

Электроны металла – причина затухания звука

Возбудить звук в металле проще простого: например, можно стукнуть по его поверхности – побежит сгусток волн от поверхности в глубину. Если мы хотим возбудить звук определенной частоты, надо к поверхности металла приложить источник звука; обычно используют кварц, который колеблется под воздействием электромагнитных излучений.

Итак, по металлу бежит звуковая волна. Постепенно она затухнет. То расстояние, на котором ее амплитуда уменьшится в e раз, называется *длиной затухания*. Ее можно измерить, что и делается с большой точностью в самых различных условиях: изменяют температуру металла, вносят металл в магнитное поле, заставляют перейти в сверхпроводящее состояние и т.д., и т.п. Зачем нужны подобные эксперименты? Затем, что длина затухания очень чувствительна к «устройству» металла. А знать, как «устроен» металл, важно. Думаю этот тезис не вызовет возражений.

Звук в твердом теле – волна колебаний атомных частиц относительно их положений равновесия. В металле атомные частицы – ионы, окруженные «газом» электронов. Принимают ли участие электроны в звуковых колебаниях? Да. Ионы и электроны колеблются так, что равновесие между ними практически не нарушается: каждый элемент объема металла остается при этом нейтральным.

Акустические свойства электронных проводников – важная и интересная глава квантовой физики твердого тела. О ней хотелось бы рассказать подробно отдельно. Здесь мы ответим лишь на один вопрос: принимают ли электроны участие в поглощении звука металлом или нет? Ответ: принимают. И более того: при низких температурах и достаточно высокой частоте звука (когда он уже не звук, а ультразвук) электроны – главные поглотители звуковых волн. В данном случае лучше говорить – фононов.

Если условие (11) определяет возможность поглощения фонона электроном, то $\omega(k) = uk$, где u – скорость звука. Условие (11) принимает вид

$$-1 \leq \cos \theta = \frac{u}{v} + \frac{\hbar\omega}{2muv} \leq 1, \quad (13)$$

где v и m – скорость и масса электрона. Максимальная скорость электронов в металлах (так называемая фермиевская скорость) по «земным» масштабам велика⁵: $v \approx 10^6$ м/с, т.е. $u \ll v$. Это – важный факт. Запомним его. Теперь оценим квантовое слагаемое. Удобно его переписать так: $\frac{\hbar\omega}{2muv} \frac{u}{v}$. Скорость звука в металлах порядка $(2-5) \cdot 10^3$ м/с. Поэтому для частот $\omega < 10^{11}$ с⁻¹ квантовый член мал по сравнению с отношением u/v . Значит, для обычного звука и даже ультразвука квантовое слагаемое (опять!) очень мало. А так как скорость электрона значительно превышает скорость звука, то электрон «легко» поглощает фонон. Следовательно, изучая поглощение звука, мы можем узнать об электронах много интересного.

Затухание Ландау

Не нравится мне название этого раздела. Точнее, давно не нравится название явления, которое так названо. Особенно грустно оно звучало в те шесть лет после автомобильной катастрофы (1962 г.), в результате которой шесть лет затухала жизнь Ландау. Но ничего не попишешь. Язык (в данном случае – научная терминология) закрепил такое наименования.

Плазма уже упоминалась в статье. Плазма – нейтральная (в среднем) смесь заряженных частиц разных знаков. Например, положительных ионов и отрицательных электронов. Но нам придется познакомиться с еще одним термином: *бесстолкновительная* плазма. Этот термин не означает, что частицы плазмы никогда не сталкиваются. Бесстолкновительной плазму называют тогда, когда столкновений можно не учитывать. Например, если время между столкновениями значительно больше, чем период тех полей, поведение которых в плазме мы изучаем.

Для описания свойств бесстолкновительной плазмы были сформулированы в 1938 году специальные уравнения. Они получили имя своего создателя – их называют уравнениями Власова⁶. Хотя частицы (по предположению)

не сталкиваются, нельзя считать, что они не взаимодействуют. Электромагнитное поле зависит от движения заряженных частиц, а само поле влияет на их движение: возникает своеобразная зависимость всех от всех – коллективное взаимодействие заряженных частиц между собой. Эти уравнения оказались важным помощником в огромном числе задач физики плазмы. С их помощью можно было бы рассчитывать многое: от электронных приборов, составным элементом которых служит электронно-ионный пучок, до свойств ионосферы или межгалактического газа. Но... обратите внимание на частицу «бы». Дело в том, что при получении решений возникала большая трудность. Оказалось: электромагнитные волны с волновым вектором \vec{k} и частотой ω такими, что $\omega = \vec{k} \vec{v}$, где \vec{v} – скорость какой-либо из частиц плазмы, описать невозможно, или, точнее, приходилось использовать искусственный, не оправданный физической природой математический прием (физики-теоретики этого очень не любят!).

Частицы в плазме, как в любом газе, движутся хаотически с самыми различными скоростями. Распределение по скоростям зависит от температуры: в частности, чем плазма горячее, тем средняя скорость частиц больше. В очень холодной плазме, описываемой квантовыми законами, скорости электронов ограничены фермиевской скоростью (см. предыдущий раздел). Отсюда ясно, что пользоваться уравнениями Власова, не внося в них какую-то новую физическую идею, если не невозможно, то очень неудобно. Как только встречается волна, характеристики которой (ω и \vec{k}) удовлетворяют условию

$$\omega = \vec{k} \vec{v}, \quad (14)$$

амплитуду такой волны мы рассчитать не можем. Или, другими словами: мы не умеем рассчитывать такие волны, фазовая скорость которых меньше скорости какой-либо из частиц плазмы.

Новую физическую идею в физику плазмы внес Ландау в своей работе 1946 года. Ее, как большинство теорфизических работ, невозможно изложить, ограничиваясь теми скромными знаниями, которыми нам приходится довольствоваться. Но понять

⁵ См. статью М.Каганова «Как устроены металлы?» («Квант» №2 за 1997 г.).

⁶ А.А.Власов получил Ленинскую премию 1970 года за цикл работ по плазме.