film. *J. Magn. and Magn. Mater.*, 2005, vol. 293, pp. 938–946 (in Eng.).

53. Menéndez E., Dias T., Geshev J., Lopez-Barbera J.F., Nogués J., Steitz R., Kirby B.J., Borchers J.A., Pereira L.M.C., Vantomme A., Temst K. Interdependence between training and magnetization reversal in granular Co-CoO exchange bias systems. *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 89, pp. 144407–144414 (in Eng.).

54. Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Osipov A.V., Maklakov S.A., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Starostenko S.N. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, pp. 107143–107149 (in Eng.).

55. Haiwen Xi, Kai-Zhong Gao, Yiming Shi and Song Xue. Precessional dynamics of single-domain magnetic nanoparticles driven by small ac magnetic fields. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, vol. 39, pp. 4746–4752 (in Eng.).

56. Wu L.Z., Ding J., Jiang H.B., Chen L.F., Ong C.K. Particle size influence to the micro-wave properties of iron based magnetic particulate composites. *J. Magn. and Magn. Mat.*, 2005, vol. 285, pp. 233–239 (in Eng.).

57. Neige J., Lepetit T., et al. Evidence of an embedded vortex translation mode in flake-shaped ferromagnetic particle composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, pp. 242401–242407 (in Eng.).

58. Nguyen N. Phuoc, Ong C.K. Thermal stability of high frequency properties of gradient-composition sputtered FeCoHf films with and without stripe domains. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, pp. 023901 (in Eng.).

59. Buravtsova V.E., Ganshina E.A., Kirov S.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Magneto-optical Properties of Layer-by-Layer Deposited Ferromagnet-Dielectric Nanocomposites. *Materials Sciences and Applications*, 2013, vol. 4, pp. 16–23 (in Eng.).

60. Burgler D.E., Buchmeier M., Cramm S., Eisebitt S., Gareev R.R., Grunberg P., Jial C.L., Pohlmann L.L., Schreiber R., Siegel M., Qin Y.L., Zimina A. Exchange coupling of ferromagnetic films across metallic and se-



micconducting interlayers. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2003, vol. 15, pp. 443–450 (in Eng.).

61. Vas'kovsky V.O., Patrin G.S., Velikanov D.A., Svalov A.V., Savin P.A., Yuvshchenko A.A., Shchegoleva N.N. Magnetizm sloev Co v sostave mnogoslojnyh plenok Co/Si, FTT, 2007, vol. 49, issue 2, pp. 291–296 (in Russ.).

62. Domashevskaya È.P., Chernyshev A.V., Sitnikov A.V. et al. XANES–issledovaniâ mežatomnyh vzaimodejstvij v mnogoslojnyh nanostrukturah  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{a-Si})_{40}$  i  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{SiO}_2)_{32}$ . FTT, 2013, vol. 55, pp. 1202–1210 (in Russ.).

63. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1696–1699 (in Eng.).

64. Guo Y., Yu X.W., Li Y.X. Spin filtering and spin-polarization reversal in multilayered ferromagnetic metal/semiconductor heterostructures. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, pp. 053902–053907 (in Eng.).

65. Aronzon B.A., Granovsky A.B., Davydov A.B., Dokukin M.E., Kalinin Yu.E., Nikolaev S.N., Ryl'kov V.V., Sitnikov A.V., Tugushev V.V. Planarnyj èffekt Holla i anizotropnoe magnitosoprotivlenie v sloistyh strukturah  $\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}$  s perkolâcionnoj provodimost'û. *ŽÈTF*, 2006, vol. 130, issue 1(7), pp. 127–136 (in Russ.).

66. Szuszkiewicz W., Fronc K., Baran M., Szymczak R., Ott F., Hennion B., Dynowska E., Paszkowicz W., Pelka J.B., Zuberek R., Jouanne M., Morhange J.F. Interlayer Magnetic Coupling for Fe/Si Multilayers. *J. Superconductivity: Inc. Nov. Magn.*, 2003, vol. 16, no. 1, pp. 1152–1158 (in Eng.).

67. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1696–1699 (in Eng.).

68. Dunec O.V., Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Sitnikov A.V. Èlektričeskie i magnitnye svojstva mul'tislojnyh struktur na osnove kompozita  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$ . *Žurnal tehničeskoj fiziki*, 2013, vol. 83, pp. 114–120 (in Russ.).

69. Ivanov A.V., Kalinin Yu.E., Nechaev V.N., Sitnikov A.V. Èlektričeskie i magnitnye svojstva mul'tislojnyh struktur  $[(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/(\alpha\text{-SiH})]_n$ . FTT, 2009, vol. 60, issue 12, pp. 2331–2336 (in Russ.).

70. Komogortsev S.V., Denisova E.A., Sitnikov A.V. et al. Multilayer nanogranular films  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{50}(\text{SiO}_2)_{50}/\text{a-Si:H}$  and

$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{50}(\text{SiO}_2)_{50}/\text{SiO}_2$ : Magnetic properties. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, pp. 17C105–170109 (in Eng.).

71. Sitnikov A.V. Èlektričeskie i magnitnye svojstva nanogeterogennyh sistem metall-dièlektrik: Dissertation of DSc (physics and mathematics). Voronezh: VGTU, 2009, 318 p.

72. Dyad'kina E.A., Vorob'ev A.A., Ukleev V.A., Lott D., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E., Gerashchenko O.V., Grigor'ev S.V. Morfologiâ, magnitnye i provodâšie svojstva geterogennyh sloistyh magnitnyh struktur  $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\text{a-Si:H}]_{36}$ . *ŽÈTF*, 2014, vol. 145, issue 3, pp. 472–480 (in Russ.).

73. Chekrygina Ju., Devizenko A., Kalinin Yu., Kirov S., Lebedeva E., Shipkova I., Sitnikov A., Syr'ev N., Vyzulin S. Magnetic and Magnetoresonance Properties of Multilayered Systems Based on  $(\text{CoFeB})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  Composite Layers. *Solid State Phenomena*, 2014, vol. 215, pp. 272–277 (in Eng.).

74. Gan'shina E.A., Perov N.S., Phonghirun S., Migunov V.E., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. Usilenie magnitooptičeskogo otklika v mnogoslojnoj sisteme nanokompozit-gidrogenizirovannyj amorfnyj kremnij. *Izvestiâ RAN. Ser. Fizičeskaâ*, 2008, no. 10, pp. 1455–1457 (in Russ.).

75. Vyzulin S.A., Gorobinskij A.V., Kalinin Yu.E., Lebedeva E.V., Sitnikov A.V., Syr'ev N.E., Trofimenko I.T., Shipkova I.G. Название. Kompleksnyj analiz statičeskih i dinamičeskih magnitnyh harakteristik mul'tislojnyh nanostruktur  $\text{CoFeZr}/\text{a-Si}$ . *Vestnik MGU, Ser. 3. Fizika, Astronomiâ*, 2009, no. 2, pp. 32–36 (in Russ.).

76. Byzylin C.A., Gopobinsky A.B., Kalinin Yu.E., Lebedeva E.B., Sitnikov A.B., Cyp'ev H.E., Tpořimenko I.T., Shipkova I.G. FMR, magnitnye i rezistivnye svojstva mul'tislojnyh nanostruktur  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ . *Izvestiâ PAH. Sep. Fizičeskaâ*, 2010, vol. 74, no. 10, pp. 1441–1443 (in Russ.).

77. Byzylin C.A., Gopobinsky A.B., Kalinin Yu.E., Lebedeva E.B., Sitnikov A.B., Cyp'ev H.E., Tpořimenko I.T., Chekrygina Yu.I., Shipkova I.G. FMR, magnitnye i rezistivnye svojstva nanostruktur s granulirovannymi magnitnymi sloâmi. *Nanotehnika*, 2010, no. 3(23), pp. 16–21 (in Russ.).

78. Vashuk M.V., Gan'shina E.A., Phonghirun S., Tulskey I.I., Shcherbak P.N., Kalinin Yu.E. Optical and magneto-optical properties of  $\{\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}\}_n$  multilayers. *Non-crystall. Solids*, 2007, vol. 353, pp. 962–964 (in Eng.).

79. Glatz A., Beloborodov I.S. Thermoelectric and Seebeck coefficients of granular metals. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, pp. 235403 (in Eng.).
80. Glatz A., Beloborodov I.S. Thermoelectric properties of granular metals. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, pp. 041404(R)-041408(R) (in Eng.).
81. Tsypliyatyev O., Kashuba O., Fal'ko V.I. Thermally excited spin current and giant magnetothermopower in metals with embedded ferromagnetic nanoclusters. *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 74, pp. 132403–132406 (in Eng.).
82. Dubi Y., M. Di Ventra. Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, vol. 83, pp. 131–155 (in Eng.).
83. Wang K., Wang L., Petrovic C. Large magnetothermopower effect in Dirac materials (Sr/Ca)MnBi<sub>2</sub>. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, pp. 112111–112116 (in Eng.).
84. Tsypliyatyev O., Kashuba O., Fal'ko V. Giant magnetothermopower and magnetoresistance in metals with embedded ferromagnetic nanoclusters. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, pp. 014324–014329 (in Eng.).
85. López-Monís C., Matos-Abiague A., Fabian J. Tunneling magnetothermopower in magnetic tunnel junctions. *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 89, pp. 054419–054422 (in Eng.).
86. Nagaosa N., Sinova J., Onoda S. et al. Anomalous Hall effect. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, vol. 82, pp. 1539–1579 (in Eng.).
87. Mikhailovsky Yu.O., Metus D.E., Kazakov A.P. et al. Anomalous Hall effect in (Co<sub>41</sub>Fe<sub>39</sub>B<sub>20</sub>)<sub>x</sub>(Al–O)<sub>100–x</sub>. *JETP Lett.*, 2013, vol. 97, pp. 473–479 (in Eng.).
88. Hoffman A. Spin Hall Effect. *IEEE transactions on magnetics*, 2013, vol. 49, no. 10, p. 5172 (in Eng.).
89. Rashba E.I. Properties of semiconductors with an extremum loop .1. Cyclotron and combinational resonance in a magnetic field perpendicular to the plane of the loop. *Sov. Phys. Solid. State*, 1960, vol. 2, pp. 1109–1135 (in Eng.).
90. Vedyayev A.V., Titova M.S., Ryzhanova N.V. et al. Anomalous and spin Hall effects in a magnetic tunnel junction with Rashba spin-orbit coupling. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, pp. 032406–032411 (in Eng.).
91. Vedyayev A.V., Ryzhanova N.V., Strelkov N., Diény B. Anomalous Hall effect in magnetic tunnel junction. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, pp. 247204–247206 (in Eng.).
92. Geng H., Wei J.Q., Nie S.J. et al. Soft magnetic property and high-frequency permeability of [Fe<sub>80</sub>Ni<sub>20</sub>–O/SiO<sub>2</sub>]<sub>n</sub> multilayer thin films for applications in GHz range. *Materials Letters*, 2013, vol. 92, pp. 346–349 (in Eng.).
93. Geng H., Wei J.Q., Wang Z.W. et al. Soft magnetic property and high-frequency permeability of [Fe<sub>80</sub>Ni<sub>20</sub>–O/TiO<sub>2</sub>]<sub>n</sub> multilayer thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 576, pp. 13–17 (in Eng.).
94. Thomson T. Magnetic properties of metallic thin films in: Barmak K. and Coffey K. (Eds.) *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*, Elsevier, 2014, pp. 454–456 (in Eng.).
95. Sarkar J. Ferromagnetic Sputtering Targets and Thin Films for Silicides and Data Storage, in: Sarkar J. *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, Elsevier, 2013, 603 p (in Eng.).
96. Barmak K., Coffey K. (Eds.) *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*, Elsevier, 2014, 634 p (in Eng.).
97. Shi D., Guo Z., Bedford N. Nanomagnetic Materials, in: D. Shi (Ed.). *Nanomaterials and Devices*, Elsevier, 2015, pp. 105–159 (in Eng.).
98. Buravcova V.E., Gan'shina E.A., Gushchin V.S., Kalinin Yu.E. et al. Gigantskoe magnitosoprotivlenie i magnitoopticheskie svoystva granulirovannyh nanokompozitov metall-diëlektrik. *Izvestiâ RAN. Ser. Fiz.*, 2003, vol. 67, no 7, pp. 918–920 (in Russ.).
99. Kadigrobov A.M., Fistul M.VOL., Efetov K.B. Magnetotransport along a barrier: multiple quantum interference of edge states. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 2006, vol. 73, no. 23, pp. 235313–235321 (in Eng.).
100. Gridnev S.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V. *Nelinejnye âvleniâ v nano- i mikrogeterogennyh sistemah*. Moscow: BINOM. Laboratoriâ znaniy Publ., 2012 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

