

ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ГАЛИИ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

П.А.Безуляк, Н.Г.Бурма

Как впервые отмечено в работе Кулика [1], в металлах в приближении квадратичного закона дисперсии при $\omega\tau \gg 1$, $q \perp H$ в сильных магнитных полях, таких, что $q r_H \ll 1$, должен наблюдаться эффект значительного (10 + 20%) изменения скорости продольного звука. Здесь ω , q – соответственно частота и волновой вектор звука, r_H – радиус орбиты электрона в магнитном поле H , τ – время релаксации электронов. Этот эффект связан с тем, что закон дисперсии продольных фононов в значительной степени определяется экранирующим действием электронного газа [2–4].

Качественно влияние магнитного поля на изменение скорости продольного звука можно объяснить следующим образом. В приближении простой теории диэлектрического экранирования Хартри и модели желе закон дисперсии продольных фононов выражается известной формулой Бома – Ставера [2]

$$\omega^2(q) = \Omega_p^2 / \epsilon(q),$$

где Ω_p — плазменная частота ионов решетки, $\epsilon(q)$ — диэлектрическая проницаемость металла. В присутствии магнитного поля характер изменения скорости продольного звука в металле определяется поведением компоненты тензора $\epsilon_{11}(q, \omega, H)$ вдоль направления распространения звука. Как следует из работ [5,6], в условиях $\omega\tau \gg 1$, $q \perp H$ в сильном магнитном поле при $qr_H \ll 1$ имеет место аномально большое изменение ϵ_{11} , а отсюда и соответствующее изменение скорости продольного звука.

Необходимо отметить, что в приближении $\omega\tau \rightarrow \infty$ и $\beta = 0$ (β — отношение глубины скин-слоя в металле к длине волны звука) основные результаты работы [1] полностью совпадают с результатами, полученными в [5]. Согласно этих работ, относительное изменение скорости продольного звука при $q \perp H$ определяется выражением

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{z m \omega^2 \tau^2 v_F^2}{6MS^2(1 + \omega^2 \tau^2)} f(qr_H),$$

где z — число валентных электронов, v_F — фермиевская скорость электронов, M — масса ионов металла, $f(qr_H)$ — функция, характеризующая изменение $\Delta S/S$ в магнитном поле и имеющая следующие предельные значения: $f(0) = 0,2$; $f(\infty) = 0$.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные об изменении скорости продольного звука в металлах в магнитном поле дают $\Delta S/S$ на несколько порядков меньше максимального значения (10±20%), полученного в [1]. Для Al [7] при $\omega\tau \sim 10^{-2}$, $qr_H \ll 1$ и $q \perp H$ изменение скорости звука составляло $5 \cdot 10^{-5}$. В работе [8] условие сильного поля выполнено не было. Максимальное значение $\Delta S/S$ составляло при $\omega\tau \sim 1/3$, $qr_H \sim 1$ величину около $2 \cdot 10^{-4}$ для Cd и $8 \cdot 10^{-4}$ для Cu.

Нами были предприняты попытки обнаружить эффект значительного изменения скорости продольного звука. В качестве объекта исследования был выбран Ga, для которого удается обеспечить условие $\omega\tau \gtrsim 1$ уже на достаточно низких частотах ультразвука. Образцы Ga представляли собой цилиндры диаметром 11 мм и толщиной 1±2 мм. Ось цилиндра была близка к направлению [010] и совпадала с направлением q . Образец мог поворачиваться относительно направления H так, что H оставался в плоскости (010). Устройство наклона образца позволя-

ло плавно менять ϕ — угол отклонения q и Π от $\pi/2$. Измерения проводились на частотах 50, 100 и 200 мГц . Температура образца изменялась от 4,2 до 1,6°K откачкой паров He.

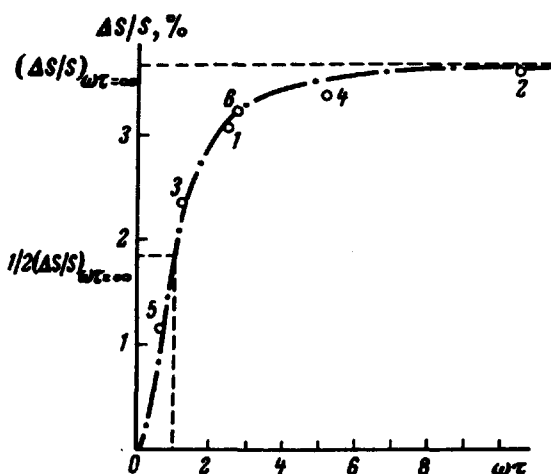


Рис. 1. Штрихпунктирная кривая — $f(\omega\tau) = \left(\frac{\Delta S}{S}\right)_{\omega\tau=\infty} \times \frac{(\omega\tau)^2}{1+(\omega\tau)^2}$. Точки: 1 — 200 МГц , $T = 4,2^\circ\text{K}$; 2 — 200 МГц , $T = 1,6^\circ\text{K}$; 3 — 100 МГц , $T = 4,2^\circ\text{K}$; 4 — 100 МГц , $T = 1,6^\circ\text{K}$; 5 — 50 МГц ; $T = 4,2^\circ\text{K}$; 6 — 50 МГц , $T = 1,6^\circ\text{K}$

На рис.1 приведена зависимость $\Delta S/S$ от $\omega\tau$ при $\text{H} \parallel [001]$ и $qr_{\text{H}} \ll 1$. Построение этой зависимости производилось следующим образом. Точки 5, 3, 1 соответствуют $\Delta S/S$ на частотах соответственно 50, 100 и 200 мГц при $T = 4,2^\circ\text{K}$. Для нанесения точек 6, 4, 2, отвечающих $\Delta S/S$, полученному на тех же частотах при $T = 1,6^\circ\text{K}$, требовалось знать, во сколько раз увеличивается время релаксации при откачке. Отношение $\tau_{1,6^\circ\text{K}}/\tau_{4,2^\circ\text{K}}$ определялось на частоте 50 мГц . При этом использовалось то обстоятельство, что точки 5, 3, 1 хорошо ложатся на теоретическую кривую [5]. Полагая, что точка 6 лежит на этой же кривой, находим $\tau_{1,6^\circ\text{K}}/\tau_{4,2^\circ\text{K}} = 4,3$.

Масштаб по $\omega\tau$ определялся из соотношения $(\Delta S/S)_{\omega\tau=1} = 0,5 (\Delta S/S)_{\omega\tau \rightarrow \infty}$, следующего из [5]. Найденное таким способом максимальное значение $\omega\tau$ при $\omega/2\pi = 200 \text{ мГц}$ и $T = 1,6^\circ\text{K}$ равнялось 10,4. Видно, что в полном соответствии с [1,5], $\Delta S/S$ испыты-

вает насыщение. Это дает основание считать, что максимальное значение $\Delta S/S$, измеренное в эксперименте, близко к $(\Delta S/S)_{\omega r \rightarrow \infty}$.

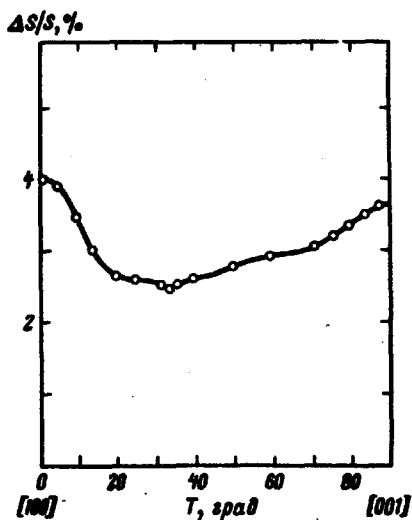


Рис. 2

Ориентационная зависимость $\Delta S/S$ при $\omega r = 10,4$ и $qr_H \ll 1$ приведена на рис.2. При изменении направления H в плоскости (010) от

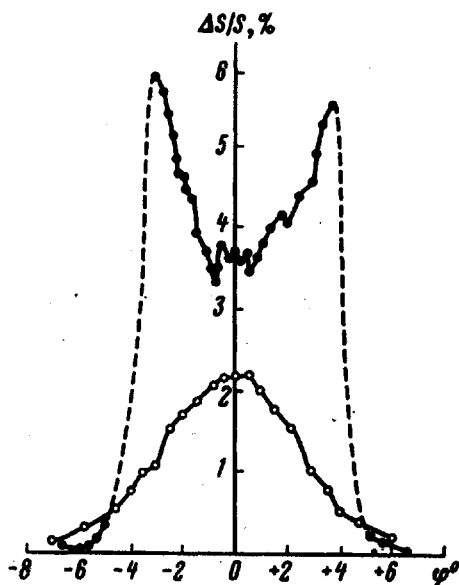


Рис. 3. —•—•— соответствует $\omega r = 10,4$, —○—○— соответствует $\omega r = 1,2$

$H \parallel [100]$ до $H \parallel [001]$ $\Delta S/S$ изменялось от 2,5 до 4%, в то время как в приближении изотропного квадратичного закона дисперсии для Ga имеем $\Delta S/S = 15\%$. Такое расхождение связано, по-видимому, с тем, что реальная электронная структура Ga сложна и закон дисперсии в нем отличается от квадратичного.

В заключение необходимо отметить слабое изменение $\Delta S/S$ в довольно широком интервале углов ϕ , в то время как согласно [1] резкое уменьшение $\Delta S/S$ должно происходить уже при ϕ в несколько раз больших S/v_F , то есть при углах около 1° . Полученная в эксперименте зависимость $\Delta S/S$ от ϕ при $q r_H \ll 1$ приведена на рис.3. Видно, что при $\omega r = 10,4$ $\Delta S/S$ не только не уменьшается, а даже увеличивается в области углов ϕ вплоть до 4° , испытывая при этом ряд экстремумов. Для объяснения наблюдаемой зависимости предполагается проведение дополнительных экспериментов.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
27 октября 1969 г.

Литература

- [1] И.О.Кулик. ЖЭТФ, 47, 107, 1964.
- [2] D.Bohm, T.Staver. Phys. Rev., 84, 836, 1952.
- [3] Е.Г.Бровман, Ю.Каран. ЖЭТФ, 5, 557, 1967.
- [4] W.M.Shyu, G.D.Gaspari. Phys. Rev., 177, 1041, 1969.
- [5] S.Rodriquez. Phys. Rev., 130, 1778, 1963; 132, 535, 1963.
- [6] M.H.Cohen, H.J.Harrison, W.A.Harrison. Phys. Rev., 117, 937, 1960.
- [7] A.G.Beattie, E.A.Uehling. Phys. Rev., 148, 657, 1964.
- [8] B.G.Yee, I.Gavenda. Phys. Rev., 175, 805, 1968.