

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

PACS numbers: 73.23.-b, 73.40.Gk, 73.40.Ns, 74.50.+r, 74.70.Ad, 85.25.Am, 85.25.Cp

Избыточный квазичастичный ток в джозефсоновских гетероструктурах сверхпроводник–допированный полупроводник–сверхпроводник MoRe–Si (W)–MoRe

В. Е. Шатерник, М. А. Белоголовский*, А. П. Шаповалов**,
А. Ю. Суворов

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

**Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины,
ул. Р. Люксембург, 72,
83114 Донецк, Украина*

***Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
ул. Автозаводская, 2,
04074 Киев, Украина*

В работе исследованы вольт-амперные характеристики гетеропереходов вида MoRe–Si (W)–MoRe; при этом толщина и концентрация допанта полупроводникового барьера Si (W) изготовленных гетероструктур изменялись в широком диапазоне значений. Было установлено, что при относительно высоких концентрациях (5–9 ат.%) вольфрама в кремниевом барьере наблюдается резонансный туннельный эффект через локализованные уровни вольфрамовых кластеров. Одновременно при определённых условиях в таких переходах появляется сверхпроводящий ток Джозефсона, обусловленный многократными андреевскими отражениями боголюбовских квазичастиц (квазиэлектронов и квазидырок). Экспериментально наблюдаемый большой избыточный ток квазичастиц через переходы свидетельствует о существенном по величине вкладе в транспорт заряда от андреевских отражений на двух S/N -интерфейсах исследуемых джозефсоновских гетероструктур.

У роботі досліджено вольт-амперні характеристики гетеропереходів MoRe–Si (W)–MoRe; при цьому товщина та концентрація допantu напівпровідникового бар'єру Si (W) виготовлених гетероструктур змінювалися в широкому діапазоні значень. Було встановлено, що за відносно високих концентрацій (5–9 ат.%) вольфраму в кремнійовому бар'єрі спостерігається резонансний тунельний ефект через локалізовані рівні вольфрамових кластерів. Одночасно за певних умов у таких переходах виникає

Джозефсонів надпровідний струм, обумовлений багаторазовими Андреевськими відбиваннями Боголюбових квазічастинок (квазіелектронів та квазідірок). Експериментально спостережуваний великий надлишковий струм квазічастинок крізь переходи свідчить про наявність істотного за величиною внеску в транспорт заряду від Андреевських відбивань на двох S/N -інтерфейсах досліджуваних Джозефсонових гетероструктур.

Current–voltage characteristics of fabricated MoRe–Si(W)–MoRe heterojunctions are investigated in a wide range of changes in the parameters (such as thickness and dopant concentration) of the semiconductor Si(W) barriers. As found, at relatively high concentrations (5–9 at. %) of tungsten in the silicon barriers, a resonant tunnelling effect occurs through the localized levels of tungsten clusters. Simultaneously, under certain conditions, a superconducting Josephson current appears through such junctions and is conditioned by the multiple Andreev reflections of the Bogolyubov quasi-particles (quasi-electrons and quasi-holes) within them. The experimentally observed high quasi-particle excess current through the junctions indicates that there is a significant contribution of the Andreev reflections by the two S/N interfaces into the charge transport through the studied Josephson heterostructures.

Ключевые слова: джозефсоновский ток, резонансный туннельный эффект, андреевское отражение, избыточный квазічастичный ток.

(Получено 28 ноября 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача развития элементной базы сверхпроводниковой электроники, в частности, разработка и создание переходов Джозефсона с более широким диапазоном эксплуатационных параметров является одной из самых актуальных и перспективных. Таким образом, возникает необходимость разработки физических принципов создания новых технологических подходов к процессу формирования переходов Джозефсона. В частности, уже имеющийся технологический потенциал [1, 2] по созданию джозефсоновских элементов, базирующихся на туннельных переходах вида сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (SIS -структурах), создает существенные ограничения, в первую очередь, по быстродействию срабатывания, для таких направлений сверхпроводниковой электроники как создание квантовых стандартов напряжений [3] и элементов быстрой одноэлектронной логики [4]. Для улучшения характеристик вышечисленных элементов при условии сохранения устойчивости и стабильности их работы требуется существенное увеличение плотности критического джозефсоновского тока через элемент, и, как следствие, необходимость создания джозефсоновских элементов с более высокой степенью прозрачности барьеров. Попытки решения

данной проблемы путем использования элементов типа сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник (*SNS*-структуры) или сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (*SINIS*-структуры), т.е. путем применения барьеров с высокой прозрачностью, пока не привело к технологическому успеху в этой области. Использование механизма резонансного туннелирования для транспорта зарядов через область слабой связи представляется удобной альтернативой разработке технологий создания переходов Джозефсона с высокой воспроизводимостью и высокой прозрачностью барьера.

Уже первые наши работы [5, 6] по исследованию характеристик гетеропереходов состава MoRe-Si (W)-MoRe подтвердили большой потенциал этого направления. Так, нам удалось продемонстрировать, что путем изменения технологических параметров условий изготовления джозефсоновских переходов (а именно, концентрации вольфрама в кремнии и толщины барьера) удается реализовать различные механизмы транспорта заряда в переходе. Исследование вольт-амперных характеристик (*VAX*) под СВЧ-излучением продемонстрировало перспективность использования таких переходов для создания стандартов напряжения [6].

Целью настоящей работы являются более детальные исследования вольтамперных характеристик джозефсоновских структур на базе тонких плёнок сплава MoRe в широком диапазоне прозрачностей барьера из аморфного кремния, допированного вольфрамом до оптимального уровня.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Сверхпроводящие гетеропереходы MoRe-Si (W)-MoRe изготавливались путем последовательного осаждения тонких слоев Mo-Re пленок и слоев пленок кремния, допированного вольфрамом W , на диэлектрические подложки при комнатной температуре путем магнетронного распыления при постоянном токе соответствующих мишеней в атмосфере аргона. Давление остаточных газов в вакуумной камере близко к 10^{-4} Па, для реализации магнетронного распыления мишеней в камеру вводился поток аргона. Давление аргона в камере в процессе осаждения пленок составляло порядка 0,2–0,5 Па. Типичная скорость осаждения слоев Mo-Re -пленок составляла $\cong 5$ нм/с, типичная скорость осаждения пленок кремния, допированного вольфрамом, Si (W) составляла $\cong 1$ нм/с. Химический состав осажденных пленок кремния исследовался с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Изменяя количество проволок вольфрама на поверхности составной мишени, мы могли изменять степень допирования кремния от 0 до 9 ат.% вольфрама в нем. Бо-

лее подробно процедура изготовления пленочных гетероструктур описана в [5].

Во всем исследуемом диапазоне толщин барьера с уровнем концентрации допанта $n_W \cong 4$ ат. % нам не удалось получить образцы переходов MoRe-Si(W)-MoRe, ВАХ которых проявили бы тип зависимости, характерный для переходов вида сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (S-I-S). Мы имели дело либо с так называемыми сверхпроводящими закортками (величина сверхпроводящего тока перехода превышает величину критического сверхпроводящего тока электродов), либо с резистивным поведением перехода даже в случае достаточно тонких барьеров.

При увеличении концентрации вольфрама в кремниевом барьере поведение ВАХ образцов сильно изменилось.

На рисунке 1 представлены ВАХ переходов MoRe-Si(W)-MoRe с возросшим уровнем концентрации леганта $n_W \cong 6$ ат. % в барьерах. Заметим, что все эти образцы демонстрируют совершенно другой вид ВАХ по сравнению с образцами с относительно малым уровнем концентрации леганта $n_W \cong 4$ ат. % в барьерах. При изменении толщины барьера происходит эволюция ВАХ, но при этом все они содержат характерный перегиб в области 1–3 мВ (см. в [5]). Интересно то, что при больших приложенных напряжениях смещения на переходах их ВАХ асимптотично приближаются к линейной зависимости (см. рис. 1).

Также были исследованы переходы, на ВАХ которых присут-

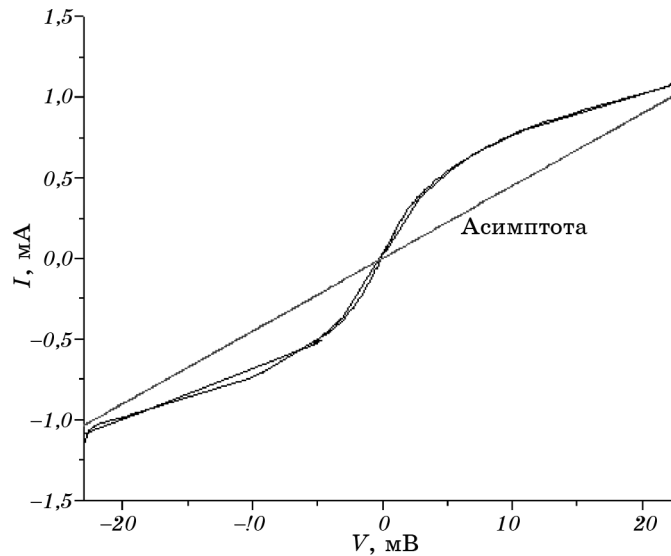


Рис. 1. ВАХ перехода MoRe-Si(W)-MoRe с концентрацией допанта $n_W \cong 6$ ат. %.

ствовала вертикальная токовая ступенька при нуле напряжений смещения, характерная для существования сверхпроводящего тока Джозефсона через переход (см. рис. 2). Для всех полученных экспериментальных ВАХ было характерно наличие линейных асимптот, причем как для левой, так и для правой их ветви при больших напряжениях смещения экспериментальные зависимости шли параллельно друг другу и были равноудалены от соответствующей прямой, проведенной через начало координат. Их положение позволяет судить о наличии и относительной величине избыточного квазичастичного тока в полученных джозефсоновских переходах MoRe-Si(W)-MoRe. Вид полученных ВАХ по форме напоминает ВАХ джозефсоновских переходов сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник (SNS).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значимым экспериментальным результатом, полученным при исследовании данного вида джозефсоновских гетероструктур, является наблюдение одновременного возникновения в них сверхпроводящего тока Джозефсона и избыточного тока боголюбовских квазичастиц I_{exc} . [7] через N-I-S-интерфейсы на соответствующих квазичастичных ВАХ исследуемых переходов. В зависимости от параметров переходов можно наблюдать как гистерезисные, так и безгистерезисные ВАХ (см. рис. 2), имеющие при этом относительно

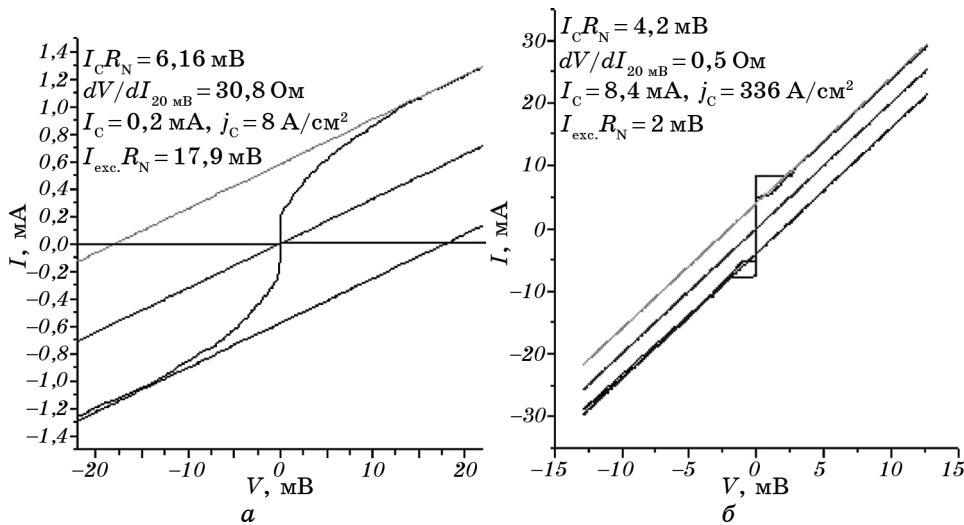


Рис. 2. ВАХ образцов с концентрациями допанта n_W и толщинами барьеров d : $n_W \cong 6 \text{ ат.}\%$, $d = 24 \text{ нм}$ (а); $n_W \cong 7,5 \text{ ат.}\%$, $d = 15 \text{ нм}$ (б).

большие дифференциальные сопротивления при напряжениях смещения $eV \gg \Delta$ (Δ — модуль амплитуды параметра сверхпроводящего порядка сверхпроводника S или, другими словами, энергетическая щель в приближении полупроводниковой модели сверхпроводника).

В рамках ставшего уже классическим подхода Блондера–Тинкхама–Клапвик [7] для трактовки возникновения и существования избыточного тока I_{exc} при транспорте заряда в переходах Джозефсона мы в нашей более ранней работе [8] рассчитали в рамках модели многократных андреевских отражений квазичастичные ВАХ $S-I-S$ переходов Джозефсона, построенные для разных прозрачностей барьера D . Если теперь построить зависимость $I_{\text{exc}}(D)$, аналогичную $I_{\text{exc}}(Z)$ в [7], то мы увидим, что избыточный ток возрос по сравнению с током через одиночный $N-I-S$ -интерфейс, при этом он также быстро спадает при уменьшении прозрачности барьера D . Соответствующий график зависимости в координатах $eI_{\text{exc}}R_N/\Delta$ и D приведен на рис. 3; здесь заряд электрона e и величина энергетической щели Δ считаются равными единице, R_N — сопротивление перехода в нормальном состоянии.

Из рисунка 3 видно, что для $S-I-S$ -структуры максимум произведения $eI_{\text{exc}}R_N/\Delta$ равен 2,82 и достигается в случае, когда прозрачность барьера D близка к единице. Наблюдаемые одновременно, относительно высокие значения произведений $I_C R_N$ и $I_{\text{exc}} R_N$ исследуемых переходов свидетельствуют о том, что транспорт заряда в них осуществляется не через один туннельный барьер I , но на основе

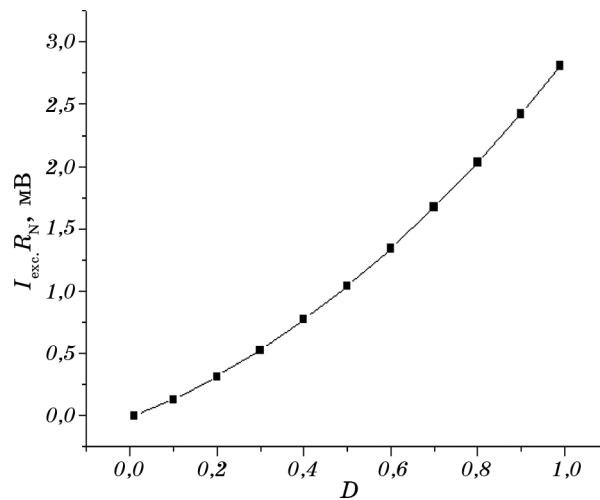


Рис. 3. Расчетная зависимость произведения избыточного тока перехода на его сопротивление в нормальном состоянии $I_{\text{exc}}R_N$ от прозрачности барьера D для $S-I-S$ -перехода.

процесса резонансного туннелирования через относительно большое число металлических кластеров (вольфрамовых), т.е. схема перехода может быть записана в виде $S/N-I-N-I\dots I-N-I-N/S$, здесь S/N и N/S обозначают левый и правый интерфейсы перехода, N — вольфрамовые кластеры, I — слои кремния между вольфрамовыми кластерами.

Из сравнительного анализа вышеприведенных экспериментальных и расчетных характеристик следует, что в зависимости от соотношения величин прозрачностей для разных пар барьеров возможны: а) реализация резонансно-перколяционного транспорта заряда в случае симметричных барьеров с высокой прозрачностью, тогда мы и имеем дело с джозефсоновским сверхпроводящим током и избыточным квазичастичным током $I_{\text{exc.}}$; б) реализация просто перколяционного механизма транспорта заряда (если барьеры разные). При этом необходимым следствием реализации резонансно-перколяционного механизма является то, что соответствующие переходы Джозефсона имеют существенно бóльшие значения сопротивления в нормальном состоянии R_N (при тех же плотностях критического тока Джозефсона I_C), нежели переходы Джозефсона всех других типов. Происходит это вследствие того, что в процессе транспорта заряда через переход рассеяние электрона (дырки) происходит на многих кластерах вольфрама последовательно, при этом при рассеянии на каждом кластере вольфрама соответственно происходит расщепление волновой функции на прошедшую и отраженную, а при движении между кластерами происходит аккумулятивное набега фазы электрона, что повторяется многократно.

4. ВЫВОДЫ

1. В переходах Джозефсона вида MoRe-Si(W)-MoRe при относительно высоких концентрациях ($\cong 6-9$ ат.%) вольфрама в кремниевом барьере наблюдали наличие резонансного туннельного эффекта через локализованные уровни вольфрамовых кластеров. При относительно высоких напряжениях смещения $eV \gg \Delta$ исследуемые экспериментально ВАХ вышеупомянутых переходов асимптотически приближаются к линейным функциям, графики которых не проходят через начало координат и смещены по оси токов на величину избыточного тока $I_{\text{exc.}}$, характерного для каждого исследуемого перехода.

2. При некоторых условиях на ВАХ этих переходов экспериментально наблюдалось одновременное появление сверхпроводящего тока Джозефсона и большого избыточного тока боголюбовских квазичастиц $I_{\text{exc.}}$. Это свидетельствует о наличии в данном переходе существенного по величине вклада в транспорт заряда через него от андреевских отражений носителей заряда на двух его S/N -интер-

фейсах.

3. Величины характеристического напряжения ($I_C R_N$) для созданных и исследуемых джозефсоновских гетероструктур существенно превышают соответствующие величины, характерные для традиционных *SIS*- и *SINIS*-переходов Джозефсона.

4. Качественное описание транспорта заряда в вышеупомянутых исследованных переходах Джозефсона дает учет андреевских отражений носителей заряда на двух *S/N*-интерфейсах соответствующего перехода с учетом многократного обычного рассеяния их же на многочисленных кластерах нормального металла (вольфрама), помещенных в слой барьера перехода, состоящего из аморфного кремния.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. M. Gurvitch, M. A. Washington, and H. A. Huggins, *Appl. Phys. Lett.*, **42**, Iss. 5: 472 (1983).
2. M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*. 2nd Ed. (Mineola, NY: Dover Publications: 1996).
3. H. Schulze, R. Behr, F. Müller, and J. Niemeyer, *Appl. Phys. Lett.*, **73**: 996 (1998).
4. K. K. Likharev and V. K. Semenov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **1**, Iss. 1: 3 (1991).
5. A. P. Shapovalov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 8: 1021 (2013) (in Russian).
6. V. Shaternik, A. Shapovalov, A. Suvorov, S. Doring, S. Schmidt, and P. Seidel, *Proc. of 8th Int'l Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves—'MSMW 2013' (June 23–28, 2013, Kharkov, Ukraine)*, p. 655.
7. G. E. Blonder, M. Tinkham, and T. M. Klapwijk, *Phys. Rev. B*, **25**, No. 7: 4515 (1982).
8. V. E. Shaternik, S. Yu. Larkin, and M. A. Belogolovskii, *Int. J. Mod. Phys. B*, **23**, No. 17: 3520 (2009).