Глава 10

Транспорт в S-N-S и S-I-S структурах 3. Измерение энергетической щели в сверхпроводниках

План

- 1. Измерение энергетической щели в спектре возбуждений в сверхпроводниках
 - \diamond Микроконтактная спектроскопия (PCAR)
 - \diamondsuit Андреевская спектроскопия микроконтакта на микротрещине (BJ)
 - ♦ Результаты экспериментов техникой ВЈ по измерению энергетической щели в сверхпроводниках

♦ Туннельная спектроскопия в джозефсоновских S-N-S контактах

 \diamondsuit Сравнение двух режимов мироконтактной спектроскопии сверхпроводников: МАR S-N-S и S-I-S (S-S_i-S)

2. Литература

Мы уже так много обсуждали сам эффект Андреевского отражения, что пора объяснить почему он столь популярен. На практике, нелинейная характеристика точечного контакта S-N-S или N-S широко используется для спектроскопии сверхпроводниковых материалов – для определения энергетических щелей в спектре возбуждений. Наиболее часто в экспериментах используются три геометрии (с различными модификациями): точечная микроконтактная спектроскопия Андреевского отражения (PCAR), точечная спектроскопия N-I-S или S-I-S в режиме сканирующей туннельной спектроскопии (STS) и спектроскопия микроконтактов S-N-S на микротрещине (breakjunction).

10.1.1 Микроконтактная спектроскопия (Point-contact Andreev reflection (PCAR))

В технике PCAR проиводятся тщательные измерения I - V характристик точечного контакта и кондактанса G = dI/dV в диапазоне напряжений от 0 до нескольких Δ/e . Важно знать и контролировать транспортный режим, в котором проводятся измерения.

Измерения обычно проводят в баллистическом (Шарвинском) режиме [1], когда длина пробега l больше характерных размеров контакта d, что облегчает интерпретацию результатов, поскольку число квантовых баллистических каналов и их коэффициенты прохождения T_i являются хорошо определенными.

Измерения PCAR в режиме SNS необходимо проводить при



Рис. 10.1: Изменение вида dI/dV при уменьшении сопротивления контакта при AR спектроскопии на интерфейсе S-N-S (с техникой STS). After: Chen et al., **453**, 1224 (2008)

низких температурах, для того, чтобы острие находилось в сверхпроводящем состоянии. Это является одним из ограничений данной техники, поскольку затрудняет измерение температурной зависимости спектров SNS и энергетических щелей. Измерения проводятся в 4-х контактной геометрии в криостате с жидким ⁴He или ³He. Дифференциальная проводимость контакта dI/dV получается стандартным способом модуляции напряжения V и синхронного детектирования. При детекти-



Рис. 10.2: Схема эксперимента для точечной микроконтактной спектроскопии

ровании сигнала на второй гармонике регистрируется вторая производная d^2I/dV^2 ; производные более высокого порядка, как правило, не регистрируют.

Для точного управления контактом используется либо механический привод с микрометрической регулировкой положения иглы, либо более тонкий пьезо-котролируемый механизм привода. При механической регулировке привод, идущий с капки криостата, связан с дифференциальным винтом, который обеспечивает перемещение иглы примерно на 10μ м на один оборот. После установки желаемой проводимости контакта, привод отсоединяется от платформы с образцом, для того, чтобы изменения температуры и вибрации как можно меньше влияли на контакт (см. рисунок 10.3).

Такое устройство позволяет измерять не только проводи-



Рис. 10.3: Схематическое устройство вставки в криостат с механическим приводом иглы

мость контакта в диапазоне температур, но также независимо определять длину свободного пробега l и размер контакта d следующим способом:

$$d = \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial R_c}$$
 размер контакта
 $R_c \approx \frac{4}{3\pi} \frac{\rho l}{d^2} + \frac{\rho}{2}$ сопротивление контакта (10.1)

Например, для спектроскопии эпитаксиальных пленок MnAs, использовалась игла из Sn с типичным контактным сопротивлением $R_c \sim 10$ OM, линейный режим соответствует диапазону температур примерно 200-245 K, с $dR_c/dT = 0.22$ OM/K и $d\rho/dT = 0.35 \times 10^{-6}$ OM см/K, откуда получаем d = 15 нм и l = 330 нм. Эти оценки показывают что $l \gg d$, подтверждая что измерения проводятся в баллистическом режиме и, соответственно, что для анализа могут быть использованы баллистические формулы. В качестве материала для иглы могут



Рис. 10.4: Температурные зависимости контакта Sn-MnAs



Рис. 10.5: Процесс изготовления Nb иглы электрохимическим травлением

быть использованы различные сверхпроводниковые материалы, такие как Sn, Pb, Nb и т.п. Для приготовления острия тонкую проволоку исходного материала полируют до нулевой толщины химически или электролитически (см. рисунок 10.5). Изображение острия иглы в сканирующем электронном микроскопе приведено на рисунке 10.6.

Для того, чтобы исследуемая поверхность не содержала загрязнений и окислов, необходимо перед измерением изготовить скол образца непосредственно в криогенных условиях.



Рис. 10.6: Изображение изготовленной Nb иглы в сканирующем электронном микроскопе

Устройство для измерений, поэтому должно быть дополнено камерой приготовления скола, что, конечно, усложняет данную технику.

10.1.2 Андреевская спектроскопия микроконтакта на микротрещине (break-junction, BJ)

В технике "break-junction" образцы монтируются на проводящую подложку (например, из фольгированного гетинакса) см. рисунок 10.7. Опишем технику монтажа образцов, применяемую в лаборатории Я.Г. Пономарева (МГУ) и в нашей лаборатории. Фольга подложки разрезана на четыре прямоугольника, служащих электрическими контактными площадками. Глубокий поперечный разрез в фольге подложки служит концентратором механических напряжений. В углах к контактным площадкам припаяны проводники: два токовых и два потенциальных. Образец монтируется по четырёхконтактной схеме посередине подложки. При исследовании слоистых кристаллов, для того, чтобы получить туннельный ток 8Глава 10. Транспорт в S-N-S и S-I-S структурах 3. Измерение энергетической щели в си

в направлении **c**, образец устанавливается так, чтобы ось **c** была перпендикулярна плоскости подложки, а **ab**-плоскость была ей параллельна. В таком положении образец закрепляется массивными каплями жидкого при комнатной температуре сплава In-Ga эвтектического состава. Этот сплав предохраняет образец от преждевременной поломки при неизбежных деформациях подложки в процессе монтажа и при охлаждении вставки.



Рис. 10.7: Схема платформы крепления образца в устройстве для получения контакта на микротрещине

Подложка предварительно прикрепляется к П-образной пружине из бериллиевой бронзы толщиной 0.2 мм. При нажиме на пружину с обратной стороны концом микрометрического винта подложка прогибается вдоль концентратора напряжений и образец ломается именно над концентратором. В слоистых кристаллах при изгибной деформации столика микротрещина образует террасы вдоль ab-плоскостей, и образец расслаивается, раскрываясь как книга. В поликристаллических образцах скол проходит чаще по границам зёрен, либо ломаются

10.1. Измерение энергетической щели в спектре возбуждений в сверхпроводниках9

отдельные кристаллиты. Поэтому, с помощью техники "breakjunction" можно получать точечные (одиночные или стопочные) контакты типа "зерно-зерно". Площадь таких контактов может варьироваться в пределах 1 - 0.01 мкм².

Генерация трещины и последующая регулировка площади контакта производится при температуре жидкого гелия. Т.о. измерительная ячейка в технике "break-junction" совмещает камеру подготовки образца и измерительную камеру. Благодаря приготовлению трещины при криогенных условиях, измерения проводятся на чистом сколе, без загрязнений и окислов на поверхности.



Скол в поликристаллических образцах MgB₂

Рис. 10.8: Схема криогенного скола в слоистых и поликристаллических образцах

В результате скола получаются контакты Шарвинского [1] типа сверхпроводник -барьер -сверхпроводник. Барьером служит слой изолятора с различной прозрачностью. При значительной толщине барьер является изолятором и получается SIS-контакт, а если слой изолятора между двумя сверхпроводящими берегами имеет толщину, меньшую, чем длина свободного пробега, то на BAX такого контакта также возникает субгармоническая щелевая структура, как и в классических S-N-S контактах.

10.1.3 Результаты экспериментов техникой ВЈ по измерению энергетической щели в сверхпроводниках

На рисунках 10.9 и 10.10 приведены типичные результаты измерений вольт-амперных характеристик с контактом S-N-S, созданным методом "break-junction", для высокотемпературных сверхпроводников GdFeAsO(F) и MgB₂.



Рис. 10.9: Вольт-амперная характристика и ее первая и вторая производные для S-N-S контакта на микротрещине в GdFeAsO(F) в режиме андреевского отражения. Т.Е. Шаныгина и др. , Письма в ЖЭТФ, 83(2), 2011

На I - V характеристике S-N-S-микроконтакта виден избыточный ток в узкой окрестности вблизи нулевого смещения.



Рис. 10.10: Вольт-амперная характеристика и ее производная для S-N-S контакта на микротрещине в MgB₂ в режиме AR. Цифрами подписаны номера рефлексов от щели σ (синего цвета) и щели π (чёрного цвета). Т.Е. Шаныгина, дипломная работа, 2010

Это признак режима Андреевского отражения. Вторая важная особенность - субгармоническая структура [2], с серией узких провалов dI(V)/dV при напряжениях смещения

$$V_n = \frac{2\Delta}{en},$$
 где $n = 1, 2...$ (10.2)

Она связана с режимом многократного Андреевского отражения. Более того, поскольку исследуемый сверхпроводник является двухзонным с двумя щелями Δ_L и Δ_S , то наблюдаются серии особенностей, связанных как с малой, так и с большой щелью.

Как же разобраться в такой каше многих пиков?

Это действительно является проблемой интерпретации результатов любых резонансных измерений, будь то циклотронный резонанс или многократное андреевское отражение. Разобраться в такой сложной картине непросто, но можно. Рисунок 10.2 поясняет что положение узких провалов на шкале напряжений можно положить на простую зависимость. Если такая систематизация возможна, то значит интерпретация результатов правильная.



Рис. 10.11: Сводка положений провалов на dI(V)/dV для двухзонного сверпроводника GdFeAsO(F). Цитировано из Т.Е. Шаныгина и др., Письма в ЖЭТФ **83**(2) (2010).

Q: Почему в зазоре микротрещины или точечного S-

N-S контакта оказался нормальный материал N?

A: В эксперименте, для того, чтобы получить режим AR зазор устанавливается не слишком малым (чтобы не было сверхтока – туннелирования пар), но и не слишком большим, чтобы в баллистическом режиме электроны пролетали область контакта баллистически; в таком случае им просто безразлично что находится на пути пролета - вакуум или металл. Именно для регулировки зазора требуется прецизионный привод, как в технике BR, так и PCAR.

10.1.4 Туннельная спектроскопия в джозефсоновских контактах

До сих пор мы рассматривали только микроконтакт S-N или S-N-S баллистического типа с проводимостью за счет процесса AR. Андреевское отражение, конечно, не является единственной возможностью прохождения тока через границу между двумя сверхпроводниками, как обсуждалось в разделе ??.

Известно, что в контактах сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник при малом зазоре могут туннелировать куперовские пары. Такие контакты эквиваленты системе S-S_i-S (где S_i – т.н. слабый сверхпроводник) и в них реализуется эффект Джозефсона. Вольт-амперная характеристика такого контакта при V = 0 имеет вертикальный участок, соответствующий сверхтоку куперовских пар, а на её производной появляются туннельные особенности – пики дифференциальной проводимости при напряжении

$$V = \pm \frac{2\Delta}{e}.\tag{10.3}$$

В отличие от Андреевского отражения, в случае Джозефсо-

новского туннелирования субгармоническая структура не возникает, а условию 10.3 на зависимости dI(V)/dV соответствуют максимумы, а не минимумы производной. При $T \ll T_c$ энергия сверхпроводящей щели может быть определена из положений максимумов dI(V)/dV по формуле 10.3.



Рис. 10.12: Вольт-амперная характеристика туннельного Джозефсоновского контакта в MgB₂ при различных значениях приложенного магнитного поля. Цитировано из Т.Е. Шаныгина, дипломная работа (2010).

Амплитуда сверхтока, т.е. высота вертикальной ступени тока I(V = 0), как известно [3], зависит от приложенного магнитного поля аналогично фраунгоферовской дифракции:

$$I_c = I_c(0) \left| \frac{\sin(\pi \Phi/\Phi_0)}{(\pi \Phi/\Phi_0)} \right|,$$
 (10.4)

где $I_c(0)$ – амплитуда сверхтока в нулевом магнитном поле, Φ - магнитный поток, а Φ_0 - квант потока.

10.1. Измерение энергетической щели в спектре возбуждений в сверхпроводниках15



Рис. 10.13: dI(V)/dV-характеристики одиночного (4) и стопочных (1-3) туннельных контактов, нормированные по напряжению на один контакт. Отмечены особенности, соответствующие $\Delta_{\sigma} = 8 \text{ мэВ}$ и $\Delta_{\pi} = 1.7 \text{ мэВ}$. Цитировано из: Т.Е. Шаныгина, дипломная работа (2010).

На рисунке 10.12 представлены четыре ВАХ туннельного контакта, измеренные при значениях магнитного поля H = 0, 1, 141 и 192 Гаусс. При нулевом напряжении на ВАХ виден вертикальный участок, соответствующий сверхтоку. При увеличении поля амплитуда сверхтока уменьшается, и далее осциллирует в согласии с формулой 10.4, что подтверждает Джозефсоновский тип транспорта в микроконтакте.

В данном случае измерения проводились на двухщелевом

сверхпроводнике MgB₂, поэтому на ВАХ присутствуют особенности от каждой из щелей, расположенные при напряжениях смещения $\pm \Delta_{\sigma}/e$ и $\pm \Delta_{\pi}/e$. Эти особенности более заметны на производной dI(V)/dV от дифференциальной проводимости (рис. 10.13). На рисунке показаны нормированные производные dI(V)/dV четырех джозефсоновских контактов, на которых хорошо видны особенности от Δ_{σ} и Δ_{π} при смещениях V = 16 мВ и V = 3.4 мВ. Согласно (10.3) максимумам dI/dVсоответствуют энергии щелей $\Delta_{\sigma} = 8$ мэВ и $\Delta_{\pi} = 1.7$ мэВ.

10.1.5 Сравнение двух режимов мироконтактной спектроскопии сверхпроводников: MAR S-N-S и S-I-S (S-S_i-S)

Каждый из двух режимов спектроскопии имеет свои достоинства и недостатки. Достоинства режима многократного андреевского отражения в симметричных структурах S-N-S состоят в симметрии измеряемой *I* – *V* характеристики и субгармонической структуре ее особенностей, что повышает точность измерений и облегчает интерпретацию данных. Однако, это достоинство может обернуться и недостатком в случае многозонных сверхпроводников и низкого качества образцовполикристаллов, в которых гармонические особенности от различных щелей могут накладываться друг на друга. Важным достоинством самой техники "break-junction" является возможность регулирования зазора, что позволяет в ходе одного и того же эксперимента проводить измерения как в режиме MAR так и Джозефсоновского туннелирования. Сопоставление данных, получаемых в разных режимах, облегчает интерпретацию наблюдаемых особенностей и повышает надежность данных. Пример сопоставления I - V характеристик для MgB₂



Рис. 10.14: Сравнение I(V)- и dI(V)/dV-характеристик, получаемых на микроконтактах в режиме S-I-S и S-N-S в MgB₂. Цитировано из Т.Е. Шаныгина, дипломная работа (2010).

в режиме MAR S-N-S и S-I-S приведен на рисунке 10.14. Как видно из рисунка, значения щели, измеренные в двух разных режимах транспорта, неплохо согласуются друг с другом. 18Глава 10. Транспорт в S-N-S и S-I-S структурах 3. Измерение энергетической щели в с

Литература

- [1] Ю.В. Шарвин, ЖЭТФ 48, 984 (1965).
- [2] R. Kümmel, U. Gunsenheimer, R. Nicolsky, Phys. Rev. B 42, 3992 (1990).
- [3] А. Бароне, Дж. Патерно, М. "Мир стр. 27-31 (1984)
- [4] С.А. Кузьмичев, Т.Е. Кузьмичева, Техника «breakjunction» применительно к слоистым сверхпроводникам (Обзор), Low Temperature Physics/Физика низких температур, т.42(11), с. 1284–1310 (2016).
- [5] Т.Е. Кузьмичева, А.В. Муратов, С.А. Кузьмичев, А.В. Садаков, Ю.А. Алещенко, В.А. Власенко, В.П. Мартовиц-кий, К.С. Перваков, Ю.Ф. Ельцев, В.М. Пудалов, О структуре параметра порядка в высокотемпературных сверх-проводниках на основе железа, Успехи Физ. наук, 187, 450 (2017). https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.10.038002
 [Physics Uspekhi 60 (4) 419 (2017). DOI: https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.10.038002