

## НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОГЛОЩЕНИИ УЛЬТРАЗВУКА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ СОСТОЯНИИ ОЧЕНЬ ЧИСТОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

А.Ф.Шепелев, О.П.Леденев, Г.Д.Филимонов

Предсказанное Андреевым [1] теоретически явление осцилляционного поглощения ультразвука (УЗ) в промежуточном состоянии (ПС) сверхпроводника первого рода [2] (при изменении толщины нормальных слоев  $a$  с изменением магнитного поля  $H$ ) невозможно обнаружить без преодоления трудностей создания [3] периодической структуры ПС в глубине металла и выполнения ряда сильных неравенств между длиной свободного пробега электрона  $l$ ,  $a$  и  $D_{ext}$ <sup>1)</sup>:  $l \gg D_{ext} \gg a$ . Критерием выполнения наиболее жесткого условия  $l \gg D_{ext}$  (поле  $H$  оказывает определяющее влияние на динамику электронов в нормальных слоях) служит наличие обычных магнетоакустических осцилляций в нормальном состоянии металла при  $T > T_K$  и  $H < H_K$ . Единственный сверхпроводник, в котором наверняка можно было надеяться обнаружить предсказанное явление — чистый галлий, магнетоакустические осцилляции в нормальном состоянии которого наблюдаются [4] в полях, начиная с нескольких эрстед.

<sup>1)</sup> Как сообщил нам А.Ф.Андреев, в формулах работы [1] под  $R_{ext}$  следует понимать экстремальный диаметр орбиты электрона в магнитном поле  $D_{ext}$ .

1. Ниже приведены некоторые результаты, полученные при исследовании импульсным методом [5] поглощения продольного УЗ частотой 50 – 190 МГц в ПС чистого галлия<sup>1)</sup>. Измерения при температурах до 0,32°К проводились в криостате с использованием адсорбционной откачки паров ~ 25 см<sup>3</sup> жидкого He<sup>3</sup> [6]. Объектом детального исследования послужил цилиндр Ø 7 мм и длиной 21 мм, вырезанный электронскровым способом из монокристалла предельно чистого галлия производства опытного завода Гиредмета. Ось цилиндра совпадала с кристаллографической осью *b* галлия и *k* УЗ<sup>2)</sup>. Измерения зависимости поглощения  $\Gamma(H)$  проводились относительным методом (сравнением исследуемого сигнала со стандартным импульсом – подробнее см. [5]) и в режиме автоматической записи на двухкоординатном самописце ПДС-021. Преобразователями высокочастотного излучения в УЗ (и наоборот) являлись пластинки кварца *X*-среза толщиной ~ 0,3 мм, Ø 4,5 мм; монохроматический пучок продольного УЗ проходит, минуя боковые поверхности, вдоль центральных областей образца<sup>3)</sup>. ПС в образце создавалось однородным поперечным магнитным полем пары катушек Гельмгольца (НЛк). Вектор *H* мог вращаться в плоскости осей *a* и *c* галлия, перпендикулярной оси образца, со скоростью 1 об/мин. Стабилизация *H* (и при необходимости изменение его величины по линейному закону) осуществлялись схемой стабилизации и развертки поля [7], точность стабилизации которой лучше  $3 \cdot 10^{-4}$ . В процессе измерений образец находился в непосредственном контакте с жидким He<sup>3</sup>, а магнитное поле Земли было скомпенсировано двумя парами катушек Гельмгольца.

2. В эксперименте определялась зависимость  $\Gamma(H)$  в галлии при постоянной температуре. На рис. 1 приведены записи на самописце ПДС-021 при переходе из сверхпроводящего (*S*) в нормальное (*N*) состояние и обратно, каждая из которых длилась 45 мин. Крупные осцилляции  $\Gamma$  в ПС галлия наблюдаются при  $H \lesssim H_K$  во всех измерениях, независимо от частоты УЗ и его амплитуды при температурах 0,37 – 0,75°К. Ввиду высокой чистоты галлия наблюдаются гистерезисные явления – перегрев (при *S-N*-переходе) и переохлаждение (при *N-S*-переходе). Однако величина поглощения УЗ (даже при самой быстрой скорости

<sup>1)</sup> В наших образцах при  $k \perp H$  магнетоакустические осцилляции в нормальном состоянии галлия при  $T > T_K$  и наименьшей использованной частоте УЗ 50 МГц наблюдаются, начиная с полей  $H \approx 3\varepsilon$  ( $k$  – волновой вектор УЗ).

<sup>2)</sup> Авторы хотели бы еще раз выразить глубокую признательность Е.А.Левикову и Л.В.Левиковой за прецизионную ориентацию образцов с помощью метода сходящегося в телесном угле пучка рентгеновских лучей.

<sup>3)</sup> Авторы благодарны А.И. Шальникову и В.Г. Барьяхтару за предоставление смазки "No-pag", которой осуществлялся акустический контакт образца с кварцами.

изменения поля 17 э/мин) обратима с точностью 0,2 дб/образец при переходе S-N и обратно, что свидетельствует об отсутствии "замороженного" потока.

Для получения структур ПС, близких к равновесным [2], использовалось медленное вращение Н между точками, отстоящими друг от друга на величину  $\Delta H = 0,003 H_k$ . При плавном изменении Н (скорость 0,7 э/мин) вектор Н совершал несколько полных вращений вокруг оси образца со скоростью 1 об/мин. Выяснилось, что уже после одного оборота Н получается очень сложная осцилляторная зависимость  $\Gamma(H)$  (рис. 2 А). Так как величина  $\Gamma$  в каждой точке после изменения Н на  $\Delta H$  не зависит от времени, можно полагать, что образующаяся

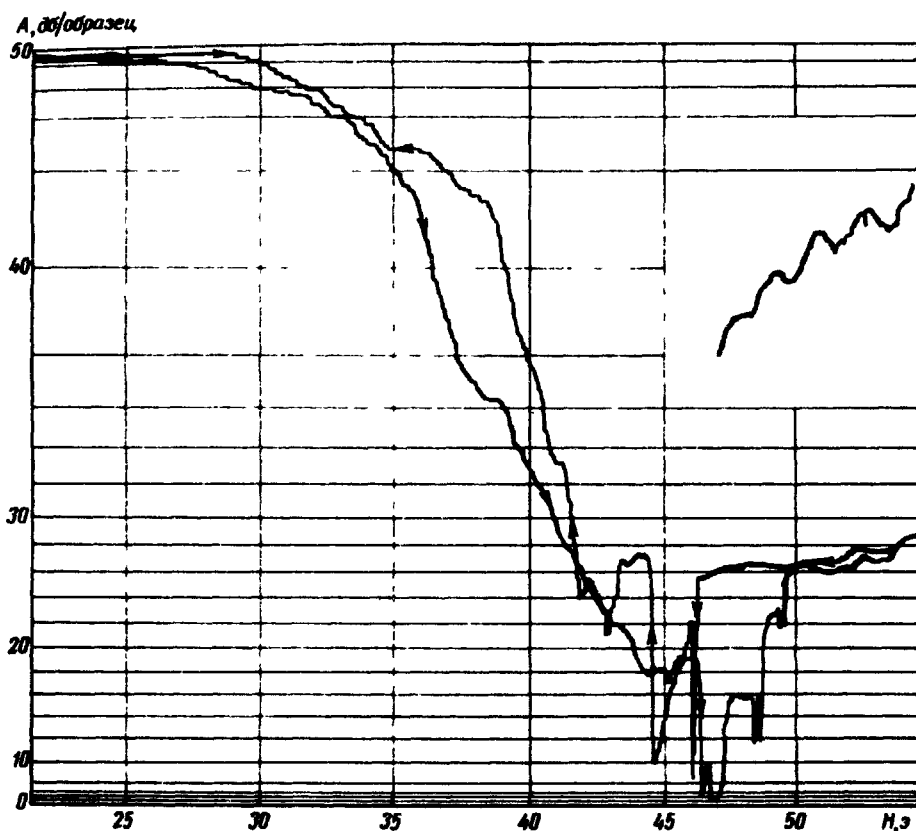


Рис. 1. Запись на самописце ПДС-021 зависимости амплитуды прошедшего УЗ  $A(H)$  при переходе S - N и N - S галлия в ПС при  $T = 0,39^\circ\text{K}$ ; частота УЗ  $f = 130 \text{ МГц}$ ,  $k \perp H$ ,  $k \parallel b$ ,  $\angle H, c = 22^\circ$ . Скорость изменения  $H$  0,75 э/мин. На врезке приведена запись  $A(H)$  в нормальном состоянии галлия при увеличенной чувствительности ПДС-021

структура близка к равновесной и имеет, в соответствии с теорией [2], слоистую дисковую форму. Это тем более справедливо, что формы кривых  $\Gamma(H)$  после одного и двух вращений Н (см. рис. 2) подобны, а величина  $\Gamma$  в каждой точке после двух вращений практически

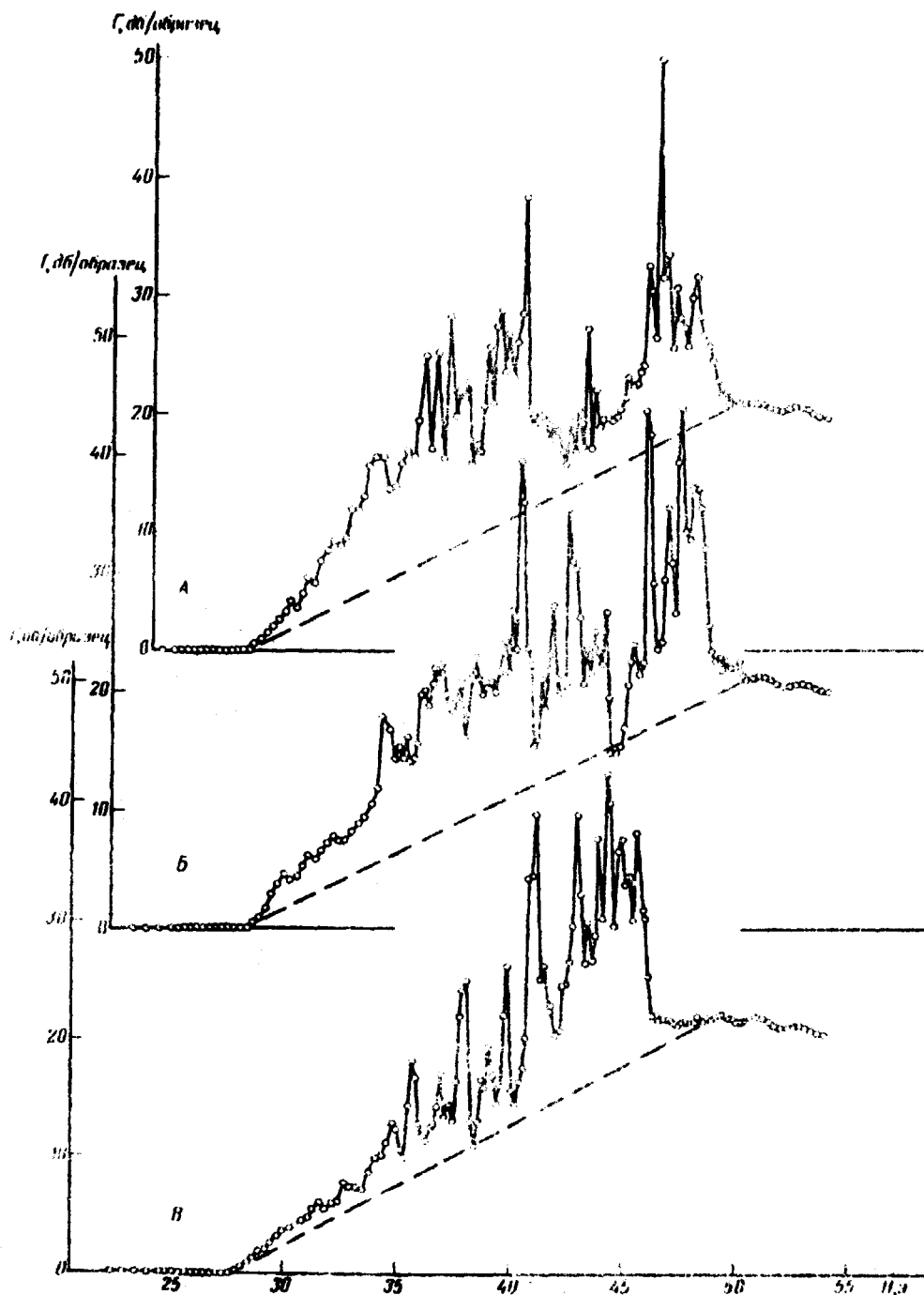


Рис. 2. Зависимость поглощения УЗ  $\Gamma(H)$  в ПС (различ. А – после одного вращения  $\mathbf{H}$  между соседними точками при  $S-N$ -переходе, Б – после двух вращений  $\mathbf{H}$  при  $S-N$ -переходе, В – после двух вращений  $\mathbf{H}$  при  $N-S$ -переходе.  $f = 130 \text{ Мгц}$ ,  $k \perp \mathbf{H}$ ,  $k \parallel \mathbf{H}$ ,  $\angle \mathbf{H}$ ,  $\sigma = 22^\circ$ . Время каждого измерения свыше 5 час, температура около  $0,4^\circ \text{K}$ . Пунктирные прямые – монотонная часть  $\Gamma(H)$  при  $ka \gg 1$  по теории [1]

не зависит от числа вращений<sup>1)</sup>. Характерны области ПС с малой и большой концентрацией  $N$  фазы, где видимо, имеются изолированные нити  $N$  и  $S$  фаз, соответственно, и отсутствует периодичность структуры. То обстоятельство, что магнитное поле в нормальных слоях  $H_K$  не изменяется при изменении  $H$ , приводит к исчезновению при  $N$ - $S$ -переходе обычных магнетоакустических осцилляций. Это служит еще одним доказательством того, что обнаруженный эффект не может быть вызван обычными осцилляционными явлениями, существующими в нормальном металле. Полученные результаты существенно отличаются от данных предыдущих УЗ исследований ПС сверхпроводников (см. обзор [9])<sup>2)</sup>. Хотя картина явления сложна, поражает масштаб эффекта — величина некоторых осцилляций больше полного электронного поглощения УЗ  $\Gamma_0$  в нормальном металле при  $H = H_K$ ! Как показал расчет на ЭВМ, при  $ka \sim 3 - 30$  и  $a/D_{ext} \sim 0,1 - 0,9$  масштаб реального явления хорошо описывается теорией<sup>3)</sup>. При этом надо учесть, что экспериментальные результаты могут отличаться от предсказаний теории, ибо она оперировала моделью металла с простейшей поверхностью Ферми. Объект исследования — галлий — обладает сложной поверхностью Ферми [12], и явление, представляется, может быть результатом суперпозиции нескольких  $D_{ext}$  (в исследованном случае — двух). В связи с этим необходимы теоретические расчеты, учитывающие обнаруженную экспериментально интерференционную картину явления<sup>4)</sup>. Оцененный по периодичности осцилляций  $\Gamma(H)$  галлия

1) Валтон [8], изучая ранее теплопроводность, пришел к подобному выводу о роли вращения (при скорости  $\sim 0,1$  об/сек) в образовании равновесных структур ПС олова.

2) Сообщалось о наблюдении немонотонной зависимости  $\Gamma(H)$  УЗ частотой  $19,5$  МГц в ПС олова [10]. Однако полученная там зависимость  $\Gamma(H)$  не содержит осцилляций, что определяется невыполнением условия  $L \gg D_{ext}$ , ибо в полях  $H < H_K$  на указанной частоте УЗ обычные магнетоакустические осцилляции не наблюдаются [11]:  $D_{ext} = 1,3 \cdot 10^{-1} + 3,2 \cdot 10^{-2}$  см при изученных [10]  $H_K$  олова, а  $\ell \approx 3 \cdot 10^{-2}$  см. Немонотонности [10] возникли в результате сложного пересчета с использованием температурных зависимостей нескольких физических величин, полученных на разных образцах различными авторами, и лежат в пределах точности измерений и расчетов.

3) Авторы благодарны Л.Г.Шепелевой за помощь при программировании и расчетах на ЭВМ "Минск-22".

4) Отметим, что в ПС в любой точке найдена резкая анизотропия  $\Gamma$  от ориентации  $H$  по отношению к осям галлия (в плоскости кристаллографических осей  $a$  и  $c$ ), — в некоторых направлениях сигнал УЗ скрывается в шумах ( $\Gamma > 80$  дб/образец при частоте  $130$  МГц), — что является следствием реального влияния  $H_K$  на электроны нормальных слоев. Естественно, в полях  $H < H_K/2$  никакой зависимости  $\Gamma$  от ориентации  $H$  нет.

размер  $\sigma$  в глубине металла при больших концентрациях  $N$  фазы, с использованием неразветвленной модели ПС Ландау [2], составляет  $\sigma \sim 10^{-2}$  см.

3. Помимо найденных осцилляций  $\Gamma(H)$ , экспериментально обнаружен максимум монотонного поглощения продольного УЗ в ПС очень чистого сверхпроводника. Природа этого явления неясна, однако то, что поглощение в ПС во много раз больше поглощения в нормальном состоянии металла (и больше поглощения, соответствующего теории [1] при  $k\sigma \gg 1$  (см. рис. 1 – 2)) свидетельствует о мощности вызывающего его механизма. Один из вероятных механизмов – вибрация межфазных границ [13], – как будто не может дать столь большого вклада в поглощение; правда, теоретические расчеты [13] были выполнены для меньших частот УЗ ( $10^6 - 10^7$  ик) и  $l \ll \sigma$ . Возможно, в наших экстремальных условиях ( $k\sigma \gg 1$  и  $l \gg \sigma$ ), его вклад значителен.

Детальные измерения зависимости  $\Gamma(H)$  в ПС галлия от температуры, ориентации  $k$  и  $H$  по отношению к кристаллографическим осям и друг к другу, частоты УЗ будут приведены в подробном сообщении.

Авторы сердечно признательны А.Ф.Андрееву за дружеские обсуждения на всех стадиях исследования, начиная с формулировки нового осцилляционного явления [1], Ю.В.Шарвину – за советы, Н.Е.Алексеевскому, Э.А.Канеру, Б.Г.Лазареву, В.Л.Покровскому, А.И.Шальникову – за интересные обсуждения полученных результатов.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
31 августа 1971 г.

### Литература

- [1] А.Ф.Андреев. ЖЭТФ, 53, 680, 1967.
- [2] Л.Д.Ландау. ЖЭТФ, 7, 371, 1937; 13, 377, 1943; Е.М.Лифшиц, Ю.В.Шарвин. ДАН СССР, 79, 783, 1951.
- [3] А.И.Шальников. ЖЭТФ, 33, 1071, 1957.
- [4] В.W.Roberts. Phys. Rev. Lett., 6, 453, 1961.
- [5] А.Г.Шепелев, Г.Д.Филимонов, ПТЭ, №1, 194, 1965; Cryogenics, 6, 103, 1966.
- [6] А.Г.Шепелев. ПТЭ, №5, 237, 1971.
- [7] А.П.Королюк, Л.Я.Мацаков. ПТЭ, №5, 217, 1965.
- [8] A.J.Walton Proc. Roy. Soc., 289A, 377, 1965.
- [9] M.Gottlieb, M.Garbuny, C.K.Jones. Phys. Acoustics, 7, 1, 1970.
- [10] П.А. Безуглый, В.И. Денисенко, В.Д.Филь, В.Ф.Фородинский. Письма в ЖЭТФ, 12, 249, 1970.
- [11] T.Olsen. J. Phys. Chem. Solids, 24, 649, 1963.
- [12] W.A.Reed. Phys. Rev., 188, 1184, 1969.
- [13] А.Ф.Андреев, Ю.М.Брук. ЖЭТФ, 50, 1420, 1966.