

УДК 539.2; 538.945.2

Д.М. Сергеев^{1*}, К.Ш. Шункеев²¹Военный институт Сил Воздушной обороны, Казахстан, г. Актобе²Актюбинский государственный педагогический институт, Казахстан, г. Актобе*E-mail: serdau@rambler.ru

О преобразовании псевдокоррелированных пар электронов в куперовские пары в интерфейсе «сверхпроводник – флуктуационный сверхпроводник»

Аннотация. В работе рассмотрено возможное преобразование псевдокоррелированных (флуктуационных) пар электронов в куперовские пары в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), а также в интерфейсе «сверхпроводник – флуктуационный сверхпроводник». Показана возможность проникновения псевдокоррелированных пар в сверхпроводник за счет эффекта близости и андреевское отражение слабосвязанного электрона, входящего в состав флуктуационной пары, с возможным формированием пары «электрон – отраженная дырка».

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, куперовские пары, андреевское отражение слабосвязанного электрона.

Введение

В настоящее время одним из актуальных вопросов в проблеме ВТСП является изучение природы флуктуационной проводимости сверхпроводящих материалов в нормальном (несверхпроводящем) состоянии в области температур $T_c < T < T^*$ [1-3] (здесь T_c – критическая температура, T^* – характеристическая температура, являющейся граничной температурой флуктуационной проводимости). Это связано с тем, что в указанном интервале температур $T_c < T < T^*$ в ВТСП-системах проявляются нетривиальные феномены, т.е. ВТСП-система переходит в необычное новое состояние. Возможно, это нетривиальное состояние связано с псевдощелевым состоянием ВТСП [3] поэтому изучение флуктуационной проводимости ВТСП считается достаточно информативным и эффективным методом изучения псевдощелевого состояния ВТСП структур, так как происхождение псевдощели до сих пор остается неясным [4].

По результатам экспериментальных и теоретических исследований идеи о происхождении псевдощели разделены: одна группа считает, что псевдощель является предвестником сверхпроводимости, когда при некоторой характеристической температуре $T^* > T_c$ возникает спаривание электронов, но фазовая когерентность

достигается лишь при температуре $T = T_c$ [1,3] другая группа предполагает, что псевдощелевое состояние не связано со сверхпроводящим состоянием, а конкурирует с ним, и обусловлено либо динамическими флуктуациями (спиновыми, зарядовыми или структурными), либо волнами зарядовой плотности с d-симметричным параметром порядка [2,4] третья группа – дуалисты, обсуждающие новые свойства ВТСП-систем, основываясь на идеях, как первой, так и второй группы [5] В данной работе обсуждаются физические явления в интерфейсе «сверхпроводник – флуктуационный сверхпроводник» (S□-□S□) в рамках идеи первой группы, где сверхпроводящее и псевдощелевое состояния связаны между собой.

Известно, что при температурах выше T_c ($T_c < T < T^*$) в сверхпроводниках параметр порядка не равен нулю ($\Delta(T^*) \neq 0$) и наблюдается флуктуационная проводимость [6, □] При температуре $T = T^*$ формируются псевдокоррелированные электронные пары (флуктуационные пары). Так как формируются пары электронов, введем понятие длины когерентности псевдокоррелированных пар $\xi_{FSC}(T^*)$ или длины псевдокогерентности для описания некоторых свойств флуктуационных пар.

Флуктуационная проводимость двумерных систем определяется поправками Асламова-Ларкина (АЛ) [7]: $\sigma'_{AL} = e^2/16\hbar d \varepsilon$ и $\sigma'_{MT} = [e^2/8\hbar d (\varepsilon - \delta)] \ln(\varepsilon/\delta)$ где e — элементарный заряд, \hbar — постоянная Планка, d — толщина образца, $\varepsilon = \ln(T/T_c) \approx (T - T_c)/T_c$, $\delta = \ln(T_{\tilde{n}0}/T_c) \approx (T_{c0} - T_c)/T_c$, T_c — критическая температура, $T_{\tilde{n}0}$ — невозможное значение критической температуры $T_{\tilde{n}}$. Поправка АЛ связана с наличием флуктуационных куперовских пар и ее вклад преобладает вблизи $T_{\tilde{n}}$, а поправка σ'_{MT} с взаимодействием квазичастиц с флуктуационными парами и вклад данной поправки σ'_{MT} возрастает по мере удаления от $T_{\tilde{n}}$. Однако при значениях $\varepsilon \approx \delta$ следует учитывать обе поправки АЛ и σ'_{MT} что означает что в интервале температур $T_c < T < T^*$ в ВСФ должны существовать сверхпроводящие флуктуационные куперовские пары. Данное явление экспериментально подтверждается в работе [3] где наблюдается ток когерентных бозонов с зарядом $2e$ в плёнках Bi_2Te_3 выше температуры T_c .

Возникают следующие вопросы: что происходит с псевдокоррелированными парами при увеличении температуры, что является причиной появления избыточной проводимости при

более высоких температурах, а так же является ли флуктуационные пары потенциальными куперовскими парами и возможно ли сдвиг критической температуры в область характеристических температур $T_c \rightarrow T^*$ тем самым существенно увеличить критическую температуру ВСФ.

Предполагается что спаренные фермионы существуют и выше $T_{\tilde{n}0}$ определяют уменьшение удельного сопротивления и другие особенности наблюдаемые в эксперименте при $T_c < T < T^*$. Длина когерентности подобных пар $\xi_{\text{флук}}(T)$ уменьшается с понижением температуры T и возможно при $T = T_{\tilde{n}}$ флуктуационные пары трансформируются в куперовские пары, т.е. псевдокоррелированные пары коррелируются $\xi_{\text{флук}}(T) \rightarrow \xi_{\text{КП}}(T)$ при $T = T_{\tilde{n}}$. При $T_c < T < T^*$ ВСФ ведет себя как материал с нетривиальными свойствами отличающийся от традиционных свойств ВСФ, т.е. образец превращается в флуктуационный сверхпроводник (флуктуационно-сверхпроводящий материал). Переход с состояния флуктуационно-сверхпроводника в сверхпроводящее состояние (супер-супер) в ВСФ-материалах происходит с плавным изменением длины когерентности. Такой переход описывается как переход от бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) к Кардин-Купер-рифферовскому (ККР) состоянию (рис. 1).

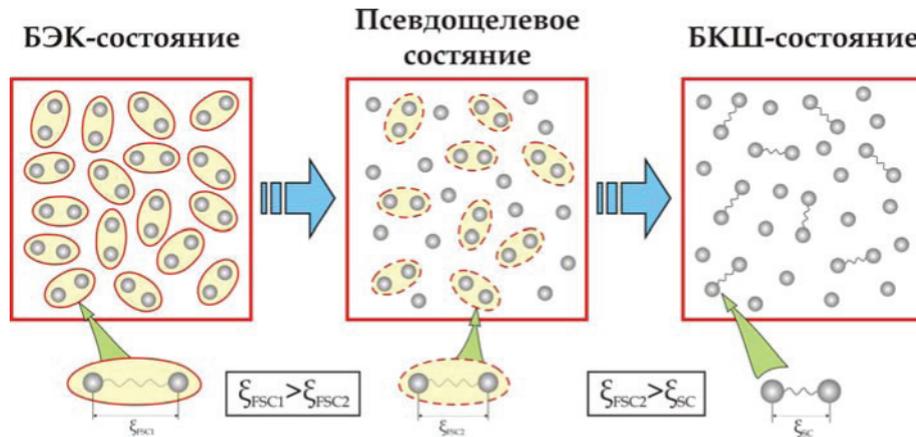


Рисунок 1 — преобразование бозонов с зарядом $2e$ (БЭК) в куперовские пары (ККР)

Переход от БЭК к ККР не является скачкообразным. Тот процесс является динамическим и поскольку с уменьшением температуры длина когерентности $\xi(T)$ при $T < T_c$ возрастает достаточно медленно вполне вероятно что в некоторой области температур локальные и куперовские пары могут сосуществовать.

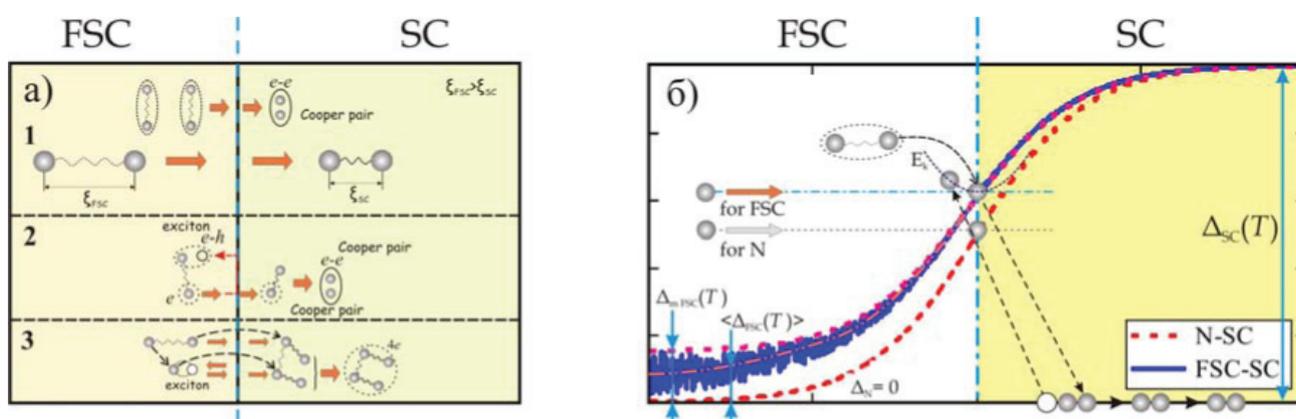
Если в ВСФ-структурах переход псевдокоррелированных пар в куперовские происходит медленно то в интерфейсе $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ вполне вероятно наблюдать быструю трансформацию данных пар электронов.

Согласно эффекту близости на границе SC–FSC происходит частичное «наведение» сверхпроводимости в флуктуационном сверхпроводнике. Куперовские пары могут проникать из SC в FSC и некоторое время существовать там. Это приводит к тому, что какой-то слой флуктуационного сверхпроводника вблизи интерфейса SC–FSC станет сверхпроводящим. Проникновение куперовских пар из SC в FSC приведет к уменьшению их плотности в сверхпроводнике. Параметр порядка ψ в сверхпроводнике вблизи интерфейса SC–FSC будет меньше 1. Помимо куперовских пар, вполне вероятно проникновение флуктуационных пар в сверхпроводник, т.е. псевдокоррелированные пары проходят в сторону сверхпроводника без

изменения своих параметров за счет эффекта близости.

При проникновении флуктуационных пар в сторону сверхпроводника вероятно уменьшение их длины когерентности с уменьшением температуры $\xi_{FSC}(T) \rightarrow \xi_{SC}(T)$, т.е. когда $\xi_{FSC}(T)$ достигает значения $\xi_{SC}(T)$ происходит полная трансформация некоторых флуктуационных пар в куперовские пары (рис. 2 а).

Трансформация флуктуационных пар в куперовские пары происходит также благодаря когерентному процессу андреевского отражения, вследствие чего в туннельных контактах из двух ВТСП при $T > T_c$ наблюдаются некоторые черты нестационарного джозефсоновского эффекта [10], т.е. флуктуационный эффект Джозефсона.



а) 1 – за счет эффекта близости с дальнейшим уменьшением длины когерентности; 2 – за счет андреевского отражения с образованием пары электрон–дырка и 3 – с образованием $4e$ кластера; б) андреевское отражение электрона, входящего в состав флуктуационной пары.

Рисунок 2 – Трансформация флуктуационных пар в куперовские пары в системе FSC-SC

Падающий на границу раздела SC–FSC электрон, входящий в состав флуктуационной пары, со стороны FSC, с вероятностью андреевского отражения может отразиться обратно как дырка (рис. 2 а, б). Отражение дырки при падении на границу раздела возникает только тогда, когда частица, налетающая на сверхпроводник со стороны флуктуационного сверхпроводника, имеет энергию меньшую, чем величина сверхпроводящей щели. При этом одна частица, входящая в состав флуктуационной пары, проникая в область сверхпроводника, находит себе парную частицу и вместе с ней переходит в конденсат, а освободившаяся дырка возвращается в FSC-область, и вероятно, что отраженная дырка со-

единяясь со второй частицей флуктуационной пары образует пару электрон–дырка (экситон). Эмпирически можно наблюдать, как следствие андреевского отражения, существенное увеличение проводимости SC–FSC-перехода при напряжениях, меньших величины сверхпроводящей щели. Возможно, превращение отраженной дырки в интерфейсе FSC-SC с образованием коррелированных двух куперовских пар, образующий своеобразный кластер с зарядом $4e$ (рис. 2 а).

Заключение

Таким образом, в данной работе показано, что в системе SC-FSC трансформация флуктуационных пар в куперовские пары происходят:

1) за счет проникновения псевдокоррелированных пар в сверхпроводник (эффект близости) с дальнейшим изменением длины когерентности; 2) за счет андреевского отражения слабосвязанного электрона, входящий в состав флуктуационной пары и имеющую энергию меньше энергетической щели (при этом вполне вероятно формирование пары электрон – дырка из отраженной дырки и из другого слабосвязанного электрона флуктуационной пары, а также образование коррелированных куперовских пар с зарядом $4e$).

Литература

1 Kondo T., Hamaya Y., Palczewski A.D. Disentangling Cooper-pair formation the transition temperature from the pseudogap state in the cuprates // *Nature Phys.* – Vol. 7. – 2011. – P. 21-25.

2 Rourke P.M.C., Mouzopoulou I., Xu X. et. al. Phase-fluctuating superconductivity in overdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ // *Nature Phys.* – Vol. 7. – 2011. – P. 455-458.

3 Соловьев А.Л., Дмитриев В.М. Флуктуационная проводимость и псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках YBCO // *ФНТ.* – Т. 35. – №3. – 2009. – С. 227-264.

4 Садовский М.В. Псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках // *УФН.* – Т. 171, №5. – 2001. – С. 539-564.

5 Трунин М.Р. Анизотропия проводимости и псевдощель в микроволновом отклике высокотемпературных сверхпроводников // *УФН.* – Т. 175, №10. – 2005. – С. 1017-1037.

6 Glover R.E. Superconducting component of conductivity above the transition temperature // *Proc. of 11-th Inter. Conf. on Low Temp. Phys.* – St. Andrews, 1968. – Vol. 2, B. 3. – P. 793-797.

7 Aslamazov L.G., Larkin A.I. The Influence of Fluctuation Pairing of Electrons on the Conductivity of Normal Metal // *Phys. Let.* – Vol. 26A, No6. – 1968. – P. 238-239.

8 Maki K. The Critical Fluctuation of the Order Parameter in Type-II Superconductors // *Progress or Theoretical Physics.* – Vol. 39, No4. – 1968. – P. 897-906.

9 Thomson R.S. Microwave, Flux Flow, and Fluctuation Resistance of Dirty Type-II Superconductors // *Phys. Rev. B.* – Vol. 1, No1. – 1970. – P. 327-333.

10 Сергеев Д.М. О флуктуационном эффекте Джозефсона в ВТСП // *Мат. межд. науч.-техн. конф. «Фунд. проб. радиоэлектронного приборостроения»* – М., 2011. – Ч.1.- С. 81-83.

Д.М. Сергеев, К.Ш. Шункеев

«Асқын өткізгіш – флуктуациялық асқын өткізгіш»

интерфейсінде псевдокорреляцияланған электрондар жұптарының купер жұптарына түрленуі туралы

Мақалада жоғары температуралы асқын өткізгіштерде, сондай-ақ «асқын өткізгіш – флуктуациялық асқын өткізгіш» интерфейсінде псевдокорреляцияланған (флуктуациялық) электрондар жұптарының Купер жұптарына түрлену мүмкіндігі қарастырылған. Жақындық эффектісінің есебінен псевдокорреляцияланған электрондар жұптардың туннелденуі және флуктуациялық электрондар жұптарына кіретін әлсіз байланысқан электронның Андреевтік шағылуы, шағылу нәтижесінде «электрон – шағылған кемтік» жұбының түзілу мүмкіндігі көрсетілген.

Түйінді сөздер: жоғарғы температуралы асқын өткізгіш, Купер жұбы, әлсіз байланысқан электрондардың Андреев шағылуы.

D.M. Sergeev, K.Sh. Shunkeyev

About transformation the pseudo-correlated pairs of electrons in cooper pairs in the interface «superconductor – fluctuation superconductor»

In the article the possible conversion of pseudo-correlated (fluctuation) pairs of electrons in Cooper pairs in high-temperature superconductors, as well as in the interface «superconductor – fluctuation superconductor» is viewed. Tunneling of the pseudo-correlated pairs in a superconductor at the expense of a proximity effect and Andreev reflection weakly coupled an electron, a part fluctuation pairs, with possible formation of pair «electron – the reflected hole» is shown possibility.

Key words: high-temperature superconductors, Cooper pairs, Andreev reflection of a weakly bound electron.