

05

Особенности магнитоимпедансного эффекта в аморфных лентах на основе кобальта, прошедших обработку ионами аргона

© Л.А. Белых,^{1,2} В.А. Лукшина,² А.С. Русалина,¹ Ч.Б. Ооржак,^{1,2} Г.Ю. Мельников,¹ А.А. Пасынкова,^{1,2}
И.С. Бодин,¹ А.В. Свалов,¹ Г.В. Курляндская¹

¹Уральский федеральный университет,
620062 Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
620108 Екатеринбург, Росси
e-mail: levbel7777@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 13 апреля 2026 г.

Принято к публикации 13 апреля 2026 г.

Исследовалось влияние кратковременной (2 и 5 min) обработки с помощью потоков ионов аргона, создаваемых в вакуумной камере установки ионно-плазменного распыления, на структуру, магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект быстроокаленных магнитомягких аморфных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ в исходном состоянии (без дополнительных обработок). Кроме того, проведено сравнение со структурой и свойствами аморфных лент той же партии, прошедшими дополнительные термические обработки в режиме релаксационного отжига при 320°C при следующих временах выдержки: 2, 5, 30 и 60 min. Установлено, что ионная обработка и релаксационный отжиг оказывают существенно различные воздействия на магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект быстроокаленных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, которые во всех случаях сохраняют аморфную структуру.

Ключевые слова: магнитомягкие ферромагнетики, быстроокаленные аморфные ленты, ионная обработка, магнитные свойства, магнитный импеданс, детекторы слабых магнитных полей, термомагнитные эффекты.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63489.98-26

Введение

Быстроокаленные аморфные ленты на основе кобальта — это хорошо исследованные материалы, получаемые в больших количествах с использованием отработанной, доступной технологии, позволяющей производить масштабирование [1,2]. Несмотря на длительную историю использования данного семейства магнитомягких материалов, интерес к ним периодически возвращается с появлением новых методов аттестации и новых технологических и биомедицинских приложений [3–7]. Так, в последние тридцать лет особое внимание уделялось исследованию магнитоимпедансного (МИ) эффекта в магнитомягких сплавах в виде аморфных и нанокристаллических лент и проволок [8,9]. МИ эффект состоит в значительном изменении импеданса (Z) ферромагнитного проводника при протекании по нему переменного тока высокой частоты (f) и приложении постоянного внешнего магнитного поля. Явление магнитного импеданса нашло свое объяснение в рамках классической электродинамики и представлений о зависимости импеданса магнитного проводника от величины скин-слоя (δ) и динамической магнитной проницаемости (μ). Импеданс Z — комплексная величина $Z(f) = R(f) - iX(f)$, где R — действительная и X — мнимая его части, а его изменения связаны с зависимостью магнитной проницаемости μ от напряженности внешнего квазистатически

изменяющегося магнитного поля H : $Z = Z(\mu, \sigma, f)$, где σ — проводимость.

Приложение внешнего магнитного поля приводит к изменениям динамической магнитной проницаемости и изменению величины скин-слоя. С точки зрения практических приложений в детекторах магнитных полей, включая различные схемы магнитного биодетектирования [10–12], наиболее интересной является конфигурация продольного магнитного импеданса, когда внешнее магнитное поле и ось протекания высокочастотного тока (I_{ac}) параллельны (рис. 1, а). Это связано с тем, что величина чувствительности продольного МИ (изменение Z на единицу величины приложенного поля H) превышает величину и продольного, и перпендикулярного МИ. Кроме того, именно для продольного МИ максимальная чувствительность наблюдается в малых магнитных полях порядка нескольких Эрстед, что критически важно при создании миниатюрных электронных устройств.

Особым достоинством семейства быстроокаленных аморфных лент на основе кобальта является возможность создания эффективной магнитной анизотропии с заданными/настраиваемыми параметрами за счет дополнительных обработок, таких как релаксационный отжиг [13], термомагнитная, термомеханическая обработки или разогрев за счет джоулевого тепла [14–17]. Различные обработки меняют особенности эффективной магнитной анизотропии, магнитную проницаемость и, как следствие, магнитный импеданс материала сенсорного

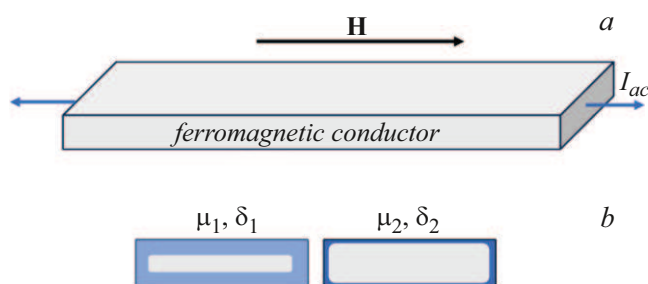


Рис. 1. *a* — схематическое описание явления продольного магнитного импеданса, когда ток высокой частоты параллелен направлению внешнего магнитного поля; *b* — схема состояний с большой глубиной скин-слоя (низкая магнитная проницаемость) и с малой глубиной скин-слоя (высокая магнитная проницаемость; $\mu_1 < \mu_2$ и $\mu_1 > \mu_2$).

элемента. С этой точки зрения, совершенствование различных измерительных методов позволяет возвращаться к фундаментальным аспектам физики данных магнитных материалов, в том числе и природе индуцированной, эффективной, поверхностной магнитной анизотропии магнитомягких магнетиков.

В то же самое время, развитие технологий ставит задачи создания магнитомягких композитов нового типа путем использования различных методов в рамках формирования одной сенсорной среды. Например, к таковым можно отнести быстрозакаленные аморфные ленты с магнитными, проводящими, полимерными и другими покрытиями [4,18], в том числе используемые в устройствах, работающих на основе МИ эффекта. Аморфные ленты, вследствие особенностей технологии их получения, обладают несимметричными поверхностями: контактная — шероховатая и свободная — гладкая, иногда называемая глянцевой. Гладкая сторона характеризуется плохой адгезией, она лиофобна по отношению ко многим жидкостям, а нанесение дополнительного магнитного покрытия на нее требует и особых условий, и особой подготовки поверхности.

Одним из наиболее универсальных, производительных и доступных методов нанесения магнитных пленочных покрытий является ионно-плазменное распыление [2]. Однако оборудование ионно-плазменного распыления позволяет не только осаждать тонкие магнитные пленки на поверхность быстрозакаленных лент, но и проводить предварительную подготовку поверхности, которая существенно улучшает адгезионные свойства образцов и позволяет осаждать на них магнитные покрытия с высокими функциональными свойствами. Такая ионная обработка (ИО) состоит в бомбардировке поверхности ленты ионами рабочего газа, например аргона [19,20], на протяжении определенного времени. При этом вопрос о влиянии такой даже короткой предварительной подготовки по отношению к быстрозакаленным лентам в литературе не обсуждался.

ИО в вакуумной камере напылительной установки представляет собой разновидность ионного облучения, которое в последние годы широко используется как дополнительный способ воздействия на магнитные среды с целью тонкой настройки их функциональных параметров [21–23]. Ионное облучение — это универсальный метод, используемый в материаловедении для изменения и анализа свойств различных материалов путем бомбардировки их ионами, что может приводить к различным структурным и фазовым изменениям. В работе [24] было исследовано влияние ионного облучения на МИ аморфной ленты на основе кобальта при воздействии ионов Хе, Аг и N. Изучались характеристики образцов до и после ионного облучения — МИ и параметры петель гистерезиса. МИ значительно увеличился в образцах, подвергнутых ионному облучению, показывая сильную зависимость от типа облучаемых ионов и частоты возбуждения. ИО приводила к существенной модификации магнитных свойств, включая увеличение коэрцитивной силы и сдвиг плоскостных петель гистерезиса, указывая на уменьшение обменной связи.

Особенности структурных изменений и магнитных свойств в быстрозакаленных аморфных лентах исследовали различными современными методами. Например, в работе [25] влияние облучения быстрыми тяжелыми ионами на свойства аморфных лент $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ исследовалось с применением методов просвечивающей электронной микроскопии и мессбауэровской спектроскопии. Происхождение индуцированной перпендикулярной магнитной анизотропии было интерпретировано с точки зрения магнитоупругих эффектов, обусловленных сильными напряжениями, возникающими в результате реакции необлученной области на анизотропную деформацию облученного аморфного материала. Следует отметить, что технологическая направленность ленточных быстрозакаленных материалов поднимает ряд вопросов в случае их использования в области аэрокосмических технологий или эксплуатации радиационно-активных материалов [26], где вероятность попадания в сферу воздействия и дозы облучения могут существенно превышать наблюдаемые в обычных условиях эксплуатации электронных устройств.

Особенностью настоящего исследования является поиск таких условий обработки, при которых эффективная магнитная анизотропия меняется очень слабо — нет заметных изменений ни коэрцитивной силы, ни сдвига петель магнитного гистерезиса, нет измеряемого изменения массы образца. Особенность подхода строится на том, что быстрозакаленные аморфные ленты (даже после релаксационного отжига) имеют неоднородность магнитных свойств по сечению (приповерхностный слой 2–3 μm сильно отличается по своим свойствам). Предлагаемая мягкая ИО позволяет эту неоднородность уменьшить за счет воздействия на приповерхностный слой и позволяет провести подготовку поверхности для синтеза слоистых композитов на основе быстрозакаленных лент таким образом, что сама подготовка лишь

незначительно влияет на исходные магнитные свойства лент.

В настоящей работе исследовалось влияние продолжительности кратковременной обработки с помощью потоков ионов аргона, создаваемых в вакуумной камере установки ионно-плазменного распыления при рабочем напряжении на мишени в 0.5 kV на структуру, магнитные свойства и МИ эффект быстрозакаленных аморфных лент на основе кобальта. Кроме того, в рамках одной партии образцов проведено сравнение с материалами, прошедшими дополнительные термические обработки в режиме традиционного релаксационного нагрева, включая одинаковые по времени режимы ионной и термической обработок.

1. Методики измерений и образцы

Аморфные ленты состава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ были получены методом закалки из расплава на воздухе на вращающемся медном барабане, их толщина составила 22 μm , а ширина — 1.4 mm. Часть образцов одной партии использовалась для обработки ионами аргона (ИО), а другая часть для проведения термических обработок в режиме релаксационного отжига при фиксированной температуре в вертикальной печи (ТО). Для определения длительности обработки при минимальном напряжении на мишени 0.5 kV, при котором обеспечивается устойчивое состояние горения плазмы при рабочем давлении аргона $3.8 \cdot 10^{-3}$ mbar были проведены дополнительные калибровочные качественные тесты. Экспериментально определить температуру бомбардируемого образца в камере ионно-плазменного распыления имеющейся конфигурации не представлялось возможным, поэтому были изготовлены образцы „свидетели“ — тонкие пластины из алюминия (температура плавления 660 °C) и олова (температура плавления 232 °C), которые бомбардировались ионами аргона в тех же условиях, что и исследуемые образцы быстрозакаленных лент. Кроме того, посредством взвешивания до и после обработки ионами аргона (обработка, как и в случае быстрозакаленных лент, велась с глянцевой стороны) модельных образцов алюминиевой фольги толщиной 14 μm было установлено, что времена обработки 5 min и менее не вызывают потерю массы, превышающую предел погрешности измерения на аналитических весах (ME 235S, Sartorius, Германия). На основании анализа всех результатов были выбраны кратковременные режимы обработки ионами аргона и режимы релаксационных отжигов в печи при фиксированной температуре 320 °C, включающие как те же самые 2 и 5 min выдержки, так и более длительные выдержки в 30 и 60 min, соответствующие принятым в литературе временам выдержек для данного типа термообработок [27–29]. В таблице приведены параметры режимов обработок и обозначения всех использованных типов экспериментальных образцов. Следует отметить, что при кратковременных обработках (2 и 5 min) само

Описание использованных обработок и названия образцов быстрозакаленных аморфных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ и некоторые магнитные характеристики образцов

Образцы	Состояние	M_s , Gs	H_c , Oe	H_a , Oe
IS	Исходное	320	0.22	1.3
ИО-2	ИО 2 min	340	0.24	1.1
ИО-5	ИО 5 min	340	0.32	1.1
ТО-2	Термообработка в печи 2 min	320	0.13	0.8
ТО-5	Термообработка в печи 5 min	330	0.13	0.8
ТО-30	Термообработка в печи 30 min	330	0.13	0.5
ТО-60	Термообработка в печи 60 min	350	0.08	0.9

Примечание. M_s — намагниченность насыщения, H_c — коэрцитивная сила, H_a — поле магнитной анизотропии.

понятие температуры обработки в каком-то смысле становится неопределенным, так как из-за ограниченной термической проводимости в начальный период обработки существует градиент температур. Методически такая возможность была учтена тем, что релаксационные отжики проводились и при больших температурах, что позволило оценить вероятность и более высоких нагревов. При этом ключевым параметром предлагаемой мягкой ИО является сохранение массы исследуемого материала. При больших временах ИО этот критерий не выполнялся, поэтому более длительные ИО и не рассматривались.

Структура быстрозакаленных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ во всех состояниях, указанных в таблице, исследовалась со свободной/глянцевой стороны с помощью рентгенофазового анализа (PHILIPS X'PERT PRO, излучение Cu-K α). Дополнительно особенности поверхностной структуры анализировались с помощью оптической микроскопии (Evico magnetics GmbH, Германия).

Магнитные свойства аморфных лент всех типов были измерены при помощи полуавтоматической установки, созданной в Институте физики металлов УрО РАН, работа которой основана на индукционном методе. Длина образцов для магнитных измерений и МИ составляла 50 mm, длина активной зоны, с которой анализируется сигнал, составляла 4 cm. Все образцы, исследуемые в настоящей работе, были получены на основе одной партии лент и имели одинаковые геометрические параметры (длину, ширину, толщину), погрешности определения которых не превышали 1 %. Соответственно при сравнительном анализе свойств различных образцов размагничивающий фактор во внимание не принимался, так как его влияние на все типы образцов было одинаковым.

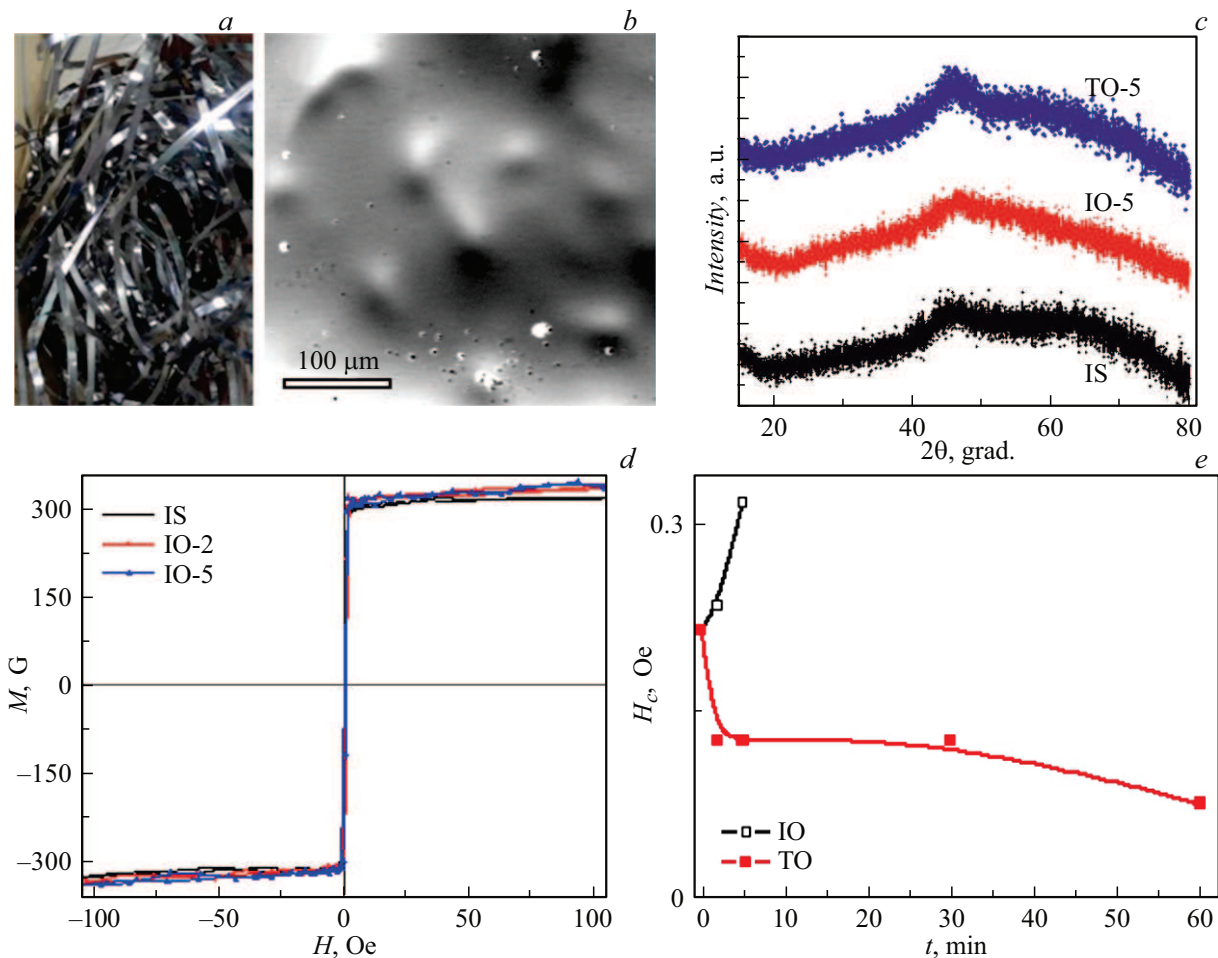


Рис. 2. *a* — общий вид партии быстрозакаленных лент на основе кобальта; *b* — общий вид свободной поверхности ленты; *c* — рентгеновские спектры аморфных лент в исходном состоянии и после термической и ионной обработок (см. также таблицу); *d* — индукционные петли магнитного гистерезиса аморфных лент в исходном состоянии и после ионных обработок; *e* — зависимости коэрцитивной силы аморфных лент от времени различных обработок.

Магнитный импеданс исследовали с помощью автоматизированного комплекса МИ спектроскопии на основе анализатора E4991A, который позволяет проводить калибровку микроволнового тракта и извлекать из измеряемого сигнала только данные, относящиеся к изменению импеданса исследуемого образца с погрешностью не хуже 1%. Измерения импеданса проводили по стандартной методике в микрополосковой линии, данные о которой могут быть найдены в следующих источниках [28–30]. Были получены результаты, относящиеся к частотной зависимости максимума МИ отношения $\Delta Z/Z_{\max}(f)$, где f — частота тока возбуждения и данные о полевых зависимостях импеданса при разных частотах для МИ отношения $\Delta Z/Z(H) = 100 \cdot (|Z(H)| - |Z(H_{\max})|)/|Z(H_{\max})|$, где $H_{\max} = 100$ Oe — максимальное поле, использовавшееся в МИ измерениях. Особый интерес представляло сравнение полевых зависимостей МИ отношения для частот, на которых $\Delta Z/Z$ достигает абсолютных максимальных значений.

2. Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований была получена большая партия материала (до 50 g) с незначительными геометрическими отклонениями (до 3%) от средней ширины и толщины и хорошим качеством поверхности. На рис. 2 представлены некоторые результаты структурных и квазистатических магнитных исследований.

Результаты рентгеновских исследований показали, что все обработки (и IO, и TO) во всех температурных режимах не приводят к кристаллизации материала быстрозакаленных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ (рис. 2, *c*). Для релаксационного отжига данный результат был вполне ожидаем, так как близкие режимы обработок описаны в научной литературе, и температура кристаллизации аморфных лент данного состава составляет 570 °C [27], т.е. коэффициент, описывающий отношение температуры отжига к температуре кристаллизации составляет 0.56, не превышая обычно рекомендуемый технологический предел 0.70. Однако литературные данные об

изменении структуры быстрозакаленных аморфных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, подвергшихся ИО в рассматриваемом режиме, совершенно отсутствуют. Факт сохранения аморфной структуры важен для понимания особенностей этого сложного воздействия (в первую очередь речь идет о причинах изменения эффективной магнитной анизотропии).

Данные структурных исследований подтверждаются результатами магнитных измерений — кристаллизация приводила бы к неминуемому росту коэрцитивности и изменению намагниченности насыщения, чего не наблюдается. Дополнительными аргументами за сохранение аморфной структуры, по крайней мере при релаксационных отжигах, могут быть предыдущие результаты [7], выполненные на лентах того же состава, но при более высокой температуре (350°C) и времени выдержки 1 h, где сохранение аморфной структуры было подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии. Вопрос о существовании приповерхностной нанокристаллической фазы, выявление которой экспериментально очень затруднено из-за ограничений по разрешению большинства стандартных рентгеновских аппаратов пределом в $\sim 2\text{ nm}$, неоднократно поднимался в литературе. В данном исследовании, даже если такая неидентифицируемая с помощью РФА и присутствует, ее доля так мала, что она не оказывает решающего влияния на магнитные и магнитодинамические свойства.

Анализ данных квазистатических магнитных измерений (рис. 2, d и таблица) показывает, что все исследуемые образцы лент являются магнитомягкими магнетиками с очень низкой коэрцитивностью порядка нескольких десятых Эрстеда. Во всех случаях они характеризуются продольной эффективной магнитной анизотропией с осью легкого намагничивания, ориентированной в плоскости ленты и вдоль ее оси (длинной стороны образца). Дополнительный анализ показывает, что величина намагниченности насыщения в случае образцов, подвергшихся ИО, в пределах погрешности использованного измерительного метода практически не меняется.

Определение величины намагниченности насыщения и поля магнитной анизотропии проводилось по стандартным методикам [7], петли магнитного гистерезиса измерялись в более высоких полях, где магнитное насыщение достигалось — именно эти данные и приведены в таблице. Строго говоря, понятие поля анизотропии имеет смысл для образцов с поперечной магнитной анизотропией при намагничивании вдоль оси трудного намагничивания. В нашем случае, и в этом и состоит особенность быстрозакаленных аморфных лент, существует магнитная неоднородность — параметры поверхности ленты отличаются от ее объемных параметров. Для материала с продольной магнитной анизотропией величины H_c и H_a просто совпадают (прямоугольная петля $M(H)$). Для материала с поперечной магнитной анизотропией между точками $-H_a$ и $+H_a$ наблюдается линейная зависимость $M(H)$, но прямая претерпевает изломы при $-H_a$ и $+H_a$. Однако реальная кривая $M(H)$

не является чисто прямоугольной, так как для такого магнитомягкого материала под воздействием размагничивающих полей, связанных с анизотропией формы, перемагничивание начинается уже в малых полях того же знака, что и поле насыщения. Кроме того, вблизи поля анизотропии появляются „дотяжки“, которые можно связать как с дисперсией осей легкого намагничивания по объему, так и с вкладом приповерхностного слоя, роль модификации которого и исследуется в настоящей работе.

ИО приводит лишь к незначительному росту коэрцитивной силы и небольшому снижению величины поля анизотропии, хотя его определение в данных случаях сопряжено с большей погрешностью, чем определение величины H_c . При этом, как и следовало ожидать, релаксационный отжиг при постоянной температуре приводит к небольшому росту намагниченности насыщения и снижению коэрцитивной силы по известному для аморфных быстрозакаленных магнетиков механизму снижения закалочных напряжений [27,28]. Строго говоря, отсутствие насыщения в используемых максимальных полях можно объяснить необходимостью „дотяжки“, или приложения более высоких полей в процессе измерения, что не всегда возможно сделать на измерительном оборудовании, созданном для исследования очень магнитомягких материалов.

Следует отдельно отметить совершенно противоположные тенденции поведения H_c с увеличением времени обработки для ИО и ТО — рост в случае ИО и снижение в случае релаксационного отжига. Для ТО общепринятым пониманием природы релаксационного отжига считается протекание релаксации внутренних закалочных напряжений, которые для быстрозакаленных лент подобных составов распределены неравномерно по сечению образца, часто формируя отдельные зоны вблизи поверхности, глубина которых зависит от состава и технологических параметров получения материала, но обычно составляет $2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ [29,30].

Природа ИО может быть значительно сложнее, так как помимо очевидного нагрева, как было установлено в калибровочных экспериментах с модельными образцами, в камере установки ионно-плазменного распыления могут присутствовать лабораторные магнитные поля. При этом магнитные измерения не указывают на формирование наведенной магнитной анизотропии. По-видимому, нагрев при ТО может осуществляться со скоростью, отличной от скорости нагрева при ИО. Кроме того, присутствующая в плазме высокоэнергетических ионов аргона может обеспечивать протекание процесса изменения ближнего порядка в приповерхностных слоях аморфной лены и соответственно особенности поверхностной анизотропии образцов, прошедших ИО и ТО, могут различаться даже для близких времен различных обработок. Отметим еще раз, что выбранные времена ИО не приводили к значимой потере массы образцов, т.е. времена обработок были выбраны именно на основе данного критерия. Вполне логично ожидать, что при

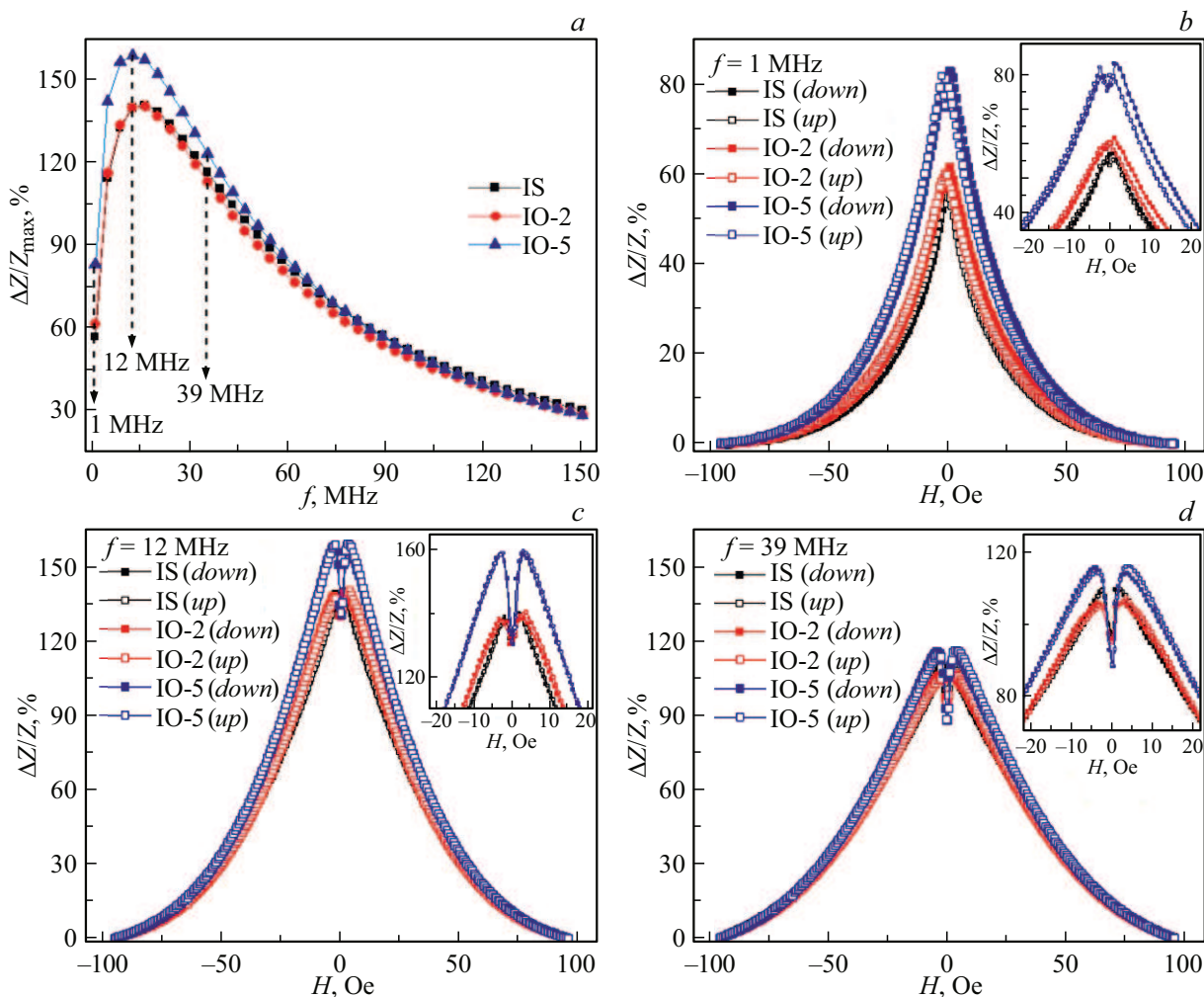


Рис. 3. *a* — частотные зависимости максимального МИ отношения для аморфных лент в исходном состоянии и после ионных обработок — пунктирными стрелками указаны характерные частоты, выбранные для анализа полевых зависимостей МИ; *b–d* — полевые зависимости для лент в тех же состояниях для выбранных частот 1, 12 и 39 МГц: *up* — измерения в восходящем поле, *down* — в нисходящем поле. На вставках приведены те же зависимости в тех же обозначениях, что и на основном графике, но в масштабе, удобном для анализа поведения в малых магнитных полях.

малых временах асимметричной обработки (каковой и является ИО), градиент температуры может существовать в течение всего времени обработки.

Некоторый свет на упомянутые отличия могут пролить исследования МИ эффекта в данных материалах. Магнитный импеданс — это спектроскопический метод, который позволяет проводить анализ особенностей магнитной анизотропии ферромагнитных проводников с высокой динамической магнитной проницаемостью для широкого диапазона частот, в данном случае от 1 до 150 МГц. На малых частотах ток возбуждения протекает фактически по всему объему аморфной ленты, так как глубина скин-слоя оказывается сопоставима с половиной толщины ленты. Но уже при частотах выше 10 МГц поверхность начинает вносить большой вклад в МИ отклик.

На рис. 3 представлены МИ данные, для исходного образца и образцов после ИО. Частотные зависимости

максимальной величины МИ отношения имеют типичный вид для быстрозакаленных аморфных лент на основе кобальта с быстрым возрастанием в области малых частот от 1 до 12 МГц и медленным уменьшением величин $\Delta Z/Z_{\max}$ вплоть до максимальных частот — асимметричный МИ отклик. Зависимости для всех типов образцов имеют один максимум в области около частоты 12 МГц и близкую форму. ИО в течении 2 min почти не меняет параметры частотных зависимостей $\Delta Z/Z_{\max}(f)$, но обе зависимости $\Delta Z/Z_{\max}(f)$ для IS и IO-2 заметно отличаются от зависимости $\Delta Z/Z_{\max}(f)$ для IO-5 в области пика частотной зависимости МИ.

На рис. 3, *b* представлены полевые зависимости МИ отношения $\Delta Z/Z$, измеренные и в нисходящем (начиная с максимального положительного), и в восходящем (начиная с максимального отрицательного) полях. Прежде всего, следует отметить, что форма МИ кривых с одним пиком вблизи нулевого поля хорошо соответствует об-

разцам с эффективной продольной анизотропией — ось легкого намагничивания расположена в плоскости ленты и вдоль ее длинной стороны. Этот результат находится в полном соответствии с результатами магнитных измерений петель магнитного гистерезиса (см. таблицу). Небольшой „провал“ в области очень малых полей в литературе принято ассоциировать с вкладом поверхностной анизотропии, формирующейся на поверхности быстрозакаленных аморфных лент из-за поверхностной структуры (рис. 2, *a*). Общая величина максимального эффекта $\Delta Z/Z_{\max}$ в 57 %, 60 % и 83 % для образцов IS, IO-2 и IO-5 соответственно достаточно велика как для исследований, так и для возможных приложений.

Следует отдельно отметить, что пятиминутная IO-обработка позволила повысить величину эффекта с 53 % до 83 % $\Delta Z/Z$ отношения при довольно низкой частоте в 1 МГц. Этот результат может быть важен с точки зрения аэрокосмических приложений, так как он отражает возможное влияние на стабильность материала детекторов слабых магнитных полей в особых условиях использования.

Увеличение частоты тока возбуждения приводит к значительному росту максимального эффекта $\Delta Z/Z_{\max}$ до величин 136 %, 138 % и 157 % для образцов IS, IO-2 и IO-5 соответственно на частоте 12 МГц. Провал в области очень малых полей становится более глубоким, что тоже объясняется вкладом поверхностной анизотропии. Глубина скин-слоя δ (рис. 1) зависит не только от электросопротивления на постоянном токе и величины динамической магнитной проницаемости, но и от частоты тока возбуждения (как $f^{-1/2}$), т.е. с ростом частоты ток возбуждения протекает все ближе к поверхностной дефектной зоне, и ее вклад возрастает. Расчет глубины скин-слоя для магнитной проницаемости 1000 и электросопротивления $190 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ($\delta \approx 20 \mu\text{m}$ при $f = 1 \text{ МГц}$ и $\delta \approx 6 \mu\text{m}$ при $f = 12 \text{ МГц}$) показывает, что выход на максимум МИ отношения как раз соответствует переходу в состояние сильного скин-эффекта (толщина ленты около $22 \mu\text{m}$).

Дальнейшее увеличение частоты тока возбуждения приводит к значительному снижению максимального эффекта $\Delta Z/Z_{\max}$ до величин 114 %, 108 % и 106 % для образцов IS, IO-2 и IO-5 соответственно на частоте 39 МГц. Следует отметить, что необычная форма раздвоенных пиков кривых $\Delta Z/Z(H)$, наблюдаемая для всех трех частот, не является типичной для большинства МИ материалов. Такие „срезанные“ верхушки пиков в области 2–3 Ое могут объясняться затруднениями процессов динамического перемагничивания вблизи поверхности, подвергшейся даже короткой экспозиции IO. Данный факт отмечается скорее, как первое наблюдение, требующее дополнительных структурных исследований и оценки распределения приповерхностных напряжений.

Далее для сравнения приводятся результаты МИ исследований ТО образцов как для близких, так и для больших времен обработки. На рис. 4, *a* представлены

частотные зависимости $\Delta Z/Z_{\max}$ исходного и всех ТО образцов. Хорошо видно, что с ростом времени отжига максимальная величина $\Delta Z/Z_{\max}$ сначала возрастает (до тридцатиминутной выдержки), а затем снижается.

Согласно экспериментальным результатам, положение максимума всех кривых $\Delta Z/Z_{\max}$ для IS, IO и ТО образцов оказывается близко к 12 МГц, т.е. использованные воздействия не меняют частоту тока возбуждения, на которой удается достичь максимального эффекта МИ. При этом максимальная величина $\Delta Z/Z_{\max}$, достигаемая в серии ТО, составила почти 300 % для образца ТО-30, а в серии IO почти 160 % для образца IO-5 для частоты 12 МГц.

В отношении формы кривых $\Delta Z/Z(H)$ для серии ТО можно сказать практически то же самое, что и для серии IO — продольная магнитная анизотропия лишь слегка модулируется незначительным вкладом поверхностной анизотропии, хотя общие величины эффекта оказываются заметно выше. Обращает на себя внимание тот факт, что тщательным подбором времени обработки (кривая ТО-30) удалось получить практически идеальный МИ отклик в форме одного пика (рис. 4, *b*). Для этого случая ($\Delta Z/Z$ составила почти 300 %) была рассчитана величина чувствительности МИ по отношению к внешнему магнитному полю, которая составила 22 %/Ое в рабочем интервале полей от 0.5 до 2.0 Ое. Хотя эта величина и уступает на порядок лучшим результатам МИ для планарных структур, но довольно низкая частота тока возбуждения (12 МГц) и очень удобный рабочий интервал 0.5 до 2.0 Ое вполне могут найти свою нишу в приложениях. Отдельно следует подчеркнуть, что все полевые МИ зависимости IS, IO и ТО обладают незначительным гистерезисом МИ по отношению к внешнему магнитному полю.

На рис. 4, *c, d* приведены МИ кривые для сравнения IS, IO и ТО обработок, проведенных за одно и то же время. В большей степени это сделано для наглядности в подтверждение ранее отмеченных закономерностей, например, совпадения интервалов частот, на которых достигается максимальное значение МИ. На рис. 4, *d* показаны только нисходящие ветви $\Delta Z/Z(H)$, начиная с насыщения в максимальном положительном магнитном поле. На рис. 4, *a, c* хорошо видно, что частотные зависимости максимального импеданса очень близки по форме, что не удивительно для образцов, имеющих одинаковую геометрию. Однако интенсивность (максимальная величина МИ эффекта) зависит от особенностей эффективной магнитной анизотропии и величины динамической магнитной проницаемости.

Возвращаясь к практической значимости полученных результатов, можно упомянуть одно из быстро развивающихся направлений современной прикладной физики — исследование термомагнитных эффектов [4,31,32]. Например, в работе [4] обсуждается возможность создания термобатарей, в основу работы которой положен аномальный эффект Нернста, усиленный вкла-

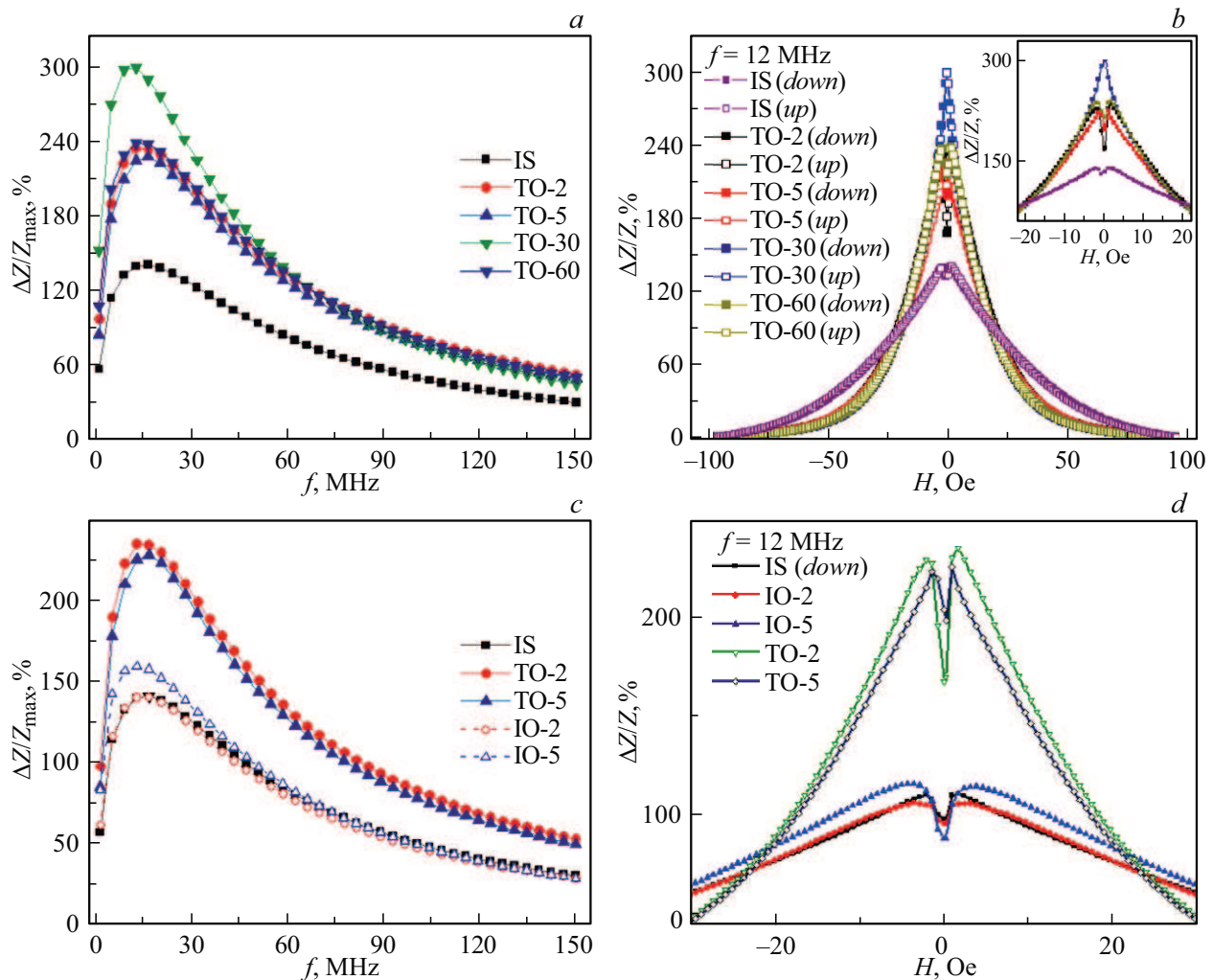


Рис. 4. *a* — частотные зависимости максимального МИ отношения для аморфных лент в исходном состоянии и после термообработок; *b* — полевые зависимости для лент в тех же состояниях для выбранной частоты 12 МГц: up — измерения в восходящем поле, down — в нисходящем поле; *c* — частотные зависимости МИ для одинаковых времен обработки 2 и 5 min; *d* — полевые зависимости для лент IO TO с одинаковыми временами обработки 2 и 5 min для выбранной частоты 12 МГц.

дом продольного спинового эффекта Зеебека. Одним из технологических этапов создания прототипа является напыление тонкого слоя платины (около 6 nm) на поверхность аморфной ленты на основе кобальта, легированной хромом. При спиновом эффекте Зеебека происходит разделение спинов электронов и возникает ток одной спиновой ориентации, а не обычный зарядный ток. Для реализации эффекта особое значение имеет качество интерфейса лента CoFeCrSiB/тонкая пленка Pt. Для получения такого композита необходима чистка поверхности ионами аргона, а значит и понимание того, какое влияние данная ИО оказывает на свойства быстрозакаленных лент на основе кобальта. Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезны и для синтеза различных композитов с металлическими и полимерными покрытиями, которые особенно трудновосместимы с металлическими компонентами.

Заключение

Сравнительно исследовано влияние кратковременных обработок с помощью потоков ионов рабочего газа аргона, создаваемых в камере установки ионно-плазменного распыления и традиционного релаксационного отжига в вертикальной печи при фиксированной температуре на структуру, магнитные свойства и МИ эффект магнитомягких аморфных лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ в закаленном состоянии. В результате дополнительных тестов для ИО при рабочем напряжении на мишени в 0.5 kV были выбраны времена 2 и 5 min, не приводящие к потере массы образцов. Проведено сравнение с аморфными лентами той же партии, прошедшими дополнительные термические обработки в режиме релаксационного нагрева при 320 °C при временах выдержки 2, 5, 30 и 60 min.

Установлено, что кратковременная ИО и релаксационный отжиг оказывают существенно различные воздействия на магнитные свойства лент $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, которые во всех случаях сохраняют аморфную структуру и магнитные свойства, типичные для магнитомягких материалов. ИО приводит к некоторому росту коэрцитивности, а релаксационный отжиг к более заметному ее снижению. Во всех случаях максимум МИ эффекта достигался на частотах, близких к частоте 12 МГц, но при тех же временах обработки релаксационный отжиг обеспечивает величины МИ эффекта, почти вдвое превышающие МИ эффект в случае ИО. Полученные результаты могут быть полезны при создании композитов на основе аморфных лент и тонких пленок, предназначенных для сенсорных приложений.

Благодарности

Авторы благодарят Н.В. Селезневу за сотрудничество.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-00165.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Fujimori. В сб.: *Amorphous Metallic Alloys*, под ред. F. E. Luborsky. (Butterworths, London, 1983), с. 300.
- [2] K. Handrich, S. Kobe. *Amorphe Ferro- und Ferrimagnetika (Amorphous Ferro- and Ferrimagnets)* (Akademie-Verlag, Berlin, 1980)
- [3] G.V. Kuryandskaya, M. Vázquez, J.L. Muñoz, D. García, J. McCord. *J. Magn. Magn. Mater.*, **196**, 259 (1999). DOI: 10.1016/S0304-8853(98)00805-1
- [4] M.A. Correa, A.V. Svalov, A. Ferreira, M. Gamino, E.F. da Silva, F. Bohn, F. Vaz, D.F. de Oliveira, G.V. Kuryandskaya. *Sensors*, **23** (18), 7781 (2023). DOI: 10.3390/s23187781
- [5] A.V. Semirov, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, V.O. Kudryavtsev, A.P. Safronov. *J. Magn. Magn. Mater.*, **415**, 97 (2016). DOI: 10.3390/s24113669
- [6] P. Gazda, M. Nowicki. *Materials*, **14**, 1919 (2021). DOI: 10.3390/ma14081919
- [7] G.V. Kuryandskaya, L. Lezama, A.A. Pasynkova, S.O. Volchikov, V.A. Lukshina, A. Larrañaga, N.V. Dmitrieva, A.V. Timofeeva, I. Orue. *Materials*, **15**, 4160 (2022). DOI: 10.3390/ma15124160
- [8] V.E. Makhotkin, B.P. Shurukhin, V.A. Lopatin, V.A. Marchukov, P.Yu. Levin, K. Sens. *Act. A*, **27**, 759 (1991). DOI: 10.1016/0924-4247(91)87083-F
- [9] F.L.A. Machado, B.L. da Silva, S.M. Rezende, C.S. Martins. *J. Appl. Phys.*, **75**, 6563 (1994). DOI: 10.1063/1.356919
- [10] Z. Yang, H.H. Wang, X.W. Dong, H.L. Yan, C. Lei, Y.S. Luo. *Anal. Methods*, **9**, 3636 (2017). DOI: 10.1039/c7ay00981j
- [11] V.O. Jimenez, K.Y. Hwang, D. Nguyen, Y. Rahman, C. Albrecht, B. Senator, O. Thiabgoh, J. Devkota, V.D. An Bui, D.S. Lam, T. Eggers, M.H. Phan. *Biosensors*, **12** (7), 517 (2022). DOI: 10.3390/bios12070517
- [12] Y. Geliang, B. Xiongzhui, X. Chao, X. Hong. *Sens. Actuators A Phys.*, **161** (1–2), 72 (2010). DOI: 10.1016/j.sna.2010.05.019
- [13] W. Lu, Y. Xu, J. Shi, Y. Song, X. Li. *J. All. Comp.*, **638**, 233 (2015). DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.03.086
- [14] Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, М.С. Деревянко, А.В. Семиров. *Изв. вузов. Физика*, **58** (2), 141 (2015). DOI: 10.1007/s11182-015-0474-0
- [15] B. Hernando, M.L. Sánchez, V.M. Prida, M. Tejedor, M. Vázquez. *J. Appl. Phys.*, **90**, 4783 (2001). DOI: 10.1063/1.1408594
- [16] J.J. Becker. *J. Appl. Phys.*, **52** (3), 1905 (1981). DOI: 10.1063/1.329565
- [17] E.N. Zanaeva, A.I. Bazlov, A.A. Kazakova. *Lett. Mater.*, **15** (3), 220 (2025). DOI: 10.48612/letters/2025-3-220-1226
- [18] S.O. Volchikov, A.A. Pasynkova, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, N.V. Kozlov, A.V. Svalov, A.V. Semirov. *Sensors*, **21** (20), 6728 (2021). DOI: 10.3390/s21206728
- [19] I.A. Solodukhin, V.V. Khodasevich, V.V. Uglov, M. Brizuela, J.I. Oñate. *Surf. Coat. Technol.*, **142–144**, 1144 (2001). DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01190-2
- [20] C. Montero, C.G. Ramírez, L. Muñoz, M. Sancy, M. Azócar, M. Flores, A. Artigas, J.H. Zagal, X. Zhou, A. Monsalve, M. Páez. *Materials*, **16**, 2327 (2023). DOI: 10.3390/ma16062327
- [21] S.K. Park, Y.K. Hong, Y.B. Lee, S.W. Bae, J. Joo. *Curr. Appl. Phys.*, **9** (4), 847 (2009). DOI: 10.1016/j.cap.2008.07.021
- [22] Д.Л. Загорский, Р.А. Макарыш, Н.С. Перов, К.В. Шаломов, И.М. Долуденко, В.В. Овчинников, Н.В. Гушина, Д.В. Панов. *ФТТ*, **67** (7), 1337 (2025). DOI: 10.61011/ФТТ.2025.07.61194.32НН-25
- [23] И.А. Антошина, Р.К. Вишератин, Г.Н. Елманов, В.А. Степанов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, **4**, 53 (2015). DOI: 10.26583/npe.2015.4.06
- [24] D.G. Park, C.G. Kim, J.H. Lee, W.W. Kim, J.H. Hong. *J. Appl. Phys.*, **101**, 09N109 (2007). DOI: 10.1063/1.2712025
- [25] J. Juraszek, A. Fnidiki, M. Toulemonde. *J. Appl. Phys.*, **89** (6), 3151 (2001). DOI: 10.1063/1.1350411
- [26] K. Ferrone, C. Willis, F. Guan, J. Ma, L. Peterson, S. Kry. *Radiation*, **3**, 46 (2023). DOI: 10.3390/radiation3010005
- [27] Г.В. Курляндская, Н.В. Дмитриева, А.П. Потапов, В.А. Лукшина, Л.М. Воронова, И.В. Гервасьева, Н.Г. Бегенин. *ФММ*, **83** (5), 41 (1997).
- [28] V. Franco, A. Conde. *Mater. Lett.*, **49**, 256 (2001). DOI: 10.1016/S0167-577X(00)00379-7
- [29] D.G. Park, H. Song, C.Y. Park, C.S. Angani, C.G. Kim, Y.M. Cheong. *IEEE Trans. Magn.*, **45** (10), 4475 (2009). DOI: 10.1063/1.3086714
- [30] Г.В. Курляндская, Д. де Кос, С.О. Волчков. *Дефектоскопия*, **6**, 13 (2009). DOI: 10.1134/S1061830909060023
- [31] M. Mizuguchi, S. Nakatsuji. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **20**, 262 (2019). DOI: 10.1080/14686996.2019.1585143
- [32] М.П. Ласёк, Л.Н. Котов, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. *ФТТ*, **12**, 2129 (2024). DOI: 10.61011/ФТТ.2024.12.59577.6564PA