

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАКСИМУМЫ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ ФОНОНОВ И ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ЧЛЕН СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ С РЕШЕТКОЙ А-15

А.И.Головашкин

Найдено, что энергетическое положение низкочастотных максимумов фононной плотности состояний T^* и характеристическая температура экспоненциального члена сопротивления T_0 в сверхпроводниках с решеткой А-15 являются монотонными функциями атомного веса соединения. Обнаружено, что для каждого соединения T_0 совпадает с T^* . Результат связывается с селекцией фононов, возникающей из топологии поверхности Ферми.

Наиболее высокотемпературные сверхпроводники – сплавы с решеткой А-15, – обладают рядом аномальных свойств [1 – 4]. Изучение их существенно для понимания причин высоких критических параметров таких соединений.

1. Одной из особенностей этих соединений является аномальная температурная зависимость проводимости, впервые обнаруженная в Nb_3Sn [5]. Зависимость сопротивления от температуры $R(T)$ в широкой области T для таких соединений хорошо описывается введением дополнительного члена $\sim \exp(-T_0/T)$ [5]. Экспоненциальные члены в $R(T)$ с характеристической температурой T_0 в интервале 120 – 180K были найдены в последнее время для Nb_3Al , Nb_3Ga , $NbAlGe$ и V_3Si [6 – 7]. Анализ данных для сверхпроводников V_3Ge и V_3Ga [8] также указывает на возможность удовлетворительного описания зависимости их $R(T)$ членом такого же типа.

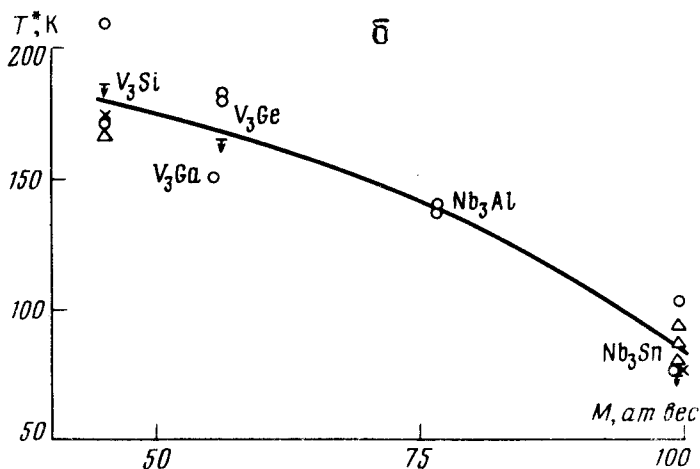
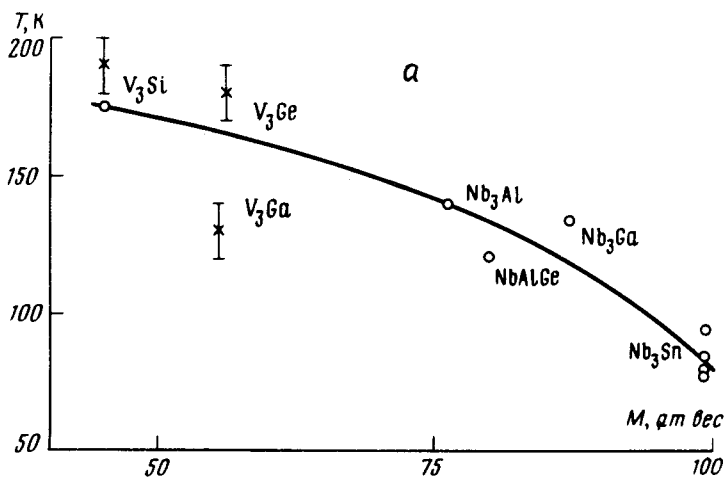


Рис. 1. а – Зависимость характеристической температуры T_0 от атомного веса соединений $A_{0,75}B_{0,25}$ с решеткой А-15, б – зависимость положения низкочастотного пика фоновой плотности состояний T^* от атомного веса соединений $A_{0,75}B_{0,25}$ с решеткой А-15

Величина T_0 оказывается монотонной функцией атомного веса соединений (рис. 1, а). На рисунке точками приведены значения T_0 из работ

[5 – 7], крестиками – результаты обработки данных [8]. Заниженная оценка T_0 для V_3Ga возможно связана с относительно небольшим количеством экспериментальных точек на кривой $R(T)$ [8]. Наблюдаемая корреляция величины T_0 с атомным весом несомненно указывает на связь экспоненциального члена в сопротивлении с фононным спектром соединения.

2. Другой особенностью соединений А-15 является наличие в их спектрах низкочастотных максимумов фононной плотности состояний. Впервые такой максимум был обнаружен при туннельных исследованиях Nb_3Sn [9, 10]. Его энергетическое положение совпало с характеристической температурой T_0 , найденной в [5], а для тех же образцов в [11]. Недавно низкочастотные максимумы плотности состояний фононов для ряда соединений А-15 найдены также из данных по неупругому рассеянию нейтронов [1, 12 – 14].

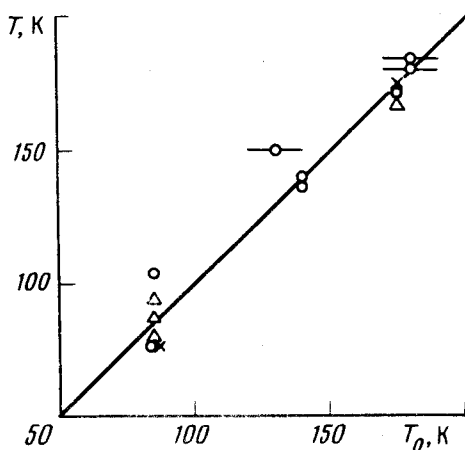


Рис. 2. Корреляция положения низкочастотного пика плотности состояний фононов T^* с характеристической температурой T_0 для соединений А-15. Прямая соответствует условию $T^* = T_0$.

Положение низкочастотного максимума фононной плотности состояний T^* коррелирует с атомным весом (рис. 1,б). На рисунке отмечены положения низкочастотных максимумов фононной плотности состояний (точки) и эффективного фононного спектра $\alpha^2F(\omega)$ (треугольники). Для фононных спектров использованы низкотемпературные данные из работ [1, 12 – 14], для $\alpha^2F(\omega)$ – данные работ [1, 9, 10]. Кроме того на рисунке приведены для Nb_3Sn и V_3Si энергии поперечных фононов $TA [100]$ вблизи границы зоны Бриллюэна [1] (крестики), а также оценки этих величин для ряда сплавов, полученные по известным упругим модулям сдвига (черточки со стрелками). Все эти величины для каждого сплава хорошо согласуются друг с другом.

Полученный результат свидетельствует о том, что в исследованных соединениях А-15 низкочастотный фононный пик определяется в основном поперечными фононами TA [100]. На это указывает также подобие фононных спектров соединений (в частности спектр V_3Ga практически идентичен спектру Nb_3Sn при изменении масштаба частоты в 1,25 раза) [14].

3. Из рис. 1,а и 1,б видно, что кривые $T_0(M)$ и $T^*(M)$ практически совпадают. Это особенно наглядно следует из рис. 2, где величины T^* отложены от T_0 для тех материалов, для которых они известны обе. Прямая на рисунке соответствует условию $T^* = T_0$ (обозначения соответствуют рис. 1,б). Такое совпадение означает, что экспоненциальный член сопротивления в соединениях А-15 и величина T_0 определяются рассеянием электронов на фононах с энергиями вблизи T^* .

На такую же связь между экспоненциальным членом сопротивления и низкочастотным фононным пиком указывает также то, что относительная величина экспоненциального члена чувствительна к высоте пика. В Nb_3Al , где наблюдается лишь слабый пик [12, 13], величина экспоненциального члена сопротивления, отнесенная к линейному по T члену, на два порядка меньше, чем в Nb_3Sn [6].

Наблюдаемые закономерности можно было бы объяснить, если бы в соединениях А-15 существовал пик числа фононов при энергии $T^* \approx T_0$. Однако, по-видимому, это не всегда имеет место [7]. Поэтому необходимо предполагать, что существует селекция фононов с энергиями $\sim T^*$ [5, 7]. Возможность такой селекции определяется формой поверхности Ферми соединений А-15 [1, 15]. По-видимому селекция возникает благодаря рассеянию электронов из состояний, соответствующих участкам поверхности Ферми с малой кривизной (окрестности точки λ).

4. Положения низкочастотных максимумов плотности состояний фононов T^* в соединениях А-15 зависят от температуры T [1, 12 – 14], смещаясь с ростом T в сторону высоких частот. Изменение T^* от комнатной до низких температур составляет от 3% в V_3Ge до 20% в Nb_3Sn и коррелирует с критической температурой T_c соединений [14, 16]. Сами величины T^* и T_0 с T_c не коррелируют.

Кривые, приведенные на рис. 1, позволяют оценить ожидаемые величины T^* и T_0 для наиболее высокотемпературного сверхпроводника Nb_3Ge и Nb_3Si . Для Nb_3Ge найдем $T_0 = 116K$, $T^* = 117K$; для Nb_3Si – $T_0 = 140K$, $T^* = 138K$. Оценка T_0 согласуется с экспериментом на пленках Nb_3Ge с высокими T_c [17].

Полученные результаты подтверждают вывод работы [18], сделанный для Nb_3Sn , о неэквивалентном влиянии различных фононов на свойства соединений А-15.

Автор выражает благодарность Г.П.Мотулевич за обсуждение работы, профессору В.Райчардту и доктору П.Швайссу за предоставление их данных по фононным спектрам.

- [1] L.R.Testardi. In *Physical Acoustics*, v.10, ed W.P.Mason and R.N.Thurston, N.Y.-L., Academic Press, 1973, p. 193.
- [2] А.И.Головашкин, Г.П.Мотулевич. Письма в ЖЭТФ, 17, 114, 1973.
- [3] Е.М.Савицкий, Ю.В.Ефимов, Н.Д.Козлова, Б.П.Михайлов, Ю.А.Успенский. *Сверхпроводящие соединения переходных металлов*, М., изд. Наука, 1976.
- [4] Ю.А.Изюмов, Э.З.Курмаев. УФН, 118, 53, 1976.
- [5] Д.В.Вудард, Г.Д.Коди. Сб. *Сверхпроводящее соединение ниобий-олово*, под ред. В.В.Шмидта, М., изд. Metallургия, 1970 г. стр. 77; D. W. Woodard, G. D. Cody. *RCA Rev.*, 25, 392, 1964.
- [6] А.И.Головашкин, И.С. Левченко, Г.П.Мотулевич. ФТТ, 16, 2100, 1974; Труды ФИАН, 82, 72, 1975.
- [7] M. Milewits, S. J. Williamson, H. Taub. *Phys. Rev.*, B13, 5199, 1976.
- [8] M. P. Sarachik, G. E. Smith, J. H. Wernick. *Can. J. Phys.*, 41, 1542, 1963.
- [9] С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, Г.П.Мотулевич. Письма в ЖЭТФ, 16, 216, 1972.
- [10] L. Y. L. Shen. *Phys. Rev. Lett.*, 29, 1082, 1972.
- [11] А.И.Головашкин, И.С.Левченко, Г.П.Мотулевич. ФММ, 33, 1213, 1972.
- [12] P.Schweiss. Progress Report of the Teilinstitut Nukleare Festkörperphysik (1.6.1974 – 31.5.1975), Institut für Angewandte Kernphysik, Karlsruhe, 1975 г. стр. 22; E.Schneider, N.Nücker, W.Reichardt. Там же, стр. 25; E.Scheider, W.Reichardt. Там же, стр. 26.
- [13] E.Schneider. Progress Report of the Teilinstitut Nukleare Festkörperphysik (1.6.1975 – 31.5.1976), Institut für Angewandte Kernphysik, Karlsruhe, 1976 г., стр. 20.
- [14] E.Schneider, P.Schweiss, W.Reichardt. Proc. of the Conf. on Neutron Scattering, Gateinburg, Tennessee USA, June 6 – 10, 1976, v.1, p.223.
- [15] Л.П.Горьков. Письма в ЖЭТФ, 20, 571, 1974.
- [16] А.И.Головашкин. Препринт ФИАН, 1977.
- [17] L.R.Testardi, J.M.Poate, H.J.Levinstein. *Phys. Rev. Lett.*, 37, 637, 1976; H.Lutz, H.Weismann, O.F.Kammerer, M.Strongin. *Phys. Rev. Lett.*, 36, 1576, 1976.
- [18] С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, Г.П.Мотулевич. *Phys. Lett.*, 45A, 103, 1973; Труды ФИАН, 86, 140, 1975.