

## Модель неоднородного потенциального барьера в джозефсоновском переходе: взаимосвязь джозефсоновского тока и разности фаз в берегах контакта

И. В. БОЙЛО

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ

В данной работе предлагается модельное описание взаимосвязи джозефсоновского тока и разности фаз волновых функций двух сверхпроводящих электродов туннельного контакта со сверхтонкой изолирующей прослойкой. Исследовано влияние температуры на соотношение ток - разность фаз в берегах джозефсоновского перехода с неоднородным потенциальным барьером.

У даній роботі пропонується модельний опис взаємозв'язку джозефсонівського струму та різниці фаз хвильових функцій двох надпровідних електродів тунельного контакту з надтонким ізолюючим прошарком. Досліджено вплив температури на співвідношення струм - різниця фаз в берегах джозефсонівського переходу з неоднорідним потенційним бар'єром.

Modelling description of the relationship between the Josephson current and the wave - function phase difference of the two electrodes of a superconducting tunnel junction with an ultrathin insulating layer is proposed in the paper. The temperature effect on the ratio of the current - phase difference in the banks of the Josephson junction with a nonuniform potential barrier has been investigated.

**Введение.** В тех областях электроники, где требуются высокие скорости срабатывания и малые рассеиваемые мощности, начинают активно применяться более быстрые сверхпроводниковые приборы на основе туннельных переходов Джозефсона, которые по своим параметрам превосходят стандартные полупроводниковые устройства. Ожидается, что именно они обеспечат дальнейший прогресс в области электроники [1]. При этом наиболее привлекательной представляется возможность использования переходов Джозефсона в качестве элементов памяти и логических устройств в современных компьютерах. С этой целью детально исследуется основной элемент сверхпроводящей цепи - джозефсоновский переход, образованный двумя сверхпроводящими (S) электродами, разделёнными слоем диэлектрика (I), толщина которого составляет обычно 1-2 нм, а в последнее время предпринимаются попытки сделать потенциальный барьер еще более тонким.

Хорошо известно, что с уменьшением размеров микроэлектронных устройств до нанометровых существенной становится неоднородность оксидного слоя I, представляющего собой потенциальный барьер для туннелирующих электронов. Следует заметить, что прозрачность  $D$  изолирующей I прослойки может быть разной, и, как правило, при моделировании процессов туннелирования она предполагается постоянной величиной. Такое приближение, которое не учитывает разброс прозрачностей барьера, является основной причиной рассогласования между теорией и экспериментом в оценках транспортных характеристик разупорядоченных оксидных слоев, поскольку оно существенно занижает те значения параметра  $D$ , которые определяют величину квантовомеханического туннельного тока сквозь них. На практике, при использовании в качестве диэлектрика оксидных слоев толщиной порядка нанометра, величины туннельных токов существенно возрастают по сравнению с традиционными контактами, поскольку прозрачность  $D$  такого потенциального барьера не является постоянной величиной,

а меняется локально от точки к точке в граничных пределах  $D = 0$  и  $D = 1$ . Это объясняется тем, что в случае очень тонкого оксидного слоя шероховатость его рельефа на атомных масштабах становится существенной (так же, как и наличие точечных дефектов в нём). Поэтому влияние разупорядоченности изолирующего слоя, разделяющего сверхпроводящие электроды, на джозефсоновский ток в S-I-S гетеропереходах с диэлектриками такого типа требует детальных исследований. Таким образом, существует необходимость создания адекватной математической модели, способной количественно описать зависимость джозефсоновского тока  $I$  от разности фаз сверхпроводящих берегов  $\varphi$  туннельного перехода со сверхтонким слоем изолятора. Этот факт неоднократно упоминался в литературе, в частности, в работе [2], где авторы изучали связь джозефсоновского тока и разности фаз волновых функций сверхпроводящих берегов для туннельных переходов с нормальной прослойкой в случае наличия спин-орбитального рассеяния. Необходимо также отметить публикацию [3], в которой модель разупорядоченного потенциального барьера была применена к исследованию электронного туннелирования сквозь ультратонкий слой изолятора  $AlO_x$  в S-N-I-S системе. Цель настоящей работы заключается в разработке адекватной математической модели для расчета джозефсоновского тока между сверхпроводящими берегами через сверхтонкие слои изолятора в туннельной структуре S-I-S типа.

**Модель.** Рассчитаем зависимость ток - разность фаз берегов S-I-S контакта для случая дефектного диэлектрического слоя с помощью универсального распределения [4] для прозрачностей  $D$  разупорядоченного потенциального барьера. В работе [5] в рамках данного подхода нами был исследован квазичастичный ток через S-I-S структуру, и получено хорошее согласие с экспериментом путем подбора граничных значений прозрачностей потенциального барьера. Применим теперь эту модель неоднородного потенциального барьера для случая джозефсоновского тока.

Джозефсоновские гетероструктуры S-I-S типа, как правило, демонстрируют синусоидальную зависимость сверхпроводящего тока от разности квантовомеханических фаз в обкладках. Ток  $I$ , определяемый разностью фаз  $\varphi$  сверхпроводящих берегов, который протекает через единичный канал проводимости с локальной прозрачностью  $D$ , дается выражением [6]

$$I(\varphi) = \frac{e\Delta(T)}{2\hbar} \frac{D \sin \varphi}{\sqrt{1 - D \sin^2 \frac{\varphi}{2}}} \tanh \left\{ \frac{\Delta(T)}{2k_B T} \sqrt{1 - D \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right\} \quad (1)$$

где  $e$  – электрический заряд,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\Delta(T)$  – энергетическая щель в сверхпроводящих электродах,  $T$  – температура,  $k_B$  – постоянная Больцмана.

Поскольку речь идет о сверхтонких диэлектриках, математическое выражение для джозефсоновского тока через них должно учитывать структуру функции распределения прозрачностей потенциального барьера (формула Шепя-Бауэра [4])

$$\rho(D) = \frac{\hbar \bar{G}}{e^2} \frac{1}{D^{3/2} (1-D)^{1/2}}, \quad (2)$$

где  $\bar{G}$  – макроскопическая проводимость образца.

Универсальное распределение Шепя-Бауэра (2) представляет собой бимодальную функцию с двумя максимумами при  $D = 0$  и  $D = 1$ . Покажем, что область применимости данной формулы намного шире тех условий, при которых она была получена авторами [4]. Для этого перейдем от распределения  $\rho(D)$  к распределению  $\rho(Z) = \rho(D) dD(Z)/dZ$ , учтем, что прозрачность барьера  $D(Z) = 1/(1+Z^2)$  – однозначная функция эффек-

$$I(\varphi) = \frac{e\Delta(T)}{2\hbar} \int_0^1 \rho(D) \frac{D \sin \varphi}{\sqrt{1 - D \sin^2 \frac{\varphi}{2}}} \tanh \left\{ 0.88 \frac{\Delta(T)/\Delta_0}{T/T_c} \sqrt{1 - D \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right\} dD, \quad (3)$$

где мы воспользовались универсальным соотношением  $2\Delta_0 = 3.5k_B T_c$  теории сверхпроводимости,  $T_c$  – температура сверхпроводящего перехода,  $\Delta_0 \approx 1.5$  мэВ в ниобиевых сверхпроводящих обкладках, наиболее часто используемых в практических приложениях.

Усреднённый ток (3) представляет собой основную характеристику джозефсоновского контакта с ультратонким неоднородным оксидным слоем. Численный расчет был выполнен нами для ниобиевых сверхпроводящих обкладок с критической температурой сверхпроводящего перехода  $T_c = 9.2$  К. На рис. 1 представлена зависимость ток - разность фаз волновых функций берегов контакта (джозефсоновская фаза) для гетеропереходов с различной прозрачностью изолирующей прослойки  $D$ , а также для S-I-S контакта с разупорядоченным барьером, прозрачность которого варьируется от 0 до 1. Вычисления проводились при отношениях температур  $T/T_c = 0.1$ . Наши

результаты показывают достаточно высокие значения величины сверхпроводящего тока для систем с неоднородным потенциальным барьером при малых температурах. В случае непосредственных контактов с прозрачностью  $D=1$  наблюдается смещение максимума на кривой ток - джозефсоновская фаза. Тогда соотношение (2) соответствует тому случаю, когда параметр  $Z$  является равномерно распределенным от нуля до бесконечности с вероятностью  $\rho(Z) = 2\hbar \bar{G}/e^2$ , что означает равномерно распределенное произведение высоты потенциального барьера на путь, который проходит туннелирующий электрон в классически запрещенной области. В сильно разупорядоченном диэлектрике такой путь может существенно превосходить толщину диэлектрического слоя из-за упругих подбарьерных столкновений с дефектами кристаллической структуры. Таким образом, предлагаемая нами математическая модель протекания туннельного тока через джозефсоновский контакт с неоднородным потенциальным барьером основана на предположении о доминирующей роли упругих туннельных процессов без потери энергии, что справедливо именно для разупорядоченных диэлектрических слоёв толщиной порядка одного нанометра. Высота потенциального барьера для туннелирующих электронов может существенно варьироваться из-за неоднородности атомного рельефа сверхтонкого диэлектрического слоя. Следовательно, математическое применение универсальной функции распределения прозрачностей в данном случае обосновано равномерным распределением произведения высоты потенциального барьера на путь, который проходит электрон в тонком слое изолятора.

Учитывая вышеизложенное и используя формализм матриц перехода, мы получим следующее выражение для зависимости тока от разности фаз в сверхпроводящем джозефсоновском переходе с разупорядоченным сверхтонким слоем изолятора, которое является обобщением стандартной формулы (1)

результаты показывают достаточно высокие значения величины сверхпроводящего тока для систем с неоднородным потенциальным барьером при малых температурах. В случае непосредственных контактов с прозрачностью  $D=1$  наблюдается смещение максимума на кривой ток - джозефсоновская фаза.

Целью данной работы является также исследование влияния температуры на джозефсоновский ток в туннельных структурах со сверхтонкими разупорядоченными слоями изолятора. На рис. 2 приведены результаты моделирования взаимосвязи джозефсоновский ток - разность фаз берегов туннельного перехода при различных отношениях температур  $T/T_c$ . Представленные кривые  $I(\varphi)$  демонстрируют довольно высокие значения сверхпроводящих токов – результат усреднения с помощью функции Шепя-Бауэра (2).

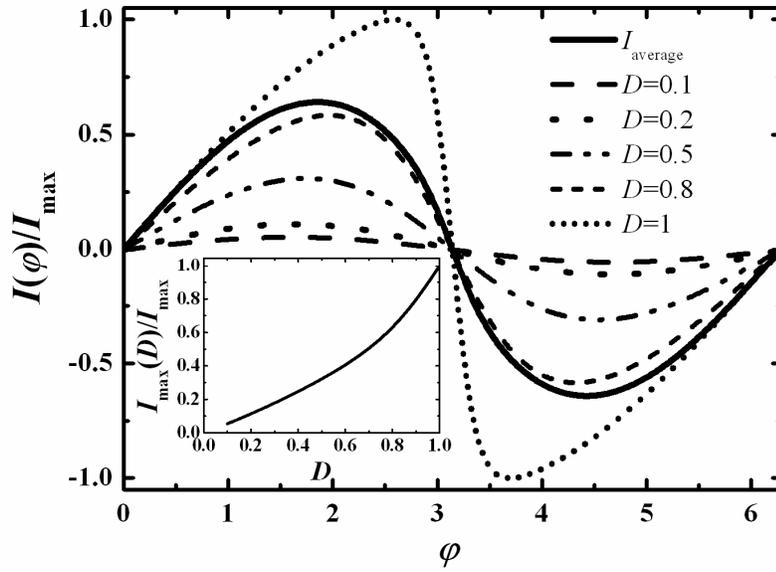


Рис. 1. Взаимосвязь сверхпроводящего тока  $I$  с джозефсоновской фазой  $\varphi$  для гетероконтактов с различной прозрачностью потенциального барьера  $D$ ; сплошная кривая соответствует усредненному джозефсоновскому току, полученному с помощью распределения прозрачностей Шепя-Бауэра [4] (см. формулу (2)). Вставка к рисунку демонстрирует рост максимальных значений сверхпроводящего тока  $I_{\max}(D)$  с прозрачностью барьера до максимального значения  $I_{\max}$  при  $D=1$ . Температура  $T=0.1T_c$ .

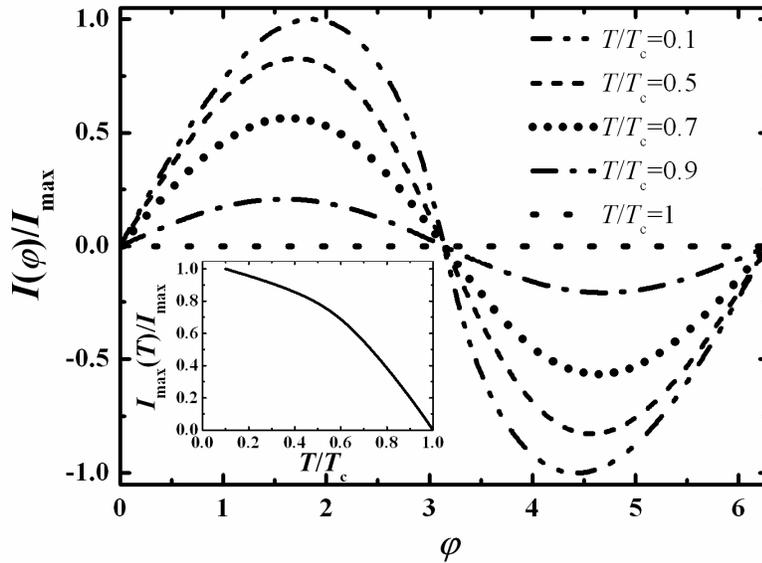


Рис. 2. Зависимость от температуры  $T$  соотношения ток ( $I$ ) – джозефсоновская фаза ( $\varphi$ ) для систем со сверхтонким слоем изолятора, распределение прозрачностей которого следует формуле Шепя-Бауэра (2). Вставка к рисунку показывает спадание максимальных значений усредненного тока  $I_{\max}(T)$  с температурой, начиная с максимального значения  $I_{\max}$  при  $T/T_c=0.1$ .

### Выводы

Таким образом, нами рассмотрена модельная задача протекания джозефсоновского тока через туннельный переход с разупорядоченным слоем изолятора. Исследовано влияние температуры на зависимость джозефсоновского тока  $I$  от разности фаз волновых функций  $\varphi$  для сверхпроводящих туннельных контактов со сверхтонким диэлектрическим слоем в соответствии с формулой Шеп-Бауэра [4]. Взаимосвязь ток - разность фаз в сверхпроводниках для S-I-S системы найдена нами в рамках модели разупорядоченного потенциального барьера, разделяющего сверхпроводящие берега туннельного джозефсоновского контакта. Отметим, что полученные при таком подходе результаты объясняют высокие значения джозефсоновского тока при различных температурах. Усреднённая кривая на рис. 1 показывает возможность использовать джозефсоновские структуры со сверхтонким, порядка нанометра толщиной, слоем диэлектрика на практике при низких температурах, и получать при этом значительные бездиссипативные токи, без тех ограничений, которые накладываются на чувствительность сверхпроводящих приборов тепловые шумы. Тем не менее, вопрос влияния электрических шумов на работу основных элементов сверхпроводящей электроники все еще требует детальных исследований. Возможны дальнейшие экспериментальные измерения температурной зависимости  $I(\varphi)$ , численный расчет которой выполнен в данной работе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Anders S., Blamire M. G., Buchholz F.-Im., *et al.* European roadmap on superconductive electronics – status and perspectives // *Physica C: Superconductivity*. — 2010. — V. 470. — № 23–24. — P. 2079–2126.
2. Dimitrova O. V., Feigel'man M. V. Two-dimensional S-N-S junction with Rashba spin-orbit coupling // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2006. — V. 102. — № 4. — P. 652–660.
3. Tolpygo S. K., Amparo D. Electrical stress effect on Josephson tunneling through ultrathin  $\text{AlO}_x$  barrier in Nb/Al/ $\text{AlO}_x$ /Nb junctions // *Journal of Applied Physics*. — 2008. — V. 104. — № 6. — P. 063904–1 — 063904–10.
4. Schep K. M., Bauer G. E. W. Universality of transport through dirty interfaces // *Physical Review Letters*. — 1997. — V. 78. — № 15. — P. 3015–3018.
5. Белоголовский М. А., Бойло И. В., Шатерник В. Е. Универсальный характер туннельной проводимости гетероструктур металл-изолятор-металл с наноразмерными оксидными прослойками // *Успехи физики металлов*. — 2011. — Т. 12. — № 2. — С. 157–182.
6. Beenakker C. W. J. Universal limit of critical-current fluctuations in mesoscopic Josephson junctions // *Physical Review Letters*. — 1991. — V. 67. — № 27. — P. 3836–3839.

пост.24.09.13