

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ СОСТОЯНИИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

А.Г.Шепелев

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
г. Харьков, Украина, e-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua*

Рассмотрены исследования промежуточного состояния в объеме сверхпроводников. Анализируется ранее опубликованная попытка устранения краевых эффектов при ультразвуковом исследовании промежуточного состояния чистого галлия и молибдена; показано, что получающиеся при этом результаты резко противоречат теории промежуточного состояния Л.Д.Ландау.

Поскольку структура промежуточного состояния сложна и вблизи поверхности образцов искажена из-за изгиба, ветвления [1, 2] и извивов [3] слоев, принципиальное значение имеет экспериментальное исследование свойств этого состояния в объеме сверхпроводников, на перспективность которого с помощью такого проникающего излучения, как ультразвук, указал А.Ф.Андреев [4]. Все основные свойства металлов, находящихся в промежуточном состоянии (электрические, магнитные, термодинамические), практически не зависят от периода структуры, который определяется поверхностной энергией на границе раздела нормальной и сверхпроводящей фаз. Поэтому большинство предыдущих экспериментальных исследований относилось к измерениям структуры слоев на поверхности образцов [5] (в частности, при длине свободного пробега электронов $l > a_n$ [6-8], где a_n - толщина слоя нормальной фазы), откуда и устанавливались численные значения величины межфазной поверхностной энергии для различных сверхпроводников I рода.

Интересны исследования слоистых структур, реализуемых в цилиндрических образцах в поперечном магнитном поле [9-20], особенно с использованием предложенной А.Б.Пиппардом [7] методики создания равновесных периодических структур медленным вращением вектора магнитного поля вокруг оси образца [7, 21-30].

Авторы статьи [31] (см. также [32]) пытались уменьшить влияние неоднородности поперечного магнитного поля на структуру промежуточного состояния на концах цилиндрического образца сверхпроводника I рода, разместив на обоих его торцах небольшие по диаметру двухсвязные шайбы толщиной 30...50 мкм из сверхпроводника II рода (сплав Nb-Zr), приклеенные к стеклотекстолитовым подложкам. Так как расчет топологии магнитного поля этой сложной в электродинамическом смысле системы авторами [31, 32] не проводился (задача расчета топологии магнитного поля в системах даже со сплошными сверхпроводящими экранами достаточно сложна [33]), целесообразно рассмотреть качественно предложенную постановку эксперимента [31, 32] и оценить количественно его результаты.

1. При постановке опыта [31, 32] происходит существенное искажение топологии внешнего магнитного поля, которое должно создавать структуру промежуточного состояния образца. Картина топологии магнитного поля возле образца и гистерезисные явления во всей системе (образец и двухсвязные шайбы на его торцах) ухудшаются как при незначительном перекосе [34] ориентации внешнего магнитного поля относительно тонких сверхпроводящих шайб, размещенных у торцов образца, так и при неконтролируемой неплоскостности шайб из-за резкого уменьшения H_{K1} фольги [35] и захвата "замороженного" магнитного потока [36]. В опытах [31, 32] неплоскостность шайб неизбежно возникала из-за значительного различия коэффициентов термического расширения [37] Nb-Zr-шайб и стеклотекстолитовых подложек (к которым шайбы были приклеены), а также из-за существенной анизотропии коэффициента термического расширения самих стеклотекстолитовых подложек [37]. Кроме того, во внешнем магнитном поле на краях даже плоских сверхпроводящих шайб существуют магнитные поля $\sim H_{K1}$ материала шайб (см., например, [38]). Величина этих полей больше магнитных полей области промежуточного состояния изучавшегося при 0,4 К образца галлия ($H_K \approx 50$ Э) и внешнего поля, которое должно было создавать промежуточное состояние: по мнению авторов [31] для Nb-Zr сплава $H_{K1} \approx 800$ Э при 4,2 К, в то время как по данным измерений трех независимых групп авторов [39] $H_{K1} \approx 200$ Э*. Наличие в шайбах из сверхпроводника II рода вихрей Абрикосова, "замороженного" магнитного потока, приводит [36, 40] и к необратимостям магнитных свойств всей системы в целом.

Естественно, что в неоднородном магнитном поле структура промежуточного состояния искажена [5] и далека от "равновесной структуры беско-

Дальнейшее улучшение свойств любого сверхпроводящего сплава, направленное на увеличение H_{K2} , сопровождается, как известно, уменьшением H_{K1} .

нечного цилиндра", о приближении к которой указывалось в [31, 32]. Именно неоднородность поля и искажения структуры промежуточного состояния не позволили авторам [31,32] наблюдать явление осцилляций поглощения ультразвука [4, 22, 24, 25] для ориентации волнового вектора звука $\mathbf{k} \parallel \mathbf{b}$ - оси галлия (напомним, что при создании периодической структуры промежуточного состояния для этой же ориентации и при той же частоте ультразвука 30 МГц и T=0,5 К явление ярко выражено [24]).

Понятно, что получающиеся в опыте [31, 32] результаты должны зависеть от величины H_{K1} сверхпроводящих шайб, т.е. от температуры измерений и материала шайб, а также от их размеров и формы, свойств подложки, к которым они приклеены, магнитной предыстории, точности ориентации поля.

2. Отметим, что введение в [31] понятия размагничивающего фактора (пригодного для эллипсоида) для неоднородно намагниченного тела лишено смысла, как и введение термина "работы по управлению коэффициентом размагничивания W'' " [31]. Вместе с тем, в [31, 32] не рассмотрено влияние сил "парения" [41], действующих на границы трех сверхпроводников (образец и 2 шайбы), размещенных рядом в магнитном поле, а также магнитомеханических сил на промежуточное состояние и плотность сверхпроводящих электронов [42].

3. Оценим, к какому численному значению фундаментальной величины теории Л.Д.Ландау – константы межфазной поверхностной энергии Δ приводят значения $a_n \cong (0,4...3) \cdot 10^{-2}$ см, найденные в [31, 32] во всем интервале концентраций нормальной фазы $c_n \sim 0,2...0,9$. По теории Л.Д.Ландау [1], период структуры промежуточного состояния в цилиндре радиуса R в поперечном поле [43, 13, 8]

$$a_n + a_s = [2R\Delta / \varphi(c_n)]^{1/2}, \quad (1)$$

где $a_n + a_s = a_n / c_n$; $\varphi(c_n)$ - функция Л.Д.Ландау, протабулированная в [2, 44].

Табл.1 содержит результаты вычисленной нами с помощью формулы (1) по данным a_n [31, 32] константы межфазной поверхностной энергии Δ галлия – величины для сверхпроводников I рода близкой, по современным представлениям, к длине когерентности ξ ($\Delta = \xi - \lambda$, $\xi \gg \lambda$, где λ - глубина проникновения магнитного поля).

Хотя измерения [31, 32] проводились при постоянной температуре вдали от T_K , приведенные в табл.1 данные анализа свидетельствуют о существенно переменных значениях для константы Δ при изменении c_n , что находится в вопиющем противоречии с теорией Л.Д.Ландау [1]; к тому же значения $\Delta \sim 10^{-6}$ см аномально малы и нефизичны для чистого сверхпроводника I рода. Независимые ультразвуковые исследования промежуточного состояния галлия [27] дали значение $\Delta = 8 \cdot 10^{-5}$ см, близкое к оценке $\xi \cong (1...4) \cdot 10^{-4}$ см из измерений $\lambda = (1,2...3,8) \cdot 10^{-5}$ см [45] и параметра Гинзбурга-Ландау $\kappa = \lambda / \xi = 0,08$ [46]. Трудно представить, что изученный в [31, 32] монокристалл чистого галлия содержит столько дефектов, что он стал сверхпроводником II рода (полученные при анализе опытов [31, 32] величины $\Delta < \lambda$ [45]).

Анализ исследования чистого молибдена [32] в той же ошибочной постановке опыта также обнаруживает существенно переменные значения константы Δ при изменении c_n (табл.2).

Таким образом, анализ показывает, что нет никаких оснований для утверждения авторов [31, 32] о близости структуры промежуточного состояния в цилиндрическом образце сверхпроводника I рода с двухсвязными шайбами из сверхпроводника II рода на его торцах к "равновесной структуре бесконечного цилиндра". Более того, как показано выше, получающиеся при постановке опыта [31, 32] результаты вообще могут быть произвольными, так как безусловно должны зависеть от многих параметров.

Таблица 1

Характеристики структуры промежуточного состояния галлия по ультразвуковым измерениям ($f=30$ МГц) при $T/T_K=0,37$

$\mathbf{k} \parallel \mathbf{b}$ – оси Ga	c_n	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	$a_n \cdot 10^2$, см [31]	0,39	0,39	0,46	0,57	0,62	0,75	1,07	2,21
	$(a_n+a_s) \cdot 10^2$, см	1,95	1,3	1,15	1,14	1,03	1,07	1,34	2,46
	$\Delta \cdot 10^6$, см	7,38	4,7	4,2	4,1	2,76	2,1	1,67	1,7
$\mathbf{k} \parallel \mathbf{c}$ – оси Ga	$a_n \cdot 10^2$, см [31,32]	0,39	0,42	0,46	0,46	0,53	0,63	0,95	2,42
	$(a_n+a_s) \cdot 10^2$, см	1,95	1,4	1,15	0,92	0,88	0,90	1,19	2,69
	$\Delta \cdot 10^6$, см	7,38	5,46	4,22	2,68	2,0	1,48	1,32	2,07

Характеристики структуры промежуточного состояния молибдена по ультразвуковым измерениям при $T/T_k=0,44$

c_n	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$a_n \cdot 10^{-2}$, см [32]	0,82	0,96	1,17	1,33	1,61	2	3,67
$(a_n+a_s) \cdot 10^{-2}$, см	4,1	3,2	2,92	2,66	2,68	2,96	4,59
$\Delta \cdot 10^{-5}$, см	3,27	2,85	2,73	2,24	1,87	1,5	1,96

При оценке измерений поглощения ультразвука в промежуточном состоянии [31, 32] надо учитывать, что по виду изменения свойств в этом состоянии нельзя восстановить топологию распределения магнитного поля в образце. Известно [47], что для образцов сверхпроводника I рода с неэллипсоидальной формой можно получить идеальные, обратимые кривые изменения магнитных свойств в промежуточном состоянии, что также можно ошибочно принять за совершенство структуры этого состояния.

Ясно, что ультразвуковые исследования промежуточного состояния должны проводиться в чистых условиях – в цилиндрических образцах без сверхпроводящих шайб на торцах, с обязательным созданием равновесной периодической структуры этого состояния вращением вектора поперечного однородного магнитного поля. Это особенно справедливо при исследованиях явления осцилляций поглощения ультразвука в периодической структуре промежуточного состояния при длине свободного пробега $l \gg D(H_k) \gg a_n$ [4, 22, 24, 25], когда возможные переменные значения толщины слоев нормальной фазы на концах образца, естественно, неэффективны и не вносят вклад в осцилляционное поглощение ультразвука ($D(H_k)$ – ларморовский диаметр орбиты электрона в критическом магнитном поле в слоях нормальной фазы). Дополнительным фактором создания периодической структуры промежуточного состояния может быть и одновременное (с вращением магнитного поля) пропускание через образец слабого постоянного электрического тока, как это осуществлялось в работах [11, 13, 21].

Автор благодарен вице-президенту РАН академику РАН А.Ф.Андрееву за обсуждение, члену-корреспонденту НАНУ В.М.Ажаже и М.А.Тихоновскому за интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Л.Д.Ландау. К теории сверхпроводимости // *ЖЭТФ*. 1937, т.7, с.371-378; Л.Д.Ландау. К теории промежуточного состояния сверхпроводников // *ЖЭТФ*. 1943, 13, с.377-387.
- 2.Е.М.Лифшиц, Ю.В.Шарвин. О промежуточном состоянии сверхпроводников // *ДАН СССР*. 1951, т.79, с.783-786.
- 3.Б.М.Балашова, Ю.В.Шарвин. Структура промежуточного состояния сверхпроводников // *ЖЭТФ*. 1956, 31, с.40-44.
- 4.А.Ф.Андреев. Поглощение ультразвука в промежуточном состоянии сверхпроводников // *ЖЭТФ*. 1967, 53, с.680-688.
- 5.J.D.Livingston, W. DeSorbo. The intermediate state in type 1 superconductors // in: *Superconductivity* (ed. R.-Parks), N.Y., M.Dekker. 1969, 2, p.1235-1281; I.P.Krylov. Macroscopic electrodynamics of the intermediate state of pure superconductors//*Sov.Sci.Rev.: A-Phys.* 1980, 2, p.90-144.
- 6.Ю.В.Шарвин. Измерение поверхностного натяжения на границе между сверхпроводящей и нормальной фазами // *ЖЭТФ*. 1957, 33, с.1341-1346; Ю.В.Шарвин. Измерение поверхностного натяжения на границе между сверхпроводящей и нормальной фазами индия // *ЖЭТФ*. 1960, 38, с.298-300; D.E.Farrell. Experimental realization of highly regular motion of the Landau domain structure // *Phys.Rev.Lett.* 1972, 28, p.154-156; I.L.Landau, Yu.V.Sharvin. Correctness of the L.D.Landau theory of the intermediate state // *Phys.Rev.* 1976, B13, p.1359-1360.
- 7.Quoted by P.Wyder. Freie Weglängen im supraleitenden Zustand, im normalen Zustand und im Zwischenzustand// *Phys. kondens. Materie.* 1965, 3, p.294-304.
- 8.Ю.В.Шарвин, И.Л.Ландау. Исследование динамического промежуточного состояния сверхпроводников // *ЖЭТФ*. 1970, 58, с.1943-1954.
- 9.Ю.В.Шарвин, Б.М.Балашова. К вопросу о структуре сверхпроводников в промежуточном состоянии // *ЖЭТФ*. 1952, 23, с.222-228.
- 10.A.L.Schawlow. Structure of the intermediate state in superconductors // *Phys. Rev.* 1956, 101, p.573-579.
- 11.А.И.Шальников. К вопросу о реальности нестандартной модели промежуточного состояния // *ЖЭТФ*. 1957, 33, с.1071-1072.
- 12.Н.В.Заварицкий. Теплопроводность сверхпроводников в промежуточном состоянии // *ЖЭТФ*. 1960, 38, с.1673-1684.

13. Г.Ф.Батраков, О.Р.Миськевич, Е.Тройнар. К вопросу об измерении поверхностного натяжения между сверхпроводящей и нормальной фазами // *ЖЭТФ*. 1962, 42, с.1171-1172.
14. R.David. Ultrasonic attenuation in superconducting aluminium // *Philips Res. Repts*. 1964, 19, p.524-602.
15. Н.В.Заварицкий. К вопросу о квантовании энергетических уровней электронных возбуждений в промежуточном состоянии сверхпроводника // *Письма в ЖЭТФ*. 1965, 2, с.168-171.
16. M.Gottlieb, C.K.Jones. Geometrical dependence of flux penetration and trapping in superconducting lead // *Phys. Lett.* 1966, 21, p.270-271.
17. M.Gottlieb, C.K.Jones. Ultrasonic attenuation in lead: intermediate state structure effects // *Phys. Lett.* 1967, 24A, p.585-586.
18. П.А.Безуглый, В.И.Денисенко, В.Д.Филь. Поглощение ультразвука оловом в промежуточном состоянии // *Письма в ЖЭТФ*. 1969, 10, с.214-216.
19. И.Л.Ландау. Температурная зависимость коэффициента отражения электронов на границе между сверхпроводящей и нормальной фазами // *Письма в ЖЭТФ*. 1970, 11, с.437-440.
20. П.А.Безуглый, В.И.Денисенко, В.Д.Филь и др. Влияние магнитного поля на поглощение ультразвука сверхпроводящим оловом в промежуточном состоянии // *Письма в ЖЭТФ*. 1970, 12, с.249-251.
21. A.J.Walton. The thermal and electrical resistance of tin in the intermediate state // *Proc. Roy. Soc.* 1965, A289, p.377-401.
22. А.Г.Шепелев, О.П.Леденев, Г.Д.Филимонов. Новые эффекты в поглощении ультразвука в промежуточном состоянии очень чистого сверхпроводника // *Письма в ЖЭТФ*. 1971, 14, с.428-433.
23. O.Singh, M.H.Jericho. Ultrasonic attenuation in the intermediate state of tin // *Phys. Rev.* 1972, v.B5, p.3542-3549.
24. А.Г.Шепелев, О.П.Леденев, Г.Д.Филимонов. Экспериментальное исследование поглощения продольного ультразвука в промежуточном состоянии очень чистого сверхпроводника // *В кн.: Вопр. атомн. науки и техн., Сер.: Фундамент. и прикл. сверхпроводимость*, 1973, вып.1(1), с.3-12.
25. A.G.Shepelev, O.P.Ledenev, G.D.Filimonov. Anomalous attenuation of longitudinal ultrasound in the intermediate state of pure type 1 superconductor // *Solid State Communic.* 1973, 12, p.241-244.
26. K.D.Chaudhuri, S.K.Mahajan. Absorption of ultrasound in the intermediate state of indium // *J. Low Temp. Phys.* 1976, 24, p.131-144.
27. O.Singh. Ultrasonic absorption in the intermediate state of gallium and indium // *Phys. stat. Solidi*. 1977, v.b82, p.179-188.
28. R.H.Dee, A.M.Guénault, E.A.Walker. Laminar intermediate state in superconducting In and Sn // *Thermoelectricity in metallic conductors, Proc. 1 Intern. Conf., East Lansing, Mich., 1977 (ed. F.J.Blatt, P.A.Schroeder)*, N.Y.-L., 1978, p.183-187.
29. K.D.Chaudhuri, S.K.Agarwal. Ultrasonic attenuation studies in the intermediate state of pure and doped type 1 superconductors // *J. Phys. F: Metal Phys.* 1979, v.F9, p.529-544.
30. A.V.Pippard. Normal-superconducting boundaries // *Nonequilibrium superconductivity, phonones, and Kapitza boundaries, Proc. NATO Adv. Study Inst., Acquafredda di Maratea, 1980*, N.Y.-L., 1981, p.341-352.
31. О.П.Леденев, В.П.Фурса. О параметрах структуры промежуточного состояния цилиндрических образцов, создаваемой внешним магнитным полем // *ФНТ*. 1985, т.11, с.57-61.
32. О.П.Леденев. Исследование структуры промежуточного состояния сверхпроводников методом поглощения ультразвука // *Тезисы докладов 23 Всесоюзн. совещан. по физике низк. темп.*, ред. В.Х.Корровитс, 1984, Тарту, ч.1, с.170-171.
33. И.А.Глебов, Ч.Лаверик, В.Н.Шахтарин. *Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости*. Ленинград: "Наука", 1980, с.140-155.
34. R.H.White, M.Tinkham. Magnetic – field dependents of microwave absorption and energy gap in superconducting films // *Phys.Rev.* 1964, 136, p.A203-A217.
35. J.Pearl. Distinctive properties of quantized vortices in superconducting films // in: *Low Temp.Phys. LT9 (ed. J.Daunt et al.)*, N.Y., Plenum Press. 1965, Part A, p.566-570.
36. Д.Шенберг. *Сверхпроводимость*. М.: "Иностран. лит.", 1955, с.34-40.
37. В.Р.Голик, Н.С.Петренко, В.П.Попов. Коэффициенты термического расширения сплава ниобий-цирконий-титан и оргстекла в интервале температур 10-300 К // *УФЖ*. 1969, т.14, с.294-296; В.Р.Голик, Н.С.Петренко, В.П.Попов. Коэффициенты термического расширения сплава ниобий-титан и текстолита в интервале 5-300 ° К. // *Препринт ХФТИ – 71/8*, 1971.
38. Г.Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: "Мир", 1972, с.39-41.
39. K.Yasukochi, T.Ogasawara, N.Usui et al. Magnetic behavior and effect of transport current on it in superconducting NbZr wire // *J.Phys.Soc.Japan*, 1964, 19, p.1649-1661; N.H.Zebouni, A.Kenkataram, G.N.Rao et al. Magnetothermal effects in type II superconductors // *Phys.Rev.Lett.* 1964, 13, p.606-609; C.J.Bergeron, M.W.Williams, A.D.Haubold. Magnetization of current – carrying cold – worked NbZr superconducting wires // *J.Appl.Phys.* 1965, v.36, p.3167-3171.
40. Д.Сан-Жам, Г.Сарма, Е.Томас. *Сверхпроводимость второго рода*. М.: "Мир", 1970, с.263-286.
41. I.Simon. Forces acting on superconductors in magnetic fields // *J. Appl. Phys.* 1953, v. 24, p.19-24.
42. F.London. *Superfluids*. N.-Y., Wiley, 1, 56 (1950); G.Rickayzen. Bernoulli potentials in superconductor // *J.Phys.*, 1969, C2, p.1334-1337; К.М.Хонг. Bernoulli potential in superconductor // *Phys.Rev.*, 1975, v.B12, p.1766-1771; Н.И.Шикина. О магнитных силах на

поверхности сверхпроводника. // *ЖЭТФ*, 1976, 71, с.1893-1904.

43. Ю.В. Шарвин, В.Ф. Гантмахер. Анизотропия поверхностного натяжения на границе между сверхпроводящей и нормальной фазами олова // *ЖЭТФ*, 1960, т.38, с.1466-1470

44. F. Haenssler, L. Rinderer. Statique et dynamique de l'état intermédiaire des supraconducteurs du type 1 // *Helv. Phys. Acta.* 1967, v.40, p.659-687.

45. R.H. Hammond, W.D. Knight. Nuclear quadrupole resonance in superconducting gallium // *Phys. Rev.* 1960, v.120, p.762-772; W.G. Gregory. Superconducting transition width in pure gallium single crystals // *Phys. Rev.* 1968, v.165, p.556-561.

46. J. Feder, S.R. Kiser, F. Rothwarf et al. Hysteresis effects in three superconducting phases of gallium // *Solid State Commun.* 1966, v.4, p.611-613.

47. J. Provost, E. Paumier, A. Fortini. Shape effects on the magnetization of superconducting lead at 4,2 K // *J. Phys. F: Metal Phys.* 1974, v.F4, p.439-448; E. Paumier, J.-P. Girard, J. Provost et al. Magnetization curves of non-ellipsoidal type-1 superconducting samples. In "Intern. Discuss. Meet. Flux Pinning Superconduct., Sonnenberg, 1974" (ed. P. Haasen, H.C. Feyhard), Göttingen, Acad. Wissenschaft., 1975, p.311-316; E. Paumier, J.-P. Girard, A. Hairie. Reversible magnetic behaviour of type-1 superconducting samples in special geometrical conditions // *J. Phys. F: Metal Phys.* 1981, v.F11, p.1463-1470.

ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОГЛИНАННЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПРОМІЖНОМУ СТАНІ НАДПРОВІДНИКІВ

А.Г.Шепелев

*Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут",
м. Харків, Україна, e-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua*

Розглянуті дослідження проміжного стану в об'ємі надпровідників. Аналізується раніше опублікована спроба усунення крайових ефектів при ультразвуковому дослідженні проміжного стану чистого галію та молібдена; показано, що отримувані при цьому результати різко протирічать теорії проміжного стану Л.Д.Ландау.

ABOUT THE INVESTIGATION OF THE ULTRASONIC ABSORPTION IN INTERMEDIATE STATES OF SUPERCONDUCTORS

A.G. Shepelev

*National science center "Kharkov Institute of Physics and Technology",
Kharkov, Ukraine, e-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua*

Investigation of intermediate state in the bulk of superconductors are surveyed. Consideration is given to a previous attempt of eliminating edge effects in the ultrasonic investigation of intermediate states of pure gallium and molybdenum; it is demonstrated that those results are in strong contradiction with Landau's intermediate – state theory.