

## О РАЗДЕЛЕНИИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО И ВОЛНОВОГО ТИПОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ

А. А. Галкин, Л. Т. Цымбал, А. Н. Черкасов,

С помощью ультразвуковой методики в работе впервые (на примере вольфрама) одновременно наблюдаются и разделены эффекты баллистического и волнового проникновения электромагнитного поля в металл, обусловленные доплер-сдвинутым циклотронным резонансом одной и той же группы носителей на поверхности Ферми. Выявлены особенности проявления обоих типов возбуждений, отражающие различие их взаимодействия со звуком.

Внешнее электромагнитное поле может обусловить два типа электромагнитных возбуждений в металле, помещенном в перпендикулярное его поверхности магнитное поле  $H$ . Одно – баллистического типа, определяемое реальной формой траекторий отдельной группы носителей [1, 2], обладающей экстремальным смещением вдоль  $H$  за циклотронный период. Второе – волнового типа. В данной работе речь идет о волне, получившей название "доплерон" [3]. В ее формировании принимают участие все носители, однако, закон дисперсии волны решающим образом определяется той же самой выделенной резонансной группой носителей. С увеличением магнитного поля (увеличением  $k$ ) при  $\omega \ll \nu \ll \Omega$  спектр доплерона асимптотически приближается и, наконец, сливается со спектром баллистического возбуждения:

$$k = \Omega / \bar{v}, \quad (1)$$

и потому оба возбуждения вообще плохо различимы в эксперименте. (Здесь  $\omega$ ,  $k$  – частота и волновой вектор возбуждения,  $\bar{v}$  – средняя скорость дрейфа резонансной группы носителей вдоль  $H$ ,  $\Omega$  – циклотронная частота,  $\nu$  – частота соударений носителей). При малых  $k$

спектр доплерона:

$$k^2 = \frac{4\pi i \omega}{c^2} \sigma_{\pm}(k) \quad (2)$$

может существенно отличаться от (1). (Здесь  $\sigma_{\pm}(k)$  — нелокальная проводимость для циркулярно поляризованных компонент поля). Следовательно, в металле вблизи доплер-сдвинутого циклотронного резонанса должны сосуществовать два возбуждения, обладающие разными длинами волн.

Однако, в экспериментах по измерению радиочастотного импеданса металла наблюдается лишь одно из них, причем вопрос идентификации (какое именно возбуждение) на сегодняшний день не вполне ясен. При одновременном наблюдении обоих возбуждений их разделение и, тем более, исследование не представляется возможным. В ультразвуковых экспериментах до настоящего времени также наблюдалось в каждом конкретном случае лишь одно из возбуждений.

Вместе с тем исследование поглощения поперечного ультразвука в принципе позволяет доказать наличие в металле одновременно обоих типов возбуждений. Действительно, условие резонансного взаимодействия звука с электромагнитным возбуждением имеет вид

$$k_{\tau} = k \quad (3)$$

( $k_{\tau}$  — волновой вектор поперечной волны). При разных законах дисперсии (1) и (2) и заданной частоте ультразвука (т. е. заданном  $k_{\tau}$ ) условие (3) оказывается выполненным для двух типов возбуждений в разных магнитных полях, в которых должны наблюдаться одиночные особенности на зависимости коэффициента поглощения поперечного звука  $\Gamma$  от  $H$  [4, 5].

Такая возможность реализована в настоящей работе.

Эксперимент выполнен на монокристаллах вольфрама с отношением удельных сопротивлений при комнатной и гелиевой температурах  $1,5 \cdot 10^5$  при  $T = 4,2\text{K}$  в геометрии  $k \parallel H \parallel [001]$ . Использован импульсный ультразвуковой спектрометр в диапазоне частот  $5 + 700$  МГц.

Мы воспользовались измеренным в вольфраме на радиочастотах [6] спектром доплерона, который обусловлен мощной резонансной группой носителей, локализованной вблизи сечения  $A$  дырочного октаэдра в III зоне (рис. 1). Этот спектр экспериментально восстановлен в широкой асимптотической области, где совпадает со спектром (1) соответствующего баллистического возбуждения. Это позволяет построить последний с высокой точностью, ибо в координатах  $(k, H)$  он имеет вид прямой, проходящей через начало координат (рис. 1). На основании полученных данных определено и отмечено на экспериментальной зависимости  $\Gamma(H)$  (рис. 2) резонансное поле баллистического возбуждения.

Его местоположение показывает, что резонанс, обусловленный возбуждением баллистического типа, или доплер-сдвинутый акустический циклотронный резонанс, экспериментально наблюдается и имеет вид ступени — края поглощения [4], которая с повышением частоты приобретает форму асимметричного пика. Однако, резонансное поле всегда соответствует краю — резкому уменьшению коэффициента поглощения

звука. Из рис. 2 видно, что наряду с баллистическим наблюдается волновой, или доплерон-фононный, резонанс. Последний с момента своего возникновения при  $\omega/2\pi \approx 300$  мГц имеет форму пика (рис. 2), который с повышением частоты резко возрастает в соответствии с уменьшением затухания доплерона и формируется в ярко выраженный лоренцовский пик поглощения [7]. В обоих случаях форма линии согласуется с физикой явления [4, 7].

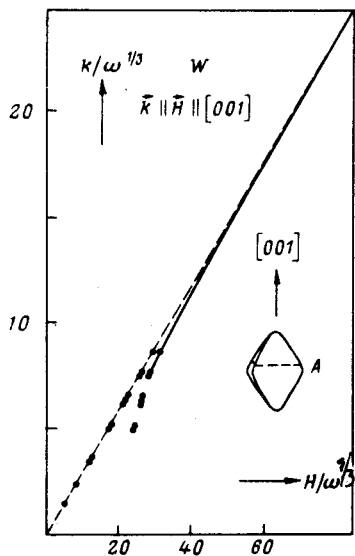


Рис. 1

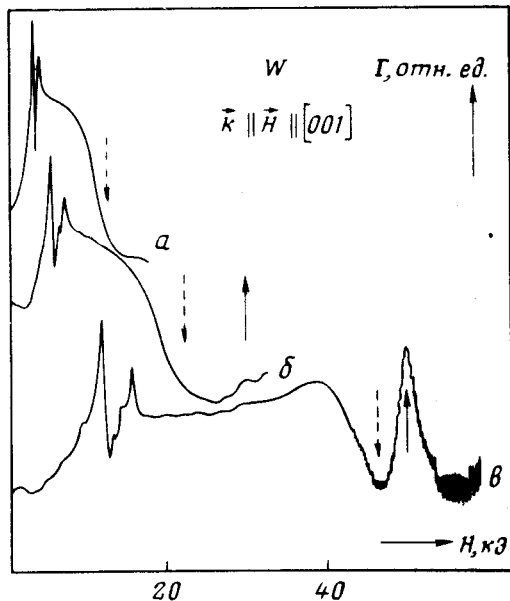


Рис. 2

Рис. 1. Спектры электромагнитных возбуждений в  $W$ , обусловленные носителями группы 'А' дырочного октаэдра. Сплошная кривая — доплеронный спектр [6]. Пунктирная прямая — восстановленный по доплеронному спектру баллистического возбуждения. ● — данные настоящего магнитоакустического эксперимента

Рис. 2. Серия экспериментальных кривых: пунктирными и сплошными стрелками указано местоположение резонансных особенностей баллистического и волнового возбуждений соответственно. а —  $\omega/2\pi = 160$  мГц, б —  $\omega/2\pi = 295$  мГц, в —  $\omega/2\pi = 643$  мГц

Таким образом, впервые однозначно разделены оба типа проникающего электромагнитного возбуждения в металле, обусловленные одной и той же группой носителей, и экспериментально установлена возможность их одновременного существования. Доказано качественное отличие форм линий обоих резонансов, показано, что в рассматриваемой области магнитных полей волновому резонансу соответствует максимум  $\Gamma$ , тогда как баллистический резонанс находится вблизи минимума  $\Gamma$ . Полученные результаты обуславливают необходимость пересмотра правильности интерпретации предшествующих ультразвуковых экспериментов.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.Ф. Гантмахера за обсуждение работы и ценные советы, А.К.Дементенко – за техническую помощь.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
19 мая 1980 г.  
После переработки  
25 ноября 1980 г.

### Литература

- [1] В.Ф.Гантмахер, Э.А.Канер. ЖЭТФ, **45**, 1430, 1963.
  - [2] В.Ф.Гантмахер, Э.А.Канер. ЖЭТФ, **48**, 1572, 1965.
  - [3] Л.М.Фишер, В.В.Лаврова, В.А.Юдин, О.В.Константинов, В.Г.Скобов. ЖЭТФ, **60**, 759, 1971.
  - [4] T.Kjeldaas . *Phys . Rev.*, **113**, 1473, 1959.
  - [5] L.T.Tsymbal, T.F.Butenko . *Sol . Stat . Comm.*, **13**, 633, 1973.
  - [6] Т.Ф.Бутенко, В.Т.Витчинкин, А.А.Галкин, А.И.Гришин, В.А.Мишин, Л.Т.Цымбал, А.Н.Черкасов. ЖЭТФ, **78**, 1811, 1980.
  - [7] С.В.Медведев, В.Г.Скобов, Л.М.Фишер, В.А.Юдин. ЖЭТФ, **69**, 2267, 1975.
-