

чая аморфный кремний ускоренными ионами инертных газов, возникает обменное взаимодействие, приводящее к ферромагнетизму.

## 10.8. СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ

Строго параллельная ориентация спинов в ферромагнетике наблюдается лишь при 0 К. Такое расположение спинов соответствует минимуму энергии. Результирующая намагниченность при этом равна намагниченности насыщения  $\vec{J}_s$ . С повышением температуры ферромагнетика его энергия возрастает за счет появления «перевернутых» спинов. В отличие от *основного состояния* (при  $T=0$  К) состояние с «перевернутым» спином является *возбужденным*. Если соседние спины связаны взаимодействием вида (10.45), то поворот в обратную сторону одного спина требует затрат дополнительной энергии  $\Delta E \approx \approx 4 A S^2$ . Другими словами, из-за обменного взаимодействия состояние с перевернутым магнитным моментом в одном из узлов решетки является энергетически невыгодным. Соседние спины стремятся возратить «перевернутый» спин в исходное положение. Обменное взаимодействие приводит при этом к тому, что соседний спин переворачивается сам. По кристаллу пробегает волна переворотов спинов. Существование таких волн было установлено в 1930 г. Ф. Блохом. Сами волны получили название *спиновых*.

Возбуждения значительно меньшей энергии образуются в том случае, когда все спины поворачиваются лишь частично. Такая спиновая волна схематически изображена на рис. 10.12. Из рисунка видно, что спиновые волны представляют собой колебания относительной ориентации спинов в кристалле. Они сходны с упругими волнами в кристалле (фононами). Спиновые волны также квантованы. Квант энергии спиновой волны получил название *магнон*. При повышении температуры число магнонов возрастает, а результирующий магнитный момент ферромагнетика соответственно уменьшается. При малой плотности магнонов взаимодействие их друг с другом можно не

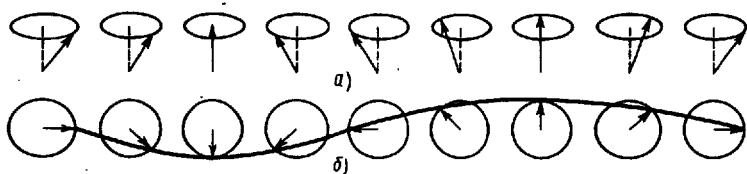


Рис. 10.12. Спиновая волна: а — вид цепочки спинов сбоку, б — вид сверху

учитывать и, следовательно, магноны можно считать идеальным газом. Газ магнонов, так же как и газ фононов, подчиняется статистике Бозе—Эйнштейна. Если известны статистические свойства магнонов, то можно найти зависимость числа возбуждаемых магнонов от температуры. Оказалось, что число магнонов растет с температурой пропорционально  $T^{3/2}$ . Соответственно пропорционально  $T^{3/2}$  убывает намагниченность ферромагнетика:

$$J(T) = J_s \left[ 1 - \beta \left( \frac{T}{\theta} \right)^{3/2} \right] \quad (10.49)$$

при  $T \ll \theta$ . Здесь  $J_s$  — намагниченность насыщения;  $\beta \approx 1$  — коэффициент.

Соотношение (10.49) называют *законом  $T^{3/2}$  Блоха*. Измерения температурных зависимостей намагниченности ферромагнетиков подтверждают справедливость (10.49).

Магноны, как и другие квазичастицы, вносят вклад в теплоемкость, в рассеяние электронов и т. п.

Подробное изложение теории спиновых волн приводится в кн.: Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1971.

## 10.9. АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ И ФЕРРИМАГНЕТИЗМ

Кроме ферромагнетиков существует большая группа магнитоупорядоченных веществ, в которых спиновые магнитные моменты атомов с недостроенными оболочками ориентированы антипараллельно. Антипараллельная ориентация спиновых магнитных моментов, как мы видели, возникает при отрицательном обменном взаимодействии ( $A < 0$ ). Так же, как и в ферромагнетиках, магнитное упорядочение имеет место здесь в интервале температур от 0 К до некоторой критической  $\theta_N$ , называемой *температурой Нееля*. Если при антипараллельной ориентации локализованных магнитных моментов результирующая намагниченность кристалла равна нулю, то имеет место *антиферромагнетизм*. Если при этом полной компенсации магнитного момента нет, то говорят о *ферримагнетизме*. Различные типы магнитного упорядочения иллюстрируются рис. 10.13. Наиболее типичными ферримагнетиками являются *ферриты* — двойные окислы металлов состава  $MO \cdot Fe_2O_3$ , где  $M$  — двухвалентный металл ( $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $F^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ).

Ферриты имеют кубическую структуру типа шпинели  $MgAl_2O_4$ . В элементарной ячейке содержатся 8 формульных единиц, т. е. 32 атома кислорода, 8 атомов двухвалентного металла  $M$  и 16 атомов трехвалентного железа. Атомы кислорода образуют плотную упаковку. Рассмотрим, например, железный феррит, или магнетит ( $FeO \cdot Fe_2O_3$ ). Восемь октаэдрических пустот в элементарной ячейке магнетита заняты трехвалентными