

следуемого вещества (напр., комплексных диэлектрич. и магн. проницаемостей).

Данные, полученные методами С. с., весьма важны для решения ряда задач техники, связанных, напр., с изучением особенностей распространения субмиллиметрового излучения в атмосфере и локации, для анализа примесей в особо чистых веществах, для неразрушающего контроля. Принципиальное значение они приобретают в тех случаях, когда характеристич. частоты и энергии исследуемых явлений соответствуют именно этому диапазону (0,4—4 мЭВ). В физике твёрдого тела это, напр., ДВ-колебания решётки ионных и молекулярных кристаллов; изгибные колебания длинных молекул, в т. ч. полимеров и биополимеров; характеристич. частоты примесей в диэлектриках, в т. ч. в лазерных кристаллах; в полупроводниках это — энергии связей примесных комплексов, экситонов, зеэмановские и штарковские переходы возбуждённых состояний примесей; мягкие моды в сегнетоэлектриках; магн. резонансы (циклотронный, анти- и ферромагнитный); энергии щелей в сверхпроводниках. С. с. успешно применяют для исследования суперионных проводников и магн. полупроводников. При помощи С. с. получены новые данные о механизмах поглощения в кристаллах, динамике кристаллич. решётки, природе фазовых переходов в твёрдых телах (в частности, в сверхпроводниках), сегнетоэлектриках, упорядоченных магн. системах. С. с. применяется в методах диагностики плазмы, космич. радиоспектроскопии; в химии — для изучения строения молекул, механизмов хим. реакций, сил Ван-дер-Ваальса и т. д. Перспективно использование С. с. в биологии для изучения строения сложных биол. структур, резонансного взаимодействия с биол. объектами, особенно на уровне живой клетки, а также для определения результатов воздействия субмиллиметрового излучения на живой организм в целом. Особо надо отметить исследование методами С. с. воды как осн. компонента биол. объектов.

Лит.: Ирисова Н. А., Метрика субмиллиметровых волн, «Вестник АН СССР», 1968, в. 10, с. 63; Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, М., 1985.

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ — эл.-магн. волны, занимающие на шкале эл.-магн. волн промежуточное положение между СВЧ- и ИК-волнами. Их осн. характеристики: частота колебаний ν (Гц) $10^{11} \div 10^{12}$; длина волны λ (м) $10^{-3} \div 10^{-4}$; энергия фотона $h\nu$ (эрг) $6,6 \cdot 10^{-16} \div 6,6 \cdot 10^{-15}$; энергия eU (мэВ) $0,4 \div 4$.

В природных условиях С. в. практически не существуют, т. к. ничтожно малая доля энергии спектра излучения Солнца, приходящаяся на этот диапазон, не достигает поверхности Земли из-за поглощения атм. парами воды и молекулами кислорода.

В 1970—80-х гг. были разработаны монохроматич. генераторы С. в.: полупроводниковые умножители частоты, лампы обратной волны (ЛОВ), оротроны, гиротроны, твердотельные и газообразные лазеры; это стимулировало развитие техники измерений С. в. Для измерит. аппаратуры С. в. характерна уникальная возможность применения элементов, имеющих геом. размеры порядка длины волны, а также много больше и много меньше длины волны.

С. в. широко используются в фундам. и прикладных исследованиях физиками и химиками, значительные успехи субмиллиметровой спектроскопии. С. в. успешно применяются также в практич. медицине.

Особый интерес вызывают С. в. у биологов; как отмечалось выше, тепловое излучение Солнцем С. в. практически не достигает поверхности Земли, вследствие чего живые организмы в процессе своей эволюции не могли приспособиться к его воздействию, и эксперим. изучение влияния С. в. на живые организмы, особенно на человека, имеет фундам. значение для науки. В экологии С. в. применяются для прогнозирования состояния озонового слоя Земли (метод локации в верх. слоях атмосферы). Для практич. метеорологии большое значение имеют проводимые с космич. объектов на С. в. определения концентрации водяного пара.

Лит. см. при ст. Распространение радиоволн.

СУЛА — НАКАМУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ — косвенное обменное взаимодействие между ядерными спинами в магнитоупорядоченных магнетиках, осуществляемое через спины электронов незаполненных внутр. оболочек магн. атомов (ионов). Для ферромагнетиков было впервые рассмотрено Х. Сулом [1], для антиферромагнетиков — А. Накамурой [2]. Механизм такого взаимодействия обусловлен тем, что в результате сверхтонкого взаимодействия ядерный спин вызывает поляризацию поперечной компоненты суммарного спина незаполненной внутр. электронной оболочки атома S, к-рую посредством сверхтонкого взаимодействия «чувствует» другой ядерный спин. При низких темп-рах С.—Н. в. можно рассматривать как обмен спиновыми волнами между ядрами разл. атомов (испускание электронной спиновой волны одним ядром и её поглощение другим ядром). Гамильтониан косвенного С.—Н. в. для ферромагнетиков может быть записан в виде [3, 4]:

$$H_{SN} = \frac{1}{2} \sum_{f,g} U_{fg} I_f^+ I_g^-, \quad (1)$$

где

$$U_{fg} = -\frac{SA^2}{N} \sum_k \frac{\exp[ik(R_f - R_g)]}{h\omega_k}$$

— параметр косвенного взаимодействия, зависящий от расстояния $R_f - R_g$ между ядерными спинами I_f и I_g ; $h\omega_k$ — энергия спиновой волны с квазиимпульсом k ; N — число атомов; A — постоянная сверхтонкого взаимодействия; $I_f^+ = I_f^x \pm iI_f^y$, где I_f^x и I_f^y — поперечные компоненты ядерного спина. Наряду с взаимодействием (1) в магнетиках имеется и взаимодействие между продольными компонентами ядерных спинов I_f^z . Однако при темп-рах, не очень близких к темп-ре фазового перехода (темп-ре Кюри для ферромагнетиков и темп-ре Нееля для антиферромагнетиков), такое взаимодействие существенно слабее взаимодействия (1). С.—Н. в. (1) зависит от направления оси z (оси ферро- или антиферромагнетизма) и, следовательно, анизотропно. Эта особенность отличает его от изотропного косвенного обменного взаимодействия между ядерными спинами, осуществляемого через электроны проводимости (подобно РККИ-обменному взаимодействию). Т. к. взаимодействие (1) обладает достаточно большим радиусом [3], то благодаря ему появляется корреляция в движении ядерных спинов и может появиться упорядочение ядерных спинов, т. е. ядерные спиновые волны.

С.—Н. в. даёт вклад в ширину линии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и влияет на поперечную релаксацию системы ядерных спинов (см. Релаксация магнитная). В теории ЯМР взаимодействие между ядерными спинами можно учесть, воспользовавшись методом моментов [5]. Учёт взаимодействия (1) приводит к отличному от нуля второму моменту линии ЯМР для ферро- и антиферромагнетиков и даёт вклад в ширину линии ЯМР. При достаточной концентрации магнитоактивных ядер этот механизм уширения может быть основным.

Корреляция в движении ядерных спинов приводит к сдвигу частоты ЯМР, пропорциональному ср. ядерной намагниченности. Величина этого сдвига растёт с понижением темп-ры как $T_{ад}^{-1}$, где $T_{ад}$ — темп-ра системы ядерных спинов [6].

Эксперим. наблюдение ядерных спиновых волн впервые было проведено для слабоанизотропного кубич. антиферромагнетика $RbMnF_3$ [7]. Наблюдался также и обратный эффект сдвига частоты электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), обусловленный пропорциональным ср. ядерной намагниченности эффективным полем, действующим на электронные спины со стороны ядерных [8]. Указанные низкотемпературные сдвиги частот особенно существенны в антиферромагнетиках с анизотропией типа «лёгкая плоскость» ($MnCO_3$, $CrMnF_3$), а также в кубич. слабоанизотропных антиферромагнетиках ($RbMnF_3$, $KMnF_3$). В них при темп-рах вблизи 1 К наблюдается очень сильная связь