

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Магниторезистивные свойства бинарных сплавов на основе
железа и редкоземельных металлов»**

Выполнил студент

419 группы:

Шапорев Артемий Валерьевич

Научный руководитель:

Профессор Перов Н.С.

Допущен к защите

Зав. кафедрой магнетизма

профессор Перов Н.С. _____

Москва

2017

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	4
Глава 2. Методика измерений.....	13
Глава 3. Основные результаты.....	17
3.1 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от внешнего магнитного поля.	17
3.2 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от температуры.....	19
3.3 Результаты измерений магнитострикции.....	20
3.4 Результаты измерений транспортных свойств.	21
Основные результаты.	22
Список литературы	23

Введение

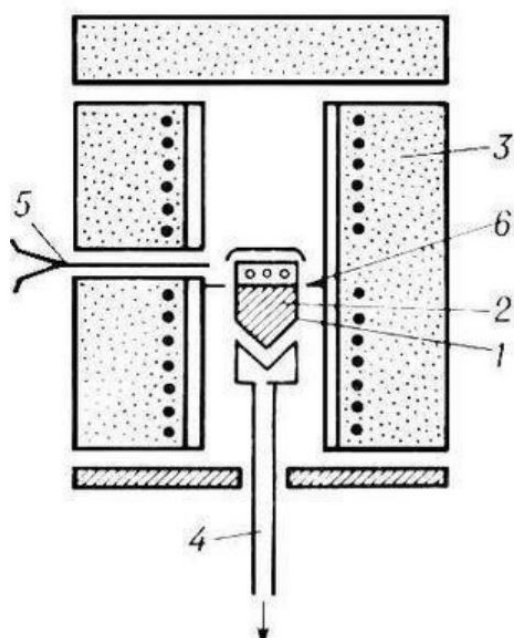
Сплавы Fe-Ga (Galfenols - Галфенолы) недавно стали центром научного внимания вследствие их гигантской магнитострикции, λ , которая в достаточно малых магнитных полях, приближается к 400 ppm [1]. Галфенолы привлекательны тем, что имеют малую коэрцитивную силу и отличные механические свойства (высокий модуль Юнга и предел прочности). Эти материалы, вследствие их гигантской магнитострикции, имеют большой потенциал для различных применений в датчиках, исполнительных механизмах, а также они могут быть применены в качестве поглотителя энергии механических вибраций [2]. Галфенол легко обрабатывается, из него можно формировать образцы различной формы, он относительно дешев. Такие уникальные технологические возможности делают галфенол потенциальной альтернативой материалу Terfenol-D ($Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ ($x \sim 0.3$)), который, несмотря на высокие показатели магнитострикции, является очень хрупким и неустойчивым к ударным и растягивающим нагрузкам.

Редкоземельные металлы (такие как Тербий Tb, Диспрозий Dy) имеют значительную магнитострикцию при низких температурах вследствие сильного спин-орбитального взаимодействия в них. Замещение железа 0.2 at.% редкоземельным металлом увеличивает кристаллографическую анизотропию галфенола, тем самым увеличивая показатели магнитострикции.

Целью данной работы является изучение магнитных и транспортных свойств серии образцов сплавов Fe-Ga с различной концентрацией галлия и добавлением тербия.

Глава 1. Обзор литературы

Галфенол – материал, обладающий уникальными свойствами: при небольшом изменении стехиометрии магнитные свойства могут значительно измениться. Галфенол впервые был получен и исследован в 1999г [3]. Для получения монокристаллической структуры в железо-галлиевом сплаве используют метод Бриджмена-Стокбаргера [4]. Он заключается в том, что через печь, имеющую неравномерное распределение температуры по длине, протягивается ампула с материалом (возможна неподвижная ампула и движущаяся печь). Ампула имеет заостренный конец для исключения образования большого числа зародышей. Кристаллизация осуществляется в контейнере при плавном снижении температуры в условиях постоянного градиента температурного поля. В результате этого на дне конусообразного тигля начинается кристаллизация, и благодаря геометрическому отбору вырастает один монокристалл, имеющий форму сосуда.



- 1 – тигель с расплавом
- 2 – кристалл
- 3 – печь
- 4 – холодильник
- 5 – термопара
- 6 – диафрагма.

Рисунок 1. Схематическое изображение аппарата для выращивания монокристаллов по методу Бриджмена-Стокбаргера.

Магнитострикция – явление самопроизвольной деформации кристалла при изменении магнитного порядка или ориентации вектора намагниченности, впервые было описано Джоулем в 1842г. [5] $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$, где l – длина образца в нулевом магнитном поле, Δl – изменение длины образца. В галфеноле магнитострикция обусловлена спин-орбитальным взаимодействием. Величина магнитострикции зависит от многих факторов. В сплавах железа с галлием в кристаллической решетке атомы железа заменяются атомами галлия. Это приводит к изменению размеров кристаллической ячейки и увеличению анизотропии. (Рис. 2) [6]

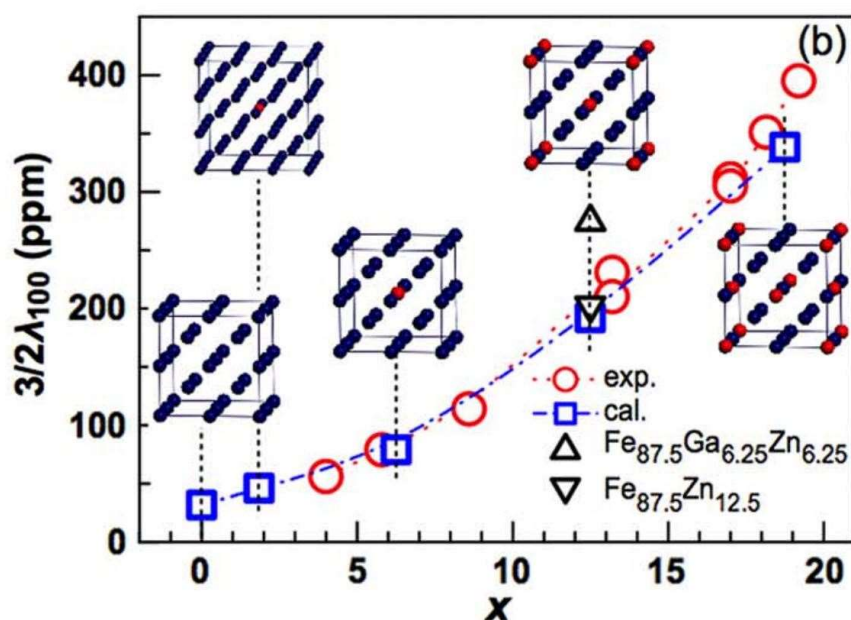


Рисунок 2. Константа магнитострикции (λ_s в направлении $\langle 100 \rangle$) как функция процентного содержания галлия. Круглые точки – экспериментальные данные при комнатной температуре. Квадратные точки – теоретические данные. [6]

Максимальные значения магнитострикции были обнаружены в сплавах Fe-Ga при 17-19 и 27 at% Ga. (Рис. 3) [7] При этих концентрациях структура вещества приводит к максимальному спин-орбитальному взаимодействию.

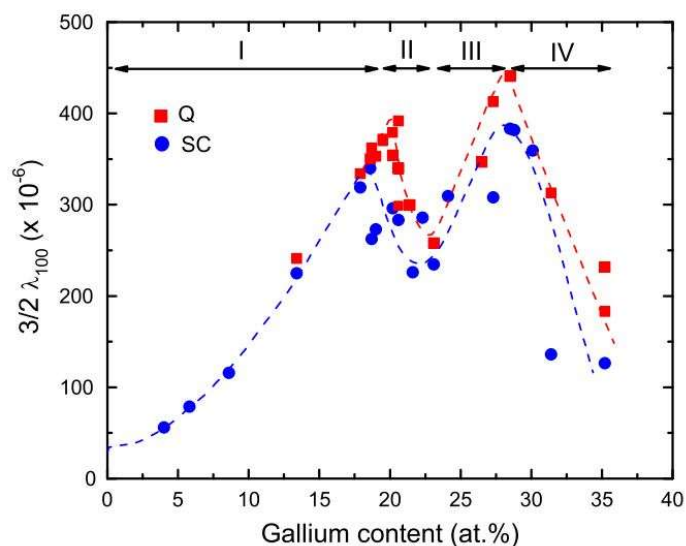
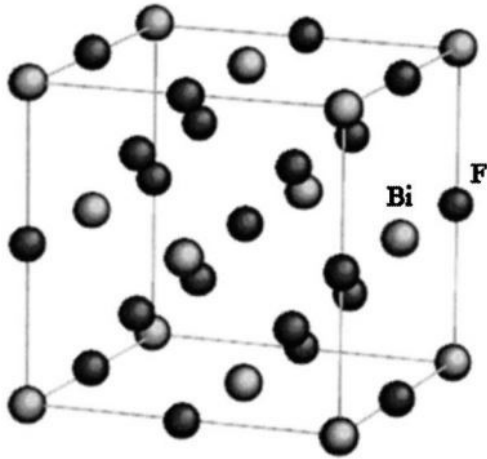


Рисунок 3. График зависимости константы магнитострикции от процентного содержания галлия. Q – быстрое охлаждение сплава после 1200К; SC – медленное охлаждение 10К/мин. [7]

Подобное поведение объясняется наличием в веществе состояний с разной структурой. [8] Фазовые переходы между ними также представляют большой интерес и активно изучаются. Галфенол имеет несколько стабильных упорядоченных состояний с разным структурным типом. [9] [10] При нагревании образца Fe₇₃-Ga₂₇ была выявлена следующая последовательность фазовых переходов D03→L12→D019→A2 (см. рис. 5 и 6), где

- A2 соответствует структура типа α-Fe со случайно распределенными атомами Fe и Ga, sp. gr. Im3m, a ≈ 2.92 Å (при 20 °C);
- D03 соответствует структура типа BiF3 с частично упорядоченными атомами Fe и Ga sp. gr. Fm3m, a ≈ 5.83 Å (при 20 °C);
- D019 соответствует структура типа MgCd3 с частично упорядоченными атомами Fe и Ga, sp. gr. P63/mmc, a ≈ 5.28 Å, c ≈ 4.28 Å (при 20 °C);
- L12 соответствует структура типа Cu3Au с частично упорядоченными атомами Fe и Ga, sp. gr. Pm3m, a ≈ 3.72 Å (при 20 °C);



DO₃ superlattice

Space group: $Fm\bar{3}m$ **Prototype:** BiF₃

Pearson Symbol: cF16

Bi atomic positions:

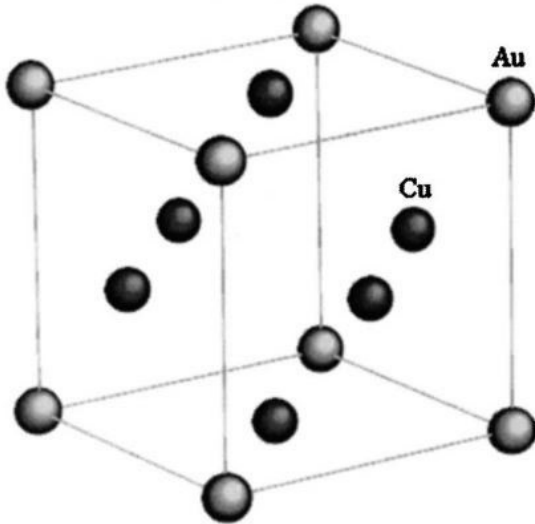
(0, 0, 0) (1/2, 1/2, 0) (1/2, 0, 1/2) (0, 1/2, 1/2)

F atomic positions:

(1/2, 0, 0) (0, 1/2, 0) (0, 0, 1/2) (1/2, 1/2, 1/2)

(1/4, 1/4, 1/4) (1/4, 1/4, 3/4) (1/4, 3/4, 1/4) (3/4, 1/4, 1/4)

(3/4, 3/4, 3/4) (3/4, 3/4, 1/4) (3/4, 1/4, 3/4) (1/4, 3/4, 3/4)



L₁₂ superlattice:

Space group: $Pm\bar{3}m$ **Prototype:** AuCu₃

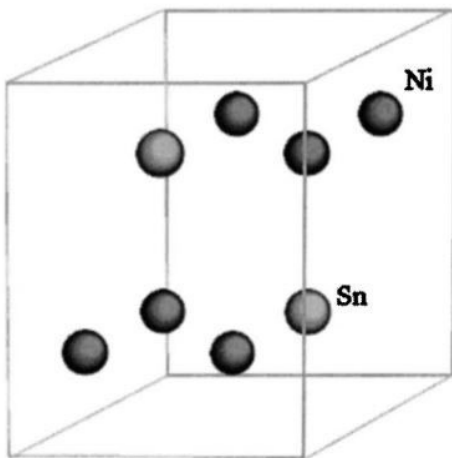
Pearson Symbol: cP4

Au atomic positions:

(0, 0, 0)

Cu atomic positions:

(1/2, 1/2, 0) (1/2, 0, 1/2) (0, 1/2, 1/2)



DO₁₉ superlattice

Space group: P6₃/mmc **Prototype:** Ni₃Sn

Pearson Symbol: hP8

Ni atomic positions:

(1/6, 1/3, 3/4) (1/3, 1/6, 1/4) (1/6, 5/6, 3/4)

(5/6, 2/3, 1/4) (2/3, 5/6, 3/4) (5/6, 1/6, 1/4)

Sn atomic positions:

(1/3, 2/3, 1/4) (2/3, 1/3, 3/4)

Рисунок 4. Структурные типы галфенола. D03, L12, D019. [8]

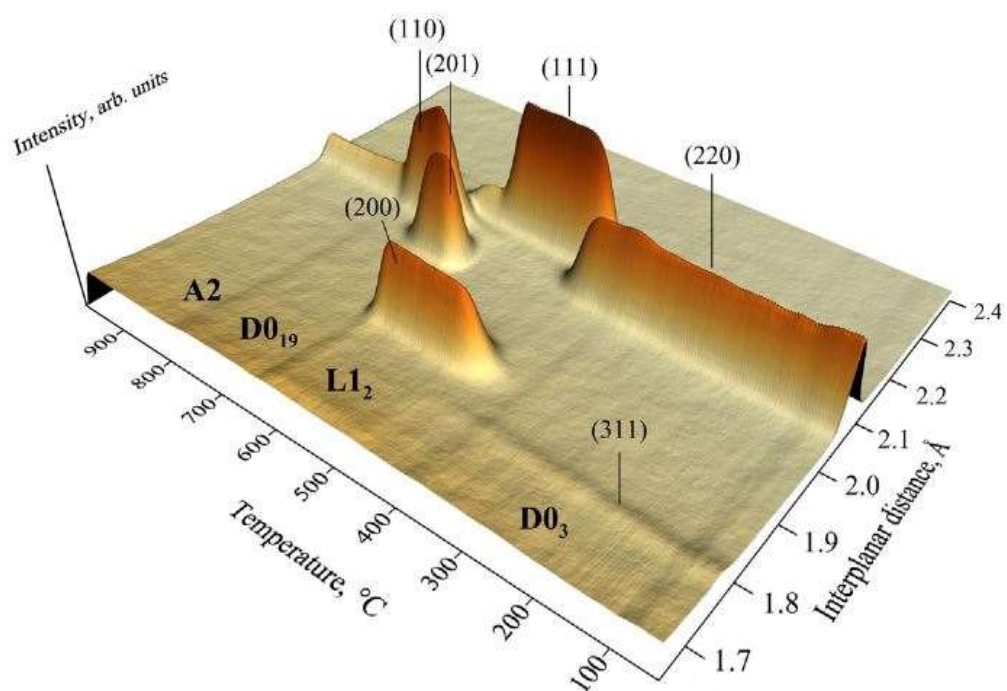


Рисунок 5. Трехмерная визуализация дифракционных пиков на образце Fe73 - Ga27 при равномерном нагревании 2К/мин. [9]

Добавление небольшого количества тербия стабилизирует появление структур A2, B2, D03 и предотвращает появление L12, D019 (Рис. 6) [11]

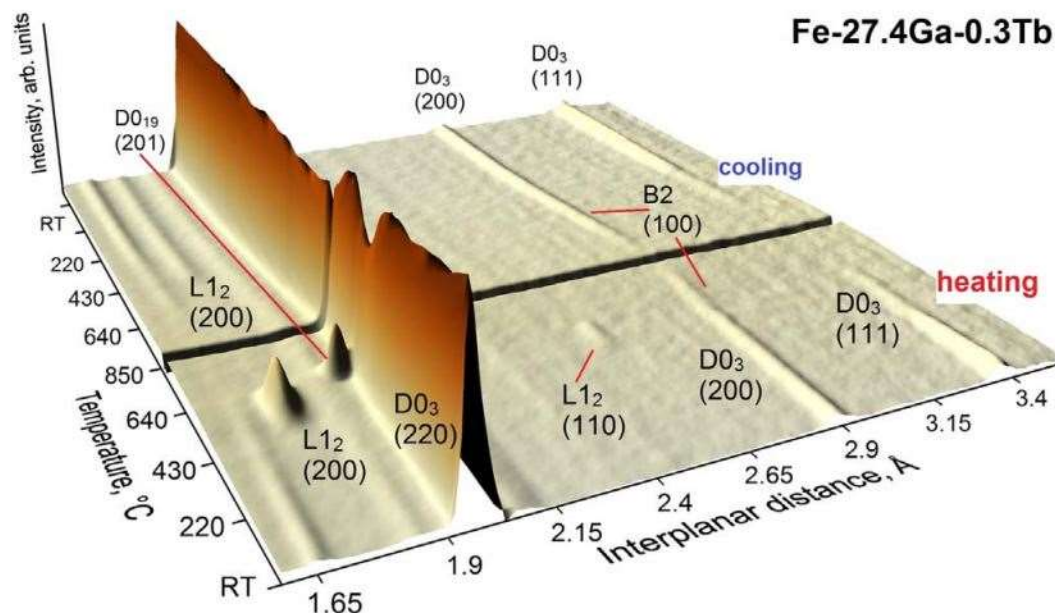


Рисунок 6. Трехмерная визуализация дифракционных пиков на образце Fe73 - Ga27.4- Tb0.3 при равномерном нагревании и охлаждении. [11]

При этих фазовых переходах в сплавах не только формируются разные структурные типы, но и, как следствие, магнитные свойства у каждой структуры будут разные. В том числе разные по знаку и величине эффекта магнитострикции. [12] Это позволяет получить материал с требуемыми значениями магнитострикции. Образцы с одинаковым составом после изотермического отжига разной продолжительности показывали различные результаты. (Рис. 7)

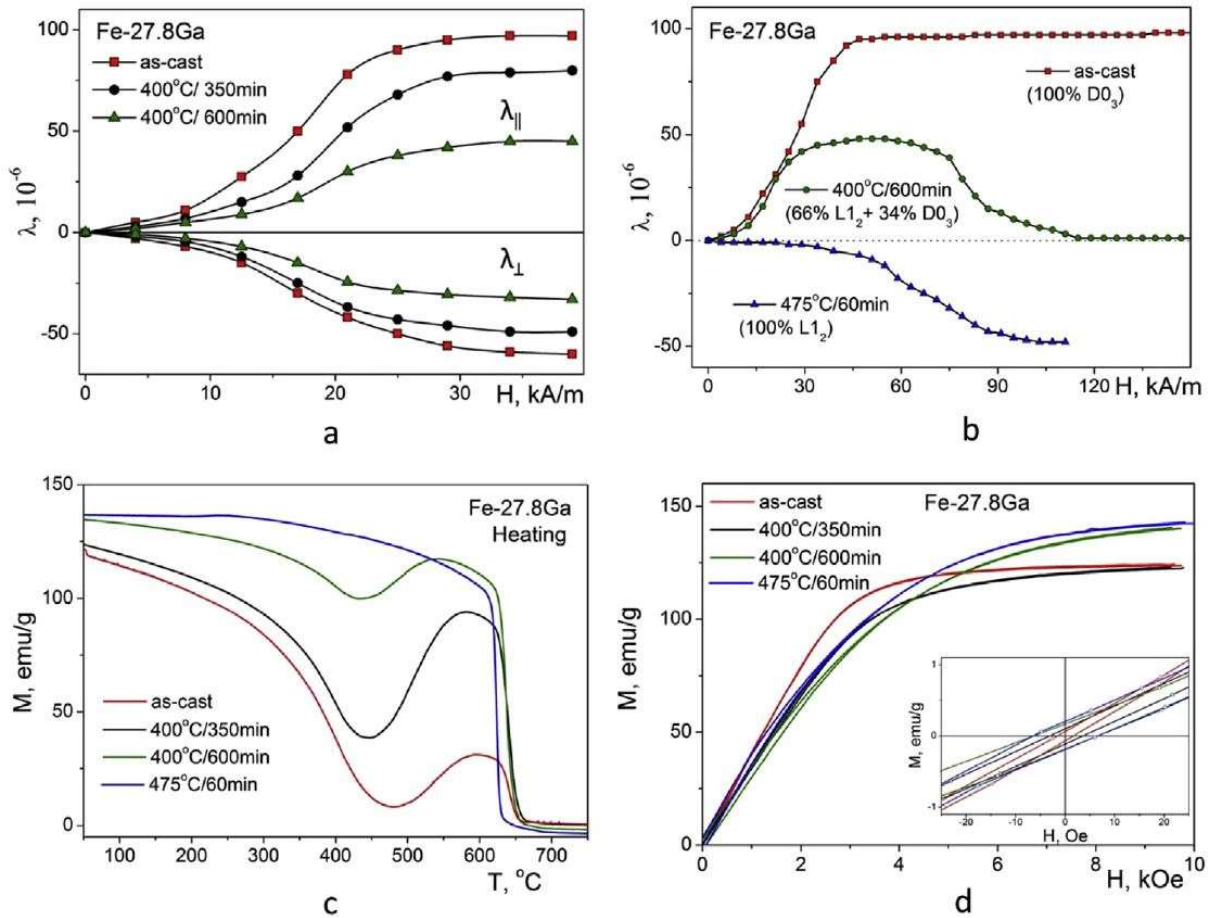


Рисунок 7. а) Перпендикулярная и параллельная магнитострикция
 б) Магнитострикция в) Зависимость намагниченности от температуры
 д) Кривые намагничивания для образцов Fe73 - Ga27 с разным временем отжига. [12]

Таким образом, можно управлять конечными свойствами образцов и изделий из галфенола. Это важно при подборе материала для конкретных целей.

Также в образцах галфенола была обнаружена так называемая “неджоулева магнитострикция”. [13] Неджоулева магнитострикция – это изменение линейных размеров образца в магнитном поле с изменением конечного объема, что противоречит теории Джоуля. Это связано с образованием “микро-клеток” внутри вещества, которые определяют переменную структуру образца в магнитное поле. (Рис. 8)

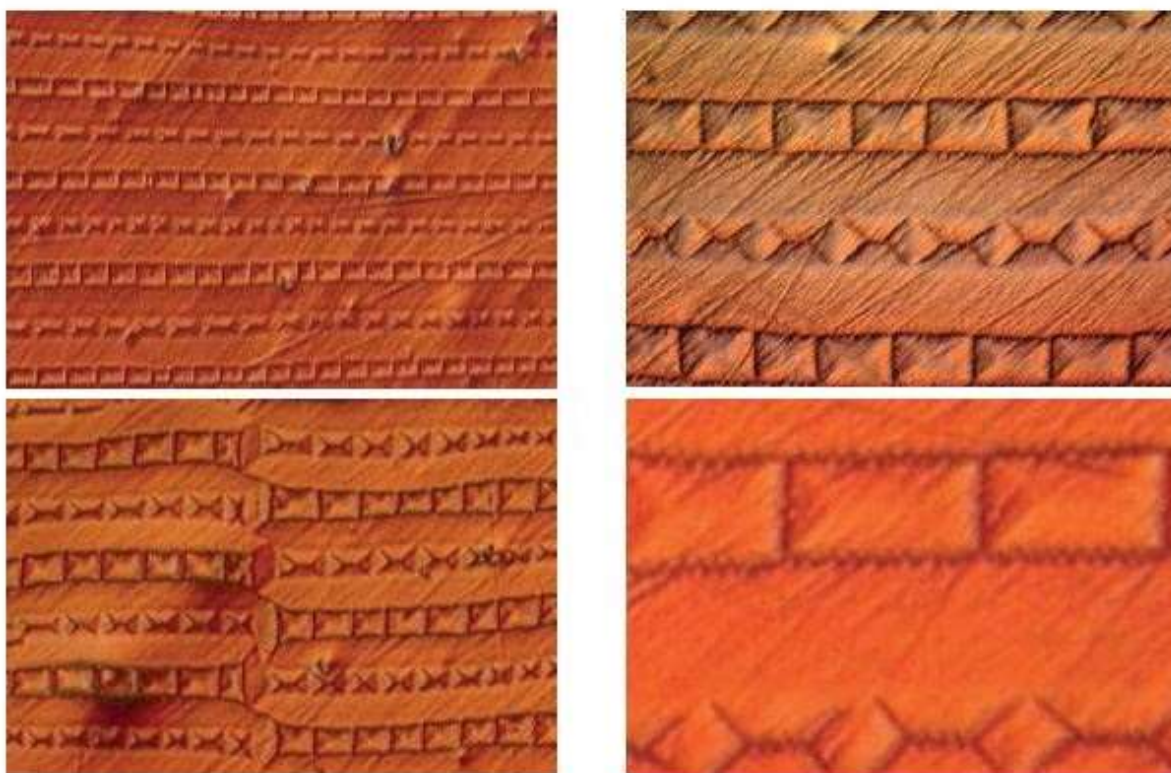


Рисунок 8. Периодическая клеточная микроструктура Fe73.9 - Ga26.1. Получена с помощью MFM. Размер одной ячейки 50 мкм на 14 мкм. [13]

При перестроении клеточной структуры в слабых магнитных полях происходит расширение образца вдоль нескольких кристаллографических направлений. (Рис. 9) Это приводит к удлинению образца вдоль нескольких направлений и, таким образом, к изменению конечного объема.

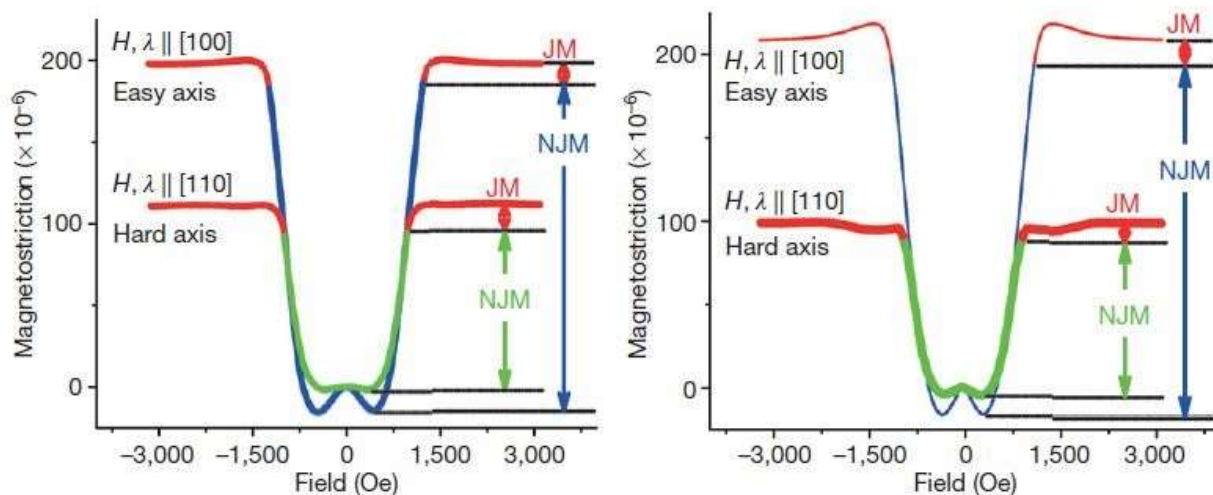


Рисунок 9. Магнитострикция в образцах Fe73.9–Ga26.1 и Fe82.9–Ga17.1 Неджоулева магнитострикция (зеленая и синяя линии) показана отдельно от джоулевой (красная линия). [13]

Механические свойства галфенола являются его сильной стороной. Модуль Юнга (отношение напряжения к деформации сжатия) у Fe₈₃Ga₁₇ приблизительно равен 65 ГПа, предел прочности (механическое напряжение выше которого происходит разрушение материала) $\sigma_B = 515$ МПа. В тоже время для материала Terfenol-D эти значения достигают лишь $\sigma_B = 28$ МПа, $E=90$ ГПа. [14]

Использование галфенола в качестве магнитострикционного материала в композитах позволило получить более высокий магнитоэлектрический коэффициент связи. [15] Прямой магнитоэлектрический эффект состоит в генерации электрического поля в структуре во внешнем магнитном поле. Магнитное поле вызывает магнитострикционную деформацию ферромагнитных слоев, которая передается ферроэлектрическим слоям и приводит, вследствие пьезоэффекта, к генерации связанных зарядов и соответственно напряжения на поверхностях структуры. Обратный магнитоэлектрический эффект проявляется в изменении намагниченности структуры при создании в ней электрического поля. Приложенное к электродам структуры напряжение вызывает электрострикционную

деформацию ферроэлектрических слоев, которая передается ферромагнитным слоям и приводит, вследствие обратной магнитострикции, к изменению намагниченности структуры. [16]

Транспортные свойства материала – это способность материала к распространению того или иного физического параметра, например, электропроводность, теплопроводность и т.д. В данной работе конкретно рассматривается явление электропроводности галфенола. Физической основой явления электрического сопротивления является рассеяние электронов проводимости, ускоряемых разностью потенциалов на концах проводника [16]. Отличительной особенностью ферромагнетика является наличие спонтанной намагниченности, в результате чего внутри каждого домена существует некоторая магнитная индукция, влияющая на прохождение через него электрического тока. В результате удельное сопротивление такого материала является по сути магнитосопротивлением и для его определения необходимо учитывать распределение намагниченности в среде. Также имеются вклады в сопротивление от рассеяния электронов на доменных границах и магнитных структурах внутри них (вихревые структуры, спиновые волны на поверхностях границ). Анализируя различные вклады в сопротивление, можно сделать предположение, что в ферромагнетике сопротивление должно уменьшаться с увеличением внешнего магнитного поля. При этом всё больше магнитных моментов внутри материала поворачивается в направлении внешнего магнитного поля, уменьшая вклад рассеяния на магнитной подсистеме в общее сопротивление, смещаются доменные границы, намагниченность распределяется более однородно по объёму образца [17]. На данный момент опубликованных статей, описывающих транспортные свойства галфенола, обнаружено не было, поэтому данная работа посвящена исследованию этих свойств.

Глава 2. Методика измерений.

2.1 Получение образцов галфенола.

Серия образцов с различным процентным содержанием галлия была получена в Московском Институте Стали и Сплавов методом Бриджмена-Стокбаргера с использованием чистого железа и галлия в среде заполненной чистым аргоном в мини-печи Indutherm MC–20V. Химические составы были определены с помощью метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Получившиеся образцы являются монокристаллами и имеют структурный тип D03 (см. гл. 1) при комнатной температуре. Образцы имеют форму прямоугольного параллелепипеда. (Табл. 1)

Номер образца	Химический состав	Размер образца
1	Fe ₇₃ -Ga ₂₇	2x2x4 мм ³
2	Fe _{75.2} -Ga _{24.8}	1x1x1 мм ³
3	Fe _{72.7} -Ga ₂₇ -Tb _{0.3}	2x2x4 мм ³
4	Fe _{80.1} -Ga _{19.8} -Tb _{0.1}	2x2x2 мм ³

Образцы для исследований предоставлены профессором МИСиС Головиным Игорем Станиславовичем.

2.2 Методика измерений транспортных свойств.

Измерения зависимости сопротивления от внешнего магнитного поля проводились четырехточечным методом с использованием сверхпроводящего соленоида. Четырехточечный метод подразумевает параллельное подключение токовых и потенциальных электродов к образцу. (Рис. 10) Это позволяет избавиться от нежелательных вкладов в сопротивление со стороны проводов и тем самым улучшить точность измерений.

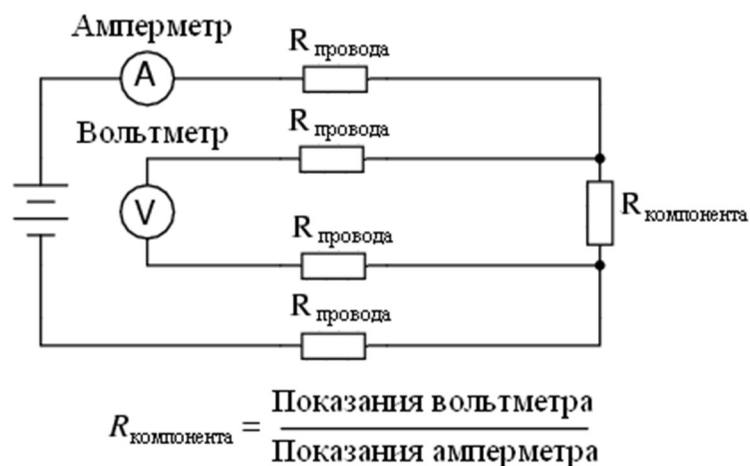


Рисунок 10. Схематичное изображение подключения амперметра и вольтметра к образцу.

К образцу галфенола размером $2 \times 1 \times 4 \text{ мм}^3$ приваривались медные провода, которые присоединялись к измерительной вставке сверхпроводящего магнита. Вставка опускалась в сверхпроводящий соленоид так, чтобы направление поля было перпендикулярно продольной стороне образца, вдоль которой пропускаться электрический ток. Токовые провода подключались к блоку питания АКТАКОМ, который подавал ток 100мА на образец. Напряжение измерялось микровольтметром Keithley 2000. Полученные данные передавались на рабочий компьютер. Измерения проводились при температуре жидкого азота 77.4К в диапазоне полей от +8кЭ до -8кЭ.

2.3 Методика измерений магнитных свойств.

Для измерений магнитных свойств серии образцов использовался вибрационный магнитометр VSM Lake Shore 7407. (Рис. 12) При проведении измерений образец закрепляется на кварцевом держателе с помощью фум-ленты. Держатель с образцом приводится в движение под действием генератора механических колебаний с частотой 82Гц. Из-за колебаний образца изменяется магнитный поток, пронизывающий измерительные катушки.

Изменение потока внутри катушек приводит к возникновению ЭДС индукции в катушках. Четыре катушки соединены попарно-последовательно и расположены навстречу друг к другу. Сигнал ЭДС усиливается; попадая на АЦП, преобразовывается в цифровой формат, и далее передается на рабочий компьютер. Этот сигнал пропорционален магнитному моменту образца. Поле, создаваемое электромагнитом, измеряется при помощи датчика Холла, помещенного в непосредственной близости от образца. Для проведения низкотемпературных измерений установка имеет специальную низкотемпературную вставку (продувной криостат). Принцип действия вставки основан на продуве хладагента (азота) через объем, в котором находится образец. Шахта, в которой расположен образец, изолирована от окружающей среды вакуумной рубашкой. Для регулировки температуры в шахте предусмотрен нагревательный элемент, мощность которого регулируется для стабилизации необходимой температуры, что позволяет изменять температуру измерений от температуры жидкого азота до 400 К.

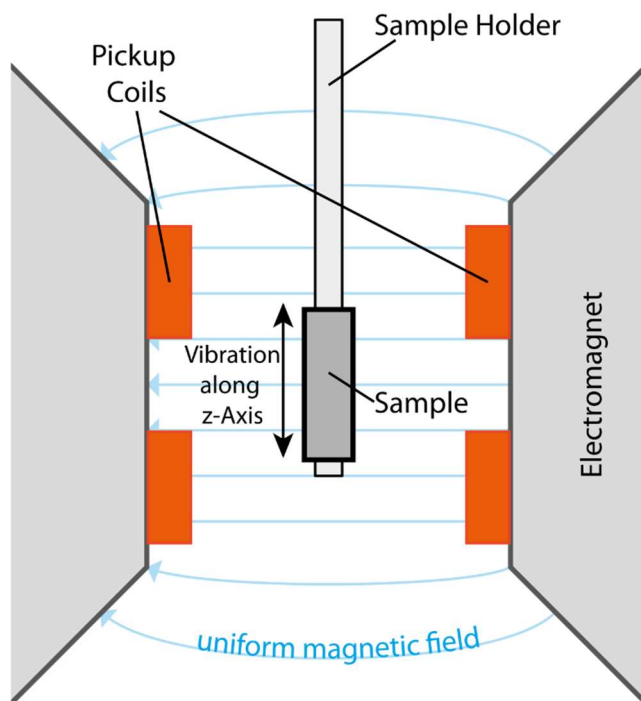


Рисунок 12. Схема установки VSM LakeShore.

Измерения проводились при комнатной температуре в диапазоне полей от +16кЭ до -16кЭ с направлением поля вдоль трёх взаимно перпендикулярных осей образцов железо-галлия. Также, были проведены измерения зависимости намагниченности от температуры с использованием температурной вставки при постоянном магнитном поле 10кЭ. Погрешность от магнитного вклада держателя и фум-ленты не превышает 0,001% от сигнала образца.

Измерения магнитострикции в образцах галфенола проводились с помощью стандартного тензометрического метода совместно с коллегами из МГТУ МИРЭА. К образцу приклеивался тензодатчик. Образец помещался в магнитное поле. С изменением линейных размеров образца (из-за изменения магнитного поля) изменялось сопротивление тензодатчика. Изменение сопротивления измерялось по мостовой схеме. (Рис. 13) По изменению сопротивления определялась деформация образца.

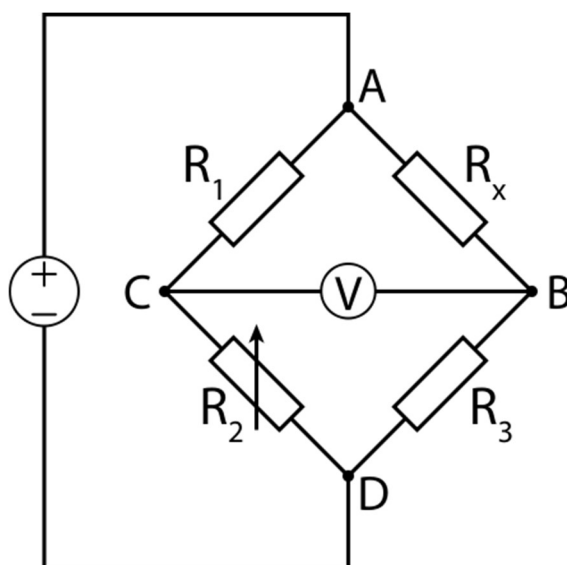


Рисунок 13. Измерительный мост с вольтметром в диагонали. Тензорезистор обозначен R_x .

Глава 3. Основные результаты.

3.1 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от внешнего магнитного поля.

Для всех образцов были выполнены измерения полевых зависимостей магнитного момента, из которых были вычислены зависимости удельной намагниченности (магнитный момент на единицу массы). Для каждого образца измерения проводились вдоль трех направлений поля. (Рис. 13)

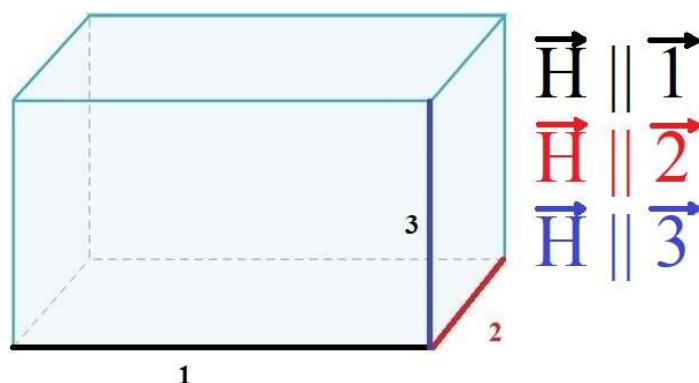


Рисунок 13. Графическое изображение расположения образца относительно направления внешнего магнитного поля.

На графике (Рис. 14 а, б) представлены зависимости намагниченности от магнитного поля для двух составов галфенола.

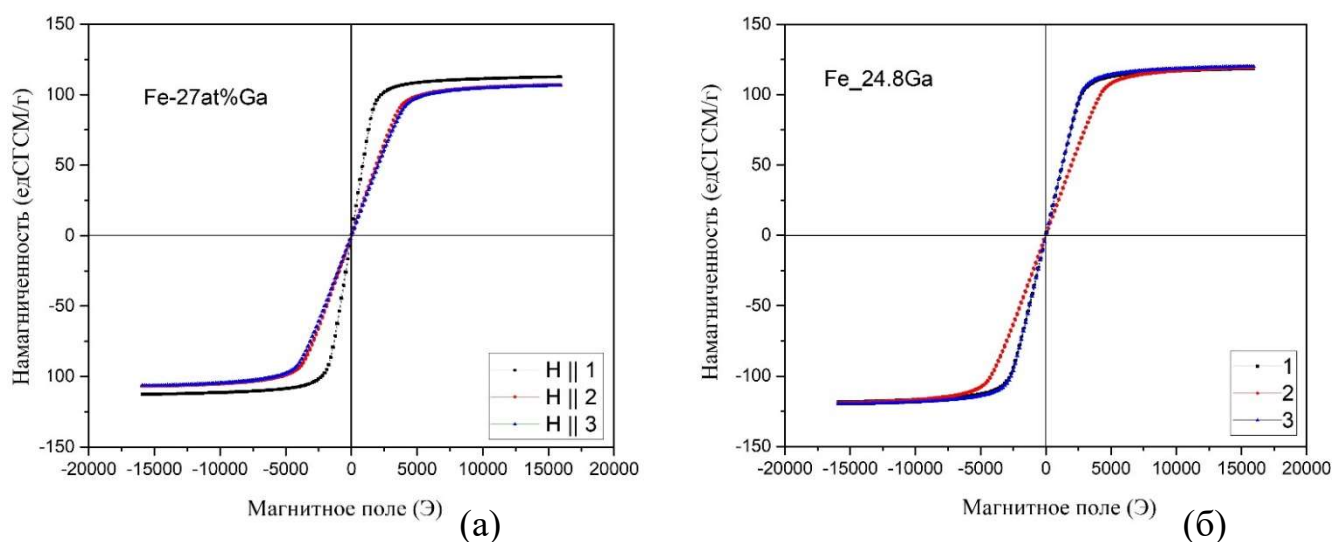


Рисунок 14. Петли гистерезиса для двух образцов Fe-Ga.

Как видно из графиков, кривые намагничивания для этих образцов показали схожий магнитномягкий характер. Анизотропия отдельно взятого образца в данном случае вызвана анизотропией формы. При добавлении небольшого количества тербия в сплав Fe-Ga анизотропия оказывается более выраженной. (Рис. 15 а, б) Это связано с тем, что атомы тербия замещают железо в кристаллической решетке, и вызывают изменение магнитной структуры и магнитной анизотропии.

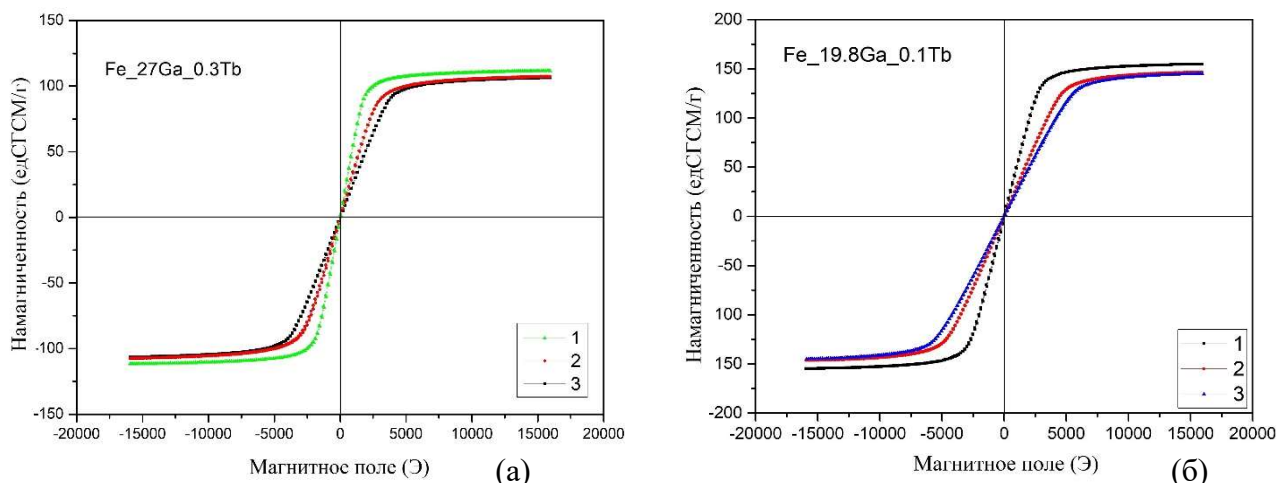


Рисунок 15. Петли гистерезиса для двух образцов Fe-Ga-Tb.

Для сравнения в таблице 1 приведены основные результаты измерений магнитных свойств серии сплавов галфенола. Легко заметить, что полученные результаты свидетельствуют о том, что при небольшом изменении стехиометрии магнитные свойства могут значительно измениться. Полученные значения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы соотносятся с результатами исследований [9] – [12].

	I_s (едСГСЭ/г)	H_c (Э)	H_s (Э)
Fe-27Ga	107.7	33.5	3333
Fe-24.8Ga	113	33.5	4031
Fe-27Ga-0.3Tb	104	33	4085
Fe-19.8Ga-0.1Tb	147.5	35	5645

Таблица 1. Основные результаты.

3.2 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от температуры.

Измерения зависимости намагниченности от температуры при постоянном магнитном поле 10кЭ были выполнены для образца Fe₇₃-Ga₂₇. Полученная зависимость показывает монотонное убывание намагниченности при увеличении температуры. (Рис. 16) Это свидетельствует о том, что в данном температурном интервале не происходит изменений магнитной структуры.

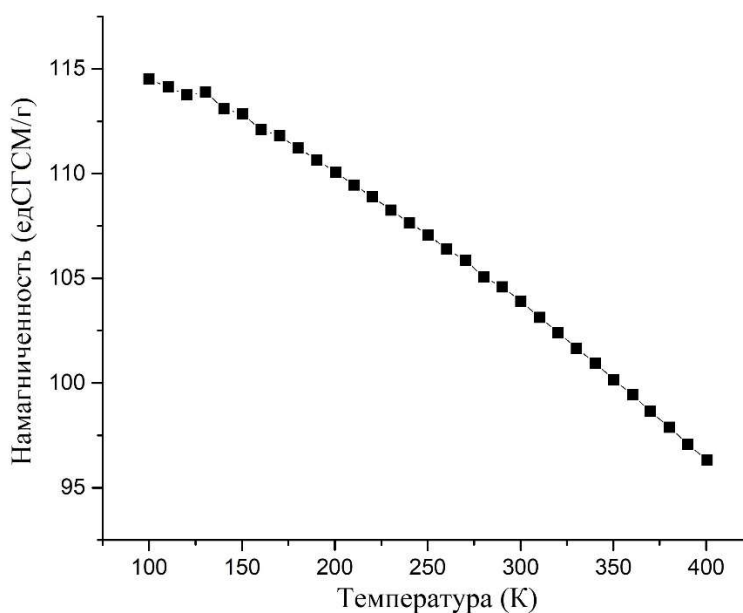


Рисунок 16. График зависимости намагниченности от температуры для образца Fe₇₃-Ga₂₇.

Для остальных образцов исследованной серии образцов зависимость намагниченности от температуры в данном температурном диапазоне будет иметь схожий характер, так как все образцы имеют одинаковый структурный тип и фазовые переходы в галфеноле происходят выше 650К (см. Гл. 1).

3.3 Результаты измерений магнитострикции.

Были проведены исследования магнитострикции для образцов Fe₇₃-Ga₂₇ и Fe_{75.2}-Ga_{24.8}. Магнитострикция измерялась в единственном направлении вдоль длины образца. Из графиков (Рис. 17) видно, что для состава с процентным содержанием галлия 24.8% наблюдается большее значение магнитострикции насыщения, чем для состава с 27% содержанием. В то же время, согласно исследованиям [7], большим значением магнитострикции должен обладать образец с 27% содержанием галлия. Несоответствие результатов, возможно, связано с тем, что в исследуемых образцах направления кристаллической решетки не совпадают. Таким образом, при получении галфенола в качестве магнитострикционного материала важным является выбор направления кристаллизации.

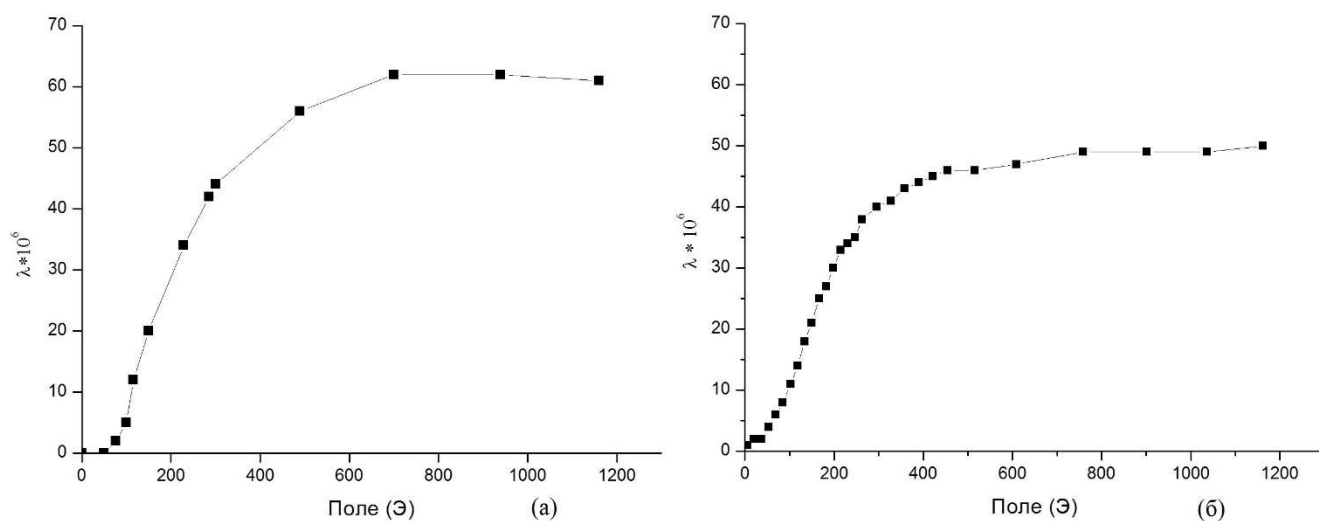


Рисунок 17. Графики зависимости магнитострикции от внешнего магнитного поля а) Fe_{75.2}-Ga_{24.8}; б) Fe₇₃-Ga₂₇.

Сравнивая графики зависимости магнитострикции и намагниченности от внешнего магнитного поля можно заметить, что магнитострикция достигает насыщения раньше, чем намагниченность. (500 Э и 3500 Э) (Рис. 14, 17) Насыщение магнитострикции при малой напряженности внешнего магнитного поля является важной особенностью галфенола.

3.4 Результаты измерений транспортных свойств.

Исследовалась зависимость электрического сопротивления образца галфенола $\text{Fe}_{72.7}\text{-Ga}_{27}\text{-Tb}_{0.3}$ от внешнего магнитного поля. Для каждого значения магнитного поля было проведено 100 измерений значения электрического сопротивления (при двух направлениях тока через образец). Итоговое значение получалось путем усреднения проведенных измерений. Результаты данного эксперимента представлены на графике. (Рис. 18) Сопротивление образца = 325.25 ± 0.35 мкОм.

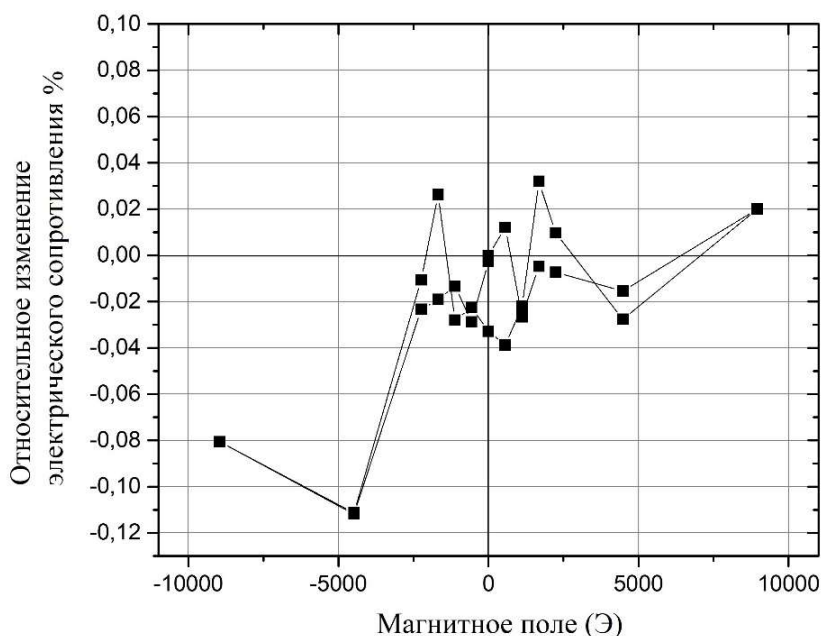


Рисунок 18. График зависимости относительного изменения электрического сопротивления образца галфенола от величины напряженности магнитного поля. Температура образца 77.4К

Из графика видно, что магнитосопротивление образца галфенола не вносит существенный вклад в общее электрическое сопротивление материала. Было зарегистрировано максимальное отклонение 0.1% от начальной величины сопротивления, что не выходит за рамки предела погрешности измерений, который рассчитывался по формуле для косвенных измерений.

Основные результаты.

1. Были исследованы магнитные свойства серии образцов галфенола с различным составом. Получены полевые и температурные зависимости намагниченности. Для всей серии образцов наблюдается схожий магнитномягкий характер кривых намагничивания. Получены зависимости магнитострикции в продольной геометрии относительно внешнего магнитного поля. Показано, что магнитострикция достигает насыщения при меньшем магнитном поле, чем намагниченность.
2. В работе показано, что для использования галфенола в качестве магнитострикционного материала необходимо учитывать не только состав, но и направление вдоль которого магнитострикция будет измеряться, так как при небольшом изменении стехиометрии магнитные свойства галфенола могут значительно измениться.
3. Магниторезистивные свойства галфенола не делают существенный вклад в электрическое сопротивление материала. По результатам эксперимента изменение электрического сопротивления во внешнем магнитном поле не было обнаружено в условиях наблюдения.

Список литературы

- [1] A.E. Clark, K.B. Hathaway, M.Wun-Fogle, J.B. Restorff, T.A. Lograsso, V.M. Keppens, G. Petculescu, R.A. Taylor, *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 8621–8623.
- [2] T. Ueno, E. Summers, M. Wun-Fogle, T. Higuchi, *Sensors Actuators A* 148 (2008) 280-284.
- [3] A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso, and D. L. Schlagel, *IEEE Trans. Magn.* 36, 3238 (2000).
- [4] Bridgman, Percy W. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.* 60 (6): 305–383. (1925).
- [5] Joule, J. P. On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars. *Philos. Mag.* 30, 76–87 (1847).
- [6] Yanning Zhang and Ruqian Wu *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 10, OCTOBER (2011)*
- [7] Q. Xing, Y. Du, R.J. McQueeney, T.A. Lograsso, *Acta Mater.* 56 (2008) 4536–4546.
- [8] N. Srisukhumbowornchai and S. Guruswamy *Journal of Applied Physics* 92, 5371 (2002);
- [9] I.S. Golovin, A.M. Balagurov, V.V. Palacheva, I.A. Bobrikov, V.B. Zlokazov *Materials and Design* 98 (2016) 113–119
- [10] I.S. Golovin, V.V. Palacheva, A.I. Bazlov, J. Cifre, N. Nollmann, S.V. Divinski, G. Wilde, *JALCOM* 656 (2016) 897–902.
- [11] A.M. Balagurov, I.A. Bobrikov, I.S. Golovin, V.V. Cheverikin, S.A. Golovin *Materials Letters* 181 (2016) 67–70
- [12] V.V. Palacheva, A. Emdadi, F. Emeis, I.A. Bobrikov, A.M. Balagurov, S.V. Divinski, G. Wilde, I.S. Golovin *Acta Materialia* 130 (2017) 229-239
- [13] Harsh Deep Chopra, Manfred Wuttig, *Nature* 521 (2015) 340–343.
- [14] Summers, Eric M.; Lograsso, Thomas A.; Snodgrass, Jonathan D.; and Slaughter, Julie C., *Ames Laboratory Conference Papers, Posters, and Presentations. Paper 59.* (2004)
- [15] Yoanh Espinosa-Almeyda, Héctor Camacho-Montesa, Gerardo Gabriel Nava-Gómez, Boris Jesús, Mederos Madrazo, Raúl Guinovart-Díaz and Juan Carlos López-Realpozob *Math. Meth. Appl. Sci.* (2016)

[16] А.А. Буш, К.Е. Каменцев, В.Ф. Мещеряков, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Л.Ю. Фетисов Журнал технической физики, (2009), том 79, вып. 9

[17] 11. С. В. Вонсовский, Магнетизм, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», стр. 925-940, (1971)