

СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ В СИСТЕМАХ С ПОНИЖЕННОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ

Л.М. Свирская¹

Рассматривается связь состояния высокой электронной проводимости с пониженной размерностью проводящей подсистемы. Обсуждается возможность теоретического объяснения существования такого состояния на основе критерия отключения взаимодействия электронов с элементарными возбуждениями.

Ключевые слова: состояние высокой проводимости, низкоразмерные системы.

Введение

Известно, что твёрдые тела, проводящие электрический ток, могут находиться в нормальном и сверхпроводящем состоянии [1]. Однако начиная с работы [2] стали накапливаться экспериментальные факты [3–8, 17, 18, 34], приводящие к выводу о возможности реализации в нормальном состоянии наряду с состоянием обычной электронной проводимости особого состояния высокой проводимости (СВП). В отличие от сверхпроводимости, в СВП вещество имеет необычно высокую, но конечную проводимость.

В то время, как сверхпроводимость, открытая 100 лет назад [9], хорошо изучена экспериментально и теоретически, имеются общепризнанные феноменологические и микроскопические теории низкотемпературной сверхпроводимости [1, 10, 11], природа СВП изучена недостаточно. Одним из первых экспериментальных исследований, в котором было обнаружено СВП, является работа Р. Огга [2]. Он обнаружил, что быстрозамороженные растворы натрия в аммиаке ($C_{Na} \sim 2,5\text{--}3$ ат. %) обладают при температурах жидкого азота и кислорода аномально высокой проводимостью. Резкое падение (более чем на 17 порядков) электросопротивления затвердевшего раствора он отождествил со сверхпроводимостью. Им же была предложена интерпретация сверхпроводимости, основанная на гипотезе бозе-эйнштейновской конденсации пар электронов с противоположными проекциями спинов. Эта интерпретация предвосхитила установленное значительно позже понимание роли электронных куперовских пар в микроскопической теории сверхпроводимости Бардина–Купера–Шриффера (БКШ) [10].

Последующие многочисленные попытки подтвердить существование сверхпроводящего состояния в быстрозамороженных растворах не увенчались успехом [12–14] и привели к противоречивым выводам относительно характера проводимости металл-аммиачных растворов. Обсуждалась возможность реализации высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в этих системах [15, 16], в частности, было высказано предположение о появлении неравновесной ВТСП [16] при быстром охлаждении раствора, когда образец быстро переводится через температуру фазового перехода.

Для объяснения СВП в полимерных композитах, исследованных в 1980–90-е гг., были предложены такие модели, как стимулированная давлением инжекция электронов из металла в зону проводимости диэлектрика [17], модель электронной самоорганизации для полярных эластомеров [18], модель проводящих каналов, возникающих в изолирующей матрице [6]. Однако общей теории, описывающей переход из диэлектрического состояния в СВП, предложено не было. Рассматриваемый период можно охарактеризовать как этап накопления эмпирических данных о СВП в полимерах.

В последние два десятилетия активно исследуется как экспериментально, так и теоретически явление электронного переключения в СВП в «сэндвич»-структурах металл–полимер–металл [19–22] и в соединениях переходных металлов [23], возникающего в результате каких-либо внешних воздействий. Установление механизмов проводимости в этих материалах и определение

¹ Свирская Людмила Моисеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей и теоретической физики, Челябинский государственный педагогический университет.
E-mail: svirskayalm@mail.ru

условий возникновения проводящего состояния является актуальной задачей [20]. Для объяснения эффекта переключения в СВП были предложены различные механизмы переноса заряда: термоэлектронная эмиссия Шоттки [20, 21], квантовое туннелирование на ловушечные уровни вблизи уровня Ферми [20], прыжковый транспорт носителей заряда по объёмным ловушечным состояниям полимерной пленки [20]. Возникновение высокопроводящего состояния в полимерных пленках связывается в [21] с формированием узкой проводящей зоны вблизи уровня Ферми, расположенной в запрещённой зоне диэлектрика. Согласно [22] ответственным за эффект электронного переключения полимерного диэлектрика является фазовый переход первого рода, происходящий в металле, который влияет на параметры потенциального барьера на границе металл–полимер. В [23] прослеживается идея о взаимосвязи между переходом металл–изолятор и электронным переключением в соединениях переходных металлов в неравновесных условиях.

В упомянутых выше работах содержатся экспериментальные факты, указывающие на взаимосвязь высокопроводящего состояния с пониженной размерностью проводящей подсистемы (слой металл-аммиачного раствора в виде замкнутого кольца в экспериментах [2], одномерные проводящие капилляры в затвердевшем металл-аммиачном растворе [4], одномерные проводящие каналы в пленках окисленного полипропилена [6], высокопроводящие наноразмерные каналы, окруженные диэлектрической средой полимера [21]). Однако теории, объясняющей переход в высокопроводящее состояние на основе указанной взаимосвязи, в приведенных работах не содержится.

В данной работе приводится теоретическое объяснение СВП как результата неполного, но существенного отключения взаимодействия токоносителей с элементарными возбуждениями в квазиодномерных системах. Основы теории СВП для квазиодномерных систем были созданы в работах [24, 25]. За прошедшее время альтернативных теоретических подходов к рассматриваемой проблеме предложено не было. Остался также открытым вопрос о природе резкого возрастания эффективной массы токоносителей при переходе в СВП [26, 27].

Основные экспериментальные факты

В 1946 г. Огг установил, что при быстром охлаждении растворов натрия в аммиаке до температур порядка 90–190 К (это на порядок выше температур, при которых тогда наблюдалась сверхпроводимость металлов, сплавов и соединений) электросопротивление затвердевшего раствора упало до значений порядка 10^{-13} Ом, в то время как жидкие образцы имели электросопротивление порядка тысяч Ом. Огг предположил, что исследованные им замороженные растворы переходят при указанных выше температурах в сверхпроводящее состояние. Если бы это предположение подтвердилось, то честь открытия высокотемпературной сверхпроводимости принадлежала бы Оггу, а дату открытия ВТСП следовало бы передвинуть на 40 лет назад – с 1986 г. на 1946 г.

В 1988 г. Арендт [4, 26, 27] экспериментально установил возможность перехода в СВП геля, полученного при распаде металл-аммиачных растворов ($M + NH_3 \rightarrow MNH_2 + \frac{1}{2} H_2$, 3–5 мол. % металла, $M = Na, Li$). До перехода в СВП коэффициент σ удельной электропроводности составлял величину порядка $20 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, после перехода – $\sigma \sim 1,8 \cdot 10^9 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Арендт высказал предположение, что это – следствие образования одномерных капилляров из нераспавшегося раствора внутри губкообразной структуры из коагулированных частиц аминов Na и Li и что вдоль капилляров скользят волны зарядовой плотности и реализуется состояние, близкое к сверхпроводимости. При этом проводимость капилляров в 3 000 раз превосходит проводимость меди при комнатной температуре, а плотность тока в капилляре $j \approx 8,8 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$. Анализируя экспериментальные данные, Арендт пришел к заключению: «наблюдаемая высокая проводимость, возможно, имеет нетривиальные причины, т.е. мы имеем дело с новым, высокопроводящим, состоянием» [27].

В [6] было обнаружено, что удельное электросопротивление тонких плёнок полипропилена (ПП) после окисления (~ 3 ч) и облучения ультрафиолетом (~ 60 мин) уменьшается скачком более чем на 10 порядков, достигая значений $\rho \sim 1 - 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. По мнению авторов работы [6], исследованный материал представляет собой изолирующую матрицу с одномерными проводящими каналами, диаметр которых не превышает 10^{-5} см. Было высказано предположение, что каналы являются сверхпроводящими в области 300 К.

В [28, 29] было установлено скачкообразное разрушение аномально сильного диамагнетизма ПП магнитным полем с переходом образца в ферромагнитное состояние. Согласно оценкам [29] диаметр проводящих каналов, соответствующих сосуществованию СВП и ферромагнетизма в ПП, не превышает 2 мкм.

Во всех перечисленных экспериментах наблюдалось резкое уменьшение электросопротивления, но оно все же не обращалось в нуль, как должно быть в состояниях идеальной проводимости или сверхпроводимости. Не обнаружен в исследованных материалах также эффект Мейсснера, являющийся существенным признаком сверхпроводящего состояния. Всё это указывает на актуальность поиска механизма реализации СВП, отличного от сверхпроводимости. Учитывая пониженную размерность описанных выше систем, представляется целесообразным при объяснении СВП использовать выводы, вытекающие из модели квазиодномерной проводящей подсистемы [24, 25], без предположения о существовании локальных сверхпроводящих областей с энергетической щелью для возбуждений.

Теория состояния высокой проводимости в квазиодномерной проводящей подсистеме

В [24, 25] рассмотрен случай одномерного движения зонного электрона, имеющего закон дисперсии

$$E(k) = E_0 - 2|L|\cos ka, \quad (1)$$

где L – интеграл переноса, a – параметр кристаллической решетки, k – волновой вектор электрона, E_0 – атомный уровень, и фонона с законом дисперсии

$$\omega_q = \frac{2u}{a} \left| \sin \frac{qa}{2} \right|, \quad (2)$$

где ω – частота, q – волновой вектор фонона, u – скорость звука при $q \rightarrow 0$. Из законов сохранения энергии и квазиимпульса вытекают условия, определяющие возможность взаимодействия электронов с реальными фононами. Эти условия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Излучение (поглощение) фонона зонным электроном

Излучение реального фонона возможно	Излучение реального фонона невозможно
$\frac{2 L a}{\hbar} \geq u, \quad (3)$	$\frac{2 L a}{\hbar} < u, \quad (3.1)$
$V_{\max} \geq u, \quad (4)$	$V_{\max} < u, \quad (4.1)$
$\Delta E_e \geq \Delta E_{ph}, \quad (5)$	$\Delta E_e < \Delta E_{ph}, \quad (5.1)$
$am_o^*u \leq \hbar \quad (6)$	$am_o^*u > \hbar \quad (6.1)$

При выполнении (3.1)–(6.1) исчезает «решеточное» электросопротивление, обусловленное процессами излучения или поглощения фононов электронами, что должно способствовать установлению СВП.

Величина максимальной скорости электрона в условии (4) определяется равенством

$$V_{\max} = \frac{2|L|a}{\hbar}, \quad (7)$$

где \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π .

Энергетические спектры (1) и (2) являются ограниченными. Ширина энергетической зоны электрона и фонона соответственно имеют вид:

$$\Delta E_e = 4|L|, \quad (9)$$

$$\Delta E_{ph} = \frac{2\hbar u}{a}. \quad (10)$$

Из неравенства (5.1) следует, что установлению СВП способствует достаточная узость энергетической зоны электрона по сравнению с энергетической зоной фонона. При $u \approx 10^5$ см/с, $a \sim 10^{-8}$ см, $\Delta E_{ph} \sim 0,01$ эВ. Поэтому согласно (5.1) критическое значение ширины энергетической зоны электрона $\Delta E_{e,k} \sim 0,01$ эВ. При $\Delta E_e < \Delta E_{e,k}$ излучение фонона невозможно.

Из квантового критерия СВП (6.1) видно, что переходу в высокопроводящее состояние способствует достаточно большая эффективная масса m_0^* электрона у дна энергетической зоны (при фиксированном параметре кристаллической решётки). Если в некотором канале при собственных ему значениях u , a , ΔE_e выполняются условия (3)–(6), то электросопротивление, обусловленное излучением или поглощением фононов, включено. Если же в этом канале под влиянием термического или другого воздействия величины u , a , ΔE_e изменяются таким образом, что выполняются условия (3.1)–(6.1), то «решеточное» электросопротивление выключается, что приводит к возможности реализации СВП.

При построении теории СВП существенным является отсутствие предположения о наличии энергетической щели в спектре элементарных возбуждений. Известно, что критерий сверхтекучести жидкого гелия был получен Ландау также для бесщелевого спектра элементарных возбуждений. Условие (4.1) появления СВП является аналогом условия появления сверхтекучести квантовой жидкости $V < V_k$, где V – скорость жидкости, V_k – критическое значение скорости, при котором в жидкости появляются элементарные возбуждения и сверхтекучесть исчезает. Это свидетельствует об определенном сходстве явлений сверхтекучести и высокой проводимости. Имеет место также схожесть условий, при которых наблюдаются эти явления: жидкий гелий обладает способностью протекать без вязкости по узким капиллярам диаметром порядка 10^{-5} см, в то же время сверхвысокая проводимость в окисленном полипропилене реализуется в материале с одномерными проводящими каналами такого же диаметра[6].

Критерий СВП может быть обобщен на случай взаимодействия зонного электрона с другими квазичастицами. В частности, для зонного ферромагнетона с законом дисперсии

$$E = 4Is(1 - \cos(ka)), \quad (11)$$

где I – обменный интеграл, s – величина спина в узле кристаллической решетки, имеют место следующие выражения для максимальной скорости $V_{\max, m}$ магнетона, его эффективной массы $m_{0, m}^*$ и ширины энергетической зоны ΔE_m :

$$V_{\max, m} = \frac{4a}{\hbar} Is, \quad (12)$$

$$m_{0, m}^* = \frac{\hbar^2}{4a^2 Is}. \quad (13)$$

$$\Delta E_m = 8Is. \quad (14)$$

Условия взаимодействия зонного электрона с ферромагнетом представлены в табл. 2, из которой следует, что излучение ферромагнетона зонным электроном будет возможным, если ширина энергетической зоны электрона не превышает ширину энергетической зоны ферромагнетона. Если выполняется противоположное условие, то излучение ферромагнетона будет невозможно.

Таблица 2

Излучение (поглощение) ферромагнетона зонным электроном	
Возможно	Невозможно
$V_{\max, e} \leq V_{\max, m}$, (15)	$V_{\max, e} > V_{\max, m}$, (15.1)
$m_{0, e}^* \geq m_{0, m}^*$, (16)	$m_{0, e}^* < m_{0, m}^*$, (16.1)
$\Delta E_e \leq \Delta E_m$ (17)	$\Delta E_e > \Delta E_m$ (17.1)

Сравнение условий табл. 1 и 2 показывает, что ширина энергетической зоны излучаемой квазичастицы оказывает противоположное влияние на установление СВП. В случае достаточно узкой энергетической зоны электронов, когда излучение зонного фонона невозможно, излучение ферромагнетона может согласно (17) оказаться возможным. Это может привести к соответствующему ферромагнетонному вкладу в электросопротивление, и, следовательно, препятствовать установлению СВП.

Согласно (17.1) и (5.1) для установления СВП благоприятна ширина энергетической зоны электрона, удовлетворяющая неравенствам

$$\Delta E_m < \Delta E_e < \Delta E_{ph}, \quad (18)$$

так как при выполнении этих неравенств невозможно излучение ни зонного фона, ни зонного ферромагнетона. Из (14) и (18) следует, что для сосуществования СВП и ферромагнетизма благоприятны достаточно малые значения произведения Is , а при данном значении спина – достаточно малые значения обменного интеграла I .

В высокопроводящем состоянии может наблюдаться изотопический эффект. Так же как и в случае сверхпроводимости, причиной изотопического эффекта в СВП является зависимость скорости звука от массы иона

$$u = a \sqrt{\gamma/M}, \quad (19)$$

где коэффициент упругой связи γ не зависит (или очень слабо зависит) от массы иона M . Интеграл переноса L тоже практически не зависит от M . Из (3.1) и (19) следует условие реализации СВП в виде

$$M < M_{\max}, \quad (20)$$

где

$$M_{\max} = \gamma \left(\frac{\hbar}{2|L|} \right)^2. \quad (21)$$

Из (21) вытекает вывод о возможности реализации СВП только в системах, содержащих достаточно легкие элементы.

Принципиальным для теории СВП является вопрос о поведении эффективной массы токоносителей. Квантовый критерий (6.1) устанавливает влияние эффективной массы на возможность перехода в СВП (при других фиксированных параметрах, входящих в (6.1)), но не выявляет физического механизма, ответственного за возрастание эффективной массы при переходе в СВП. Микроскопический подход к описанию поведения эффективной массы требует выхода за рамки простых зонных представлений и может быть дан на основе полярной теории кристаллов Шубина–Вонсовского [30], в которой носителями тока являются «двойки» (два электрона с противоположными проекциями спина в одном узле кристаллической решетки) и «дырки» (положительно ионизованные узлы, лишенные валентного электрона).

Учет кулоновского отталкивания U электронов в «двойках» и матричного элемента t перехода между двумя соседними узлами кристаллической решетки приводит к существенной зависимости эффективной массы электрона от отношения U/t . В частном случае, когда число электронов N_e равно числу N узлов решетки, эффективная масса в полярной модели определяется равенством

$$m^* = \frac{2\hbar^2}{ta^2 \left[1 - \left(\frac{U}{4t} \right)^2 \right]}. \quad (22)$$

В общем случае, когда $N_e \neq N$, эффективная масса зависит от отношения N_e/N , при этом сохраняется зависимость от отношения $U/4t$. Такое поведение эффективной массы может служить указанием на взаимосвязь проблемы СВП с теорией сильно коррелированных электронных систем [31].

Возможность теоретической интерпретации экспериментальных фактов

1. В [26] установлено значительное возрастание эффективной массы зонного электрона при переходе в СВП. Из квантового критерия СВП (6.1) видно, что переходу в СВП способствует достаточно большая эффективная масса токоносителей вблизи дна энергетической зоны (при фиксированных значениях a и ΔE_e). Этот вывод согласуется с экспериментальными данными [26], согласно которым до перехода в высокопроводящее состояние зонная масса электрона $m_b \approx 1,25 m_0$ (m_0 – масса свободного электрона), а после перехода $m_b \approx 2,3 \cdot 10^4 m_0$. Скорость звука $u \approx 1,6 \cdot 10^5$ см/с. Поэтому до перехода в СВП величина $am^*u \approx 10^{-30}$ эрг·с и может реализо-

ваться решеточное электросопротивление, а после перехода в СВП величина $am^*u \approx 10^{-26}$ эрг·с и, следовательно, выполняется условие (6.1) появления СВП.

2. Критерий (6.1) использовался в [32] для объяснения высокой интенсивности эмиссии электронов церия при импульсном давлении до 10 кбар. Под давлением может происходить резкое увеличение плотности состояний на поверхности Ферми и, следовательно, рост эффективной массы, либо значительное возрастание межатомных сил связи с возрастанием скорости звука. Освобождение энергии сильного межатомного сцепления при образовании трещин приводит к интенсивной фрактоэмиссии электронов. Когда произведение am_o^*u достигает величины порядка \hbar или превышает ее, в материале создаются условия для появления высокопроводящего состояния.

3. Согласно [33] высокопроводящее состояние окисленного полипропилена разрушается критической плотностью тока $j_k \geq 10^8$ А/см², что было интерпретировано в [33] как разрушение сверхпроводимости. Критическая плотность тока связана с критической скоростью V_k соотношением

$$j_k = neV_k. \quad (23)$$

Полагая в случае СВП в соответствии с (4) $V_k \approx u$, получаем из (23)

$$n \approx \frac{j_k}{eu}. \quad (24)$$

При $j_k \approx 10^8$ А/см², $u \sim 10^5$ см/с получаем $n \sim 10^{22}$ 1/см³, что согласуется с обычной оценкой концентрации электронов проводимости в металлах. Это позволяет считать, что обнаруженное в [33] разрушение высокопроводящего состояния критическим током может быть интерпретировано не как исчезновение сверхпроводимости, а как разрушение СВП при достаточно большой скорости дрейфа токоносителей.

4. Квантовый критерий (6) позволяет объяснить резкое увеличение электросопротивления (на 7 порядков) тонких диэлектрических пленок и полимерных композиций при критическом давлении $P_k = 13$ кбар [34], а также наблюдаемые особенности поведения электросопротивления органических проводников, содержащих локализованные спины (например, Co^{2+} , Zn^{2+}) в анионных слоях, в зависимости от давления [35]. Однако в отличие от [34], для объяснения особенностей зависимости электросопротивления от давления $R(P)$ [35] необходимо учесть возможность взаимодействия зонного электрона с коллективными возбуждениями, которые могут существовать в магнитоупорядоченных системах.

5. Поскольку при выполнении условий (3.1 – 6.1) табл. 1 зонный электрон не может излучать зонные фононы, то при этом должна отсутствовать доминирующая при низких температурах часть «решеточного» электросопротивления. Электросопротивление, обусловленное поглощением фононов или взаимодействием электронов проводимости с примесями, может при этом привести к электросопротивлению, слабо зависящему или не зависящему от температуры. Возможно, этим объясняются наблюдаемые в некоторых сверхпроводящих металлооксидных керамиках выше T_c области температур, в которых сопротивление почти не зависит от температуры [36] и демонстрирует ступенчатый характер, стабильно воспроизводимый как при понижении, так и при повышении температуры. Аналогичным образом квантовый критерий СВП позволяет объяснить независимость электросопротивления от температуры для некоторых полимеров в области от 77 до 340 К при постоянном давлении, превышающем пороговое значение [5].

6. Квантовый критерий (6.1) позволяет объяснить переход в СВП тонких полимерных пленок под влиянием одноосного механического давления [7] и существование критической толщины пленки, при превышении которой СВП исчезает [21]. Поскольку этот переход сопровождается образованием высокопроводящих наноразмерных каналов [21], под влиянием давления (уменьшения толщины пленки) в указанных каналах могут возникать условия, согласующиеся с (6.1), что приводит к возможности реализации СВП.

7. Соотношение (18) позволяет дать объяснение возможности сосуществования СВП и ферромагнетизма, установленного в [28, 29]. Если в образце ширина электронной энергетической зоны превышает ширину энергетической зоны ферромагнетона, но остается меньше ширины энер-

гетической зоны фонона, то при этих условиях возможно сосуществование высокопроводящего состояния с ферромагнитным порядком.

8. Условие реализации СВП (20) согласуется с тем, что экспериментально СВП наблюдалось в случаях легких элементов (например, Li и Na в NH_3) в полипропилене, полиуретане, каучукоподобных полимерах.

Заключение

Регулируемое законами сохранения энергии и квазиимпульса отключение процессов излучения токоносителями элементарных возбуждений может оказать существенное влияние на величину электросопротивления как неферромагнитных, так и ферромагнитных материалов и тем самым на возможность реализации СВП.

Теория, основанная на взаимосвязи состояния высокой электронной проводимости с пониженной размерностью проводящей подсистемы, позволяет объяснить переход в СВП в материалах, являющихся перспективными для неорганической и органической электроники.

Микроскопический подход к описанию высокопроводящего состояния в системах с пониженной размерностью возможен на основе многоэлектронной полярной теории кристаллов.

Литература

1. Абрикосов, А.А. Основы теории металлов / А.А. Абрикосов. – М.: Наука, 1987. – 520 с.
2. Ogg, R.A. Bose-Einstein condensation of trapped electron pairs. Phase separation and superconductivity of metal-ammonia solutions / R.A. Ogg // *Phys. Rev.* – 1946. – Т. 69. – С. 243–244.
3. Васильченко, С.А. Особенности высокопроводящего состояния в твердой фазе натрий-аммиачных растворов / А.С. Васильченко, И.М. Дмитренко, А.А. Мошенский // *Физика низких температур.* – 1985. – Т. 11, вып. 2. – С. 221–226.
4. Arendt, P. The xerogel made from decomposing liquid metal-ammonia solutions / P. Arendt // *J.Phys. Chem. Sol.* – 1988. – Т. 49, № 5. – С. 511–517.
5. Аномально низкое электрическое сопротивление тонких пленок диэлектриков / Н.С. Ениколопан, Ю.А. Берлин, С.И. Бешенко, В.А. Жорин // *Письма в ЖЭТФ.* – 1981. – Т. 33. – Вып. 10. – С. 508–511.
6. Архангородский, В.М. Высокопроводящее состояние в плёнках окисленного полипропилена / В.М. Архангородский, Е.Г. Гук, А.М. Ельяшевич // *ДАН СССР.* – 1989. – Т. 309, № 3. – С. 603–606.
7. Лачинов, А.Н. Высокопроводящее состояние в тонких пленках полимеров. Влияние электрического поля и одноосного давления / А.Н. Лачинов, А.Ю. Жеребов, В.М. Корнилов // *ЖЭТФ.* – 1992. – Т. 102. – В. 1(7). – С. 187–193.
8. Лачинов, А.Н. Электроника тонких слоёв широкозонных полимеров / А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева // *УФН.* – 2006. – Т. 176, № 12. – С. 1249–1266.
9. Kamerlingh Onnes, H. Further Experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc.VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears / H. Kamerlingh Onnes // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* – 1911. – № 124 с.
10. Bardeen, J. The theory of superconductivity / J. Bardeen, L. Cooper, J. Schrieffer // *Phys. Rev.* – 1957. – Т. 108. – С. 1175–1204.
11. Гинзбург, В.Л. К теории сверхпроводимости / В.Л. Гинзбург, Л.Д. Ландау // *ЖЭТФ.* – 1950. – Т. 20. – С. 1064; Ландау, Л.Д. Собрание трудов / Л.Д. Ландау. – М.: Наука, 1969. – Т. 2. – С. 126–152.
12. Daunt, J.L. Conductivity of sodium-ammonia solutions (L). / J.L. Daunt // *Phys. Rev.* – 1946. – V. 70. – P. 219.
13. The electrical conductivity of rapidly frozen solutions of sodium in liquid ammonia (L) / H.A. Boorse, D.B. Cook, R.B. Pontius, M.W. Zemansky // *Phys. Rev.* – 1946. – Т. 70. – С. 92–93.
14. Туманов, К.А. К вопросу о сверхпроводимости растворов натрия в аммиаке // К.А. Туманов, А.И. Шальников, Ю.В. Шарвин // *ДАН СССР.* – 1947. – Т. 56, № 1. – С. 33–35.
15. Дмитренко, И.М. К вопросу о сверхпроводимости в системе натрия – аммиак / И.М. Дмитренко, И.С. Щеткин // *Письма в ЖЭТФ.* – 1973. – Т. 18. – С. 497–501.
16. Брандт, Н.Б. Гипотеза о возможном эффекте неравновесной высокотемпературной сверхпроводимости / Н.Б. Брандт, В.В. Толмачев // *Письма в ЖЭТФ.* – 1974. – Т. 19. – С. 439–442.

17. Новое высокопроводящее состояние композиций металл-полимер / Н.С. Ениколопян, Ю.А. Берлин, С.И. Бешенко, В.А. Жорин // ДАН СССР. – 1981. – Т. 258, № 6. – С. 1400–1403.
18. Григоров, Л.Н. Зарядовая неустойчивость полимеров в высокоэластическом состоянии / Л.Н. Григоров, В.М. Андреев // ВМС. – 1988. – Т. 30(Б), № 8. – С. 589–592.
19. Чурлина, Е.Е. Особенности электронного переключения в многослойных полимерных образцах / Е.Е. Чурлина, А.Н. Лачинов // Структура и динамика молекулярных систем. – 2003. – Вып. X. – Ч. 1. – С. 198–201.
20. Бунаков, А.А. Исследование особенностей переноса заряда в многослойных МДМ и МДП структурах на основе полидифениленфталаида: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.А. Бунаков. – Уфа, 2006. – 142 с.
21. Салихов, Р.Б. Электронный транспорт в гетероструктурах на основе широкозонных полимерных материалов: автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Р.Б. Салихов. – Уфа, 2011.
22. Набиуллин, И.Р. Влияние параметров потенциального барьера на интерфейсе металл/полимер на электронное переключение в структуре металл/полимер/металл / И.Р. Набиуллин, А.Н. Лачинов, А.Ф. Пономарев // ФТТ. – 2012. – Т. 54. Вып. 2. – С. 230–234.
23. Пергамент, А.Л. Электронные неустойчивости в соединениях переходных металлов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А.Л. Пергамент. – СПб, 2007. – 302 с.
24. Вонсовский, С.В. К теории взаимодействия зонного электрона с фононами / С.В. Вонсовский, М.С. Свирский, Л.М. Свирская // ФММ. – 1989. – Т. 67. – С. 885–890.
25. Вонсовский, С.В. К теории состояния высокой проводимости / С.В. Вонсовский, М.С. Свирский, Л.М. Свирская // ФММ. – 1992. – № 1. – С. 36–50.
26. Arendt, P. Natural units of current and voltage drop associated with Fröhlich conduction through a Gel made from decomposing liquid metal-ammonia solutions // P. Arendt // Solid State Comm. – 1988. – Т. 67, № 12. – С. 1161–1164.
27. Arendt, P. A high – conducting state in a liquid metal – ammonia solutions / P. Arendt // Journ. de Physique IV, Colloque C5, supplement au Journal de Physique I. – 1991. – Т. 1. – С. C5-245–C5-249.
28. Смирнова, С.Г. Индуцированный магнитным полем скачкообразный переход окисленного полипропилена в ферромагнитное состояние / С.Г. Смирнова, Л.Н. Григоров, О.В. Демичева // ВМС. – 1989. – Т. 31(Б), № 5. – С. 323–324.
29. Смирнова, С.Г. Аномальный ферромагнетизм окисленного полипропилена / С.Г. Смирнова, О.В. Демичева, Л.Н. Григоров // Письма в ЖЭТФ. – 1988. Т. 48. – Вып. 4. – С. 212–214.
30. Вонсовский, С.В. К теории самопроизвольной ионизации кристалла с взаимодействующими электронами. IV. Полярная модель с числом электронов, отличным от числа узлов кристаллической решетки / С.В. Вонсовский, М.С. Свирский, Л.М. Свирская // ФММ. – 1997. – С. 59–74.
31. Изюмов, Ю.А. Материалы с сильными электронными корреляциями / Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев // ФММ. – 2008. – Т. 178, № 1. – С. 25–60.
32. Трапезников, В.А. Повышение прочности тонких поверхностных слоев твердых тел за счет кратковременного увеличения межатомных сил связи / В.А. Трапезников // Поверхность. – 1994. – № 8–9. – С. 136–143.
33. Разрушение сверхвысокой проводимости окисленного полипропилена критическим током / О.В. Демичева, Л.Н. Григоров, С.Г. Смирнова и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51. – Вып. 4. – С. 228.
34. Измерение электрических свойств сверхтонких полимерных слоёв. / Н.С. Ениколопян, С.Г. Груздева, С.Г. Галашина и др. // ДАН СССР. – 1985. – Т. 283, № 6. – С. 1404–1408.
35. Mory, T. Transport properties of organic metal containing magnetic ions (BEDT – TTF) CsCo(SCN) / T. Mory, A. Fuse, Sh. Tanaka // Physica C. – 1996. – Т. 264. – С. 208–210.
36. Веркин, Б.И. Электрические и магнитные свойства сверхпроводящих соединений La(Ba,Sr)CuO и YBaCuO / Б.И. Веркин, В.М. Дмитриев, А.И. Звягин // Проблемы ВТСП, ч. II. – Свердловск, 1987. – С. 164–165.

Поступила в редакцию 13 января 2012 г.

HIGH-CONDUCTING STATE IN LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS

L.M. Svirskaya¹

A connection between a state of high electron conductivity with low dimension of conducting subsystem is considered. A possibility of theoretical explanation of high-conducting state existence on the basis of criterion of switching electron interaction with elementary excitations is discussed.

Keywords: high-conducting state, low-dimensional systems.

References

1. Abrikosov A.A. *Osnovy teorii metallov* (Fundamentals of the theory of metals). Moscow, Nauka, 1987. 520 p. (in Russ.).
2. Ogg R.A. Bose-Einstein condensation of trapped electron pairs. Phase separation and superconductivity of metal-ammonia solutions. *Phys. Rev.* 1946. Vol. 69. pp. 243–244.
3. Vasil'chenko A.S., Dmitrenko I.M., Moshenskij A.A. Osobennosti vysokoprovodjashhego sostojanija v tverdojj faze natrij-ammiachnykh rastvorov (Features high-conductivity state in the solid phase of sodium-ammonia solutions). *Fizika nizkikh temperatur.* 1985. Vol. 11. Issue 2. pp. 221–226. (in Russ.).
4. Arendt P. The xerogel made from decomposing liquid metal-ammonia solutions. *J. Phys. Chem. Sol.* 1988. Vol. 49, no. 5. pp. 511–517.
5. Enikolopjan N.S., Berlin Ju.A., Beshenko S.I., Zhorin V.A. Anomal'no nizkoe ehlektricheskoe soprotivlenie tonkikh plenok dielektrikov (Abnormally low electrical resistance of thin films of dielectrics). *Pisma v JETP.* 1981. Vol. 33. Issue 10. pp. 508–511. (in Russ.). [Enikolopyan N.S., Berlin Yu.A., Beshenko S.I., Zhorin V.A. Anomalously low resistance of compressed dielectric thin films. *JETP letters.* Vol. 33. Issue 10. p. 492].
6. Arkhangorodskij V.M., Guk E.G., El'jashevich A.M. Vysokoprovodjashhee sostojanie v pljonnakh oksilennogo polipropilena (High-conducting state in the films of oxidized polypropylene). *DAN SSSR.* 1989. Vol. 309, no. 3. pp. 603–606. (in Russ.).
7. Lachinov A.N., Zherebov A.Yu., Kornilov V.M. Vysokoprovodjashhee sostojanie v tonkikh plenkakh polimerov. Vlijanie ehlektricheskogo polja i odnoosnogo davlenija (High-conductivity state of thin polymer films: effects of an electric field and of a uniaxial pressure). *JETP.* 1992. Vol. 102. Issue 1 (7). pp. 187–193. (in Russ.).
8. Lachinov A.N., Vorob'eva N.V. Ehlektronika tonkikh slojov shirokozonnnykh polimerov (Electronics of thin wideband polymer layers). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 2006. Vol. 176, no. 12. pp. 1249–1266. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200612a.1249 (in Russ.). [Lachinov A.N., Vorob'eva N.V. Electronics of thin wideband polymer layers. *Physics-Uspekhi.* 2006. Issue 49. pp.1223–1238. DOI: 10.1070/PU2006v049n12ABEH006176].
9. Kamerlingh Onnes H. Further Experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears. *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* 1911. no. 124 c.
10. Bardeen J., Cooper L., Schrieffer J. The theory of superconductivity. *Phys. Rev.* 1957. Vol. 108. pp. 1175–1204.
11. Ginzburg V.L., Landau L.D. K teorii sverkhprovodimosti (On the theory of superconductivity). *JETP.* 1950. Vol. 20. p. 1064; Landau L.D. *Sobranie trudov* (Collection of the Work). Moscow, Nauka, 1969. Vol. 2. pp. 126–152. (in Russ.).
12. Daunt J.L. Conductivity of sodium-ammonia solutions (L). *Phys. Rev.* 1946. V. 70. p. 219.
13. Boorse H.A., Cook D.B., Pontius R.B., Zemansky M.W. The electrical conductivity of rapidly frozen solutions of sodium in liquid ammonia (L). *Phys. Rev.* 1946. Vol. 70. pp. 92–93.
14. Tumanov K.A., Shal'nikov A.I., Sharvin Ju.V. K voprosu o sverkhprovodimosti rastvorov natrija v ammiake (The problem of superconductivity in ammonia solutions of sodium). *DAN SSSR.* 1947. Vol. 56, no. 1. pp. 33–35. (in Russ.).

¹ Svirskaya Lyudmila Moiseevna is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, General and Theoretical Physics Department, Chelyabinsk State Pedagogical University.
E-mail: svirskayalm@mail.ru

15. Dmitrenko I.M., Shchetkin I.S. K voprosu o sverkhprovodimosti v sisteme natrij–ammiak (Concerning superconductivity in the sodium-ammonia system). *Pisma v JETP*. 1973. Vol. 18. pp. 497 – 501. (in Russ.). [Dmitrenko I.M., Shchetkin I.S. Concerning superconductivity in the sodium-ammonia system. *JETP letters*. Vol. 18. Issue 8. p. 292].
16. Brandt N.B., Tolmachev V.V. Gipoteza o vozmozhnom ehffekte neravnovesnoj vysokotemperaturnoj sverkhprovodimosti (The hypothesis of the possible effect of nonequilibrium high-temperature superconductivity). *Pisma v JETP*. 1974. Vol. 19. pp. 439–442. (in Russ.). [Brandt N.B., Tolmachev V.V. Hypothesis concerning the possible effect of nonequilibrium high-temperature superconductivity. *JETP letters*. Vol. 19. Issue 7. p. 237].
17. Enikolopjan N.S., Berlin Ju.A., Beshenko S.I., Zhorin V.A. Novoe vysokoprovodjashhee sostojanie kompozicij metall-polimer (A new highly conducting state of metal-polymer compositions). *DAN SSSR*. 1981. Vol. 258, № 6. pp. 1400–1403. (in Russ.).
18. Grigorov L.N., Andreev V.M. Zarjadovaja neustojchivost' polimerov v vysokoehlasticheskom sostojanii (Charge instability of polymers in the highly elastic state). *Vysokomolekuljarnye soedinenija*. 1988. Vol. 30 (B), no. 8. pp. 589–592. (in Russ.).
19. Churlina E.E., Lachinov A.N. Osobennosti ehlektronnogo pereklyucheniya v mnogoslojnykh polimernykh obrazcakh (Features of electronic switching in multilayer polymer samples). *Struktura i dinamika molekuljarnykh sistem*. 2003. Issue X. Part 1. pp. 198–201. (in Russ.).
20. Bunakov A.A. *Issledovanie osobennostej perenosa zarjada v mnogoslojnykh MDM i MDP strukturakh na osnove polidifenilentalida: dis. ...kand. fiz.-mat. nauk* (Investigation of the features of charge transport in multi-MDM and MDS structures on the basis polidifenilentalida: thesis candidate Phys.-Math. Science). Ufa, 2006. 142 p.
21. Salikhov R.B. *Ehlektronnyj transport v geterostrukturakh na osnove shirokozonykh polimernykh materialov: avtoreferat dissertacija doktora fiz.-mat. nauk* (Electron transport in heterostructures based on wide-polymer materials: summary of the thesis of Dr. Sciences). Ufa, 2011.
22. Nabiullin I.R., Lachinov A.N., Ponomarev A.F. Vlijanie parametrov potencial'nogo bar'era na interfejse metall/polimer na ehlektronnoe pereklyuchenie v strukture metall/polimer/metal (The influence of the potential barrier at the interface of metal/polymer for electronic switching in a metal/polymer/metal). *Fizika tverdogo tela*. 2012. Vol. 54. Issue 2. pp. 230–234. (in Russ.).
23. Pergament A.L. *Ehlektronnye neustojchivosti v soedinenijakh perekhodnykh metallov: dissertacija doktora fiz.-mat. nauk* (Electronic instabilities in transition-metal compounds: the dissertation of Dr. Science). Sankt-Peterburg, 2007. 302 p.
24. Vonsovskij S.V., Svirskij M.S., Svirskaja L.M. K teorii vzaimodejstvija zonnogo ehlektrona s fononami (The theory of the interaction of itinerant electrons and phonons). *Fizika metallov i metallovedenie*. 1989. Vol. 67. pp. 885–890. (in Russ.).
25. Vonsovskij S.V., Svirskij M.S., Svirskaja L.M. K teorii sostojanija vysokoj provodimosti (The theory of the state of high conductivity). *Fizika metallov i metallovedenie*. 1992. no. 1. pp. 36–50. (in Russ.).
26. Arendt P. Natural units of current and voltage drop associated with Fröhlich conduction through a Gel made from decomposing liquid metal-ammonia solutions. *Solid State Comm.* 1988. Vol. 67, № 12. pp. 1161 – 1164.
27. Arendt P. A high-conducting state in a liquid metal-ammonia solutions. *Journ. de Physique IV, Colloque C5, supplement au Journal de Physique I*. 1991. Vol. 1. pp. C5-245–C5-249. (in Eng.).
28. Smirnova S.G., Grigorov L.N., Demicheva O.V. Inducirovannyj magnitnym polem skachkoobraznyj perekhod okislennogo polipropilena v ferromagnitnoe sostojanie (The induced magnetic field of an abrupt transition of the oxidized polypropylene in the ferromagnetic state). *Vysokomolekuljarnye soedinenija*. 1989. Vol. 31(B), no. 5. pp. 323–324. (in Russ.).
29. Smirnova S.G., Demicheva O.V., Grigorov L.N. Anomal'nyj ferromagnetizm okislennogo polipropilena (Anomalous ferromagnetism of oxidized polypropylene). *Pisma v JETP*. 1988. Vol. 48. Issue 4. p. 212–214. (in Russ.). [Smirnova S.G., Demicheva O.V., Grigorov L.N. Anomalous ferromagnetism of oxidized polypropylene. *JETP letters*. Vol. 48. Issue 4. p.231.]
30. Vonsovskij S.V., Svirskij M.S., Svirskaja L.M. K teorii samoproizvol'noj ionizacii kristalla s vzaimodejstvujushimi ehlektronami. IV. Poljarnaja model' s chislom ehlektronov, ot-lichnym ot chisla uzlov kristallicheskoj reshetki (The theory of spontaneous ionization of a crystal with interacting elec-

trons. IV. The polar model with the number of electrons different from the number of lattice sites). *Fizika metallov i metallovedenie*. 1997. pp. 59–74. (in Russ.).

31. Izjumov Ju.A., Kurmaev E.Z. Materialy s sil'nymi elektronnyimi korreljatsijami (Strongly electron-correlated materials). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2008. Vol. 178, no. 1. pp. 25–60. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200801b.0025 (in Russ.). [Izyumov Yu.A., Kurmaev E.Z. Strongly electron-correlated materials. *Physics-Uspekhi*. 2008. Issue 178. pp.25–60.]

32. Trapeznikov, V.A. Povysenie prochnosti tonkikh poverkhnostnykh sloev tverdykh tel za schet kratkovremennogo uvelichenija mezhatomnykh sil svyazi (Increasing the strength of thin surface layers of solids due to short-term increase of the interatomic binding forces). *Poverkhnost*. 1994. no. 8–9. pp. 136–143. (in Russ.).

33. Demicheva O.V., Rogachev D.N., Smirnova S.G., Shkljarova E.I., Jablovkov M.Ju., Andreev V.M., Grigorov L.N. Razrushenie sverkhvysokoj provodimosti okislennogo polipropilena kriticheskim tokom (Destruction of ultrahigh conductivity of oxidized polypropylene by critical current). *Pisma v JETP*. 1990. Vol. 51. Issue 4. p. 228. (in Russ.). [Demicheva O.V., Rogachev D.N., Smirnova S.G., Shklyarova E.I., Yablokov M.Yu., Andreev V.M., Grigorov L.N. Destruction of ultrahigh conductivity of oxidized polypropylene by critical current. *JETP letters*. Vol. 51. Issue 4. p.258]

34. Enikolopjan N.S., Gruzdeva S.G., Galashina S.G., Shkljarova E.I., Grigorov L.N. Izmerenie ehlektricheskikh svojjstv sverkhtonkikh polimernykh slojov (Measuring the electrical properties of ultra-thin polymer layers). *DAN SSSR*. 1985. Vol. 283, no. 6. pp. 1404–1408. (in Russ.).

35. Mory T., Fuse A., Tanaka Sh. Transport properties of organic metal containing magnetic ions (BEDT – TTF) CsCo(SCN). *Physica C*. 1996. Vol. 264. pp. 208 – 210.

36. Verkin B.I., Dmitriev V.M., Zvjagin A.I. Ehlektricheskie i magnitnye svojjstva sverkhprovodjashhikh soedinenij La(Ba,Sr)CuO i YBaCuO (Electrical and magnetic properties of superconducting compounds La (Ba, Sr) CuO and YBaCuO). *Problemy VTSP. Sverdlovsk*, 1987. Part II. pp. 164–165. (in Russ.).