

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛЛОВ

На правах рукописи

УДК 537.611.45

ШАХОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА МНОГОПОДРЕШЕТОЧНЫХ
РОМБИЧЕСКИХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Специальность 01.04.02
Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков. - 1992

20 26. 600

Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте
АН Украины, г. Донецк

Научные руководители: доктор физико-математических наук

БИТЕБСКИЙ И. М.

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

ПАШКЕВИЧ Ю. Г.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук

профессор Доктев В. М.

доктор физико-математических наук

Лавриненко Н. М.

Ведущая организация: Физико-технический институт низких

температур АН Украины

г. Харьков.

Защита состоится " " 1993 года в часов на

заседании специализированного совета К 138.01.01 в Институте моно-
кристаллов.

Адрес: 310001, г. Харьков-001, пр. Ленина 60.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Института монокристаллов АН Украины

Автореферат разослан " " 1992 года.

Ученый секретарь

Специализированного совета

К 138.01.01

кандидат технических наук

Л. В. Атрошенко

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00825757 (Y)

ЛНБ ім. В. Стефаника
ЛНБ

Актуальность темы. Большинство магнетиков, используемых для решения различных научных и технических задач, являются много-подрешеточными магнитоупорядоченными кристаллами. К ним относятся, например, кристаллы La_2CuO_4 и Nd_2CuO_4 , являющиеся базовыми соединениями для получения высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Однако, в значительном числе работ свойства реальных магнетиков описываются в рамках моделей, учитывающих лишь акустические ветви спин-волнового спектра. Между тем известно, что в общем случае n -подрешеточного магнетика число акустических спиновых ветвей не превышает трех [1], остальные $n-3$ ветви магнитного спектра приходятся на обменные спиновые волны. Поэтому изучение различных физических свойств и характеристик магнитных материалов, связанных с обменными модами является актуальной и важной задачей [2].

На сегодняшний день, в ряде магнетиков достаточно хорошо изучены однородные колебания обменных спиновых волн, например, их проявление в антиферромагнитном резонансе [3-8] или одномоночном рассеянии света [9,10]. Поэтому, в связи с увеличением числа объектов, в которых обнаружены обменные моды магнитного резонанса, актуальной задачей является исследование процессов взаимодействия обменных магнонов с акустическими магнонами и фононами и построение микроскопической теории релаксации обменных спиновых волн.

Интегральные по спектру спиновых волн эффекты в многоподрешеточных магнетиках рассматривались в работах [11,12], связанных с двухмагнонным поглощением света и поведением намагниченности подрешеток при изменении температуры [13]. К таким эффектам, в которых проявляются особенности спектра всех ветвей спиновых волн относится также и теплоемкость кристалла. Представляет интерес выяснить роль обменных спиновых волн в термодинамике магнетика, а также исследовать возможность выделения этого вклада из общей теплоемкости магнетика и определения частот однородных колебаний магнонов. Особую актуальность этот вопрос приобретает для La_2CuO_4 , поскольку в этом антиферромагнетике магнитный резонанс не наблюдается.

Целью работы являлось:

- а) Построение микроскопической теории релаксации обменных спиновых волн в четырехподрешеточном ромбическом антиферромагнетике.
- б) Теоретическое исследование температурной зависимости спиновой теплоемкости многоподрешеточных антиферромагнетиков.
- в) Теоретическое изучение антиферромагнитного резонанса четырехподрешеточного антиферромагнетика $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в полях перпендикулярных легкой оси кристалла.
- д) Сопоставление выводов теории с результатами эксперимента.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Предложен метод получения слагаемых высших порядков по операторам рождения-уничтожения магнов в гамильтониане многоподрешеточного магнетика, максимально использующий его симметрию.
2. Впервые рассмотрена микроскопическая теория релаксации обменных магнов и исследованы все возможные процессы магно-магнонных и магнон-фононных взаимодействий, определяющие величину этой релаксации на примере $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
3. Показано, что основной вклад в ширину линий обменных мод магнитного резонанса в $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ дают процессы распадного типа, амплитуда которых не зависит от величины магнитного поля.
4. Определен главный механизм температурной перенормировки частот обменных мод магнитного резонанса, обусловленный рассеянием обменных спиновых волн на акустических.
5. Впервые численно исследован вклад магнонной подсистемы ромбических четырехподрешеточных трехмерных и квазидвумерных антиферромагнетиков в теплоемкость кристалла и рассмотрена возможность выделения этого вклада из полной теплоемкости.
6. Изучены основные состояния, частотно-полевые зависимости антиферромагнитного резонанса и высокочастотная магнитная восприимчивость в четырехподрешеточном орторомбическом антиферромагнетике, в полях перпендикулярных легкой оси кристалла.

Все перечисленные результаты получены впервые, что определяет научную новизну работы.

Научное и практическое значение работы. Получены новые данные о резонансных и релаксационных свойствах дигидрата глю-

рида меди. Проведено сопоставление теории и эксперимента, что дало возможность понять природу физических процессов релаксации обменных мод, протекающих в многоподрешеточных магнетиках. Вычислена спиновая теплоемкость ромбических антиферромагнетиков, и рассмотрена возможность обнаружения начала магнитного спектра для квазидвумерного антиферромагнетика La_2CuO_4 .

Апробация работы. Результаты настоящей работы докладывались на XVII и XVII Вс. конференциях по физике магнитных явлений Донецк 1985 г., Калинин 1988г., и Вс. школе-семинаре 'Спиново-волновая электроника СВЧ' Ашхабад 1985 г., XXVI Вс. совещании по физике низких температур Донецк 1990 г., Вс. конференции 'Современные проблемы статистической физики', а также на семинаре 'Спиновые волны' Ленинград 1988 г., 1990 г.

Диссертация состоит из введения трех глав и заключения, содержит 22 рисунка. Список литературы содержит 85 источников. Общий объем текста 118 страниц. Материалы диссертации опубликованы в 6 работах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы, формулируется цель работы, перечисляются основные положения выносимые на защиту, излагается научная новизна и значение работы, рассматривается структура и содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена изучению микроскопической теории релаксации обменных спиновых мод. В первом параграфе этой главы строится гамильтониан четырехподрешеточного ромбического антиферромагнетика типа $\text{CaS}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с пространственной группой симметрии $D_{2h}^{(7)}$. В гамильтониане магнетика учитывались только магнон-магнонные и магнон-фононные взаимодействия. Для того чтобы максимально учесть симметрию магнетика и существенно упростить вычисления процессов релаксации, вводятся линейные комбинации фурье-компонент спинов подрешеток $s_{\alpha}(\mathbf{k})$ [9]. В спиновой части гамильтониана учитываются обменные и обменно-релятивистские взаимодействия между спинами подрешеток. В гамильтониане взаимодействия спиновой и фононной подсистем удерживались лишь обменные магнитоупругие взаимодействия, причем наряду с обычной магнитострикцией, которая сохраняется и в двухподрешеточной модели, в гамильтониане магнон-фононных взаимодействий, благодаря наличию инварианта вида $\hat{U}_{xz} \hat{L}_1 \hat{L}_2$, суще-

ствуют слагаемые обменного происхождения, не имеющих аналогов в рамках двухподрешеточной модели антиферромагнетика. В дальнейшем, релаксация обменных мод рассматривается в коллинеарной фазе. Для того, чтобы воспользоваться методом вторичного квантования, развитым для многоподрешеточных магнетиков в [9], необходимо неприводимые комбинации спинов подрешеток выразить через операторы s_{μ} , каждый из которых записан в своей собственной локальной системе координат с осью oz' направленной вдоль равновесного значения спина. Связь между неприводимыми комбинациями спинов подрешеток, записанными в системе координат кристалла и этими же комбинациями, но записанными в локальной системе координат L , осуществлялась при помощи матрицы перехода, компоненты которой определяются основными состояниями магнетика.

Дальнейшее рассмотрение процессов релаксации ограничивалось низкими температурами $T < T_N$. При этих температурах плотность спиновых возбуждений в магнетике всегда мала (спин-волновое приближение), что дает возможность при помощи преобразования Голштейна-Примакова выразить операторы L , через операторы спиновых отклонений подрешеток. В данном конкретном случае, в разложении Голштейна-Примакова удерживаются не только линейные члены обобщенных неприводимых комбинаций операторов спиновых отклонений, но и кубические слагаемые по операторам спиновых отклонений подрешеток. В кубических слагаемых операторы спиновых отклонений подрешеток, также как и в линейных членах разложения Голштейна-Примакова, выражались через обобщенные неприводимые комбинации операторов спиновых отклонений, что дает возможность, благодаря неявному учету симметрии магнетика, алгоритмизировать процедуру вычисления амплитуд процессов взаимодействия. В полученном гамильтониане, путем диагонализации, с помощью $u-v$ преобразования Боголюбова-Габелюва, квадратичных слагаемых содержащих обобщенные линейные комбинации операторов спиновых отклонений подрешеток, вводятся магнонные операторы. После всех преобразований структура магнетонного гамильтониана схематически описывается выражением:

$$H_m = \sum_{k\mu} c_{k\mu} \hat{s}_{k\mu}^x \hat{s}_{k\mu}^y + \sum_{1,2,3,4} \left\{ \hat{1}_{(1,2,3,4)} \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 \hat{O}_4 \right\}$$

$$+ I_2(1,2,3,4) \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{A}_3 \hat{A}_4 + I_3(1,2,3,4) \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \hat{A}_4 + \left. \begin{aligned} &+ R_1(1,2,3,4) \hat{O}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \hat{A}_4 + R_2(1,2,3,4) \hat{A}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 \hat{O}_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\xi_{k\mu}^+$, $\xi_{k\mu}$ - операторы рождения-уничтожения магнов в ветви μ с волновым вектором k ; $\epsilon_{k\mu}$ - энергия магнов; операторы \hat{A}_σ и \hat{O}_σ вида $\xi_{\sigma}^{\pm} \xi_{\sigma}^{\pm}$ условно соответствуют акустическим и обменным магнам. σ - совокупный индекс $k\mu$. Амплитуды I в (1) пропорциональны обменным интегралам, а R содержит в виде множителя неоднородное взаимодействие Дзялошинского-Мория. Отметим важную особенность второго слагаемого в фигурных скобках (1). В него входят либо четыре оператора рождения, либо четыре оператора уничтожения, либо пара операторов рождения и пара операторов уничтожения. Причем в последнем случае один из операторов пары оператор обменного магнана, а второй акустического. Таким образом это слагаемое, описывающее в обменном приближении взаимодействие подсистем обменных и акустических магнов, содержит лишь процессы рассеяния обменных магнов на акустических. Поскольку квадратичная часть гамильтониана магнофононных взаимодействий содержит дополнительный малый множитель v/c , описывающий нелинейность магнитной структуры, то в дальнейшем смешивании магнонных и фононных состояний будем пренебрегать.

Часть гамильтониана, описывающего процессы магно-фононных взаимодействий имеет структуру:

$$H_{mp} = \sum_{123} \left[\lambda_{12}^{(\sigma)} \hat{A}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 + \lambda_{11}^{(\sigma)} \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 + \lambda_{111}^{(\sigma)} \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 + \lambda_{12}^{(\sigma)} \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{O}_3 \right] \quad (2),$$

где $\lambda^{(\sigma)}$ - обменные магнитоупругие постоянные; фононные операторы \hat{O}_σ вида $\hat{b}_\sigma^+ \hat{b}_\sigma$, $\hat{b}_\sigma^+ \hat{b}_\sigma$ - операторы рождения и уничтожения фононов, σ - совокупный индекс номера фононной ветви ν и его импульса q . Релятивистская часть гамильтониана магнитоупругих взаимодействий нами не учитывалась, поскольку ее структура совпадает с приведенной в (2). Учет диполь-дипольных взаимодействий приводит к трехчастичным магно-магнонным процессам. Структура части гамильтониана, обусловленная диполь-дипольными взаимодействиями определяется выражением:

$$\hat{H}_{d-d}^{(2)} = \sum_{1,2,3} \left[\eta_{123}^{(1)} \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 + \eta_{123}^{(2)} \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{A}_3 + \eta_{123}^{(3)} \hat{O}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 + \eta_{123}^{(4)} \hat{O}_1 \hat{O}_2 \hat{O}_3 \right]. \quad (3)$$

Здесь η -константа диполь-дипольных взаимодействий.

Во втором параграфе первой главы на основе гамильтониана (I-3) анализируются времена жизни обменных магнов. Как следует из вышеприведенного гамильтониана, релаксация обменных магнов определяется двумя группами процессов. Первая группа - это процессы, которые могут идти при нулевой температуре. К ним принадлежат: I- процесс распада обменного магнона на три акустических, амплитуда этого процесса пропорциональна константе неоднородного взаимодействия Дзялошинского-Мория, и процесс II, обусловленный обменными магнитоупругими взаимодействиями, - распада обменного магнона на акустические магнон и фонон. Вторая группа процессов - это процессы, идущие при $T=0$. Это следующие процессы: III - слияния обменного и акустического магнов с образованием двух акустических магнов, амплитуда которого пропорциональна константе неоднородного взаимодействия Дзялошинского-Мория, IV - рассеяния обменного магнона на акустическом, V - рассеяния обменного магнона на обменном. Амплитуды приведенных процессов рассеяния обусловлены обменными взаимодействиями между магнонами. И наконец процесс VI, обусловленный обменными магнитоупругими взаимодействиями, - слияния обменного и акустического магнов, с образованием фонона. Учет магнитного диполь-дипольного взаимодействия даёт малые добавки во все, рассмотренные выше, процессы, обусловленные магнон-магнонными взаимодействиями и приводит к трехмагнонному процессу VII - распада обменного магнона на два акустических. Гамильтониан (I-3) в принципе допускает возможность возникновения и других процессов релаксации, однако, они запрещены законами сохранения.

В третьем параграфе первой главы проводится сопоставление теории и эксперимента. Исходя из экспериментальных данных определяются главные механизмы релаксации обменных мод в сист. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, соответствующие процессам распада обменного магнона на три акустических, и на акустический фонон и акустический магнон. Имеется удовлетворительное количественное (по порядку

величины) согласно экспериментального и теоретического значения полуширины линии антиферромагнитного резонанса обменных мод.

В соответствии с экспериментом, полученные времена жизни однородных обменных магнонов не зависят от величины внешнего магнитного поля. Теоретически это объясняется тем, что в главных процессах распада образуются акустические магноны с большими волновыми векторами, энергия которых линейно зависит от поля. Вследствие этого обстоятельства магнитное поле выпадает из законов сохранения энергии этих процессов, а также не входит в $u-v$ - коэффициенты квазичастиц, участвующих в распаде.

В четвертом параграфе первой главы рассматривается температурная перенормировка частот обменных мод, которая возникает преимущественно за счет процессов рассеяния обменных магнонов на акустических. Сопоставление с экспериментом показало, что в целом предложенный механизм температурной перенормировки частот обменных мод правильно описывает наблюдаемое понижение частот обменных мод с повышением температуры.

Вторая глава диссертации посвящена изучению спиновой теплоемкости четырехподрешеточных антиферромагнетиков. Рассматриваются и сравниваются магнонные теплоемкости антиферромагнетиков, как с трехмерным магнитным упорядочением так и с квазидвумерным характером магнитного упорядочения. Вычисляются и сравниваются магнонные плотности состояний указанных антиферромагнетиков. Для антиферромагнетиков с трехмерным характером магнитного упорядочения типа $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, вклады в магнонную теплоемкость от акустических и обменных спиновых ветвей существенно различны. От обменных спиновых ветвей этот вклад в основном носит зейнштейновский характер, а от акустических магнонов, для температур выше их энергий активации, он пропорционален T^3 . В области температур, где работает спин-волновое приближение вклад в спиновую теплоемкость от акустических магнонов значительно превышает величину аналогичного вклада от обменных спиновых волн. Что касается квазидвумерного антиферромагнетика, типа La_2CuO_4 , то вклады в спиновую теплоемкость этого магнетика от обменных и акустических спиновых ветвей, в области температур больших энергий активаций магнонов, одинаковы и пропорциональны T^2 . Из-за большой величины интеграла внутрислое-

вого обмена в La_2CuO_4 такая зависимость сохраняется до температур порядка 100К.

В заключительном параграфе второй главы обсуждается возможность выделения магнного вклада из общей теплоемкости для квазидвумерного антиферромагнетика, квазидвумерность которого носит чисто магнитный характер. Для этого вычисляется фононная теплоемкость магнетика La_2CuO_4 по известным значениям скоростей звука [14] и предельных частот оптических фононов [15]. При этом оказалось, что область температур где фононная теплоемкость пропорциональна T^3 является достаточно узкой, около 6К. Установлено, что вследствие различной температурной зависимости магнного и фононного вкладов на кривой $c(T)/T^3$ (где $c(T)$ суммарная магнная и фононная теплоемкости кристалла) возникает пик в области начала магнного спектра. Полученный теоретический результат находится в хорошем согласии с экспериментом.

Заключительная третья глава диссертации посвящена изучению основных состояний и частотно-полевых зависимостей антиферромагнитного резонанса в четырехподрешеточном ромбическом антиферромагнетике типа $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в полях направленных вдоль осей симметрии перпендикулярных к легкой оси ox кристалла и превышающих обменные поля.

В случае ориентации поля $H \parallel oz$ изучена область сильного взаимодействия обменной и акустических мод одинаковой симметрии и показано, что наименьшее расстояние между частотами пропорционально постоянным взаимодействия Дзялошинского - Мориа и недиагональным компонентам тензора g -фактора. При ориентации поля $H \parallel ox$ имеется случайное вырождение частот обменных и акустических мод, однако, взаимодействия между ними не возникает поскольку эти моды принадлежат разным типам симметрии.

Фазовый переход в спин-флип фазу, при котором основной вектор антиферромагнетизма L_z обращается в ноль, является фазовым переходом второго рода, поскольку он сопровождается уменьшением магнитной элементарной ячейки вдвое. При этом число мод магнитного резонанса также уменьшется вдвое, однако, по аналогии с ферромагнетиком можно по-прежнему говорить о наличии одной обменной и одной акустической мод, различая их по типу прецессии намагниченностей подрешеток. В спин-флип фазе,

реализующейся в поле $n = 1$ оз, между спинами двух подрешеток имеется слабая неколлинеарность, не исчезающая даже в бесконечно больших полях. Спин-флип фаза, возникающая в поле $n = 1$ оу, является строго коллинеарной.

Получена высокочастотная восприимчивость антиферромагнетика во всех фазах и рассмотрена интенсивность поглощения на обменной моде в коллинеарной магнитной структуре. Показано, что эта интенсивность пропорциональна величине взаимодействия Дзялошинского-Мория. Таким образом имеется возможность поглощения на обменных модах даже в коллинеарных магнитных структурах в ситуациях, когда это взаимодействие существует, но при данной ориентации спинов не проявляет себя (не приводит к подгату спинов подрешеток).

В конце этой главы обсуждаются особенности формирования величины взаимодействия Дзялошинского-Мория в различных антиферромагнетиках.

Основные результаты и выводы работы вынесены в заключение и формулируются следующим образом:

1. В настоящей работе развит, предложенный ранее, метод вторичного квантования гамильтониана многоподрешеточного магнетика. Показано, что использование симметрии многоподрешеточного магнетика, путем введения линейных комбинаций операторов спиновых отклонений при переходе к представлению Голстейна-Примакова, позволяет алгоритмизировать процедуру вычисления амплитуд нелинейных процессов.

2. Построена микроскопическая теория релаксации обменных спиновых волн. Исходя из экспериментальных данных, определены главные механизмы релаксации обменных мод в $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, соответствующие процессам распада обменного магнона на три акустических и на акустический магнон и акустический фонон. Показано, что амплитуды данных процессов отличны от нуля только для многоподрешеточных магнетиков, и в согласии с экспериментом не зависят от величины внешнего магнитного поля. Получено удовлетворительное количественное (по порядку величины) согласие экспериментального и теоретического значений времени жизни обменных магнонов.

3. Показано, что температурная перенормировка частот обменных мод возникает преимущественно за счет процессов рассея-

ния обменных магновов на акустических вследствие более быстрого увеличения чисел заполнения последних с ростом температуры.

4. Для квазидвумерного антиферромагнетика La_2CuO_4 и антиферромагнетика с трехмерным характером магнитного упорядочения $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ вычислен вклад спиновых волн в теплоемкость этих кристаллов. Показано, что в трехмерных антиферромагнетиках наличие обменных магновов приводит к эффективному понижению суммарного магнонного вклада в области температур порядка энергий активации акустических магновов. Установлено, что в квазидвумерном антиферромагнетике La_2CuO_4 возможно обнаружение начала магнонного спектра по появлению пиков на температурной зависимости величины $\alpha(T)/T^3$ (где $\alpha(T)$ суммарная магнонная и фонная теплоемкость кристалла) в области низких температур, порядка энергий активации спиновых волн.

5. Рассмотрены основные состояния, частотно-полевые зависимости антиферромагнитного резонанса и тензор высокочастотной магнитной восприимчивости в четырехподрешеточном ромбическом антиферромагнетике в полях перпендикулярных легкой оси кристалла. Показано, что даже в коллинеарных структурах, и в ситуациях, когда взаимодействие Дзялошинского-Мория существует, но при данной ориентации спинов не проявляется (не приводит к подгибу спинов подрешеток) интенсивность поглощения на обменных модах определяется величиной этого взаимодействия.

Проведенные в работе теоретические исследования спиновой динамики многоподрешеточных ромбических антиферромагнетиков, полностью подтверждены экспериментальными результатами - количественное согласие по порядку величины, либо в целом неплохое качественное согласие с экспериментально наблюдаемыми и теоретически полученными зависимостями физических величин.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пашкевич Ю. Г., Соболев В. Л., Шахов В. В. Резонансные свойства четырехподрешеточного ромбического антиферромагнетика в полях перпендикулярных легкой оси. - ФТП, 1986, 12, №9, с. 962 - 971.

2. Еременко В. В., Звягин С. А., Пашкевич Ю. Г., Пешко В. В., Соболев В. Л., Шахов В. В. Зависимость частот обменных мод антиферромагнитного резонанса от температуры в $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. // ФТП. - 1988. - т. 30, №4, с.1231-1233.

3. Барьяхтар В. Г., Еременко В. В., Звягин С. А., Пашкевич Ю. Г., Пишко В. В., Соболев В. Л., Шахов В. В. Релаксация обменных спиновых волн в дигидрате хлорида меди. - Препринт ИМК-90 - 25. ВНИИ Монокристаллов АН Украины, Харьков, 1990 г., 32 с.

4. Барьяхтар В. Г., Еременко В. В., Звягин С. А., Пашкевич Ю. Г., Пишко В. В., Соболев В. Л., Шахов В. В. Ширина линии обменных мод магнитного резонанса в четырехподрешеточном ромбическом антиферромагнетике. // ЖЭТФ, 1991, т. 100, в. №(12), с. 1983-1909.

5. Блинкин В. А., Витебский И. М., Захаров А. А., Пашкевич Ю. Г., Соболев В. Л., Суетин А. В., Хлопкин М. Н., Шахов В. В. Исследование магнитного вклада в теплоемкость многоподрешеточных антиферромагнетиков La_2CuO_4 , Nd_2CuO_4 и $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ // Препринт ИМК - 31-92, Институт монокристаллов АН Украины, Харьков, 1992 г. 48 с.

6. Еременко В. В., Звягин С. А., Пишко В. В., Пашкевич Ю. Г., Шахов В. В. Резонансные свойства четырехподрешеточного антиферромагнетика. // ФНТ, 1992, 19, №3, с. 255-260.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Halperin B.I., Saslow W.M. Hydrodynamic theory of spin waves in spin glasses and other systems with noncollinear spin orientations. - Phys. Rev., 1977, B16, №5, p.2154-2164.
2. Барьяхтар В. Г., Витебский И. М., Яблонский Д. А. Симметрия и частоты магнитного резонанса в магнитоупорядоченных кристаллах. - ЖЭТФ, 1979, 76, №4, с. 1381-1391.
3. Барьяхтар В. Г., Еременко В. В., Науменко В. М., Пашкевич Ю. Г., Пишко В. В., Соболев В. Л. Обменные моды в антиферромагнитном $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. - ЖЭТФ, 1985, т. 88, №4, с. 1382 - 1394.
4. Звягин А. И., Кобец М. И., Криворучко В. Н., Степанов А. А., Яблонский Д. А. Магнитный резонанс и фазовые переходы в двумерном антиферромагнетике $(\text{NH}_4)_2(\text{CH}_3)_2\text{MnCl}_4$ // ЖЭТФ, 1985, - т. 89, № 6(12), - с. 2298-2317.
5. Степанов А. А., Пашенко В. А., Кобец М. И. Обменные моды в моноклинных двумерных антиферромагнетиках. // ФНТ, 1988, 14, №5, с. 550-557.
6. Данышин Н. К., Зельцер А. С., Попов В. А. Четырехподрешеточная модель двусосного антиферромагнетика и сопоставление ее с экспериментом // ФНТ, 1985, 11, №7, с. 768-785.

7. Зализняк И. А., Прозорова Л. А., Петров С. В. Магнитный резонанс в неколлинеарных гексагональных антиферромагнетиках CsNiCl_2 , CsMnBr_2 // ЖЭФ. 1990. 97, №1, с. 359-366.
8. Витебский И. М., Соболев В. Л., Чабанов А. А. Магнитная симметрия и спиновая динамика обменнеколлинеарных антиферромагнетиков со структурой CsNiCl_2 // ФНТ. 1990. 19, вып. II, с. 1428-1434.
9. Барьяхтар В. Г., Пашкевич Ю. Г., Соболев В. Л. Рассеяние света на магнонах и магнитооптические эффекты в многоподрешеточных магнетиках // ЖЭФ. -1983. - т. 85, №5 (II). - с. 1625-1637.
10. Vitebskii I.M., Yereimenko A.V., Pashkevich Yu.G., Sobolev V.L., Fedorov S.A. One-magnon light scattering in exchange-nonlinear Nd_2CuO_4 // Physica C. -1991. -v.178. -P.189-192.
11. Еременко В.В., Зягин С.А., Пашкевич Ю.Г., Пишко В.В., Соболев В.Л., Федоров С.А. Двухмагнонное поглощение и особенности спектра спиновых волн многоподрешеточных антиферромагнетиков // ЖЭФ. -1987, т.33, №6 (12), с.2075-2089.
12. Алистратов А. Л., Криворучко В. И., Степанов А. А., Яблонский Д. А. Двухмагнонное поглощение в четырехподрешеточном квазидвумерном релятивистском антиферромагнетике // Физ. Низк. температур. - 1988. - т. 14. - №4. - с. 374-385.
13. Дорошев В. Д., Криворучко В. Н., Савоста М. М., Шестаков А. А., Яблонский Д. А. Экспериментальное и теоретическое исследование температурной зависимости подрешеточной намагниченности La_2CuO_4 // ЖЭФ. 1992. т. 101, №1, с. 190-202.
14. Бурма Н. Г., Гайдук А. Л., Жерлицин С. В., Колобков И. Г., Филь В. Д., Панфилов И. В., Гесь А. П., Барыло С. Н., Жигунов Д. И. Упругие и магнитные свойства монокристаллов $\text{La}_2\text{CuO}_{4-\delta}$. // ФНТ. 1992, т. 18, №3, с. 247-254.
15. Pintschovius L., Pyka N., Rumiantsev A.Y., Reichardt W. et al. Lattice dynamical studies of HTSC materials. // Physica C, 1991, 185-189, p.156-161.

Подписано к печати 16.12.92. Объем I п. л. Зак. № 25
Тираж 100 экз. Бесплатно. Ротапринт. ИЭП АН Украины
340048 Донецк, ул. Университетская, 77

470637

AB 26.688