

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И МОРФОЛОГИИ
ТРЕХСЛОЙНЫХ Fe/ПОЛИМЕР/Fe ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ»**

Выполнил студент

219М группы:

Макаров Андрей Владимирович

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Шальгина Елена Евгеньевна

Допущена к защите 25 мая 2018 года

Зав. кафедрой магнетизма

профессор Перов Н. С.

Москва

2018

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Литературный обзор	8
1.1 Молекулярное строение полидифениленфталида	8
1.2 Макромолекулярная структура плёнок ПДФ	9
1.3 Эффект переключения в тонких плёнках ПДФ	11
1.4 Особенности эффекта переключения в тонких плёнках ПДФ под влиянием состояния прилегающего электрода	17
1.5 Природа высокопроводящего состояния в плёнках ПДФ	21
Глава 2. Образцы и методика проведения экспериментов	24
2.1 Изучаемые образцы	24
2.2 Атомная силовая микроскопия	25
2.3 Методика измерения магнитных характеристик трёхслойных Fe/ПДФ/Fe образцов	26
2.4 Классификация магнитооптических методов	27
2.5 Характеристики магнитооптических методов	28
2.6 Магнитооптическая установка	29
Глава 3. Полученные результаты и их обсуждение	34
Глава 4. Выводы	46
Список литературы	48

Список сокращений и обозначений

АФ – антиферромагнитный

АСМ – атомный силовой микроскоп

МСМ – магнитный силовой микроскоп

M – намагниченность

ТПМС - тонкопленочные магнитные структуры

КРЭ – квантовые размерные эффекты

РККИ – Рудерман, Киттель, Касуя, Иосида

H_s – поле насыщения

H_c – коэрцитивная сила

QWSs – Quantum Well States (дискретность энергетических уровней в пленке)

ГМС – гигантское магнетосопротивление

МЭМС – микроэлектромеханические системы

ОЛН – ось легкого намагничивания

ОТН – ось трудного намагничивания

Ф – ферромагнитный

Fe1 – нижний слой железа

Fe2 – верхний слой железа

Введение

Электропроводящие полимеры, созданные в конце XX века, обратили на себя внимание исследователей благодаря разнообразию их механических и оптических свойств, а также высокой проводимости. В связи с тем, что эти полимеры способны изменять свойства при слабых внешних воздействиях, они могут быть применены для создания на их основе функциональных элементов в устройствах микроэлектроники. Более того, полимеры помогают глубже понять природу высокой проводимости в неметаллических средах.

Для того, чтобы полимер проявлял высокую проводимость, необходимо наличие, с одной стороны, обеспечение возможности переноса заряда, а с другой, наличие большого количества свободных носителей заряда, что вытекает из соотношения между силой тока I и напряжением U :

$$I = en\mu U$$

где e - заряд электрона, n - концентрация носителей заряда, μ - подвижность носителей заряда.

В электропроводящих полимерах проблема переноса заряда была решена путём создания макромолекулярной структуры, имеющей сопряжённые связи между отдельными молекулами. Ниже на рисунке 1 для иллюстрации приведены такие полимеры:

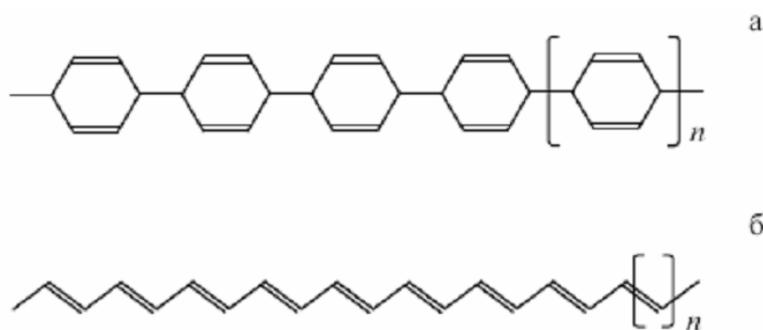


Рис. 1. Электропроводящие полимеры: полифенилен (а), полиацетилен (б)

Увеличение количества свободных зарядов в указанных выше соединениях создавалось допированием полимера низкомолекулярными веществами (допантами), например, йодом [1, 2].

Последующий прогресс в области исследования электропроводящих полимеров привёл к обнаружению необычных полимеров, названных электроактивными, которые проявляли высокую проводимость при определённых условиях, но не обладали ни сопряжёнными связями, ни допантами. Причём переход между электропроводящим и неэлектропроводящим состоянием осуществлялся резко, подобно фазовому переходу.

Наиболее интересным среди таких полимеров оказался полидифениленфталид из класса полиариленфталидов. Электроактивный полимер (полидифениленфталид – ПДФ) был синтезирован в 1983 году. При нормальных внешних условиях ПДФ представляет собой диэлектрик с запрещенной зоной (4.3 эВ) и без сопряженных связей. Результаты исследований, проведенные в последнее время, свидетельствовали о способности полимеров переходить из низкопроводящего состояния в высокопроводящее, инициируемого различными внешними воздействиями, в частности температурой, электрическим полем и давлением. Изменение граничных условий на интерфейсе металл/полимер также сопровождалось изменением проводимости полимера. В частности, переход в состояние высокой проводимости наблюдался при плавлении электрода, при изменении его магнитного состояния и структуры. Этот переход был объяснён модификацией конфигурации молекулы полимера, сопровождаемой появлением электронных состояний в запрещённой зоне.

Проводимость полимера в высокопроводящем состоянии близка к металлической и имеет сильно выраженную анизотропию. В частности,

проводимость вдоль направления, перпендикулярного плоскости, на 12 порядков больше, чем проводимость вдоль плоскости. В связи с этими особенностями ПДФ и гетероструктуры, содержащие ПДФ, представляют теоретический интерес, поскольку они помогают понять природу проводимости в полимерах. Кроме того, разработка новых устройств для микроэлектроники способствует расширению практического применения полимеров [3, 4].

В целом анализ существующих данных показал, что к настоящему времени получен достаточно большой объем данных о физических свойствах ПДФ, но практически отсутствует информация о влиянии полимера, входящего в состав композитных многослойных магнитных систем, на их физические свойства. С этой точки зрения наибольший интерес представляют трехслойные образцы, состоящие из двух ферромагнитных (ФМ) слоев и промежуточного слоя ПДФ.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование структурных и магнитных свойств, а также магнитополевого поведения трёхслойных Fe/ПДФ/Fe систем.

В рамках проводимых исследований были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование морфологии поверхности изучаемых трёхслойных Fe/ПДФ/Fe образцов;
2. Изучение магнитных характеристик и анализ особенностей магнитополевого поведения Fe/ПДФ/Fe образцов;
3. Исследование зависимости магнитных характеристик Fe/ПДФ/Fe образцов от толщины магнитных и немагнитных слоёв.

Достоверность результатов

Измерения были проведены на современном оборудовании с применением современных методов обработки полученных данных. Достоверность полученных результатов обеспечивалась современными экспериментальными методиками, взаимодополняющими друг друга.

Положения, выносимые на защиту

1. Различие локальных приповерхностных значений поля насыщения не превышает 10%.

2. С ростом толщины верхнего магнитного слоя средняя шероховатость поверхности образцов уменьшается;

3. При малых значениях t_{Fe} на поверхности образцов наблюдается полосовая доменная структура, а при больших значениях t_{Fe} – хаотическое распределение намагниченности.

4. Петли гистерезиса в магнитном поле, приложенном параллельно направлениям D1 и D2, различаются, что свидетельствует о наличии магнитной анизотропии в изучаемых образцах.

5. Значение поля насыщения и коэрцитивной силы при одинаковой толщине магнитных слоев уменьшается с увеличением толщины промежуточного ПДФ слоя.

Научная новизна

Впервые изучены магнитные характеристики Fe/ПДФ/Fe трехслойных тонкопленочных систем. Обнаружена зависимость поля насыщения изучаемых образцов от направления приложенного поля и толщины магнитных слоёв.

Обнаружено влияние полимерной прослойки на магнитное поведение изучаемых систем.

Полученные результаты расширяют знания о ферромагнитных системах с полимерной прослойкой.

Практическая значимость работы

Данная работа расширяет информацию о сложных ферромагнитных системах. Полученные экспериментальные данные могут быть полезны при синтезе тонкопленочных магнитных систем, состоящих из чередующихся магнитных и полимерных слоев, а также при разработке устройств микроэлектроники.

Личный вклад автора

Данные, приведённые в диссертации, автор получил самостоятельно в ходе проведения исследований на вибрационном и магнитооптическом микромагнитометрах. Измерения на атомно-силовой микроскопе были выполнены в Центре Коллективного Пользования (ЦКП) физического факультета МГУ под руководством старшего научного сотрудника Т.П. Каминской. Кроме того, на основе прочитанных и проанализированных статей был написан литературный обзор по теме диссертации. Автор принимал участие в обсуждении и подготовке научных публикаций.

Апробация работы и публикации

Автор представлял результаты по теме диссертационной работы на российских и международной конференциях: MISM 2017, Ломоносовские чтения 2017, Ломоносовские чтения 2018.

По результатам работы опубликованы работы:

Тезисы докладов:

1. Макаров А.В., Харламова А.М. // Исследования магнитных свойств тонкопленочных трехслойных систем Fe / Полидифениленфталид /

- Fe // Сборник тезисов докладов XXIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ»–2017 // с.599–600.
2. Shalygina E.E., Kharlamova A.M., Makarov A.V., Vorobieva N.V., Lachinov A.N. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017) // p. 265.
 3. Макаров А.В., Харламова А.М. // Исследования структурных и магнитных свойств тонкопленочных трехслойных систем Fe / Полидифениленфталид / Fe // Сборник тезисов докладов XXV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ»–2018 // с.488–490.

Статьи:

1. Shalygina E.E., Kharlamova A.M., Makarov A.V., Vorobieva N.V., Lachinov A.N. // Peculiarities of the magnetic properties of thin-film three-layer Fe / Poly (diphenylene phthalide) / Fe systems // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, T.450, с. 328-330.
2. Е.Е. Шалыгина, А.М. Харламова, А.В. Макаров, Т.П. Каминская, А.Н. Шалыгин «Особенности структурных свойств и магнитополевого поведения тонкопленочных трехслойных Fe/полидифениленфталид/Fe-систем» Физика твердого тела, 2018, том 60, вып. 9 (online август 2018).

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Молекулярное строение полидифениленфталата

Молекула полидифениленфталата состоит из нескольких фрагментов, которые по-разному себя проявляют в тех или иных электрофизических процессах. Свойства полимера являются суперпозицией свойств составляющих его подсистем. Полимерные цепи ПДФ состоят из углеводородного ароматического каркаса полимера – бифенилена, бокового фрагмента – фталидного цикла, а также концевых и дефектных групп в виде антрахионовых и антроновых структур:

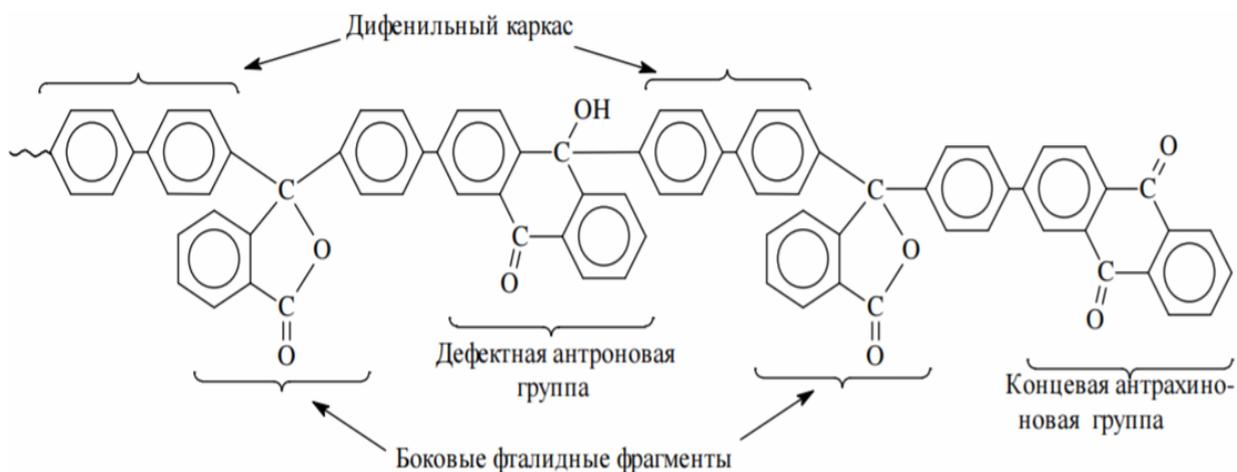


Рис. 2. Структура молекулы полидифениленфталата [5]

Для определения типа взаимодействия молекулы полимера и электрона, необходимо знать значение его электронного сродства. В таблице 1 приведены расчётные значения сродства к электрону соединений, моделирующих фрагменты молекулы полидифениленфталата в различных растворителях (см. работу [6]). Фрагменты полимера, в соответствии с этими данными, являются акцепторами. Различные фрагменты ПДФ в зависимости от значения электронного сродства акцептируют электроны в следующей последовательности: антрахионовые концевые группы, антроновые дефектные группы, фталидные фрагменты.

Таблица 1

Расчетные величины сродства к электрону (эВ) фталид- (ди(бифенил)фталид (ДБФ), антрахинон- (АН и АН1) и антронсодержащих (АТ) соединений, модельных для ПДФ. (Вертикальное сродство к электрону, адиабатическое сродство к электрону, сродство к электрону в растворителе ДМСО (диметилсульфоксид), сродство к электрону в растворителе ДМФА (диметилформамид), сродство к электрону в плёнке ПДФ).

Сродство	АН	АН1	АТ	ДБФ	АН1* ^T
$E_{A_{ver}}$	1.59	1.81	1.01	0.50	4.16
$E_{A_{ad}}$	1.86	2.05	1.31	0.82 [1.34]	4.34
$E_{A_{ДМСО}}$	3.77	3.85	3.20	2.75 [3.58]	5.85
$E_{A_{ДМФА}}$	3.76	3.84	3.18	2.73 [3.56]	5.84
$E_{A1_{ПДФ}}$	—	2.42	1.67	1.17 [1.71]	4.70

1.2 Макромолекулярная структура плёнок ПДФ

Для понимания причин появления различных эффектов в ПДФ и особенностей систем, состоящих из указанного полимера, целесообразно рассмотреть вопрос о макромолекулярной структуре ПДФ, то есть об организации расположения макромолекул между собой и их формы, а также наличии ассоциатов¹ макромолекул.

В работе [7] было проведено теоретическое исследование молекулярного и надмолекулярного строения полидифениленфталида.

1. **Ассоциация** – объединение простых молекул или ионов в более сложные, не вызывающее изменения химической природы вещества. Различают ассоциацию ионов и ассоциацию молекул. Образование ионных **ассоциатов** основано на проявлении электростатических сил. Простейшие ионные ассоциаты состоят из двух или трех ионов и представляют собой нейтральные или заряженные частицы.

Результаты квантово-химического моделирования показали, что в процессе геометрической оптимизации наблюдается переход линейной изотактической конфигурации в синдиотактическую.

Было установлено, что энергетически наиболее выгодными конфигурациями макромолекул являются линейная синдиотактическая и спиральная изотактическая. Их поперечные размеры составляют 1,51 нм и 2,46 нм, соответственно. Были также проведены исследования с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ) для выяснения конфигураций в плёнках ПДФ. Оказалось, что в толстых плёнках (толщина более 100 нм) наблюдаются эллипсоидальные ассоциаты макромолекул диаметром 40–100 нм и длиной 20–40 нм. При толщине плёнок менее 100 нм участки с подобным надмолекулярным строением выявить не удалось. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что в объёме полимерной плёнки макромолекулы принимают глобулярную изотактическую конфигурацию, образуя ассоциаты, а в приповерхностных слоях макромолекулы принимают линейную синдиотактическую конфигурацию. Данное различие может объяснять разные электрофизические свойства плёнок ПДФ нанометровой толщины и плёнок толщиной более 100 нм.

В работе [8] были более подробно изучены особенности макромолекулярной структуры многослойной полимерной плёнки. Исследования проводились методом малоуглового нейтронного рассеяния в сочетании с методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для исследования методом малоуглового нейтронного рассеяния образцом служила структура, состоящая из 1000 тонких плёнок ПДФ толщиной порядка 1 нм. Для исследования методом АСМ изготавливались полимерные плёнки на полированных подложках из нержавеющей стали.

Методом малоуглового нейтронного рассеяния было установлено, что основной вклад в рассеяние вносят неоднородности с радиусом 110 нм. При

этом неоднородности с радиусом 28 нм вносят намного меньший вклад.

Метод атомно-силовой микроскопии показал, что структурные элементы полимерной плёнки имеют форму плоских эллипсоидов с характерным диаметром порядка 100 нм, толщиной 15 – 20 нм, шириной (с учётом малоуглового нейтронного рассеяния) 28 нм. Было сделано предположение, что зёрна внутри плёнки представляют собой ассоциаты макромолекул полимера в растворе.

В целом результаты исследований свидетельствовали о наличии двух типов макромолекулярного упорядочения в объёме полимера. При толщине плёнок более 100 нм молекулы полимера образуют ассоциаты диаметром порядка 100 нм, толщиной 15 – 20 нм и шириной 28 нм, распределённые в объёме плёнки. Тонкие плёнки и приповерхностные слои полимера толщиной менее 100 нм обладают линейным упорядочением молекул, что обуславливает их особые свойства, например такие, как спонтанная поляризация [9], металлоподобная проводимость поверхностных слоёв [10].

1.3. Эффект переключения в тонких плёнках ПДФ

Многочисленные исследования, проведенные на сегодняшний день, свидетельствуют о способности полимеров переходить из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, активируемого различными внешними воздействиями, в частности, давлением, электрическим полем, изменением свойств прилегающего к плёнке ПДФ электрода.

Работа [11], опубликованная в 1990 году, была одна из первых, в которой были представлены результаты, подтверждающие наличие высокопроводящего состояния. Авторы изучали влияние давления на плёнки полидифениленфталида толщиной 0,3 мкм, нанесённые на поверхности различных металлических электродов. Измеренная

зависимость силы тока от приложенного к плёнке избыточного давления (превышающего атмосферное) свидетельствовала о значительном изменении проводимости (на 11 порядков с 10^{-14} до 10^{-3} Ом $^{-1}$ •см $^{-1}$) при достижении давления, равного $1,1 \cdot 10^5$ Па. При этом особого внимания заслуживало обнаружение неустойчивости высокопроводящего состояния в электрическом поле. Диапазон напряжений, при которых происходит переход, был равен 2 – 5 В. Для объяснения этого результата была использована модифицированная модель Мотта.

Впоследствии совместное влияние давления на электрические характеристики полимера при различном приложенном электрическом поле исследовалось в работе [12]. В качестве образцов использовались структуры металл-полимер-металл с толщиной полимерной прослойки 1000 Ангстрем. К образцу было приложено давление и электрическое поле. Измерение зависимостей тока от давления показало наличие перехода в высокопроводящее состояние (ВПС) при давлении, равном примерно 0,4 МПа и в диапазоне напряжений 3–5 Вольт. Были также измерены вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов. Было обнаружено, что структуры, к которым не прикладывалось дополнительное давление, обладали нелинейной бистабильной ВАХ с экспоненциальным возрастанием тока $I = \exp(U^n)$, $n = 1 - 0,5$ при малых напряжениях. Такая зависимость была объяснена токами, ограниченными пространственным зарядом, а также Шоттки или Пула-Френкеля механизмом. Приложенное давление изменяет ВАХ. В результате начальная проводимость растёт и n стремится к 1. Когда давление достигает критического значения, равного 0,4 МПа, ВАХ, как у проводника, становится линейной. Дальнейшее увеличение давления не меняет вид ВАХ. Было также обнаружено, что повышение электрического поля увеличивает значение тока в ВПС и уменьшает пороговое давление.

Более подробное исследование ВАХ в предпереходной области для выяснения причин влияния электрического поля на характеристики перехода в ВПС было проведено в работе [13]. Для этой цели измерялись ВАХ образцов различной толщины при различном давлении, приложенном к образцу. Анализ ВАХ с использованием модели инжекционных токов позволил авторам рассчитать параметры носителей заряда (см. таблицу 2).

Таблица 2

Влияние одноосного давления на некоторые параметры инжекционной модели

$P \cdot 10^3, \text{Pa}$	$\mu \cdot 10^{-9}, \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$n_0 \cdot 10^{20}, \text{m}^{-3}$	U_1, V	U_{lf}, V	$p_{t,0} \cdot 10^{21}, \text{m}^{-3}$	θ
780	1.39	3.68	6.14	8.13	1.37	0.36
820	1.65	2.41	5.55	9.18	1.52	0.26
860	1.77	2.18	5.22	10.68	1.79	0.25

Анализ зависимости приведенных выше параметров от давления показал, что инжектированный заряд возрастает при увеличении приложенного давления и электрического поля. При определённой величине объёмной плотности инжектированного заряда в полимере возникает зона ловушек в запрещённой зоне, по которой переносится заряд, что и приводит к переходу полимера в высокопроводящее состояние.

В более ранних работах было обнаружено, что выше некоторой критической толщины полимерной плёнки, $t_{кр}$, перестаёт наблюдаться эффект переключения проводимости, активируемый малым давлением. Для понимания этого эффекта, было проведено сравнение особенностей транспорта носителей заряда и характера переноса заряда в плёнках ПДФ с толщиной меньше и больше критической [14]. Для этой цели были измерены и проанализированы зависимости дрейфовой подвижности носителей заряда от механического давления. В качестве образцов использовались слоистые структуры электрод/ПДФ/электрод. Толщина

прослойка ПДФ составляла 1 – 9 мкм. Измерения проводились путем регистрации времени пролёта заряда. Было обнаружено, что транспорт носителей заряда в случае толстых плёнок (больше 5 мкм) является недисперсионным, а в случае тонких плёнок – дисперсионным. Кроме того, при нормальных условиях в тонкой прослойке ПДФ наблюдалась дырочная проводимость, а при наличии механического одноосного давления выше определённого значения – электронная. Полученные результаты были объяснены возникновением электронно-дырочных пар вблизи электрода и формированием проводящих каналов между электродами при приложении давления.

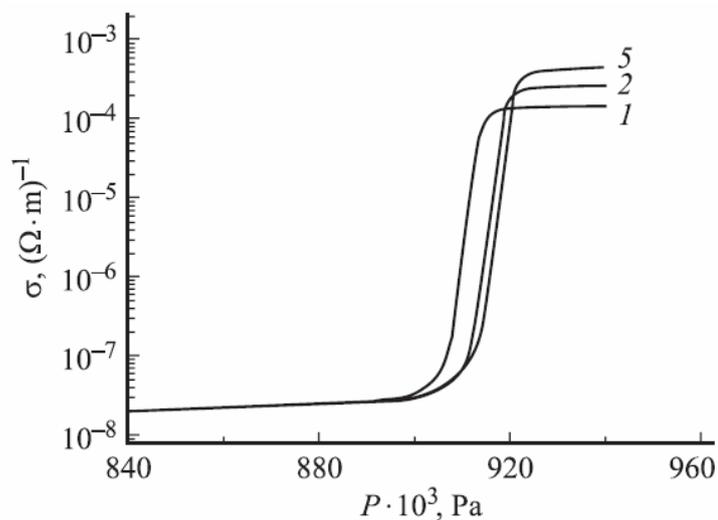


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости полимерной плёнки от величины одноосного давления P (величина давления соответствует избыточному относительно атмосферного). Цифры у кривых – значения электрических напряжений, приложенных к плёнке (в V).

В работе [15] было изучено влияние электрического поля без дополнительно приложенного давления на перенос заряда в тонких плёнках полидифениленфталида и на параметры носителей заряда. Для этого были измерены зависимости термостимулированного тока (ТСТ) от температуры при скорости нагревания 10 К/мин и различных напряжениях на образце.

Образец был изготовлен в виде трёхслойной структуры металл/ПДФ/металл. В качестве металла был использован алюминий, а в качестве полимерной прослойки – полимер ПДФ толщиной 1 мкм.

При увеличении напряжения был обнаружен сдвиг пиков ТСТ в область низких температур, свидетельствующий об уменьшении энергии активации ловушек, а также увеличение пика ТСТ. При объяснении этого результата была использована модель Френкеля-Пула и модель термоэлектронной эмиссии Шоттки, позволившие рассчитать коэффициенты этих процессов, которые практически совпали с полученными теоретически. Это свидетельствовало о влиянии полевых эффектов на проводимость полимера. Предполагалось, что помимо давления и электрического поля активировать высокопроводящее состояние полимера может нагрев. В работе [16] было исследовано термостимулированное переключение в высокопроводящее состояние. Было проведено измерение зависимости тока, проходящего через структуру металл-полимер-металл от температуры. Было найдено, что при 190^oC в структурах с толщиной прослойки меньше, чем 500 мкм, возникают небольшие колебания значения тока, а при температуре 265^oC величина тока возрастает на несколько порядков. Причём скорость нагревания также играла роль. В частности, при слишком медленном нагревании эффект не наблюдался. При объяснении этого факта было высказано предположение об изменении структурной конфигурации молекулы полимера.

Дополнительные исследования, проведённые в [17], были направлены на измерении термостимулированных токов (ТСТ) и токов термостимулированной деполяризации (ТСД). Было обнаружено несоответствие между токами ТСТ и ТСД в указанном выше интервале температур, причиной которого, по мнению исследователей, является

ионизация электронных состояний, находящихся вне молекул полимера, которая приводит к увеличению концентрации объёмного заряда в полимерной прослойке. При концентрации выше некоторой пороговой величины полимер переходит в высокопроводящее состояние. В результате можно утверждать, что объёмная термоионизация электронных ловушек также как и инжекция заряда из электрода приводит к переключению из низкопроводящего состояния в высокопроводящее.

В работе [18] было обнаружено, что атмосфера, в которой находится полимер, влияет также на его электрофизические характеристики. Фактически была исследована подвижность дырок в различных условиях, а именно в инертной атмосфере и в воздухе. Подвижность определялась из вольтамперных характеристик и методом экстракции носителей заряда линейно растущим полем¹. Измерения были выполнены на ИТО/PEDOT/ПДФ/TPD/Al (ИТО - оксид индия-олова, PEDOT - комплекс поли-(3, 4-этилендиокситиофена) и полистирол-сульфоновой кислоты, TPD - производный дифенилдиамина), образцах, в структуре которых проводимость обусловлена только транспортом дырок. Было установлено, что ВАХ, измеренная в воздухе, является более пологой. Подвижность дырок в инертной атмосфере в 3 раза больше подвижности дырок в воздухе.

1. ЭКСТРАКЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА – ЭНЗ (от лат. *extractio* – извлечение) – обеднение полупроводника (диэлектрика) носителями заряда благодаря их вытягиванию в контакт с металлом или др. полупроводником.

ЭНЗ – явление, противоположное *инъекции носителей заряда*. ЭНЗ происходит, когда внешнее электрическое поле совпадает по направлению с полем приконтактного потенциального барьера, что приводит к увеличению его высоты и преобладанию в области барьера дрейфовых потоков над диффузионными.

Для проверки правильности значений подвижности, рассчитанных из анализа вольтамперных характеристик, был использован метод экстракции носителей заряда линейно растущим полем. Результаты, полученные разными методами, хорошо согласовывались.

В целом зависимость между концентрацией носителей заряда и подвижностью свидетельствовала о влиянии дополнительных механизмов в воздухе, отсутствующих в инертной атмосфере. Таким образом, было установлено, что на транспорт дырок существенное влияние оказывает среда, в которой находится образец.

1.4. Особенности эффекта переключения в тонких плёнках ПДФ под влиянием состояния прилегающего электрода

Электрофизические характеристики полимера также зависят от характеристик потенциального барьера на границе металл/полимер [19] и соответственно от состояния металлического электрода, примыкающего к прослойке из полимера.

Электронное переключение в структуре металл/полимер/металл, вызванное фазовым переходом в металлическом электроде (плавлением) исследовалось в работе [20]. Полимерной прослойкой служила плёнка полидифениленфталида толщиной $\approx 0,8 - 1$ мкм. Металлический электрод, подвергающийся плавлению, был изготовлен из индия, имеющему температуру плавления 429 К (156 градусов Цельсия). Были измерены зависимости тока, протекающего через структуру, от температуры. Оказалось, что до 415 К ток близок к нулю, при температуре 415 – 429 К (область предплавления индиевого электрода) возникают флуктуации тока, а при $T = 429$ К ток резко возрастает. ВАХ, измеренные при различных температурах, также показали падение сопротивления при температуре, равной 429 К. График зависимости $\ln(I/T^2)$ от величины $1/T$ показал, что до

423 К основным механизмом переноса заряда служит термоэлектронная эмиссия. Выше 423 К меняется характер зависимости, что свидетельствует об изменении механизма переноса заряда через структуру. Проведённые расчёты показали, что вблизи температуры плавления электрода изменяется электронная работа выхода индия. Помимо этого, в запрещённой зоне полимера в результате эмиссии заряда формируется узкая проводящая зона. Эти обстоятельства приводят к значительному изменению проводимости структуры. Однако это объяснение результатов, полученных при исследовании влияния плавления электрода на проводимость структуры металл-полимер-металл, оказалось не очень убедительным, так как переход в ВПС мог быть результатом протекания металла через полимерную плёнку. Предполагалось, что было бы целесообразнее исследовать фазовый переход 2 рода в металлическом электроде, в частности, изменение кристаллической структуры и изменение магнитного порядка.

В [21] были проведены исследования влияния изменения структуры нанокристаллического металла на электрофизические свойства полимера. Была измерена зависимость электропроводности трёхслойной структуры ванадий/полимер/нанокристаллический металл от температуры. В качестве полимера использовался полидифениленфталид. Толщина полимерной прослойки составляла 0,5–1 мкм. В качестве электродов были выбраны медь и никель с нанокристаллической структурой. Было обнаружено наличие высокопроводящего состояния в интервале температур, соответствующему переходу металлов из нанокристаллического состояния в крупнозернистое. При многократном нагреве и последующем охлаждении происходила релаксация состояния металла, и одновременно уменьшался заряд, протекающий через структуру.

Электрическое поле также оказывало влияние на структуру. При увеличении напряжения выше 0,1 В наблюдалось резкое изменение

протекающего заряда, что свидетельствовало о роли инжекционного механизма на проводимость структуры. При объяснении влияния структурного перехода в металлическом электроде, примыкающего к полимерной прослойке, было сделано предположение о скачкообразном изменении в металле электронной работы выхода и соответствующим ему увеличению инжектируемого заряда при изменении кристаллической структуры электрода.

Влияние постоянного магнитного поля на потенциальный барьер контакта ферромагнетик/полимерный изолятор было проанализировано в работе [22]. Были обнаружены изменения энергии магнитной подсистемы и релаксационные процессы, которые ведут к деформации электростатического потенциального барьера. Были измерены зависимости тока от магнитного поля. Объектом исследования была структура медь/полидифениленфталид. Толщина полимерной плёнки была равна 0,8 мкм. Было обнаружено резкое изменение сопротивления структуры металл/полимер при приложении магнитного поля и давления. В частности, сопротивление изменялось на 6–8 порядков в магнитном поле, равном 0,1 – 0,5 Тесла. При уменьшении магнитного поля и возвращении в начальное состояние наблюдался небольшой гистерезис. В зависимости от начального состояния структуры сопротивление либо повышалось, либо уменьшалось при достижении критического магнитного поля.

Эффект влияния магнитного поля был объяснен изменением потенциального барьера на границе ферромагнитный металл/полимер. В работе [23] проведены оценки величины изменения барьера. Величина изменения потенциального барьера была рассчитана путем сравнения величины токов в различных состояниях. Было найдено, что она составляет порядка 0,01 эВ.

Поскольку на переход в высокопроводящее состояние оказывает

влияние не только инжекция заряда из электрода, но также активация ловушек, целесообразно было исследовать характеристики ловушек и их плотность. В работе [24] было проведено исследование электрически активных дефектов в плёнках полидифениленфталида. Параметры дефектов определялись методами термоактивационной спектроскопии, а именно, термостимулированной деполяризации (ТСД) и термостимулированной релаксации поверхностного потенциала (ТСРПП). Использовались два типа образцов: многослойная система с медными электродами и прослойкой ПДФ толщиной 1,5 мкм и свободная плёнка полимера толщиной 50 мкм. В режиме короткого замыкания структуры типа "сэндвич" было обнаружено 2 релаксационных процесса: низкотемпературный (25–30°С) и высокотемпературный (140-145°С). Рассчитанные энергии активации процесса релаксации заряда были равны 0,43 эВ и 0,64 эВ, соответственно. Исследования свободных плёнок, заряжавшихся в поле коронного разряда (*при коронном разряде ионизационные процессы происходят только вблизи коронирующего электрода*), было также обнаружено 2 релаксационных процесса. Причём энергия активации низкотемпературного процесса совпадала с энергией активации многослойной системы, тогда как энергия активации высокотемпературного процесса зависела от знака коронного разряда: $E(\text{акт}) = 0,62 \text{ эВ}$ (заряженные отрицательным зарядом) и $E(\text{акт}) = 0,71 \text{ эВ}$ (заряженные положительным зарядом). Полученные результаты свидетельствовали о том, что в плёнках ПДФ в диапазоне температур 0 – 250°С наблюдаются три релаксационных процесса, а именно, ориентация полярных групп $E(\text{акт}) = 0,42 \text{ эВ}$, опустошение электронных ловушек $E(\text{акт}) = 0,62 \text{ эВ}$ и опустошение положительных носителей заряда $E(\text{акт}) = 0,71 \text{ эВ}$.

Таким образом, на основании вышеприведённых многочисленных

работ можно утверждать, что внешнее влияние оказывает сильное воздействие на свойства полимера и, в частности, на свойства носителей заряда. При определённых условиях полимер способен переходить в высокопроводящее состояние, проводимость которого намного превышает обычное состояние. Существует несколько механизмов перехода, в частности, инжекция электронов из прилегающего электрода и термоионизация ловушек, создающих объёмный заряд в полимере. Последнее состояние обратимо, но при переходе обратно наблюдается гистерезис. Требуемое воздействие для перехода достижимо экспериментально и невелико по сравнению с другими полимерами.

При изменении состояния электрода (кристаллической структуры, магнитного упорядочивания, агрегатного состояния), прилегающего к плёнке полимера, инжекционный механизм перехода полимера в высокопроводящее состояние, характеризующееся наличием узкой подзоны в запрещённой зоне, является основным. Однако до изменения состояния электрода проводимость структуры остаётся незначительной в силу наличия высокого потенциального барьера на границе металл/полимер. При изменении состояния электрода потенциальный барьер уменьшается, что приводит к переходу трёхслойной структуры в ВПС.

1.5. Природа высокопроводящего состояния в плёнках ПДФ

Экспериментальные исследования проводимости полимера ПДФ в высокопроводящем состоянии позволили выявить некоторые его характерные особенности. Было установлено, что проводимость полимера ПДФ по своему значению близка к металлической и имеет металлоподобную зависимость. В работах [25, 26] было найдено, что наличие анизотропии в высокопроводящем состоянии. В частности, проводимость перпендикулярно плоскости в 10^{12} раз превышала

проводимость в плоскости. Это свойство было объяснено наличием двух фаз в полимере: диэлектрической матрицы и проводящих каналов. Экспериментальные исследования [27], визуализировавшие проводящую структуру полимера, подтвердили это предположение. В этой же работе на основе модели протекания был вычислен диаметр каналов и их проводимость. Для объяснения возникновения ВПС состояния в работе [28] была предложена теория, согласно которой существуют две стабильные конфигурации молекулы полимера – невозбуждённая и возбуждённая с разорванной связью С—О (рис. 4). Молекула полимера при определённом воздействии на неё (например, электрическим зарядом), изменяет свою структуру и энергетическое состояние, превращаясь в молекулу, обладающую делокализованными электронами.

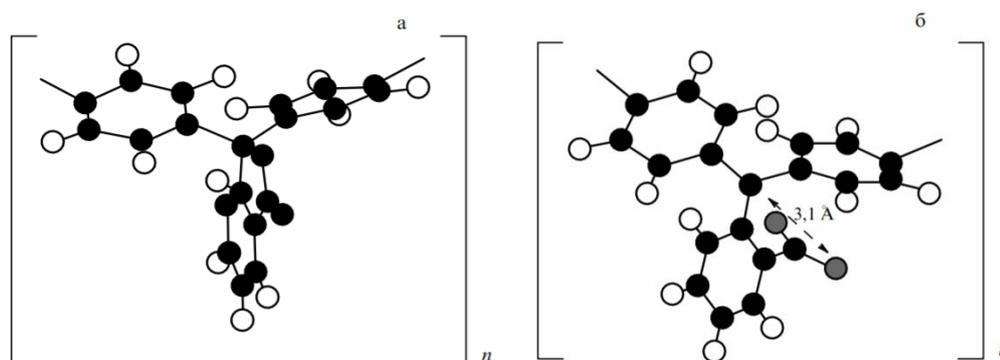


Рис. 4. Оптимизированная геометрия для двух различных случаев. (а) Нейтральная молекула в основном состоянии. (б) Молекула в состоянии с более высокой общей энергией, которое соответствует открытому лактонному (содержащему группировку $-C(O)-O-$) циклу на месте $-(CO_2)-$ в боковом бензольном кольце.

Результаты расчёта одной молекулы показали, что конфигурация с разорванной связью становится стабильной при захвате молекулой электрона (ионизации). Последующие экспериментальные исследования, описанные в [29], посвященные изучению взаимодействия низкоэнергетических электронов с фталидом, подтвердили эти расчёты. Оценки эффективного выхода отрицательных молекулярных ионов

подтвердили существование долгоживущей ионизованной молекулы с разорванной С – О связью. При увеличении количества изменённых молекул образуются делокализованные состояния, наблюдаемые как каналы проводимости, по которым течёт ток [4]. Это косвенно подтверждается результатами измерений ИК спектров, полученными в работе [16], которые подтверждали наличие пика, соответствующего возбуждению С--С связей, и, соответственно свидетельствовали об изменении структуры полимера.

Для выяснения природы высокопроводящего состояния в работе [16] был изучен инфракрасный спектр. Было найдено, что при температуре, равной 190°С и 265°С, происходит возбуждение С – С связей фенильного кольца (*Фенил – одновалентная группа*) бокового фталидного фрагмента, а при 190°С связей С – Н. Подобные возбуждения свидетельствовали о переходе молекулы в иное энергетическое состояние с другой структурной конфигурацией, причиной которого является захват электрона. При увеличении концентрации электронов увеличивается количество изменённых молекул. При определённой концентрации заряда формируется решётка поляронов, проводящая ток. В результате структура становится проводящей. Молекулы полидифениленфталида в основной конфигурации являются незаряженными. Энергетическая структура характеризуется широкой запрещённой зоной, равной 4,3 эВ. Вместе с тем в возбуждённом состоянии молекулы полидифениленфталида ионизованы за счет захваченного электрона и обладают изменённой длиной как внутримолекулярных, так и межмолекулярных связей. В результате возникают сопряжённые связи, по которым переносится заряд. На зонной диаграмме это выражается тем, что в запрещённой зоне возникают электронные состояния.

Глава 2. Образцы и методика проведения эксперимента

2.1 Изучаемые образцы

Полимерные ПДФ прослойки изучаемых образцов были получены с использованием метода центрифугирования. Для получения слоёв различной толщины использовались растворы полимера в циклогексаноне с различной концентрацией. Выбор концентрации определялся толщиной формируемой плёнки. Следует отметить, что полимерные растворы с концентрацией от 1 до 10 % позволяют получать полимерные плёнки толщиной от 5 нм до 1,3 мкм.

ПДФ имеет следующие свойства. В зависимости от условий синтеза, он обладает молекулярной массой порядка 50000-70000 g/mol. Средняя длина молекул 100–150 нм. Полимер является термостойким: температура размягчения ~ 360 °С, а температура разрушения ~ 440 °С. Полимер растворим в органических растворителях, таких как хлороформ, метилхлорид, циклогексанон и других. Это позволяет эффективно очищать его от примесей. ПДФ в обычном состоянии является диэлектриком и характеризуется следующими параметрами: ширина запрещённой зоны ~ 4.3 eV, первый потенциал ионизации ~ 6.2 eV.

Нижний и верхний слои железа (Fe1, Fe2) наносились соответственно на стеклянную подложку и полимерную прослойку методом вакуумного термодиффузионного напыления. Толщина Fe и ПДФ слоев (t_{Fe} и $t_{\text{ПДФ}}$) изменялась от 14 до 50 нм и от 10 до 35 нм, соответственно.

Толщина полимерных и Fe слоёв контролировалась с помощью микроинтерферометра МП-4М и атомно-силового микроскопа, соответственно.

2.2. Атомно-силовая микроскопия

Морфология поверхности тонкоплёночных Fe₁/ ПДФ /Fe₂ систем была изучена с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ). Измерения были выполнены на частоте 223 кГц с использованием кантилевера «Эталон».

Принцип работы атомно-силового микроскопа (АСМ) основан на регистрации силы взаимодействия острого зонда с радиусом закругления порядка десятков нанометров с поверхностью исследуемого материала. В отличие от сканирующей туннельной микроскопии АСМ позволяет исследовать свойства поверхностей и сколов как металлов и полупроводников, так и диэлектриков.

В основу работы АСМ положена зависимость энергии взаимодействия двух атомов посредством сил Ван-дер-Ваальса, находящихся на расстоянии r друг от друга, которую, как правило, аппроксимируют потенциалом Леннард-Джонса. Реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, но вид зависимости сохраняется. Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли (кантилевера) зондового датчика. АСМ способны регистрировать очень малые силы ($10^{-8} \dots 10^{-13}$ Н и меньше), характерные для межатомного взаимодействия. В специальных конструкциях АСМ регистрируемые значения силы достигают малых значений порядка 5×10^{-18} Н.

Атомно-силовой микроскоп зондирует поверхность образца тонкой иглой, длина которой составляет, как правило, несколько микрометров, а диаметр острия менее 10 нм. На рис. 2.1.схематически показан типичный зондовый датчик: 1 – кремниевый чип, кантилевер 2 и игла 3, которая

находится на свободном конце кантилевера.

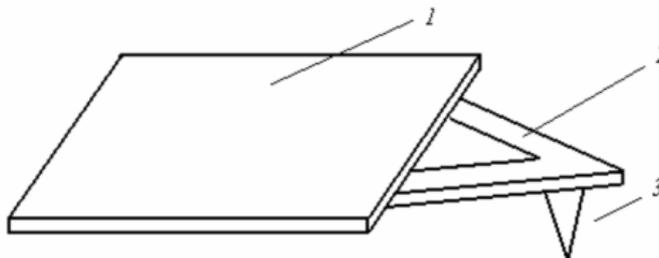


Рис. 5. Схематическое изображение кантилевера и зонда.

Силы взаимодействия между иглой и поверхностью образца заставляют иглу с кантилевером изгибаться. Специальный детектор регистрирует отклонение кантилевера при перемещении иглы вдоль поверхности образца или, как в данном случае, образца относительно иглы. Изменение положения кантилевера в процессе сканирования измеряют разными способами: интерферометрически, оптико-позиционной схемой, тензодатчиком.

Полученные АСМ изображения для изучаемых образцов обрабатывались с помощью математических операций и фильтров программы «Nova», разработанной изготовителями АСМ. Программа позволяет определять среднюю арифметическую шероховатость поверхности образцов R_a .

Особенности приповерхностной микромагнитной структуры (равновесного распределения намагниченности) $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов были исследованы с помощью магнитной силовой микроскопии (МСМ) с использованием кантилевера MFM 01 на частоте 55 кГц.

2.3. Методика измерения магнитных характеристик трёхслойных $Fe/ПДФ/Fe$ образцов.

Основными магнитными характеристиками тонких плёнок, определяющими их дальнейшее применение, являются намагниченность,

M_s , поле насыщения, H_s , и коэрцитивная сила, H_c . Исследования магнитных свойств были выполнены на магнитооптической установке и вибрационном магнитометре. При измерениях на магнитооптической установке использовался экваториальный эффект Керра. Экваториальный эффект Керра (ЭЭК) состоит в изменении интенсивности и сдвиге фазы Р-компоненты света, отражённого от исследуемого образца при его перемагничивании. В Р компоненте падающего света электрический вектор параллелен плоскости падения. В случае ЭЭК вектор намагниченности перпендикулярен плоскости падения света и параллелен поверхности образца.

В работе использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических сигналов. Преимущество данного метода заключается в том, что его применение позволяет устранить влияние колебаний источника света, влияние флуктуаций тока, и в силу того, что метод является дифференциальным, чувствительность его увеличивается по сравнению со статическим методом на 2-3 порядка, то есть, возможно измерение относительного изменения интенсивности отраженного света от перемагничиваемого образца вплоть до 10^{-5} .

2.4. Классификация магнитооптических методов

Намагниченный ферромагнетик, помещенный во внешнее магнитное поле, обнаруживает свойства двойного кругового и линейного двупреломления и дихроизма. Это приводит к появлению различных магнитооптических эффектов на проходящем и отраженном поляризованном свете. Магнитооптические эффекты можно разделить на эффекты, наблюдающиеся на проходящем через магнитный кристалл свете, и эффекты влияния на отраженный от кристалла свет. Можно также разделить магнитооптические эффекты на продольные и поперечные по

характеру распространения света относительно вектора M_s . К продольным относится эффект Фарадея и эффекты при полярном и меридиональном намагничивании, а к поперечным — эффект Фохта и эффекты при экваториальном намагничивании. При меридиональном эффекте Керра намагниченность параллельна плоскости образца и плоскости падения света. При полярном эффекте Керра намагниченность перпендикулярна плоскости пленки и параллельна плоскости падения света. При поперечном экваториальном эффекте Керра (ЭЭК) намагниченность параллельна плоскости образца и перпендикулярна плоскости падения света. При отражении света от магнитной среды происходит изменение амплитуды ЭЭК и сдвиг фаз S и P компонент света. Существует также разделение магнитооптических эффектов на четные и нечетные по намагниченности. Квадратичными по намагниченности являются эффект Фохта и ориентационный магнитооптический эффект. Остальные эффекты в первом приближении зависят от намагниченности линейно. Магнитооптические эффекты на отраженном свете используются для измерения магнитных характеристик тонкопленочных систем и приповерхностных слоев объемных магнитных материалов, а полярный и меридиональный эффекты Керра, а также эффект Фарадея используются для наблюдения доменной структуры в магнитных образцах.

2.5. Характеристики магнитооптических методов

В работе [30] Хуберт с соавторами при помощи компьютерных экспериментов установили, что в области слабого поглощения ферромагнетиков чувствительность магнитооптического сигнала определяется глубиной проникновения света в образец и равна $t_{\text{прон.}} = \lambda/8n$, а в области сильного поглощения величиной $t_{\text{прон.}} = \lambda/4\pi k$, где λ — длина волны падающего света, n и k — показатели преломления и поглощения

света в магнетике. Согласно экспериментальным данным, полученным на кафедре магнетизма [31], для света с энергией квантов 0,5 - 4,5 эВ глубина проникновения света в образец порядка 30 - 10 нм.

2.6. Магнитооптическая установка

Измерения приповерхностных магнитных характеристик изучаемых образцов были выполнены на магнитооптической установке, созданной на базе микроскопа МИС-11. Блок-схема установки представлена на рис. 2.2.

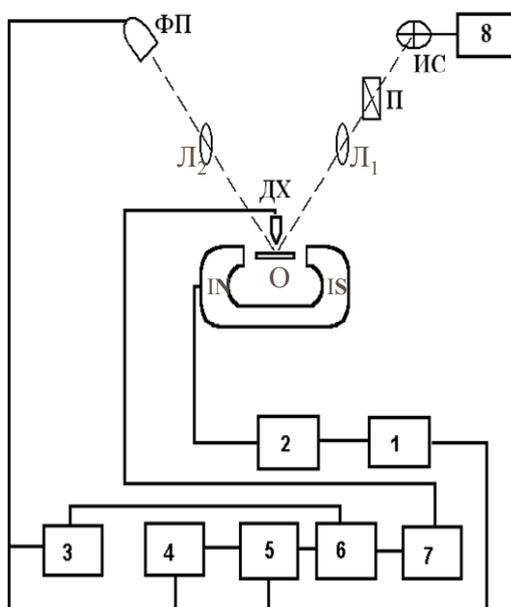


Рис. 6. Блок-схема магнитооптической установки, собранной на базе микроскопа МИС-11

- | | |
|---|---------------------|
| 1 - Генератор звуковых частот ЗГ-102 | О – образец |
| 2 - Усилитель мощности УМ-50 | ИС – источник света |
| 3 - Микровольтметр постоянного тока В2-11 | П - поляризатор |
| 4 - Селективный усилитель У2-8 | Л1 – первая линза |
| 5 - Синхронный детектор СД-1 | ДХ – датчик Холла |
| 6 - Блок деления | Л2 - вторая линза |
| 7 - Аналого-цифровой преобразователь Е-24 | ФП – фотоприемник |
| 8 - Блок питания лампы | |

Принцип действия установки заключается в следующем. Свет от излучения ИС (лампа К-12, питаемая от стабилизированного источника питания) проходит через поляризатор П и с помощью системы линз Л1 первого тубуса микроскопа фокусируется на образец О, расположенный между полюса электромагнита. Угол падения света на образец равен 45 градусам. Размер локального участка поверхности изучаемого образца определяется диаметром полевой диафрагмы, расположенной в первом тубусе микроскопа. С учётом возможного изменения увеличения микроскопа диаметр светового пятна на образце может варьироваться от нескольких миллиметров до нескольких десятков микрон.

Отражённый от образца свет системой линз Л2 второго тубуса собирается в плоскости изображения микроскопа, где расположен приёмник излучения ФП (германиевый фотодиод). Сигнал, пропорциональный интенсивности падающего на фотодиод света, поступает на вход измерительной системы.

В работе использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических сигналов. Преимущество данного метода заключается в том, что его применение позволяет устранить влияние колебаний интенсивности источника света, влияние флуктуаций фототока, и в силу того, что этот метод является дифференциальным, чувствительность его увеличивается по сравнению со статическим методом на 2 – 3 порядка, то есть, возможно измерение относительного изменения интенсивности отражённого света от перемагничиваемого образца вплоть до пятого порядка малости.

Сущность применяемой методики заключается в следующем. Исследуемый образец с помощью магнита перемагничивается переменным магнитным полем с частотой $f = 80$ Гц. Питание магнита осуществляется от генератора звуковых частот ЗГ-102. Изменение намагниченности

засвеченного участка поверхности под действием периодически изменяющегося внешнего магнитного поля приводит к изменению интенсивности света за счёт магнитооптического эффекта. Это изменение интенсивности регистрируется фотоприёмником.

В цепи приёмника излучения возникают два сигнала:

U_{\sim} – постоянное напряжение, пропорциональное интенсивности света I_0 , отражённого от образца в отсутствие магнитного поля;

U_{\sim} – переменное напряжение с частотой f , пропорциональное глубине модуляции интенсивности отражённого от образца света за счёт магнитооптического эффекта, возникающего при изменении намагниченности от M до $-M$ под действием внешнего переменного магнитного поля.

Постоянное напряжение U_{\sim} измеряется микровольтметром постоянного тока В2-11, а переменное напряжение U_{\sim} – усилителем-преобразователем У2-8 с синхронным детектором СД-1. Роль детектора сводится к подавлению сигналов с частотой следования, отличающейся от частоты опорного сигнала, задаваемого генератором ЗГ-102, и регистрации изменения фазы сигнала. С выхода СД-1 и В2-11 сигналы подаются на вход блока деления. С блока деления сигнал, пропорциональный отношению переменной и постоянной составляющих интенсивности отражённого света, подаётся на один из входов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Е-24. На второй вход АЦП Е-24 подаётся напряжение, пропорциональное напряжённости магнитного поля в зазоре электромагнита. Магнитное поле регистрируется датчиком Холла (ДХ), закреплённым между тубусами микроскопа таким образом, чтобы фиксировать значение поля на участке проведения измерения. АЦП осуществляет преобразование аналоговых сигналов в цифровые, регистрация которых осуществляется компьютером.

Программное обеспечение позволяет визуализировать и упрощать процессы регистрации, обработки и анализа данных.

Изучаемые образцы вместе с электромагнитом устанавливаются на предметном столике микроскопа, снабжённом двумя микроподачами, позволяющими перемещать образец в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до ± 5 мкм. Поляризация света осуществляется с помощью поляризатора Глана-Томсона (степень поляризации $\sim 10^{-4}$), снабжённого лимбом, позволяющим выставлять угол поляризации с точностью до ~ 0.5 градусов.

Основные технические характеристики установки:

- минимальная величина регистрируемого относительного изменения интенсивности отражённого от перемагничиваемого образца света 10^{-5} :

- минимальный диаметр изучаемого локального участка образца с учётом увеличения микроскопа равен 20 мкм.

Кривые намагничивания и петли гистерезиса образцов измерялись на вышеописанной установке с помощью ЭЭК. Величина ЭЭК определялась из соотношения $\delta = U_{\sim} / U_{-} = (I - I_0) / I_0$, где I и I_0 - интенсивности света, отражённого от намагниченного и ненамагниченного образца. Магнитное поле H было приложено параллельно поверхности образцов и перпендикулярно плоскости падения света. Измерения магнитных характеристик изучаемых тонкоплёночных систем были выполнены при двух ориентациях внешнего магнитного поля H . В одном случае H было параллельно ОЛН (направление D1), а в другом – H было перпендикулярно D1 (направление D2).

Известно, что магнитооптический эффект Керра чувствителен к намагниченности приповерхностного слоя определенной толщины, соответствующей «глубине проникновения света в среду», t_{penet} . Величина t_{penet} определяется из соотношения: $t_{\text{penet}} = \lambda / 4\pi k$, где λ – длина волны

падающего света, а k – коэффициент поглощения среды. Согласно существующим экспериментальным данным [32], значение t_{penet} для металлических магнитных материалов в области энергии квантов падающего света 0,5 – 4,5 eV не превышает 10 – 30 нм. В данном случае толщина изучаемого приповерхностного слоя была порядка 20 нм. Диаметр измеряемого приповерхностного участка был равен 0,5 мм. Локальные кривые намагничивания были измерены для различных участков поверхности образцов в магнитном поле, приложенном в плоскости образцов вдоль их длинной стороны.

Кроме того, магнитные характеристики изучаемых образцов были измерены на вибрационном магнитометре (ВМ) с чувствительностью вплоть до 10^{-7} Г•см³.

Все измерения были выполнены на открытом воздухе при комнатной температуре.

Глава 3. Полученные результаты и их обсуждение

На рисунках 7, 8, 9, 10 и 11 приведены соответственно типичные АСМ, МСМ изображения и приповерхностные локальные кривые намагничивания, наблюдаемые для изучаемых тонкоплёночных Fe₁/ПДФ/Fe₂ систем.

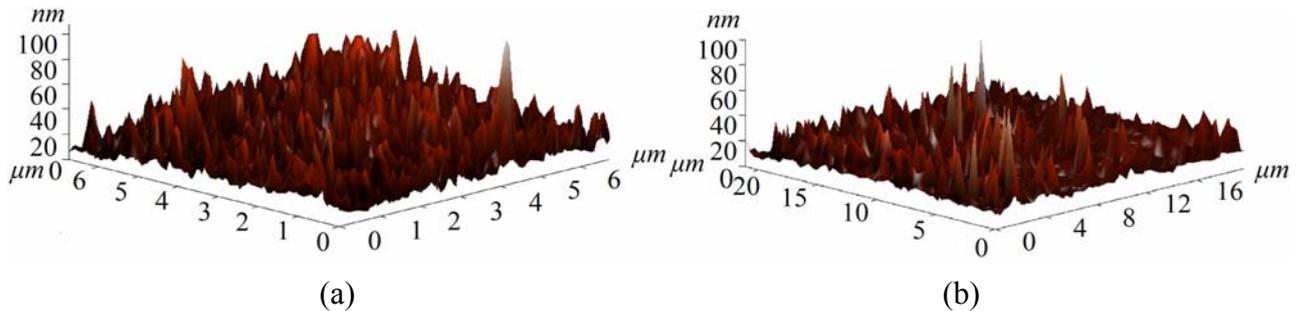


Рис. 7. АСМ изображения, наблюдаемые для Fe (16 нм) / ПДФ (20 нм) / Fe (15 нм) ($Ra \approx 8$ нм) и Fe (30 нм) / ПДФ (13 нм) / Fe (30 нм) ($Ra \approx 5$ нм) образцов, а и b, соответственно.

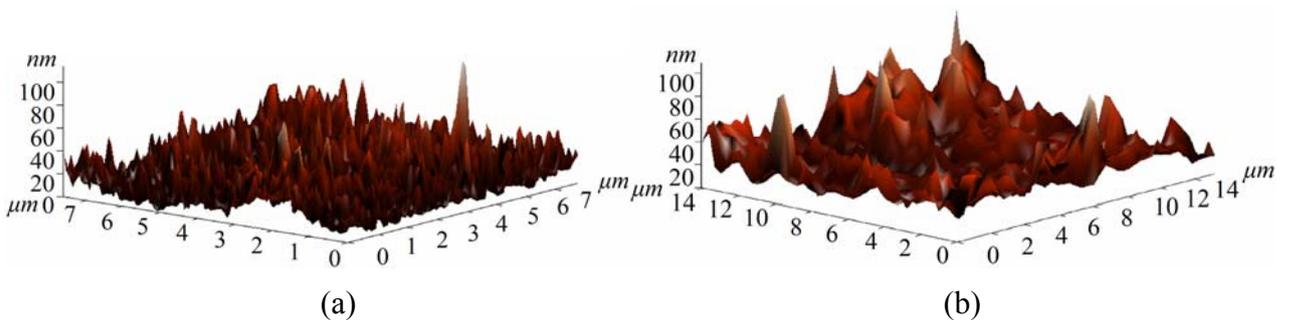


Рис. 8 АСМ изображения, наблюдаемые для Fe (16 нм) / ПДФ (10 нм) / Fe (15 нм) ($Ra \approx 8$ нм) и Fe (17 нм) / ПДФ (10 нм) / Fe (16 нм) ($Ra \approx 7$ нм) образцов, а и b, соответственно.

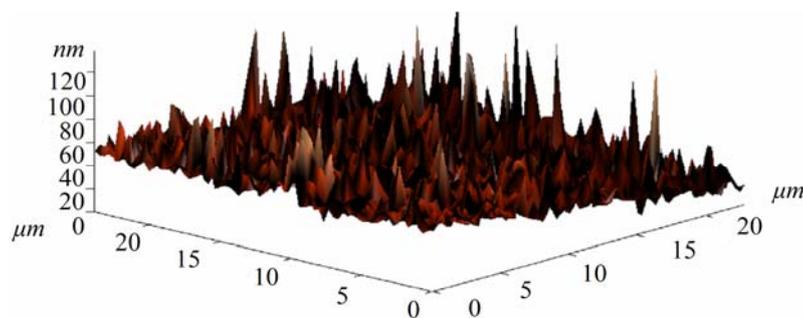


Рис. 9. АСМ изображения, наблюдаемые для Fe (24 нм) / ПДФ (6 нм) / Fe (16 нм) ($Ra \approx 6$ нм).

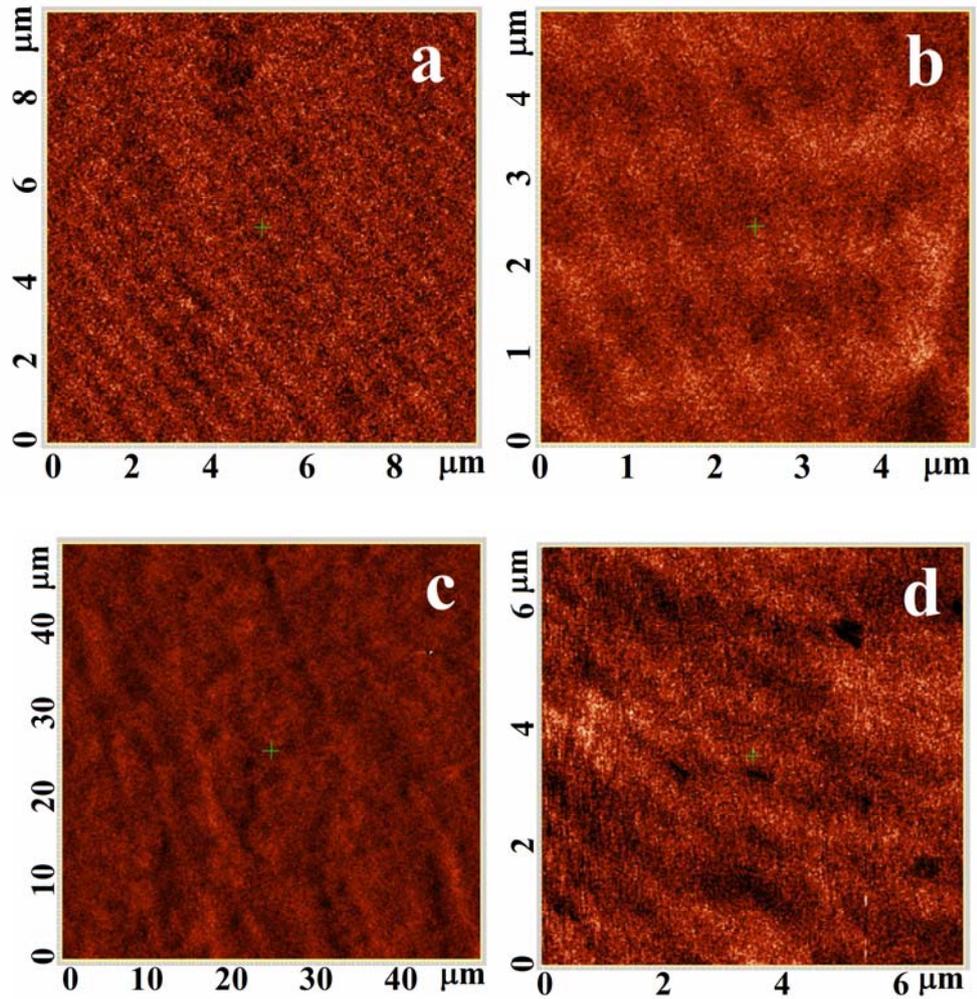
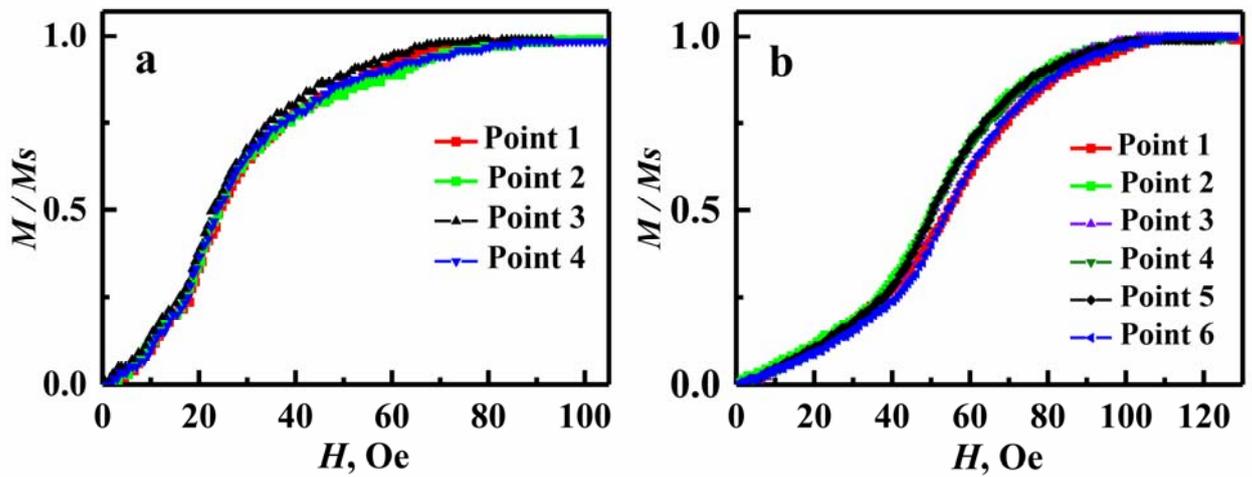


Рис. 10. Типичные МСМ изображения, наблюдаемые для Fe (16 нм) ПДФ (20 нм) / Fe (15 нм) (a, b) и Fe (30 нм) / ПДФ (13 нм) / Fe (30 нм) образцов, c, d, соответственно.



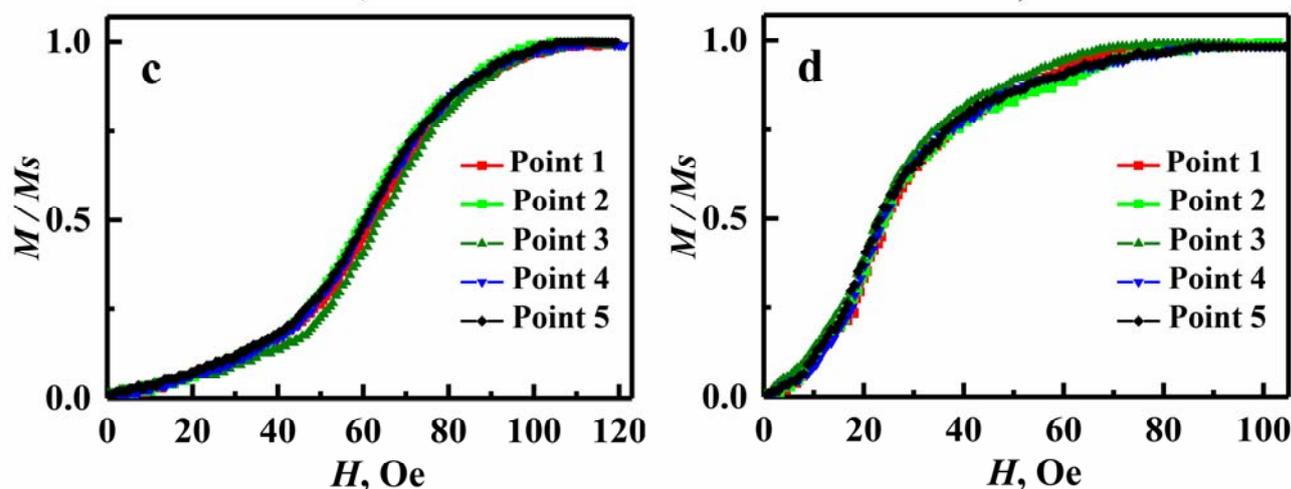


Рис. 11. Типичные приповерхностные локальные кривые намагничивания, наблюдаемые для изучаемых $Fe_1/ PD\Phi / Fe_2$ образцов с $t_{Fe1} = 16$ нм, $t_{Fe2} = 15$ нм, $t_{PD\Phi} = 10$ нм; $t_{Fe1} = 24$ нм, $t_{Fe2} = 16$ нм, $t_{PD\Phi} = 28$ нм; $t_{Fe1} = 24$ нм, $t_{Fe2} = 16$ нм; $t_{PD\Phi} = 6$ нм, $t_{Fe1} = 14$ нм, $t_{Fe2} = 50$ нм, $t_{PD\Phi} = 18$ нм, в магнитном поле, приложенном параллельно $D1$ (a, b, c, d, соответственно).

Анализ полученных данных показал следующее. Среднее значение шероховатости, Ra , трёхслойных $Fe/ PD\Phi / Fe$ тонкоплёночных систем порядка 5–8 нм. Рост толщины верхнего магнитного слоя сопровождается уменьшением величины Ra .

Согласно МСМ данным, при малых значениях t_{Fe} на поверхности образцов наблюдается полосовая доменная структура (рис. 10a и 10b), а при больших значениях t_{Fe} – хаотическое распределение намагниченности (рис. 10c и 10d).

Различия приповерхностных локальных значений поля насыщения, H_S^{loc} , не превышает 10%. Величина H_S^{loc} определялась из кривых намагничивания (рис. 11) как значение приложенного магнитного поля, при котором намагниченность образца достигает 98% M_S (M_S – намагниченности насыщения образца).

Наиболее характерные петли гистерезиса, наблюдаемые для изучаемых образцов с помощью ВМ, представлены на рисунках 12 – 19.

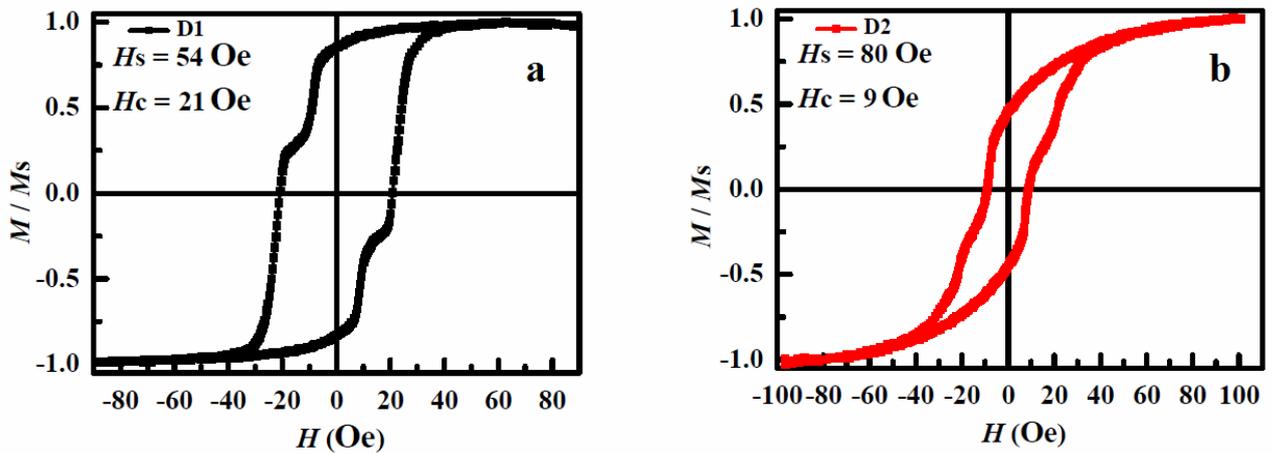


Рис. 12. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 16$ нм, $t_{Fe2} = 15$ нм, $t_{ПДФ} = 10$ нм в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2 (a и b, соответственно).

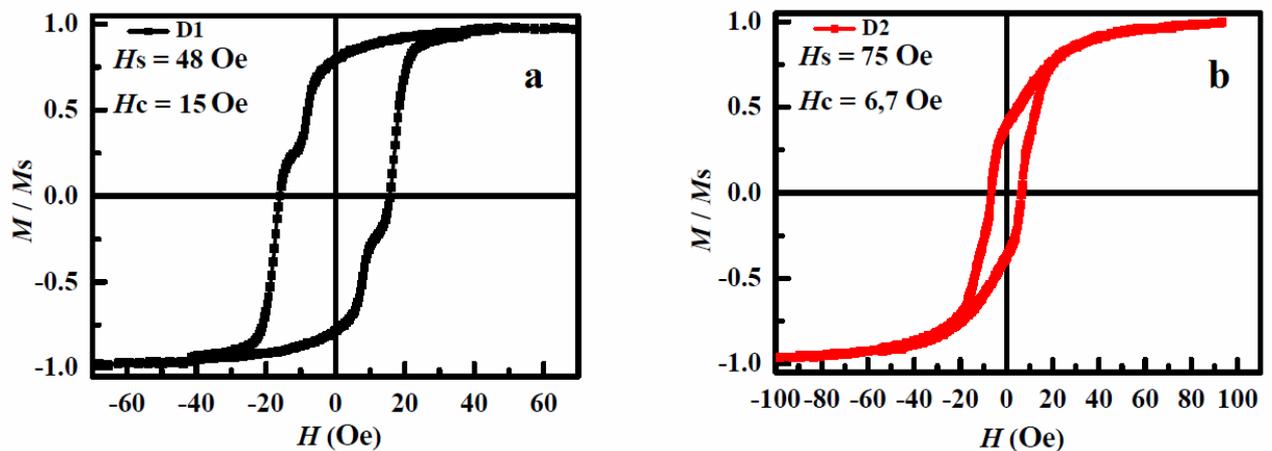


Рис. 13. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 16$ нм, $t_{Fe2} = 15$ нм, $t_{ПДФ} = 20$ нм в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2 (a и b, соответственно).

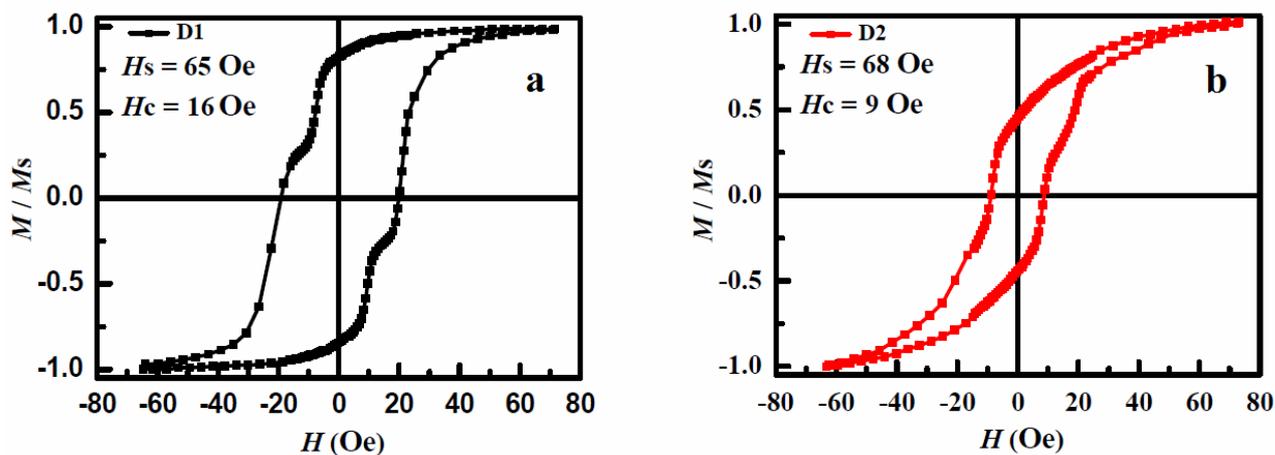


Рис. 14. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 17$ нм, $t_{Fe2} = 16$ нм, $t_{ПДФ} = 10$ нм в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2 (a и b, соответственно).

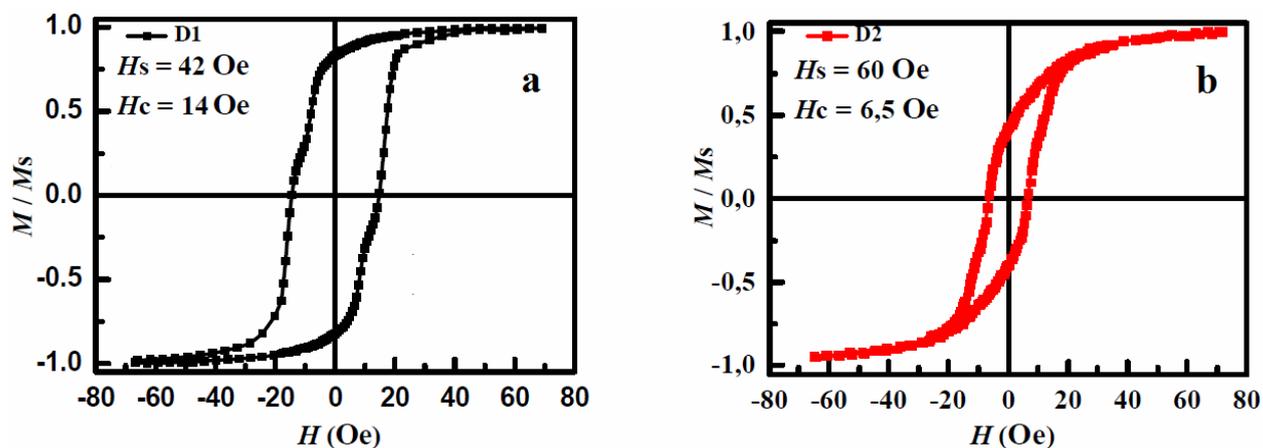


Рис. 15. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 17$ нм, $t_{Fe2} = 16$ нм, $t_{ПДФ} = 20$ нм в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2 (a и b, соответственно).

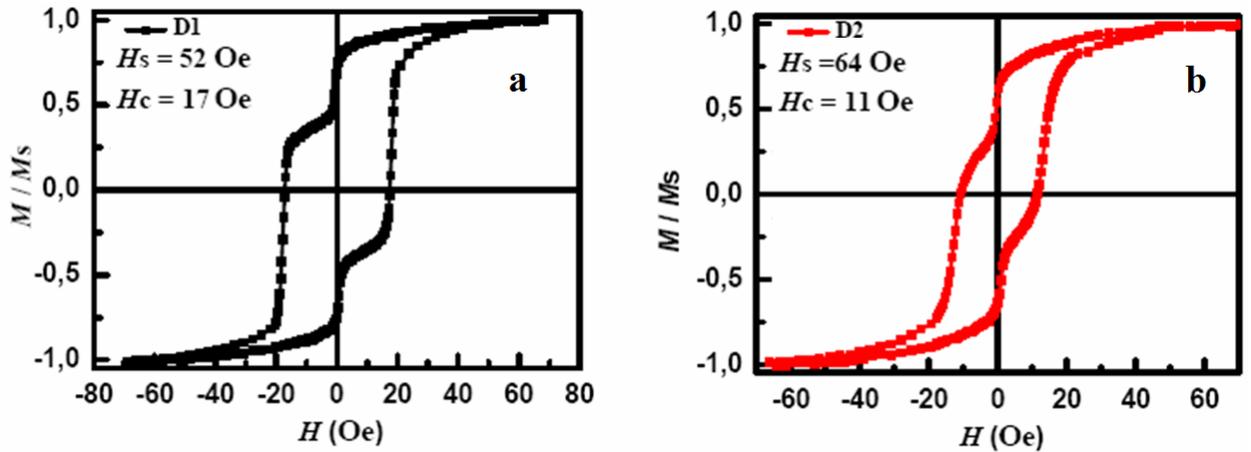


Рис. 16. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 14$ нм, $t_{Fe2} = 50$ нм, $t_{ПДФ} = 18$ нм в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2 (a и b, соответственно).

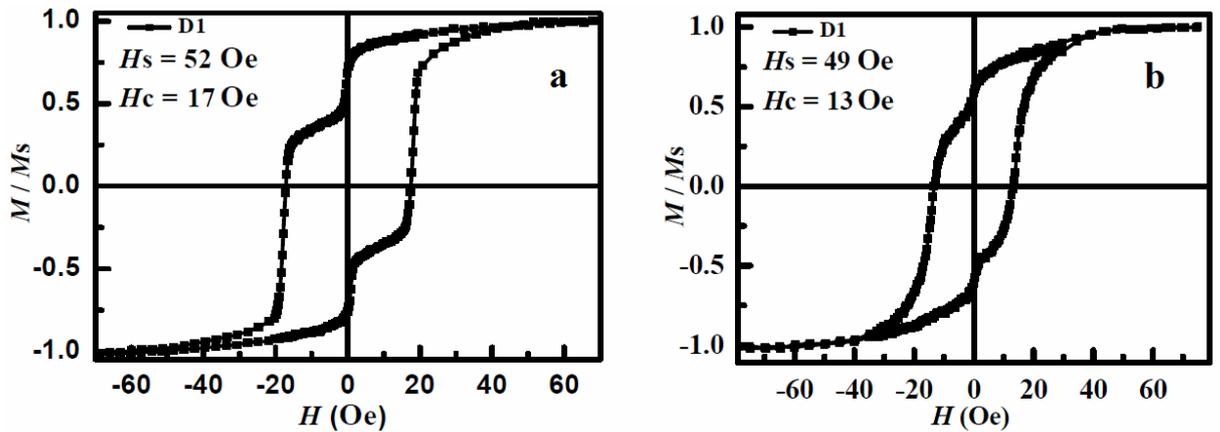


Рис. 17. Петли гистерезиса, наблюдаемые для $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов с $t_{Fe1} = 14$ нм, $t_{Fe2} = 50$ нм, $t_{ПДФ} = 18$ нм и 35 нм (a и b, соответственно) в магнитном поле, приложенном вдоль направления D1.

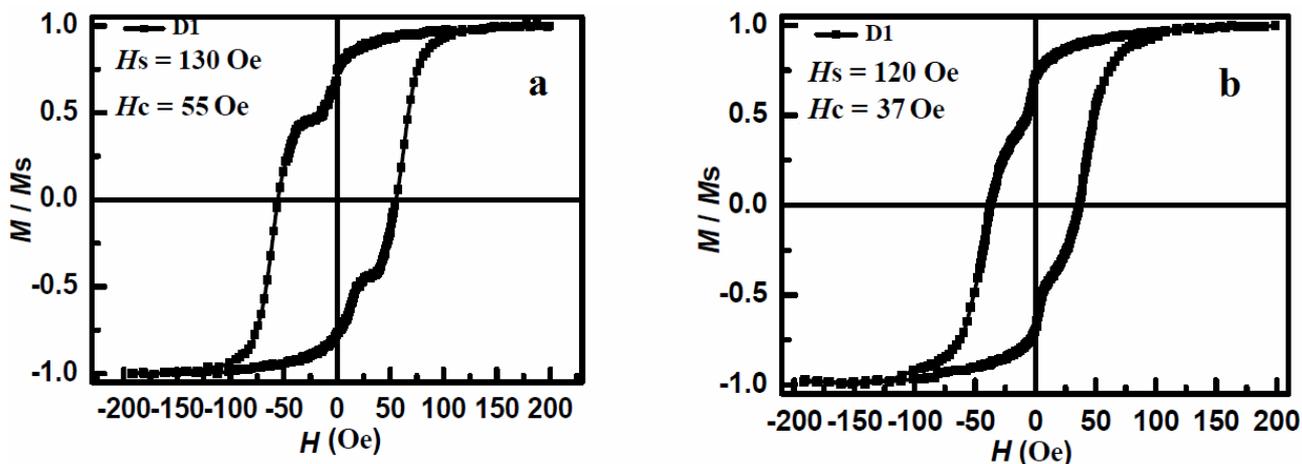


Рис. 18. Петли гистерезиса, наблюдаемые для $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов с $t_{Fe1} = 24$ нм, $t_{Fe2} = 16$ нм, $t_{ПДФ} = 6$ нм и 28 нм (a и b, соответственно) в магнитном поле, приложенном вдоль направления D1.

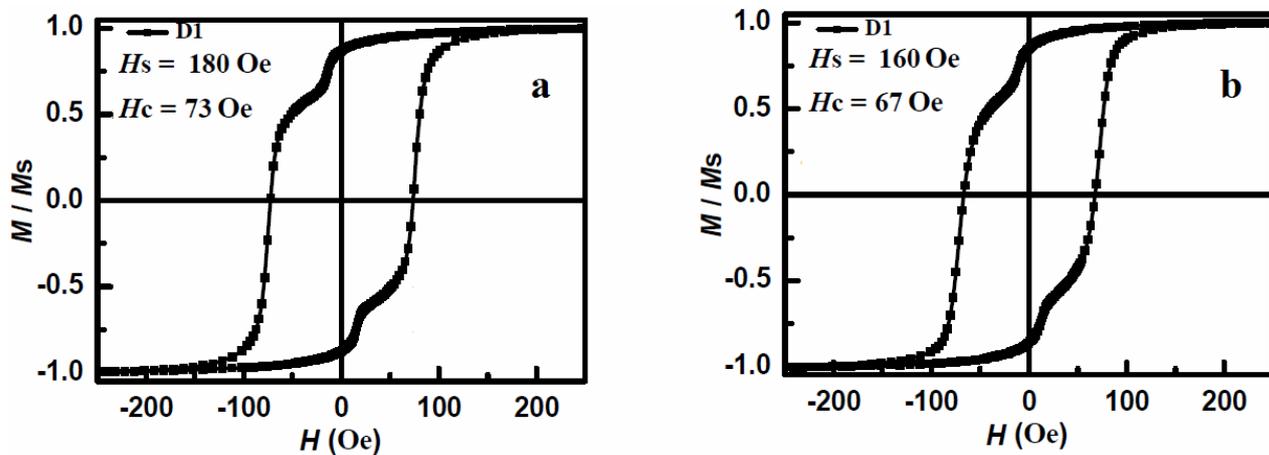


Рис. 19. Петли гистерезиса, наблюдаемые для $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов с $t_{Fe1} = 30$ нм, $t_{Fe2} = 30$ нм, $t_{ПДФ} = 13$ нм и 29 нм (a и b, соответственно) в магнитном поле, приложенном вдоль направления D1.

Анализ полученных данных показал, что для всех изучаемых образцов петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2, отличаются друг от друга (см. приведенные для иллюстрации рисунки 12 – 16). Этот факт свидетельствовал о наличии магнитной анизотропии с осью легкого намагничивания, параллельной длине образца. Причиной появления магнитной анизотропии является форма исследуемых образцов, в частности, различие их длины и ширины.

Петли гистерезиса, измеренные вдоль направления D1, имеют в двухступенчатую форму, обозначаемую в научной литературе как “two-step loops”. Согласно экспериментальным результатам [33 – 36] и расчетам, выполненным в [37], двухступенчатые петли гистерезиса наблюдаются при антипараллельной ориентации намагниченности в магнитных слоях, обусловленной межслойным обменным взаимодействием через немагнитный (НМС) разделительный слой.

Особого внимания заслуживает работа [37], в которой впервые рассмотрено влияние значений $M_{S1}d_1$ и $M_{S2}d_2$, на магнитолевое поведение трехслойных систем (M_{S1} и M_{S2} – намагниченности магнитных слоев, d_1 и d_2 – их толщины) с толщиной немагнитной прослойки не более 5 нм. Для корректного описания процесса перемагничивания вышеуказанных образцов было выполнено компьютерное моделирование. Было найдено, что в тонкопленочных структурах при $M_{S1}d_1 > M_{S2}d_2$ возникают сложные двухступенчатые петли гистерезиса, обусловленные наличием антиферромагнитного обменного взаимодействия между магнитными слоями через немагнитную прослойку. Причем размер ступеньки зависит от эффективности антиферромагнитного обменного взаимодействия между

магнитными слоями. Для иллюстрации этого факта на рис. 19 приведены рассчитанные петли гистерезиса, наблюдаемые при слабом и сильном антиферромагнитном обмене между магнитными слоями.

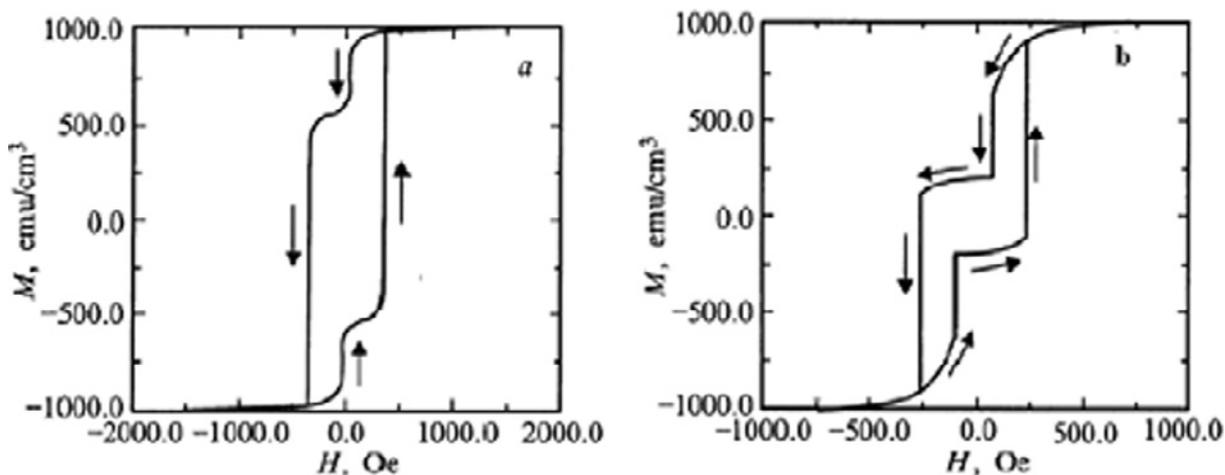


Рис. 20. Петли гистерезиса, наблюдаемые для трёхслойных образцов с различными значениями M_{S1d1} и M_{S2d2} в слабом (a) и сильном (b) антиферромагнитном обменном взаимодействии (К.А. Zvezdin. *Phys. Solid State* **42**, 120 (2000)).

При дальнейшем обсуждении полученных результатов были приняты во внимание следующие факты. Экспериментальные исследования тонкопленочных систем, представленные, например, в работе [38], свидетельствовали о наличии межслойного обменного взаимодействия через немагнитный металлический слой (НММС) толщиной вплоть до 7 нм, а данные фотоэмиссионной спектроскопии – до толщин НММС вплоть до 7–10 нм [39–41]. Таким образом, можно предположить, что причиной двухступенчатых петель гистерезиса, наблюдаемых для изучаемых в данной работе образцов с $t_{\text{ПДФ}} \leq 10$ нм (Рисунки 12, 14), является обменное взаимодействие между магнитными слоями через ПДФ слой. Физическая причина этого явления для тонкопленочных систем с металлическим

промежуточным слоем была проанализирована P.J. Bruno в обзорной работе [42]. Было показано, что основным механизмом обмена является поляризация электронов проводимости немагнитного слоя, обусловленная взаимодействием с магнитными моментами магнитных слоев.

При анализе физической причины обменного взаимодействия в изучаемых тонкопленочных системах с ПДФ прослойкой была учтена информация о физических свойствах ПДФ. Как отмечалось во введении, субмикронные пленки ПДФ, обладая несопряженной системой электронов, могут проявлять нетипичные электрофизические характеристиками, приводящие к возникновению высокой металлоподобной проводимости без использования методов химического допирования. Поскольку ПДФ в исходном состоянии является диэлектриком с шириной запрещенной зоны ≈ 4.3 эВ, то его проводимость возможна по локализованным состояниям в запрещенной зоне. Такая электропроводность ограничена по величине и должна иметь активационный характер. Однако в работах [11 – 17, 19 – 22] показано, что в материалах типа ПДФ проводимость под действием незначительных внешних воздействий может достигать значений сравнимых с проводимостью металлов. Кроме того, тонкопленочные структуры, содержащие слой ПДФ, могут реагировать на изменение внешнего магнитного поля. В частности, при нанесении немагнитного ПДФ слоя на ферромагнитную подложку проводимость ПДФ увеличивается на несколько порядков (вплоть до 6 – 8) [4, 43]. Этот переход ПДФ из низкопроводящего в высокопроводящее состояние в [44] был объяснен возникновением глубоких электронных состояний в запрещенной зоне полимера, концентрация которых по мере возрастания внешнего воздействия может достигать критической величины. В результате перекрытия волновых функций электронов в области самого перехода формируется узкая зона когерентного переноса заряда. Металлический

характер транспорта в этом случае был неоднократно доказан в экспериментах по исследованию наведенной в полимерной пленке сверхпроводимости (см., например, [45]). Изложенное выше позволяет предположить, что физическая причина обменного взаимодействия между магнитными слоями через ПДФ слой в $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцах с $t_{ПДФ} \leq 10$ нм аналогична наблюдаемой в тонкопленочных магнитных системах с НММС, предложенной Р.Ж. Bruno

Что касается $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов с $t_{ПДФ} > 10$ нм, то анализ полученных данных показывает, что существенная разность толщин магнитных слоев обуславливает также двухступенчатые петли гистерезиса с размером ступеньки, увеличивающейся с уменьшением толщины ПДФ (см. рисунки 13, 15 – 18). В этом случае, принимая во внимание результаты расчетов магнитополевого поведения трехслойных образцов, полученные в теоретической работе [46], наблюдаемое магнитополовое поведение $Fe_1 / ПДФ / Fe_2$ образцов в магнитном поле, приложенном параллельно оси легкого намагничивания, можно объяснить магнитостатическим взаимодействием между магнитными слоями. В частности, в работе [46], было показано, что в обменно-связанных тонкопленочных структурах, в которых один слой (магнитомягкий) находится под влиянием размагничивающего поля другого (магнитожесткого), возможно наблюдение сложных, вплоть до инвертируемых петель гистерезиса. В случае инвертируемых петель гистерезиса при уменьшении перемагничивающего поля от $+H_S$ до 0 намагниченность становится отрицательной при $0 < H < H_S$, а при перемагничивании образца в поле от $-H_S$ до 0 намагниченность становится положительной при $-H_S < H < 0$. В случае $Fe_1 / ПДФ / Fe_2$ тонкопленочных систем «магнитомягкость» и «магнитожесткость» магнитных слоев может быть обусловлена различием

их толщин. Известно [47], что константа магнитной анизотропии тонких пленок с одинаковым составом с ростом их толщины увеличивается. Это обуславливает увеличение поля насыщения образцов, то есть, фактически возможен переход из «магнитомягкого» к «магнито жесткому» состоянию.

Существенно то, что в отличие от обменной связи между магнитными слоями через немагнитную прослойку, действующей в основном на границе слоя, магнитостатическое взаимодействие между слоями действует на весь объем слоев, а, следовательно, является более эффективным.

Основные результаты и выводы

Впервые исследованы магнитные свойства тонкопленочных Fe / ПДФ / Fe трехслойных систем, состоящих из двух магнитных слоев железа и полимерного (полидифениленфталидного) промежуточного слоя.

Обнаружено, что среднее значение шероховатости, R_a , трёхслойных Fe / ПДФ / Fe образцов порядка 5–8 нм. Рост толщины верхнего магнитного слоя сопровождается уменьшением R_a .

Найдено, что при малых толщинах слоев железа, t_{Fe} , на поверхности образцов наблюдается полосовая доменная структура, а при увеличении t_{Fe} – хаотическое распределение намагниченности.

Установлено, что различия приповерхностных локальных значений поля насыщения, H_S^{loc} , не превышает 10 %.

Обнаружено сильное влияние толщины как магнитных, так и немагнитных слоев на магнитополовое поведение изучаемых Fe / ПДФ / Fe трехслойных систем.

Установлено, что Fe / ПДФ / Fe тонкопленочные системы характеризуются двухступенчатыми петлями гистерезиса с размером ступенек, зависящим от толщины ПДФ слоя.

Магнитополовое поведение трехслойных образцов с $t_{ПДФ} \leq 10$ нм объяснено наличием антиферромагнитного обмена между магнитными слоями через ПДФ разделительный слой, а при $t_{ПДФ} > 10$ нм – магнитостатическим взаимодействием между магнитными слоями.

Полученные экспериментальные данные могут быть полезны при синтезе тонкопленочных магнитных систем с полимерными прослойками с

заранее заданными фотомагнитными свойствами, а также при разработке устройств спинтроники с полимерным спин-транспортным слоем.

Список литературы

- [1] Chiang C. K. et al. Electrical conductivity in doped polyacetylene //Physical review letters. – 1977. – Т. 39. – №. 17. – С. 1098-1101.
- [2] Shirakawa H. et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene,(CH) x //Journal of the Chemical Society, Chemical Communications. – 1977. – №. 16. – С. 578-580.
- [3] Юсупов А. Р. и др. О транзисторном эффекте в вертикальной структуре с несопряженным полимером в качестве транспортного слоя //Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – №. 11. – С. 2265-2268.
- [4] Лачинов А. Н., Воробьева Н. В. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров //Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176. – №. 12. – С. 1249-1266.
- [5] Антипин В. А., Хурсан С. Л. Фотолюминесценция полиариленфталидов. I. электронные спектры поглощения полидифениленфталида и полифлуорениленфталида //Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19. – №. 2 – С. 4-10.
- [6] Шишлов Н. М., Хурсан С. Л. Роль концевых антрахиноновых групп в электронных процессах в полидифениленфталиде //Доклады Академии наук. – Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, 2013. – Т. 450. – №. 1. – С. 54-54.
- [7] Байбулова Г. Ш. и др. Квантово-химические исследования надмолекулярной структуры полидифениленфталида //Вестник Омского университета. – 2014. – №. 2 (72) – С. 46-49.
- [8] Корнилов В. М. и др. Надмолекулярная структура тонких пленок электроактивного полимера //Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – №. 5. – С. 1030-1035.
- [9] Гадиев Р. М. и др. Влияние дипольного упорядочения на электрофизические свойства границы раздела двух органических диэлектриков //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 100. – №. 4. – С. 276-280.
- [10] Карамов Д. Д. и др. Применение методики сканирующей силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика для исследования плёнок полидифениленфталида //Вестник Челябинского государственного университета. – 2015. – №. 22 (377).
- [11] Лачинов А. Н., Жеребов А. Ю., Корнилов В. М. Аномальная электронная неустойчивость полимеров при одноосном давлении //Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 52. – №. 2. – С. 742-745.
- [12] Lachinov A. N. et al. High-conductivity state of thin polymer films: effects of an electric field and of a uniaxial pressure //J. Exp. Theor. Phys. – 1992. – Т. 75. – С. 99-102.
- [13] Бунаков А. А., Лачинов А. Н., Салихов Р. Б. Исследование вольт-амперных

характеристик тонких пленок полидифениленфталата //Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – №. 5. – С. 104-108.

[14] Тамеев А. Р. и др. Влияние избыточного давления на дрейфовую подвижность носителей заряда в пленках полидифениленфталата //Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53. – №. 1. – С. 182-186.

[15] Пономарев А. Ф., Лачинов А. Н., Мошелев А. В. Вклад полевого механизма в термостимулированный ток в субмикронных пленках полидифениленфталата //Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – №. 2 – С. 337-339.

[16] Lachinov A. N., Zherebov A. Y., Zolotukhin M. G. Thermostimulated switching in thin polymer films //Synthetic metals. – 1993. – Т. 59. – №. 3. – С. 377-386.

[17] Пономарев А. Ф. и др. Термостимулированное переключение в пленках электроактивных полимеров //Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – №. 11. – С. 137-139.

[18] Юсупов А. Р. и др. Влияние атмосферы на транспорт дырок в пленках полидифениленфталата //Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38. – №. 24. – С. 18-25.

[19] Юсупов А. Р. и др. Исследование транспорта носителей заряда через границу металл–полимер класса полиариленафталатов //Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55. – №. 7. – С. 1392-1395.

[20] Набиуллин И. Р., Лачинов А. Н., Пономарев А. Ф. Влияние параметров потенциального барьера на интерфейсе металл/полимер на электронное переключение в структуре металл/полимер/металл //Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54. – №. 2. – С. 230-234.

[21] Лачинов А. Н. и др. Перенос заряда в системе металл–полимер–нанокристаллический металл //Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. – №. 10. – С. 1882-1888.

[22] Воробьева Н. В., Лачинов А. Н. ОГРОМНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛИМЕРОВ //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2013. – Т. 77. – №. 10. – С. 1431-1431.

[23] Lachinov A. N. et al. Magnetoresistance phenomena in ferromagnetic/wide band gap polymer system //Synthetic Metals. – 2011. – Т. 161. – №. 7-8. – С. 642-645.

[24] Гороховатский Ю. А., Мусралиева Ю. Ж., Карамов Д. Д. Исследование электрически активных дефектов в пленках полидифениленфталата (ПДФ) методами термоактивационной спектроскопии //Ученые записки Санкт-Петербургского имени ВВ Бобкова филиала Российской таможенной академии. – 2012. – №. 4. – С. 202-212.

[25] Lachinov A. N., Zherebov A. Y., Kornilov V. M. Influence of uniaxial pressure on

conductivity of polydiphenyleneophthalide //Synthetic metals. – 1991. – Т. 44. – №. 1. – С. 111-115.

[26] Zherebov A. Y., Lachinov A. N. On the mutual influence of uniaxial pressure and electric field on the electronic instabilities in polydiphenyleneophthalide //Synthetic metals. – 1991. – Т. 44. – №. 1. – С. 99-102.

[27] Скалдин О. А. и др. Зарядовая неустойчивость в тонких пленках органических полупроводников //Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51. – №. 3. – С. 141-144.

[28] Johansson N. et al. A theoretical study of the chemical structure of the non-conjugated polymer poly (3, 3'-phthalidylidene-4, 4'-biphenylene) //Synthetic Metals. – 1994. – Т. 67. – №. 1-3. – С. 319-322.

[29] Зыков Б. Г. и др. Резонансный захват электронов низких кинетических энергий молекулами производных фталида //Письма в ЖЭТФ. – Т. 64. – №. 6. – С. 402-406.

[30] Traeger G., Wenzel L., Hubert A. // Computer experiments on the information depth and the figure of merit in magneto-optics Phys. Stat. Sol. 131 (1992) 201-227.

[31] Е. Е. Шалыгина, В. Л. Козловский, Ду Сяньбо (кафедра магнетизма) //Магнитооптическое исследование ультратонких плёнок железа и кобальта // (1995) 51-57.

[32] Shalyguina E. E., Shin K. H. Influence of nonmagnetic layer (Ti, Zr, Pt) on magnetic and magneto-optical properties of Fe/NML bilayers and Fe/NML/Fe trilayers //Journal of magnetism and magnetic materials. – 2000. – Т. 220. – №. 2-3. – С. 167-174.

[33] Shalyguina E. E., Shin K. H. Influence of nonmagnetic layer (Ti, Zr, Pt) on magnetic and magneto-optical properties of Fe/NML bilayers and Fe/NML/Fe trilayers //Journal of magnetism and magnetic materials. – 2000. – Т. 220. – №. 2-3. – С. 167-174.

[34] Shalygina E. E., Rozhnovskaya A., Shalygin A. The Influence of Quantum Size Effects on Magnetic Properties of Thin-Film Systems //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2012. – Т. 190. – С. 514-517.

[35] Shalygina E. E. et al. The Influence of Si on Magnetic and Magneto-Optical Properties of Co/Si/Co Thin-Film Systems //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2015. – Т. 233. – С. 653-656.

[36] Shalygina E. E. et al. Exchange interaction in Co/Bi/Co thin-film systems with Bi interlayer //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Т. 440. – С. 136-139.

[37] Zvezdin K. A. Features of magnetization reversal in trilayer nanostructures //Physics of the Solid State. – 2000. – Т. 42. – №. 1. – С. 120-125.

[38] Kudrnovský J. et al. Interlayer exchange coupling: Effect of the cap //Physical Review B. – 1997. – Т. 56. – №. 14. – С. 8919-8927.

[39] Ortega J. E., Himpsel F. J. Quantum well states as mediators of magnetic coupling in superlattices //Physical review letters. – 1992. – Т. 69. – №. 5. – С. 844-847.

- [40] Crampin S., De Rossi S., Ciccacci F. Integrity of quantum-well resonances in metallic overlayers //Physical Review B. – 1996. – Т. 53. – №. 20. – С. 13817-13823.
- [41] Ortega J. E. et al. Quantum-well states and magnetic coupling between ferromagnets through a noble-metal layer //Physical Review B. – 1993. – Т. 47. – №. 3. – С. 1540-1552.
- [42] Bruno P. Theory of interlayer magnetic coupling //Physical Review B. – 1995. – Т. 52. – №. 1. – С. 411-439.
- [43] Vorob'eva N. V., Lachinov A. N., Latypova Y. I. The Effect of the External Magnetic Field on the Wide Band Gap Polymer Conductivity //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2015. – Т. 28. – №. 3. – С. 757-759.
- [44] Лачинов А. Н. и др. К вопросу о высокой проводимости несопряженных полимеров //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2006. – Т. 129. – №. 4. – С. 728-734.
- [45] Ионов А. Н., Лачинов А. Н., Ренч Р. Сверхпроводящий ток в тонкой пленке полифтальдилиденбифенилена //Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – №. 14. – С. 69-76.
- [46] Aharoni A. Exchange anisotropy in films, and the problem of inverted hysteresis loops //Journal of Applied Physics. – 1994. – Т. 76. – №. 10. – С. 6977-6979.
- [47] Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. Изд-во МГУ //Москва. – 1985.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф., д.ф.м.н. Шалыгиной Е.Е. за поставленную задачу, помощь в проведении измерений, человеческое отношение и знания, полученные в процессе обучения. А также выражает благодарность к.ф.-м.н. Воробьевой Н.В. за получение трехслойных тонкопленочных образцов, Харламовой А.М. за помощь при обработке результатов.

Благодарю всех сотрудников кафедры магнетизма за поддержку, терпение, неоценимый вклад в личностное и научное развитие.

Спасибо рецензенту за ряд полезных замечаний