

ДСЦР И ДОППЛЕРОН-ФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС В МОЛИБДЕНЕ

А.А.Галкин, Л.Т.Цымбал, А.М.Гришин, Т.Ф.Бутенко

Теоретически и экспериментально исследовано резонансное поглощение поперечных ультразвуковых волн в монокристаллах Мо в магнитном поле параллельном волновому вектору звука. Наряду с несколькими сериями доплер-сдвинутого акустического циклотронного резонанса обнаружен резонансный максимум поглощения, обусловленный возбуждением в металле доплерона.

1. Распространение ультразвуковых волн (УЗВ) в чистых монокристаллах металлов в магнитном поле при низких температурах сопровождается рядом эффектов резонансного взаимодействия звука с электронами проводимости. Они проявляются в том случае, когда длина свободного пробега электронов намного превосходит длину звуковой волны, а циклотронная частота Ω больше ν – частоты соударений электронов с рассеивателями.

В настоящей работе исследовались эффекты резонансного поглощения УЗВ двух типов. Первый выражается в виде резкого возрастания поглощения при таких значениях магнитного поля H , когда выполнено условие доплер-сдвинутого циклотронного резонанса (ДСЦР) [1]: $\omega - \bar{q}\bar{v} = N\Omega$, ω — частота, q — волновой вектор звука, v — скорость электронов, черта означает усреднение за циклотронный период; N — номер резонанса, разрешенный симметрией кристалла относительно направлений векторов q и H . Второй — появляется при возбуждении поперечным звуком собственной электромагнитной волны в металле-доплерона [2]. В этом случае увеличение поглощения УЗВ должно иметь место при совпадении длины волны доплерона с длиной волны звука [3, 4].

Эксперимент проводился на образцах, изготовленных из монокристаллических слитков Мо с отношением удельных сопротивлений при комнатной и гелиевой температурах порядка $6 \cdot 10^4$. Поперечная УЗВ частоты $30 + 400$ Мгц возбуждалась преобразователями из ниобата лития. Затухание УЗВ измерялось общепринятой импульсной методикой при температурах от 1,7 до 4,2К. Магнитное поле создавалось сверхпроводящим (до 60 кэ) и медным (до 5 кэ) соленоидами. Геометрия эксперимента: H параллельно q и основным кристаллографическим направлениям в Мо.

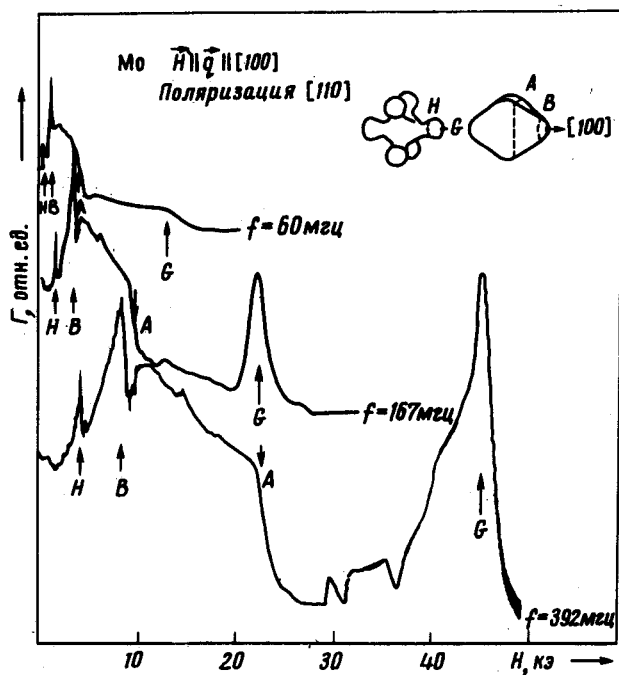


Рис. 1

2. Теоретический анализ для такой геометрии показывает, что в отсутствие магнитного поля поглощение УЗВ (Γ) носит бесстолкновительный характер $\Gamma = \omega s / v$ (s — скорость звука). В слабых полях зависимость плавной части Γ от H незначительна. С ростом поля бесстолкновительное поглощение поперечной УЗВ i -й группой электронов сменяется малым столкновительным затуханием, когда $\Omega > qv_{i, max}$. В связи с этим в сильных полях, при $\Omega > qv_{max}$, суммарное поглощение быстро уменьшается до величины $\Gamma \approx \nu s^2 / v^2$. Качественно эта картина подтверждается экспериментально.

3. На рис. 1 приведены типичные зависимости $\Gamma(H)$ для геометрии $q \parallel H \parallel [100]$. Со стороны больших полей наблюдается мощный пик поглощения, обусловленный возбуждением доплеронной волны. Его амплитуда быстро увеличивается с ростом частоты звука. Оценки показывают, что в максимуме $\Gamma_{max} \sim \omega^2 H^4$. С увеличением ω максимум сдвигается в область больших значений H . По положению максимума удается восстановить спектр доплерона (рис. 2, б). В сильных полях доплерон прижимается к прямой линии, соответствующей ДСЦР электронов с максимальным смещением вдоль H за циклотронный период, $(2\pi\hbar)^{-1}(\partial S / \partial P_H)_{ext} = 0,915 \text{ \AA}^{-1}$. По-видимому, эта доплеронная мода формируется электронами из окрестности опорной точки G на "шишке" электронного "валета" ферми-поверхности Mo .

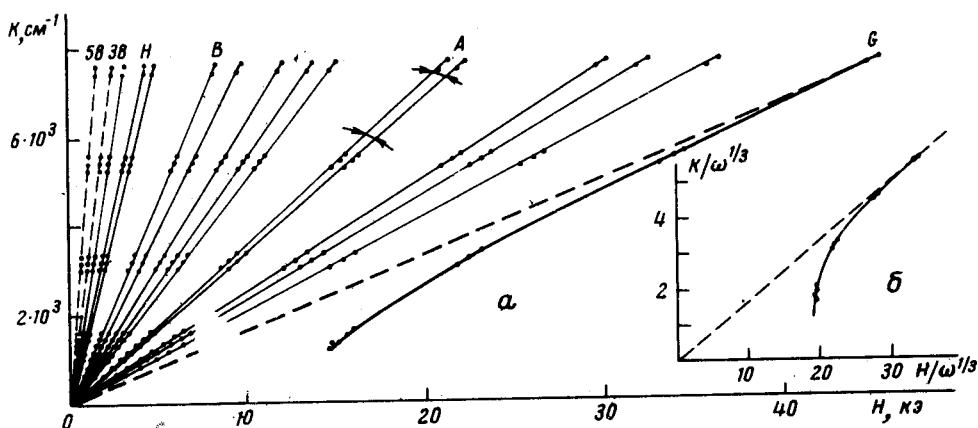


Рис. 2

С уменьшением ω спектр доплерона все больше отклоняется от прямой, амплитуда доплерон-фононного резонанса падает, и на частотах ниже 50 МГц он уже практически неразличим на фоне столкновительного поглощения. Это связано с резким увеличением собственного затухания доплерона $\text{Im}q \approx \nu\Omega^3/q^3v^4$ при малых q . Отметим, что в месте зарождения доплерон-фононный резонанс имеет несимметричную форму. Он похож на ступеньку из-за того, что невысокий и широкий пик накладывается на уменьшающуюся с ростом H монотонную часть Γ . Любопытно, что доплерон-фононный резонанс не сопровождается со стороны меньших полей соответствующим ДСЦР собственного затухания звуковой волны. Это свидетельствует о том, что ДСЦР электронов опорной точки G является слишком слабым, чтобы привести к заметной особенности прямого поглощения УЗВ электронами, хотя и достаточно силен для создания доплеронной моды.

4. В слабых магнитных полях на рис. 1 видны пики ДСЦР поглощения УЗВ электронами с меньшими экстремальными смещениями вдоль H за циклотронный период. Они проявляются на фоне относительно большого бесстолкновительного поглощения. С ростом ω их максимум линейно перемещается в сторону больших H . Как видно из рис. 2, наблю-

дается по меньшей мере 10 отдельных ветвей ДСЦР. Мы не станем сейчас детально обсуждать картину поглощения. Идентификации ветвей и подробному сравнению теории с экспериментом будет посвящено отдельное сообщение. Обратим внимание на следующие обстоятельства. Самые большие по величине пики обусловлены поглощением УЗВ электронами почти параболической окрестности опорной точки B дырочного октаэдра $(2\pi\hbar)^{-1}(\partial S/\partial P_H)_{ext} = 0,169\text{Å}^{-1}$, и электронами сечения H , $(2\pi\hbar)^{-1}(\partial S/\partial P_H)_{ext} = 0,89\text{Å}^{-1}$. Определяемые по наклону ветвей ДСЦР величины $(\partial S/\partial P_H)_{ext}$ согласуются с измеренными ранее в Мо из радиочастотного размерного эффекта [5]. Заметим, что носители сечения A дырочного октаэдра с максимальным смещением давали в эксперименте [5] мощные осцилляции размерного эффекта. Настоящие измерения показывают (см. рис. 1), что амплитуда их ДСЦР невелика. Дело в том, что сечение A ($P_H \approx 0,2 P_F$) близко к центральному сечению ($P_H = 0$) дырочного октаэдра и компоненты деформационного потенциала (пропорциональные P_H) для этой группы носителей малы.

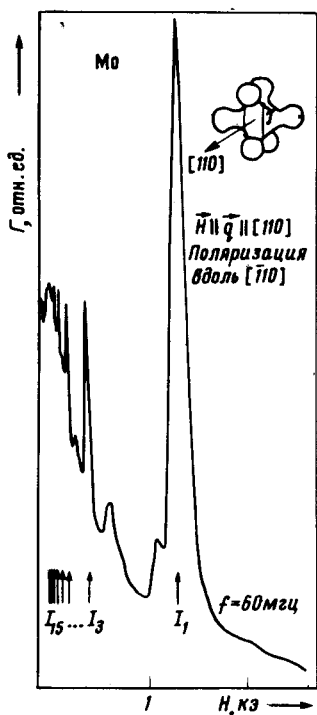


Рис. 3

На рис. 3 приведена запись ДСЦР при $q \parallel H \parallel [110]$. Здесь видна серия мощных импульсов (вплоть до 15 гармоники). Она соответствует сечению I_1 на теле электронного вала. Для него $(2\pi\hbar)^{-1}(\partial S/\partial P_H)_{ext} = 0,216\text{Å}^{-1}$. Проявление ДСЦР не в виде одиночных пиков, а серий, связано с тем, что траектории движения электронов в плоскости $\perp H$ отличаются от окружностей. Номер N в условии ДСЦР возникает как раз из-за разложения в ряд Фурье поперечных компонент скорости элект-

тронов. Из сравнения рисунков 1 и 3 видно, что амплитуда кратных ДСЦР от сечения I уменьшается с номером заметно медленнее, чем для других групп резонансных электронов. Это связано с почти прямоугольной формой сечения I . В соответствии с выводами теории в обеих геометриях наблюдались лишь нечетные гармоники ДСЦР.

Допплеронные моды вблизи описанных ДСЦР в настоящем эксперименте обнаружены не были. Это по-видимому, объясняется тем, что они должны существовать (в отличие от G -доплерона) в области сильного бесстолкновительного поглощения. Сложность их наблюдения связана с тем, что спектры доплеронов прижаты к линиям ДСЦР и для их регистрации необходимы более высокие частоты звука.

5. Таким образом, магнитоакустические исследования дают достаточно полную картину ДСЦР в металлах. Они являются конструктивной методикой изучения спектра доплеронных возбуждений. В отличие от исследования доплерон-фононного резонанса по данным радиочастотного эффекта [4], в акустических экспериментах резонанс проявляется в чистом виде, а не в форме небольших изменений амплитуды доплеронных осцилляций поверхностного импеданса. При анализе экспериментальных данных здесь также не возникает специфической для размерного эффекта проблемы разделения доплерона и эффекта Гантмахера — Канера. В то же время, различные доплеронные моды по разному проявляются в обеих методиках, поэтому магнитоакустические и размерные эксперименты взаимно дополняют друг друга.

В заключение авторы выражают благодарность профессору Э.А.Канеру за полезные обсуждения.

Донецкий

физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
1 декабря 1976 г.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Украинской ССР

Литература

- [1] Э.А.Канер, В.Г.Песчанский, И.А.Привороцкий. ЖЭТФ, 40, 214, 1961.
- [2] D.S.Falk, B.Gerson, J.F.Carolan. Phys. Rev., B1, 407, 1970; О.В.Константинов, В.Г.Скобов. ФТТ, 12, 2768, 1970.
- [3] L.Г.Тсымбал, Т.Ф.Вутенко. Sol. St. Com., 13, 633, 1973.
- [4] С.В.Медведев, В.Г.Скобов, Л.М.Фишер, В.А.Юдин. ЖЭТФ, 69, 2267, 1975.
- [5] Л.Т.Цымбал, А.Н.Черкасов, В.Т.Витчинкин, Ю.Д.Самохин, В.А.Мишин. Тезисы докладов НТ-19, Минск, М-9, 1976.