

О страйповом механизме отражений электрона и дырки от границы нормальный металл–недостаточно допированный высокотемпературный сверхпроводник

Г.Г. Сергеева

*Национальный научный центр НАН Украины «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина
E-mail: gsergeeva@kipt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2007 г., после переработки 24 мая 2007 г.

При $T < T_c$ исследован процесс отражений электрона и дырки от границы нормальный металл–недостаточно допированный высокотемпературный сверхпроводник (НД ВТСП), наблюдаемых Г. Дойтсчером и др. на точечном N/S контакте. В дополнение к известному механизму отражений на сверхпроводящем потенциале, развитому Андреевым, де Женном и Сент-Джеймсом для контакта металл–низкотемпературный сверхпроводник, предложен страйповый механизм отражений, приводящий к полному циклу с двумя отражениями электрона и дырки от внешней границы нормального металла. Показано, что к таким отражениям приводят ионы меди в страйпах CuO_2 -плоскости в точечном контакте: ионы меди в D -страйпах поглощают и испускают в металл только электроны, а в U -страйпах — только дырки. При $T < T_c$ на расстоянии от границы металл–НД ВТСП, равном длине когерентности, в D - и U -страйпах N/S контакта должны наблюдаться локальные флуктуации антиферромагнитного (АФМ) упорядочения ионов меди: при поглощении электрона локальный АФМ порядок в страйпах N/S контакта восстанавливается, при поглощении дырки — нарушается. Уход электронов и дырок из страйпов CuO_2 -плоскости НД ВТСП в нормальный металл свидетельствует о несовместимости этих носителей заряда с локальным АФМ упорядочением двухвалентных ионов меди в CuO_2 -плоскости.

При $T < T_c$ досліджено процес відбиттів електрона та дірки від межі нормальний метал–недостаточно допований високотемпературний надпровідник (НД ВТНП), які спостережено Г. Дойтсчером та ін. на крапковому N/S контакті. На додаток до відомого механізму відбиттів на надпровідному потенціалі, розвиненому Андрієвим, де Женном та Сент-Джеймсом для контакту метал–низкотемпературний надпровідник, запропоновано страйповий механізм відбиттів, що призводить до повного циклу із двома відбиттями електрона й дірки від зовнішньої границі нормального металу. Показано, що до таких відбиттів призводять іони міді у страйпах CuO_2 -площини у точковому контакті: іони міді в D -страйпах поглинають і випромінюють у метал тільки електрони, а в U -страйпах — тільки дірки. При $T < T_c$ на відстані від границі метал–НД ВТНП, що дорівнюється довжині когерентності, у D - та U -страйпах N/S контакту повинні спостерігатися локальні флуктуації антиферромагнітного (АФМ) упорядкування іонів міді: при поглинанні електрона локальний АФМ порядок у страйпах N/S контакту відновлюється, при поглинанні дірки — порушується. Відхід електронів і дірок зі страйпів CuO_2 -площини НД ВТНП у нормальний метал свідчить про несумісність цих носіїв заряду з локальним АФМ упорядкуванням двовалентних іонів міді в CuO_2 -площині.

PACS: **74.72.-h** Высокотемпературные сверхпроводящие соединения;
74.72.Dn Купраты на основе La;
74.40.+k Флуктуации (шумы, хаос, неравновесная сверхпроводимость, локализация и т.д.).

Ключевые слова: недостаточно допированный ВТСП, страйповый механизм отражений, антиферромагнитное упорядочение.

1. Для недостаточно допированных (НД) купратных ВТСП уже двадцать лет одним из интенсивно обсуждаемых вопросов остается проблема двух щелей — псевдощели (PG) Δ_{PG} при $T > T_c$ и сверхпроводящей (SC) щели Δ_{SC} при $T < T_c$ (см., например, обзоры Г. Дойтсчера [1,2]). При допировании, близком к оптимальному, для одночастичных возбуждений сканирующая туннельная спектроскопия (STM) и малоугловая фотоэмисионная спектроскопия (ARPES) позволяют определить величину псевдощели $25 \text{ мэВ} \leq \Delta_{PG} \leq 40 \text{ мэВ}$, но вопрос о SC щели Δ_{SC} долго оставался открытым [1]. Впервые для точечного контакта (золотая игла–монокристалл YBCO) величина $\Delta_{SC} \sim 20 \text{ мэВ}$ была определена при наблюдении отражений Андреева–де Женна и Сент-Джеймса* (AdGS-J отражений) [3–5] и установлено, что $\Delta_{SC} < \Delta_{PG}$ [1,6].

Поскольку в низкотемпературных сверхпроводниках отражения AdGS-J связаны с электрон-дырочной природой носителей заряда [5], в обзоре [1] обсуждается предположение, что и в НД ВТСП носители заряда имеют такую же природу. В настоящей работе показано, что отражения электрона и дырки от внешней границы нормального металла могут наблюдаться в НД ВТСП со страйповой структурой CuO_2 -плоскостей при $T < T_c$ в модели носителей заряда, топологически совместимых с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением допированных CuO_2 -плоскостей [7–10]. К отражениям электрона, и дырки приводит страйповая структура CuO_2 -плоскостей, граничащих с N/S контактом: ионы меди в D-страйпах поглощают и испускают в металл только электроны, а в U-страйпах — только дырки. Несовместимость электронов и дырок с локальным АФМ упорядочением двухвалентных ионов меди приводит к тому, что образовавшиеся в CuO_2 -плоскости N/S контакта электроны (в D-страйпах) или дырки (в U-страйпах) уходят в металл. Для N/S контакта с одним типом страйпов при $T < T_c$ будут наблюдаться отражения с одним циклом (или электрона, или дырки).

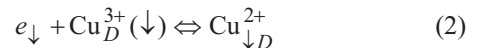
2. Два обзора Г. Дойтсчера [1,2] содержат экспериментальные и теоретические результаты, полученные при изучении НД ВТСП с применением AdGS-J спектроскопии. Убеждают пятнадцать лет «устойчивости» значения $\Delta_{SC} \approx 20 \text{ мэВ}$, найденной этим методом [1,6] для монокристалла YBCO. Но нерешенный для НД ВТСП вопрос о природе носителей заряда [7–10], с одной стороны, и убедительные свидетельства необходимости для отражений AdGS-J присутствия в НД

ВТСП электронов и дырок, с другой стороны, требуют ответа. Ниже рассмотрен N/S точечный контакт нормальный металл–U- и D-страйпы CuO_2 -плоскости. При этом для НД ВТСП в металлическом состоянии учитывается требование совместимости носителей заряда с АФМ упорядочением ионов меди плоскости CuO_2 , например такой, как для двумерных вихрей или антивихрей [10]. Поэтому электрон, пришедший в N/S контакт, не может перемещаться в плоскости CuO_2 и поглощается ионом меди в D-страйпе ВТСП в области контакта, стимулируя локальное восстановление АФМ порядка в U- и D-страйпах. Образовавшаяся при этом в U-страйпе дырка тоже не может перемещаться по плоскости CuO_2 , уходит из N/S контакта в металл, отражается от внешней границы металла и приходит в U-страйп N/S контакта. Дырка не может перемещаться по плоскости CuO_2 , поглощается ионом меди в U-страйпе, стимулируя локальное нарушение АФМ порядка в U- и D-страйпах в области N/S контакта. Образовавшийся при этом электрон в D-страйпе уходит через N/S контакт в металл.

Поглощение электрона e_\downarrow в D-страйпе и рождение дырки h_\downarrow в U-страйпе, граничащих с N/S контактом. Предположим, что энергия ε_e электрона e_\downarrow , пришедшего из металла через N/S контакт в D-страйп ВТСП (и находящегося на расстоянии $r \leq \xi$ от границы N/S контакта), такова, что

$$\varepsilon_e \approx \Delta E_D = E_{\text{Cu}_D^{2+}} - E_{\text{Cu}_D^{3+}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{Cu}_D^{2+}}$ — энергия двухвалентного иона меди в D-страйпе, а $E_{\text{Cu}_D^{3+}}$ — энергия Cu_D^{3+} иона меди в нем, и $E_{\text{Cu}_D^{2+}} > E_{\text{Cu}_D^{3+}}$ [11]. При этом захват электрона ионом Cu_D^{3+}

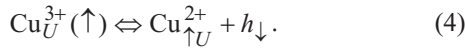


приводит к переходу иона Cu_D^{3+} в двухвалентное состояние с магнитным моментом, соответствующим антиферромагнитному (АФМ) порядку в плоскости CuO_2 (в (2) стрелка \downarrow в скобках означает, что ион Cu_D^{3+} в D-страйпе занимает позицию иона $\text{Cu}_{\downarrow D}^{2+}$).

Спонтанная ионизация иона $\text{Cu}_U^{3+} (\uparrow)$ (стрелка \uparrow означает, что в U-страйпе ион Cu_U^{3+} занимает позицию иона $\text{Cu}_{\uparrow U}^{2+}$) с энергией $E_{\text{Cu}_U^{3+}} > E_{\text{Cu}_U^{2+}}$ [11] приводит к рождению дырки с энергией

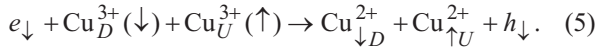
$$\varepsilon_h \approx E_{\text{Cu}_U^{3+}} - E_{\text{Cu}_U^{2+}}, \quad (3)$$

* Для N/S в 1963 г. в работе де Женна и Сент-Джеймса [4] было найдено решение уравнений Боголюбова–де Женна и показано, что в сверхпроводнике появляются связанные состояния «электрон–дырка» с конечной энергией, а в 1964 г. Сент-Джеймсом было установлено [5], что полный цикл отражений состоит из двух отражений (и электрона, и дырки) от внешней границы N металла.)

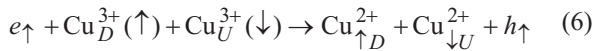


и к возникновению локальной флуктуации АФМ параметра порядка в U - и D -страйпах, граничащих с N/S контактом.

Сложив правые и левые части уравнений (2) и (4) и предположив, что эти процессы происходят в соседних D - и U -страйпах, получим



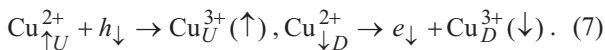
При переходе электрона e_{\uparrow} из металла через N/S контакт в D -страйп



электрон поглощается ионом $\text{Cu}_D^{3+}(\uparrow)$, а спонтанная ионизация иона $\text{Cu}_U^{3+}(\downarrow)$ приводит к рождению дырки h_{\uparrow} в U -страйпе и к возникновению локальной флуктуации АФМ параметра порядка в области N/S контакта.

Таким образом, приход электрона e_{\downarrow} (или e_{\uparrow}) в D -страйп и его поглощение трехвалентным ионом меди инициирует локальное восстановление АФМ порядка на расстоянии $r \sim \xi$ от границы N/S контакта и в D -страйпе, и в соседнем U -страйпе с рождением (4) дырки h_{\downarrow} (или h_{\uparrow}), которая не может двигаться по плоскости CuO_2 и уходит через N/S контакт в нормальный металл.

Поглощение дырки h_{\downarrow} в U -страйпе и рождение электрона e_{\downarrow} в D -страйпе, граничащих с N/S контактом. Отражившись от внешней границы металла, дырка через N/S контакт приходит в НД купратный ВТСП, где она в U -страйпе может ионизировать ион Cu_U^{2+} , если $\varepsilon_h + E_{\text{Cu}_U^{2+}} \approx E_{\text{Cu}_U^{3+}}$, что приводит к нарушению локального АФМ упорядочения в граничащих с N/S контактом U - и D -страйпах:



Как видно из (2), иону $\text{Cu}_{\downarrow D}^{2+}$ из D -страйпа, граничащего с N/S контактом, энергетически выгодно уменьшить свою энергию, нарушив АФМ порядок в CuO_2 -плоскости и совершив переход в энергетически более выгодное состояние Cu_D^{3+} с потерей энергии ε_e , достаточной (1) для рождения электрона e_{\downarrow} . Электрон не может двигаться по CuO_2 -плоскости и уходит через N/S контакт в нормальный металл.

Отразившись от внешней границы металла, электрон через N/S контакт приходит в D -страйп ВТСП (2), и процесс повторяется снова. Однако, как видно из (2)–(4), отражения электрона и дырки в НД купратных ВТСП наблюдаются только благодаря страйповой структуре плоскостей CuO_2 , граничащих с N/S контактом: D -страйпы поглощают и испускают только

электроны, U -страйпы поглощают и испускают только дырки. Таким образом, если N/S контакт будет граничить только с D -страйпом (или только с U -страйпом), то проходить через контакт и отражаться от внешней границы металла будут только электроны (или только дырки), и отражения будут состоять из одного цикла. Такая избирательность страйпов связана с двумя обстоятельствами:

1) в U -страйпах энергия иона Cu_U^{3+} больше, чем иона Cu_U^{2+} , а в D -страйпах — наоборот, энергия иона Cu_D^{2+} больше, чем иона Cu_D^{3+} [11];

2) и дырка, и электрон, пройдя из металла через N/S контакт в CuO_2 -плоскость НД купратного ВТСП, не могут двигаться в ней, так как локальное АФМ упорядочение ионов меди требует совместимости носителей заряда с ним. Как показано выше, электрон поглощается трехвалентным ионом меди в D -страйпе, а дырка — двухвалентным ионом меди в U -страйпе в области N/S контакта.

3. Следовательно, если в область N/S контакта с D - и U -страйпами CuO_2 -плоскости НД купратного ВТСП приходит из N металла электрон, то он поглощается трехвалентным ионом меди в D -страйпе, что приводит к локальному восстановлению АФМ порядка и в нем, и в соседнем U -страйпе. Образовавшаяся при этом в U -страйпе дырка несовместима с локальным АФМ упорядочением ионов меди и уходит в металл, а после отражения от внешней границы металла поглощается в N/S контакте ионом Cu_U^{2+} в U -страйпе, что приводит к локальному нарушению АФМ порядка и в U -страйпе, и в соседнем D -страйпе. Образованный в D -страйпе электрон не может двигаться в CuO_2 -плоскости и уходит из области контакта в металл, отражается от его внешней границы, приходит в N/S контакт, и процесс отражений повторяется. Рассмотренный в работе страйповый механизм отражений существенно отличается от отражений AdGS-J двумя обстоятельствами. Первое связано с тем, что он должен наблюдаться и в псевдощелевом состоянии в области наблюдений эффекта Нернста с подвижными вихрями («cheap vortices» [12]) при температурах $T \leq T_f(p)$, где $T_f(p) = 815p$ (К), где p -концентрация допирования на ион меди [13]. Второе отличие от отражений AdGS-J состоит в том, что связанное состояние электрон–дырка в НД ВТСП при $T < T_c$ не возникает, но отражения при страйповом механизме сопровождаются локальными флуктуациями АФМ параметра порядка на расстоянии $r \sim \xi$ от N/S контакта и в D - и в U -страйпах, контактирующих с N металлом, по крайней мере, в области температур квазидвумерного сверхпроводящего состояния Березинского–Костерлица–Таулесса.

1. G. Deutscher, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 109 (2005).
2. G. Deutscher, *Fiz. Nizk. Temp.* **32**, 740 (2006).

3. А.Ф. Андреев, *ЖЭТФ* **46**, 1823 (1964).
4. P. de Gennes and D. Saint-James, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 151 (1963).
5. D. Saint-James, *J. Phys.* **25**, 59 (1964).
6. N. de Haas, D. Ilzycer, G. Deutscher, G. Desgardin, I. Monot, and M. Weger, *J. Supercond.* **7**, 763 (1992); *Physica C* **209**, 85 (1993).
7. В.В. Еременко, В.П. Новиков, *Письма ЖЭТФ* **11**, 478 (1970).
8. M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
9. В.М. Локтев, *ФНТ* **31**, 645 (2005).
10. Г.Г. Сергеева, *ФНТ* **32**, 761 (2006).
11. M.D. Sturge, in: *Solid State Physics. Advances in Research and Applications*, **20**, 91 (1967).
12. P.A. Lee, N. Nagaosa, and X.G. Wen, *Rev. Mod. Phys.* **78**, 306 (2006).
13. Г.Г. Сергеева, *ВАИТ (Problems of Atomic Energy and Technology)* №3(2), 385 (2007), Харьков.

On the stripe mechanism of electron and hole
reflections from normal metal–underdoped
high- T_c cuprates interface

G.G. Sergeeva

Electron and hole reflections from normal metal (N)–underdoped high- T_c cuprates (UD HTS) in-

terface were studied at $T < T_c$. These reflections were first observed by G. Deutscher *at al.* for N–S point contact. In addition to the known Andreev-de Gennes-Saint James mechanism of reflections on superconducting potential, a stripe mechanism of reflections is discussed here. It is shown that for a point contact the copper ions in D -stripes of the CuO_2 plane absorb and emit only electrons, and the copper ions in U -stripes absorb and emit only holes. At $T < T_c$ in D - and U -stripes local fluctuations of antiferromagnetic (AFM) order are observed at a distance from the interface which is equal the coherence length: the local AFM order is restored with electron absorption and it is broken with hole absorption. Escape of electrons and holes from the stripes of CuO_2 plane to N metal suggests that these charge carriers are incompatible with the local AFM ordering of bivalent copper ions in CuO_2 planes.

PACS: **74.72.-h** Cuprate superconductors (high- T_c and insulating parent compounds);
74.72.Dn La-based cuprates;
74.40.+k Fluctuations (noise, chaos, non-equilibrium superconductivity, localization, etc.)

Keywords: underdoped HTS, stripe mechanism of reflections, antiferromagnetic order.