

О СУБГАРМОНИЧЕСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЕ НА ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТУННЕЛЬНЫХ КОНТАКТОВ

О.М. Иваненко, К.В. Мицен

Получены экспериментальные результаты, позволяющие считать, что механизм, ответственным за субгармоническую щелевую структуру на ВАХ сверхпроводящих туннельных контактов, является многочастичное туннелирование.

Сверхпроводящие слабые связи (точечные контакты, мостики, туннельные переходы и др.) находят широкое применение в устройствах криогенной электроники. Однако некоторые процессы в них до сих пор остаются до конца не изученными. В частности, это касается механизма, ответственного за появление субгармонической структуры на вольтамперных характеристиках (ВАХ) слабых связей с концентрацией тока и джозефсоновских туннельных переходов с малой высотой потенциального барьера. Эта структура, проявляющаяся как скачки тока на ВАХ при напряжениях $V = 2\Delta/ne$ ($n = 1, 2, \dots$), экспериментально изучалась в работах [1–3]. Для ее объяснения были предложены различные механизмы: многочастичное туннелирование [4], самодетектирование джозефсоновского излучения [5], многократное андреевское отражение квазичастиц в области микроразоротки [6]. Однако при интерпретации на их основе всей совокупности экспериментальных данных возникают серьезные затруднения. Так, модель многочастичного туннелирования для объяснения скачка тока при $V = 2\Delta/ne$ предполагает одновременное туннелирование n квазичастиц. Но учитывая, что вероятность этого процесса пропорциональна $|T|^{2n}$, где T – матричный элемент туннельного перехода, а в экспериментах на точечных контактах часто наблюдаются субгармоники с $n \gtrsim 10$, такое объяснение представляется маловероятным, во всяком случае для структур, в которых наблюдаются субгармоники высоких порядков.

Модель самодетектирования, в свою очередь, наталкивается на необходимость рассмотрения двух различных механизмов для объяснения субгармоник при четных и нечетных n , в то время как в эксперименте не наблюдается различия в амплитуде и форме особенностей этих серий. Третья модель предполагает образование в точке контакта (для структур с концентрацией тока) нормальной области, в которой квазичастицы испытывают многократные андреевские отражения на границе. В случае точечных контактов эта модель дает правильное качественное описание экспериментальных результатов. В частности, она позволяет объяснить появление на ВАХ слабосвязанных контактов из различных сверхпроводников ($\Delta_2 \geq 2\Delta_1$) особенностей, соответствующих $2\Delta_1/2n$, Δ_2 и $\Delta_2 + \Delta_1$. Распространение этой модели на туннельные переходы для объяснения появления субгармонической структуры на ВАХ требует предположить существование нормальной микроразоротки в туннельном барьере.

Цель данного эксперимента состояла в том, чтобы разделить механизмы, приводящие к появлению субгармонической структуры на ВАХ джозефсоновских туннельных переходов по их влиянию на величину сверхпроводящей щели. Это представлялось в принципе возможным, поскольку процесс многочастичного туннелирования, приводящий к появлению щелевых субгармоник, должен сопровождаться развалом пар и увеличением концентрации квазичастиц. Последнее, в свою очередь, должно приводить к подавлению сверхпроводящей щели.

С другой стороны, андреевское отражение оставляет концентрацию квазичастиц в обеих сверхпроводящих обкладках туннельного контакта без изменений. А при сохранении полной концентрации процесс квазичастичного туннелирования ($eV < 2\Delta$) сводится лишь к повышению средней энергии квазичастиц по обе стороны от барьера [7]. Этот эффект аналогичен разогреву квазичастиц в СВЧ поле [8] и должен приводить к стимуляции сверхпроводимости и увеличению сверхпроводящей щели [7].

В настоящей работе для выяснения природы субгармонической щелевой структуры на ВАХ туннельных переходов использовалась методика двойного туннельного контакта. Такой контакт представляет собой

наложение трех пленок сверхпроводника, разделенных туннельными барьерами. Один из контактов – генератор – инжектирует квазичастицы, а другой работает как пассивный детектор, регистрирующий величину изменения щели $\delta\Delta$ в средней обкладке, которая является верхней обкладкой генератора и нижней обкладкой детектора одновременно. Средняя пленка должна быть по возможности более тонкой (300–500 Å), чтобы уменьшить объем, где формируется неравновесная функция распределения, и таким образом увеличить эффективную скорость квазичастичной "накачки".

Особо следует остановиться на тепловом режиме работы такого контакта. Поскольку ожидаемые изменения щели малы, то разогрев контакта под действием рассеиваемой в нем мощности (~ 1 мкВт), приводя к повышению концентрации квазичастиц в средней обкладке, может существенно исказить результаты измерений. Однако в случае туннелирования в квазичастичной области ($eV < 2\Delta$) ситуация существенно облегчается. Поскольку в этой области энергия фононов, образующихся в процессе релаксации туннелирующих квазичастиц, $\hbar\omega_{ph} < 2\Delta$, то время их жизни в пленке $\tau_{ph} \gg \tau_{es}$ ($\tau_{es} = 4d/s$ – время ухода фонона из пленки толщиной d , s – скорость звука). Поэтому вся рассеиваемая мощность будет уходить из пленки.

Эксперименты проведены на двойном туннельном контакте Sn – SnO_x – Sn – SnO_x – Sn. Измерялось изменение щели $\delta\Delta$ в средней пленке Sn, возникающее при включении тока I_g через контакт-генератор, в зависимости от напряжения на генераторе V_g . Описание экспериментальной установки приведено в [9].

На рис. 1а (кривая 1) приведена экспериментальная зависимость $\delta\Delta(V_g)/10$ в средней пленке Sn для двойного контакта, на ВАХ генератора которого (кривая 2) отсутствует субгармоническая щелевая структура. Видно, что $\delta\Delta > 0$ при $0 < V_g < 2\Delta/e$, что соответствует увеличению щели в этом интервале напряжений, обусловленному повышением средней энергии квазичастиц. Рост $\delta\Delta$ с увеличением напряжения связан с увеличением скорости квазичастичной инжекции, а резкий спад при $V_g \lesssim 2\Delta/e$ – с увеличением концентрации квазичастиц вследствие преобладания при $V_g \gtrsim 2\Delta/e$ процессов туннелирования с разрывом пар.

На рис. 1б приведены результаты измерений $\delta\Delta(V_g)$ (кривая 1) на другом двойном контакте, ВАХ генератора которого (кривая 2) имеет субгармоническую особенность при $eV_g = 2\Delta/2$. Кривая 3 – та же ВАХ, но в увеличенном в 10 раз масштабе по току. Видно, что величина $\delta\Delta > 0$ и увеличивается с ростом V_g на начальном участке.

В области субгармонической особенности наблюдается спад $\delta\Delta$ и далее переход в отрицательную область, что соответствует переходу от стимуляции к подавлению щели. На туннельных контактах, ВАХ которых не имеют субгармонической структуры, стимуляция щели наблюдается во всем интервале $0 < V_g < 2\Delta/e$ (рис. 1а). Следовательно, механизм, приводящий в данном случае к появлению субгармонической структуры, одновременно приводит и к повышению концентрации квазичастиц, поскольку щель уменьшается. Таким образом, можно сделать вывод, что многократное андреевское отражение в данном случае не дает определяющего вклада в формирование субгармонической структуры на ВАХ туннельных контактов.

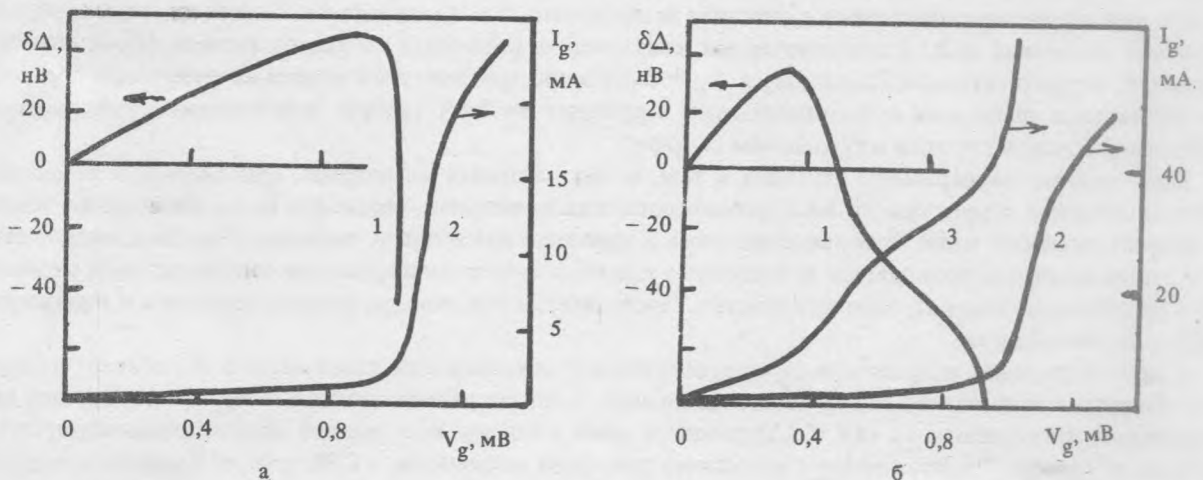


Рис. 1. Изменение сверхпроводящей щели в средней пленке Sn в зависимости от напряжения на контакте-генераторе (кривая 1) для случаев: а) ВАХ контакта-генератора (кривая 2) не имеет субгармонической щелевой структуры; б) на ВАХ контакта-генератора (кривые 2 и 3) имеется субгармоническая особенность при $eV = 2\Delta/2$.

Дополнительную информацию для выбора между моделями многочастичного туннелирования и самодетектирования можно извлечь из анализа соотношения амплитуд скачков тока $\Delta I(2\Delta/m)/\Delta I(2\Delta)$ ($m = 2, 3, \dots$). Для многочастичного туннелирования [11] максимальная величина $\Delta I(\Delta)/\Delta I(2\Delta)$ (при $D \rightarrow \infty$, где D — прозрачность туннельного барьера) равна 0,031. В настоящей работе это соотношение равно 0,025, что хорошо согласуется с теоретической оценкой.

Таким образом, в джозефсоновских туннельных переходах механизмом, ответственным за появление субгармонических особенностей, является многочастичное туннелирование. В то же время, в структурах с концентрацией тока (мостики, точечные контакты) таким механизмом, по всей видимости, является многократное андреевское отражение квазичастиц в нормальной области контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дивин Ю. Я., Надь Ф. Я. Письма в ЖЭТФ, 29, 567 (1979).
2. Янсон И. К. ФНТ, 1, 141 (1975).
3. Octavio M., Sa-Neto A., Callarotti R. C. Physica, 108B + C, 973 (1981).
4. Schrieffer J. R., Wilkins J. W. Phys. Rev. Lett., 10, 17 (1963).
5. Werthamer N. R. Phys. Rev., 147, 255 (1966).
6. Octavio M. et al. Phys. Rev., B27, 6739 (1983).
7. Песковецкий С. А., Семиноженко В. П. ФНТ, 2, 943 (1976).
8. Элиашберг Г. М. Письма в ЖЭТФ, 11, 186 (1970).
9. Мицен К. В. Труды ФИАН, 174, 124 (1986).
10. Мицен К. В. и др. В кн. 21-е Всесоюзное совещание по физике низких температур ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1980, с. 173.
11. Hasselberg L. E., Levinsen M. T., Sumuelsen M. R. Phys. Rev., B9, 3757 (1974).

Поступила в редакцию 2 февраля 1987 г.