

## ОБ АНОМАЛИЯХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

И.В.Берман, Н.Б.Брандт, И.Л.Ромашкина, В.И.Сидоров, В.А.Алексеев

В области давлений 140 – 180 кбар, предшествующей кристаллизации  $a\text{-Si : H}$ , обнаружено значительное (на 1,5 – 3 К) увеличение температуры  $T_c$  перехода в сверхпроводящее состояние по сравнению с  $T_c$  в аморфной и кристаллической фазах. Высказывается предположение, что рост  $T_c$  может быть обусловлен взаимодействием электронов с концентрационными волнами в кристаллизующейся системе.

Исследование сверхпроводимости у систем, находящихся в метастабильном состоянии, представляет большой интерес. Особое место среди таких систем занимают аморфные вещества, у которых под действием давления оказывается возможным наблюдать не только возникновение сверхпроводимости вблизи порога подвижности<sup>1</sup>, но и изменение сверхпроводящих свойств в области давлений, близких к давлению кристаллизации.

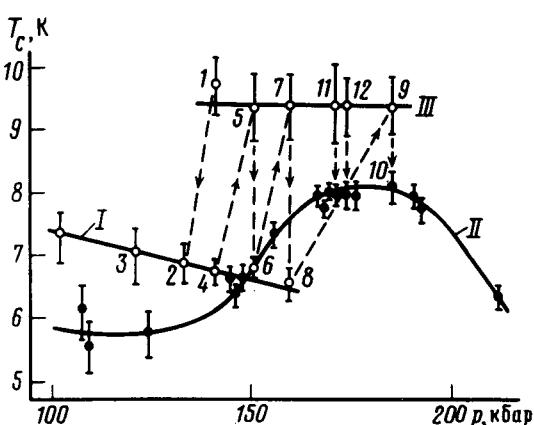
В настоящей работе исследованы сверхпроводящие свойства аморфного  $a\text{-Si : H}$  при высоких давлениях. Давление кристаллизации аморфной фазы кремния существенно превосходит давление, при котором возникает сверхпроводимость<sup>2</sup>. Это обстоятельство позволяет исследовать характер изменения  $T_c$  при приближении к давлению кристаллизации, а также в кристаллических фазах, возникающих в области более высоких давлений.

Образцы получались методом разложения силана и содержали до 16 ат.% водорода. Измерения проводились в области давлений до 220 кбар и температур (1,5 – 300 К). Давление с точностью  $\pm 10\%$  определялось по смещению  $T_c$  у свинцового манометра, смонтированного вместе с образцом. Электросопротивление измерялось четырехконтактным методом.

В системе  $a\text{-Si : H}$  давление вызывает переход диэлектрик – металл (по-видимому, мотовского типа), сопровождающийся уменьшением электросопротивления  $R$  на  $7 \div 10$  порядков. Давление перехода  $P_0$  ( $X$ ) возрастает при увеличении концентрации водорода  $X$  от  $P_0 = 100$  кбар при  $X = 0$  до  $P_0 = 170$  кбар при  $X = 16$  ат.%. При  $P > P_0$  ( $X$ ), но  $< 140$  кбар, в металлической аморфной фазе  $T_c$  линейно понижается с ростом  $P$  (см. рисунок, кривая I). При давлениях, превышающих 180 кбар, по данным рентгенографического анализа<sup>2</sup>, происходит полная кристаллизация аморфного кремния в смесь кристаллических фаз со структурами ОЦК и  $\beta\text{-Sn}$ . По-видимому, аналогичная ситуация имеет место для  $a\text{-Si : H}$ .

Для кристаллизовавшихся фаз  $a\text{-Si : H}$  зависимость  $T_c$  от  $P$  имеет вид кривой с максимумом (кривая II). Движение по этой кривой полностью обратимо. Переходы кристаллизовавшихся фаз в сверхпроводящее состояние острые, хотя ширина переходов несколько возрастает при приближении к граничному значению  $P \approx 100$  кбар, ниже которого сверхпроводимость отсутствует. Исчезновение сверхпроводимости при  $P \lesssim 100$  кбар связано с увеличением концентрации ОЦК фазы, которая является полупроводником с характерной для полупроводников температурной зависимостью электросопротивления.

В области промежуточных давлений  $140 < P < 180$  кбар, предшествующей кристаллизации, наблюдается следующее интересное явление: небольшое увеличение давления вызывает значительное (до  $\sim 3$  К) повышение  $T_c$  (кривая III). Состояние с более высокими  $T_c$  сохраняется при комнатной температуре в течение 2–3 часов. При больших временах отжига это состояние разрушается и система переходит или в равновесное металлическое аморфное состояние (при  $P < 60$  кбар) с критическими температурами, соответствующими кривой I, или в кристаллическое состояние с  $T_c$ , соответствующими кривой II. Промежуточных значений  $T_c$  между "высокотемпературным" и равновесными не наблюдалось. После полной кристаллизации образца (при  $P > 180$  кбар) эффект исчезает.



Изменение  $T_c$  у  $a\text{-Si} : \text{H}$  под действием давления.  
Кривые: I – равновесные значения  $T_c$  у аморфной металлической фазы  $a\text{-Si} : \text{H}$ ; II – значения  $T_c$  у кристаллизовавшихся фаз  $a\text{-Si} : \text{H}$  (черные круги); III –  $T_c$  у неравновесной фазы  $a\text{-Si} : \text{H}$ . Цифрами 1 – 10 обозначена последовательность изменения состояния одного и того же образца  $a\text{-Si} : 10\%$  H до полной кристаллизации

Эффект возрастания  $T_c$  при переводе системы в неравновесное состояние вблизи порога структурной устойчивости (кривая III), по своей природе, по-видимому, наиболее близок к наблюдавшемуся в <sup>3</sup> уменьшению  $T_c$  у сверхпроводящих стекол при отжиге вблизи температуры стеклования по сравнению с  $T_c$  у свежезакаленных образцов, находящихся в неравновесном состоянии. Величина изменения  $T_c$  в этих экспериментах, в отдельных случаях, достигала 15%.

Значительное увеличение  $T_c$  у пленок  $a\text{-Si} : \text{H}$  и у стекол, находящихся в неравновесном состоянии вблизи порога кристаллизации (стеклования), свидетельствует об усилении в этом состоянии электрон-электронного взаимодействия, ответственного за сверхпроводимость. Увеличение энергии взаимодействия в электронной системе может быть связано или с усилением обычного электрон-фононного взаимодействия, или с появлением дополнительных, не фононных механизмов сверхпроводимости. В качестве одного из таких механизмов в настоящее время рассматривается виртуальное взаимодействие электронов с туннелирующими уровнями, характерными для аморфных систем <sup>4-6</sup>.

Однако, учет этого механизма, по теоретическим оценкам, проведенным в <sup>6</sup>, должен приводить лишь к незначительному (всего на несколько процентов) изменению  $T_c$ . В настоящее время нет также никаких данных, свидетельствующих о существенном изменении фононного спектра у аморфных материалов в неравновесном состоянии и указывающих на возможность усиления у них электрон-фононного взаимодействия. Поэтому не исключена возможность, что эффект увеличения  $T_c$  вблизи порога кристаллизации связан с взаимодействием электронов с другим типом конфигурационных возбуждений, например, с концентрационными волнами <sup>7,8</sup>. Подобного рода механизм, имеющий, как показано в <sup>7,8</sup>, релаксационный характер, может быть ответственен также за высокие значения  $T_c$  аморфных пленок Ga и Bi и аномалии их свойств, наблюдавшиеся в <sup>9</sup> при кристаллизации и за увеличение  $T_c$  у предельно деформированных образцов  $P^{10}$  и  $a\text{-Si}$  <sup>11</sup>.

Пользуемся случаем выразить нашу искреннюю признательность В.Е.Егорушкину за обсуждение результатов работы и Д.П.Уткину за предоставление образцов.

## Литература

1. Берман И.В., Брандт Н.Б., Алексеев В.А., Костылева И.Е., Сидоров В.И., Пяткина О.П. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 472.
2. Minomura S. Amorphous Semicond. : Technol. and Devices, 1981, 245.
3. Altounian Z., Guo-hua Tu, Strom-Olsen O. Solid State Comm., 1981, 40, 221.
4. Anderson P.W., Halperin B.I., Varma C.M. Phil. Mag., 1972, 25, 1.
5. Phillips W.A. J. Non-Cryst. Solid, 1978, 31, 267.
6. Harris R., Lewis L.J., Zuckermann M.J. J. Phys. F: Met. Phys., 1983, 13, 2323.
7. Алышев С.В., Егорушкин В.Е., Кульментьев А.И. ДАН СССР, 1981, 258, 7.
8. Егорушкин В.Е., Мурзашев А.И., Панин В.Е. Изв. высш. уч. зав., сер. Физика, 1984, 1, 15.
9. Белевцев Б.И., Брандт Н.Б., Комник Ю.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1975, 22, 510.
10. Kawamura H., Shirotani I., Tachikawa K. Solid State Comm., 1984, 49, 879.
11. Валянская Т.В., Степанов Г.Н., Яковлев Е.Н. Труды XXIII Всесоюзного совещания по физике низких температур, 1984, ч. I , 112.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
31 января 1985 г