

05.4;06.1;06.2

©1995

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНТАКТОВ $n^{++}\text{GaAs-Nb}$ И ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*В.И.Барчукова, В.Н.Губанков, Е.Н.Еньюшкина,
С.А.Ковтонюк, И.Л.Лапунтская, М.П.Лисицкий,
А.Д.Максимов, В.Г.Мокеров,
А.В.Никифоров, С.С.Шмелев*

1. В настоящее время контакты сверхпроводник-полупроводник вызывают большой интерес как с точки зрения фундаментальных исследований [1-6], так и практического применения в криоэлектронике [7-9]. Среди низкотемпературных сверхпроводников ниобий, обладающий критической температурой сверхпроводящего перехода $T_c = 9.2$ К и высокой стойкостью к термоциклированию, является наиболее подходящим металлом для изготовления таких контактов с помощью тонкопленочной технологии [10]. Однако ниобий характеризуется высокой степенью поглощения различных газовых примесей (водяного пара, кислорода и т. д.), которые существенно понижают T_c пленки по сравнению с объемным образцом. Поэтому тонкие пленки ниобия изготавливают в специальных высоковакуумных камерах, не допускающих напыления в них других материалов. Целью данной работы является исследование при низких температурах электрофизических свойств контактов $n^{++}\text{GaAs-Nb}$, изготовленных в условиях разрыва вакуума с использованием стандартных технологических процессов очистки поверхности GaAs от окислов перед нанесением пленки ниобия. Выбор $n^{++}\text{GaAs}$ был связан с возможностью изготавливать на его основе структуры с двумерным электронным газом (2ДЭГ) и, следовательно, изучать процессы переноса заряда в контактах сверхпроводник-2ДЭГ.

2. Контакты $n^{++}\text{GaAs-Nb}$ были изготовлены на базе стандартной многослойной транзисторной структуры, представляющей собой монокристаллическую полуизолирующую подложку GaAs толщиной 300 мкм, на которой методом газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений были последовательно выращены следующие слои:

1. $n^-\text{GaAs}$ нелегированный буферный слой (толщина ≈ 0.7 мкм);

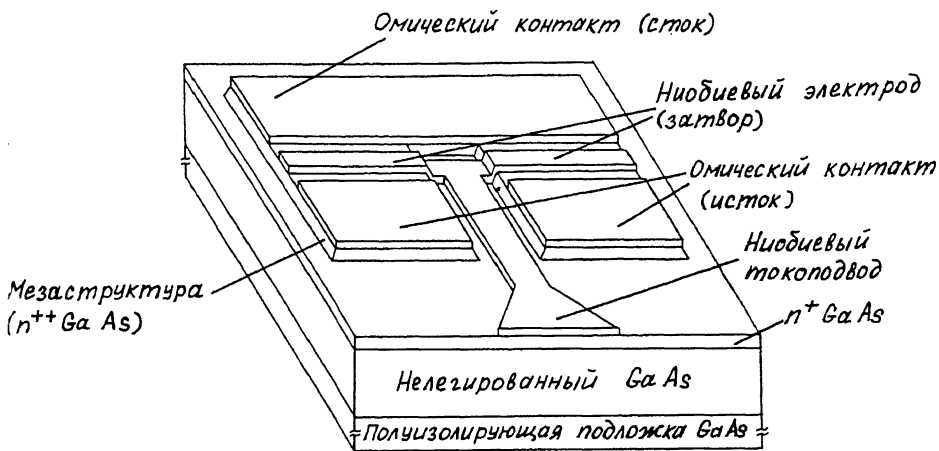


Рис. 1. Схематическое изображение изготовленной структуры.

2. n^+ GaAs слой, легированный Si (концентрация легирующей примеси $n \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина $\approx 0.12 \text{ мкм}$);

3. n^{++} GaAs слой, легированный Si ($n \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, толщина $\approx 0.12 \text{ мкм}$).

Изготовленный элемент представлял собой транзисторноподобную конфигурацию с разделенным истоком [11], в которой сток и исток являлись омическими контактами, выполненными из сплава золота, а затвор был выполнен из ниобия, причем слой n^{++} GaAs не удалялся из области канала. Схематическое изображение элемента показано на рис. 1. Длина затвора составляла ≈ 1 , ширина затвора ≈ 60 , расстояние между затвором и истоком $\approx 1 \text{ мкм}$. Омические контакты к n^{++} GaAs слою были выполнены путем напыления сплава Au-Ge-Ni последующим его вжиганием при температуре $T = 470^\circ\text{C}$ в течение 1.5–2 мин. Перед напылением ниобия производилась чистка поверхности n^{++} GaAs в ВЧ разряде в атмосфере аргона при напряжении 100 В в течение 7 мин. Напыление ниобия осуществлялось методом ВЧ магнетронного распыления в вакууме $8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. Электрическая изоляция транзисторноподобных структур друг от друга осуществлялась ионной имплантацией B^+ и травлением слоя n^{++} GaAs в областях, не относящихся к областям стоков, истоков и каналов транзисторов.

3. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) контакта n^{++} GaAs-Nb осуществлялось по двухзондовой методике: один зонд подсоединялся к контактной площадке Nb, другой — к омическому контакту истока. Дифференциаль-

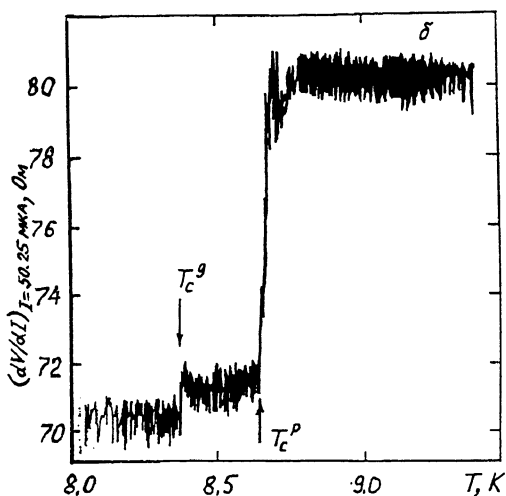
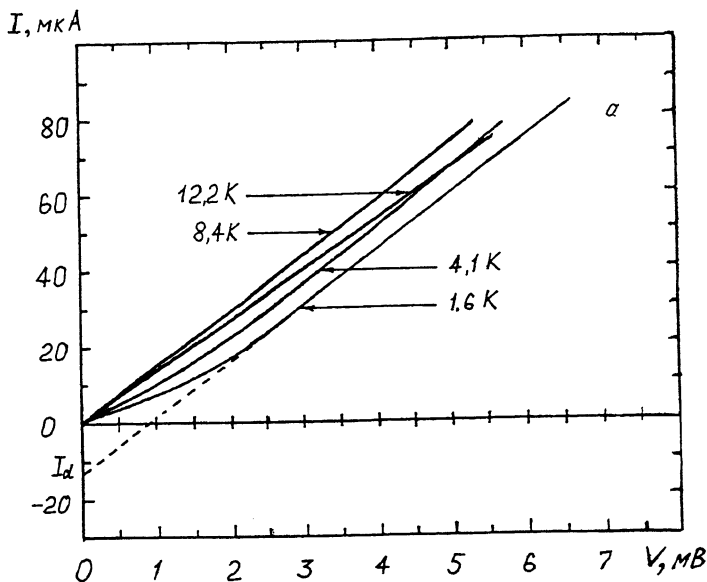


Рис. 2. а — вольт-амперные характеристики контакта, измеренные при различных температурах; б — температурная зависимость dV/dI контакта при токовом смещении 50.25 μA , измеренная в интервале температур, соответствующих изменению ВАХ контакта от линейного вида к нелинейному.

ное сопротивление (dV/dI) контакта измерялось при синусоидальной токовой модуляции с помощью синхронного детектирования сигнала на контакте.

Температурная эволюция ВАХ показана на рис. 2, а. При комнатной температуре ВАХ контакта была близка к линейной зависимости в интервале напряжений ± 4 мВ (сопротивление контакта при $V = 0$ мВ составляло ≈ 50 Ом). При понижении температуры вплоть до $T \approx 8.7$ К ВАХ оставалась линейной, причем наблюдалось увеличение сопротивления контакта. На рис. 2, б приведена температурная зависимость dV/dI контакта при токовом смещении 50.25 мкА $(dV/dI)_{I=50.25\text{мкА}}$, измеренная в интервале температур, соответствующих изменению ВАХ контакта от линейного вида к нелинейному. Из рис. 2, б видно, что при охлаждении величина dV/dI претерпевала два скачкообразных уменьшения: первое уменьшение на величину ≈ 9 Ом происходило при температуре, равной 8.7 К, второе уменьшение на величину ≈ 1 Ом имело место при температуре 8.4 К. Мы полагаем, что первое изменение величины $(dV/dI)_{I=50.25\text{мкА}}$ связано с переходом в сверхпроводящее состояние ниобиевого токоподвода, соединяющего затвор с контактной площадкой и расположенного на ионно-имплантированном $n^+\text{GaAs}$ (см. рис. 2, б), а второе уменьшение соответствует переходу в сверхпроводящее состояние самого ниобиевого затвора, лежащего на $n^{++}\text{GaAs}$ слое канала (мы обозначим температуру перехода токопровода в сверхпроводящее состояние через T_c^p , а температуру перехода затвора в сверхпроводящее состояние через T_c^g). Разница температур сверхпроводящего перехода скорее всего обусловлена различным влиянием сильнолегированного слоя $n^{++}\text{GaAs}$ и ионно-имплантированного слоя $n^+\text{GaAs}$ на сверхпроводящие свойства ниобия. Таким образом, наблюдаемая нами нелинейность ВАХ контакта связана со сверхпроводимостью ниобиевого затвора. Нелинейность ВАХ ярко проявляется на зависимости дифференциального сопротивления dV/dI от напряжения смещения V (рис. 3). Кривые $dV/dI(V)$, измеренные при $T < T_c^g$, характеризуются наличием пика при $V = 0$ В, причем с понижением температуры высота пика возрастает. При $T = 1.6$ К на кривой $dV/dI(V)$ помимо пика наблюдаются минимумы при $V = \pm 3$ мВ (см. рис. 3). Известно, что процессы туннелирования в контактах вырожденный полупроводник-барьер Шоттки-сверхпроводник ($\text{Sm}-I_{\text{sh}}-\text{S}$) при напряжениях $V \lesssim \Delta/e$ (Δ — энергетическая щель сверхпроводника, e — заряд электрона) аналогичны процессам, имеющим место в $\text{S}-\text{I}-\text{N}$ контактах [1]. В связи с этим на зависимости $dV/dI(V)$ $\text{Sm}-I_{\text{sh}}-\text{S}$ контакта при $V \gtrsim \Delta/e$ должна наблюдаться ще-

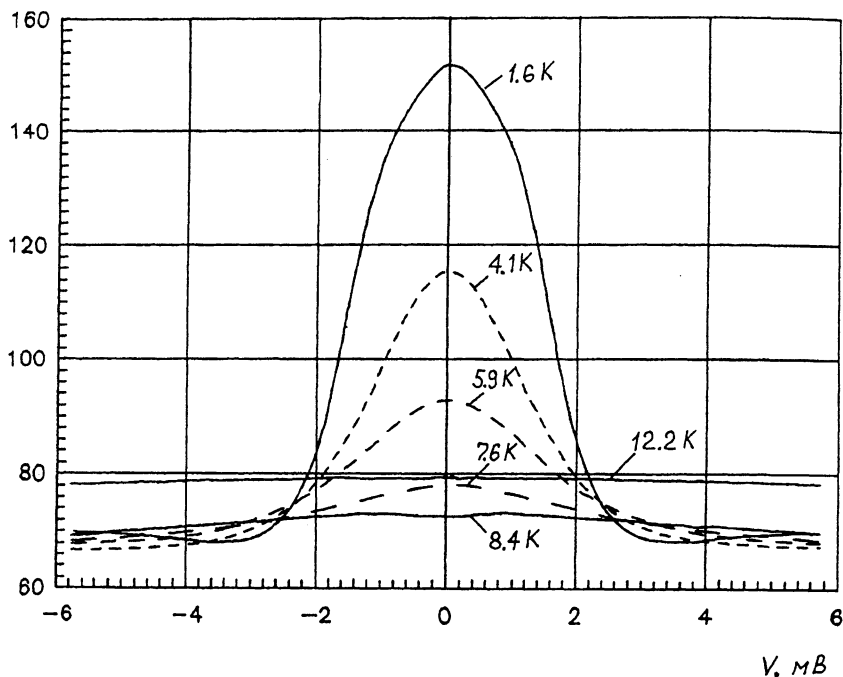
$dV/dI, \text{Om}$ 

Рис. 3. Зависимости дифференциального сопротивления dV/dI от напряжения смещения V , измеренные при различных температурах.

левая особенность. В наших экспериментах вид зависимостей $dV/dI(V)$, измеренных при $T < T_c^g$, близок к аналогичным зависимостям S-I-N контакта. Отсюда можно сделать вывод о том, что наблюдаемые нами ВАХ и зависимости $dV/dI(V)$ отражают туннелирование одночастичных возбуждений через барьер Шоттки, образовавшийся на границе между ниобием и легированным GaAs, а характерные минимумы на зависимостях $dV/dI(V)$ отражают наличие энергетической щели в спектре сверхпроводника. Обращают на себя внимание два экспериментальных факта. Во-первых, щелевая особенность появляется при температурах $T \ll T_c^g$, т. е. при температурах, существенно меньших тех, которые следовало ожидать из классической модели S-I-N контакта. Во-вторых, минимумы на экспериментальной кривой $dV/dI(V)$, измеренной при $T = 1.6 \text{ K}$ (см. рис. 3), наблюдаются при напряжении, заметно превышающем величину Δ/e для ниобия, соответствующую этой температуре [12]. Полученное смещение щелевой особенности в область больших

напряжений и ее размытость ранее наблюдались на контактах $\text{Sn}-p^+\text{GaAs}$ [5], $\text{Nb}-n^{++}\text{Si}$ [1], $\text{Nb}-p\text{GaAs}$ [7], однако причина этого явления до сих пор остается не выясненной.

Следует отметить, что на ВАХ контакта наблюдался так называемый "ток дефицита", связанный с неравновесной функцией распределения носителей в сильнолегированном слое $n^{++}\text{GaAs}$ [4,13] (процедура определения тока дефицита I_d для ВАХ, измеренной при $T = 1.6$ К, продемонстрирована на рис. 2, а).

Таким образом, изготовленный нами контакт $n^{++}\text{GaAs}-\text{Nb}$ при переходе ниобия в сверхпроводящее состояние обладал электрофизическими свойствами, соответствующими контакту полупроводник-барьер Шоттки-сверхпроводник. Разработанную технологию можно использовать для изготовления сверхпроводниковых туннельных структур с полупроводниковым барьером.

Авторы благодарны М.В. Фистулю (Purdue University of West Lafayette, U.S.A.) и А.М. Гуляеву (МЭИ) за плодотворное обсуждение работы, В.Н. Прудникову (МГУ) за поддержку работы. Работа выполнена при поддержке Государственной программы Российской Федерации "Перспективные информационные технологии", проект № 05.02.1015 (шифр "Интеграция").

Список литературы

- [1] *Heslinga D.R., van Huffelen W.M., Klapwijk T.M., Bakker S.J.M., van der Drift E.W.J.M.* // *Cryogenics*. 1990. V. 30. P. 1009-1013.
- [2] *Heslinga D.R., van Huffelen W.M., Klapwijk T.M.* // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1991. V. 27. N 2. P. 3264-3267.
- [3] *Kastalsky A., Kleinsasser A.W., Greene L.H., Bhat R., Milliken F.P., Harbison J.P.* // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. N 21. P. 3026-3029.
- [4] *Volkov A.F.* // *Phys. Lett. A*. 1993. V. 174. P. 144-150.
- [5] *Gao J.R., Heida J.P., van Wees B.J., Bakker S., Klapwijk T.M.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. N 3. P. 334-336.
- [6] *Van Huffelen W.M., Klapwijk T.M., Heslinga D.R., de Boer M.J., van der Post N.* // *Phys. Rev. B*. 1993. V. 47. N 9. P. 5170-5189.
- [7] *Sugiyama Y., Tacano M., Sakai S., Kataoka S.* // *IEEE Electron Dev. Lett.* 1980. V. EDL-1. N 11. P. 236-238.
- [8] *Kleinsasser A.W., Jackson T.N., McInturff D., Rammo F., Pettit G.D.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55. N 18. P. 1909-1911.
- [9] *Kleinsasser A.W., Jackson T.N., McInturff D., Rammo F., Pettit G.D.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. N 17. P. 1811-1813.
- [10] *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона. Физика и применение. Пер. с англ. / Под ред. Л.Г. Асламазова, Л.Н. Булаевского, С.И. Веденева. М.: Мир, 1984. 640 с.

- [11] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. Пер. с англ. / Под ред. М.Е. Левинштейна и В.Е. Челнокова. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [12] *Вольф Е.Д.* Принципы электронной туннельной спектроскопии. Пер. с англ. / Под ред. В.М. Свистунова. Киев: Наукова думка, 1990. 456 с.
- [13] *Blonder G.E., Tinkhman M., Klapwijk T.M.* // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. P. 4515-4532.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Москва

Поступило в Редакцию
10 января 1995 г.
