

Н. В. ЗАВАРИЦКИЙ

## СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МОДИФИКАЦИИ ВИСМУТА

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 4 VI 1953)

Как было установлено в последнее время <sup>(1,2)</sup>, образцы висмута, полученные посредством конденсации металла из пара на поверхность, охлажденную до температуры жидкого гелия, обладают сверхпроводимостью. Ниже приведены результаты дальнейшего исследования свойств сверхпроводящей модификации висмута.

1. Образцы конденсировались на наружное плоское дно стеклянного стаканчика (рис. 1 а). Толщина дна не превосходила 0,3 мм. Конденсация образцов производилась при температурах ниже 2° К в гелии II. Измерение свойств пленок висмута производилось в специально сконструированном термостате (рис. 1 б), в котором было возможно поддерживать температуру с точностью до 0,003° К в течение произвольного промежутка времени. Для измерения температуры применялся термометр, приготовленный из радиотехнического угольного сопротивления <sup>(3)</sup> и проградуированный по газовому термометру. Вблизи 6° К можно было измерять температуру с точностью до 0,03° и изменение температуры до 0,002°. При измерении температуры в присутствии магнитного поля вводилась соответствующая поправка.

2. У большинства исследованных сверхпроводящих пленок висмута толще  $10^{-6}$  см интервал температур, в котором происходило изменение их сопротивления от значения в нормальном состоянии  $R_n$  до нуля, не превосходил 0,03°. У образцов меньших толщин наблюдалось некоторое расширение этого интервала. Зависимости критической температуры  $T_k$  от толщины у образцов толще  $2 \cdot 10^{-6}$  см не наблюдалось; у более тонких пленок имело место явное смещение критической температуры в сторону низких температур, приблизительно обратно пропорционально толщине пленки (рис. 2 а). Подобная же зависимость  $T_k$  от толщины образца была обнаружена нами ранее при исследовании пленок других сверхпроводников <sup>(4)</sup>.

3. Для всех образцов измерялась зависимость сопротивления от величины параллельного плоскости пленки магнитного поля, по которой определялось критическое магнитное поле  $H_k$ . По характеру зависимости  $H_k$  от температуры (рис. 3) пленки висмута не отличаются от других сверхпроводников <sup>(5,6)</sup>. У них так же наблюдаются две области с различной зависимостью  $H_k$  от  $\Delta T = T_k - T$ : область с зависимостью, характерной для массивных образцов сверхпроводников, и область, в которой  $H_k$  примерно пропорционально  $\Delta T^{1/2}$  (область тонких пленок). В области тонких пленок  $H_k$  изменяется приблизительно обратно пропорционально толщине образца (рис. 4 а).

На основании результатов измерения  $H_k$  было определено влияние толщины образцов висмута на их сверхпроводящие свойства. Мы опре-

деляли связь между величиной  $H_k/\Delta T$  и  $\delta_0(T)/d\delta_{00}$ . Так как оказалось (рис. 4 б), что для всех исследованных образцов висмута имеет место общая зависимость между  $H_k/\Delta T$  и  $\delta_0(T)/d\delta_{00}$ , то, повидимому, структура исследованных пленок одинакова и различие в их свойствах связано лишь с толщиной образцов.

Поэтому, воспользовавшись результатами измерения критического магнитного поля в области тонких пленок и теоретической <sup>(7,8)</sup> зависимостью  $H_k = 2 \sqrt{6} H_{км} \frac{(\delta_0 T)}{d}$ , можно было определить для сверхпроводящей модификации висмута величину  $H_{км}\delta_0$ , которая оказалась равной  $1,45 \pm 0,7 \cdot 10^{-2}$  эрст·см·град<sup>1/2</sup>. Отсюда, предполагая, что величина  $dH_{км}/dT$  у висмута  $\sim 150$  эрст/град, можно оценить величину глубины проникновения магнитного поля в массивный образец сверхпроводящей модификации висмута:  $\delta_0(T) \sim 10^{-4} (T_k - T)^{1/2}$  см.

4. Образцы висмута при отжиге переходят из сверхпроводящей в обычную несверхпроводящую модификацию <sup>(2)</sup>. В несверхпроводящей модификации удельное сопротивление висмута в несколько раз меньше, чем в сверхпроводящей. Поэтому на основании изменения сопротивления образцов при отжиге можно судить об изменении их модификации. Отжиг образцов производился посредством медленного повышения температуры со скоростью  $1^\circ$  за 10—15 мин. Так как у большинства исследованных образцов при отжиге возрастание сопротивления происходило в относительно широком интервале температур и зависело от времени нахождения образца при данной температуре, то определялась температура начала возрастания сопротивления — «температура перехода»  $T_p$ . Повидимому, она соответствует началу перехода висмута из сверхпроводящей в несверхпроводящую модификацию. Эта температура увеличивается с уменьшением толщины пленки примерно обратно пропорционально ее толщине (рис. 2 б).

Экстраполируя зависимость  $T_p$  от толщины образца, можно определить температуру перехода «массивного» образца висмута из сверхпроводящей в нормальную модификацию. Эта температура равна 10—11° К.

Проведен ряд опытов для выяснения влияния поверхности, на которую производится конденсация висмута, на его свойства. Для этого на

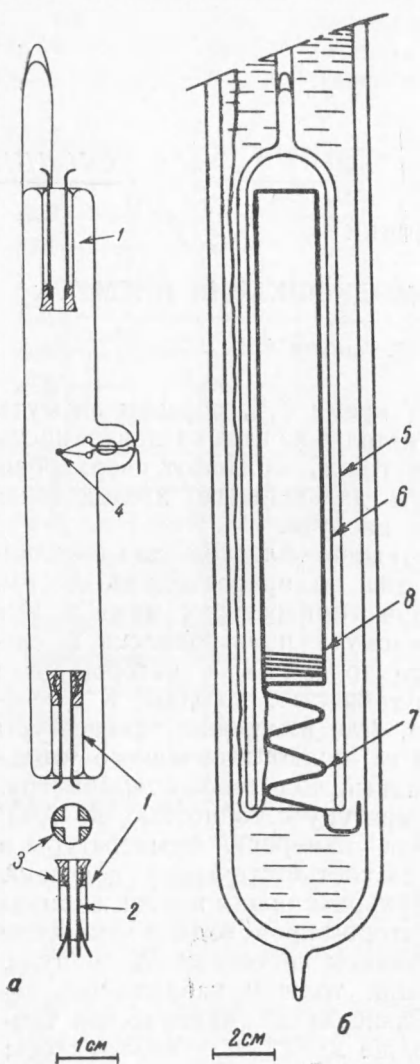


Рис. 1. а — прибор для приготовления пленок. 1 — стеклянный стаканчик, 2 — платиновые проволоки для измерения сопротивления пленки, 3 — слой платины, нанесенный катодным распылением для контакта между проволоками и пленкой, 4 — испаритель. б — термостат. 5 — дьюаровский сосуд в жидком гелии, 6 — медный экран, 7 — холодопровод из медной фольги, 8 — нагреватель

8

дно стаканчика (рис. 1 а) вначале конденсировалась пленка висмута толщиной  $10^{-5}$  см, которая затем отжигом переводилась в несверхпроводящую модификацию. На этот слой висмута при  $2^\circ$  К из другого испарителя наносился второй слой металла. Были проведены опыты с толщиной второго слоя  $4,3 \cdot 10^{-7}$  и  $2,3 \cdot 10^{-6}$  см. У обоих образцов обнаружен резкий переход в сверхпроводящее состояние. Критическая температура пленок сверхпроводящего висмута, сконденсированных на несверхпроводящий висмут, оказалась несколько меньше критической температуры образцов той же толщины, сконденсированных на стекле (рис. 2 а). При отжиге образцов обнаружено уменьшение температуры перехода (рис. 2 б) до величины, близкой к наблюдавшейся у наиболее толстых из исследованных образцов, сконденсированных на стекле.

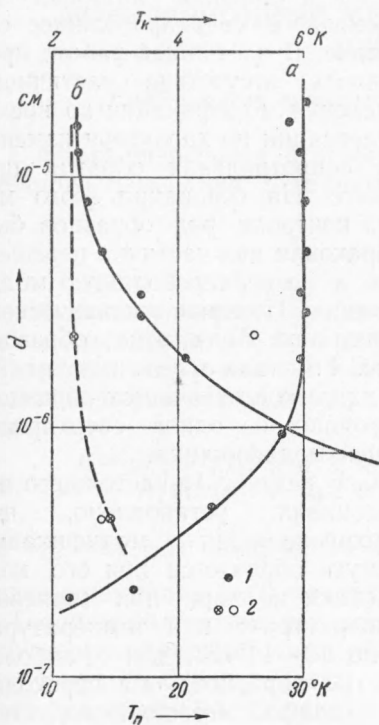


Рис. 2. а — критическая температура сверхпроводящих пленок из висмута, б — температура перехода висмута из сверхпроводящей в несверхпроводящую модификацию. 1 — образцы, сконденсированные на стекло, 2 — образцы, сконденсированные на несверхпроводящий висмут

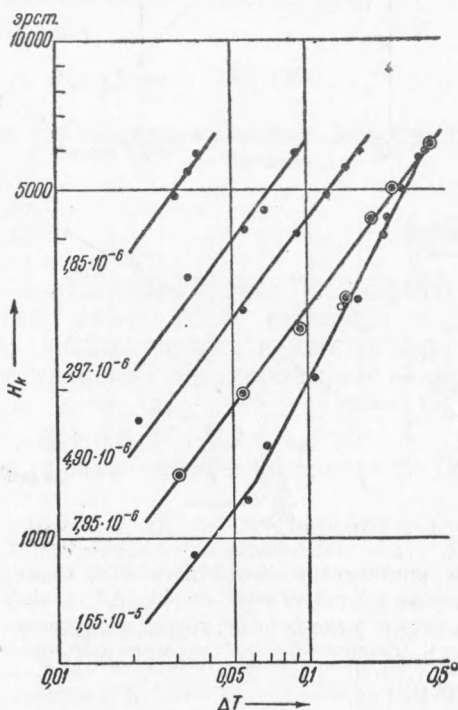


Рис. 3. Зависимость критического магнитного поля  $H_k$  от  $\Delta T = T_k - T$  ( $T$  — температура измерения) для образцов висмута различной толщины

5. Наличие сверхпроводимости даже у пленок, сконденсированных на висмут, находящийся в несверхпроводящей модификации, показывает, что образование сверхпроводящей модификации висмута не зависит от поверхности, на которую производится конденсация. Эта сверхпроводящая модификация у массивного образца висмута является, видимо, устойчивой ниже  $10$ — $11^\circ$  К. Происходящее у образцов малых толщин возрастание температур перехода сверхпроводящей в несверхпроводящую модификацию может быть объяснено, например, влиянием поверхностной энергии. Этому не противоречат результаты опытов с пленками сверхпроводящего висмута, сконденсированными на несверхпроводящей. Вследствие низкой температуры изменения модификации, перегрев образца

при конденсации приводит к его переходу в несверхпроводящую модификацию, визуально заметному по изменению окраски пленки (2). Резкая граница области, перешедшей в несверхпроводящую модификацию, вызвана зависимостью температуры перехода от толщины пленки (рис. 2 б).

Нужно отметить, что в приборах, применявшихся нами при первоначальном исследовании висмута (2), было трудно устранить перегрев образцов в процессе их конденсации, который мог приводить к частичному изменению модификации. Последним обстоятельством, видимо, объясняются различные значения критических температур пленок и широкий интервал их перехода в сверхпроводящее состояние. В настоящей работе проверялось отсутствие частичного изменения модификации во время конденсации по характеру изменения сопротивления образца при отжиге. На основании этого метода контроля ряд образцов был забракован как частично перешедших в несверхпроводящую модификацию. Измерение критического магнитного поля этих образцов (рис. 4 б) также ясно показывает на их резкое отличие от образцов, состоящих из одной сверхпроводящей модификации.

6. В результате настоящего исследования установлено, что сверхпроводящая модификация висмута образуется при его конденсации из пара при гелиевых температурах; при температурах около 10–11° К (для наиболее толстых образцов) она переходит в обычную несверхпроводящую модификацию. Ее оптические свойства (2) резко отличаются от свойств несверхпроводящей модификации.

В сверхпроводящей модификации удельное сопротивление в несколько раз меньше, чем в несверхпроводящей; в ней висмут — сверхпроводник с критической температурой, равной 6° К; в магнитном поле он ведет себя как сверхпроводник 2-й группы и характеризуется величиной  $H_{км} \delta_0(T) = 1,45 \pm 0,7$  эрст · см · град

Автор выражает глубокую благодарность А. И. Шальникову и А. А. Абрикосову за внимание к работе и обсуждение ее результатов и Б. Д. Юрасову за техническое содействие.

Институт физических проблем им. С. И. Вавилова  
Академии наук СССР

Поступило  
5 V 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> R. Hilsch, Rec. Intern. Confer. of Low Temperature Physics, Oxford, 1951, p. 119.  
<sup>2</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 86, 687 (1952). <sup>3</sup> A. Brown, H. Zemansky, N. Boorse, Phys. Rev., 84, 1050 (1951). <sup>4</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 82, 229 (1952). <sup>5</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 85, 749 (1952). <sup>6</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 86, 501 (1952). <sup>7</sup> В. Л. Гинзбург, Л. Д. Ландау, ЖЭТФ, 20, 1064 (1950). <sup>8</sup> А. А. Абрикосов, ДАН, 86, 489 (1952).

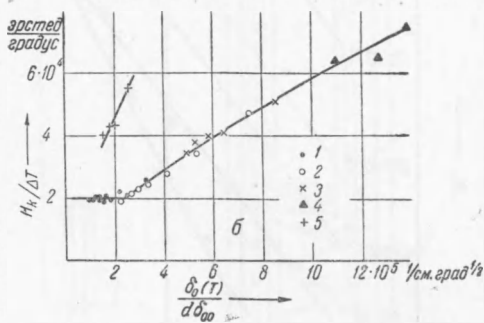
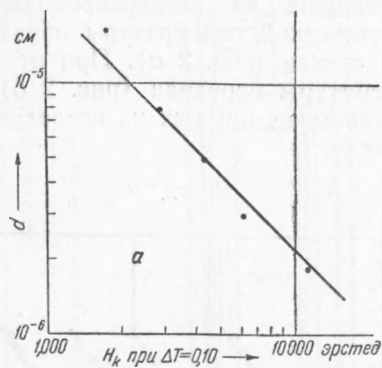


Рис. 4. а — зависимость от толщины образцов критического магнитного поля тонких пленок, б — зависимость  $H_k/\Delta T$  пленок висмута от отношения глубины проникновения к толщине образца; толщина образцов: 1 —  $1,65 \cdot 10^{-5}$  см, 2 —  $7,95 \cdot 10^{-6}$  см, 3 —  $4,90 \cdot 10^{-6}$  см, 4 —  $2,97 \cdot 10^{-6}$  см, 5 — образец, перегретый при конденсации, толщина  $1,55 \cdot 10^{-5}$  см