

## ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ И ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ПЛОСКОСТИ ДВОЙНИКОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

И.Н.Хлюстиков, М.С.Хайкин

Исследована фазовая диаграмма сверхпроводимости плоскости двойникования монокристаллов олова в координатах  $(H, T)$ . Обнаружена зависимость критических параметров пары параллельных плоскостей двойникования от расстояния между ними и исследована зависимость от этого расстояния фазовой диаграммы пары плоскостей. Наблюдена сверхпроводимость плоскостей двойникования монокристаллов индия и таллия.

1. В опытах<sup>1, 2</sup>, в которых была обнаружена сверхпроводимость плоскости двойникования (ПД) бикристалла олова, было замечено существование областей стабильной и метастабильной фаз. Пример записи магнитного момента образца  $M_D(H)$ , демонстрирующий это обстоятельство, приведен на рис. 1 справа вверху. Если запись  $M_D$  начинается с достаточно большого значения поля  $H$  (стрелка  $a$ ), то момент  $M_D$  возникает скачком при поле  $H_m$  (в хорошем однородном образце наблюдается один скачок, в иных случаях – несколько). При обратном изменении поля запись момента  $M_D$  идет по пунктирной кривой, и  $M_D$  исчезает при  $H \approx H_d$ .

Если снова обратить направление изменения поля  $H$ , не доходя до  $H_d$  (т.е. по стрелке  $b$ ) то  $M_D$  изменяется обратимо (по пунктиру). Если же зайти в область  $H > H_d$  и затем уменьшать  $H$ , то запись  $M_D$  опять идет по стрелке  $a$ . Уменьшая интервал  $(a, b)$ , можно измерить поле  $H_d$  – верхнюю границу области метастабильных состояний – с точностью  $\sim 5\%$ ; нижняя граница  $H_m$  воспроизводится с такой же точностью при повторных экспериментах.

В результате описанных измерений  $H_d$  и  $H_m$  при различных температурах и на различных образцах получена фазовая диаграмма, представленная на рис. 1. Масштабы по осям выбраны в соответствии с эмпирической формулой  $M_D \propto H \exp[-H/h] \exp[-(T - T_c)/\tau]$ , найденной в работе<sup>3</sup> и описывающей зависимость  $M_D(H, T)$  во всем исследованном интервале  $H$  и  $T$  (пример подобной зависимости приведен на рис. 1 вверху). Величины  $h$  и  $\tau$  зависят от качества образца, однако их отношение остается постоянным и равным  $h/\tau = 110$  Э/К (исследованы несколько десятков образцов). Характерные значения констант  $h$  и  $\tau$  приведены в таблице. Сходная фазовая диаграмма предложена в работе<sup>4</sup>; более точные расчеты фазовой диаграммы, выполненные позже авторами этой работы, привели к хорошему количественному согласию с излагаемыми результатами опытов.

На фазовой диаграмме рис. 1 линией без точек указана граница существования объемной сверхпроводимости образца олова  $H_c(T)$  с наклоном  $-164$  Э/К. По экспериментальным точкам проведены интерполирующие прямые  $H_d(T)$  с наклоном  $-120$  Э/К и  $H_m(T)$  с наклоном  $-40$  Э/К. Эти линии разбивают плоскость  $(H, T)$  на следующие области:

I – область объемной сверхпроводимости;

II – область нормального состояния;

III – область метастабильных состояний сверхпроводимости ПД;

IV – область стабильных состояний сверхпроводимости ПД.

Правые пунктирные части прямых  $H_d(T)$  и  $H_m(T)$  – экстраполяция в область, где измерений нет (сигнал оказывается намного слабее шумов). Отметим, что прямые  $H_d(T)$  и  $H_m(T)$  пересекаются вблизи точки с координатами  $(4, 0)$ .

2. Известно, что критическая температура и критическое поле тонкого слоя сверхпроводника снижаются под влиянием близости нормального металла. Этот эффект близости, очевидно, должен сказываться и на сверхпроводимости ПД. Описываемые далее опыты имели целью обнаружение обратного эффекта: повышения критических температуры и поля двух близко лежащих ПД с уменьшением расстояния между ними.

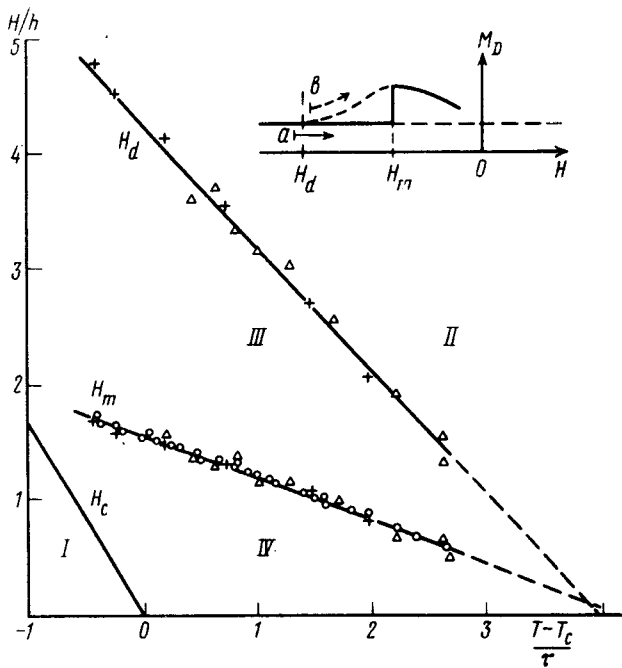


Рис. 1

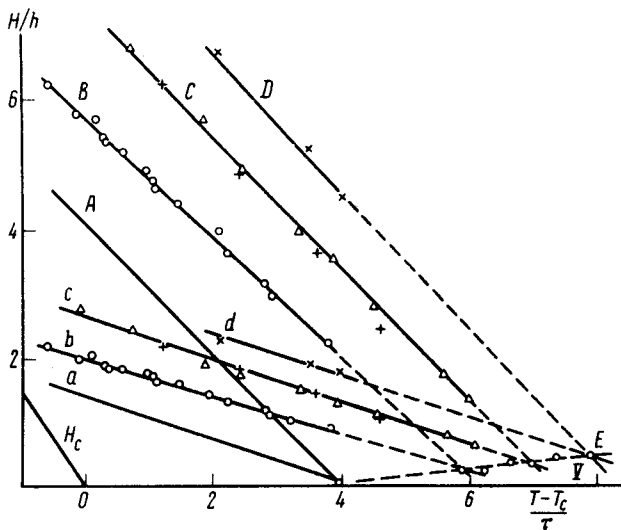


Рис. 2

Для обнаружения эффекта был изготовлен монокристалл олова, в котором путем механического двойникования образован пересекающий его тонкий  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  см кристалл-двойник. Благодаря тщательному изготовлению (отбор, отжиг) удалось получить образец, в котором наблюдался переход к сверхпроводимости ПД одним скачком — подобно изображенному на графике рис. 1 (вверху). Результаты измерений  $H_d$  и  $H_m$  на этом образце представлены прямыми  $B$  и  $b$  (соответственно) на рис. 2. Для сравнения на этом рисунке проведены прямые  $A$  и  $a$ , воспроизводящие прямые  $H_d$  и  $H_m$  рис. 1. Видно, что наличие двух ПД привело к увеличению значений их критических параметров. На нескольких других образцах были получены аналогичные результаты, представленные для одного из образцов прямыми  $C$  и  $c$ , а для остальных — только точками пересечений соответствующих прямых  $H_d$  и  $H_m$ , лежащими близ прямой  $E$ . К сожалению, измерить толщину прослойки двойника на этих образцах не удалось. Прямые  $D$  и  $d$  представляют результаты измерений однородно деформированного образца, в котором средняя плотность участков ПД опре-

делалась по величине диамагнитного момента; среднее расстояние между этими участками <sup>5</sup> оценено в  $\sim 10^{-4}$  см. Как видно из рис. 2, интервал температур, в котором существует исследуемый эффект, увеличился вдвое по сравнению с уединенной ПД.

Описанные эксперименты указывают на очень интересную возможность существенного повышения критических параметров металла в образце периодической структуры — в виде множества тонких параллельных монокристаллических слоев, имеющих взаимную ориентацию двойников.

Отметим, что прямая  $E$  рис. 2, на которой лежат точки пересечения прямых  $H_d$  и  $H_m$ , ограничивает еще одну часть фазовой диаграммы — область  $V$ , в которой имеет место инверсное соотношение верхнего и нижнего критических полей  $H_d < H_m$ ; однако, сделать какие-либо измерения в этой любопытной области пока не удалось.

3. Кроме описанных опытов с Sn, были выполнены опыты по наблюдению сверхпроводимости ПД в In, Tl и Al; в последнем эффект не найден. Характеристики этих металлов приведены в таблице.

	Sn	In	Tl	Al
структура	тетрагон.	тетрагон.	гексагон.	г.ц. куб.
плоскость двойникования	(301)	(101)	(10 $\bar{1}$ 2)	(111)
$T_c$ , К	$\sim 0,01$	$\sim 0,001$	$\sim 0,001$	—
$h$ , Э	$\sim 0,8 \div 1$	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$	—

Отметим еще раз, что ПД является плоскостью зеркальной симметрии бикристалла. Работы <sup>1, 2</sup> высказаны соображения о том, что симметрия бикристалла относительно ПД служит причиной появления в двойнике экстремальной группы электронов, не существующей в монокристалле. Эти электроны, движущиеся параллельно ПД, сильно взаимодействуют с фононами ПД, также не существующими в монокристалле. Таким образом в бикристалле близ ПД возникает „двумерный металл” <sup>1, 2</sup>, свойства которого могут существенно отличаться от свойств трехмерного кристалла того же металла. В частности, спектр фононов „двумерного металла” смягчен, по сравнению с трехмерным, тем сильнее, чем более косо ориентирована ПД, вследствие малой ее населенности атомами металла. Последнее и приводит к повышению критической температуры ПД — наибольшему для Sn.

Действительно, смягчение спектра фононов есть путь повышения критической температуры  $T_c$  сверхпроводника <sup>6</sup>. Так, сжатие решетки кристалла Sn на 1% приводит <sup>7</sup> к понижению  $T_c$  (Sn) на  $\sim 1$  К; ее растяжение приведет к соответствующему росту  $T_c$  (Sn). Межатомные расстояния в плоскости (301), являющейся ПД, на  $\sim 50\%$  (в среднем) больше размеров кристаллической ячейки Sn. Это делает вполне естественным значительное повышение  $T_c$  (ПД Sn), снижаемое лишь эффектом близости кристалла Sn, находящегося в нормальном состоянии при  $T > T_c$  (Sn).

П.Л.Капице авторы благодарны за интерес к работе, Л.Н.Булаевскому и А.И.Буздину — за ее обсуждение, Ю.В.Шарвину — за предоставленные образцы Al, Г.С.Чернышеву — за техническую помощь.

#### Литература

1. Хайкин М.С., Хлюстиков И.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 167.
2. Khaikin M.S., Khlustikov I.N. Physica, 1981, 108B, 1259.
3. Хлюстиков И.Н., Хайкин М.С. ЖЭТФ, 1978, 75, 1158.

4. Буздин А.И., Булаевский Л.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 118.
5. Хлюстиков И.Н., Хайкин М.С. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 207.
6. „Проблема высокотемпературной сверхпроводимости” под ред. В.Л.Гинзбурга и Д.А.Киржница, М.: Наука, 1977.
7. Seiden P.E. Phys. Rev., 1969, 179, 458.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
2 июля 1982 г.

---