

ПЕРЕНОС ЗВУКА ЭЛЕКТРОНАМИ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Н. Г. Бурма, В. Д. Филь, П. А. Безуглый

Экспериментально показано, что при резонансном взаимодействии электронов со звуком переносимое звуковое поле сравнимо с основным сигналом.

Обнаруженный авторами ранее [1] перенос звука электронами проводимости свидетельствует о том, что электронная подсистема, отбирая энергию от звукового поля, возвращает ее решетке не только в виде тепловых фононов, но также и в виде когерентной волны, имеющей при определенных условиях заметную амплитуду. Из соображений взаимности следует, что чем сильнее взаимодействие какой-либо группы электронов со звуковой волной, тем большая часть поглощенной энергии будет когерентным образом возвращена решетке до того, как рассеяние на примесях и фононах нарушит этот процесс.

В условиях нерезонансного взаимодействия электронов со звуком, имеющего место при переносе звука по цепочке орбит и соответствующего эксперименту [1], амплитуда переносимого звука была относительно небольшой и составляла, в среднем по различным направлениям распространения и поляризацию в кристалле, около 10^{-2} амплитуды основного звука. В случае резонансного взаимодействия, когда коэффициент поглощения звука на резонансных электронах существенно превышает свое значение вдали от резонанса и становится преобладающим на фоне остальных электронов, следует ожидать, что амплитуда переносимого звука может быть весьма значительной и сравнимой с амплитудой основного звука даже при относительной малочисленности резонансных электронов.

1. В работе обнаружен перенос звукового поля в условиях акустического доплер-сдвинутого циклотронного резонанса (ДСЦР) на электронах открытых орбит в галлии высокой чистоты. Условие резонанса в этом случае имеет вид [2]

$$\bar{q}\bar{v} \pm \omega = \frac{2\pi n}{T}; \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

где q , ω — волновой вектор и циклическая частота звука, \bar{v} — средняя скорость электронов вдоль q ; T — период открытой орбиты, знак "—" соответствует электронам, летящим вдоль q ; знак "+" — в противоположную сторону.

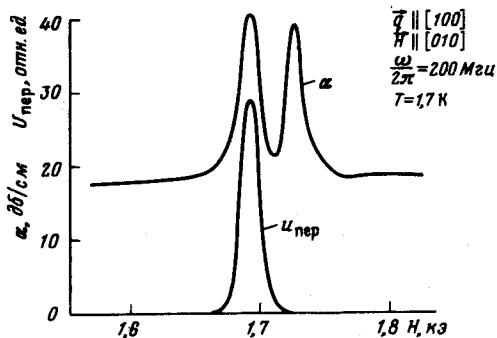


Рис. 1

На рис. 1 представлены зависимости от магнитного поля амплитуды переносимого звукового "предвестника"¹⁾ $U_{\text{пер}}$ и коэффициента поглощения звука α в условиях ДСЦР вблизи $n = 3$. Как и следовало ожидать, "предвестник" связан с электронами, летящими вдоль звука. Изменение фазы "предвестника" в пределах ширины линии ДСЦР оказалось значительным (около 4π) и для первых четырех значений n было примерно одинаковым.

На рис. 2 представлено отношение амплитуд "предвестника", переносимого электронами на расстояние x и регистрируемого на конце образца длины $L = 4$ мм, и основного сигнала в условиях резонанса также на выходе образца, в зависимости от x (кривая 1). Как видно, амплитуда "предвестника" в условиях ДСЦР даже несколько превышает амплитуду основного импульса после прохождения последним образца.

Зависимость амплитуды "предвестника" от x при выполнении (1) можно представить в виде

$$U_{\text{пер}} = AU_0 e^{-\alpha_{\text{рез}} x} e^{-x/l} e^{-(\alpha_M + \alpha_{\text{рез}})(L-x)} (L-x), \quad (2)$$

где A — коэффициент, по порядку величины близкий к коэффициенту поглощения звука, U_0 — амплитуда основного сигнала в начале образца, α_M — монотонная часть коэффициента поглощения вблизи резонансного значения магнитного поля, $\alpha_{\text{рез}}$ — резонансная добавка к коэффициенту поглощения звука, l — длина свободного пробега электронов вдоль q .

¹⁾ Термин "предвестник" нужно понимать несколько условно, так как переносимое звуковое поле в обсуждаемом случае распространяется с фермиевской скоростью на весь образец в отличие от [1], где переносимый звуковой импульс в данный момент времени был локализован в ограниченной области пространства.

Третий сомножитель в (2) учитывает тот факт, что электроны на пути x непрерывно отдают энергию в виде когерентной звуковой волны, причем показатель экспоненты из соображений взаимности следует положить равным $\alpha_{рез}$; четвертый — количество таких электронов; в пятом сомножителе учтено, что расстояние $(L - x)$ перенесенный сигнал распространяется звуком.

Множитель $(L - x)$ описывает подкачку энергии в "предвестник" из основного импульса, проходящую непрерывно на всем звуковом пути [3].

Учитывая, что $U_0 e^{-(\alpha_M + \alpha_{рез})L}$ есть амплитуда $U_{вых}$ основного сигнала на выходе образца, из (2) получаем

$$\frac{U_{пер}}{U_{вых}} = A(L - x) e^{-x/l} e^{\alpha_M x}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что функция $y = U_{пер}/U_{вых}(L - x)$ должна быть экспонентой с показателем $(\alpha_M - 1/l)$. Функция $y(x)$ построенная по результатам эксперимента и приведенная на рис. 2 (кривая 2), действительно имеет вид экспоненты. Используя измеренное значение $\alpha_M = 2,05 \text{ см}^{-1}$, находим $l = 1,2 \pm 0,1 \text{ мм}$. С другой стороны, l можно определить по полуширине линии ДСЦР по формуле $\Delta H/H \approx 1/gl$ [2]. Эта оценка дает $l = 1,3 \pm 0,3 \text{ мм}$, что также подтверждает разумность представления переносимого звука в виде (3).

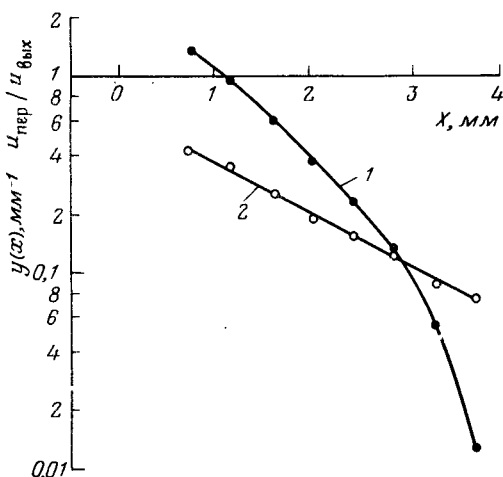


Рис. 2

Температурные измерения амплитуды "предвестника" дали для величины l^{-1} , определенной по формуле (3), кубическую зависимость от температуры.

В идейном отношении обсуждаемый перенос близок к аномальному проникновению поля (АПП) на "неэффективных" электронах обнаруженному в [4], однако там из-за наличия скин-слоя волновой вектор электромагнитной волны не имел определенного значения и АПП проявлялось в виде слабых осцилляций поверхностного импеданса плоскопараллельной пластины.

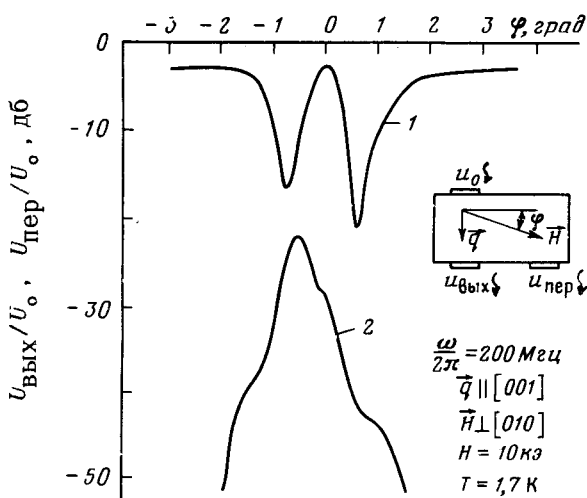


Рис. 3

2. Случай $n = 0$ в (1) соответствует "наклонному эффекту" [5]. Для его наблюдения магнитное поле должно быть отклонено от нормали к q на угол $\phi \sim s/v_F$ (s — скорость звука, v_F — фермиевская скорость). В этом случае взаимодействие также носит резонансный характер и наблюдается интенсивный вынос звукового поля вдоль H . Амплитуда основного сигнала (кривая 1) и переносимого (кривая 2) на выходе образца длиной 2,5 мм в зависимости от ϕ представлены на рис. 3; там также пояснена схема эксперимента. При оптимальных ϕ отличие двух сигналов ~ 8 дБ. Асимметрия кривой переноса связана с асимметричным расположением датчиков.

Амплитуда переносимого сигнала должна описываться выражением, сходным с (2), с тем, однако, отличием, что вынос звука и дальнейшее его распространение происходит по разным координатам. Величина l , определенная из данных по "наклонному эффекту" [6] ~ 3 мм, минимальное расстояние между датчиками ~ 2 мм, так что и в данном случае поле, выносимое на малое по сравнению с l расстояние, одного порядка с основным сигналом.

Физико-технический институт
 низких температур
 Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
 6 августа 1978 г.

Литература

- [1] В.Д.Филь, Ч.Г.Бурма, П.А.Безуглый. Письма в ЖЭТФ, **23**, 428, 1976.
- [2] Э.А.Канер. ЖЭТФ, **43**, 216, 1962.
- [3] Б.Н.Богачек, А.С.Рожавский, Р.М.Шехтер. Письма в ЖЭТФ, **23**, 432, 1976; ФНТ, **4**, 481, 1978.
- [4] А.А.Марьяхин, В.П.Набережных. Письма в ЖЭТФ, **3**, 205, 1966.
- [5] D.N. Reneker. Phys. Rev., **115**, 303, 1959.
- [6] А.П.Королюк, М.А.Оболенский, Р.Л.Фалько. ЖЭТФ, **59**, 377, 1970.