

О ВОЗМОЖНОСТИ НЕФОНОННОГО МЕХАНИЗМА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СПЛАВЕ Nb_3Sn

А. И. Головашкин, Г. П. Мотулевич

За последние годы открыт ряд сверхпроводящих сплавов с решеткой типа А-15, которые обладают высокими критическими температурами $T_c \sim 17 - 21^\circ K$, существенно превышающими значения T_c чистых металлов [1]. Для выяснения вопроса о возможной связи столь высоких значений T_c с нефононным механизмом сверхпроводимости Хопфильд [2] предложил определить знак эффективного кулоновского псевдопотенциала μ^* , используя формулу Макмиллана [3]

$$T_c = \frac{\Theta}{1,45} \exp \left\{ - \frac{1,04 (1 + \lambda)}{\lambda - \mu^* (1 + 0,62 \lambda)} \right\} \quad (1)$$

и значение константы электрон-фононного взаимодействия λ , полученное из оптических измерений в инфракрасной области спектра. Здесь Θ – температура Дебая.

Константа электрон-фононного взаимодействия может быть определена через частоту электрон-фононных соударений ν_{ep} [2, 4]:

$$\lambda = \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\nu_{ep}}{kT} \quad (2)$$

Здесь частота ν_{ep} должна определяться при температурах $T \sim \Theta$, когда ν_{ep} пропорциональна T ; k – постоянная Больцмана. Величина ν_{ep} в свою очередь может быть найдена из оптических измерений в инфракрасной области спектра [5]. При наличии заметного рассеяния электронов на примесях или дефектах для определения ν_{ep} помимо оптических измерений необходимо выполнить измерения отношения остаточного сопротивления образца к сопротивлению при температуре T , т. е. $R_{ост}/R$. Из-за наличия эффектов, связанных с квантовым характером взаимодействия электронов с фотонами [6] частота соударений электронов с фононами, полученная оптическим методом ν_{ep}^{OPT} всегда больше ν_{ep} . Однако, в интересующем нас случае (комнатная температура, сплав Nb_3Sn) разница $\nu_{ep}^{OPT} - \nu_{ep}$ невелика, и мы будем пренебрегать ею.

Ранее величина λ для Nb_3Sn определялась в работе [4]. При этом использовались оптические данные, полученные в [7] для сплавов $Nb - Sn$, близких к стехиометрии, фазовый состав которых не был известен. В настоящей работе определение λ выполнено на основании более поздних оптических исследований интерметаллического соединения Nb_3Sn [8]. Образцы Nb_3Sn изготавливались напылением в вакууме [9], что обеспечивало отсутствие искаженного слоя на их поверхности. Были выполнены специальные рентгеновские исследования, показавшие наличие в образцах только одной фазы А-15. Измерения оптических свойств Nb_3Sn проведены в широком спектральном интервале 0,45 – 10 мк. При обработке экспериментальных данных были учтены

длинноволновые полосы межзонных переходов (в работах [4, 7] эти полосы не учитывались). В результате исследования получено значение эффективной частоты электронных соударений $\nu_{эфф} = 1,85 \cdot 10^{14} \text{сек}^{-1}$. Для указанных образцов отношение сопротивления при комнатной температуре к остаточному сопротивлению $R_K/R_{ост} = 2,5$. Полагая, что

$$\nu_{эфф} = \nu_{ep} + \nu_{ed}, \quad (3)$$

$$\frac{\nu_{ed}}{\nu_{ep} + \nu_{ed}} = \frac{R_{ост}}{R_K} \quad (4)$$

получим $\nu_{ep} = 1,1 \cdot 10^{14} \text{сек}^{-1}$ и $\lambda = 0,46$. Учет разницы $\nu_{ep}^{опт}$ и ν_{ep} приводит к еще меньшему значению λ .

Малость величины λ не может быть связана с влиянием поверхности, поскольку оптический метод дает информацию о свойствах образца с глубины порядка скин-слоя. Для Nb_3Sn эта величина равна 500 \AA .

Возвращаясь к формуле (1), найдем при $\lambda = 0,46$ и $\Theta = 304^\circ K$, что $\mu^* = -0,12$. Это значение μ^* получено при использовании соотношений (3) – (4), предполагающих выполнение правила Маттиссена. Однако, даже предположение, что $\nu_{ep} \approx \nu_{эфф}$, дает $\lambda = 0,77$ и $\mu^* = 0,0$.

Отрицательный знак μ^* может свидетельствовать о существовании в Nb_3Sn также и нефононного механизма сверхпроводимости. Другое объяснение связано с возможным радикальным изменением фононного спектра Nb_3Sn при структурном превращении в области температур $30 - 40^\circ K$ [10]. Если константа λ в низкотемпературной фазе существенно больше величины λ в высокотемпературной фазе, то значение μ^* может оказаться положительным при $T < 30^\circ K$. Однако, для получения величины $\mu^* = 0,13$ нужно $\lambda = 1,12$ [3]. Трудно ожидать такого радикального изменения λ , учитывая, что решетка при указанном структурном переходе в Nb_3Sn меняется незначительно. Величина изменения константы электрон-фононного взаимодействия может быть определена экспериментально, если выполнить измерения λ оптическим методом при температурах как ниже, так и выше температуры структурного перехода.

Следует отметить, что сплав Nb_3Sn обладает рядом особенностей, которые отличают его от обычных металлов. Оптические исследования [8] показали наличие в нем двух основных полос межзонной проводимости, расположенных в очень низкочастотной области спектра при $\hbar\omega = 0,1 - 0,2 \text{ эв}$. Туннельные исследования [11] обнаружили существование в этом сплаве четырех энергетических щелей 2Δ с отношениями $2\Delta/kT_c$ равными 3,0; 1,4; 1,0 и 0,2. Все эти отношения ниже теоретического значения 3,5. По-нашему мнению, малость сверхпроводящих энергетических щелей может быть связана с малостью константы электрон-фононного взаимодействия λ . Одна из указанных щелей является аномально малой. Фононный спектр Nb_3Sn имеет резкий пик в плотности состояний при энергии $6 - 7 \text{ мэв}$ [12]. Это значение в 2,5 – 3 раза меньше энергии, соответствующей максимуму поперечных фононов Nb [3]. Наконец, зависимость статического сопротивле-

ния Nb_3Sn от температуры содержит член пропорциональный $\exp(-T_0/T)$, где $T_0 \approx 80^\circ K$, который отсутствует в других металлах [9, 13].

Все эти особенности свидетельствуют о необычности электронного и фононного спектров Nb_3Sn и требуют большой осторожности в применении теорий, развитых для обычных металлов.

В заключение выражаем благодарность В.Л.Гинзбургу и участникам руководимого им семинара по сверхпроводимости за обсуждение настоящей работы.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 ноября 1972 г.

Литература

- [1] См., например, Б.Робертс в сб. "Новые материалы и методы исследования металлов и сплавов" под ред. И.И.Корнилова, изд. "Металлургия", М., 1966 г., стр. 9.
- [2] J.J.Hopfield. Coments on Solid State Physics. Coments of Modern Physics, P.B. 48, 3, 1970.
- [3] W.L.McMillan. Phys. Rev., 167, 331, 1968.
- [4] Е.Г.Максимов, Г.П.Мотулевич. ЖЭТФ, 60, 414, 1971.
- [5] Г.П.Мотулевич. УФН, 97, 211, 1969.
- [6] Т.Holstein. Phys. Rev., 96, 535, 1954; Р.Н.Гуржи. ЖЭТФ, 33, 660, 1957.
- [7] А.И.Головашкин, Е.Д.Доннер, И.С.Левченко, Г.П.Мотулевич. ЖЭТФ, 59, 1967, 1970.
- [8] С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, И.С.Левченко, Г.П.Мотулевич. Тезисы докладов международного симпозиума по электронной структуре и свойствам переходных металлов, их сплавов и соединений, г.Киев, май 1972 г., стр. 79; С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, И.С.Левченко, Т.А.Лескова, Г.П.Мотулевич. Труды международного симпозиума по электронной структуре и свойствам переходных металлов, их сплавов и соединений, г. Киев, май 1972 г.
- [9] А.И.Головашкин, И.С.Левченко, Г.П.Мотулевич. ФММ, 33, 1213, 1972.
- [10] С.А.Медведев, К.В.Киселева, В.В.Михайлов. ФТТ, 10, 746, 1968.
- [11] С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, И.С.Левченко, Г.П.Мотулевич. ЖЭТФ, 63, 1010, 1972.
- [12] С.И.Веденеев, А.И.Головашкин, Г.П. Мотулевич. Письма в ЖЭТФ, 16, 216, 1972.
- [13] Д.В.Вудард, Г.Д.Коди. Сб. "Сверхпроводящее соединение ниобий-олово" под ред. В.В.Шмидта, М., изд. "Металлургия", 1970 г. стр. 77.