

ГДЕ ПРЕДЕЛ T_C Nb_3Ge ?

А. И. Головашкин, Н. П. Кокоева, Е. В. Печень

УДК 537.312.6

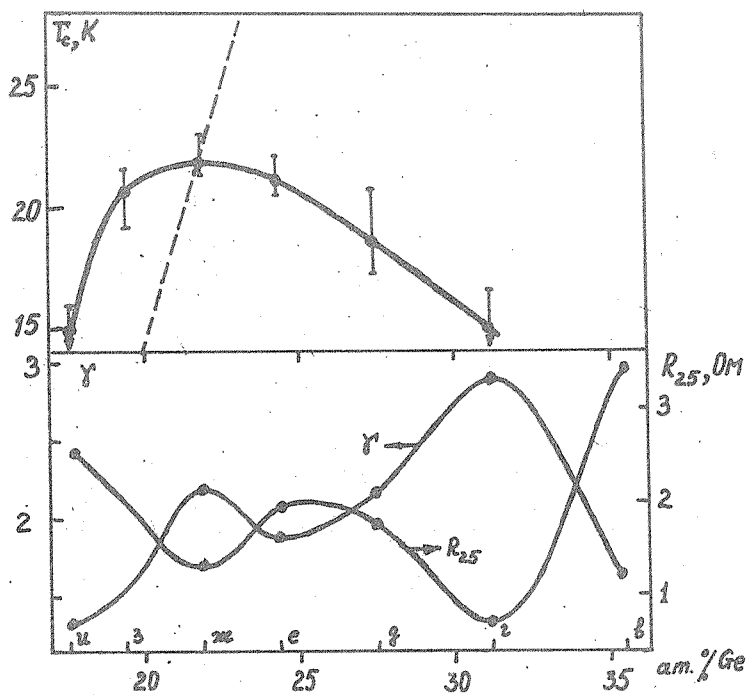
Изучена концентрационная зависимость T_C и других характеристик пленок Nb-Ge. Найдена корреляция T_C с остаточным сопротивлением. Получена полная сверхпроводимость при 23,0 K ($T_C = 23,2$ K и начало сверхпроводящего перехода $T_C^{(H)} = 23,9$ K). Связанные со сверхпроводимостью особенности перехода обнаружены вплоть до 25 K. Для Nb_3Ge оценено предельное значение $T_C = 27-30$ K.

До сих пор не существует однозначной оценки предельного значения температуры сверхпроводящего перехода T_C Nb_3Ge /1/, в пленках которого получены рекордные значения T_C . Сплавлением компонент не удается достигнуть высоких T_C , что, очевидно, связано с невозможностью подойти к стехиометрическому составу в равновесной фазе A15. Реализация в пленках особого механизма роста β -фазы /2/ позволяет приблизиться к стехиометрии и при этом получить достаточно совершенную структуру. Изучение концентрационной зависимости T_C позволяет оценить предельные возможности Nb_3Ge . Независимую оценку предела T_C можно получить, исследуя корреляцию T_C с электрическим сопротивлением пленок.

При рассмотрении механизма формирования неравновесных фаз в пленках возможны два подхода. Можно ввести понятие фазовой диаграммы для неравновесных условий (например, при участии кислорода /2/). Изменение потенциалов Гиббса β - и α -фаз в этих условиях повышает конкурентноспособность высокотемпературной фазы A15. Можно, однако, исходить и из равновесной фазовой диаграммы, но для объяснения процессов, происходящих при росте пленки, при-

влечет дополнительно механизм пересыщения. Присутствие кислорода способствует образованию β -фазы, пересыщенной Ge. Распад высокотемпературной β -фазы, начинающийся с уходом кислорода, затруднен из-за низкой подвижности Nb и Ge при температуре осаждения. Кроме того обособленность зерен /2/ и оптимальность их размера делают энергетически невыгодным их последующее измельчение и появление внутри них дополнительных фазовых границ. Формирование высокотемпературной сверхпроводящей фазы важно проследить на серии образцов, полученных в одном опыте.

Пленки изготавливались методом катодного распыления /2/. T_c измерялись четырехконтактным способом с точностью выше 0,1 К.



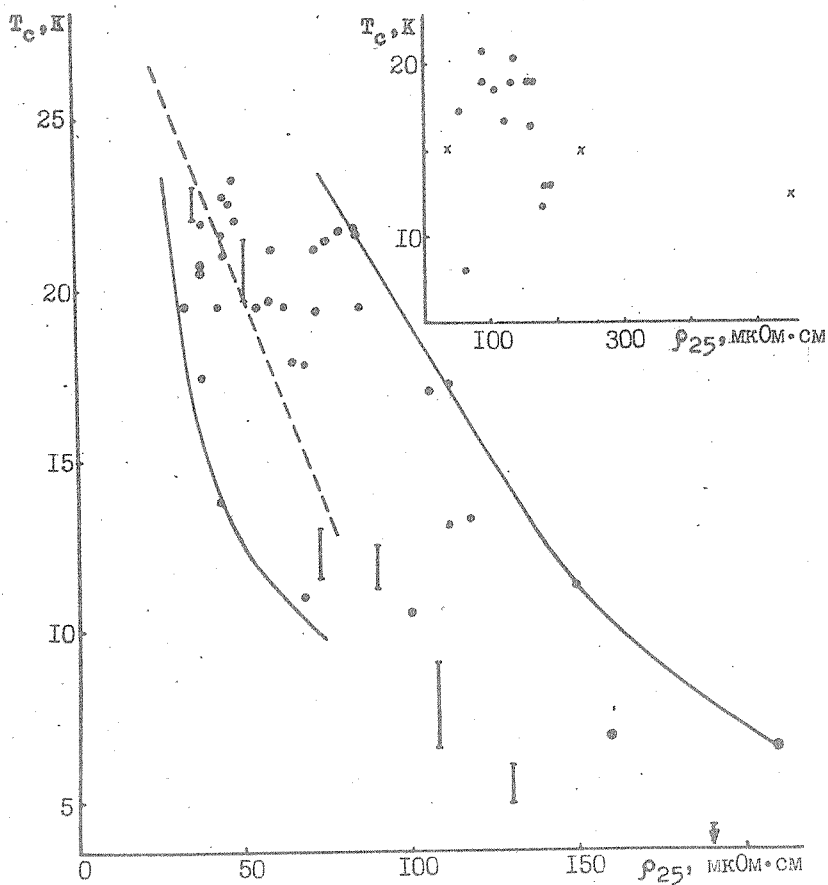
Р и с. 1. Концентрационные зависимости T_c , γ и R_{25} для серии № 110 (буквами обозначены номера образцов в серии). Пунктиром показана зависимость T_c от состава собственно β -фазы

Германиевый термометр тщательно градуировался по термометрам ТСН-I и ТСГ-I, гелиевой, водородной, неоновой, азотной реперным точкам с точностью 0,01 К. Состав образцов определялся микрозондовым анализатором с точностью ~ 1 ат.%. Возможно систематическое занижение содержания Ge на ~ 1 ат.%, связанное с шероховатостью эталона Nb. Погрешность измерения удельного сопротивления при 25 К R_{25} составляла около 10% и определялась измерением толщины.

На рис. 1 приведены зависимости T_c , $\gamma = R_{300}/R_{25}$ и R_{25} от атомной концентрации Ge С для характерной серии образцов (R_{300} и R_{25} - сопротивления при 300 К и 25 К). Плавность и асимметрию кривой T_c (С) можно объяснить, исходя из развитой ранее модели формирования метастабильной β -фазы [2]. Плавность связана с образованием включений высокотемпературной сверхпроводящей β -фазы даже при значительных отклонениях состава пленки от оптимального C_0 . Асимметрия обусловлена зависимостью состава и количества β -фазы, определяющей T_c , от состава пленки С. При низком содержании Ge изменение С меняет состав основной фазы. Флуктуации состава повышают T_c в меру образования β -фазы с более высоким содержанием Ge. При $C \gg C_0$ формируется β -фаза с содержанием Ge, близким к максимальному (для данных условий), а избыточный Ge идет на образование σ -фазы. При этом понижение T_c с ростом С связано с уменьшением размеров кристаллитов β -фазы, приводящим к относительно высокому содержанию примесей и дефектов, а также с ростом напряжений, вызванных наличием σ -фазы. Зависимости γ и R_{25} от С подтверждают описанную картину. Максимум γ и минимум R_{25} наблюдаются вблизи состава C_0 , соответствующего максимуму T_c . Максимум γ и минимум R_{25} при составе, богатом Ge, определяются σ -фазой.

Зависимость T_c (С) позволяет оценить предельное T_c в Nb_3Ge . Для этого достаточно построить зависимость T_c от состава самой фазы (в первом приближении - прямая). Состав наиболее высокотемпературной фазы должен примерно соответствовать составу пленки при $C = C_0$ (в отсутствие флуктуаций этот состав был бы границей области гомогенности β -фазы). Для получения указанной зависимости необходимо провести прямую через точку $T_c(C_0)$ параллельно круто возрастающему начальному участку кривой T_c (С) в

области $\sigma < \sigma_0$ (флуктуации считаются независимыми от состава). Эта прямая практически совпадает с зависимостью, построенной по данным для массивных равновесных и закаленных образцов Nb-Ge /3/. Экстраполяция к стехиометрическому составу дает

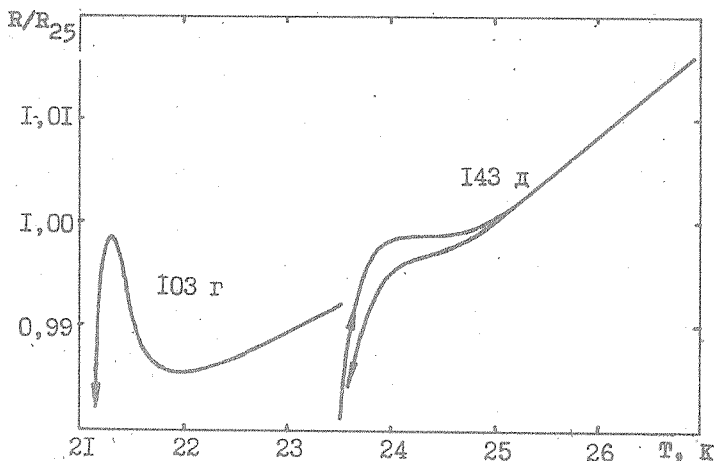


Р и с. 2. Корреляция T_c и ρ_{25} для образцов, полученных в "мягких" режимах. Отрезками приведены данные /8/. На вставке даны результаты для образцов, приготовленных в "жестких" режимах (точки), и для составов, соответствующих σ -фазе (крестики)

$T_C \sim 30$ К, что следует рассматривать как верхний предел из-за наличия механизмов (например, размытие пика плотности электронных состояний), понижающих T_C при усилении электрон-фононного взаимодействия.

Непрерывное распределение β -фазы по составу в некотором интервале должно проявляться в дополнительном уширении рентгеновских дифракционных линий. Обычно на неоднородность β -фазы обращают внимание лишь в случае, когда наблюдается их расщепление /4/.

Корреляция T_C с ρ_{25} (величина ρ_{25} близка к остаточному сопротивлению $\rho_{ост}$) показана на рис. 2. Приведены результаты для образцов, изготовленных в "мягких" режимах, с составами, находящимися в пределах максимума $\chi(C)$, относящегося к β -фазе, в которых основной вклад в проводимость дает β -фаза. На том же рисунке отрезками приведены данные по облучению Nb_3Ge ионами гелия /5/. На вставке к рисунку даны результаты для образцов, полученных в "жестких" режимах, а также для составов, соответствующих σ -фазе. В таких образцах рентгеновские исследования показывают наличие значительного количества посторонних фаз. Это приводит к большому разбросу точек. Значительно более низкое содержание посторонних фаз в образцах, полученных в "мягких" режимах, дает и существенно меньший разброс точек. Ближе всего к "идеальной" зависимости T_C от состава самой фазы лежат точки для образцов из области гомогенности β -фазы, которые практически совпадают с зависимостью T_C от $\rho_{ост}$ из /5/. Прямая, проведенная по группе этих точек, в области относительно высоких T_C дает зависимость $T_C \approx 32 - \rho_{25}^{1/4}$ (ρ_{25} в мкОм·см, T_C в градусах Кельвина). Поскольку $\rho_{25} = m\dot{\nu}/e^2N$, где N - концентрация электронов проводимости, $\dot{\nu}$ - частота электронных соударений при $T \sim 25$ К, получим $T_C \approx 32 - 200\dot{\nu}$ ($\dot{\nu}$ в эВ). Предполагается, что N не меняется при изменении ρ_{25} и равно $0,65 \cdot 10^{22}$ см⁻³ /6/. Из-за сильного электрон-фононного взаимодействия даже в образцах с малыми $\rho_{ост}$ величина $\dot{\nu}$ при $T \sim T_C$ остается еще значительной /7/. Полагая для оценки $\dot{\nu} \approx 2\pi kT/\hbar$ (k - константа электрон-фононного взаимодействия, k и \hbar - постоянные Больцмана и Планка) /8/, получим предельное значение $T_C \approx 28$ К. С учетом некоторой неопределенности в проведении исходной прямой можно указать интер-



Р и с. 3. Начало перехода в сверхпроводящее состояние образцов I43д и I03г. Стрелками показано направление изменения температуры

вал $T_C = 27-30$ К. Это значение согласуется с величиной, полученной на основе концентрационной зависимости T_C .

Наилучший результат, достигнутый нами в настоящее время: полная сверхпроводимость при 23,0 К, $T_C = 23,2$ К, начало перехода по уровню $0,2\% T_C^{(H)}$ = 23,9 К. На кривых перехода обнаружены особенности вплоть до $T = 25$ К (рис. 3). Локальный максимум сопротивления R вблизи начала перехода связан с перераспределением тока при появлении сверхпроводящих включений. Для ряда образцов это явление сопровождалось гистерезисом (рис. 3, образец I43д). Различная величина эффекта при охлаждении и нагревании образца обусловлена, на наш взгляд, захватом магнитного потока сверхпроводящими контурами.

Результаты настоящей работы указывают на реальную возможность дальнейшего повышения T_C в сплаве Nb-Ge.

Поступила в редакцию
10 сентября 1980 г.

Л и т е р а т у р а

1. D. Dew-Hughes, *Cryogenics* 15, 435 (1975); D. E. Farrell, B. S. Chandrasekhar, *Phys. Rev. Lett.*, 28, 788 (1977).
2. А. И. Головашкин, Е. В. Печень, *ФНТ*, 6, 454 (1980); *ФТТ*, 21, 1248 (1979); *Письма в ЖЭТФ*, 29, 396 (1979).
3. А. И. Головашкин, Е. В. Печень, *Письма в ЖЭТФ*, 30, 561 (1979).
4. R. E. Somekh, *Phil. Mag.*, B37, 713 (1978); B. Letellier, J. C. Renard, *IEEE Trans. Mag.*, MAG-15, 498 (1979).
5. L. R. Testardi, J. M. Poate, H. J. Levinstein, *Phys. Rev. Lett.*, 37, 637 (1976).
6. P. B. Allen, W. E. Pickett, K. M. Ho, M. L. Cohen, *Phys. Rev. Lett.*, 40, 1532 (1978).
7. K. M. Ho, M. L. Cohen, W. E. Pickett, *Phys. Rev. Lett.*, 41, 815 (1978).
8. J. J. Hopfield, *Comm. Sol. St. Phys.*, 3, 48 (1970).