

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИИ ВЫДЕЛЕННЫХ ГРУПП НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В МЕТАЛЛЕ ИЗ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. Я. Бланк, А. Н. Васильев, Ю. П. Гайдуков

Предложен метод определения времен релаксации выделенных групп носителей тока при одновременном измерении амплитуд квантовых осцилляций скорости и затухания звука в металле. Определены времена релаксации дырок в третьей ( $\tau_1 = 2,5 \cdot 10^{-10}$  сек) и электронов в шестой ( $\tau_2 = 4 \cdot 10^{-10}$  сек) энергетических зонах олова.

Взаимодействие звуковых волн с электронами проводимости в металлах в магнитном поле проявляется, в частности, в существовании квантовых осцилляций затухания и скорости звука [1, 2]. Амплитуды квантовых осцилляций затухания и скорости звука связаны между собой, в общем случае, соотношениями типа Крамерса — Кронига, а в рассматриваемой в настоящей работе низкочастотной области — более простым соотношением, включающим время релаксации соответствующей группы носителей тока. Одновременные измерения амплитуд квантовых осцилляций скорости и затухания звука позволяют предложить метод определения времен релаксации  $\tau_i$  выделенных групп носителей тока в металле<sup>1)</sup>.

### Теория

Квантовые осцилляции скорости и затухания звука в металле могут быть описаны с помощью поляризационного оператора  $\Pi(\omega, \mathbf{q})$ , общее выражение для которого содержится в [2]. В случае распространения продольного звука поперек магнитного поля  $\mathbf{q} \perp \mathbf{H}$  могут быть выписаны следующие соотношения:

$$\omega = \omega_0(\mathbf{q}) \sqrt{1 + \Pi(\omega, \mathbf{q})},$$

$$\Pi(\omega, \mathbf{q}) = -2\zeta \frac{\Omega}{\epsilon_F} \sum_{n=\Phi}^{N=[\epsilon_F/\Omega]} \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} \frac{J_{\alpha}^2(qR_n)}{(x_n + x_{n-\alpha})} \frac{\alpha\Omega}{(\alpha\Omega - \omega + i\nu)}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  — безразмерная константа связи электрон-фононного взаимодействия,  $\epsilon_F$  — энергия Ферми,  $\Omega$  — циклотронная частота,  $\omega$  — частота звука,  $\nu = \tau^{-1}$  — частота столкновений электронов,  $J_n(x)$  — функция Бесселя номера  $n$ ,  $R_n = [(2n+1) \epsilon / eH]^{1/2}$  — радиус орбиты электрона на  $n$ -м уровне Ландау,  $x_n = [1 - (n + 1/2) \Omega / \epsilon_F]^{1/2}$  —  $z$  — проекция безразмерного им-

<sup>1)</sup> Определению времени релаксации электронов из нерезонансных магнитоакустических измерений посвящена работа Королюка и др. [3], в которой, однако, измерялось время релаксации, усредненное по всем группам носителей.

пульса электрона на уровне Ферми. Рассмотрение проводится в предположении изотропного закона дисперсии носителей тока. Учет произвольного спектра приведет лишь к умножению результата на численный множитель порядка единицы.

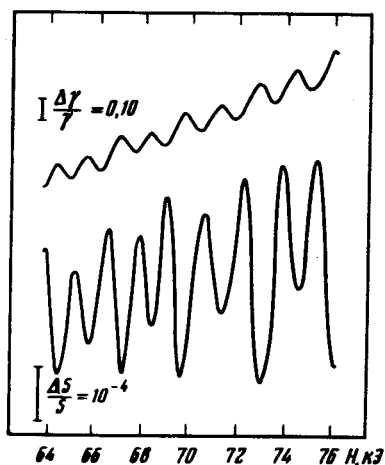
В рассматриваемой области низких частот  $\omega\tau \ll 1$  и сильных магнитных полей  $qR \ll 1$  в формуле (1) существенны малые значения  $\alpha$ . Разложим знаменатель (1) по малым  $\alpha$ , после чего получившаяся сумма по  $\alpha$  вычисляется точно. В результате получим

$$\Pi(\omega, q) = -\frac{\zeta}{4} \frac{q^2}{2m(\omega - i\nu)} \left( \frac{\Omega}{\epsilon_F} \right)^2 \sum_n \frac{n}{x_n^3}. \quad (2)$$

Применяя к (2) формулу суммирования Пуассона, находим

$$\Pi(\omega, q) = \zeta \frac{q^2}{2m(\omega - i\nu)} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Omega}{\epsilon_F} \right)^2 \sum_{j=1}^{\infty} \int_0^N \frac{n \cos 2\pi j n}{x_n^3} dn \right\}. \quad (3)$$

Здесь первое слагаемое соответствует дисперсии и затуханию звука в отсутствие магнитного поля [4], а второе описывает квантовые осцилляции. Формула (3) справедлива при выполнении условия  $\omega\tau_D \ll 1$ , где  $\tau_D$  — дингловское время релаксации, описывающее ширину квантовых осцилляций.



Квантовые осцилляции скорости и затухания продольного звука в образце  $n \parallel [100]$ .  $H \parallel [001]$ ,  $T = 4,2\text{K}$

Из формулы (3) следует простое соотношение, связывающее действительную и мнимую части  $\Pi(\omega, q)$ . В терминах относительного затухания  $\text{Im}\Pi_{\text{осц}} = \Delta\gamma/\gamma$  и дисперсии  $\text{Re}\Pi_{\text{осц}} = \Delta S/S$  звука оно записывается в виде

$$\left( \frac{\Delta S}{S} \right)_{\text{осц}} = -\omega\tau \left( \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right)_{\text{осц}}. \quad (4)$$

Отметим, что иное соотношение, связывающее амплитуды квантовых осцилляций скорости и затухания звука в той же области низких

частот получено в [5] на основе теории Родригеса [1]. Их формула, однако, оказалась неверной — в частности, она приводит к амплитуде осцилляций скорости звука, большей осцилляций затухания.

## Эксперимент

Для одновременного измерения амплитуд квантовых осцилляций скорости и затухания звука в настоящей работе собран "акустический" измерительный генератор. В основе действия этого прибора лежит явление бесконтактного возбуждения стоячих звуковых волн в пластине металла в магнитном поле [6]. Установление стоячих звуковых волн на толщине пластины сопровождается появлением резонансных особенностей на частотной зависимости поверхностного импеданса металла. Частота и амплитуда резонансных особенностей и, соответственно, частота и амплитуда генерации предлагаемого прибора определяются скоростью и затуханием звука в металле. Изменение этих параметров  $\Delta S/S$  и  $\Delta\gamma/\gamma$  измерялось в эксперименте. Методика измерений описана в [7].

Измерения амплитуд квантовых осцилляций скорости и затухания продольного звука проводились на частоте 1,7 МГц на монокристалле олова, имеющем форму диска диаметром 1,8 см и толщиной 0,1 см. Нормаль  $n$  к плоскости диска совпадала с осью симметрии второго порядка [100], качество образца характеризовалось отношением сопротивлений  $\rho_{300K}/\rho_{4,2K} = 8 \cdot 10^4$ . Измерения проводились при  $T = 4,2K$  в магнитном поле, параллельном плоскости диска.

На рисунке представлены экспериментальные записи квантовых осцилляций скорости и затухания звука в олове при  $H \parallel [001]$ . Частоты наблюдаемых осцилляций соответствуют экстремальным сечениям  $\delta_1^1$  и  $\delta_2^1$  [8]. Амплитуды квантовых осцилляций скорости и затухания звука от сечения  $\delta_1^1$  в поле  $H = 70$  кЭ равны, соответственно,  $(\Delta S/S)_{осц} = 3,7 \cdot 10^{-4}$  и  $(\Delta\gamma/\gamma)_{осц} = 0,15$ . Согласно формуле (4), это определяет время релаксации в третьей дырочной зоне  $\tau_1 = 2,5 \cdot 10^{-10}$  сек. При  $H \parallel [010]$  максимальную амплитуду имели осцилляции от сечения  $\tau_2^1$ , в поле  $H = 70$  кЭ они составили, соответственно,  $(\Delta S/S)_{осц} = 4,9 \cdot 10^{-4}$  и  $(\Delta\gamma/\gamma)_{осц} = 0,12$ . Это определяет время релаксации в шестой электронной зоне олова  $\tau_2 = 4 \cdot 10^{-10}$  сек. Точность измерения амплитуд квантовых осцилляций скорости и затухания звука равна 10%.

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
9 сентября 1980г.

## Литература

- [1] S. Rodriguez. *Phys. Rev.*, **132**, 535, 1963.
- [2] А.Я.Бланк, Э.А.Канер. *ЖЭТФ*, **50**, 1013, 1966.
- [3] А.П.Королюк, М.А.Оболенский, В.И.Белецкий. *ЖЭТФ*, **65**, 1963, 1973.
- [4] И.М.Лифшиц, М.Я.Азбель, М. И. Каганов. *Электронная теория металлов*. М., изд. Наука, 1971.

[5] K.R. Lyall, J.F. Cochran. Can. J. Phys., 49, 1075, 1971.

[6] В.М. Конторович, А.М. Глушук. ЖЭТФ, 41, 1195, 1961.

[7] А.Н. Васильев, Ю.П. Гайдуков, А.П. Перов. ПТЭ, №6, 1980 (в печати).

[8] J.E. Craven. Phys. Rev., 182, 693, 1969.

---