

ЭФФЕКТ

АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ОСЦИЛЛАЦИЙ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА
В ЧИСТОМ МЕТАЛЛЕ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Г.Шепелев, О.Н.Леденев, Г.Д.Филимонов

Впервые экспериментально обнаружены очень большие осцилляции скорости продольного ультразвука $\Delta s / s \approx 0,6 \cdot 10^{-1}$ в нормальном состоянии металла при низкой температуре. Осцилляции происходят при $\omega r \sim 1$ как при изменении величины магнитного поля, так и при изменении его ориентации в плоскости $H \perp k$.

Теоретическому и экспериментальному исследованию изменений скорости ультразвука (УЗ) в магнитном поле посвящено много работ. Наибольший масштаб известных осцилляций скорости $\Delta s / s \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ (см. исследования магнитоакустических — "пиппардовских" [1], квантовых [2] и гигантских квантовых осцилляций [3] в поле $\sim 1, 70$ и 150 кз, соответственно).

В настоящем сообщении излагаются результаты экспериментов, в которых обнаружены осцилляции $\Delta s / s \approx 0,6 \cdot 10^{-1}$ в нормальном состоянии галлия в поле ≈ 50 э.

1. Эффект столь велик, что изменение положения во времени прошедшего через образец УЗ импульса наблюдается непосредственно на экране осциллографа установки для исследования поглощения УЗ [4]. Это позволило проводить измерения на частотах $30 - 90$ Мгц с незначительным ее усложнением. Сигнал с выхода приемника поступает одновременно на селектор импульсов, осциллограф и стробоскопическую приставку С1-21, работающую совместно с осциллографом С1-19Б. Применение последней при жесткой синхронизации всей схемы дало возможность измерять изменение положения прошедшего через образец УЗ импульса по отношению к зондирующему сигналу. Точность измерений при использовании развертки 300 мсек не хуже ± 6 мсек, что при длине образца 2 см соответствует изменению скорости $\Delta s / s = \pm 1 \cdot 10^{-3}$. Применение селектора импульсов и двухкоординатного самописца ПДС-021 позволяет при измерении скорости УЗ поддерживать на выходе приемника постоянную величину импульса с точностью $\pm 0,03$ дБ. Это устранило погрешности, связанные с изменением поглощения УЗ в магнитном поле. Измерения скорости проводятся на уровне $1/3$ от основания импульса и не зависят от фронта импульса, по которому они ведутся.

Образец очень чистого галлия¹⁾ производства Опытного завода Гирядмета — монокристалл цилиндрической формы $\phi 7$ мм и длиной 19,6 мм. Ось цилиндра совпадает с кристаллографической осью b галлия. На

¹⁾ Ранее [5] в таком галлии было обнаружено явление осцилляционного поглощения УЗ в промежуточном состоянии, которое может происходить только в очень чистом сверхпроводнике.

торцах образца укреплены монокристаллы кварца X -реза толщиной 0,3 мм и ϕ 4,5 мм — источник и приемник продольного УЗ. Волновой вектор УЗ k ориентирован вдоль оси образца, находящегося в контакте с жидким гелием-3 криостата [6]; температура в последнем может изменяться от $\sim 0,4$ до 2,2 К. Внешнее однородное магнитное поле пары катушек Гельмгольца $H \perp k$ ориентируется в плоскости осей (а, с) галлия с точностью $\pm 0,03^\circ$. Вектор H может вращаться в этой плоскости со скоростью 1 оборот/час. Стабилизация поля (с точностью, лучше 10^{-5}) и изменение его величины со скоростью 0,6 э/мин осуществляются схемой стабилизации и развертки. При измерениях магнитное поле Земли компенсируется двумя парами катушек Гельмгольца.

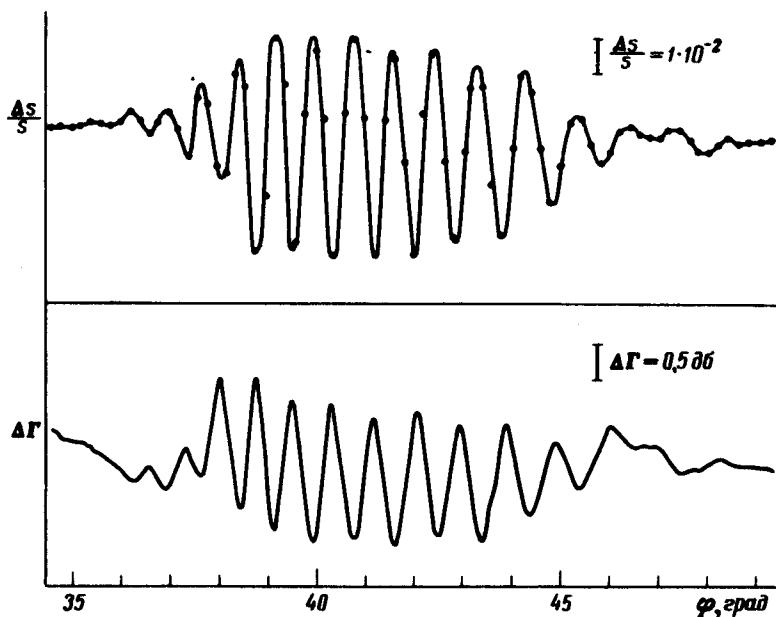


Рис. 1. Осцилляции скорости $\Delta s / s$ и поглощения $\Delta\Gamma$ продольного УЗ частотой 70 МГц в зависимости от ориентации $H = -48,6$ э в плоскости осей (а, с) монокристаллического галлия при $T = 0,4$ К, $k \parallel b$, $k \perp H$

2. При фиксированной величине поля $H > H_K \approx 50$ э и при температуре 0,4 К исследовалась зависимость распространения продольного УЗ частотой 70 МГц от ориентации H в плоскости (а, с) осей галлия — диаграмма вращения¹⁾. Обнаружено, что в определенной области диаграммы вращения происходят существенные осцилляции скорости УЗ $\Delta s / s = -6 \cdot 10^{-2}$ (рис. 1), сопутствующие осцилляциям поглощения $\Delta\Gamma$ (запись на ПДС-021). Максимумам осцилляций $\Delta s / s$ соответствуют минимумы $\Delta\Gamma$. Осцилляции имеют четко выраженную область углов $\angle H$, а = 36 — 48° (при вращении $H > 50$ э на 360° есть четыре области углов, симметричные относительно оси а) и происходят до полей ~ 100 э. Вне этих

¹⁾ В нашем сообщении [7] на диаграммах вращения рис. 2 и рис. 8 нанесены зависимости амплитуды УЗ, прошедшего через образец, $A(\phi)$, а не $\Gamma(\phi)$.

областей подобных изменений $\Delta s / s$ не обнаружено, несмотря на то, что поглощение сильно изменяется. Обнаруженные осцилляции $\Delta s / s$ наблюдаются при температурах 0,4 – 2,2 К; отклонение плоскости вращения \mathbf{H} от условия $\mathbf{H} \perp \mathbf{k}$ на угол 1 – 2° также не приводит к исчезновению эффекта. 1

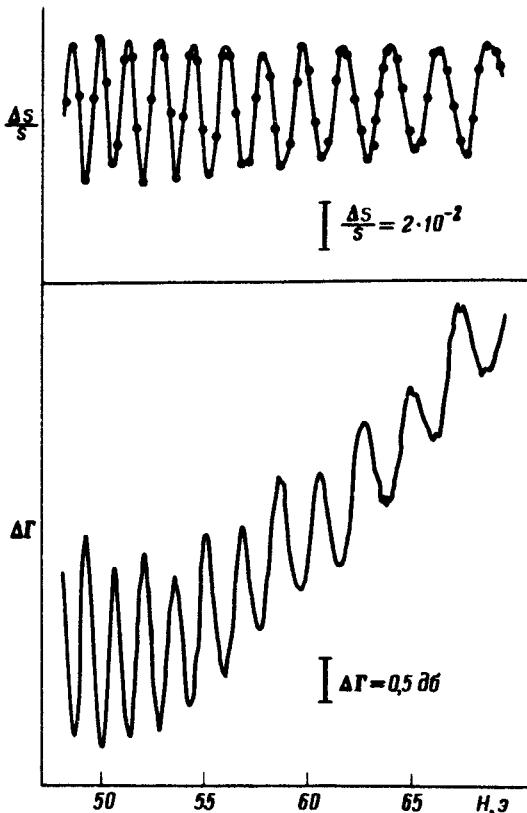


Рис. 2. Осцилляции $\Delta s / s$ и $\Delta\Gamma$ продольного УЗ частотой 70 Мгц в зависимости от величины H при $\angle \mathbf{H}, \mathbf{a} = 40^\circ$, $\mathbf{k} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$, $T = 0,4$ К

3. При фиксированной ориентации магнитного поля \mathbf{H} в указанном интервале углов $\angle \mathbf{H}$, а изменение его величины также вызывает осцилляции $\Delta s / s$ подобного же масштаба (рис. 2), сопровождающиеся осцилляциями $\Delta\Gamma$. Период осцилляций $\Delta(1/H) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ э}^{-1}$ при частоте УЗ 70 Мгц¹⁾. Следует отметить, что при дальнейшем увеличении H происходят осцилляции $\Delta\Gamma$ близкой амплитуды (с другим периодом), которые, однако, не сопровождаются большими осцилляциями $\Delta s / s$.

4. Картина явления сильно зависит от частоты (длины волны) УЗ. Из рис. 3 видно, что уменьшение частоты УЗ в 2,3 раза привело к тому же увеличению периода осцилляций; при этом масштаб осцилляций $\Delta s / s$ уменьшился в три раза. Таким образом, эти осцилляции не относятся к разряду квантовых. В свете существующих представлений [9], при $\omega\tau \sim 1$ (где ω – частота УЗ, τ – время релаксации электрона) в больших

¹⁾ Французские авторы [8] наблюдали в галлии осцилляции поглощения $\Delta\Gamma$ для подобных условий эксперимента. По их мнению, это – "пиппардовские" осцилляции, обусловленные 6-дырочной зоной поверхности Ферми.

магнитных полях ($kR \ll 1$, где R – радиус орбиты электрона в магнитном поле) должно происходить только монотонное изменение скорости УЗ¹⁾. В слабых полях ($kR > 1$) скорость УЗ в чистом металле ($l > R$, где l – длина свободного пробега электрона) должна испытывать "пиппардовские" осцилляции, связанные с изменением kR под действием поля. Кроме того, в столь чистом металле, как галлий, изменение частоты УЗ может приводить к изменению скорости УЗ не только за счет изменения ω_r в "пиппардовских" осцилляциях, но и, вероятно, из-за изменения соотношения ω / Ω – в связи с акустическим циклотронным резонансом (Ω – циклотронная частота электрона).

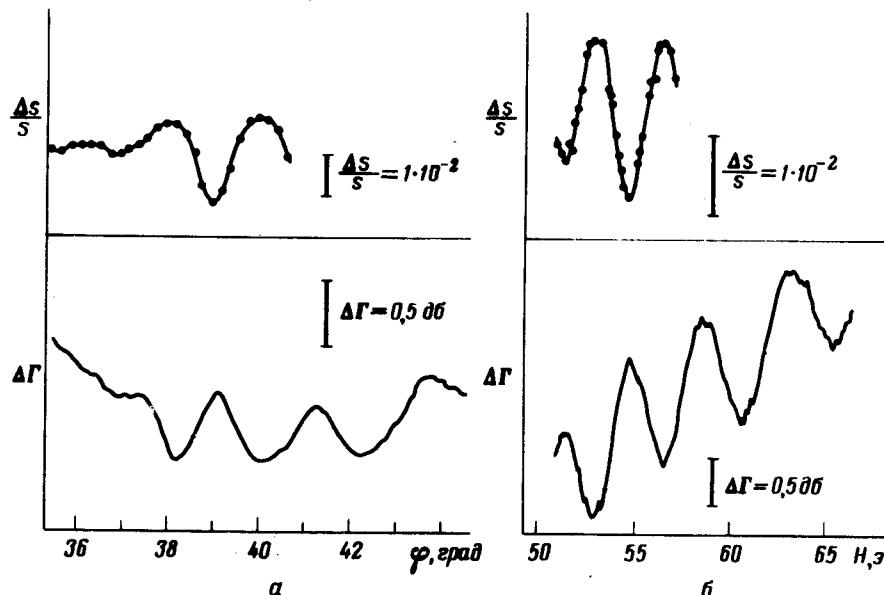


Рис. 3. Осцилляции $\Delta s / s$ и $\Delta \Gamma$ продольного УЗ частотой 30 Мгц при $\mathbf{k} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$, $T = 0,375$ К в зависимости от: *a* – ориентации $\mathbf{H} = 56,6$ э и *б* – величины H при $\angle \mathbf{H}, \mathbf{a} = 38,1^\circ$

Масштаб явления, вообще говоря, наводит на мысль о сильном электрон-фононном взаимодействии или возможности коллективных электронных возбуждений. Трудность анализа определяется сложностью поверхности Ферми галлия, наличием многих сильно различающихся размерами электронных орбит и анизотропией как эффективного электрон-фононного взаимодействия, так и времени релаксации электронов. Быть может, особую роль играют группы протяженных электронных орбит, проходящих вблизи седловых (или конической) точек поверхности Ферми. Орбиты с двумя седловыми точками обнаружены в указанной области ориентаций \mathbf{H} в исследованиях магнитосопротивления галлия [11]. При этом не исключается возможность магнитного пробоя в галлии в слабом магнитном поле [12], хотя обсуждение этого вопроса выходит за рамки статьи.

¹⁾ В работе [10] установлено, что в сильном поле ≈ 15 кэ скорость продольного УЗ в галлии увеличилась на $\approx 3 \cdot 10^{-2}$.

Для расширения области температур были проведены исследования обнаруженного явления на монокристалле галлия той же ориентации и чистоты (толщиной 6 μ м), но другой формы, в ином криостате с отличающейся магнитной системой. Измерения проводились на частоте уз 90 $M\gamma$, как и раньше – по первому прошедшему импульсу, и на частоте 30 $M\gamma$ – по импульсу, прошедшему тройной путь в образце. Оказалось, что явление происходит в том же интервале углов LH , а и полей (т.е. оно не связано с размерными эффектами) при температурах 1,5 – 2,7 К. При более высоких температурах оно отсутствует, что можно объяснить уменьшением длины свободного пробега.

Заметим, что при 1,5 К до полей ≈ 30 э, где сильно изменяется поглощение УЗ в указанной области углов LH , а, больших изменений скорости $\Delta s/s$ не наблюдается.

Авторы признательны Б.Г.Лазареву, Э.А.Канеру, М.И.Каганову, В.Л.Покровскому, В.Ф.Гантмахеру, А.А.Слуцкину, А.М.Гришину и В.С.Эдельману за интересные обсуждения результатов.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
26 июня 1975 г.

Литература

- [1] B.G.W.Yee, J.D.Gavenda. Phys. Rev., 175, 805, 1968.
- [2] E.P.Missell, N.S.Wisnik, C. C.Becerra, Y.Shapira. Solid State Comm., 13, 971, 1973.
- [3] L.J. Neuringer, Y.Shapira. Phys. Rev., 165, 751, 1968.
- [4] А.Г.Шепелев, Г.Д.Филимонов. ПТЭ, № 1, 194, 1965.
- [5] А.Г.Шепелев, О.П.Леденев, Г.Д.Филимонов. Письма ЖЭТФ, 14, 428, 1971.
- [6] А.Г.Шепелев. ПТЭ, № 5, 237, 1971.
- [7] A.G.Shepelev, O.P.Ledenev, G.D.Filimonov. Solid State Comm., 12, 241, 1973.
- [8] C.Alquie, J.Lewiner. Phys. Rev., B6, 4490, 1972.
- [9] S.Rodriguez. Phys. Rev., 130, 1778, 1961; 132, 535, 1963; И.Ф.Кулик. ЖЭТФ, 47, 107, 1964; В.М.Конторович. ЖЭТФ, 59, 2116, 1970; 61, 1181, 1971.
- [10] П.А.Безуглый, Н.Г.Бурма. Письма ЖЭТФ, 10, 523, 1969.
- [11] J.R.Cook, W.R.Datars. Canad. J. Phys., 48, 3021, 1970.
- [12] J.C.Kimball, T.W.Stark. Phys. Rev., B4, 1786, 1971.