

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVII Международного симпозиума

13–16 марта 2023 г., Нижний Новгород

Том 1

Секция 1

Сверхпроводящие наносистемы

Секция 2

Магнитные наноструктуры

Секция 4

Измерения и технологии атомарного и нанометрового масштаба на основе зондовых, электронно-лучевых и ионно-лучевых методов

Секция 6

Твердотельная элементная база квантовых технологий

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2023

УДК 538.9(063)
ББК 22.37я431
32.844.2я431
Н-25

Н-25 В 2 томах. Том 1-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2023. — 496 с.
ISBN 978-5-8048-0120-6

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Отделение физических наук РАН
Научный совет РАН по физике полупроводников
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Институт физики микроструктур РАН
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

Сопредседатели программного комитета

С. В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород;
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород.

Учёный секретарь Симпозиума

Д. А. Татарский, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Нижний Новгород

Программный комитет

А. Ю. Аладышкин, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В. В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И. С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка
В. А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
В. А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В. А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В. И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
К. Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Москва
С. В. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В. В. Кведер, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
И. В. Кукушкин, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
В. Д. Кулаковский, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
А. В. Латышев, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. А. Мильяев, д.ф.-м.н.	ИФП УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.	СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
Н. Н. Салашенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
А. В. Чаплик, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Организационный комитет

В. Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Зорина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. В. Иконников	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д. А. Камелин	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Р. С. Малофеев	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. С. Михайленко	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Н. Садова	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Е. Пестов	ИФМ РАН, Нижний Новгород

ISBN 978-5-8048-0120-6

ББК 22.37я431
32.844.2я431
© ИПФ РАН, 2023
© ИФМ РАН, 2023

Суперпарамагнетизм стекол, синтезированных на основе горных пород: экспериментальные данные и теоретическое моделирование

П. В. Харитонский¹, Е. С. Сергиенко², А. Ю. Ралин^{3,**}, Е. А. Сетров^{1,*}, Т. С. Шейдаев¹, К. Г. Гареев¹, Д. Д. Дубешко²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022

² Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, 199034

³ Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922

* evgensetrov@gmail.com, ** ralin.ayu@dvfu.ru

Исследовались минеральный состав, петрографическая структура и магнитные свойства искусственных стекол, полученных путем высокотемпературного плавления смесей горных пород различного генезиса. При синтезе стекол использовались различные по длительности условия охлаждения и стеклования. При этом образуется смесь частиц различных размеров и, соответственно, в различных магнитных состояниях: от суперпарамагнитного до многодоменного. Судя по частотной зависимости магнитной восприимчивости, во многих образцах присутствует значительная доля суперпарамагнитных частиц. На основе двух моделей ансамбля магнитостатически взаимодействующих химически неоднородных двухфазных частиц проведены согласованные расчеты гистерезисных характеристик ряда стекол, в которых обнаруживается присутствие магнетита. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Материалы и методы

Исследовались структурно-фазовый, химический состав и магнитные свойства искусственных стекол, полученных путем высокотемпературного плавления смесей горных пород различного генезиса: вулканогенно-осадочные породы, кварцито-сланцы, псамит-алеврит-пелитовый комплексы. При синтезе стекол использовались различные по длительности условия охлаждения и стеклования.

Структурно-фазовый состав полученных искусственных стекол и исходных пород до плавления исследовался при помощи настольного порошкового дифрактометра Bruker D2 Phaser (Bruker, Германия), элементный состав — при помощи энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8100P (Shimadzu, Япония).

Для магнитометрических экспериментов было выбрано 14 образцов из 20. Для них были получены частотно-полевые зависимости магнитной восприимчивости с использованием моста восприимчивости MFK-1FA (AGICO, Чехия), а также построены петли гистерезиса и кривые размагничивания остаточной намагниченности при максимальной индукции поля 1,8 Тл при комнатной температуре с использованием вибрационного магнитометра LakeShore 7410 (Lake Shore Cryotronics Inc., США).

Экспериментальные результаты

Образцы искусственных стекол представлены рентгеноаморфной фазой с содержанием кристаллической фазы в незначительном количестве: кварц, кристобалит и магнетит. При плавлении и дальнейшем стекловании при длительном охлаждении расплава в ряде искусственных стекол образуется магнетит в количестве, измеримом методом порошковой рентгеновской дифрактометрии.

Искусственные стекла демонстрируют, как правило, низкую, но положительную начальную магнитную восприимчивость χ в диапазоне $(1,5\text{--}440,8)\cdot 10^{-7}$ ед. СИ. Все образцы можно разделить на две группы:

величина χ которых меньше $3\cdot 10^{-7}$ ед. СИ и с магнитной восприимчивостью на 1–2 порядка больше. В ряде образцов, обладающих высокой магнитной восприимчивостью и содержащих магнетит, явно присутствуют в значительном количестве суперпарамагнитные зерна. Их наличие было подтверждено исследованием частотно-полевой зависимости χ и высоким значением FD-фактора (frequency dependence) этих образцов [1].

При «быстром» охлаждении образующиеся магнитные частицы находятся в основном в суперпарамагнитном состоянии. При «медленном» — образуется смесь частиц различных размеров и, соответственно, в различных магнитных состояниях: от суперпарамагнитного до малодоменного. Как было показано в работе [2] для аналогичных стекол, более крупные частицы выходят на поверхность образца и подвергаются большему воздействию внешней среды. Менее окисленные мелкие частицы, в том числе суперпарамагнитные, в основном находятся внутри образца. Магнитные свойства образцов в целом обуславливаются ферромагнитной фазой, состоящей как из крупных химически неоднородных частиц, так и из мелких более однородных.

Для теоретического моделирования гистерезисных характеристик были выделены две группы образцов, содержащих магнетит и значительную суперпарамагнитную составляющую: 1) с относительно высоким и 2) с относительно низким значением остаточной намагниченности. В табл. 1 приведены гистерезисные параметры (M_s — намагниченность насыщения и M_{rs} — остаточная намагниченность насыщения, H_c — коэрцитивная сила и H_{cr} — коэрцитивная сила по остаточной намагниченности) и величины FD-фактора выбранных образцов.

Теоретическое моделирование

В работах [1, 3] проводилась верификация теоретической модели однодоменных магнитостатически взаимодействующих ферромагнитных частиц с

Таблица 1. Гистерезисные параметры и значения FD-фактора искусственных стекол

Образец	$\mu_0 H_c$, мТл	$\mu_0 H_{cr}$, мТл	M_s , А·м ² /кг	M_{rs} , А·м ² /кг	H_{cr}/H_c	M_{rs}/M_s	FD
Sha f	18,5	33,9	4,598	1,2980	1,83	0,28	0,060
a30s10c5 f	12,0	134,0	0,702	0,1240	11,17	0,18	0,119
s10c30 f	0,6	2,7	1,385	0,0005	4,50	0,0004	0,074
a30c10 f	22,0	116,0	3,020	1,1500	5,27	0,38	0,011
a10c30 f	23,0	35,0	2,959	1,1400	1,52	0,39	0,020

эффективной спонтанной намагниченностью. Этот параметр позволяет феноменологически учитывать магнитную и химическую неоднородность частиц. В статье [4] для описания магнитных состояний химически неоднородных частиц применялась модель двухфазных частиц с учетом их магнитостатического взаимодействия. Это позволило рассчитать поля перемагничивания частиц и оценить гистерезисные характеристики образцов. В работе [5] продемонстрирована согласованная применимость двух указанных теоретических моделей.

Аналогичный подход был использован для моделирования гистерезисных характеристик синтезированных стекол, магнитные свойства которых представлены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что гистерезисные и магнитогранулометрические характеристики железосодержащей фазы определяются параметрами процесса стеклообразования, причем существенно зависят от состава шихты, способа и скорости охлаждения.

Согласованное моделирование на основе двух указанных теоретических моделей в предположении

логнормального распределения частиц по размерам позволило показать, что магнитные свойства образцов обусловлены наличием значительного количества суперпарамагнитных частиц (в основном нестехиометричный магнетит) и более крупных химически неоднородных частиц состава типа «магнетит–гематит». Показано, что использованный подход применим также к состоящим преимущественно из суперпарамагнитных частиц образцам, в которых остаточная намагниченность насыщения обеспечивается заблокированными за счет магнитостатического взаимодействия частицами.

Литература

1. P. Kharitonskii, N. Bobrov, K. Gareev *et al.* // JMMM, **553**, 169279 (2022).
2. Е. С. Сергиенко, А. А. Костеров, С. Ю. Янсон и др. // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2020.
3. P. Kharitonskii, S. Kirillova, K. Gareev *et al.* // IEEE Trans. Magn., **56**, 7200209 (2020).
4. P. Kharitonskii, N. Zolotov, S. Kirillova *et al.* // Chinese Journal of Physics, **78**, 271 (2022).
5. П. В. Харитонский, К. Г. Гареев, А. Ю. Ралин, Е. С. Сергиенко // ФММ. 2023. **124**, 1.