

периодом и некоторые связанные с этим эффекты, «Письма в ЖЭТФ», 1972, т. 15, в. 4, с. 204; Гальперин Ю. М., Гуревич В. Л., Акустический пробой в металлах, «ЖЭТФ», 1977, т. 73, в. 5, с. 1873. Ю. М. Гальперин.

АКУСТИЧЕСКИЙ ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС (АЯМР) — поглощение энергии акустич. волн определ. частоты (избирает. поглощение фононов) системой ядерных спинов твёрдого тела, возникающее при совпадении частоты УЗ с интервалом между энергетич. уровнями ядерных спинов во внеш. магнитном или *внутрикристаллическом поле*. Это явление аналогично *ядерному магнитному резонансу* (ЯМР).

Известно неск. механизмов, ответственных за поглощение энергии акустич. волн ядерными спинами (ядерные *спин-фононные взаимодействия*). Так, для диэлектриков с ядерными спинами $I > 1/2$ наиболее существенны модуляция акустич. волной электрич. внутрикристаллич. поля и возникновение при этом переменных градиентов электрич. поля, взаимодействующих с квадрупольными моментами ядер. Для ядер с $I = 1/2$, у которых отсутствуют квадрупольные моменты, преобладает модуляция магн. диполь-дипольных взаимодействий. В парамагнетиках, где существует сильная связь электронов с ядрами, спин-фононное взаимодействие осуществляется посредством модуляции сверхтонких электронно-ядерных взаимодействий. Распространение акустич. волны в проводящей среде, содержащей свободные электроны, приводит к возникновению переменного магн. поля, воздействующего на ядерные спины. Однако при наличии достаточно большого квадрупольного момента в проводнике может действовать и квадрупольный механизм. Установлено, что спин-фононная связь усиливается за счёт дефектов, создающих дополнит. локальные градиенты электрич. поля на ядрах.

Изучение АЯМР проводится на УЗ-частотах 1—100 МГц двумя методами. В первом — непосредственно измеряется дополнит. *поглощение звука* в образце при резонансе. Коэфф. поглощения

$$\alpha_p = W \hbar \omega \cdot \Delta n / \rho V v^3,$$

где W — вероятность переходов между ядерными спиновыми уровнями n и m под действием УЗ с частотой ω , $\Delta n = N_n - N_m$ — разность населённости уровней, ρ и V — плотность и объём образца, v — скорость распространения УЗ-волны. Поскольку $\alpha_p \sim 10^{-6} - 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, то для достижения необходимой чувствительности используются те же методы, что и в ЯМР. Измерит. генератор, возбуждающий составной резонатор (образец + пьезопреобразователь), настраивается на одну из совб. частот резонатора. К образцу прикладывается магн. поле, к-рое медленно изменяется. Дополнит. поглощение акустич. энергии ядерной спин-системой проявляется в изменении амплитуды напряжения на выходе генератора при прохождении магн. полем значения, соответствующего АЯМР.

Во втором методе используется акустич. насыщение ядерных спиновых уровней. Резонансные акустич. колебания возбуждают переходы между спиновыми уровнями, а возникающее при этом изменение населённости уровней измеряется по интенсивности сигналов ЯМР. Вследствие акустич. возбуждения спиновых переходов разность населённости уровней, а следовательно, и интенсивность сигналов ЯМР уменьшаются в отношении

$$A/A_0 = (1 + W\tau_1)^{-1/r},$$

где A_0 — первонач. интенсивность сигнала, A — интенсивность сигнала при акустич. воздействии, τ_1 — время спин-решёточной релаксации, r ($\sim 1-3$) определяется характером распространения акустич. волн в образце.

Метод АЯМР обладает рядом дополнит. возможностей по сравнению с ЯМР, что связано с отличиями от ЯМР правилами отбора для переходов и особенно-стями ядерного спин-фононного взаимодействия. Наи-

более подробно методом АЯМР были изучены механизмы спин-фононных взаимодействий в разл. диэлектриках, что позволило усовершенствовать теорию внутрикристаллич. электрич. полей и вычислить ряд параметров кристаллич. решётки, напр. угл. характеристики хим. связей, градиенты электрич. полей на ядрах. Разработан способ оценки дефектности кристаллов на основе изучения спин-фононных взаимодействий и сравнения ширины линий АЯМР и ЯМР. Использование двойных магнитоакустич. резонансов позволило исследовать ряд новых явлений: динамич. поляризацию атомных ядер УЗ, акустич. многоквантовые переходы в многоуровневых неэквидистантных ядерных и электрош-ядерных системах. Высокая чувствительность позволяет применять двойные резонансы к изучению АЯМР ядер с малой концентрацией или слабым спин-фононным взаимодействием. Методом АЯМР были исследованы монокристаллы металлов, сплавов и низкоомных полупроводников. Такие исследования с помощью ЯМР ограничиваются только *глубинной скин-слоем*, в то время как использование АЯМР позволяет изучать образцы больших объёмов. Причём в ряде случаев для кристаллов с высокой проводимостью АЯМР является единств. методом исследования спиновых систем (напр., для ядер рения).

Очень большое резонансное поглощение звука ($\alpha_p \sim 1-10^2 \text{ см}^{-1}$) обнаружено на спинах магнитоактивных ядер в антиферромагнетиках типа «плоскость лёгкого намагничивания», что связано с сильным электронно-ядерным взаимодействием. Такие вещества являются модельными образцами для исследования различных нелинейных эффектов. Так, в условиях АЯМР был обнаружен солитонный характер распространения акустич. импульсов, что ранее наблюдалось в оптич. диапазоне.

Лит.: Шутитлов В. А., Ядерный магнитный резонанс на ультразвуке, «Акуст. ж.», 1962, т. 8, с. 383; Кессель А. Р., Ядерный акустический резонанс, М., 1969; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 4, ч. А, М., 1969, гл. 3; Магнитная квантовая акустика, М., 1977.

В. А. Голенищев-Кутузов.

АКУСТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ — см. *Импеданс акустический*.

АКУСТОКОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ — изменение концентрации носителей заряда вблизи поверхностей полупроводникового образца под действием распространяющегося в нём стационарного акустич. потока. Является прямым следствием увлечения носителей звуковой волной (см. *Акустоэлектрический эффект*).

АКУСТОМАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ — возникновение поперечной эдс под действием УЗ-волны в твёрдом проводнике, помещённом в магн. поле. А. э. обусловлен увлечением носителей заряда УЗ-волной (см. *Акустоэлектрический эффект*) и отклонением потоков носителей заряда магн. полем. При прохождении *ультразвука* через проводник с *биполярной* проводимостью (собств. *полупроводник, полуметалл*) возникают потоки электронов проводимости и дырок в направлении распространения УЗ. Под действием перпендикулярного к ним магн. поля эти потоки отклоняются в противоположные стороны. В результате возникает эдс (или ток в случае электрически замкнутого проводника) в направлении, перпендикулярном к магн. полю и к УЗ-потоку. Т. о., А. э. в биполярных проводниках аналогичен *фотомагнитоэлектрическому эффекту* с той разницей, что потоки электронов и дырок обусловлены не градиентом концентрации носителей, вызванным неоднородным освещением образца, а УЗ-волной.

В монополярных проводниках (примесных полупроводниках) происходит А. э. сложнее. Если в направлении УЗ-потока образец электрически замкнут, то имеет место акустоэлектрич. эффект Холла, отличающийся от обычного *Холла эффекта* тем, что продольный (диссипативный) ток создаётся не внеш.