

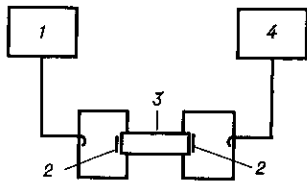
С. А. Альтшулером (1952). АПР можно рассматривать как акустич. аналог электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Передача энергии эл.-магн. колебаний парамагнитным частицам при ЭПР происходит непосредственно, в то время как передача акустич. энергии при АПР происходит посредством спин-фононного взаимодействия.

Известно неск. механизмов спин-фононного взаимодействия. В парамагнетиках наиб. существен механизм, при к-ром акустич. волна гиперзвуковой частоты модулирует *внутрикристаллическое поле*, а появляющееся при этом эл.-магн. поле той же частоты взаимодействует со спином. Поглощение энергии гиперзвуковой волны (фононов) возникает при совпадении частоты поля с разностью выраженных в частотах энергетич. уровней спина в приложенном магн. поле. Др. возможные механизмы спин-фононного взаимодействия — акустич. модуляция магн. диполь-дипольного (или обменного) взаимодействия между электронными спинами; модуляция тонкого или сверхтонкого взаимодействия электронных и ядерных спинов.

АПР наблюдается по изменению поглощения акустич. волны данной частоты в образце парамагнетика в зависимости от напряжённости приложенного магн. поля. Дополнит. поглощение звука характеризуется коэф. α_p

$$\alpha_p = 2W\hbar\omega\Delta n/\rho Vv^3,$$

где W — вероятность перехода между спиновыми уровнями n и m под действием гиперзвука с частотой ω , $\Delta n = N_n - N_m$ — разность населённости спиновых уровней, v — скорость распространения акустич. волны, V — объём образца, ρ — его плотность. Получение значений α_p и его зависимости от взаимной ориентации кристаллографич. осей образца и направленного магн. поля и волнового вектора УЗ-волны — цель измерений при исследованиях АПР.



Блок-схема спектрометра для изучения акустического парамагнитного резонанса.

Измерения поглощения звука обычно выполняются эхо-импульсным методом на частотах $\sim 10^{10}$ Гц. Для уменьшения основного решётчного поглощения звука, маскирующего эффект АПР, измерения проводят при гелиевых темп.-рах. Акустич. импульсы излучаются и принимаются пьезоэлектрич. плёночными преобразователями 2 (рис.), нанесёнными на противоположные плоскопараллельные торцы образца 3. Возбуждённые СВЧ-генератором 1 акустич. импульсы распространяются через образец, многократно отражаясь от его торцов. Серия эхо-сигналов поступает в приёмник 4, где и регистрируется. Для наблюдения АПР на частотах $10^{11} - 10^{12}$ Гц используются методы излучения и приёма упругих колебаний с помощью сверхпроводящих плёнок, нанесённых на торцы исследуемого образца. В таких устройствах электроны сверхпроводника переводятся в возбуждённое состояние за счёт электрич. или лазерного нагрева. Рекомбинация возбуждённого состояния сопровождается излучением монохроматич. фононов с частотой, определяемой шириной сверхпроводящей щели.

С помощью АПР определяют энергетич. спектры парамагнитных ионов, исследуют механизмы спин-фононного взаимодействия, изучают динамику электронно-ядерных взаимодействий и нелинейных процессов.

Как спектроскопич. метод АПР существенно дополняет и расширяет возможности ЭПР, поскольку при акустич. резонансе разрешены практически все переходы между энергетич. уровнями спинов, а в ЭПР — только магн. дипольные переходы. Наиболее важно изучение с помощью АПР энергетич. спектров ионов

с четным числом электронов (Cr^{2+} , Fe^{3+} и др.), для к-рых характер спектра определяется Яна — Теллера эффектом. Использование акустич. фононов с частотами 10^{12} Гц позволило определить особенности энергетич. спектров ионов с большим нач. расщеплением уровней во внутрикристаллич. поле. Исследовано большое число парамагнитных ионов, содержащихся в диамагнетиках, полупроводниках и магнетиках, имеющих синглетное, дублетное и триплетное орбитальные состояния.

С помощью АПР проведены прямые измерения компонент тензора электронного спин-фононного взаимодействия, тогда как с помощью ЭПР определяют только интегральные кинетич. характеристики спин-решётчного взаимодействия. Информацию об искажении симметрии локального внутрикристаллич. поля парамагнетика в результате наличия дислокаций, примесных центров и др. дефектов структуры даёт изучение формы линий АПР. На этом основан метод контроля качества кристаллов. Одноврем. возбуждение системы ядерных и электронных спинов акустич. и эл.-магн. полями создаёт дополнит. возможность исследования особенностей электронно-ядерных взаимодействий.

Развитие исследований по АПР и спиновой динамике привело к созданию квантовых усилителей и генераторов УЗ. Поскольку коэф. $\alpha_p \sim (N_n - N_m)$, то при создании инверсии населённости спиновых уровней он становится отрицательным. Благодаря этому в условиях инвертирования при достаточно сильной спин-фононной связи происходит усиление акустич. волн на частоте АПР.

Если усиление превосходит затухание упругих волн в кристалле, наступает самовозбуждение системы, сопровождающееся генерацией когерентных фононов. Увеличение мощности распространяющихся через образец акустич. импульсов в условиях АПР позволило обнаружить ряд новых явлений, имеющих место в когерентной оптике, — ультразвуковые спиновые эхо и самоиндуцированную прозрачность. Значительно большее время прохождения акустич. импульса через среду по сравнению с оптич. импульсом даёт возможность получить в этих случаях более точную информацию о механизмах взаимодействия волн разл. природы со средой. При исследовании АПР в кристаллах с параэлектрич. центрами обнаружено взаимодействие гиперзвука с параэлектрич. центрами — модуляция диполь-дипольных связей.

Лит.: Альтшулер С. А., Козырев Б. М., Электронный парамагнитный резонанс соединений промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; Такер Дж., Рэмтон и В., Гиперзвук в физике твердого тела, пер. с англ., М., 1975; Физика фононов больших энергий, пер. с англ., М., 1976; Магнитная квантовая акустика, М., 1977; Коппилем У. Х., Сабуров А. Р. В., Параэлектрический резонанс, М., 1982. В. А. Голенчиков-Кутузов.

АКУСТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ — искажение траекторий электронов в металле в магн. поле, сопровождающееся изменением их топологии, под действием интенсивной УЗ-волны. При внутризонном А. п. под действием периодич. деформации в звуковой волне энергетич. зона металла расщепляется на ряд подзон, с каждой из к-рых связаны свои траектории электронов во внеш. магн. поле. Межзонный А. п. возникает, когда квазиимпульс звуковой волны близок к миним. расстоянию между электронными траекториями в импульсном пространстве в отсутствие звука. Межзонный А. п. всегда проявляется в комбинации с *магнитным пробоем*: в присутствии звука переходы, связанные с магн. пробоем, происходят при существенно меньших магн. полях и могут приводить к изменению топологии электронных траекторий. А. п. приводит к появлению новых периодов осцилляций Шубникова — де Хааза (см. Шубникова — де Хааза эффект), а также к изменению плавной части тензора электропроводности в сильных магн. полях.

Лит.: Брандт Н. Б. и др., Изменение топологии поверхности Ферми в кристаллах с дополнительным длинным