

или отсутствие (т. е. считать информацию), а также разрушать ненужные ЦМД. Исследования и разработки в данном направлении дают основание считать, что устройства с ЦМД будут служить основной элементной базой ЭВМ новых поколений.

10.11. МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Магнитный резонанс — это избирательное (резонансное) поглощение энергии переменного электромагнитного поля электронной или ядерной подсистемами вещества, находящегося в постоянном магнитном поле. Поглощение связано с квантовыми переходами между дискретными энергетическими уровнями, возникающими в этих подсистемах под действием постоянного магнитного поля. Ниже мы кратко рассмотрим два типа магнитных резонансов — *электронный парамагнитный резонанс* (ЭПР) и *ядерный магнитный резонанс* (ЯМР).

Электронный парамагнитный резонанс. Его наблюдают во всех веществах, в которых имеются неспаренные (нескомпенсированные) электроны. Для выяснения физической природы ЭПР рассмотрим изолированный атом (или ион), обладающий результирующим магнитным моментом. При наложении на

атом с полным моментом импульса \vec{j} внешнего магнитного поля H_0 происходит квантование магнитного момента атома. Каждый уровень с определенным квантовым числом j расщепляется на $2j+1$ подуровня с разными значениями магнитного квантового числа m_j (*зеemanовское расщепление*):

$$E_m = g \mu_B \mu_0 H_0 m_j. \quad (10.58)$$

Здесь g — фактор Ланде; $-j \leq m_j \leq j$. В простейшем случае, когда мы имеем дело с чисто спиновым моментом, $g=2$. Для орбитального момента $g=1$.

Расстояние между эквидистантными подуровнями

$$\Delta E_m = g \mu_B \mu_0 H_0. \quad (10.59)$$

Под действие переменного магнитного поля частоты ν между подуровнями возможны квантовые переходы. Правила отбора для магнитного квантового числа ($\Delta m_j = \pm 1$) допускают переходы только между соседними подуровнями. Таким образом,

$$h \nu = \Delta E_m = g \mu_B \mu_0 H_0. \quad (10.60)$$

Если частота ν такова, что условие (10.60) выполняется, наблюдается интенсивное поглощение энергии электромагнитного поля. Формула (10.60) представляет собой условие элементарного магнитного резонанса атома (или иона). Из (10.60) сле-

дует, что для полей H_0 , обычно используемых в экспериментах, когда $\mu_0 H \approx 1$ Тл, резонансная частота составляет примерно 30000 МГц, что соответствует длине волны $\approx 10^{-2}$ м.

Перейдем теперь от изолированной парамагнитной частицы к макроскопическому телу, содержащему большое число таких частиц. Здесь очень важным является не только то, что имеется много магнитных моментов, но и то, что они взаимодействуют между собой и с окружением. Эти взаимодействия приводят к установлению термодинамического равновесия, если оно, в силу каких-либо причин, окажется нарушенным. Внутренние взаимодействия в парамагнетике влияют также на вид энергетического спектра, возникающего под действием поля H_0 . Если бы такого влияния не было, то система энергетических уровней по-прежнему определялась бы формулой (10.58) и существовала бы только одна линия поглощения, определяемая соотношением (10.60). Однако у многих парамагнетиков, в особенности у тех, где магнетизм не является чисто спиновым, система магнитных подуровней перестает быть эквидистантной. Вследствие этого вместо одной линии поглощения возникает несколько. В этом случае говорят, что проявляется *тонкая структура спектра электронного парамагнитного резонанса*. Отметим также, что вследствие внутреннего взаимодействия могут изменяться правила отбора. Возможными становятся переходы не только между соседними зеемановскими уровнями. Все это значительно усложняет вид спектра ЭПР. На энергетический спектр большое влияние оказывают, кроме того, внутренние электрические поля, связанные с неоднородностью вещества, дефекты структуры, примеси и т. д.

Явление ЭПР было предсказано в 1923 г. Я. Г. Дорфманом и экспериментально обнаружено в 1944 г. Е. К. Завойским. В настоящее время ЭПР используется как один из мощнейших методов изучения твердого тела. На основе интерпретации спектров ЭПР получают информацию о дефектах, примесях в твердых телах и электронной структуре, о механизмах химических реакций и т. д.

Ядерный магнитный резонанс. Он представляет собой избирательное поглощение энергии электромагнитного поля, связанное с квантовыми переходами в ядерной подсистеме вещества, находящейся в постоянном магнитном поле. Атомное ядро с отличным от нуля моментом I , помещенное в магнитное поле H_0 , также испытывает пространственное квантование. Каждый энергетический уровень расщепляется на $2I+1$ подуровня с энергиями

$$E = g_N \mu_N \mu_0 H_0 m_I. \quad (10.61)$$

Здесь $\mu_N = |e| \hbar / (4 \pi M)$ — ядерный магнетон Бора, M — масса ядра.

Поглощение энергии электромагнитного поля частоты ν наступает при выполнении условия

$$h\nu = g_N \mu_N \mu_0 H_0, \quad (10.62)$$

аналогичного условию (10.60) для ЭПР. Так как масса ядра примерно в 10^3 раз больше массы электрона, $\mu_N \approx 10^{-3} \mu_B$. Это приводит к тому, что резонансная частота ЯМР заметно меньше частоты ЭПР. В случае протона, например, в поле $\mu_0 H_0 = 1$ Тл, она составляет 42,6 МГц.

Метод ЯМР нашел наиболее широкое применение не в физике твердого тела, а в органической химии, где он успешно применяется в основном для определения структуры сложных молекул.

Кроме ЭПР и ЯМР в твердых телах могут существовать еще и другие типы магнитных резонансов: циклотронный резонанс, электронный ферромагнитный резонанс, электронный антиферромагнитный резонанс. Подробное описание этих явлений можно найти в книге С. В. Вонсовского.

ГЛАВА 11

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В 1911 г., проводя эксперименты по исследованию влияния примесей на остаточное сопротивление металлов, голландский физик Г. Камерлинг-Оннес обнаружил новое явление, получившее название *сверхпроводимости*. Изучая зависимость сопротивления ртути от температуры, он установил, что при очень низких температурах сопротивление образца обращалось в нуль. Сам по себе этот факт не казался неожиданным. Согласно существовавшим в то время представлениям, и как оказалось правильным, сопротивление очень чистых металлов определяется движением атомов. Поэтому в чистых металлах следовало ожидать плавного уменьшения сопротивления до нуля при понижении температуры до 0 К. Неожиданным оказалось то, что исчезновение сопротивления происходило скачком в температурном интервале в несколько сотых долей градуса. Как выяснилось впоследствии, такое «сверхпроводящее» состояние при низких температурах наблюдается примерно у половины металлических элементов, большого числа металлических соединений, у ряда полупроводников и оксидов.

Почти полвека обнаруженное Камерлинг-Оннесом явление оставалось загадкой. Микроскопическая теория сверхпроводимости была создана Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером только в 1957 г. Эта теория, получившая название теории БКШ, достаточно сложна, и в рамках настоящей книги мы приведем лишь краткий обзор физических идей, лежащих в ее основе, а также основные результаты. Прежде, однако, целесо-