

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА

К.Н.Зиновьева

Исследовалась угловая зависимость коэффициента прохождения плоской звуковой волны из He^4 в вольфрам и золото при температурах $\sim 0,1 - 0,3\text{К}$. Показано, что акустические фононы с частотой 10 и 30 Мгц проходят в твердое тело лишь в области докритического угла и угла, соответствующего возбуждению релеевской волны. В критическом релеевском угле обнаружен предсказанный Андреевым резкий максимум, соответствующий резонансному поглощению звука поверхностью металла.

Температурный скачок на границе твердого тела с жидким гелием в условиях теплового потока впервые наблюдал Капица [1]. Явление было объяснено Халатниковым [2].

Несмотря на то, что природа "скачка Капицы" в настоящее время не вызывает сомнений, тем не менее в некоторых вопросах до сих пор нет полной ясности. В частности, не ясна причина, из-за которой реальный теплообмен происходит значительно лучше, чем это следует из теории.

При исследованиях скачка Капицы обычно измеряется интегральный эффект от прохождения теплового потока, усредненный по углам и частотам. Представляет интерес подробнее изучить угловую и частотную зависимости коэффициента прохождения звука $\alpha(\theta, \omega)$, поскольку именно от него зависит теплообмен между гелием и твердым телом.

Особый интерес представляет эффект резонансного поглощения звука поверхностью металла, предсказанный Андреевым [3] для случая, когда звук падает из гелия на поверхность под углом θ_1 , близким к критическому θ_0 и лежащему в области полного внутреннего отражения (θ_0 и θ_1 определяются соотношениями $\sin \theta_0 = c/c_t$, $\sin \theta_1 = c/v_{\text{ред}} = c/\xi c_t$, $0,87 < \xi < 0,96$, где c – скорость звука в гелии, c_t – скорость поперечного звука в металле, $v_{\text{ред}}$ – скорость поверхностных релеевских волн в металле).

При θ_1 в металле возбуждаются релеевские волны с острым максимумом, соответствующим резонансу падающей звуковой волны с волнами Релея. Если существует затухание звука на электронах проводимости, то для $l \gg \lambda$ (l – длина свободного пробега электрона, λ – длина волны звука в металле) при θ_1 энергия звука будет практически полностью поглощаться. В коэффициенте прохождения $\alpha(\theta)$ будет наблюдаться острый максимум высотой порядка единицы и шириной порядка $\rho c^2/Dc_t^2$, где ρ и D – соответственно плотности гелия и металла.

В настоящей работе была предпринята попытка обнаружить эффект резонансного поглощения звука поверхностью металла в измерениях угловой зависимости $\alpha(\theta)$. Для этой цели мы исследовали прохождение звука из He^4 в чистый монокристаллический образец вольфрама

$R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}} = 64000$ и поликристаллический образец чистого золота $R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}} = 36000$. Образец вольфрама имел форму диска, диаметром 8,6 мм и толщиной 1,5 мм. Звук падал на плоскую электрополированную поверхность образца. Нормаль к плоскости диска составляла с осями [100] и [101] углы 23 и 30°.

Измерения проводились в криостате растворения непрерывного действия, в отдельной камере, заполненной He⁴. Звук на частоте 10 и 30 Мгц излучался пьезокварцем на расстоянии ~ 1 см от образца. Кварц, X-срез (диаметр 15 мм) возбуждался от генератора Г4-18. Специальные измерения показали, что КПД излучения кварца составляет $\sim 50\%$, а расхождение пучка на основной частоте 10 Мгц не превышает 20°.

Поворот рамки с образцом на угол $\pm 20^\circ$ относительно нормали к кварцу осуществлялся при помощи тяги, выведенной в гелиевую ванну, и возвратной пружины. Движение рамки меняло емкость подсоединенного к ней переменного конденсатора, включенного в контур измерительного LC генератора. Угол падения звука определялся по частоте генератора. Чувствительность метода составляла ~ 1 секунду, ошибка в определении угла $\pm 10\%$.

Приемником поглощенной звуковой энергии служил германиевый термометр сопротивления, приклеенный к образцу с теневой для звука стороны проводящим клеем. Аналогичный термометр был помещен в жидкий He⁴.

Сопротивления термометра измерялись мостами переменного тока $S = 71$ и $S = 72$, изготовленными в ЧССР. Одновременные показания параметров на образце и в жидкости как функция угла падения звука записывались на двухкоординатном двухперьевом самописце "Bryans". Для этого на X-координату самописца подавалось напряжение с частотомера 43-38, а на координаты Y_1 и Y_2 напряжения с выходов мостов $S-71$ и $S-72$. Температура жидкости во время записи поддерживалась постоянной с точностью $2 \cdot 10^{-5}$ К. Эксперимент проводился следующим образом. При некоторой температуре T и максимальном угле $\theta \sim 20^\circ$ на кварц подавалось напряжение от генератора и производилась настройка кварца на резонанс. Далее включался стабилизатор температуры и при медленном изменении угла от $-\theta$ до θ и постоянной мощности звука производилась одновременная запись температуры образца и жидкости. Оба термометра имели малое время релаксации ($\tau \leq 1$ сек) и синхронно записывали любое тепловое возмущение в камере. Это позволяло исключить случайные флуктуации температуры.

На рис. 1 при $T = 0,28\text{K}$ дана одновременная запись температуры жидкого He⁴ (1) и температуры вольфрама (2) в зависимости от угла падения звука на частоте $f = 10$ Мгц и напряжении на кварце $U = 260\text{mV}$. По оси ординат слева отложен перегрев образца относительно He⁴, справа — коэффициент прохождения звука $\alpha(\theta)$, привязанный в точке $\alpha(0)$ к значению $\alpha_0 \approx 4\rho c / Dc_1$; $\alpha_0 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ ($\rho = 0,145$ г/см³, $c = 2,4 \cdot 10^4$ см/сек, $D = 19,2$ г/см³, $c_1 = 5,11 \cdot 10^5$ см/сек).

На рис. 2 представлены аналогичные кривые для частоты звука $f = 30$ Мгц при трех стабилизированных температурах жидкости. За-

пись температуры жидкости приведена лишь для $T = 0,21\text{K}$ (две другие аналогичны). Из рис. 1 и рис. 2 видно, что, во-первых, звук падающий на поверхность вольфрама, проходит в металл лишь в узком угле от 0 до 6° . Область углов $> 6^\circ$ соответствует полному отражению звука (хвост за пределы этого угла незначителен $\sim 2^\circ$). Во-вторых, при $\theta = 6^\circ$ наблюдается острый максимум, превосходящий α при $\theta = 0$ для $f = 30$ Мгц в три раза, для $f = 10$ Мгц в 1,3 раза. (Не исключено, что вблизи θ_1 α зависит от частоты).

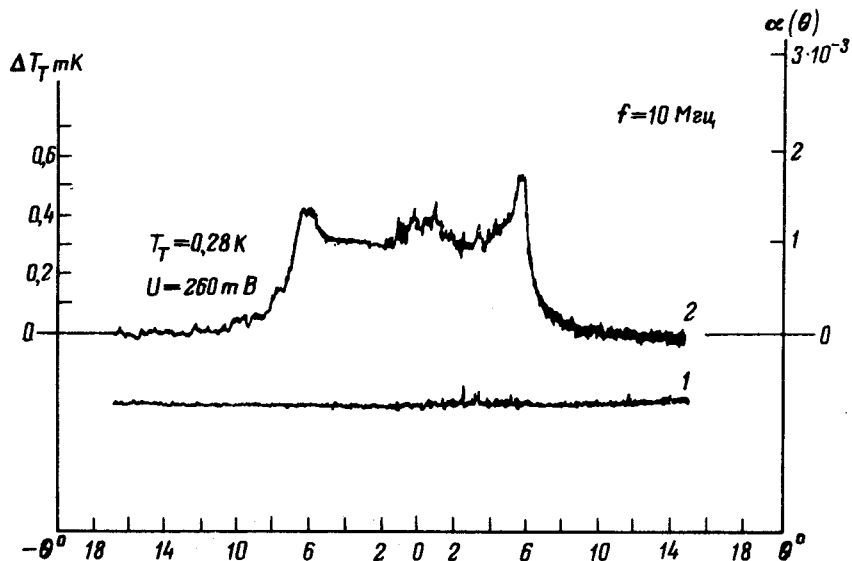


Рис. 1. Запись на двухкоординатном самописце перегрева вольфрама ΔT_T (кривая 2) звуком в зависимости от угла падения θ (шкала слева) $f = 10$ Мгц, $T = 0,28\text{K}$, напряжение на кварце $U = 80$ мВ. Шкала справа – коэффициент прохождения звука $\alpha(\theta)$. Кривая 1 – запись температуры жидкого He^4 $T = 0,28\text{K}$

Оценка θ_0 и θ_1 для вольфрама дает $\theta_0 = 5^\circ 16'$ и $\theta_1 = 5^\circ 36'$ ($c_t = 2,6 \cdot 10^5$ см/сек, $\xi = 0,935$), что в пределах точности согласуется с опытом и указывает на возбуждение при θ_1 релеевских волн (разная высота пиков при $-\theta_1$ и θ_1 объясняется, по-видимому, неэквивалентностью краевых условий).

При $\theta = 3^\circ$ (рис. 1) наблюдается небольшой провал в коэффициенте прохождения, соответствующий критическому углу для продольного звука ($\theta_c = 2^\circ 42'$).

Релеевский пик полностью не разрешается $\Delta\theta_1 \approx 30^\circ$, что можно объяснить большим расхождением ультразвукового пучка, размазывающим истинный узкий пик, не исключено, кроме того, дополнительное затухание звука в поверхностном слое на дислокациях [4 – 6]. Полученная зависимость $\alpha(\theta)$ дает возможность оценить относительный вклад релеевских волн в тепловой поток для акустических фононов. Умножив $\alpha(\theta)$ на $\sin\theta \cos\theta$ [2] и подсчитав площадь, ограниченную этой кривой, получим, что вклад релеевских волн для $f = 30$ Мгц составляет $\sim 50\%$.

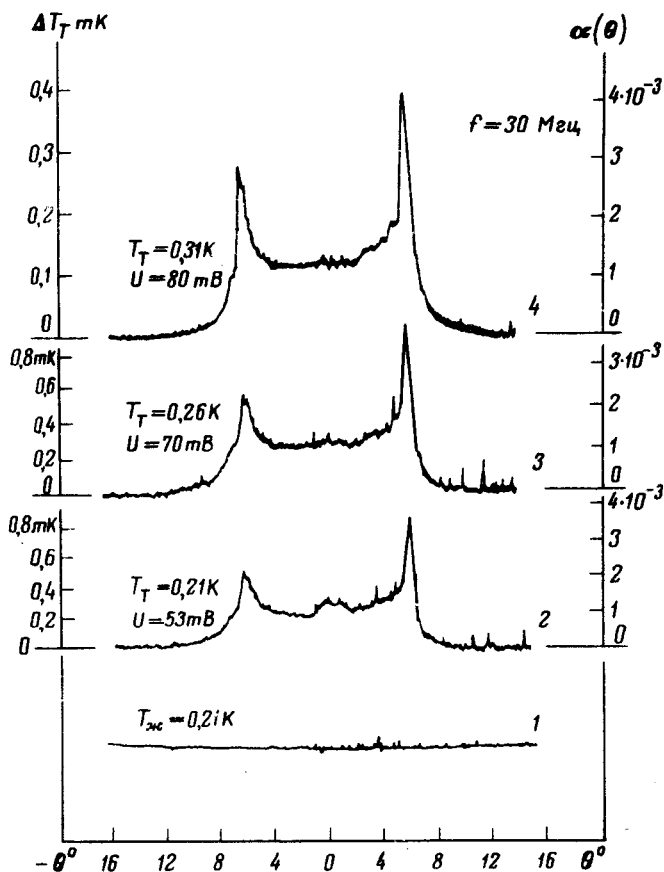


Рис. 2. Запись перегрева вольфрама ΔT_T звуком на частоте $f = 30$ Мгц при трех температурах: $T = 0,21\text{K}$ (2), $T = 0,26\text{K}$ (3) и $T = 0,31\text{K}$ (4) в зависимости от угла падения θ (шкала слева); U — напряжение на кварце. Шкала справа — коэффициент прохождения звука $\alpha(\theta)$. Кривая 1 — запись температуры жидкого He^4 $T = 0,21\text{K}$

Аналогичные измерения $\alpha(\theta)$ были проведены нами на поликристаллическом образце чистого золота при температурах $T \sim 80$ мК на частоте звука $f = 20$ Мгц. При угле падения $\theta \sim 13^\circ$ и $U = 15$ мВ был наблюден резкий перегрев золота на $\Delta T \sim 1$ мК ($\Delta\theta_1 \sim 40^\circ$). Температура жидкости оставалась при этом неизменной. Эффект был аналогичен наблюдаемому на вольфраме и свидетельствовал о резонансном поглощении звука поверхностью в релеевском критическом угле падения ($\theta_1 = 12^\circ 12'$ $c_t = 1,2 \cdot 10^4$ см/сек, $\xi = 0,945$).

В заключение выражаю искреннюю благодарность П.Л.Капице за внимание и интерес к работе, А.Ф.Андрееву, В.П.Пешкову, Ю.В.Шарвину за обсуждение и ценные советы, А.С.Абубакирову за исследование характеристик кварцевых излучателей и В.Н.Крутихину за помощь в работе.

Литература

- [1] П.Л.Капица. ЖЭТФ, 11, 1, 1941.
 - [2] И.М.Халатников. ЖЭТФ, 22, 687, 1952.
 - [3] А.Ф.Андреев. ЖЭТФ, 43, 1535, 1962.
 - [4] И.М.Халатников, И.Н.Адаменко. ЖЭТФ, 63, 745, 1972.
 - [5] H. Naug, K. Weiss. Phys. Lett., 40A, 19, 1972.
 - [6] R. E. Peterson, A. C. Anderson. J. Low Tem. Phys., 11, 639, 1973.
-