

велико, чтобы его можно было объяснить как емкость остова карбонового кластера, который имеет диаметр 7 \AA . СТМ-изображение кластерной молекулы также существенно больше (около 20 \AA). Разумно предположить, что эффективный размер (в смысле электростатической энергии) больше, чем размер остова¹. Сфера диаметром $d = 20 \text{ \AA}$ имеет емкость $C \approx \epsilon \times 1,1 \times 10^{-19} \Phi$. Следовательно, экспериментальную емкость $1,2 \times 10^{-18} \Phi$ можно достаточно разумно объяснить, если принять во внимание эффективную диэлектрическую постоянную ϵ (связанную с подложкой, стеариновой кислотой и адсорбатом), а также увеличение емкости при приближении геометрии системы к плоскому конденсатору.

На рисунке 5 показаны кривые ВАХ, вычисленные с помощью "ортодоксальной" теории (кривые 1 и 2) для описания экспериментальных результатов (кривая 3). Видно, что между теорией и экспериментом имеется неплохое качественное согласие, но нет хорошего количественного. Расчеты показывают, что для получения такой четкой кулоновской лестницы температура должна быть по меньшей мере в 1,5 раза ниже, чем она была в экспериментах. Наблюдение в эксперименте почти горизонтальных ступенек можно объяснить только в предположении, что туннельный переход с существенно большим сопротивлением имеет также значительно большую емкость. Хотя такое допущение кажется не совсем естественным, оно обычно привлекается для объяснения почти плоских ступенек в одноэлектронных экспериментах с использованием СТМ.

Горизонтальные ступеньки можно хорошо описать, если предположить существование дискретного энергетического спектра центрального электрода транзистора [18], что вполне естественно для молекулярной системы. Однако в настоящее время необходимая информация об энергетическом спектре нашей системы отсутствует.

Емкость затвора C_g , вычисленная из периода контрольной кривой (кривая 1 на рис. 5), составляет около $2 \times 10^{-19} \Phi$. Отношение $C_g/C \approx 0,15$ оказывается неожиданно большим, несмотря на то, что расстояние между кластером и электродом затвора ($\approx 60 \text{ нм}$) много больше, чем типичное расстояние между иглой СТМ и кластерной молекулой. Возможное объяснение этого обстоятельства может быть основано на том, что графитовая подложка — далеко не идеальный проводник, и это существенно уменьшает экранирование напряжения на затворе электродами смещения. Теоретическое описание для амплитуды модуляции контрольной кривой (с использованием значения емкости, вычисленного из рис. 4) дает расхождение по температуре в 1,5 раза, аналогичное расхождению, полученному при теоретическом описании ВАХ. Однако на рис. 5 показан наибольший размах колебаний тока, и типичные контрольные кривые не выходят за пределы, объяснимые в рамках "ортодоксальной" теории.

В заключение следует отметить, что в работе получена управляемая одноэлектронная система на основе

единичной кластерной молекулы. При комнатной температуре получена четкая кулоновская лестница и наблюдается функционирование транзистора. Экспериментальные результаты находятся в хорошем качественном согласии с "ортодоксальной" теорией одноэлектронного транзистора, однако, имеются некоторые количественные расхождения. Очевидно, необходимо дальнейшее изучение этого объекта.

Работа выполнена при частичной поддержке Российской программы перспективных технологий вnanoэлектронике (грант № 233/78/1-3), Российской программы по физике наноструктур (грант № 96-1031) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-03-33766а, 97-03-32199а).

Список литературы

1. Averin D V, Likharev K K, in *Mesoscopic Phenomena in Solids* (Eds B L Altshuler, P A Lee, R A Webb) (Amsterdam: Elsevier, 1991) p. 173
2. Korotkov A N, in *Molecular Electronics* (Eds J Jortner, M A Ratner) (Oxford: Blackwell) (to be published)
3. Yano K et al. *IEEE Trans. on Electron. Dev.* **41** 1628 (1994)
4. Takahashi Y et al. *Electron. Lett.* **31** (2) 136 (1995)
5. Chen W, Ahmed H J. *Vac. Sci. Technol. B* **13** 2883 (1995)
6. Matsumoto K et al. *Appl. Phys. Lett.* **68** 34 (1996)
7. Schönenberger C, van Houten H, Donkersloot H C *Europhys. Lett.* **20** 249 (1992)
8. Dorogi M et al. *Phys. Rev. B* **52** 9071 (1995)
9. Nejoh H *Nature* (London) **353** 640 (1991)
10. Fischer C M et al. *Europhys. Lett.* **28** 129 (1994)
11. Зубилов А А и др. *Письма в ЖЭТФ* **20** (5) 41 (1994) [*Tech. Phys. Lett.* **20** 195 (1994)]
12. Dubois J G A et al. "Coulomb staircase and quantum size effects in tunneling spectroscopy on ligand stabilized metal clusters", preprint (Изд-во МГУ, 1995)
13. Солдатов Е С и др. *Письма в ЖЭТФ* **64** 510 (1996) [*JETP Lett.* **64** 556 (1996)]
14. Iakovenko S A et al. *Thin Solid Films* **284–285** 873 (1996)
15. Губин С П и др. *Неорганические материалы* **32** (10) 1265 (1996) [*Inorg. Mat.* **32** 1111 (1996)]
16. Яковенко С Д и др. *Неорганические материалы* **32** (10) 1272 (1996) [*Inorg. Mat.* **32** 1118 (1996)]
17. Gaines G L *Insoluble monolayers at liquid-gas interfaces* (New York: Interscience Publ., 1966)
18. Аверин А Д, Коротков А Н *ЖЭТФ* **94** 1661 (1990) [*Sov. Phys. JETP* **70** 937 (1990)]

Зондирование динамических зарядовых состояний с помощью одноэлектронных туннельных транзисторов

В.А. Крупенин, С.В. Лотхов, Х. Шерер,
Т. Вайманн, А.Б. Зорин, Ф.-Й. Алерс,
Й. Нимайер, Х. Вольф

1. Введение

В настоящей работе в основном рассматриваются свойства одноэлектронного туннельного транзистора (ОЭТ), используемого в качестве электрометра в сложных ОЭТ-структурах.

ОЭТ-транзистор представляет собой систему из двух сверхмалых туннельных переходов, присоединенных к малому проводящему острову, и снабженную управляющим электродом, который связан с этим островом емкостной связью. При достаточно малой энергии теп-

¹ Следует отметить, что в нашем более раннем исследовании подобных систем [11] (без электрода затвора) не наблюдалась отчетливая кулоновская лестница, однако наблюдалась значительно большая кулоновская блокада ($\sim 500 \text{ мВ}$). Не исключено, что дополнительная технологическая операция изменила химическое окружение кластерных молекул.

ловых и квантовых флуктуаций ($E_c \gg k_B T$, $R_{1,2} \gg R_q$) становится возможным наблюдение некоторых специфических характеристик этого транзистора;

- 1) область кулоновской блокады на кривой ВАХ с исчезающе малым постоянным током;
- 2) периодические вариации ВАХ при изменении напряжения на затворе.

Одним из наиболее важных свойств ОЭТ-транзистора является высокая чувствительность его ВАХ к заряду на центральном острове. Теоретические оценки дают значение этой зарядовой чувствительности около $1 \times 10^{-5} e/\sqrt{\text{Гц}}$. Оказывается, что экспериментальные значения шума при частоте 10 Гц примерно на порядок выше, и при уменьшении частоты они возрастают как $1/f$. Тем не менее, это наилучшие значения, доступные для электрометров в настоящее время. ОЭТ-транзистор успешно использовался в качестве высокочувствительного считывающего электрометра в недавних экспериментах с ОЭТ-устройствами: ячейкой (box) [2], насосом [3] и ловушкой [4].

В качестве измерительного устройства ОЭТ-транзистор все же не свободен от погрешностей функционирования, например таких, как обратное влияние на исследуемую систему. То обстоятельство, что туннельный ток в транзисторе реализуется посредством случайного процесса отдельных событий туннелирования, приводит к флуктуациям числа избыточных электронов на острове транзистора. В результате электрический потенциал острова флуктуирует с амплитудой порядка e/C_Σ , где C_Σ — полная емкость острова. Таким образом, исследуемый остров другого расположенного вблизи ОЭТ-устройства испытывает флуктуации напряжения, которые в свою очередь влияют на туннелирование на этот остров и из него. Чем сильнее связь между двумя центральными островами, тем выше чувствительность электрометра. С другой стороны, чем сильнее связь, тем сильнее обратное влияние. Итак, имеется противоречие: чтобы добиться более высокой чувствительности, следует поместить электрометр как можно ближе к объекту исследования, однако, чем ближе электрометр к объекту, тем сильнее его обратное влияние. Кроме того, как можно видеть на примере системы с ОЭТ-ловушкой, эти два механизма обратного воздействия не являются единственными.

2. Характеристики образца

Исследуемая структура состояла из трех стандартных транзисторов с туннельными переходами на основе Al. Она была изготовлена при помощи обычной техники теневого напыления на термически оксидированной кремниевой подложке. В данной конструкции все три последовательно формируемых транзистора образовывались без паразитных теней их островов (рис. 1). В результате были получены транзисторы с заметно отличающимися площадями перехода и, следовательно, туннельными емкостями. Например, для транзистора наименьшего размера *a* площадь перехода составляла около $50 \times 60 \text{ нм}^2$, а для наибольшего транзистора — $60 \times 400 \text{ нм}^2$. В результате ОЭТ-поведение последнего было значительно подавлено, поскольку энергия заряжения e^2/C_Σ его центрального острова была примерно на порядок меньше, чем для транзистора *a*.

Работа проводилась с двумя почти аналогичными образцами. В образце 1 полные емкости острова для

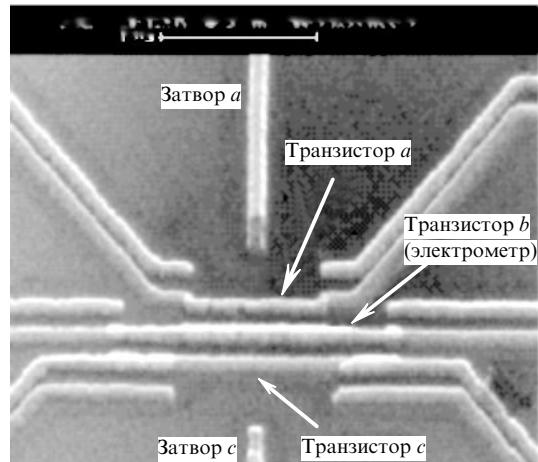


Рис. 1. Изображение трехтранзисторной системы, полученное в сканирующем электронном микроскопе.

транзисторов *a* и *b* были малы ($C_\Sigma^a \approx 260 \text{ аФ}$, $R_\Sigma^a \approx 2,6 \text{ МОм}$ и $C_\Sigma^b \approx 360 \text{ аФ}$, $R_\Sigma^b \approx 2,3 \text{ МОм}$ с $C_\Sigma^{ab} \approx 36 \text{ аФ}$), а транзистор *c* был обломан (установлен). Этот образец использовался в эксперименте, в котором среднее число избыточных электронов $\langle n \rangle$ на острове транзистора *a* контролировалось электрометром (транзистором *b*). Электрические параметры образца 2, который не содержал дефектов и использовался для детектирования ОЭТ-флуктуаций, составляли: $C_\Sigma^a \approx 320 \text{ аФ}$, $R_\Sigma^a \approx 2,0 \text{ МОм}$, $C_\Sigma^b \approx 600 \text{ аФ}$, $R_\Sigma^b \approx 1,2 \text{ МОм}$ и $C_\Sigma^c \approx 2300 \text{ аФ}$, $R_\Sigma^c \approx 0,28 \text{ МОм}$ с $C_\Sigma^{ab} \approx 32 \text{ аФ}$ и $C_\Sigma^{bc} \approx 50 \text{ аФ}$.

3. Эксперименты

В первом эксперименте с образцом 1 через транзистор *a* пропускался слабый ток смещения (до 50 пА), а транзистор *b* использовался как электрометр с малым током смещения (1 пА) для измерения зарядовых состояний на острове транзистора *a*. Два затвора использовались для того, чтобы электрометр регистрировал только добавочный заряд острова. Для этой цели на затвор *c* подавалось компенсирующее напряжение. Сначала проводилась проверка системы в режиме электронной ячейки (e-box) (когда через транзистор *a* не течет ток). Как и в работе Лафаржа с соавт. [8], наблюдалось размытие лестничной зависимости $\langle n \rangle$ от напряжения на затворе (заряда смещения), которое превышало тепловое размытие, соответствующее температуре ванны 43 мК (рис. 2). Это значительное размытие можно объяснить недостаточной защитой держателя образца от проникновения слабых СВЧ-сигналов. Этот эффект был менее выраженным, когда неравновесные зарядовые состояния в ячейке создавались с помощью конечного транспортного тока. Следующие кривые на рис. 2 демонстрируют влияние слабого тока на ступенчатую зависимость $\langle n \rangle$ от заряда смещения. В этом случае электрометр воспринимает некоторый "средний" заряд, индуцированный на острове ячейки, который определяется статистически усредненным зарядом на острове транзистора, т.е. средним числом избыточных электронов. Постепенное размытие ступенек количественно аналогично влиянию повышения температуры. Результаты численного моделирования, которые хорошо согласуются с экспери-

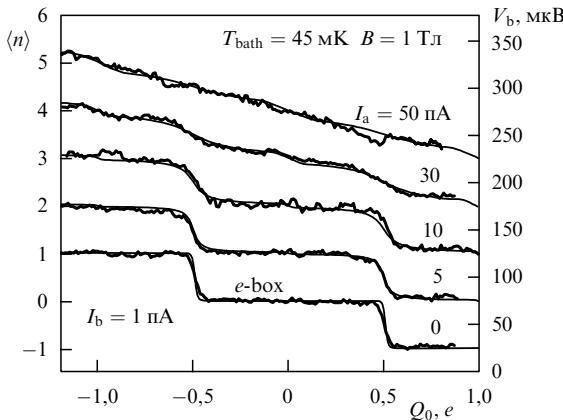


Рис. 2. Среднее значение избыточных электронов на островке транзистора *a* для различных токов смещения.

ментальными кривыми, показаны тонкими сплошными линиями. Когда в транзисторе *a* устанавливается достаточно большой ток (> 50 пА), зарядовые состояния острова оказываются в значительной степени смешанными (два и более состояний вовлечены в динамику). Ступенчатая зависимость размывается, и $\langle n \rangle$ изменяется почти линейно в зависимости от напряжения затвора. В таком случае заполнение дискретных зарядовых состояний островов обоих транзисторов описывается плотностями вероятности $\sigma(n)$, которые зависят от тока смещения и от температуры. Чем больше ток смещения, тем шире распределение $\sigma(n)$ и сильнее флуктуации потенциала острова. Таким образом, электрометр может выступать для исследуемого устройства в качестве детектора дробового шума. В настоящей работе выполнено моделирование динамики транзистора и, в частности, рассчитано распределение по состояниям $\sigma(n)$ для двух значений тока смещения (рис. 3).

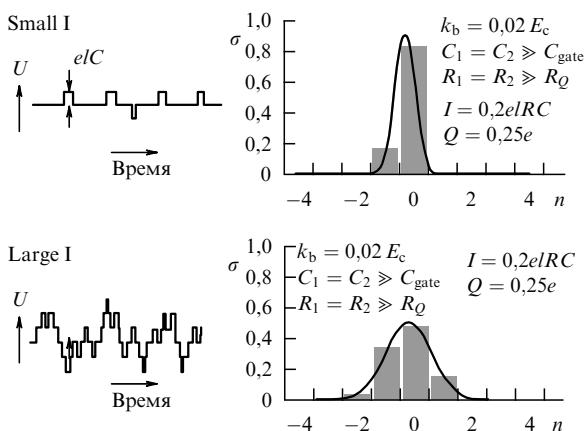


Рис. 3. Распределение состояний $\sigma(n)$ для малых и больших токов смещения.

Следующий эксперимент выполнялся с образцом 2. Когда на боковые транзисторы подавался довольно сильный ток, было обнаружено, что амплитуда модуляции для транзистора *b* подавляется при увеличении тока в каждом из боковых транзисторов. На рисунках 4 и 5 представлены соответствующие экспериментальные

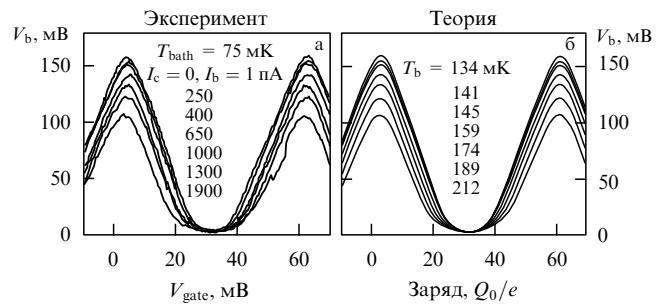


Рис. 4. Модуляционные кривые электрометра (а — экспериментальная, б — теоретическая) при различных токах в транзисторе *c*. Электронная температура островка электрометра использовалась как подгоночный параметр при расчете теоретической кривой.

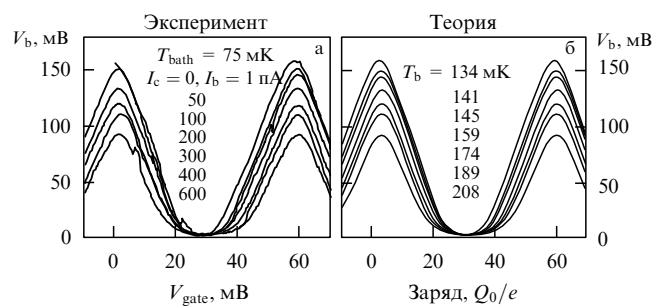


Рис. 5. Модуляционные кривые электрометра при различных токах в транзисторе *a*.

данные, а также результаты расчетов. Из этих графиков видно, что уменьшение амплитуды модуляции больше в случае пары транзисторов *a*—*b*. Для объяснения этого эффекта была построена модель [1], в которой боковые транзисторы рассматривались как генераторы тепла или шума для среднего транзистора (электрометра). То, что туннельные переходы транзистора *c* имеют большие площади, позволяет считать флуктуации напряжения на его центральном острове пренебрежимо малыми по сравнению с флуктуациями на острове транзистора *a*. По этой причине амплитуды сильнее подавляются током в транзисторе *a*, чем током в транзисторе *c* (при одинаковой рассеиваемой мощности в них). Результаты расчетов в рамках предложенной модели хорошо соглашаются с экспериментальными данными.

Эффект обратного влияния считающего электрометра наблюдался также в эксперименте по исследованию хранения заряда в ОЭТ-ловушке [4]. ОЭТ-ловушка состоит из цепочки туннельных контактов, присоединенной к проводящему острову (острову памяти), управляемому внешним электродом через емкостную связь. Большая энергия заряжения электрона в цепочке приводит к образованию потенциального барьера. Этот барьер препятствует уходу небольшого числа избыточных электронов, ранее "накачанных" на остров памяти, почему данное явление и получило название "эффекта памяти". Из-за наличия барьера зависимость захваченного заряда от напряжения на затворе обычно имеет гистерезисный характер. Ширина петли гистерезиса характеризует способность данной ловушки к сохранению заряда.

Наблюдалась также зависимость ширины петли от тока смещения считающего электрометра: при возра-

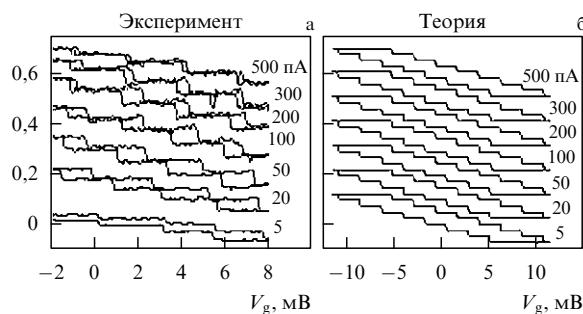


Рис. 6. Зависимость ширины петли гистерезиса в одноэлектронной ловушке от тока смещения в считающем электрометре.

стании тока петля сужается (рис. 6а). Наши расчеты показали, что в случае ОЭТ-ловушки теоретический подход, развитый для тройного ОЭТ-транзистора, не работает. Этот подход не позволяет получить уменьшение ширины петли гистерезиса (рис. 6б). В это явление дает вклад также локальный перегрев, который, однако, не является достаточно интенсивным, чтобы полностью объяснить его. В настоящее время проверяется применимость к данному случаю некоторых других моделей.

4. Заключение

Изучалось обратное воздействие ОЭТ-транзистора на измеряемые устройства: другой транзистор в системе из трех транзисторов и ОЭТ-ловушку. Будучи точным измерительным прибором, такой транзистор, однако, влияет на характеристики исследуемых устройств. Рассмотрены два физических механизма, которые дают вклад в это обратное влияние: локальный перегрев, обусловленный эффектом Джоуля, и электрический шум, вызываемый туннельными событиями в электрометре. Результаты расчетов в рамках предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными в тройной системе транзисторов:

1) В системе из трех транзисторов средний транзистор использовался для наблюдения смешивания зарядовых состояний в одном из боковых транзисторов при возрастании соответствующего тока смещения (менее 50 пА);

2) Как результат действия более сильных токов (более 50 пА), подаваемых на боковые транзисторы, амплитуда модуляции расположенного в середине электрометра подавлялась.

В ОЭТ-ловушке увеличение тока смещения считающего электрометра сопровождалось уменьшением гистерезиса заряда. Однако в отличие от системы из трех транзисторов, в данном случае этот эффект не описывается в рамках того же самого подхода: флуктуационная модель не дает сколь-нибудь заметных изменений гистерезиса заряда, и хотя локальный перегрев, по-видимому, способствует этим изменениям, он не является достаточно интенсивным, чтобы быть единственной причиной наблюдаемого эффекта. Поэтому в настоящее время проводятся исследования с целью поиска более подходящего механизма.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке ЕС (MEL ARI Research Project — CHARGE), Федерального министерства образования и исследований ФРГ (BMBF) и Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Krupenin V A et al. Submitted to *Phys. Rev. B* (1997)
2. Lafarge P et al. *Z. Phys. B* **85** 327 (1991)
3. Keller M W et al. *Appl. Phys. Lett.* **69** 1804 (1996)
4. Krupenin V A et al. "Proceedings of the 21st International Conference on Low Temperature Physics" *Czech. J. Phys.* **46-S4** 2283 (1996)
5. Averin D V, Likharev K K, in *Mesoscopic Phenomena in Solids* (Eds B L Altshuler, P A Lee, R A Webb) (Amsterdam: Elsevier, 1991) p. 176
6. Kautz R L, Zimmerli G, Martinis J M *J. Appl. Phys.* **73** 2386 (1993)
7. Roukes M L et al. *Phys. Rev. Lett.* **55** 422 (1985)
8. Lafarge P et al. *Z. Phys. B* **85** 327 (1991)

Локализация квазичастиц в NS-структуре

А.В. Шитов, П.А. Ли, Л.С. Левитов

Рассмотрим возбуждения в тонкой пленке нормального металла на поверхности сверхпроводника. Предположим, что электроны с энергией много меньше сверхпроводящей щели Δ отражаются от поверхности раздела NS по андреевскому механизму, который реализуется на чистых и ровных NS-поверхностях. (см. рис. 1). Если андреевское отражение происходит *строго* назад [1], то орбита электрона будет замкнутой. Такой электрон будет отражаться от границы раздела металл – вакуум к границе металл – сверхпроводник и обратно, возвращаясь после каждого двух отражений точно в первоначальное положение. В такой модели все траектории оказываются локализованными. Этот простой факт можно интерпретировать как интегрируемость классических андреевских биллиардов [2].

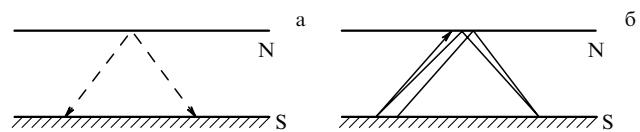


Рис. 1. (а) Идеализированная картина локализации. Квазичастица движется между поверхностями раздела, не размазываясь по всей системе. (б) При конечной энергии квазичастицы не существует идеального самовозврата в андреевском рассеянии. Это приводит к медленному дрейфу вдоль поверхности раздела.

Ниже обсуждается квантовая локализация в этой системе. В приведенное выше слишком упрощенное описание следует добавить новые детали и внести некоторые поправки. Оказывается, что в классической андреевской динамике локализация (и интегрируемость) не является универсальным поведением. Ниже обсуждаются проблемы, возникающие в квантовом случае, например, роль плавного беспорядка в сравнении с близким беспорядком. Приводится сравнение данной ситуации с ситуацией в идеально однородной металлической пленке, где локализация отсутствует. Показано, однако, что при наличии плавного беспорядка с большой корреляционной длиной может происходить локализация. Выводится критерий локализации этого типа и обсуждается устойчивость этого явления.

Эффект андреевского отражения недавно обсуждался в контексте проблемы квантового хаоса в NS-резонатор-