

538(063)

ЮБИЛЕЙНАЯ СЕССИЯ НАУЧНОГО СОВЕТА ПО ПРОБЛЕМЕ «ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ» АН СССР

(Москва, 9—10 декабря 1982 г.)

9-го и 10-го декабря 1982 г. в Москве проходило годовичное заседание пленума Научного совета по проблеме «Физика магнитных явлений» при Отделении общей физики и астрономии Академии наук СССР. Повестка дня первого заседания 9-го декабря была целиком посвящена обычным вопросам годовичного пленума Совета — отчету о работе Совета и его секций за 1982 г. и обсуждению проекта плана работ Совета на 1983 г., а также некоторым текущим вопросам.

Второе заседание 10-го декабря было юбилейным, посвященным 60-летию образования Советского Союза. Его повестка дня была следующей:

1. Вступительное слово председателя Научного совета о современном состоянии исследований по физике магнитных явлений в различных союзных республиках СССР и координации этих исследований.

2. Научный доклад доктора физико-математических наук, профессора В. А. Игнатченко (Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения АН СССР, Красноярск) «Стохастические характеристики аморфных магнетиков».

3. Научный доклад доктора физико-математических наук, профессора А. А. Самохвалова и мл. научн. сотрудника В. В. Осипова (Институт физики металлов Уральского научного центра АН СССР, Свердловск) «Активное электрон-магнитное взаимодействие в магнитных полупроводниках».

4. Научный обзорный доклад доктора физико-математических наук, профессора Р. З. Левитина (Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва) «Магнетизм актинидных соединений».

1

В первом сообщении докладчик остановился на обзоре результатов некоторых важнейших исследований по магнетизму в дореволюционной России и в СССР, охарактеризовав современное состояние этих исследований в республиках Союза.

Первые работы в России в середине XVIII века выполнил академик Российской Академии наук Ф. У. Т. Эпинус, в первой половине XIX века русский академик Э. Х. Ленц также сформулировал свое знаменитое правило о магнитном поле индукционного тока, во второй половине XIX века профессор Московского университета А. Г. Столетов впервые снял истинную кривую намагниченности ферромагнетика в замкнутой магнитной цепи. Идея о «молекулярном поле» в ферромагнетиках была высказана русским физиком Б. Л. Розингом (1892). Изучению магнитных свойств ферромагнетиков в переменных электромагнитных полях были посвящены работы В. К. Аркадьева, положившие начало развитию магнетодинамики. В советское время были проведены блестящие работы Я. Г. Дорфмана по объяснению температурно-независимого парамагнетизма щелочных металлов, по предсказанию ЭПР и циклотронного (диамагнитного) резонанса, по доказательству немагнитной природы молекулярного поля в ферромагнетиках. Л. Д. Ландау в своей знаменитой работе построил квантовую теорию диамагнетизма электронного газа в металлах (уровни Ландау). Н. С. Акулов

построил теорию магнитной анизотропии и магнитострикции ферромагнитных монокристаллов, заложив тем самым основу современной теории кривой намагничивания ферромагнетиков. Им было впервые высказано представление о двух типах процессов намагничивания: процессах вращения и смещения. В работе Я. Г. Дорфмана и Я. И. Френкеля впервые была дана оценка размера однодоменных ферромагнитных частиц. В знаменитой работе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица (1935) было дано окончательное теоретическое обоснование гипотезе П. Вейсса о магнитных доменах и предложена первая конкретная модель доменной структуры. Позже такая структура была обнаружена на опыте в работах Н. С. Акулова и других. Работы Н. С. Акулова, Е. И. Кондорского, Р. И. Януса, Я. С. Шура и других заложили основы современной теории гистерезиса ферромагнетиков. В работе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица (1935) было также предложено уравнение, описывающее динамику намагничивания ферромагнетиков (уравнение Ландау — Лифшица), которое положено в основу всей современной теории ферромагнитного резонанса. Я. П. Терлецкий дал обобщение теоремы Бора — Ван-Леевен о невозможности с точки зрения классических электродинамики и статистической механики существования стационарной намагниченности в телах. В основополагающих работах школы И. М. Лифшица на основе развития зонной теории кристаллов с произвольным законом дисперсии были получены строгие трактовки магнитных и гальваномагнитных свойств слабомагнитных металлов и полупроводников. Квантовомеханическая теория ферромагнетизма в рамках модели коллективизированных электронов была впервые сформулирована в работе Я. И. Френкеля (1928). Дальнейшее развитие было получено в работах С. П. Шубина и С. В. Вонсовского, Н. Н. Боголюбова и С. В. Тябликова, разработавших многоэлектронную полярно-экситонную модель, синтезирующую зонную и гейзенберговскую локализованную модель. В настоящее время эта модель в своем частном варианте широко применяется в мировой науке (модель Хаббарда). В работе С. П. Шубина и С. В. Вонсовского была также предложена $s - d$ (или $s - f$)-обменная модель переходных металлов, которая теперь нашла всеобщее признание и широко используется для объяснения различных фазических свойств, в том числе и магнитных, для переходных металлов и их металлических и полупроводниковых соединений. $s - f$ -обменная модель была успешно применена к объяснению ряда магнитных и электрических свойств редкоземельных металлических и полупроводниковых соединений (И. Е. Дзялошинский, К. П. Белов, Е. И. Кодорский, Ю. П. Ирхин, А. А. Самохвалов, Э. Л. Нагаев и др.). Значительный вклад внесли советскими физиками в проблему фонов-магнетонного взаимодействия (А. И. Ахиезер, Е. А. Туров, В. Г. Шавров, В. Г. Барьяhtar, А. С. Боровик-Романов, К. Б. Власов, В. И. Ожогин, С. В. Пелетминский, Е. Г. Рудашевский). Л. Д. Ландау одновременно с французским физиком Л. Неелем предсказал существование явления антиферромагнетизма. В. Л. Гинзбург и С. В. Вонсовский применили теорию фазовых переходов второго рода Ландау к случаю перехода ферромагнетик — парамагнетик. Е. К. Завойский открыл явление ЭПР, и созданная им казанская школа физиков под руководством Б. М. Козырева и С. А. Альтшулера внесла огромный вклад в изучение этого важного явления. В экспериментальной работе А. С. Боровика-Романова с сорудниками и в теоретической работе И. Е. Дзялошинского было открыто и объяснено явление слабого ферромагнетизма (слабо неколлинеарного антиферромагнетизма). В этой области также существенный вклад в науку внесли работы Е. А. Турова. Очень важные исследования советских физиков касаются ядерных методов исследований магнетизма: по магнитной нейтронографии (см. монографию Ю. А. Изюмова и Р. П. Озерова¹), по ядерному магнитному резонансу в магнитноупорядоченных веществах (см. монографию Е. А. Турова и М. П. Петрова²), по эффекту Мёссбауэра и др. Следует отметить также работу И. Е. Тамма и С. А. Альтшулера по предсказанию магнитного момента у нейтрона, а также работу Л. Н. Добрецова и А. Н. Теренина по открытию сверхтонкой структуры спектральных линий (СТС). Проблема сильных магнитных полей была начата в широко известных работах П. Л. Каниды и ныне продолжается во многих лабораториях Союза (В. Г. Веселаго, В. И. Ожогин и др.).

Следует отметить, что кроме некоторых отмеченных выше работ, которые ясно указывают на огромную роль советской физики в области магнетизма, в последние годы масштабы и глубина разработок по физике магнитных явлений еще больше увеличились, и в кратком сообщении нет никакой возможности их все охватить. В дни нашего всенародного торжества — дни, когда отмечается 60-летний юбилей образования Союза Советских Социалистических Республик, этого первого социалистического многонационального государства, вот уже более полувека демонстрирующего всему миру жизнеспособность ленинской национальной политики, мы также можем отметить, что и в области науки эта политика принесла свои весьма положительные плоды. Мы теперь знаем, что и на необъятных просторах Российской Федерации от Ленинграда и Москвы до Свердловска, Красноярска, Иркутска и Владивостока всюду есть активно работающие группы физиков-магнитологов. Такие же активные группы, работы которых известны не только в СССР, но и за его границами, имеются на Украине, в Белоруссии и Молдавии, в прибалтийских и закавказских республиках, а также в республиках Средней Азии.

Советские физики магнитологи каждые два года собираются на Всесоюзные конференции по физике магнитных явлений, на которых обсуждаются итоги важнейших работ по магнетизму, проведенных во всех регионах нашей необъятной Родины. Места проведения этих конференций самые различные, они связаны с различными научными центрами союзных республик, где интенсивно ведутся работы по магнетизму. Кроме Всесоюзных конференций ежегодно проводится много более узких совещаний, симпозиумов, школ по вопросам физики магнитных явлений.

Координацией магнитных исследований, подготовкой больших магнитных форумов занимается Научный совет по проблеме «Физика магнитных явлений» Академии наук СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изюмов Ю. А., Озеров Р. П. Магнитная нейтронография. — М.: Наука, 1966.
2. Туров Е. А., Петров М. П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. — М.: Наука, 1969.

2

В настоящее время одним из самых актуальных вопросов физики магнитных явлений стало изучение аморфных магнетиков, которые уже приобрели существенное практическое значение, как весьма перспективные мягкие магнитные материалы. Много интересного также дает и чисто физическое изучение этих материалов. Этому вопросу и был посвящен доклад профессора В. А. Игнатченко, в котором изложены результаты теоретических и экспериментальных работ Института физики СО АН СССР в Красноярске, посвященные важному аспекту физики аморфных магнетиков.

Аморфный магнетик — это типичная стохастическая система. Из-за структурного и химического беспорядка все параметры спин-системы (обмен, намагниченность, анизотропия) — случайные функции пространственных координат; их математические ожидания, исследуемые на опыте, являются лишь одной простейшей их характеристикой. Главными же их характеристиками служат автокорреляционные функции и функции взаимной корреляции параметров. Во многих случаях знания этих функций достаточно, ибо в них содержится основная информация о величине флуктуаций и их протяженности (корреляционном радиусе). До последнего времени в физике магнитных явлений методы измерения пространственных корреляционных функций полностью отсутствовали. Именно поэтому в Институте физики им. Л. В. Киренского СО АН СССР и была поставлена задача развития феноменологической теории аморфного магнетика, в которой корреляционные функции каждого флуктуирующего в пространстве параметра спин-системы фигурировали бы в общем виде, как некоторые неизвестные функции. Задача решалась в приближении сплошной среды как для аморфного ферро-, так и ферримагнетика. На основе этой теории был найден ряд эффектов, изучая которые можно измерить корреляционные функции основных магнитных параметров. Наибольшей информативностью обладает закон дисперсии спиновых волн, в нем содержится информация о корреляционных функциях всех флуктуирующих параметров. При этом флуктуации каждого параметра приводят к различному виду модификации закона дисперсии. Этот результат явился теоретическим обоснованием нового метода исследования аморфных магнетиков — спин-волновой спектроскопии. Эксперименты на кобальт-фосфорных аморфных тонких пленках методом спин-волнового резонанса обнаружили предсказанные теорией модификации закона дисперсии соответствующих флуктуации обмена, а на сплавах $\text{Co} - \text{Ni} - \text{P}$ и флуктуации намагниченности. Корреляционные радиусы флуктуаций обмена и намагниченности оказались $\sim 20-30 \text{ \AA}$, что намного больше структурного корреляционного радиуса $\sim 5-8 \text{ \AA}$. Стохастические характеристики аморфных магнетиков проявляются не только в законе дисперсии. Так, флуктуации оси анизотропии дали возможность определить величину и корреляционный радиус локальной магнитной анизотропии аморфного магнетика, он оказался $\sim 100-150 \text{ \AA}$. При кристаллизации аморфного сплава корреляционный радиус анизотропии не изменялся, он был равен среднему радиусу кристаллита. Незменность этого радиуса означает, что при кристаллизации образуются кристаллиты, размер которых совпадает с некоторым характерным размером, уже существовавшим в аморфной фазе. Полученные результаты говорят о наличии больших областей, в которых магнитные характеристики не испытывают значительных изменений, сглаженные какими-то взаимодействиями. Поэтому обычная теория аморфных магнетиков с нулевым корреляционным радиусом является очень плохим приближением. Возникает вопрос: длинные корреляции — это внутреннее свойство спин-системы, проявляющееся на фоне структурного хаоса, в котором корреляции кончаются на двух-трех межатомных расстояниях, или это отражение каких-то длинноволновых корреляций, существующих в самой атомной структуре аморфных веществ? Совокупность полученных опытных

фактов говорит в пользу последнего. Отсюда следует задача развития прямых структурных методов, которыми удалось бы обнаружить такие же дальние корреляции в расположении атомов аморфных сплавов, какие наблюдаются сейчас для параметров спин-системы.

3

Проблема полупроводниковых ферро- и ферримагнетиков привлекает к себе в последнее время особое внимание, поскольку в этих веществах имеет место сосуществование двух весьма ярких физических свойств твердого тела, а именно, сосуществование атомного магнитного порядка в системе электронов дотраняющихся слоев электронной оболочки атомов переходных элементов и наряду с этим особого (целевого) типа энергетического спектра системы коллективизированных электронов проводимости. Такое «богатство» различных физических свойств делает эти вещества также весьма перспективными и для их практического использования в задачах современной квантовой электроники. В Институте физики металлов УНЦ АН СССР ведутся весьма интенсивные исследования различных физических свойств упомянутых веществ. Некоторые результаты этих работ и были рассказаны в докладе А. А. Самохвалова и В. В. Осипова. Взаимодействие дрейфующих в сильном электрическом поле носителей тока и магнитных элементарных возбуждений — магнонов (спиновых волн) в магнитных полупроводниках может приводить к появлению совершенно новых эффектов. В частности, теория предсказывает усиление спиновых волн, черенковскую генерацию магнонов, а также их разогрев носителями тока ^{1, 2}. Эти явления могут приводить к изменению физических параметров магнитных полупроводников — электропроводимости, намагниченности, магнитной проницаемости и других. Например, в Eu O и $\text{Cd Cl}_2 \text{ Se}_4$ экспериментально обнаружены черенковская генерация магнонов, приводящая к пороговому уменьшению электропроводности при повышении скорости дрейфа носителей наименьшей фазовой скорости спиновых волн, разогрев носителей тока, сопровождающийся нелинейностями вольт-амперной характеристики ³, разогрев магнонов, приводящий к уменьшению намагниченности ^{4, 5}. Можно считать с достаточным основанием, что отмеченные выше результаты по возбуждению магнонов носителями тока являются первым шагом на пути создания новой отрасли квантовой электроники — полупроводниковой магнитоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахизер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. — ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 337.
2. Коренблит И. Я., Танхилевич Б. Г. — ФТТ, 1976, т. 18, с. 62.
3. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Аминов Т. Г. — ФТТ, 1978, т. 20, с. 595.
4. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Аминов Т. Г. — Письма ЖЭТФ, 1978, т. 28, с. 413.
5. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Иваев В. Т., Калинин В. Т., Аминов Т. Г. — Ibid., 1979, т. 30, с. 658.

4

Не меньший интерес представляет изучение магнитных свойств соединений на основе элементов группы актинидов. Это связано в первую очередь с тем, что электронная оболочка атомов группы актинидов имеет весьма сложную структуру, в которой наряду с валентной оболочкой имеется еще совокупность электронов из разных дотраняющихся внутренних слоев. Обзору результатов последних исследований этих веществ был посвящен доклад Р. З. Левитина. Еще в 1952 г. известный польский физик В. Тшебатовский с сотрудниками открыл первое актинидное ферромагнитное соединение $\beta\text{-UCl}_3$. В настоящее время известно более 130 двойных магнитоупорядоченных соединений актинидов, не считая твердых растворов. В свойствах этих соединений сказываются особенности строения заполняющейся 5f-оболочки актинидов, которая занимает промежуточное положение в смысле локализации между 4f-оболочкой редкоземельных элементов и d-оболочками обычных переходных металлов. При увеличении порядкового номера актинидов чистых элементов наблюдается возрастание степени локализации 5f-электронов, что приводит к переходу от парамагнетизма Дорфмана — Паули у урана (почти полностью коллективизированные 5f-электроны) к антиферромагнетизму у юрия (локализованные 5f-электроны). Весьма сложной является проблема смешанной валентности у актинидных соединений. Например, у урана в некоторых случаях валентность меняется от +2 до +6. В актинидных соединениях в связи с их магнитными свойствами возникает интересная концепция критического расстояния ближайших соседей актинидов — актинид, при котором происходит переход из коллективизированного состояния в локализованное для 5f-электронов и, как следствие, возникает магнитное упорядочение. К актинидам также применима, по-видимому, концепция косвен-

ного обменного взаимодействия через электроны проводимости (обмен типа Рудермана — Киттеля — Касуи — Йосиды). Однако в последнее время модель локализованных моментов подвергается существенной критике, и здесь существенную роль играют результаты последних экспериментальных данных по оптическим свойствам актинидных соединений. Дискутируется также возможность весьма заметной гибридизации $5f$ и $6d$ -состояний. В последнее время получены новые данные об атомных магнитных структурах актинидных соединений. Здесь наблюдается заметное разнообразие и сложность структур. Обнаружены также гигантские магнитокристаллическая анизотропия и магнитострикция актинидных соединений. Делаются первые попытки объяснения этих явлений в модели одноионной анизотропии с учетом взаимодействия орбитального момента $5f$ -оболочки с кристаллическим полем решетки. Начались исследования магнитных возбуждений (спиновых волн и т. п.) в актинидных соединениях.

В ходе докладов было задано много вопросов и была проведена оживленная дискуссия.

С. В. Вонсовский