

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ МОНОКРИСТАЛЛОВ Nb1-xSe2Snx

Завгородний А.А., Балла Д.Д., Назиров З.Ф., Вовк Р.В., Оболенский М.А.

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,

г. Харьков

Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua

В работе исследовано влияние гидростатического давления до 12 кбар на критические и резистивные параметры монокристаллов Nb1-xSe2Snx (x=0.1 и x=0.15). Показано, что основной вклад в увеличение Tc под давлением вносит изменение плотности состояний на уровне Ферми. Установлено, что при приложении гидростатического давления фононный спектр смещается в сторону высоких частот (происходит ужесточение спектра). Численные оценки температуры Дебая согласуются с данными, полученными путем измерения теплоемкости монокристаллов NbSe2. Показано, что с увеличением гидростатического давления длина свободного пробега возрастает, а соединение Nb1-xSe2Snx можно рассматривать в чистом пределе в теории Гинзбурга-Ландау

Как известно, новый всплеск интереса к исследованию слоистых кристаллов дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) возник после открытия в 1986 году высокотемпературной сверхпроводимости [1] в нестехиометрических оксидах, обладающих ярко выраженной анизотропией физических характеристик. Выявление сходных физических характеристик и отличительных особенностей между низкотемпературными и высокотемпературными сверхпроводниками, связанных с кристаллическим строением и механизмом сверхпроводимости [2] является актуальной задачей физики твердого тела. Анизотропия ДПМ, в том числе соединения NbSe₂, обладающего наиболее высокой критической температурой T_c, может быть существенно усилена [3] посредством внедрения чужеродных атомов или молекул в межслойное пространство (процесс интеркалирования). Со способностью этих соединений к интеркалированию связаны надежды на реализацию высокотемпературной сверхпроводимости в структурах типа "сэндвич" с экситонным механизмом, предложенным Гинзбургом [4]. Кроме того ДПМ характеризуются существованием структурного перехода в состояние волны зарядовой плотности (ВЗП). Взаимосвязь между ВЗП-переходом T_c является предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований [2,3]. При этом особое значение приобрели экспериментальные методы, позволяющие выявить те структурные параметры сверхпроводников, которые существенно влияют на их критические характеристики и позволяют определить эмпирические пути повышения их критических параметров. Одним из таких важнейших методов является использование высоких гидростатических давлений [2]. Цель настоящей работы – изучение влияния высокого гидростатического давления до 12 кбар на электротранспортные свойства в нормальном и сверхпроводящем состоянии соединения Nb_{1-x}Se₂S_x при допировании примесью олова с различной концентрацией.

Монокристаллические образцы получали по методике, описанной в [3]. Гидростатическое давление создавалось в автономной камере типа поршень — цилиндр с фиксированным зажимом. Средой, передающей давление, служила смесь трансформаторного масла с керосином в соотношении 1:1. Давление измеряли манганиновым манометром, температурную зависимость электросопротивления которого использовали для оценки падения давления в камере при охлаждении до температуры кипения жидкого азота. Температуру измеряли медь-константановой термопарой при T > 50 К с погрешностью 0,05 К, а в области температур 4,2-50 К - угольным термометром типа ТСУ-2 - с погрешностью 0,01 К. Измерения электросопротивления проводили стандартным четырехконтактным методом.

Как показал анализ полученных экспериментальных данных, особенности поведения ρ(T), связанные с возникновением ВЗП-перехода, отсутствуют для всех исследованных

концентраций примеси олова. Это свидетельствует о том, что ВЗП-переход в исследованных образцах либо полностью отсутствует, либо в значительной степени подавлен, и, таким образом, влияние его на температуру сверхпроводящего перехода сказываться не должно. При этом, увеличение концентрации олова при атмосферном давлении приводит к уменьшению T_c . Приложение гидростатического давления приводит к резкому увеличению T_c , с барической производной для образца с $x = 0.1$, равной 0.2 К/кбар при $P < 4$ кбар и 0.04 - в интервале $4 < P < 12$ кбар. При увеличении концентрации олова до $x = 0.15$ излом смещается к более низким давлениям. Значение dT_c/dP становится равным 0.22 К/кбар в интервале $0 < P < 3$ кбар и 0.08 К/кбар при $P > 3$ кбар.

Воспользуемся для качественного анализа $T_c(p)$ известной формулой Макмиллана [5]:

$$T_c = \frac{\theta_D}{1.45} \exp\left[-\frac{1.04(1 + \lambda)}{\lambda - \mu^*(1 + 0.62\lambda)}\right] \quad (1)$$

Здесь θ_D - температура Дебая, μ^* - экранированный кулоновский псевдопотенциал, характеризующий отталкивание электронов, λ - константа электрон-фононного взаимодействия. Величина λ в свою очередь зависит от параметров электронного и фононного спектра металла:

$$\lambda = \frac{N(E_F)\langle I^2(\vec{k} - \vec{k}') \rangle}{M\theta_D^2} \quad (2)$$

где $N(E_F)$ - плотность состояний на уровне ферми, I - усредненный по поверхности Ферми матричный элемент электрон-фононного взаимодействия, M - масса иона.

Из Формулы (2) видно, что с введением тяжелой примеси олова T_c понижается, так как

$\theta_D \sim \frac{1}{\sqrt{M}}$. Используя значения $\lambda = 0.81$ и $\mu^* = 0.1$ [6] можно оценить температуру Дебая для Nb Se Sn при $P = 0$, которая составляет 175.5 и 177.8 К для $x = 0.1$ и $x = 0.15$, соответственно. Такие значения температуры Дебая хорошо согласуются сданными, полученными путем измерения теплоемкости [3]. Из (1) видно, что температура Дебая. растет с увеличением давления, так как T_c увеличивается.

Согласно (1) зависимость T_c от давления определяется зависимостью величин θ_D , $N(E_F)$, λ , μ^* . Более наглядно это видно из формулы, полученной для T_c в теории БКШ:

$$T_c \sim \theta_D \exp\left(-\frac{1}{N(E_F)V^*}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial P} = \frac{\partial \theta_D}{\partial P} \exp\left(-\frac{1}{NV^*}\right) + \theta_D \exp\left(-\frac{1}{NV^*}\right) \left(-\frac{1}{NV^*}\right)^2 \frac{\partial(NV^*)}{\partial P}$$

Зависимость θ_D от давления приближенно может быть получена из формулы Грюнайзена для коэффициента объемного теплового расширения [7].

$$\frac{1}{\theta_D} \cdot \frac{\partial \theta_D}{\partial P} = \frac{\alpha V}{C_V}, \quad (4)$$

где α - коэффициент теплового расширения.

Из уравнения (4) следует, что дебаевская температура должна возрастать при всестороннем сжатии. Возрастание при сжатии удовлетворительно объясняет уменьшение электрического сопротивления под действием давления, а также должно, в свою очередь, приводить к увеличению T_C (см. формулу 1). Необходимо однако подчеркнуть, что определение величины θ_D по формуле (1) носит оценочный характер и для $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$ при сжатии дает значение на порядок меньшее соответствующего изменения T_C . Таким образом, изменение θ_D по-видимому не является фактором, определяющим зависимость $T_C(P)$.

Оценим изменение плотности состояний на уровне Ферми под влиянием гидростатического давления на основе Формулы Макмиллана, записанной в виде

$$T_C = \frac{\langle \omega \rangle}{1.22} \exp \left[- \frac{1.04(1 + \lambda)}{\lambda - \mu^* (1 + 0.62\lambda)} \right] \quad (5)$$

где ω - усредненная частота Фононного спектра [8], предполагая, что кулоновский потенциал μ^* слабо зависит от давления. Тогда барическая зависимость T_C обусловлена средней частотой Фононного спектра и константой электрон-фононного взаимодействия λ . Если записать λ в виде отношения электронного и решеточного факторов:

$$\lambda = \frac{\alpha}{M \langle \omega^2 \rangle}; \alpha = N(E_F) I^2 \quad (6)$$

дифференцируя T_C по давлению P , получим следующее соотношение

$$\frac{d \ln T_C}{dP} = \frac{1}{B} \left\{ \gamma_g + \frac{1.04\lambda}{\lambda - \mu^* (1 + 0.62\lambda)} - \frac{1.04\lambda(1 + \lambda)(1 - 0.62\lambda)}{[1 - \mu^* (1 + 0.62\lambda)]^2} \cdot 2\gamma + \frac{d \ln \alpha}{d \ln V} \right\} \quad (7)$$

Здесь $B = -VdP/dV$ - объемный модуль, а γ_g - эффективная константа Грюнайзена

$$\gamma_g = - \frac{d \ln \langle \omega^2 \rangle^{1/2}}{d \ln V} \quad (8)$$

Для оценки последнего слагаемого в формуле (7) используем экспериментальные данные dT_C/dP и B , и, так как, γ_g не может быть прямо получена из эксперимента - табулированные значениями γ_g [8]. Полученные результаты смотри в таблице.

Таблица. Барические производные соединения $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$.

Соединение	0 < P < 3 кбар		3 < P < 12 кбар	
	dT/dP, К.кбар ⁻¹	dlnα/dV, м ⁻³	dT/dP, К.кбар ⁻¹	dlnα/dV, м ⁻³
Nb _{0,9} Se _{0,1} Sn _{0,1}	0.2	19	0.04	3.7
Nb _{0,85} Se ₂ Sn _{0,1}	0.22	20	0.08	7

Из таблицы видно, что относительное изменение плотности состояний на уровне Ферми очень сильно изменяется в области давлений до 3 кбар, что, по-видимому, и обуславливает быстрый рост T_C при приложении гидростатического давления до 3 кбар. В области давлений 3 < P < 12 кбар относительная величина изменения плотности состояний уменьшается и рост T_C замедляется. Таким образом рост T_C в основном определяется

изменением плотности состояний на уровне Ферми, изменение фононного спектра играет незначительную роль, при гидростатическом сдавливании фононный спектр ужесточается.

Воспользовавшись Формулой Лифшица для электропроводности можно найти длину свободного пробега и оценить как она меняется под влиянием давления.

$$l \sim 1.27 \cdot 10^4 [\rho n^{2/3} (S/S_F)]^{-1}, \quad (9)$$

где l - свободного пробега, ρ - остаточное сопротивление, n - плотность носителей, S/S_F - отношение площади действительной поверхности Ферми к поверхности Ферми свободного электронного газа. Расчеты выполнены в предположении, что введение примеси олова не изменяет существенно концентрацию носителей и площадь ферми-поверхности [9]. Изменение остаточного электросопротивления под влиянием гидростатического давления является следствием изменения длины свободного пробега при неизменном значении произведения $\rho n^{2/3} (S/S_F)$. Величина $\rho n^{2/3} (S/S_F)$ определена в [10] и равна 4-6 10^{14} . Если сравнить длину свободного пробега с длиной когерентности ξ в теории Гинзбурга-Ландау, вычисленной в [11] можно видеть, что $l > \xi$ и $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$ можно рассматривать в "чистом" пределе и "чистота" его увеличивается при гидростатическом сжатии.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что особенности поведения зависимостей $\rho(T)$ у соединений $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$, связанные с возникновением ВЗП-перехода, отсутствуют для всех исследованных концентраций примеси олова. Это свидетельствует о том, что ВЗП-переход в этих образцах либо полностью отсутствует, либо в значительной степени подавлен, и, таким образом, влияние его на температуру сверхпроводящего перехода сказываться не должно. Основной вклад в увеличение T_c при воздействии высокого гидростатического давления на электросопротивление соединений $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$ вносит изменение плотности состояний на уровне Ферми. При этом фононный спектр смещается в сторону высоких частот (ужесточается). Длина свободного пробега носителей с увеличением приложенного давления возрастает, что позволяет рассматривать соединение $Nb_{1-x}Se_2Sn_x$ в чистом пределе в теории Гинзбурга-Ландау.

Литература

1. *Bednorz J.G and Muller K.A.* // Z. Phys. B. -1986. -V.64, №2. –P.189-193.
2. *Johannes M.D., Mazin I.I., and Howells C.A.* // Phys. Rev. B. 73. – 2006. – P. 205102-205108.
3. *Оболенский М.А.* // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Харьков, 1993.
4. *Под редакцией Гинзбурга В.Л., Куржица Д.А.* // Проблема высокотемпературной сверхпроводимости - М.: Изд. "Наука", 1977. с. 243-245.
5. *McMillan W.L.* // Phys. Rev. -1968. - V.167, №2. -P.331-344.
6. *Чашка Х.Б., Белецкий Е.И., Оболенский М.А.* // ФНТ. - 1991. -17, N7 с.833-840.
7. *Рябинин Ю.Н., Родионов К.П., Алексеев Е.С.* // ЖТФ. -1964. .т.34, вып. 11, с. 1913-1932.
8. *Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А., Курмаев Э.З.* // М.: Наука, 1977. – с. 383.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* // Статистическая Физика, часть 1. -М.: Наука, 1976, с. 226-230.
10. *Prober D.E., Sehwali R.E., Beasley H.R.* // Phys. Rev. B -21, №7. -1980. -p-2717-2733.
11. *Шмидт В-В.* // Введение в физику сверхпроводников - М.: МЦНМО, Наука, 2000. - с. 322.