

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Д14-86-301

В.И.Данилов, В.М.Дробин, В.Н.Трофимов

ФЕРРОМАГНЕТИЗМ НЕМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Направлено в журнал "physica status solidi (b)"

1986

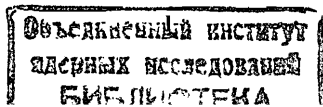
При измерении магнитной восприимчивости χ слабомагнитных веществ при 4,2 К нами было обнаружено, что некоторые образцы обладают спонтанной намагниченностью ^{/1/}. Пытаясь установить причины этого эффекта, мы провели предварительные опыты с большим числом образцов из различных немагнитных веществ: меди, алюминия, тефлона, оргстекла, графита. В результате оказалось, что все образцы способны намагничиваться постоянным магнитным полем и длительное время сохранять остаточную намагниченность при комнатной температуре и выше. В таблице I приведены максимальные и минимальные наблюдавшиеся значения магнитного момента M_s в магнетонах Бора μ_B некоторых цилиндрических образцов диаметром 3,5 и длиной 5 мм, намагниченных вдоль оси при 300 К, измеренного при 4,2 К в нулевом магнитном поле.

Таблица I. Экстремальные наблюдавшиеся значения остаточной намагниченности

№ образца	Вещество	$M_{smax, 10^{15} \mu_B}$	$M_{smin, 10^{15} \mu_B}$	Намагничивающее поле, кЭ
1	Медь поликристаллическая, 99,99%	0,3 [*]	0,02 ^{**}	2,7
2	Медь поликристаллическая, 99,99%	0,04 ^{***}	0,006 ^{***}	2,7
3	Алюминий поликристаллический, 99,9999%	0,04 ^{****}	0,007 ^{**}	4,0
4	Алюминий поликристаллический, 99,99%	0,27 [*]	0,02 ^{**}	2,7
5	Графит пиролитический	30 [*]	-	2,7
6	Графит технический	0,5 [*]	0,03 ^{*****}	2,7
7	Тефлон	0,05 [*]	0,001 ^{*****}	2,7
8	Оргстекло	0,1 [*]	-	2,7

- ^{*} - непосредственно после изготовления;
- ^{**} - после глубокого (≥ 10 мкм) травления и УЗ очистки;
- ^{***} - после полировки поверхности и УЗ очистки;
- ^{****} - после неглубокого (≤ 1 мкм) травления;
- ^{*****} - после однократной УЗ очистки;
- ~~*****~~ - непосредственно после УЗ очистки.

Установка, на которой проводились измерения, подробно описана в ^{/1/}.



Далее было установлено, что для всех образцов, кроме пятого (табл. 1), эффект на первый взгляд в основном является поверхностным, а не объемным, поскольку любое воздействие, изменяющее состояние поверхности, но не объема, влияет также на остаточную намагниченность. В качестве такого селективного воздействия мы использовали травление в кислотах или щелочах и ультразвуковую (УЗ) очистку в растворе детергента и далее в дистиллированной воде. В таблицах 2 и 3 приведены примеры влияния этих операций на M_s . Поверхностный характер эффекта подтверждается также анализом формы выходного сигнала при прохождении образца через две встречно-включенные приемные катушки магнитометра. Однородной объемной намагниченности соответствует сигнал из двух одинаковых

Таблица 2. Влияние УЗ очистки на остаточную намагниченность

№ образца	№ операции *	M'_{s0}/M_{s0}	M_s/M_{s0}
1	1 ^{ЖЖ}	0,22	0,81
	2	0,21	0,73
	3	0,15	0,80
3	1 ^{ЖЖЖ}	0,30	0,38
	2	0,33	0,61
7	1	0,018	0,10
	2	0,017	-

M_{s0} - остаточная намагниченность после намагничивания непосредственно перед обработкой;

M'_{s0} - остаточная намагниченность после обработки;

M_s - остаточная намагниченность при намагничивании после обработки;

Ж - нумерация соответствует хронологической последовательности;

ЖЖ - после неглубокого травления и отжига в форвакууме при 600°C 2 часа;

ЖЖЖ - после полировки пастой ГОИ.

Таблица 3. Влияние травления на остаточную намагниченность

№ образца	№ операции	Глубина травления, мкм	M'_{s0}/M_{s0}	M_s/M_{s0}
1	1	6	0,03	0,21
	2	7	0,10	0,20
	3	2	0,70	1,07
	4	19	0,22	1,00
3	1	-	0,09	0,18
	2	-	-	1,12
4	1	-	-	0,08

по амплитуде симметричных пиков разного знака, расстояние между которыми соответствует расстоянию между катушками, а при поверхностной намагниченности каждый пик расщепляется на два, причем величина расщепления соответствует длине образца. Пример записи выходных сигналов для разных образцов приведен на рис. 1.

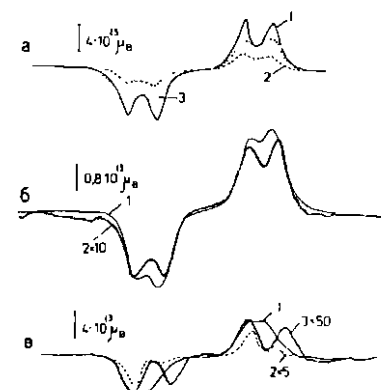


Рис. 1. Форма сигналов от некоторых образцов при малых M_s .

а - образец 3; 1 - после полировки, УЗ очистки и намагничивания в поле 2,7 кЭ; 2 - после повторной УЗ очистки; 3 - после повторного намагничивания в поле 2,7 кЭ.

б - образец 7; 1 - после намагничивания в поле 4 кЭ; 2 - после УЗ очистки;

в - образец 2; 1 - после полировки, УЗ очистки и намагничивания в поле 2,7 кЭ; 2 - после глубокого травления ($\approx 0,1$ мм), УЗ очистки и намагничивания в поле 2,7 кЭ; 3 -

после отжига на воздухе при (400-500)°C 5 мин.

В принципе можно допустить три причины поверхностного ферромагнетизма: во-первых, загрязнение поверхности ферромагнитными частицами, во-вторых, ферромагнетизм адсорбированных поверхностью слоев молекул или атомов других веществ, в-третьих, ферромагнетизм чистой поверхности. Первая из причин тривиальна и интереса не представляет. Хотя реально этот тип ферромагнитного поведения иногда наблюдается, но он легко идентифицируется и исключается из рассмотрения. Действительно, при попадании на поверхность ферромагнитных пылинок это обнаруживается по невоспроизводимому и случайному изменению M_s и часто подтверждается визуально при осмотре образца. При загрязнении образцов во время изготовления первая УЗ-очистка должна была бы полностью или почти полностью уничтожить намагниченность M_{s0} предварительно намагниченного образца, если она действительно вызвана загрязнением, так же как и способность намагничиваться после очистки. В действительности, как видно из табл. 2, близкое к этому поведение проявляет лишь тефлоновый образец, в то время как для металлических образцов УЗ-очистка сохраняет 15-33% M_{s0} и последующее намагничивание восстанавливает M_{s0} от 40 до 80%. Для тефлона соответствующие цифры 2% и 10%. Различие в ферромагнитных свойствах тефлонового с одной стороны и метал-

лических образцов - с другой, становится еще более явным при анализе зависимостей однократной намагниченности и способности намагничиваться от времени хранения при комнатных условиях после УЗ-очистки, приведенных на рис. 2.

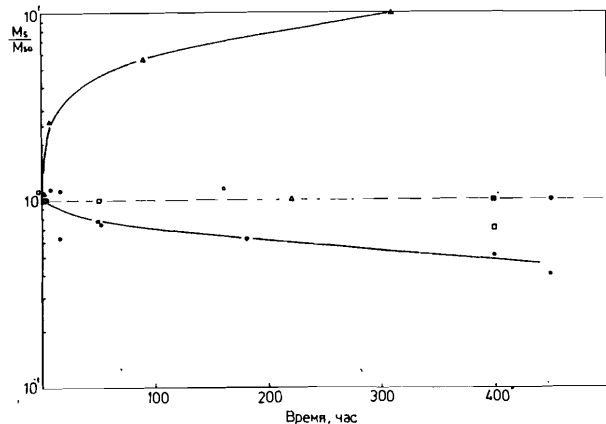


Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности после однократного намагничивания M_s и способности намагничиваться M_s' от времени хранения при комнатных условиях. $\square, \Delta - M_s(t)$; $\bullet, \blacksquare, \blacktriangle - M_s'(t)$
 $\circ, \bullet -$ образец 1; $\square, \blacksquare -$ образец 3; $\Delta, \blacktriangle -$ образец 7.

Очевиден релаксационный характер способности тефлонового образца намагничиваться. Поскольку все образцы хранились в одинаковых условиях, то нельзя объяснить это постепенным загрязнением поверхности ферромагнитной пылью субмикронных размеров. Этот вывод подкрепляется также различным видом зависимостей M_s этих образцов от поля намагничивания, которое проводилось при 4,2 К (рис. 3). Таким образом для образцов, подвергнутых очистке кратковременным травлением или УЗ обработкой, при объяснении их ферромагнитного поведения мы исключаем из рассмотрения первую причину. Обе оставшиеся представляют большой физический интерес. Известны по крайней мере два случая, когда адсорбированная фаза обладает сильно магнитными свойствами, в то время как конденсированная объемная - нет [2-4].

Обнаруженный нами эффект характерен двумя особенностями: наблюдается для всех использованных и весьма разных веществ, кристаллических и аморфных, металлов и диэлектриков, диа- и парамагнетиков; во-вторых - очень высокой температурой Кюри T_c . На рис. 4 приведена зависимость M_s однократно протравленного образца 1 от температуры

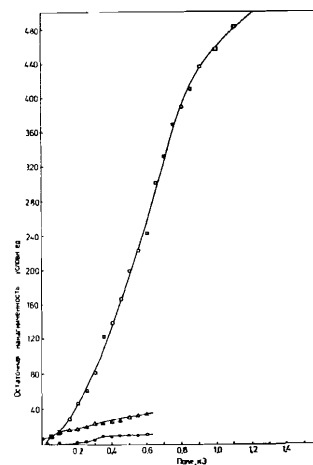


Рис. 3. Зависимость M_s от поля намагничивания. Намагничивание проводилось при 4,2 К, M_s измерялась сразу после намагничивания. $\square -$ образец 1 после первого неглубокого (≤ 1 мкм) травления и отжига в форвакууме при 700°C 4 часа; $\Delta -$ образец 3 после первого неглубокого травления; $\circ -$ образец 7, сразу после УЗ очистки.

отжига. При этих измерениях образец все время находился в герметичной кварцевой ампуле в вакууме не хуже 10^{-2} мм.рт.ст. Нумерация кривых соответствует последовательности измерений. После снятия одной кривой образец намагничивался при 300 К кольцевым магнитом из сплава $SmCo_5$ с максимальным полем на образце 1,5 кЭ и далее снималась следующая кривая. Из приведенного рисунка 4 видно, что для меди T_c может превышать 650°C.

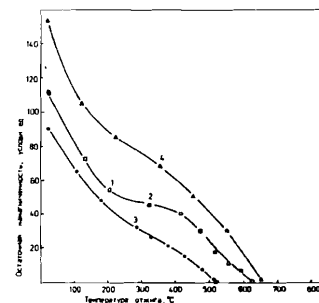


Рис. 4. Зависимость M_s образца 1 от температуры отжига. Время отжига при указанной температуре составляло от 2 до 10 мин.

Дальнейшее сужение круга возможных причин эффекта дает анализ влияния глубины травления на способность намагничиваться. Необходимо отметить, что в большинстве случаев после травления образец подвергался еще УЗ-очистке, когда ее влияние на намагниченность, не связанную с поверхностным загрязнением, не было еще очевидно. Тем не менее, влияние травления можно выразить следующим образом: остаточная намагниченность для одного и того же поля быстро уменьшается с глубиной травления и выходит на один постоянный уровень. Это исключает, во всяком случае для металлических образцов, в качестве основной причины ферромагнетизм адсорбированных слоев. С другой стороны, для них очевидно, что намагничивается поверхностный слой конечной толщины. Из величин M_s (табл. I) и эффективной поверхности образцов ($0,5 \text{ см}^2$) с большой вероятностью следует,

что ферромагнетизм такого слоя обусловлен существованием отдельных кластеров магнитных моментов с достаточно сильным обменным взаимодействием. Разумно предположить, что эти кластеры связаны с дефектами кристаллической решетки, если отбросить крайне маловероятную для наших образцов возможность выделения в них ферромагнитной фазы. Такими дефектами с неспаренными спинами в кристаллических твердых телах могут быть, например, дислокации. Таким образом, ферромагнитное поведение является скорее объемным, а не поверхностным свойством, а наблюдаемый преобладающий вклад поверхностного слоя связан с большей концентрацией в нем дефектов, возникающих при изготовлении.

Мы надеемся, что полученных предварительных результатов достаточно для доказательства нетривиального характера наблюдаемого эффекта. В таком случае он может представлять интерес как для теории, так и для практики, которая может использовать новый метод определения дефектной структуры твердых тел. Вероятно, метод ЭПР в данном случае неприемлем даже для диэлектриков как из-за недостаточной чувствительности, так и предположительно широких линий. Чувствительность же использованной нами аппаратуры составляла $3 \cdot 10^{10} \mu_B \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ и может быть существенно улучшена.

Литература

1. В.М. Дробин и др. ОИЯИ, Р8-85-190, Дубна, 1985.
2. Y.Okuda a.o., Proc. 17 Int.Conf. on Low Temp. Phys., Karlsruhe, 1984, Part , 725.
3. H.Franko a.o., Phys. Rev. B., 1985, 31, No 3, 1699.
4. S.Gregory, Phys. Rev. Lett., 1977, 39, No 16, 1035; *ibid* 1978, 40, No 11, 723.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 мая 1986 года.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Данилов В.И., Дробин В.М., Трофимов В.Н.
Ферромагнетизм немагнитных образцов

D14-86-301

Обсуждаются некоторые результаты исследования ферромагнетизма немагнитных образцов. Измерялась зависимость остаточной намагниченности от различных факторов СКВИД-магнитометром. Обнаружено, что эффект не связан с тривиальным ферромагнитным загрязнением. Делается предположение, что наиболее вероятным источником ферромагнетизма являются неспаренные спины, локализованные на структурных дефектах.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Danilov V.I., Drobin V.M., Trofimov V.N.
Ferromagnetic Behaviour of Nonmagnetic Samples

D14-86-301

Some results obtained in investigations of ferromagnetic behaviour of non-magnetic samples are discussed. The residual magnetization versus different variables was measured by the SQUID susceptometer. It is found that the phenomenon observed is not caused by trivial ferromagnetic contamination. An assumption has been made that ferromagnetism is most probably produced by unpaired spins localized at structural defects.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986