

**УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ  
ИМ. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН**

---

На правах рукописи  
УДК

ФИЛИППЕНКО Людмила Викторовна

**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ  
СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ  
ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Кошелец В.П.

МОСКВА – 2009

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	стр...
П1 Область исследования .....	5
П2 Порядок изложения материала .....	7
П3 Основные положения, выносимые на защиту .....	9
П4 Вопросы авторства и публикация результатов .....	12
П5 Аннотация .....	14
<b>Глава 1 Введение</b>	
1.1 Основы сверхпроводниковой электроники.....	16
1.2 Краткий обзор развития технологии СИС переходов .....	25
1.3 Устройства сверхпроводниковой электроники.....	28
1.4 Постановка задачи.....	35
<b>Глава 2 Технология изготовления СИС переходов на основе структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb</b>	
2.1 Технологический маршрут и режимы изготовления СИС переходов.....	36
2.2 Основные этапы изготовления СИС переходов	
2.2.1 Фотолитография.....	40
2.2.2 Напыление тонких пленок.....	48
2.2.3 Электролитическое анодирование.....	51
2.2.4 Реактивное ионное травление (RIE).....	54
2.3 Оборудование для изготовления СИС переходов.....	55
2.4 Система измерения электрофизических параметров .....	63

### **Глава 3 Разработка технологии изготовления малошумящих СИС приемников для радиоастрономических исследований**

3.1 Основные требования к параметрам смесительных СИС переходов.....	68
3.2 Оптимизация технологии изготовления СИС переходов для СВЧ применения.....	70
3.3 СИС структуры для волноводных смесителей мм диапазона длин волн.....	76
3.4 Разработка технологии изготовления СИС переходов на кварцевых подложках.....	82
3.5 Квазиоптический приемник на основе туннельного СИС перехода.....	86
3.6 Выводы по Главе 3 .....	90

### **Глава 4 Интегральные сверхпроводниковые структуры**

4.1 Интегральный сверхпроводниковый приемник (СИП).....	91
4.2 Микросхема интегрального приемника .....	93
4.2.1 Технология изготовления микросхемы СИП.....	96
4.2.2 Особенности RIE процесса при формировании перехода методом «крест».....	102
4.2.3 Оптимизация края пленок микрополосковой линии...104	
4.2.4 Экспериментальное исследование интегрального приемника.....	112
4.3 Приемник с балансным СИС смесителем.....	113
4.4 Примеры применения чипов интегрального приемника.....	116
4.5 Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для проекта TELIS.....	118
4.5.1 Технология изготовления микросхем интегрального приемника для проекта TELIS.....	121

4.5.2	Оптимизация процессов изготовления СИС переходов субмикронных размеров.....	125
4.6	СИП на основе структуры Nb/Al-AlN/NbN.....	130
4.7	Технология изготовления микросхем интегрального приемника, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе.....	134
4.8	Выводы по Главе 4 .....	137
<b>Глава 5 Детекторы рентгеновского излучения на основе туннельных переходов</b>		
5.1	Общие требования к разработке СТП-детекторов .....	140
5.2	Микросхемы для испытания СТП-детекторов .....	146
5.3	Методика изготовления СТП-детекторов.....	152
5.4	Экспериментальные характеристики СТП-детекторов.....	161
5.5	Выводы по Главе 5 .....	174
<b>Глава 6 Новые методы формирования СИС переходов</b>		
6.1	Концепция метода химико-механической полировки (CMP) .....	175
6.2	Формирование СИС переходов субмикронного размера методами CMP и электронно-лучевой литографии.....	177
6.3	Исследование способов формирования многоэлементных схем.....	183
6.4	Выводы по Главе 6 .....	189
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Основные результаты диссертации .....</b>		<b>190</b>
<b>Публикации по теме диссертационной работы .....</b>		<b>192</b>
<b>Цитированная литература.....</b>		<b>212</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

### П.1. Область исследования.

Туннельные переходы сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) являются основными элементами большинства устройств сверхпроводниковой электроники. Однако, отсутствие технологии, позволяющей изготавливать туннельные СИС переходы с воспроизводимыми параметрами и выдерживающими многократные термоциклирования, долгое время препятствовало практическому применению СИС переходов и структур на их основе. В начале 80-х годов началось исследование СИС переходов на основе тугоплавких материалов, что сделало возможным широкое применение таких структур для приема и обработки сигналов малой мощности.

СИС структуры на основе нелинейной зависимости тока квазичастиц от напряжения являются наиболее перспективными элементами для создания высокочувствительных приемных устройств при проведении радиоастрономических наблюдений. Приемники на основе туннельных СИС переходов обладают самой низкой шумовой температурой в диапазоне 100 – 1000 ГГц. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. Для реализации предельных параметров СИС приемников требуются туннельные переходы с высокой плотностью тока, низкими токами утечки и малым размытием целевого напряжения, изготовленные целиком из тугоплавких материалов. Для согласования таких переходов с внешней электродинамической системой необходимо использовать переходы субмикронных размеров.

В ИРЭ РАН была предложена концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). На одной микросхеме размещаются

приемная антенна, квантовый СИС смеситель на квазичастичной нелинейности туннельного перехода и сверхпроводниковый генератор гетеродина (ФФО). Интегральные приемники крайне перспективны для радиоастрономии, мониторинга окружающей среды, осуществляемого с борта спутников или специальных самолетов, а также медицинской диагностики и систем безопасности. Первым практическим применением СИП является проект TELIS, направленный на изучение распределения примесных газов в атмосфере с борта высотного аэростата. Поэтому весьма актуальной явилась задача создания технологии изготовления многослойных СВЧ микросхем, объединяющих различные сверхпроводниковые элементы в единое устройство.

СИС переходы весьма перспективны для детектирования рентгеновского и мягкого гамма-излучения, так как они обладают более высоким энергетическим разрешением по сравнению с лучшими полупроводниковыми детекторами и уже используются для рентгенофлюоресцентного анализа в материаловедении, в астрономии и других приложениях. Рекордные характеристики таких устройств связаны с существенно большим числом носителей тока (квазичастиц), возникающих в сверхпроводнике при поглощении кванта излучения по сравнению с традиционными полупроводниковыми детекторами. Однако, для реализации высокого энергетического разрешения необходимы туннельные переходы с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки.

Для реализации предельных параметров СИС приемников и их продвижения в область терагерцовых частот необходимы туннельные переходы, площадь которых существенно меньше  $1 \text{ мкм}^2$ . Это требует разработки принципиально новых методов формирования таких структур и оптимизации режимов их изготовления. Кроме того, для большинства перспективных применений нужны сложные многоэлементные микросхемы

с малым разбросом параметров и воспроизводимыми характеристиками. На решение перечисленных выше задач и была направлена данная диссертационная работа.

## П2. Порядок изложения материала.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней дано описание физических процессов, лежащих в основе эффекта Джозефсона. Подробно описаны переходы сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС переходы), которые являются основным элементом сверхпроводниковой электроники и являются главным объектом исследования данной диссертационной работы. Дается краткий обзор развития технологии изготовления СИС переходов. Рассматриваются различные устройства сверхпроводниковой электроники на основе СИС переходов.

Глава 2 посвящена описанию технологического маршрута изготовления СИС переходов на основе Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb. Детально рассмотрены ключевые этапы формирования СИС переходов: фотолитография, напыление пленок, анодизация, реактивно-ионное травление; даются режимы изготовления.

Глава 3 посвящена разработке технологии изготовления СИС смесителей для радиоастрономических наблюдений. Представлены результаты оптимизации напыления тонких пленок ниобия. Обсуждаются особенности изготовления СИС переходов на кварцевых подложках.

Глава 4 посвящена разработке технологии изготовления микросхем сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). Представлены результаты оптимизации изготовления СИС переходов субмикронного размера. Описана технология изготовления микросхем СИП на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

Глава 5 посвящена исследованию детекторов рентгеновского излучения на основе туннельных переходов. Предложена конструкция и оптимизирована технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN.

Глава 6 посвящена новым методам формирования СИС переходов субмикронного размера с помощью химико-механической полировки и электронно-лучевой литографии. Исследованы способы формирования многоэлементных схем.

### ПЗ. Основные положения, выносимые на защиту.

1. Проведено исследование по оптимизации технологии изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронного размера. Найдены условия, при которых механические напряжения в пленках Nb минимальны; изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода)  $R_j/R_n > 40$ . Использование изготовленных автором приемных структур позволило получить шумовую температуру приемника 70 К на частоте 100 ГГц. Разработана технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках для использования их в волноводных смесителях, что позволило создать серию малошумящих приемников, успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия).
2. Создана технология изготовления СИС переходов субмикронного размера для многослойных СВЧ микросхем, работающих в диапазоне частот 100-700 ГГц. Данная технология позволяет получать СИС переходы с плотностью тока до 10 кА/см<sup>2</sup>, размытием щелевой особенности  $\delta V_g < 150$  мкВ и разбросом параметров по подложке порядка 10 %. Впервые изготовлена микросхема сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), объединяющая в себе СИС смеситель с квазиоптической антенной и сверхпроводящий генератор на потоке джозефсоновских вихрей, шумовая температура которого на частоте 480 - 520 ГГц составила 100К. Разработана технология изготовления микросхем интегрального приемника, позволяющая объединять структуры с разными плотностями тока на одном чипе.
3. Разработана технология изготовления интегральных сверхпроводниковых СВЧ микросхем на основе туннельных переходов

Nb/Al-AlN/NbN. Микросхема сверхпроводникового интегрального спектрометра субмиллиметровых волн представляет собой однокристалльную СВЧ микросхему СИП, в которую для фазовой синхронизации частоты гетеродина включен гармонический смеситель. Были изготовлены и исследованы микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника реализована шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Первый тестовый полет проведен в июне 2008 г. на полигоне Терезина в Бразилии.

4. Предложена конструкция и оптимизирована технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. Показано, что использование подслоя из Ti не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади с параметром качества  $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$  (при  $T = 1.3 \text{ K}$ ). Наилучшее энергетическое разрешение, измеренное в НИИЯФ МГУ для детектора площадью  $6400 \text{ мкм}^2$ , составило 78 эВ при вкладе электронных шумов 50 эВ. Сигнал пассивного электрода в 8 раз меньше сигнала активного электрода.
5. Разработаны новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе. С помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки изготовлены и измерены туннельные

переходы с площадью перехода вплоть до  $0.03 \text{ мкм}^2$  и  $R_j/R_n > 10$ . Исследованы способы формирования многоэлементных схем средней степени интеграции с числом элементов до 1000. Показано, что с помощью разработанного автором технологического процесса возможно изготовление цепочек туннельных переходов с разбросом основных параметров не превышающих 2% для  $n = 100$  и 3.5% для  $n = 1000$ .

#### П.4. Вопросы авторства и публикация результатов.

В работах [A1, A6 - 7, A10] автором проведены исследования по оптимизации технологии изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронного размера. Найдены условия, при которых механические напряжения в пленках Nb минимальны и изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода)  $R_j/R_n > 40$ . Найденные условия и режимы напыления использовались автором для изготовления туннельных переходов с плотностью тока до  $10 \text{ кА/см}^2$ , размытием щелевой особенности  $\delta V_g < 150 \text{ мкВ}$  и разбросом параметров по подложке порядка 10 % для различных сверхпроводниковых устройств (приемников, СКВИДов и цифровых схем) [A2, A4 - 5, A8, A13, A43, A49 - 50]. Это позволило создать ряд практических устройств, в частности серию малошумящих приемников [A3, A9, A12 - 20, A26-36, A44, A47, A56 - 59], успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия) [A117].

Созданная и оптимизированная автором технология изготовления СИС переходов субмикронного размера и многослойных СВЧ микросхем на их основе описана в работах [A88, A11]; в работах по созданию приемных устройств на базе этих микросхем (в том числе микросхем спектрометра нового поколения для международного проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата) [A23 - 25, A37 - 39, A45 - 46, A51 - 55, A60 - 72, A89 - 96, A98 - 100, A104, A106 - 109, A118 - 121, A124 - 134] автором проведено изготовление и предварительное тестирование микросхем интегрального приемника.

В работах [A102, A103] автор принимал участие в оптимизации технологии и изготовлении экспериментальных образцов.

В работах [A97, A101, A105, A112 - 116, A122, A123] автором предложена и апробирована новая технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на

основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. В работе [A92] автором были разработаны и проверены новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров с помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки.

Работы автора докладывались на международных и российских конференциях: Applied Superconductivity Conference (ASC' 1988, 1990, 92, 94, 96, 98, 2000, 02, 04, 06), International Superconductive Electronics Conference (ISEC' 1991, 93, 95, 99, 2005, 2007), International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT' 1993, 95, 96, 97, 98, 99, 2000, 02, 03, 05, 07, 08), European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS' 1993, 97, 2003, 2005) и публиковались в ведущих специализированных изданиях: Physical Review Letters, Applied Physics Letters, Physical Review B, Physica B, Physica C, Superconductor Electronics, Superconductor Science and Technology, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, ЖТФ, «Радиотехника и электроника», «Приборы и техника эксперимента», «Известия ВУЗов. Радиофизика» и другие. Всего по результатам работы подготовлено более 130 публикаций (статей и тезисов конференций), список основных публикаций приведен ниже. Эти публикации хорошо известны специалистам, на них имеются многочисленные ссылки в научной периодике. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

## П5. Аннотация.

Представлен цикл работ по оптимизации технологии изготовления стабильных и воспроизводимых туннельных переходов на основе структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронного размера; изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и под щелью (характеристика качества туннельного перехода)  $R_j/R_n > 40$ . Использование изготовленных автором приемных структур позволило получить шумовую температуру приемника 70 К на частоте 100 ГГц. Автором разработана технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках, что позволило создать серию малошумящих приемников, успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Швеция) и Метсахови (Финляндия).

Создана технология изготовления СИС переходов субмикронного размера для многослойных СВЧ микросхем, работающих в диапазоне частот 100-700 ГГц. Данная технология позволяет получать СИС переходы с плотностью тока до  $10 \text{ кА/см}^2$ , размытием щелевой особенности  $\delta V_g < 150 \text{ мкВ}$  и разбросом параметров по подложке порядка 10 %. Впервые изготовлена микросхема сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), объединяющая в себе СИС смеситель с квазиоптической антенной и сверхпроводящий генератор на потоке джозефсоновских вихрей, шумовая температура которого на частоте 480 - 520 ГГц составила 100 К. Разработана технология изготовления микросхем интегрального приемника, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

Были изготовлены и исследованы микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника реализована шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Первый тестовый полет проведен в июне 2008 г. на полигоне Терезина в Бразилии.

Впервые предложена конструкция и разработана технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана.

Разработаны новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе. С помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки изготовлены и измерены туннельные переходы с площадью перехода вплоть до 0.03 мкм<sup>2</sup> и  $R_j/R_n > 10$ .

## **Глава 1. Введение**

Явление сверхпроводимости было открыто еще в 1911 году, однако сверхпроводниковая электроника зародилась только в 1960-е годы после открытия эффекта Джозефсона. Этот эффект был теоретически предсказан в 1962 году, а спустя два года подтвержден экспериментально в работе И.К.Янсона, В.М. Свистунова и И.М. Дмитренко, которые впервые наблюдали так называемую джозефсоновскую генерацию. Квантовый макроскопический эффект Джозефсона, описывающий своеобразные нелинейные процессы протекания сверхпроводящего и быстро осциллирующего тока куперовских пар через слабые связи, позволил создать целый класс сверхпроводниковых приборов для приема и обработки информации.

### **1.1 Основы сверхпроводниковой электроники.**

Физические объекты, в которых имеет место эффект Джозефсона, сейчас принято называть джозефсоновскими переходами, или джозефсоновскими контактами. Они являются элементной базой сверхпроводниковой электроники. Джозефсоновские переходы представляют собой некоторую слабую связь между двумя сверхпроводниками. Наиболее часто используемые на практике типы слабой связи – это: 1) туннельные переходы, в которых связь между двумя пленочными сверхпроводниками осуществляется через очень тонкий (десятки ангстрем) слой изолятора между ними – СИС структуры; 2) «сэндвичи» - два пленочных сверхпроводника, взаимодействующие через тонкий слой (сотни ангстрем) нормального металла – СНС структуры; 3) структуры типа мостик, представляющие собой узкую сверхпроводящую перемычку (мостик) ограниченной длины между двумя массивными сверхпроводящими электродами [1,2].

Совокупность экспериментальных фактов о сверхпроводимости убедительно показывает, что при охлаждении ниже  $T_c$  проводник переходит в новое состояние, качественно отличающееся от нормального. Исследуя различные возможности объяснения свойств сверхпроводника, особенно эффекта Мейснера, немецкие учёные, работавшие в Англии, Г. и Ф. Лондоны (1934) пришли к заключению, что сверхпроводящее состояние является макроскопическим квантовым состоянием металла. На основе этого представления они создали феноменологическую теорию, объясняющую поведение сверхпроводников в слабом магнитном поле — эффект Мейснера и отсутствие сопротивления. Обобщение теории Лондонов, сделанное Гинзбургом и Ландау (1950), позволило рассмотреть вопросы, относящиеся к поведению сверхпроводников в сильных магнитных полях. При этом было объяснено огромное количество экспериментальных данных и предсказаны новые важные явления. Убедительным подтверждением правильности исходных предпосылок упомянутых теорий явилось открытие эффекта квантования магнитного потока, заключённого внутри сверхпроводящего кольца. Из уравнений Лондонов следует, что магнитный поток в этом случае может принимать лишь значения, кратные кванту потока  $\Phi_0 = hc/e^*$ , где  $e^*$  — заряд носителей сверхпроводящего тока,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света. В 1961 Р. Долл и М. Небауэр [3], независимо, Б. Дивер и У. Фейроенк (США) [4] обнаружили этот эффект. Оказалось, что  $e^* = 2e$ , где  $e$  — заряд электрона. Найденная в опытах величина заряда частиц, создающих своим движением сверхпроводящий ток ( $e^* = 2e$ ), подтверждает эффект Купера, на основе которого в 1957 Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер (США) и Н.Н. Боголюбов (СССР) построили последовательную микроскопическую теорию сверхпроводимости [5]. Согласно Куперу, два электрона с противоположными спинами при определённых условиях могут образовывать связанное состояние (куперовскую пару). Заряд такой пары равен  $2e$ . Пары обладают нулевым

значением спина. В отличие от нормальных электронов, имеющих спин  $\frac{1}{2}$  и поэтому подчиняющихся статистике Ферми-Дирака, куперовские пары подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна и конденсируются на одном, нижнем энергетическом уровне. Средний размер куперовской пары, называемый длиной когерентности

$$\xi_0 = \frac{\hbar v_F}{2\pi^2 \Delta(0)}, \quad \Delta(0) \approx 3.5kT_c,$$

где  $v_F$  - скорость электронов на поверхности Ферми ( $\sim 10^8$  см/с), а  $\Delta(T)$  – характерная энергия связи электронов в паре, называемая шириной энергетической щели. Характерной особенностью куперовских пар является их относительно большой размер (порядка 100 нм), намного превышающий среднее расстояние между парами (порядка межатомных расстояний). Такое сильное пространственное перекрытие пар означает, что вся совокупность (конденсат) куперовских пар описывается в квантовой механике единой волновой функцией. При  $T = 0$  связаны в пары все электроны проводимости. Энергия связи электронов в паре весьма мала: она равна примерно  $3,5 kT_c$ , где  $k$  — постоянная Больцмана. Для типичных сверхпроводников (свинца, ниобия с  $T_c \sim 10$  К)  $\Delta$  имеет порядок 1-2 мэВ. При разрыве пары, происходящем, например, при поглощении кванта электромагнитного поля или кванта звука (фонона), в системе возникают возбуждения. При отличной от нуля температуре имеется определённая равновесная концентрация возбуждений, она возрастает с температурой, а концентрация пар соответственно уменьшается. Энергия связи пары определяет так называемую щель в энергетическом спектре возбуждений, то есть минимальную энергию, необходимую для создания отдельного возбуждения. Природа сил притяжения между электронами, приводящих к образованию пар, вообще говоря, может быть различной, хотя у всех известных сверхпроводников эти силы определяются взаимодействием электронов с фононами.

Наличие слабой электрической связи между сверхпроводящими электродами обусловлено слабым перекрытием волновых функций куперовских пар электродов, в результате чего такой контакт также является сверхпроводящим, однако значение плотности его критического тока намного (на несколько порядков) меньше плотности критического тока электродов  $j_c \approx 10^8 \text{ A/cm}^2$ . Для СИС и СНС структур плотность критического тока джозефсоновских переходов обычно лежит в диапазоне  $j_k$  от  $10^1$  до  $10^5 \text{ A/cm}^2$ , а их площадь  $S$  в рамках современной технологии может быть сделана от нескольких сот до долей квадратного микрона. Поэтому критический ток таких джозефсоновских элементов  $I_c = j_k S$  может быть от нескольких миллиампер до нескольких микроампер.

В целом можно отметить три следствия проявления квантовой когерентности бозе-конденсата куперовских пар в макроскопическом масштабе: сам факт наличия сверхтока в сверхпроводнике, эффект Джозефсона в слабых связях сверхпроводников [6] и эффект квантования магнитного потока.

Величина постоянного сверхтока  $I_s$  через джозефсоновский переход является периодической функцией разности фаз волновых функций электродов  $\varphi = \chi_1 - \chi_2$ , называемой джозефсоновской фазой. Таким образом,

$$I_s = I_c \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $I_c$  – критический ток контакта, зависящий от физической природы и размеров слабой связи.

При отсутствии тока через джозефсоновский переход  $\varphi = 0$  (с точностью до  $2\pi n$ ), а при протекании максимального сверхтока, равного  $I_c$ , джозефсоновская фаза  $\varphi = \pi/2$ . При протекании постоянного тока  $I < I_c$  напряжение на контактах равно нулю. Это явление носит название *стационарного эффекта Джозефсона*.

*Нестационарный эффект Джозефсона* ( $d\varphi/dt \neq 0$ ) имеет место, когда, например, через джозефсоновский переход пропускается ток  $I > I_c$ . В этом

случае в переносе тока  $I$  через джозефсоновский переход кроме сверхтока  $I_s$  будет участвовать также нормальная компонента  $I_n$ , которая представляет собой ток нормальных электронов. Протекание нормальной и, следовательно, диссипативной компоненты тока обуславливает появление на джозефсоновском переходе падения напряжения

$$V = I_n R_n, \quad (2)$$

где  $R_n$  - сопротивление перехода в нормальном состоянии, определяемое геометрическими размерами структуры, прозрачностью ее границ и электрическими свойствами материала слабой связи. В силу основного соотношения Джозефсона

$$d\varphi/dt = 2eV/\hbar, \quad (3)$$

в этом случае будут иметь место периодическое изменение во времени сверхтока  $I_s$ . Таким образом, сверхток осциллирует с джозефсоновской частотой:

$$f = 2eV/\hbar \quad (4)$$

Напряжение на джозефсоновском элементе  $V(t) = I_n(t)R_n$  также будет осциллировать во времени с частотой  $f$ , и этот процесс носит название джозефсоновской генерации.

Основными типами источников флуктуаций в джозефсоновских переходах являются тепловые, дробовые и внешние («наводка»). Их описывает флуктуационная компонента тока  $I_f(T)$ .

В случае, если не только  $V$ , но и производная  $dV/dt \neq 0$ , становится существенным ток смещения:

$$I_D = C \cdot dV/dt, \quad (5)$$

где  $C$  - собственная емкость перехода, степень влияния которой на процессы в джозефсоновских структурах определяется параметром [7,8]:

$$\beta = (2e/\hbar) \cdot I_c R_n C, \quad (6)$$

$\beta$  называется параметром емкости или параметром Мак-Камбера -Стюарта.

Таким образом, полный ток, протекающий через джозефсоновский переход, может быть записан в таком виде [1]:

$$I = I_s(\varphi) + I_n(V) + I_D + I_f(T). \quad (7)$$

Эквивалентная схема джозефсоновского перехода показана на рис. 1.1.

Наиболее важной и, вместе с тем, наиболее легко измеряемой характеристикой джозефсоновского перехода является его вольт-амперная характеристика (ВАХ), представленная на рис. 1.2. ВАХ представляет собой зависимость напряжения на джозефсоновском элементе  $V$  от задаваемого через него тока  $I$ . Эта характеристика отражает внутреннюю динамику джозефсоновского перехода, непосредственное наблюдение которой крайне затруднено из-за очень высокой частоты джозефсоновской генерации: характерная джозефсоновская частота находится в диапазоне десятков и сотен гигагерц. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского элемента состоит из сверхпроводящей или S-ветви, для которой  $V = 0$ , и двух резистивных или R-ветвей, где  $V \neq 0$ . При отсутствии емкости R-ветви представляют собой в резистивной модели ветви гиперболы. Учет конечной емкости перехода, влияние которой, как уже было сказано выше, характеризуется параметром  $\beta$ , приводит к неоднозначной, гистерезисной ВАХ.

Шунтирующее действие емкости обуславливает монотонное уменьшение амплитуды осцилляций напряжения по мере увеличения частоты джозефсоновской генерации. В случае туннельного джозефсоновского перехода его ВАХ характеризуется двумя основными особенностями: глубоким гистерезисом вследствие больших значений емкости  $C$  и специфической формой резистивной ветви ВАХ, обусловленной туннелированием квазичастиц (нормальных электронов) в такой структуре с учетом специфики энергетического спектра сверхпроводников.

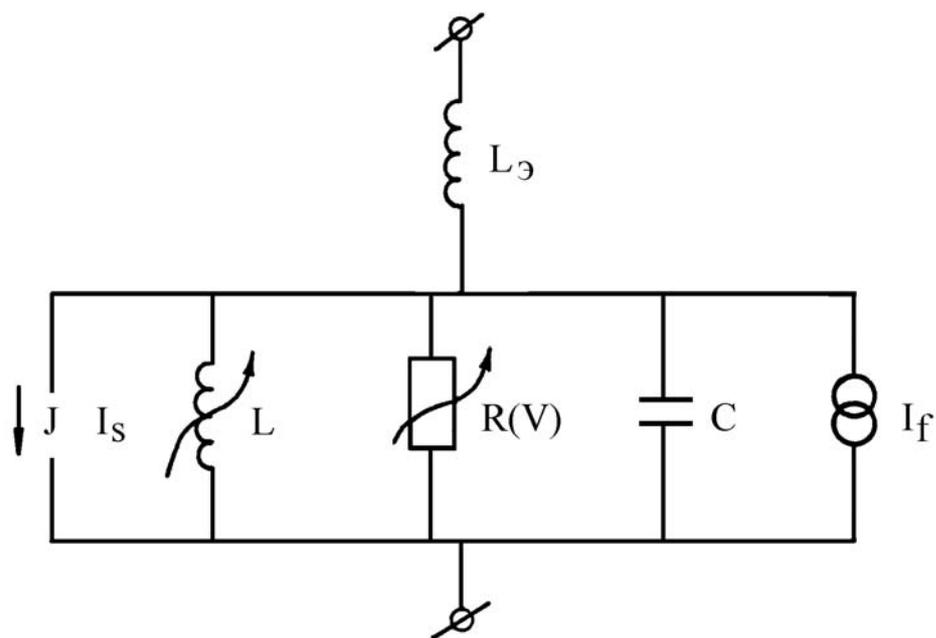


Рис. 1.1 Эквивалентная схема джозефсоновского контакта.  $L_{\Theta}$  – индуктивность подводящих электродов, другие обозначения даны в тексте.

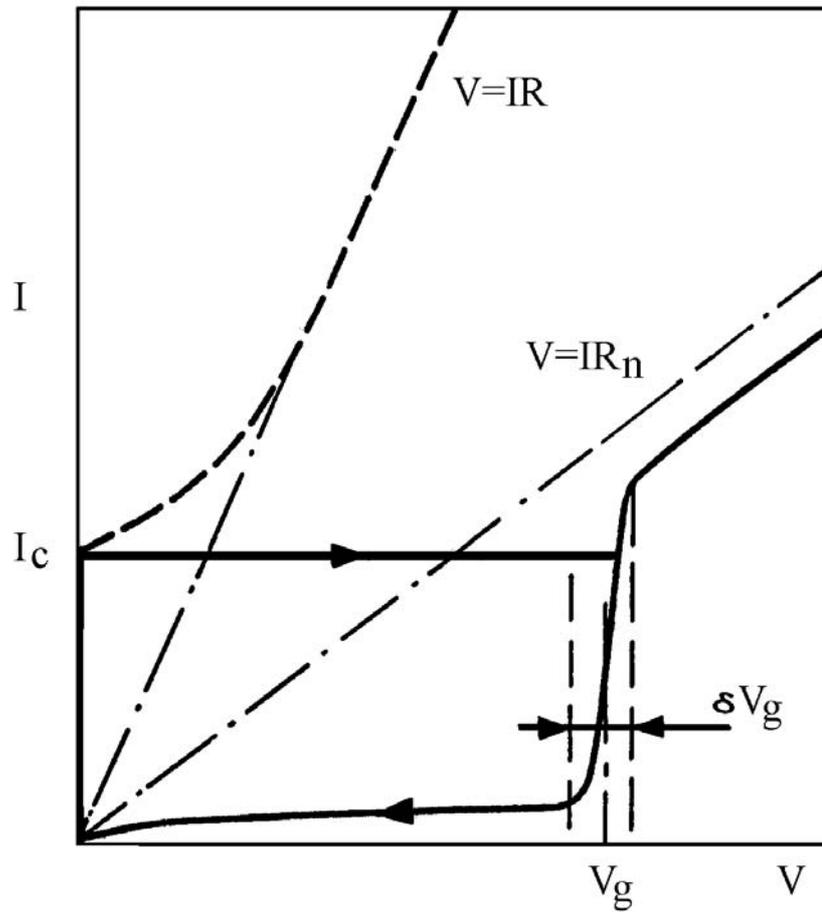


Рис. 1.2 Схематическое изображение ВАХ джозефсоновского контакта. Сплошной линией показана ВАХ СИС перехода с большой емкостью, пунктир – характеристика перехода с малым влиянием емкости.

В сверхпроводниковой электронике применяются квантовые интерферометры. Наиболее распространен двухконтактный интерферометр, представляющий собой сверхпроводящее кольцо индуктивностью  $L$ , замкнутое двумя джозефсоновскими переходами. Такое устройство обладает свойствами, близкими к свойствам одиночного контакта, но с критическим током, зависящим от внешнего магнитного поля. Основным параметром интерферометра, называемый еще безразмерной индуктивностью, можно записать как  $l = 2\pi LI_c/\Phi_0$ . При  $l < 1$ , имеет место сильная модуляция критического тока магнитным полем; при  $l \geq 1$  модуляция уменьшается, но оказывается возможным существование нескольких устойчивых стационарных состояний. Это значит, что джозефсоновские переходы могут впускать или выпускать из сверхпроводящего кольца интерферометра одиночные кванты магнитного потока [9].

Для ряда задач большой интерес представляют распределенные джозефсоновские переходы, у которых длина перехода настолько велика, что разность фаз между электродами может меняться по длине перехода. Свойства распределенных джозефсоновских переходов близки к свойствам многоконтактных интерферометров.

Таким образом, джозефсоновские контакты представляют собой сильно нелинейные элементы с необычной электродинамикой, обладающие малым энерговыделением ( $\sim 10^{-6}$  Вт), высоким быстродействием ( $\sim 10^{-12}$  с) и малыми собственными шумами ( $T_{эфф} < 10$  К) [1, 10].

Первыми сверхпроводящими контактами, для которых был предсказан и экспериментально обнаружен эффект Джозефсона, были туннельные СИС переходы – два сверхпроводящих электрода, разделенных тонким слоем изолятора. Слабая связь этих электродов создается за счет туннелирования электронов через слой изолятора, толщина которого составляет 1-2 нм. Достоинством туннельных переходов является практически синусоидальная зависимость сверхтока от разности фаз и близкое к максимально

возможному значению характерного напряжения  $V_c$ . Нормальное сопротивление  $R_n$  экспоненциально зависит от толщины туннельного барьера, а  $V_c = I_c R_n$  зависит от материалов электродов.

В зависимости от области применения СИС переходов существуют разные требования к их параметрам и характеристикам. Так для устройств на квазичастичной нелинейности основными являются малость размытия щели  $\delta V_g$  и малые токи утечки ниже щели ( $\sim 1/R_j$ ). Для систем, использующих джозефсоновскую зависимость сверхтока от разности фаз, нужны переходы с безгистерезисной характеристикой ( $\beta \approx 1$ ). Однако для всех применений существуют общие требования – это возможность изготовления переходов с заданными и контролируемыми параметрами, стабильность при многократных термоциклированиях от комнатной до гелиевой температуры гелия, хорошая воспроизводимость и малый разброс параметров на подложке, что особенно важно для многоэлементных структур.

## **1.2 Краткий обзор развития технологии СИС переходов.**

Первые туннельные переходы изготавливались на основе термически окисленных «мягких» сверхпроводников (Pb, In, Sn) с характерными размерами переходов  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> и плотностью тока 1-10 А/см<sup>2</sup> [11]. Такие переходы были просты в изготовлении, но не обладали необходимой стабильностью к термоциклированиям и механической прочностью. В 70-х годах прошлого столетия фирма IBM (США) достигла значительных результатов в изготовлении СИС переходов на основе мягких материалов, создав так называемую «свинцовую технологию» [12,13]. В качестве базового электрода они использовали сплав из последовательно напыленных Au, Pb и In. Туннельный барьер формировался методом окисления в тлеющем ВЧ разряде в атмосфере кислорода. В качестве верхнего электрода использовался сплав свинца с индием или сплав свинца с висмутом [14, 15].

Данная технология позволяла получать воспроизводимые туннельные переходы с плотностью тока  $3 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup> и размерами 3\*3 мкм. Но эти переходы также обладали малой механической прочностью и изменяли свои туннельные характеристики в процессе хранения.

Дальнейшее развитие технологии по созданию надежных и воспроизводимых СИС переходов привело к применению тугоплавких материалов, таких как, например, ниобий, обладающий хорошей стабильностью и высокой критической температурой. Туннельный барьер в таких структурах формировался методом окисления нижнего электрода [16, 17]. Такие переходы обладали хорошей воспроизводимостью, достаточной механической прочностью и устойчивостью к термоциклированиям от комнатной температуры до 4.2 К.

К существенным недостаткам СИС переходов Nb/Nb<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Nb надо отнести:

- 1) большие токи утечки, которые связаны с неоднородностью окисла ниобия. Туннельные барьеры состояли не только из высшего пентооксида ниобия, но и из субоксидов ниобия, которые не являются диэлектриками;
- 2) большую величину удельной емкости, которая связана с большой диэлектрической постоянной окисла ниобия.

Для решения проблем, связанных с применением в качестве туннельного барьера окисла ниобия, в начале 80-х годов прошлого столетия стали осуществляться попытки применения в качестве туннельного барьера искусственных прослоек. Были исследованы различные материалы: ZrO<sub>x</sub>, TaO<sub>x</sub>, YbO<sub>x</sub>, AlO<sub>x</sub>, SiO<sub>2</sub> [18 - 22]. Были также предложены методы, позволяющие изготавливать СИС переходы в едином вакуумном цикле – метод селективного анодного окисления ниобия (SNAP) и метод селективного травления ниобия (SNEP) [23, 24]. Эти методы позволили значительно улучшить качество СИС переходов: при напылении всех трех

слоев без разрыва вакуума поверхность нижнего электрода не загрязняется, поэтому удается избежать процесса ВЧ- травления, нарушающего структуру поверхностного слоя.

В настоящее время используются изготовленные полностью из тугоплавких материалов СИС переходы на основе структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb [24 - 31]. Туннельный барьер в таких структурах формируется методом окисления алюминия в среде чистого кислорода. Тонкая пленка Al ( $d \sim 5-7$  нм) равномерно покрывает поверхность ниобия, предотвращая его окисление, и образует на поверхности однородный окисел Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, имеющий небольшую диэлектрическую постоянную ( $\epsilon_{\text{AlO}_x} = 8 \div 10$ ) [24]. Переходы Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb имеют ряд преимуществ перед другими типами СИС переходов: 1) малые токи утечки; 2) низкую удельную емкость (в зависимости от плотности тока составляет 0,04 - 0,08 пФ/мкм<sup>2</sup>; 3) хорошую воспроизводимость параметров; 4) высокую стабильность к термоциклированию; 5) неизменяемость туннельных характеристик в процессе длительного хранения.

На основе структур Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb стало возможным реализовать широкий спектр сверхпроводниковых приборов с рекордными характеристиками: высокочувствительные приемники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн; интегральные приемники, объединяющие гетеродин, смеситель и антенну на одном чипе; СКВИД усилители и магнетометры; устройства быстрой одноквантовой логики.

Дальнейшее развитие ниобиевой технологии идет по пути разработки процедур контроля качества слоев и туннельного барьера, уменьшения разброса параметров по подложке, изготовление переходов субмикронных размеров, использования метода планаризации при изготовлении многослойных схем, использования двухбарьерных структур, а также переход на новые материалы (NbN, NbTiN, и т. д.).

### 1.3 Устройства сверхпроводниковой электроники.

На основе явлений в сверхпроводниковых микроструктурах впервые были созданы новые высокочувствительные устройства для измерения предельно малых магнитных полей и сверхслабых электромагнитных колебаний мм и субмм диапазонов длин волн, а также сверхбыстрые элементы с малыми энергиями переключения для цифровых микросхем.

Смесители на основе нелинейности туннельного тока квазичастиц в СИС переходах являются наиболее чувствительными приемными элементами мм и субмм диапазонов длин волн [32-39]. Предельная чувствительность таких устройств ограничена только квантовым пределом  $hf/k$ , причем в настоящее время шумовая температура практических устройств лишь в 3 - 5 раз превосходит этот предел [35 - 39] (рис. 1.3, 1.4). Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами. При воздействии на СИС переход высокочастотной накачки (гетеродина) происходит туннелирование нормальных электронов (квазичастиц), стимулированное СВЧ фотонами. Этот квантовый процесс позволяет получать преобразование частоты вниз с усилением и шумами, ограниченными лишь квантовыми флуктуациями. СИС смесители на основе структур Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb признаны на сегодня наиболее эффективными гетеродинными детекторами для радиоастрономии при изучении спектров межзвездного излучения в диапазоне частот 100 - 1000 ГГц.

Поскольку время накопления для приема сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого приемника, СИС приемники позволяют значительно сократить время наблюдения, что важно для современных дорогостоящих комплексов. В настоящее время СИС

приемники используются в качестве штатных устройств на большинстве радиотелескопов (таблица 1.1).

*Сверхпроводниковый СВЧ генератор излучения.* Новые возможности в использовании сверхпроводникового приемника открывает джозефсоновский генератор, поскольку он полностью совместим со смесительным элементом, компактен, потребляет малую мощность и может перестраиваться по частоте путем изменения напряжения постоянного смещения [40, А55].

Первый джозефсоновский гетеродин был реализован в интегральном сверхпроводниковом приемнике с использованием вязкого движения вихрей (флаксонов) в СИС переходе большого размера - Flux Flow Oscillator (ФФО). Другой вариант интегрального джозефсоновского гетеродина был осуществлен на цепочке СИС переходов, соединенных короткими отрезками микрополосковой линии.

*Усилитель промежуточной частоты на сквиде.* К наиболее малошумящим усилителям, пригодным для диапазона в несколько гигагерц, относится сквид (сверхпроводниковый квантовый интерферометр), который может иметь температуру шума менее 1 К [А56]. Сквид представляет собой сверхпроводящее кольцо диаметром менее 100 мкм, в разрыв которого включены два джозефсоновских перехода. Сигнал поступает в сквид через входную катушку, выходной сигнал снимается в виде переменного напряжения на сквиде. В отличие от существующих усилителей сквид-усилитель имеет на много порядков меньшие габаритные размеры и потребляет ничтожно малую мощность, причем он полностью совместим (по технологии изготовления и температурным характеристикам) с остальными элементами сверхпроводникового приемника.

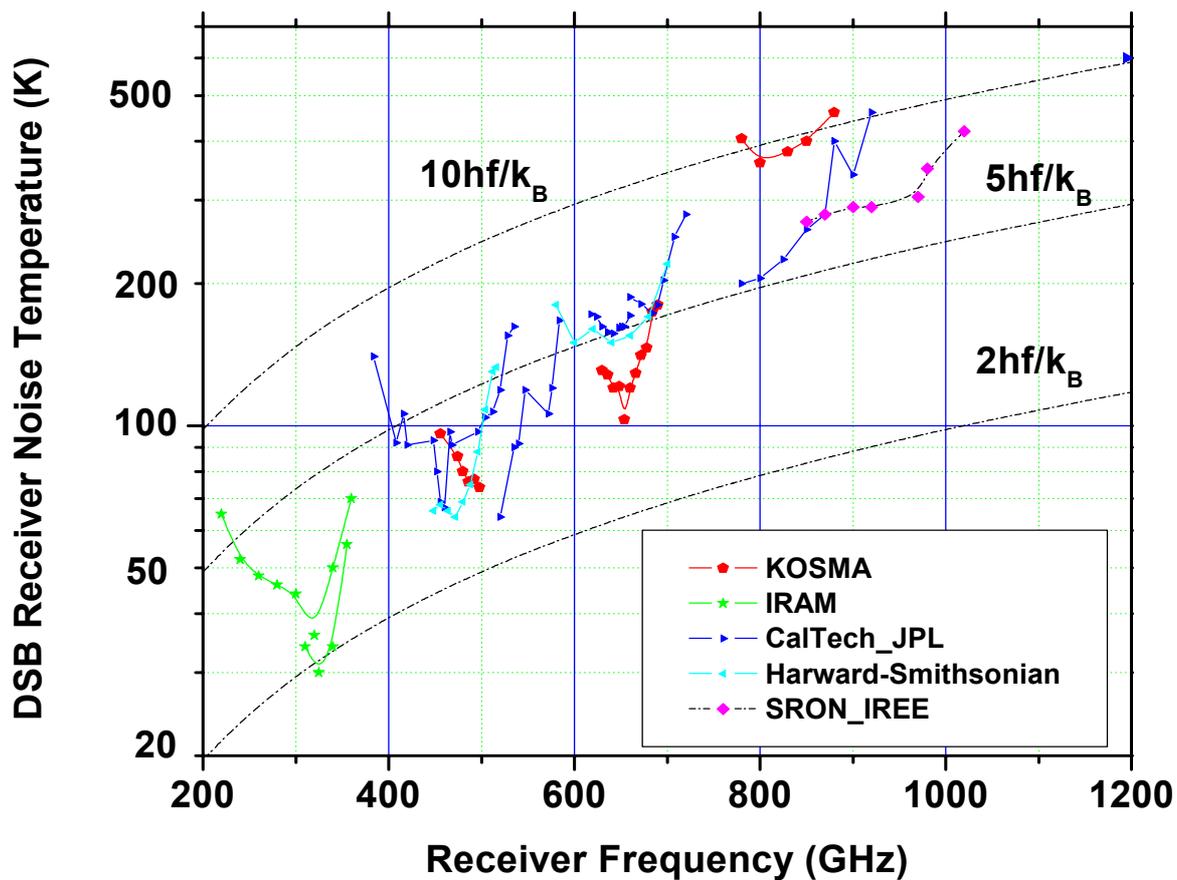


Рис. 1.3 Частотная зависимость шумовой температуры СИС приемников, созданных в различных научных центрах.

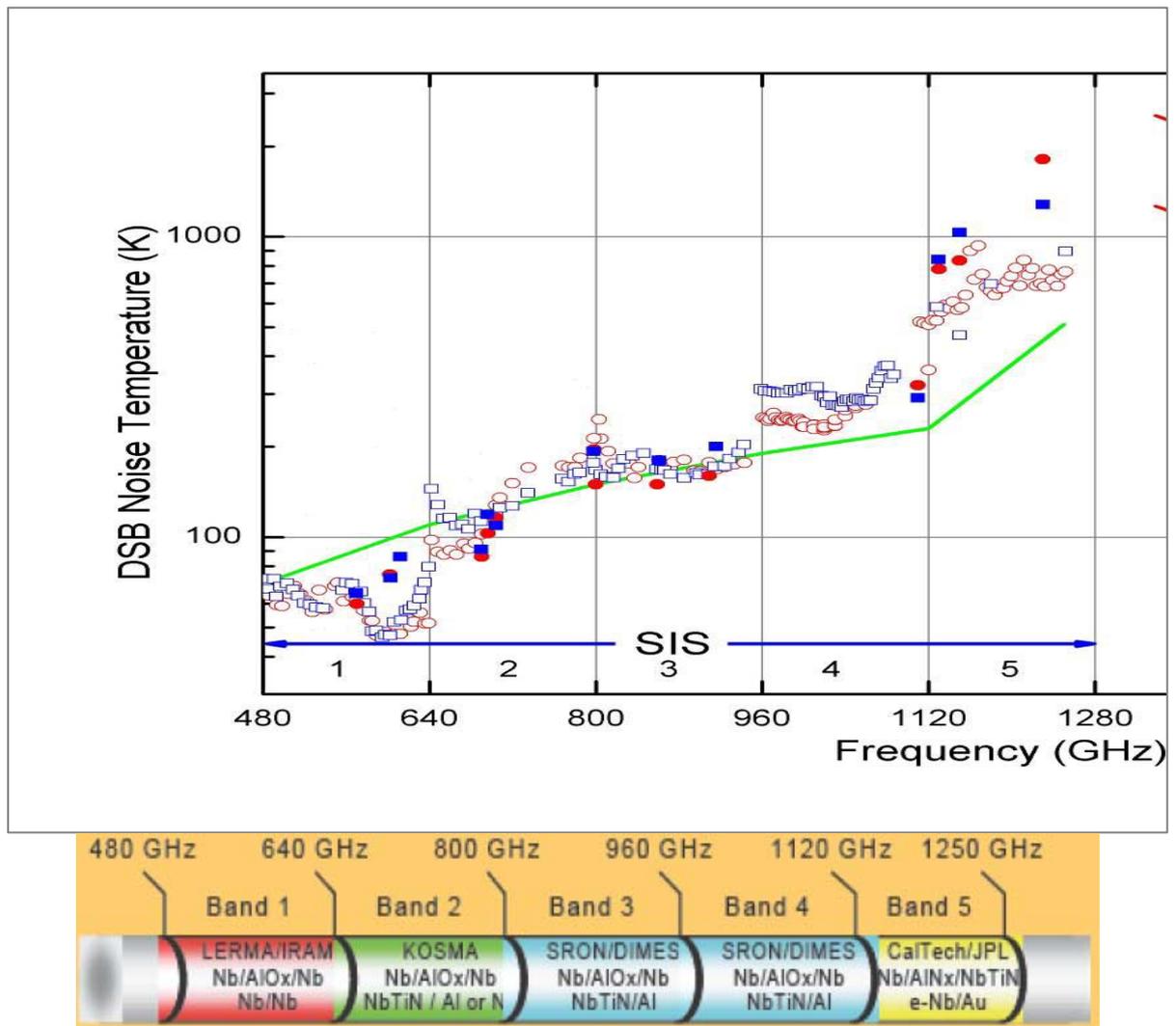


Рис. 1.4. Шумовая температура СИС приемников, разработанных для космической обсерватории Hershel – HIFI (запуск намечен на 2009 год). Данные измерений в лаборатории показаны незаполненными символами, сплошные символы – результаты после установки в систему космического телескопа [47].

**Таблица 1.1 Некоторые СИС приемники наземного базирования**

	Название	Организация, (место- положение)	Год	Диаметр антенны, м	Высота, м	Диапазон, ГГц	Тип приемника
ALMA	Atacama Large Millimeter Array	ESO/ NRAO (Chile)	2010	12 (всего 64 антенны)	5 000	35 - 850	СИС для $f > 150$ ГГц
APEX	Atacama Pathfinder EXperiment	Max-Planck Institute (Chile)	2003	12	5 000	200-1000	СИС приемники
AST/ RO	Antarctic Submillimeter Telescope	(South Pole, Antarctica)	1995	1.7 план - 10	2 900	150-820	СИС приемники
CSO	Caltech Submm Array	Mauna Kea (Hawaii, US)	1988	10.4	4 092		СИС приемники
JCMT	James Clerk Maxwell Telescope	Mauna Kea (Hawaii, US)		15	4 092		СИС приемники
SMA	Submillimeter Array	Mauna Kea (Hawaii, US)	2002	6 (8 антенн)	4 080	180-900	СИС приемники
SEST	Swedish-ESO Submm Telescope	La Silla (Chile)	1987	15	2 400	70-365	СИС приемники
	Nobeyama Observatory	Mt. Fuji (Japan)	1998	1.2	3 724	250-700	СИС приемники

*Цифровые устройства.* Сверхпроводниковые элементы давно рассматриваются как одна из наиболее перспективных структур для создания сверхбыстродействующих цифровых устройств. Это связано не только с чрезвычайно короткими временами процессов в таких элементах, но и с рекордно низкими значениями рассеиваемой мощности ( $10^{-6}$  Вт на один вентиль). Последнее обстоятельство очень важно, так как позволяет располагать вычислительные элементы достаточно плотно (вплоть до  $10^6$  вентилях на  $1 \text{ см}^2$ , поскольку мощность, отводимая жидким гелием без кипения  $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$ ). Поэтому в сверхпроводящих структурах учет конечной скорости передачи информации не будет приводить к заметному ухудшению быстродействия из-за очень плотной упаковки элементов, тогда как в полупроводниковых схемах уже при современном уровне технологии лимитирующим фактором становится не скорость переключения элемента, а его энерговыделение (невозможность располагать полупроводниковые элементы более плотно).

Идея использовать джозефсоновский переход для цифровых применений возникла еще в 70-х годах. Она была основана на нелинейности вольтамперной характеристики перехода, что привело к стандартному для полупроводниковой электроники 2-х уровневому представлению информации через наличие/отсутствие напряжения на контакте. Первые попытки реализации сверхпроводниковых цифровых элементов были предприняты в ИВМ, а после и в некоторых других научных лабораториях. Но несовершенство технологий и, самое главное, неудачный выбор логики привели к отказу от дальнейших попыток создания сверхпроводниковой электроники. И только в 1985 году, в МГУ, была предложена так называемая RSFQ (rapid single-flux-quantum) логика, получившая дальнейшее распространение. Данная логика реализуется на основе сверхпроводниковых джозефсоновских переходах с безгистерезисной ВАХ. В таких структурах

информация передается в виде коротких импульсов напряжения  $V(t)$  на джозефсоновском переходе, причем площадь таких импульсов:

$$\int V(t)dt = \Phi_0 = h/2e = 2.07 \text{ mV*ps} \quad (8)$$

В простейшем случае для регенерации импульсов используется одиночный сверхпроводниковый переход с малой емкостью ( $\beta < 1$ ), через который течет ток питания несколько меньший его критического тока. В этом случае в момент прихода на переход короткого импульса (пусть даже ослабленного по амплитуде) происходит регенерация такого импульса путем скачкообразного изменения разности фаз на переходе на  $2\pi$  (через переход проходит один квант магнитного потока). Первые устройства, основанные на этом принципе, были изготовлены и испытаны в ИРЭ РАН.

В ИРЭ РАН в течение ряда лет проводятся исследования по разработке и созданию сверхпроводниковых элементов и устройств на их основе. Для успешного проведения таких исследований требовалось разработать отечественную технологию изготовления сверхпроводниковых структур, что и явилось основной целью диссертационной работы.

#### 1.4 Постановка задачи исследования.

- Создание надежной технологии изготовления СИС переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронных размеров на различных типах подложек, с характеристиками, оптимизированными для реализации предельных параметров сверхчувствительных приемных устройств миллиметрового диапазона длин волн. Исследование влияния различных технологических параметров на качество переходов.

- Разработка технологии изготовления СИС переходов субмикронного размера и многослойных СВЧ микросхем на их основе. Реализация новой концепции интегрального приемника, объединяющей в одной микросхеме различные функциональные элементы: СИС смеситель с планарной антенной, распределенный джозефсоновский переход и элементы для их согласования. Разработка технологии и изготовление микросхем интегрального спектрометра на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN для международного проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата «TELIS».

- Исследование влияния различных материалов в многослойной структуре сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на их характеристики. Создание технологии изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию дополнительных слоев в структуре нижнего электрода.

- Разработка новых способов формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе с использованием методов электронно-лучевой литографии и химико-механической полировки. Исследование влияния технологических подходов на характеристики и разброс параметров многоэлементных схем средней степени интеграции.

## **Глава 2. Технология изготовления сверхпроводниковых структур Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb**

К началу диссертационной работы в нашей лаборатории уже велись работы по созданию технологии изготовления сверхпроводниковых структур. Были исследованы переходы на основе мягких материалов (Pb, In). В качестве туннельного барьера исследовались как естественные окислы ниобия, так и различные искусственные прослойки. Была разработана технология изготовления СИС переходов полностью из ниобия с искусственным барьером из окиси алюминия. Было показано, что для большинства сверхпроводниковых применений наиболее успешной и стабильной является технология изготовления структур Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb, а СИС переходы на основе такой структуры обладают уникальными параметрами, не изменяющие свои свойства при длительном хранении и термоциклированиях. Переходы изготавливались методом селективной анодизации ниобия (SNAP) [23] и селективного плазмо-химического травления (SNEAP) [24].

В этой главе будет описан технологический маршрут и режимы изготовления СИС переходов на основе Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb. Более детально будут рассмотрены ключевые этапы формирования СИС переходов: фотолитография, напыление пленок, анодизация, реактивно-ионное травление.

Схематический разрез и вид в плане сверхпроводникового туннельного перехода показан на рис.2.1.

### **2.1 Технологический маршрут и режимы изготовления СИС переходов.**

В большинстве случаев в качестве подложек для изготовления СИС переходов использовались пластины монокристаллического неокисленного кремния, применяемые в микроэлектронике. Обычно это были пластины

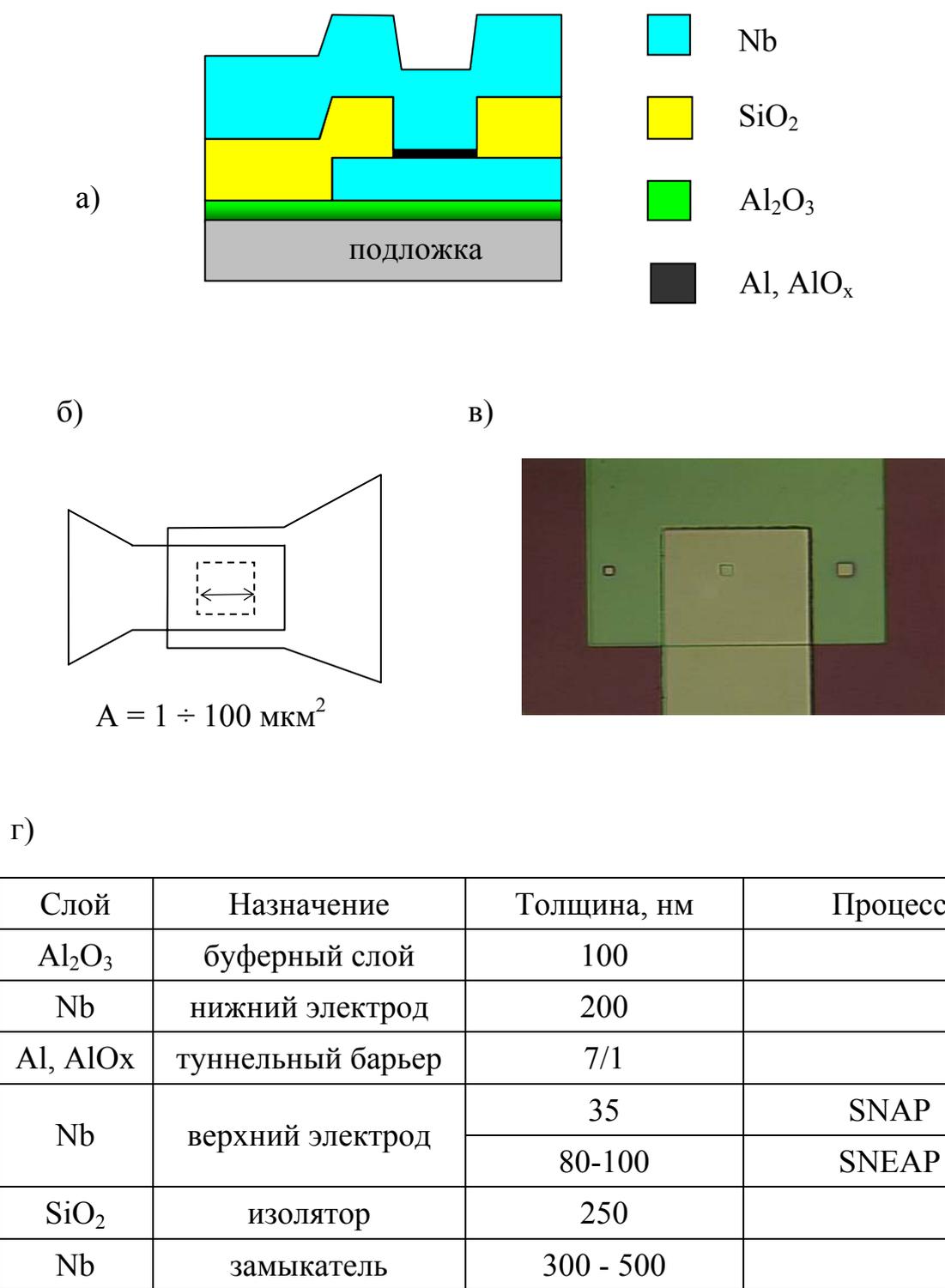
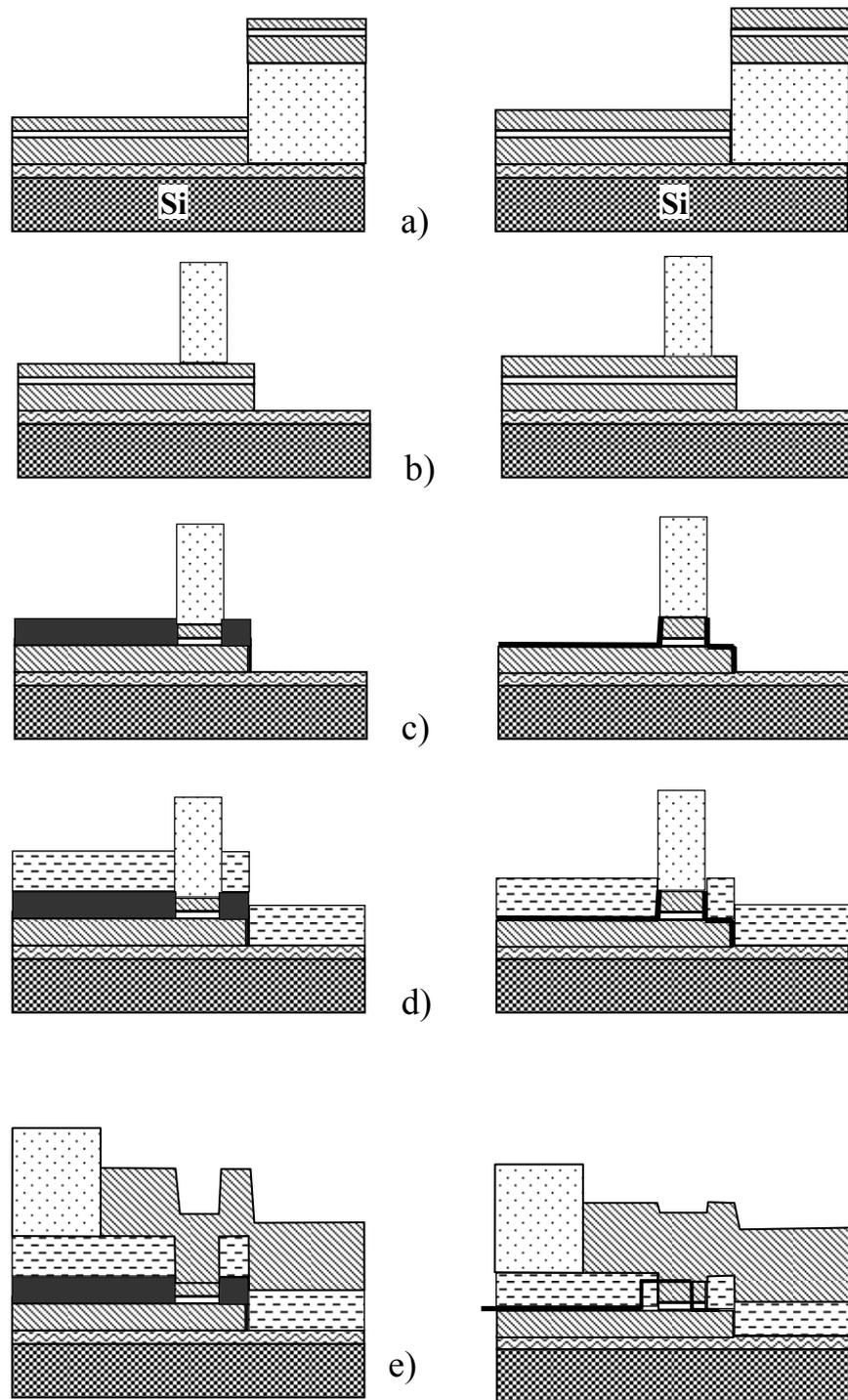


Рис. 2.1 Схематический разрез (а), вид в плане (б), фотография (в), основные слои туннельного СИС перехода (г).

кремния марки КДБ 100 (100); при низких температурах такой кремний является диэлектриком. Толщина пластин была обычно 0,4 – 0,45 мм; стандартные размеры подложки для отработки режимов и многих применений были 24\*15 мм. Последовательность технологических операций при изготовлении трехслойных структур методами селективной анодизации ниобия (SNAP) и селективного плазмо-химического травления (SNEAP) показаны на рис. 2.2.

На очищенную кремниевую подложку напылялся слой  $Al_2O_3$  толщиной 100 нм, являющийся защитным слоем при формировании переходов реактивно-ионным травлением. При SNAP процессе этот слой не является необходимым. Геометрия нижнего электрода формировалась методом «взрывной» литографии. Трехслойная структура напылялась в едином вакуумном цикле в установке фирмы *Leybold Heraeus L-560 UV* с давлением остаточных газов  $3 \cdot 10^{-8}$  мбар. Металлы напылялись магнетронным распылением. Базовый электрод состоял из 200 нм ниобия и 7 нм алюминия. После напыления нижнего электрода Nb проводилось напыление Al и его последующее термическое окисление при комнатной температуре в атмосфере чистого кислорода. После окончания окисления и необходимой откачки камеры проводилось напыление второй пленки Nb. Толщина верхнего электрода определялась возможностью проведения анодизации на последующих технологических этапах. После фотолитографии, определяющей размеры перехода, проводилось анодирование Nb верхнего электрода (SNAP процесс), в результате чего пленка ниобия, не закрытая фоторезистом, превращалась в анодный окисел. Анодирование проводилось до  $50 \div 60$  В.

Для получения СИС переходов использовалась также модификация метода селективного травления ниобия (SNEP) [24]. При этом процессе



  $\text{Al}_2\text{O}_3$    
  Nb   
   $\text{Nb}_2\text{O}_5$    
  Al,  $\text{AlO}_x$    
   $\text{SiO}_2$    
  фоторезист

Рис. 2.2 Последовательность операций при изготовлении СИС переходов методами SNAP (левая колонка) и SNEAP (правая колонка).

проводилось травление ниобия либо обычным методом плазмо-химического травления (PE), либо методом реактивного ионного травления (RIE) в смеси газов  $CF_4 + O_2$ . В результате полностью удалялись незащищенные резистом участки ниобия. Травление автоматически останавливалось на пленке алюминия. Далее проводилась «легкая» анодизация до напряжений  $10 \div 20$  В. Такой метод, использующий как плазмо-химическое травление ниобия, так и его анодизацию, называется SNEAP. На следующем этапе (и для SNAP, и для SNEAP процесса) напылялся дополнительный слой изоляции ( $SiO$  или  $SiO_2$ ); при этом использовалась та же маска, что и при анодизации и травлении. Такой процесс с использованием самосовмещенной маски позволяет не увеличивать площадь переходов, и в то же время значительно уменьшить дополнительную емкость за счет перекрытия электродов. Для избежания трудностей со взрывной литографией по оставшейся маске, осаждение изоляционного слоя проводится в два этапа с временным интервалом, достаточным для охлаждения. Суммарная толщина изоляции равна 250 нм. На последнем этапе наносилась ниобиевая разводка толщиной 350-400 нм, обеспечивающая контакт с верхним электродом.

## **2.2 Основные этапы изготовления СИС переходов.**

### **2.2.1 Фотолитография.**

Одним из определяющих технологических процессов в микроэлектронике в течение более 40 лет продолжает оставаться литография. Литография или микролитография, предназначена для создания топологического рисунка на поверхности монокристаллической кремниевой пластины. Базовый литографический процесс можно разделить на три этапа: 1 этап - формирование слоя резиста (включает в себя подготовку поверхности подложки, нанесение резиста и сушка резиста); 2 этап – передача рисунка на слой резиста (совмещение и экспонирование,

проявление резиста и вторая термообработка); 3 этап – передача рисунка на материал технологического слоя.

Различают прямую и обратную литографию. При прямой литографии пленка, в которой формируется рисунок, нанесена на подложку до формирования слоя резиста. Передача рисунка на пленку осуществляется травлением. Рисунок, получаемый на пленке, соответствует рисунку маски. При обратной литографии пленка, в которой необходимо получить рисунок, наносится поверх уже сформированной резистивной маски. Часть пленки удаляется вместе с маской («взрывная» литография), и на подложке остается требуемый рисунок пленки. Для «взрывной» литографии необходимо обеспечить соответствующую (с отрицательным наклоном) форму боковых стенок окон маски и сравнительно с пленкой толстый слой резиста. При обратной литографии рисунок, передаваемый на пленку, противоположен рисунку резистивной маски.

Наиболее важными контролируемыми параметрами при формировании резистивной маски являются ускорение и скорость нанесения резиста, температура и время сушки резиста, время экспонирования и интенсивность, концентрация и температура проявителя и время проявления. Изменения влажности и температуры воздуха, которые не контролируются в нашей чистой комнате, могут, однако, приводить к небольшому разбросу технологических параметров. Параметры основных этапов формирования стандартной резистивной маски и маски с нависающим профилем приведены ниже в таблице 2.1.

Оба этих процесса начинаются с жидкостной очистки поверхности пластин, в процессе которой необходимо удалить в первую очередь молекулярные органические и химически связанные с поверхностью загрязнения, а затем – остаточные ионные и атомарные. Для очистки (обезжиривания) подложек применяются органические растворители (ацетон, спирт). Для повышения эффективности и качества жидкостной очистки, кассету с подложками помещают в ультразвуковую ванну, дно и

стенки которой совершают механические колебания с УЗ-частотой. В жидкости возникают вихревые акустические потоки с высокими скоростями, которые интенсивно перемешивают жидкость, а также упругие волны (сгустки и разрежения за счет смещения частиц жидкости). Благодаря кавитации жидкость способна проникнуть в глубокие поры, углубления, которые при обычных методах остаются неочищенными. Подложки, предназначенные для изготовления сложных многослойных структур, к качеству поверхности которых предъявлялись особые требования, отмывались в горячем (80°C) растворе кислот: 110 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 96% и 110 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%; или 30 ml NH<sub>4</sub>OH 25%, 30 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% , 150 ml DI воды.

Затем пластины отмываются струей деионизованной (DI) воды (для очистки от остатков растворителей, а также для механического смывания пылинок и других частиц с поверхности подложек) и сушатся или на высокоскоростной центрифуге, или в потоке воздуха.

В нашей технологии мы используем два типа резиста: позитивный фоторезист *Microposit S1813 Shipley Corporation* и фоторезист *AZ5214E Hoest Clariant GmbH, Germany*. Резист наносится методом центрифугирования. Зависимости толщины резистов от частоты вращения центрифуги представлены на рис.2.3. Последующая сушка фоторезиста проводилась в сушильном шкафу при 90°C. Как уже говорилось выше, температура и время термообработки фоторезистов являются одними из основных критериев формирования резистивной маски, качество проведения которой влияет на все остальные операции фотолитографии.

В процессе сушки удаляется растворитель, и в пленке фоторезиста происходит сложный релаксационный процесс плотной упаковки молекул, уменьшающий внутренние напряжения и увеличивающий адгезию фотослоя к подложке. Растворитель при сушке необходимо удалять полностью, так как он экранирует фоточувствительные части молекул при экспонировании.

**Таблица 2.1 Параметры основных этапов формирования стандартной резистивной маски и маски с нависающим профилем**

<b>Стандартная резистивная маска</b>	<b>Резистивная маска с нависающим профилем</b>
- ультразвуковая очистка подложек	- ультразвуковая очистка подложек
- сушка сжатым воздухом	- сушка сжатым воздухом
- пары HMDC	- пары HMDC
- S 1813, 4000 rpm, 30 sec	- AZ5214E, 4000rpm, 30 sec
- сушка, 90°C, 30 мин	- сушка, 90°C, 30 мин
- засветка, 4 mW/cm <sup>2</sup> , 16 сек	- засветка, 4 mW/cm <sup>2</sup> , 16 сек
- проявление, MF312+H <sub>2</sub> O, 1:1, 30 с	- сушка, 120°C, 5 мин
- отмывка водой	- засветка, 4 mW/cm <sup>2</sup> , 40 сек
	- проявление, КОН, 17 сек
	- отмывка водой

При низких температурах адгезия фотослоя к подложке плохая, преобладает сцепление между собственными молекулами полимера (когезия). Этим объясняется отслаивание фотослоя при проявлении. При больших температурах в фоторезисте идет термополимеризация, что также ведет к необратимым явлениям. Для увеличения адгезии фотослоя к подложке использовался гексаметилдисилазан ( $C_6H_{19}NSi_2$ ), парами которого подложка обрабатывалась перед нанесением фоторезиста.

Формирование фотомаски – технологический этап, на котором в фотослое создается топологический рисунок. В процессе изготовления структур микросхем литография проводится несколько раз. Начиная со второй литографии, необходимо совмещать рисунок шаблона с рисунком на подложке, полученном при формировании предыдущего слоя. Совмещение выполняется визуально на той же установке, что и последующее экспонирование, путем наложения под микроскопом рисунков шаблона и подложки. Точность совмещения – одно из наиболее важных требований, предъявляемых к технологическому процессу изготовления микросхемы. Для совмещения шаблона с рисунком мы используем специальные топологические фигуры.

Экспонирование производилось на установках МА150 и МJB3НР фирмы “Karl Zuss”. Подбор оптимального времени экспонирования осуществлялся экспериментально с помощью подложек-спутников при разработке каждого нового технологического процесса, использовании нового комплекта шаблонов или новой партии фоторезиста, смене источника излучения, изменении толщины фотослоя. Правильно подобрать время экспонирования можно только при учете взаимосвязи режимов экспонирования и проявления. Это объясняется тем, что при одинаковой экспозиции  $H = Et$ , но при различных соотношениях освещенности  $E$  и времени  $t$  фотохимические процессы протекают по-разному, и скорость проявления различна.

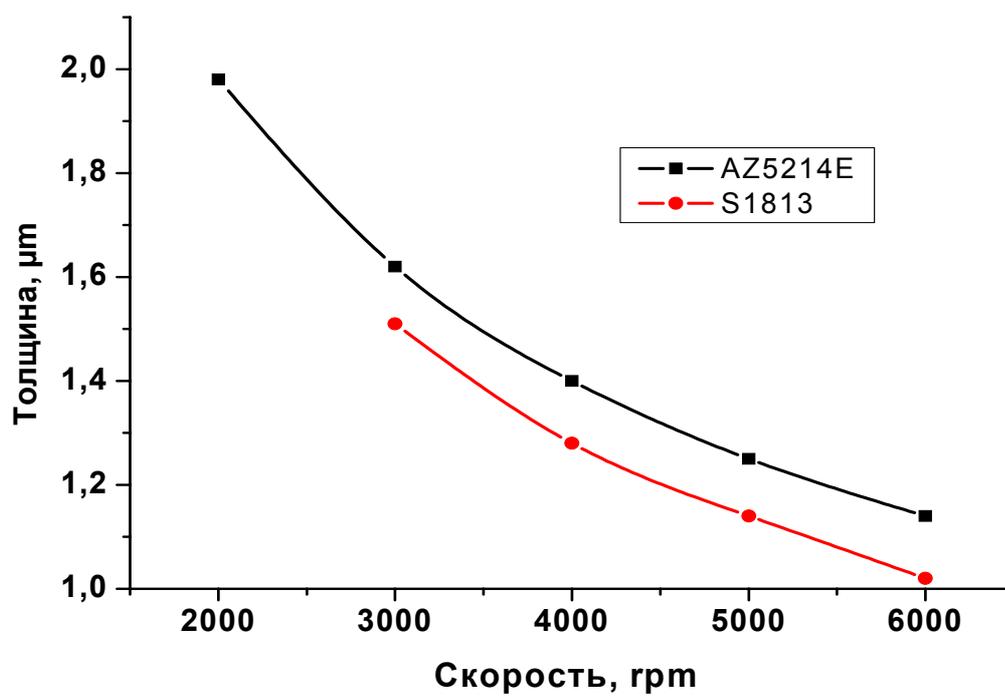


Рис. 2.3. Зависимости толщины резисторов от частоты вращения центрифуги

После проявления подложка тщательно проверяется под микроскопом. Если резистивная маска используется для последующего плазмохимического травления, то во избежание повреждения маски и неконтролируемого подтравывания, мы использовали дополнительную сушку при  $120^{\circ}\text{C}$  в течение 7 мин. Если фотомаска используется для анодизации и необходима хорошая адгезия «окна» из резиста, то также требуется дополнительная термообработка. При формировании резистивной маски для последующего напыления изоляционного слоя, мы использовали специальный проявитель (например, MF312), который не повреждает Al и позволяет избежать нежелательного подтравывания барьерного слоя Al/AlO<sub>x</sub>. При формировании резистивной маски под «взрыв» для напыления ниобия дополнительная сушка не производится, что позволяет избежать оксидирования верхнего слоя ниобия трехслойки. Оксидирование может привести к образованию нежелательного нормального слоя (дополнительного СНС-перехода) между верхним Nb трехслойки и Nb верхнего электрода.

При формировании резистивной маски с нависающим профилем мы используем резист *AZ5214E*. Хотя это и позитивный резист (и даже может использоваться как обычный позитивный резист) он содержит в себе фотоактивные компоненты, способные изменяться, превращая его в негативный (“*image reversal*” или *IR*). Как правило, *AZ5214E* фоторезист используется в *IR*- виде.

Способность менять свой тип этот резист получил благодаря наличию специальных присадок, которые становятся активными при температуре выше  $110^{\circ}\text{C}$ , и что особенно важно, только в проэкспонированной области резиста. Таким образом, после дополнительной сушки засвеченные участки фоторезиста становятся нерастворимыми в проявителе, в отличие от неэкспонированных участков, где резист продолжает вести себя как обычный незасвеченный позитивный резист, и после последующего полного экспонирования (без маски) удаляется в проявителе. Самым важным и

критичным параметром в процессе формирования такой резистивной маски является температура второй термообработки, которая должна поддерживаться в пределах  $\pm 1^\circ\text{C}$  от выбранной (в нашем случае  $120^\circ\text{C}$ ).

Рассматривая возможность применения обычного литографического процесса для получения рисунков с размерами субмикронного масштаба необходимо определить критические ступени, которыми в предлагаемой схеме являются процесс экспонирования и травления. Минимальный размер рисунка, который может быть разрешен с помощью той или иной оптической системы может быть оценен с использованием известной формулы

$$\sigma = k_1\lambda/NA,$$

где  $\sigma$  - разрешение,  $k_1$  – константа, зависящая от типа использованного резиста, типа литографического процесса,  $\lambda$ - длина волны света,  $NA$  – численная апертура оптической системы.

Формула показывает, что уменьшение длины волны и (или) увеличение численной апертуры позволяет реализовать более высокое разрешение. Оптическая литография всегда развивалась по этому пути. Для производства микросхем с 350 нм рисунками использовалась 360 нм дуговая ртутная лампа (i линия). Дальнейшее увеличение степени интеграции микросхем привело к переходу литографических систем в область так называемого глубокого ультрафиолета (deep UV). 250 нм транзисторы рисуются с использованием 248 нм KrF эксимерного лазера, 180 нм литография оперирует с излучением 198 нм ArF эксимерного лазера. Будущая 118-120 нм литография ориентирована на использование 157 нм F2 лазера.

Увеличение числовой апертуры имеет определенные ограничения, связанные в первую очередь с уменьшением глубины фокуса (DOF):

$$DOF = k_2\lambda/NA$$

В обычной фотографии мы сталкиваемся с проблемой малой глубины фокуса, когда изображение предмета и фона не находятся в фокусе одновременно. С литографической точки зрения необходимо иметь четкое изображение рисунка как на вершине слоя резиста, так и в глубине. Применение систем с высокой апертурой и короткой длиной волны снижает глубину фокуса до недопустимых пределов. Будущие наноэлектронные конструкции как правило будут иметь высокое отношение высоты линии к ее ширине. Это автоматически приведет к использованию резистов с высоким аспектным отношением. Для толстых резистов (по сравнению с длиной волны используемого света) достижение необходимой глубины фокуса становится существенной проблемой.

Для получения структур с хорошо воспроизводимыми субмикронными размерами становится обоснованно использование принципиально новых источников экспонирования, одним из которых является электронная литография.

### ***2.2.2 Напыление тонких пленок***

Магнетронное распыление является в настоящее время наиболее используемым методом напыления тонких пленок. Этот метод появился в результате усовершенствования вакуумных систем диодного распыления. Отличительной особенностью его является наличие в прикатодной области нормальных друг к другу электрического и кольцеобразного магнитного полей. Такое скрещенное электромагнитное поле для эмитированных катодом электронов является ловушкой: под действием электрического поля они стремятся к аноду, а магнитное поле поворачивает их к катоду. В результате электроны движутся вдоль катода по сложной циклоидальной траектории. Потеряв энергию на ионизацию аргона, электроны начинают двигаться к аноду диффузионно. В результате увеличения пути электрона в

области темного катодного пространства, число ионизаций атомов аргона возрастает, поэтому газовый разряд может существовать при меньшем давлении. Это позволяет получать пленки, менее загрязненные остаточными газами. Благодаря увеличению концентрации ионов аргона у катода, интенсивность бомбардировки возрастает, распыление катода и скорость роста пленки увеличиваются. Возрастает адгезия пленок к подложкам. Магнитная ловушка обеспечивает отсутствие бомбардировки подложки вторичными электронами высоких энергий, поэтому температура подложек не превышает 100 - 150°С, что делает магнетронный способ распыления подходящим для «взрывной» литографии. К недостаткам магнетронного метода распыления можно отнести неравномерность электрического и магнитного полей и, соответственно, плотности разрядного тока, приводящего к низкому коэффициенту использования материала мишени (около 25 %). Распыляется только узкая кольцеобразная область поверхности мишени (эрозия мишени). Основные параметры процесса получения пленок магнетронным распылением: давление рабочего газа в камере, подаваемая мощность, напряжение катод-анод, ток разряда, время распыления. Параметры напыления зависят от срока жизни мишени: с увеличением глубины распыляемой канавки катода скорость напыления падает. Процесс эрозии катода приводит к значительному изменению диаграммы направленности распыленного материала, что приводит к необходимости калибровки скорости напыления.

Для получения диэлектрических пленок применяют ВЧ-системы магнетронного распыления.

Напыление пленок является, возможно, наиболее ответственным этапом в формировании СИС переходов. Мы используем напылительную систему *Leybold Heraeus L-560 UV*, оснащенную водоохлаждаемым держателем подложек, двумя системами магнетронного распыления на постоянном токе (DC) и ВЧ-системой магнетронного распыления (RF).

(Подробно об установке в разделе 2.3). Давление остаточных газов составляло  $3 \cdot 10^{-8}$  мбар. Подложки крепились на медном держателе с помощью специальной прижимной рамки. Для увеличения теплопроводности и стабилизации температуры между обратной стороной подложки и держателем использовалось масло для вакуумного диффузионного насоса. После загрузки образцов в камеру проводилось ее откачивание в течение нескольких часов. Для достижения предельного вакуума и откачивания паров воды проводился нагрев камеры. Перед напылением слоев для очистки поверхности подложки и улучшения адгезии пленки проводилось ионно-лучевое травление. Перед осаждением ниобия и алюминия в течение 3-х минут проводилось предварительное распыление мишеней с целью очистки их поверхности. Во время предраспыления мишени подложка закрывалась специальной вращающейся заслонкой.

Нижний электрод трехслойной структуры Nb напылялся магнетронным распылением на постоянном токе при мощности  $P = 510$  Вт. Скорость осаждения ниобия при этом составляла 2 нм/сек. Чистота материала Nb мишени составляла 99,99%. Использовался аргон чистотой 99,9%. Давление Ar при напылении Nb составляло  $9 \cdot 10^{-3}$  мбар. После небольшой паузы (5÷10 минут), необходимой для охлаждения осажденной пленки Nb, напылялся Al слой. При мощности  $P = 78$  Вт, скорость осаждения алюминия составляла 0.2 нм/сек. Чистота материала Al мишени составляла 99,999%. Давление аргона при напылении алюминия  $6 \cdot 10^{-3}$  мбар.

Качество слоя алюминия весьма важно для получения высококачественных туннельных барьеров без микрозакоротов. При напылении при комнатной температуре Al полностью покрывает Nb, формируя однородный туннельный барьер. При напылении алюминия на нагретую поверхность Nb, «смачиваемость» Al ухудшается, происходит диффузия Al по межзеренным границам Nb, что приводит к заметному ухудшению качества перехода и, возможно, даже образованию несплошного

слоя Al. Это делает необходимым применение водяного охлаждения подложек. После напыления Al проводилось его термическое окисление при комнатной температуре в атмосфере чистого кислорода. Давление кислорода могло варьироваться для достижения заданных значений плотности критического тока  $J_c$ . Для калибровки окисления можно использовать феноменологическую зависимость между плотностью критического тока и произведением давления кислорода (в Па) на время окисления [43]:

$$J_c = 3,2 \cdot 10^5 \cdot (Pt)^{-0.5}$$

Градуировочная кривая процесса окисления для нашей напылительной системы представлена на рис. 2.4. Необходимо отметить, что данная кривая может быть смещена вверх или вниз в зависимости от величины давления водяных паров. Затем камера откачивалась в течение 10-20 минут для удаления остаточного кислорода. Напыление трехслойной структуры завершалось осаждением второго слоя Nb.

### ***2.2.3 Анодизация (электролитическое анодирование)***

Метод получения тонких пленок электролитическим анодированием, называемый также электрохимическим оксидированием, был открыт в 1817 году Н.П. Слугиновым. Формирование пленок оксидов металлов осуществляется в электролитических ваннах на аноде. При анодировании реакция взаимодействия материала с ионами окислителя идет на границе пленка – электролит [44]. Поверхность пленки Nb может быть проаноодирована с образованием однородного и стабильного изоляционного слоя Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [45].

Пленка роста оксида ниобия сопровождается реакциями.



По мере роста оксида ионы анодируемого вещества доставляются от границы подложка – пленка Nb – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на поверхность под действием

электрического поля, возникающего в оксиде при приложении между электродами ванны напряжения. Большая часть приложенного напряжения приходится на пленку оксида, поэтому в ней возникают высокие напряженности электрического поля, приводящие к дрейфу ионов ниобия. Анодирование проводят при комнатной температуре. Electrodes должны располагаться строго параллельно друг к другу, чтобы обеспечить равномерную плотность тока, а следовательно, и равномерную толщину пленки по поверхности подложки.

При SNEAP процессе анодирование проводилось до значений напряжения 10÷20 В. Толщина анодного слоя определяется приложенным напряжением. При приложенном напряжении в 1 В из 8.8 Å Nb формируется 23 Å Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, а из 9 Å Al образуется 13 Å Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [46].

Анодирование происходило в растворе электролита, состоящего из 300 мл пропиленгликоля, 200 мл деионизованной воды и 40 г пентабората аммония.

Для процесса анодизации при изготовлении сложных структур необходимо предусмотреть дополнительные связи между нижними электродами всех элементов схемы, которые должны быть удалены впоследствии отдельной технологической операцией.

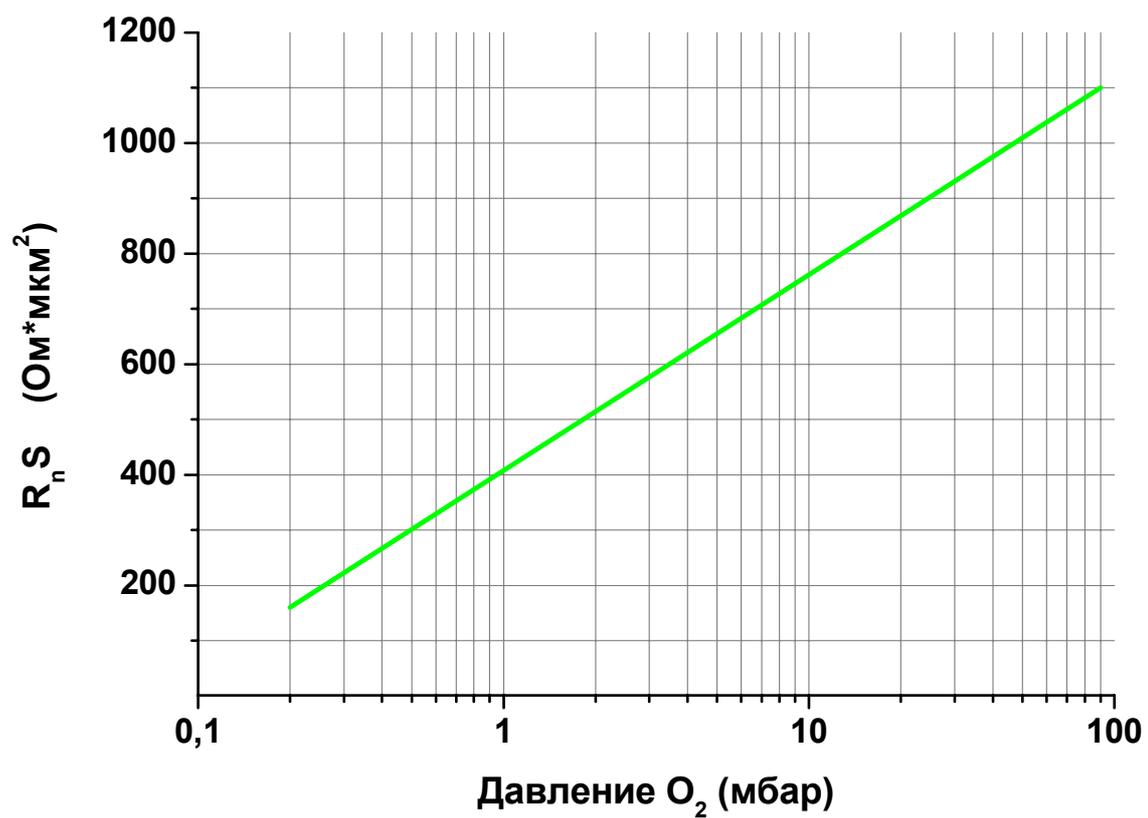


Рис. 2.4 Градуировочная кривая процесса окисления. Время окисления 20 минут.

#### ***2.2.4 Реактивное ионное травление.***

В технологических процессах изготовления сверхпроводниковых переходов оптимальным методом травления является реактивное ионно-плазменное травление. Данный метод имеет большую скорость, селективность и анизотропность травления по сравнению с остальными методами за счет сочетания физического распыления материала и химических реакций энергетических частиц плазмы на его поверхности.

В SNEAP процессе реактивно- ионное травление (RIE) применяется для формирования геометрии СИС перехода и удаления верхнего Nb электрода трехслойной структуры. Базовая технология изготовления СИС переходов в нашей лаборатории разработана на использовании для травления Nb смеси газов  $\text{CF}_4$  и  $\text{O}_2$ . Первые СИС переходы и сверхпроводниковые приборы на их основе изготавливались с использованием установки плазмохимического травления «Secon XPE II». Скорость травления ниобия при мощности 150 Ватт и давлении смеси  $\text{CF}_4 : \text{O}_2$  (3:1) составляла 2.7 нм/сек, а скорость травления  $\text{SiO}_2$  при тех же параметрах составляла 1.1 нм/сек. Одним из важных показателей процесса травления является его точность, то есть изменение размеров рисунка на слое фоторезиста до и после травления. Факторами, влияющими на изменение размеров рисунка при травлении, являются подтравливание и анизотропия травления рисунка на слое резиста, причем, влияние этих факторов зависит от свойств обрабатываемого слоя, материала резиста, используемого при травлении газа, а также режимов травления. В процессах реактивного ионного травления необходимо постоянно контролировать такие динамические параметры, как подаваемая мощность, давление, скорость расхода газа и подвергаемая травлению площадь. Технические возможности установки «Secon XPE II» не позволяли точно контролировать давление остаточных газов; температура водоохлаждаемого катода варьировалась в пределах  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Все это приводило к уходу размеров

переходов до 0.5 мкм и к разбросу параметров как по подложке, так и от партии к партии.

В главе 4 описано изготовление СИС переходов микронных и субмикронных размеров, которое стало возможным в результате исследования и оптимизации режимов травления.

### **2.3. Оборудование для изготовления СИС переходов.**

Технологическое оборудование для изготовления СИС переходов должно иметь ряд особенностей. Эти особенности связаны прежде всего с уникальными технологическими процессами и операциями, определяющими в конечном итоге параметры джозефсоновских приборов и устройств на их основе. К таким процессам следует отнести: операцию формирования барьерных слоев с заданными толщиной и свойствами; нанесение сверхпроводника на сверхтонкий барьерный слой без нарушения свойств последнего; создание надежного сверхпроводящего контакта между слоями различных сверхпроводников; получение сверхпроводящих пленок требуемого качества и состава.

Успешное проведение перечисленных операций возможно на специализированном технологическом оборудовании, оснащенном системами: «безмаслянного» вакуума с криосорбционными средствами откачки; многопозиционных источников осаждения; подложкодержателей, обеспечивающих поддержание заданной температуры; напуска рабочих газов. Оборудование должно быть оснащено развитой системой датчиков, обеспечивающих контроль практически всех технологических параметров в процессе формирования сверхпроводниковых структур.

В нашей лаборатории создан и успешно функционирует целый технологический комплекс по изготовлению и исследованию сверхпроводниковых структур на основе высококачественных туннельных

переходов, позволивший создать целый ряд уникальных приборов с рекордными параметрами.

Все технологические операции производятся в двух «чистых комнатах» класса 1000/10000 с рабочими зонами класса 100.

Схема напылительной установки *L560UV*, фирмы «Leybold AG», используемая в нашем технологическом цикле, показана на рис.2.5. Подложки закрепляются на массивном изолированном, вращающемся держателе из меди, предусмотренным для размещения 4-х подложек диаметром 3". Держатель может разогреваться до 80°C и охлаждаться до 2°C при помощи жидкости. Привод вращения держателя расположен сверху и оборудован системой позиционирования. К держателю подводится ВЧ мощность, что позволяет проводить ВЧ-чистку поверхности образцов перед напылением пленок. Установка *L560UV* оснащена тремя магнетронными распылительными системами, две из которых работают в режиме постоянного тока (DC магнетроны) и одна – в режиме ВЧ разряда (RF магнетрон). DC магнетроны используются для распыления пленок алюминия и ниобия; оснащены мишенями диаметром 120\*6 мм и чистотой 99,9% для Nb и 99,999% для Al. RF магнетрон обладает сменным катодом и используется для напыления резистивных пленок (Mo, Ti) и диэлектриков (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO). Расстояние между подложкой и мишенью может меняться в диапазоне 2-5 см и составляет 4 см между подложкой и DC магнетронами, и 3 см между подложкой и RF магнетроном.

Напылительная установка оснащена ионной пушкой (IG). Для контроля толщины напыляемых пленок используются кварцевые датчики. Предельный вакуум  $3 \cdot 10^{-8}$  мбар достигается с помощью откачной системы, включающей в себя криогенным насос, турбомолекулярным насос и насосы предварительной откачки.

Глубоковакуумный насосный стенд с криогенным насосом RPK1500 (1500 л/сек по N<sub>2</sub>) оборудован системой автоматической регенерации

криогенного насоса с нагревателем. Турбомолекулярный насос TMP 1000 (производительность откачки 1000 л/сек по H<sub>2</sub>) изготовлен в устойчивом относительно химических веществ исполнении. Форвакуумный насосный стенд оборудован пластинчато-роторным насосом D 65 В (65 м<sup>3</sup>/ч) и форвакуумной адсорбционной ловушкой. Насос Рута WS 501, дополнительно к пластинчато-роторному насосу D65B, служит для повышения форвакуумной производительности в процессах распыления; производительность встроенного над форнасосом насоса Рута составляет 5053 м<sup>3</sup>. Эффективная откачка достигается при помощи прифланцованных непосредственно глубоковакуумных насосов, а также использование всего сечения отверстия за счет применения сильфонного шиберного вентиля.

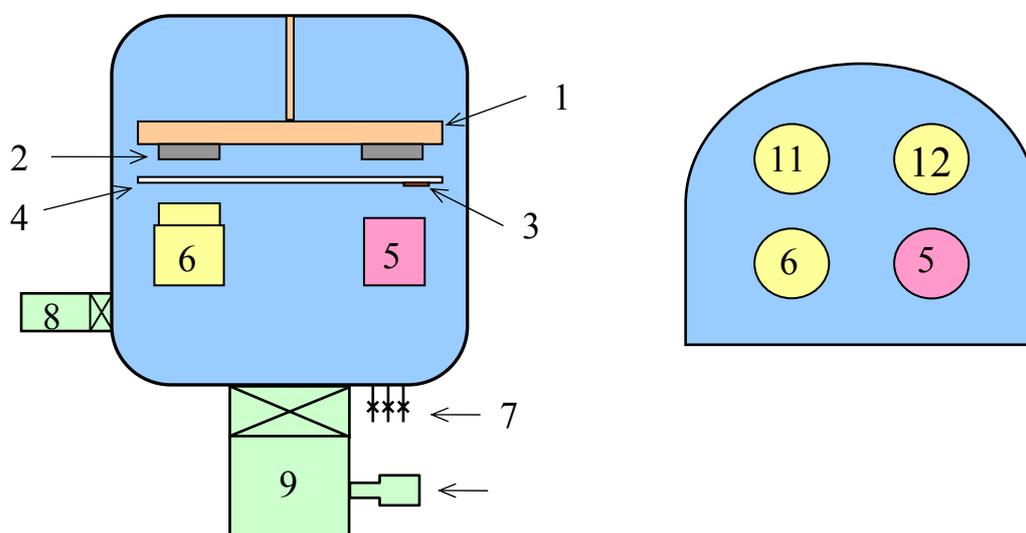


Рис. 2.5. Фото и схема камеры напылительной установки L 560 UV:

- 1- держатель
- 2- подложка
- 3- кварцевый датчик
- 4- заслонка
- 5- ионная пушка
- 6- RF магнетрон
- 7- система ввода газов
- 8- крионасос
- 9- турбомолекулярный насос
- 10- форвакуумный насос
- 11- DC магнетрон (Al)
- 12- DC магнетрон (Nb)

Технологическая установка оснащена системой замера вакуума. Для форвакуума используется TERMOVAC TMC 01 ( $1000 \div 10^{-3}$  мбар), с измерительным датчиком TR 205 HF. Для глубокого вакуума ( $10^{-3} \div 10^{-12}$  мбар) используется ионизационный вакуумметр IONIVAC IM 520, со встроенной системой замера типа IE 414. Предельный вакуум достигается с применением предварительного прогрева камеры горячей водой и инфракрасными нагревателями. Инфракрасный нагреватель для разогрева камеры и двери камеры имеет три контура нагрева с двойным регулятором температуры, диапазон регулировки температуры  $0 \div 200^{\circ}\text{C}$ . Прогрев камеры может осуществляться в автоматическом цикле. Три системы для регулировки потока 3-х газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ ) определяют давление рабочего газа при напылении. Чистота всех газов, использованных в процессе напыления, не хуже чем 99,999 %. Для анализа состава остаточного газа используется масс-спектрометр PGA 100 с измерительным датчиком Фарадея QF 210. Все технологические процессы в напылительной установке *L560UV* можно осуществлять в автоматическом, программируемом режиме. Управление процессом и контроль актуального состояния оборудования осуществляется при помощи вакуумной схемы и выводимых на монитор процессных данных (параметры насосов, источников, газов, заслонок, нагревателя, устройства вращения).

Описанная выше сверхвысоковакуумная напылительная установка *L560UV* фирмы “Leybold AG” позволяет напылять высококачественные структуры с заданным и, самое главное, контролируруемыми параметрами.

Дополнительные напыления изоляторов ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) и контактных площадок ( $\text{Au}$ ) проводятся в напылительных установках A700 и Z400 той же фирмы “Leybold AG”.

Технологический комплекс включает в себя две установки экспонирования и совмещения MA150 и MJB3HP фирмы “Karl Zuss”. Установка MA150, фото которой представлено на рис. 2.6, имеет

максимальное разрешение 0.6 мкм при использовании оптической системы UV 300 нм и разрешение 0.8 мкм при использовании оптической системы UV 400 нм (паспортные данные). Экспонирование ртутной лампой возможно с пиком в спектре при 405 нм и 320 нм. Максимальный размер экспонированных пластин 3". Процесс совмещения – ручной, с возможностью дублирования изображения на мониторе через установленную видеосистему. Автоматическое выставление плоскостности подложки относительно шаблона и возможность программируемого выставления зазора между подложкой и шаблоном позволяет максимально снизить нежелательные дифракционные эффекты. Шаговый механизм перемещения подложки позволяет обеспечивать высокую точность совмещения вплоть до 0.5 мкм.

В набор технологического оборудования входят установки плазмохимического травления «March Jupiter II» и «Secop XPE II».

Установка реактивного ионно-плазменного травления «March Jupiter II» представляет собой высокочастотную диодную систему (рис. 2.7), расстояние между анодом и катодом которой равно 2 см. Конструктивные особенности камеры с верхней загрузкой позволяют обеспечить анизотропность и максимальную селективность травления, равномерность и высокую скорость травления. Керамическое кольцо фокусирует плазму на нижнем электроде, где располагается подложка, оптимизируя используемую мощность и увеличивая тем самым анизотропность и скорость травления. Нижний электрод водоохлаждаемый. Камера снабжена кварцевым смотровым окном, необходимым для наблюдения плазмы и контроля окончания процесса травления. Предельный вакуум ( $2 \cdot 10^{-5}$  мбар) достигается с помощью откачки форвакуумным и турбомолекулярным насосами.



Рис. 2.6. Установка совмещения и экспонирования МА150

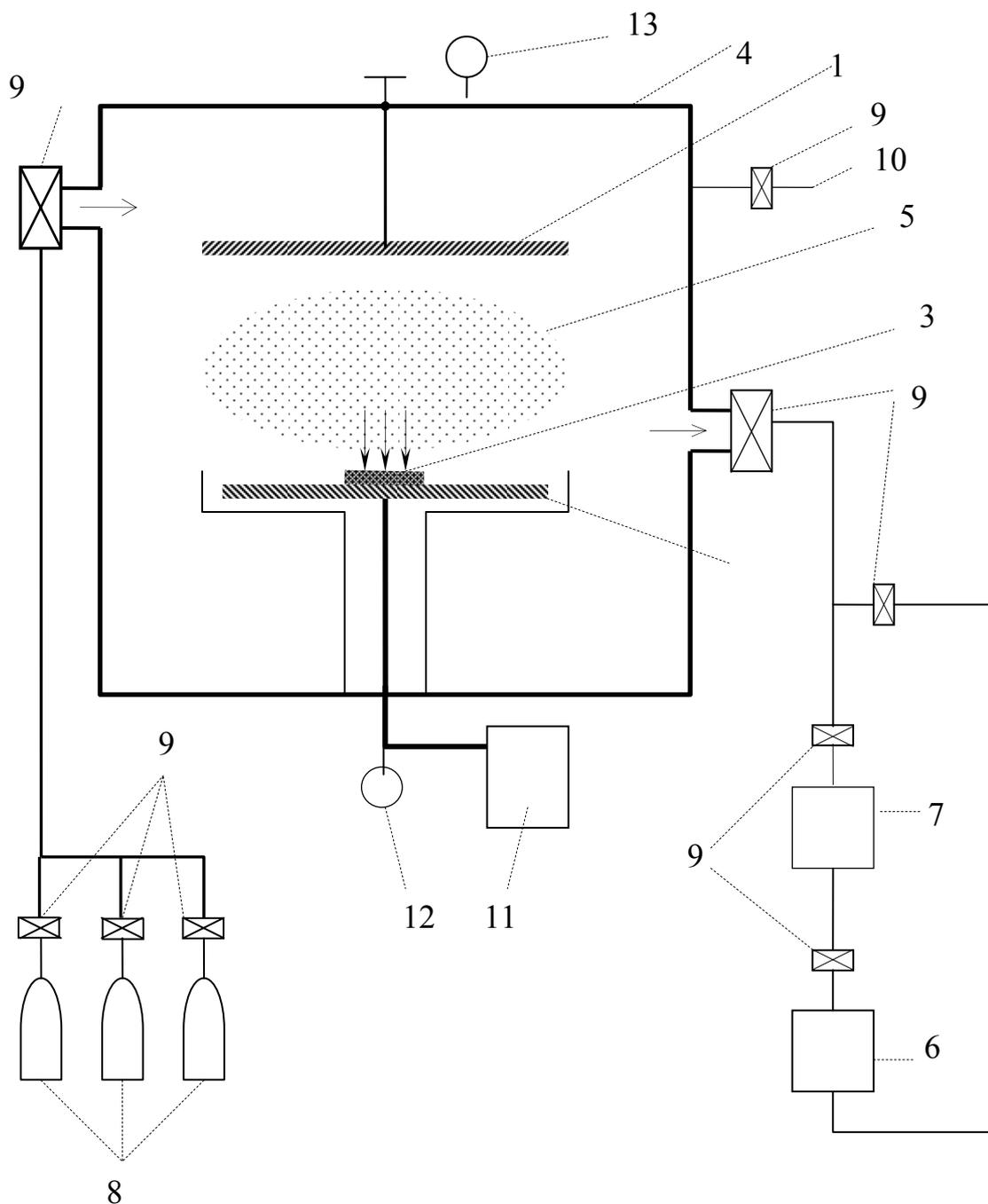


Рис. 2.7. Схема установки травления:

1 – анод; 2 – катод; 3 – подложка; 4 – рабочая камера; 5 – плазма; 6 – форвакуумный насос; 7 – турбомолекулярный насос; 8 – баллоны с реактивными газами; 9 – вакуумный клапан; 10 – натекатель; 11 – охлаждение катода; 12 – ВЧ-генератор; 13 - манометр

Установка реактивного ионно-плазменного травления оборудована системой ввода шести газов ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{NF}_3$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{Ar}$ ) с контролем скорости втекания и датчиком давления (диапазон  $10^{-3}$  – 1 мбар), что позволяет проводить сухое травление различных по составу пленок.

В набор технологического оборудования, необходимого для изготовления СИС переходов, входят также микроскопы с TV измерительной системой и интерферометром для контроля толщины фирмы “Leitz”; профилометр “Alfa step”; оборудование для фотолитографии (центрифуга для нанесения резиста фирмы “Convac”, термостат с печкой фирмы “Heraeus”, система фильтрации воды, ультразвуковые ванны “Branson”).

Все это оборудование позволяет изготавливать высококачественные СИС переходы и сложные многослойные структуры с заданными, воспроизводимыми параметрами.

#### **2.4. Система измерения электрофизических параметров**

На рис. 2.8 представлена блок-схема низкотемпературной автоматизированной системы (АС) измерения вольтамперных характеристик и электрофизических параметров СИС переходов, сконструированная в нашей научной группе. Тестовые измерения проводились в транспортном дьюаре с жидким гелием. В измерительной головке криогенного зонда крепилась подложка с СИС переходами (предусмотрено до 14 переходов). Переключение между переходами происходит автоматически. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось по обычной четырехконтактной схеме. В АС используется система задания тока. Для достижения выбранного диапазона по напряжению использовались балластные сопротивления, задающие диапазон тока от 10 мкА до 140 мА. Диапазон по напряжению 1 мкВ – 5 В. Для уменьшения внешних наводок

транспортный дьюар с образцами помещался в экранированный бокс и подключался к АС через фильтры.

В криогенном зонде также установлены термометр, нагреватель для температурных измерений, соленоид для задания магнитного поля. При измерении критической температуры образцов  $T_c$  и снятия температурных зависимостей, которое проводилось в вакуумированном объеме зонда, использовался прецизионный вольтметр.

Автоматизированная система определяет следующие параметры СИС перехода:  $R_n$ ;  $R_j/R_n$ ;  $R_d$ ;  $V_g$ ;  $\delta V_g$ ;  $I_c$ ;  $V_0$ ;  $V_m$ ;  $C$ ;  $j_c$ ;  $I_c/I_g$ ;  $\omega CR_n$ .

Большинство параметров СИС переходов определялось непосредственно из ВАХ перехода. Топологический способ определения некоторых основных параметров представлен на рис. 2.9. За величину нормального сопротивления  $R_n$  принималось дифференциальное сопротивление при  $V > 4$  мВ. Значение сопротивления утечки  $R_j$  определялось как сопротивление касательной к ВАХ, проведенной из нуля и лежащей ниже ВАХ.

Параметр  $V_m = I_c R$  (2 мВ) характеризует утечку. Для его определения измерялось сопротивление в точке  $V = 2$  мВ. Для применений, где используется квазичастичная нелинейность, а критический ток целенаправленно подавляется, важнейшей характеристикой является качество туннельного перехода, которое характеризуется малым током утечки. В связи с этим наиболее правильной характеристикой утечки является отношение сопротивлений  $R_j/R_n$ .

Для СИС переходов, используемых в СВЧ применении, важным параметром является величина размытия энергетической щели  $\delta V_g$ . Эта величина измерялась как разность напряжений в точках ВАХ вблизи щели, где дифференциальное сопротивление  $R_d = R_n/2$  (выше щели) и  $R_d = R_n$  (ниже щели).

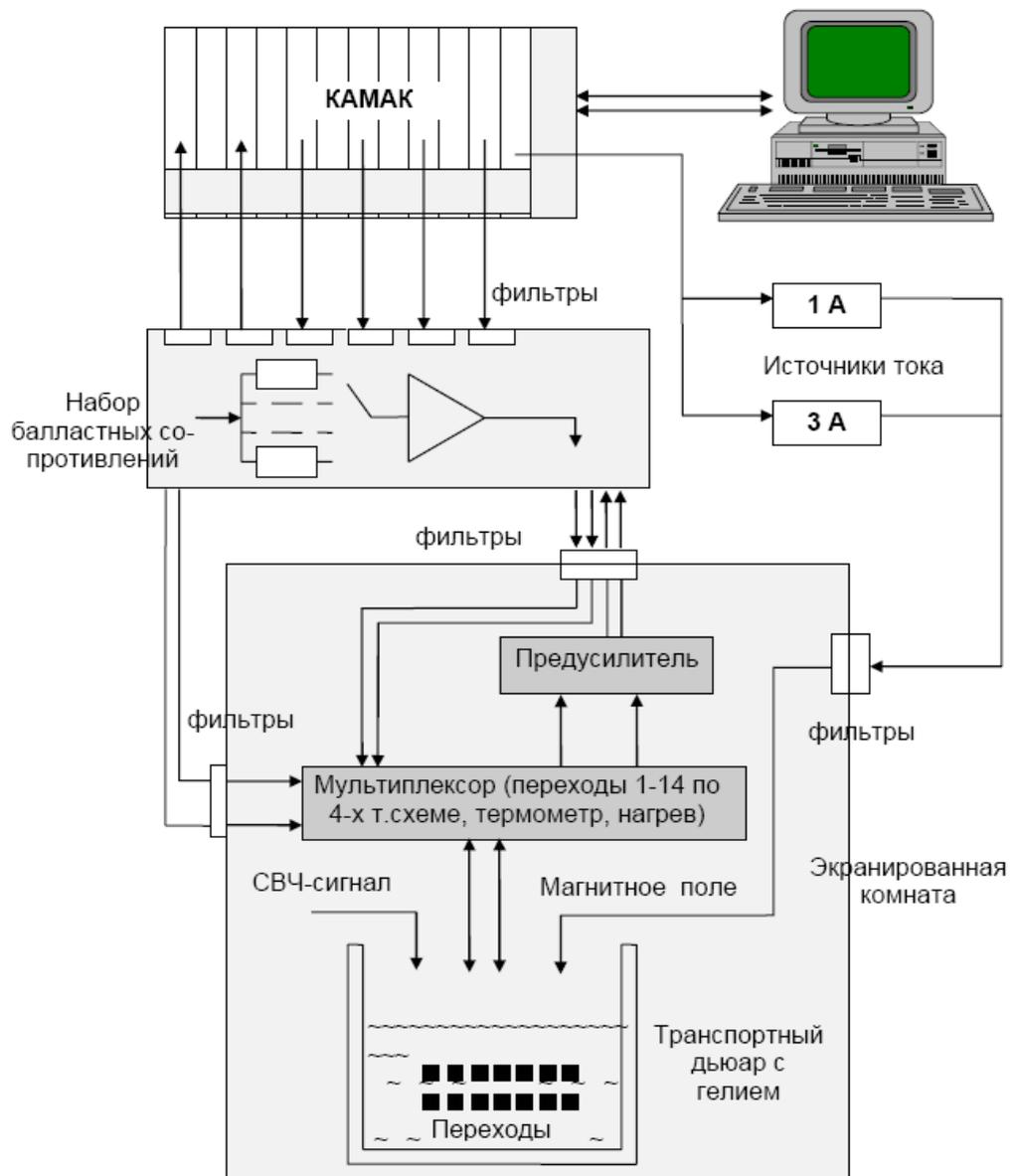


Рис. 2.8 Блок-схема автоматизированной установки измерения параметров СИС переходов. Программа измерений разработана Ермаковым А.Б.

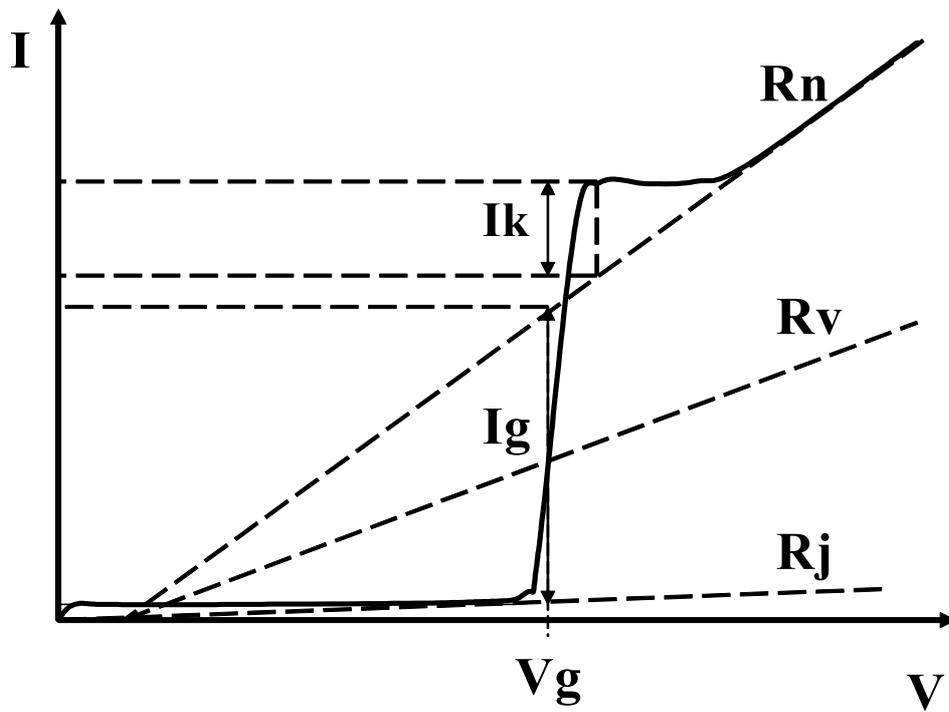


Рис. 2.9. Определение параметров СИС перехода для использования в топологическом алгоритме расчета.

Значение щелевого напряжения  $V_g$  определялось в точке с минимальным значением  $R_d$ . Параметрами, наиболее правильно характеризующими толщину туннельного барьера, являются удельное сопротивление перехода  $R_n A$ , где  $A$  – площадь одиночного перехода, и плотность квазичастичного тока  $j_g = I_g/A$ . Величина  $I_g$  определялась по скачку тока на щели.

В автоматизированной системе измерений СИС переходов реализован простой доступ к любым данным, осуществляется вывод данных в виде таблиц и графиков, предусмотрена возможность проводить анализ характеристик переходов и их взаимосвязь, учитывать влияние на них технологических параметров.

### **Глава 3. Разработка технологии изготовления малошумящих СИС приемников для радиоастрономических исследований.**

При проведении радиоастрономических наблюдений СИС структуры являются наиболее перспективным элементом для создания высокочувствительных приемных устройств на основе нелинейной зависимости тока квазичастиц  $I_n$  от напряжения  $V$  на СИС переходе. Возникновение этой нелинейности на ВАХ СИС перехода обусловлено наличием особенности в плотности состояния сверхпроводника при энергиях, близких к энергетической щели  $\Delta_{1,2}$  [72], что приводит к росту тока  $I_n$  при напряжениях  $V_g = (\Delta_1 + \Delta_2)/e$  и образованию на вольтамперной характеристике перехода резкого изгиба. На основе СИС переходов с высокой крутизной ВАХ удастся реализовать смесители с малой шумовой температурой и, в принципе, достичь так называемого «квантового предела» шумовой температуры  $T_N \sim hf/e$ . Ток при напряжениях  $V < V_g$  вызван как температурой, так и влиянием различных размывающих плотность состояний факторов: магнитные примеси, неоднородность слоя окисла, конечным временем жизни квазичастиц и т.д., во многом определяемыми материалами и технологией изготовления СИС перехода. Чем меньше размытие щели  $\delta V_g$  и величина утечки, тем выше качество туннельного перехода, тем выше будут параметры приемных устройств на его основе.

#### **3.1 Основные требования к параметрам смесительных СИС переходов.**

Частотный диапазон и условия охлаждения смесительного элемента выдвигают определенные требования к выбору материалов и технологии изготовления СИС переходов. Подложка, на которой располагается структура, должна иметь хорошую теплопроводность, низкие диэлектрические потери, и геометрию, препятствующую возбуждению резонансов в своем объеме.

В большинстве случаев структуры на основе переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb изготавливались на подложках из кристаллического кремния. Однако из-за большой величины диэлектрической постоянной ( $\epsilon = 12 - 16$ ) кремний не подходит для большинства волноводных СВЧ применений. Поэтому для использования СИС переходов в СВЧ приемных устройствах на основе волноводных смесителей, необходимо было разработать технологию их изготовления на подложках с малой величиной диэлектрической постоянной  $\epsilon$  и малыми СВЧ потерями. Материалом для таких подложек может служить кварц ( $\epsilon \approx 4$ ). Кварцевое стекло (плавленый кварц) обладает при 4 К теплопроводностью ( $1 \cdot 10^{-3}$  Вт/см·град) и годится для использования в жидком гелии или его густых парах. При использовании вакуумных криостатов с контактным отводом тепла, могут возникать эффекты перегрева СИС переходов током смещения [48]. Для предотвращения такого перегрева структуры лучше изготавливать на подложках из монокристаллического кварца, теплопроводность которого примерно на два порядка выше, чем у стекла.

Еще одним требованием к смесительному элементу является ограничение паразитного тока утечки в рабочей точке при напряжении  $V_0 = V_g - hf/2e$ . Ток утечки должен быть мал, то есть  $R_j$  должно быть значительно больше  $R_n$ . В противном случае, когда ток утечки велик, оказывается невозможным получить большие значения дифференциального сопротивления в рабочей точке, а значит - невозможно реализовать эффективный смеситель. Для изготовления СИС смесителя с рекордными параметрами необходимы высококачественные СИС переходы с отношением  $R_j/R_n \sim 40$  при 4 К. Это отношение увеличивается по мере охлаждения за счет уменьшения числа тепловых возбуждений над щелью. Теоретически показано, что при уменьшении тока утечки растет усиление смесителя, а его шумовая температура и оптимальная мощность гетеродина уменьшаются [49].

### 3.2 Оптимизация технология изготовления СИС переходов для СВЧ применения.

Технология изготовления туннельных СИС переходов должна обеспечивать получение переходов площадью несколько квадратных микрон при высоком качестве переходов и малом разбросе параметров по подложке и от партии к партии. Явление внутреннего напряжения в пленках электродов является одной из причин снижения качества переходов [50 - 54]. Релаксация напряжения происходит при формировании геометрии слоев Nb, она приводит к разрушению туннельного барьера и образованию микрозакоротов, шунтирующих СИС переход. Напряжения в пленках нижнего электрода возникают во время его напыления. Причем, чем больше площадь поверхности этой пленки по сравнению с площадью перехода, тем больше величина этих напряжений [55]. Один из способов уменьшения влияния напряжений – это применение «взрывной» (обратной) фотолитографии, когда пленка, в которой необходимо получить рисунок, наносится поверх уже сформированной резистивной маски [50]. В нашем технологическом процессе (см. главу 2), геометрия нижнего электрода трехслойной структуры Nb/Al-AlOx/Nb формируется с использованием этого метода, что позволяет значительно устранить влияние напряжений при больших площадях перехода (50-100 мкм<sup>2</sup>). При меньших площадях переходов этой меры становится недостаточно, и возникла необходимость в оптимизации режимов напыления пленок ниобия.

Напряжение в пленках ниобия, напыленных DC магнетронным распылением, зависит от давления Ar и изменяется от напряжений сжатия до напряжений растяжения при увеличении давления Ar. Величина внутреннего напряжения может быть вычислена по формуле [56]:

$$\sigma = \frac{1}{6R} \frac{E}{(1-\nu)} \frac{D^2}{d}$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  - коэффициент Пуассона, ( $E/(1-\nu)$  равно 94 ГПа для стеклянных подложек [57]),  $D$ - толщина подложки,  $d$ - толщина напыленной пленки,  $R$  – радиус кривизны подложки.

Для нахождения оптимальных условий напыления ниобия, при которых получаются пленки с минимальной величиной напряжения, был проведен цикл исследований [A1, A6, A10]. Были исследованы пленки, напыленные при различных давлениях аргона. Пленка Nb напылялась с помощью DC магнетрона диаметром 75 мм на подложку, крепившуюся к водоохлаждаемому медному держателю. Пленки осаждались при разных уровнях мощности  $P$  и при давлениях аргона, изменявшихся в диапазоне  $(3 \div 14) \cdot 10^{-3}$  мбар. Внутреннее напряжение в пленках ниобия оценивалось по изгибу стеклянных подложек, толщиной 0,2 мм после напыления на них пленок толщиной 200 нм. Нулевое напряжение было достигнуто у пленок, напылявшихся при  $P = 300$  Вт (скорость распыления  $v = 2$  нм/сек) и давлении аргона  $p_{Ar} = (10 \div 11) \cdot 10^{-3}$  мбар.

Мы оценивали качество переходов Nb/Al-AlOx/Nb с электродами, напыленными при различных давлениях аргона, по их вольт-амперным характеристикам. Зависимости основных параметров СИС переходов: отношение сопротивлений под и над щелью  $R_j/R_n$  и характерного напряжения  $V_m = R(2mB) * I_c$  от давления аргона при напылении электродов при  $P = 300$  Вт представлены на рис. 3.1 для переходов площадью  $80 \text{ мкм}^2$  и  $9 \text{ мкм}^2$  (вертикальные линии показывают разброс параметров переходов, изготовленных на одной подложке, для переходов площадью  $80 \text{ мкм}^2$  разброс параметров не превышал размер символа). Видно, что качество и разброс параметров переходов малых площадей существенно зависят от давления аргона; оптимальная величина давления совпадает с измеренной ранее по изгибу подложек ( $p_{Ar} = (10 \div 11) \cdot 10^{-3}$  мбар).

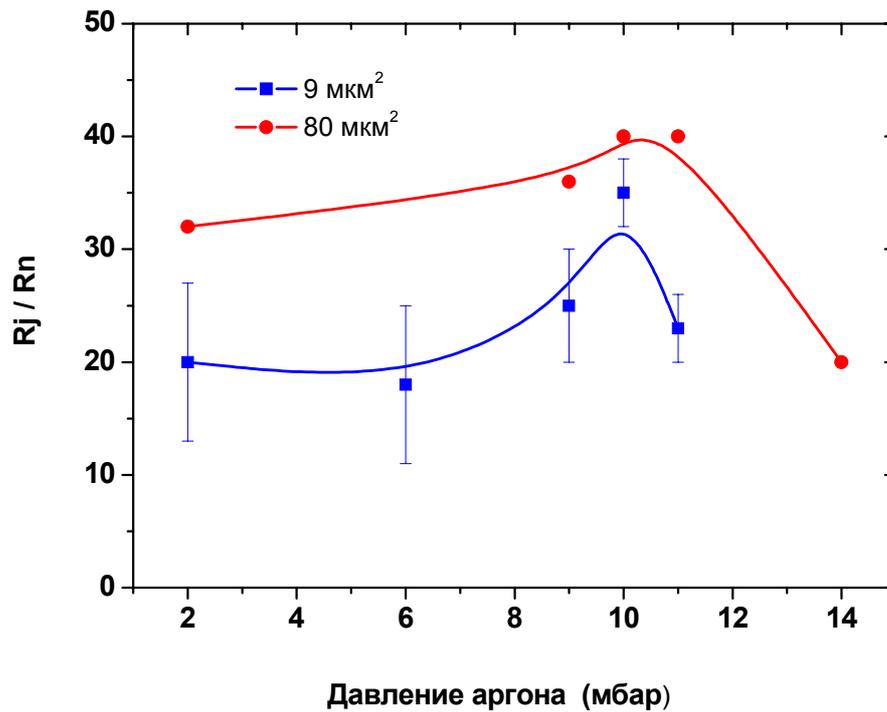
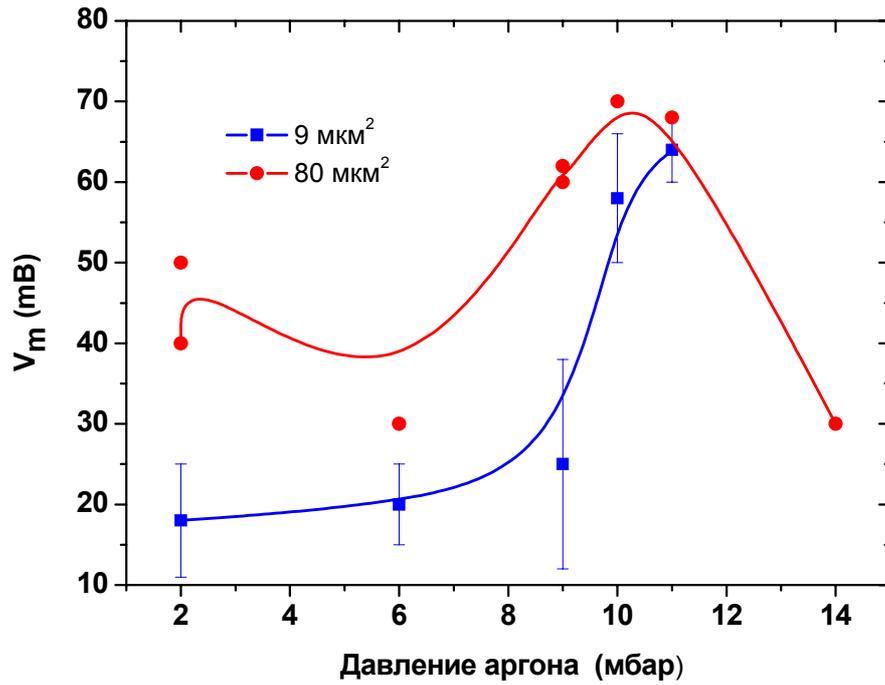


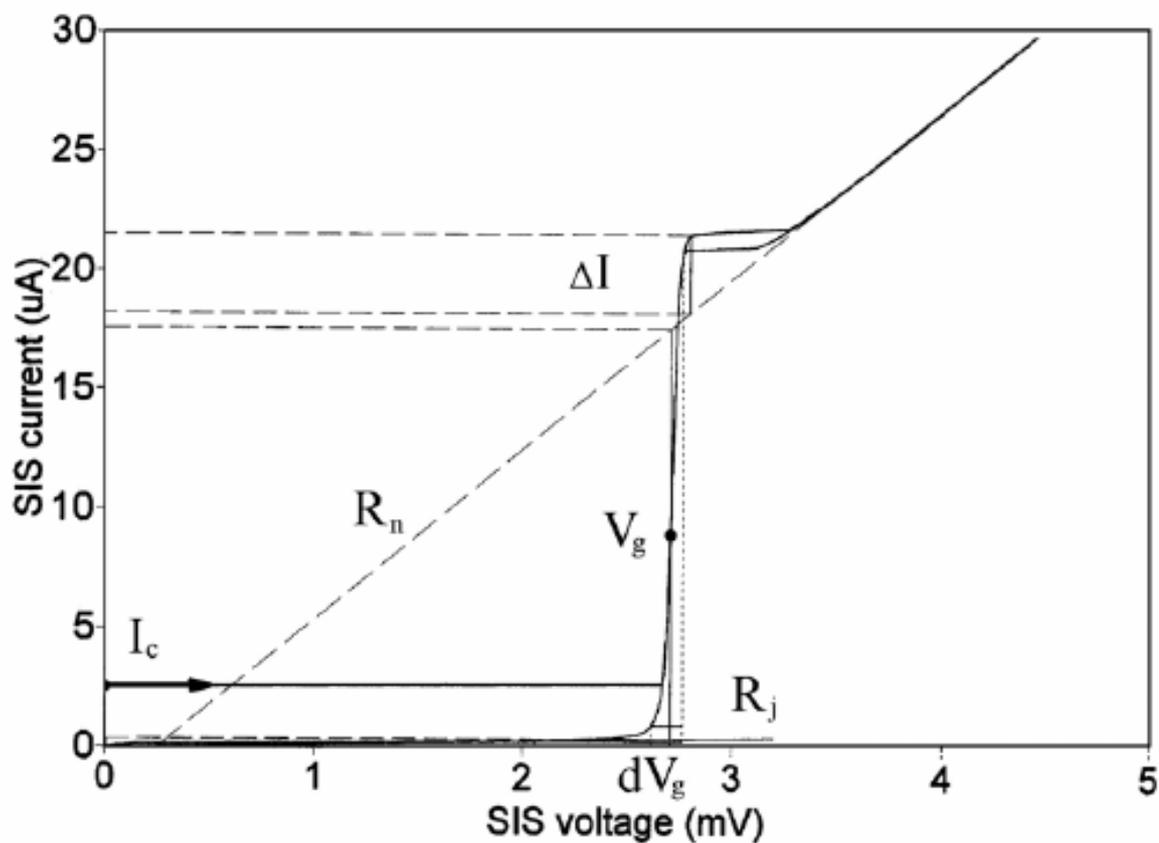
Рис. 3.1. Зависимость параметров  $V_m = I_c * R$  (2 мВ) (а) и  $R_j / R_n$  (b) от давления аргона при напылении Nb при  $P = 300$  Вт для переходов площадью 80 и 9  $\mu\text{m}^2$ .

Вольт-амперная характеристика СИС перехода площадью  $3.7 \text{ мкм}^2$ , изготовленного в оптимизированных условиях, представлена на рис.3.2. Параметр качества туннельного перехода  $R_j/R_n > 40$ .

Морфология поверхности пленки ниобия влияет на слой Al, покрывающий нижний электрод. Диффузия Al на поверхности границы пленок Al/Nb увеличивается с увеличением шероховатости Nb нижнего электрода, что приводит к микрозакороткам и увеличению тока утечки переходов. Шероховатость пленки Nb, напыленных DC магнетронным распылением, зависит от ее внутреннего напряжения. Ненапряженная пленка имеет гладкую поверхность [59].

Мы исследовали морфологию поверхности пленки ниобия толщиной 200 нм, напыленную при оптимальном давлении аргона на кварцевую подложку, с помощью атомно-силового микроскопа. Поле сканирования составляло  $2480 \times 2480 \text{ нм}$  и  $870 \times 870 \text{ нм}$ . На рис. 3.3 представлены микрофотографии пленки ниобия. Шероховатость пленки составила 2.8 нм.

При формировании переходов на подложках из стекла или кварца возникает проблема теплоотвода. Тепловой режим очень важен при формировании переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb, так как влияет на шероховатость пленки ниобия, на качество туннельного барьера, и, как следствие, на характеристики всего СИС смесителя. При напылении алюминия на нагретую поверхность Nb, «смачиваемость» Al ухудшается, происходит диффузия Al по межзеренным границам Nb, что приводит к заметному ухудшению качества перехода и, возможно, даже образованию несплошного слоя Al [30]. Для улучшения теплопроводности кварцевых подложек используют высоковакуумную смазку. Как утверждают авторы работы [58], температура поверхности кварцевых подложек во время напыления ниобия без высоковакуумной смазки достигает больше  $350^\circ\text{C}$ , в то время как с использованием высоковакуумной смазки стабилизируется около  $200^\circ\text{C}$  после 50 секунд напыления.



<b>Area,one[sq.um] = 3.700</b>	Q-ty in array = 1
Cs[fF/sq.um] = 65.00	Type of array = serial
<b>Rn,arr [Ohm] = 140.0</b>	<b>Rn,one [Ohm] = 140.0</b>
Rj [Ohm] = 7745.5	<b>RnA = 517.9</b>
R2 [Ohm] = 7745.5	<b>Rj/Rn = 45.33</b>
Ig [uA] = 17	Vm=R2Ic [mV] = 19.56
Ic [uA] = 3	R2[.7Ig] [mV] = 93.28
Ik [uA] = 3	Vo=RnIc [mV] = 0.35
<b>Vg [mV] = 2.71</b>	Ic/Ig = 0.15
<b>dVg [mV] = 0.150</b>	Ik/Ig = 0.19
DVg [mV] = 0.707	<b>Jg [A/sq.cm] = 465</b>
Fres [GHz] = 0.0	Jc [A/sq.cm] = 68

Рис. 3.2. ВАХ СИС перехода, изготовленного в оптимальных условиях, и измеренная автоматизированной системой. Площадь перехода  $3.7 \text{ мкм}^2$ . Критический ток частично подавлен магнитным полем.

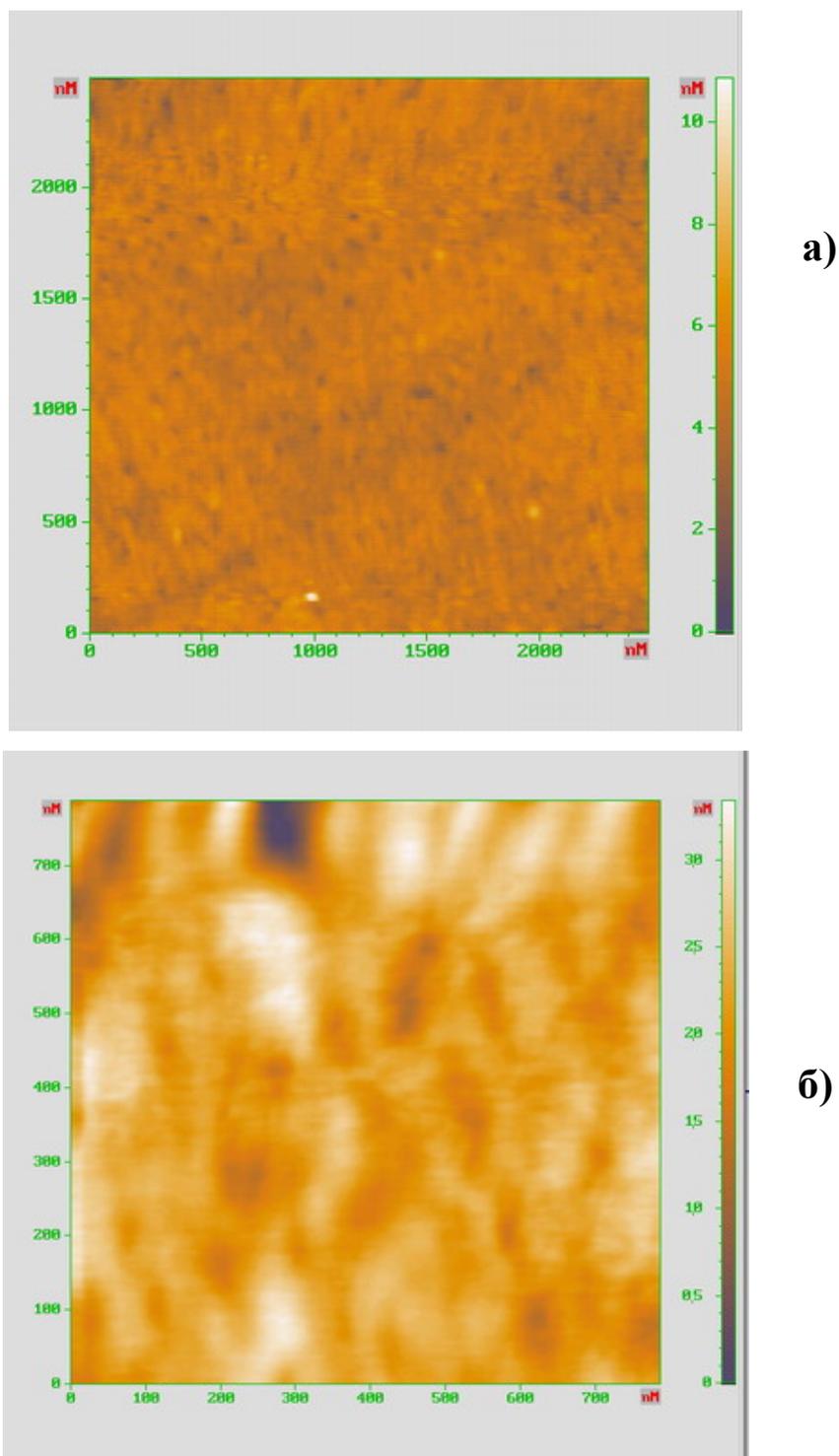


Рис. 3.3. Микрофотография поверхности пленки ниобия толщиной 200 нм, напыленная при оптимальном давлении аргона на кварцевую подложку. Поле сканирования 2480\*2480 нм (а) и 870\*870 нм (б). Шероховатость  $Ra = 2.88$  нм.

Охлаждение подложки также происходит значительно быстрее, если используется высоковакуумная смазка. Температура подложки через минуту после окончания процесса напыления Nb составляет 50°C, если используется высоковакуумная смазка, и 200°C – если не используется.

Для решения проблемы теплоотвода во время напыления пленок, мы закрепляли подложку на водоохлаждаемом медном держателе с помощью специальной рамки. Теплопередача между подложкой и держателем дополнительно увеличивалась за счет вакуумной смазки. Перед напылением туннельного барьера выдерживалась пауза в течение 5 - 10 минут, необходимая для охлаждения предварительно осажденной пленки Nb.

### **3.3 СИС структуры для волноводных смесителей мм диапазона длин волн.**

Недостатком СИС смесителей на одиночных переходах является их малый динамический диапазон [60-63]. Эту проблему удастся решить, используя цепочку из  $N$  СИС переходов [63 - 65]. Для успешного использования цепочек необходимо обеспечить условие квазисосредоточенности, то есть, чтобы длина цепочки  $l \leq \lambda_{эф}/4$  (где  $\lambda_{эф}$  - эффективная длина волны с учетом диэлектрической проницаемости подложки). Выбирая  $N$  достаточно большим, можно при малых значениях  $RnA$  получить хорошее согласование цепочки с внешней системой при площадях отдельных СИС переходов  $A \approx 10$  мкм<sup>2</sup>. Применение цепочек не только облегчает согласование по СВЧ; кроме того, мощность насыщения смесителя возрастает пропорционально квадрату количества переходов в цепочке. При этом собственные шумы по сравнению с одиночным переходом того же нормального сопротивления практически не возрастают [66].

Однако при создании последовательных цепочек возникает целый ряд трудностей. Центральная проблема – это различие рабочих напряжений на переходах из-за неидентичности их ВАХ, приводящее к снижению эффективности преобразования. Было показано [67], что небольшой разброс ( $5 \div 10 \%$ ) параметров СИС переходов при изготовлении цепочек последовательно соединенных переходов приводит к ухудшению параметров СИС смесителя более чем в 2 раза. Одним из вариантов преодоления этих трудностей является использование цепочек СИС переходов, соединенных последовательно по сигнальной частоте и параллельно по постоянному току и ПЧ [68, 69], так, чтобы одновременно обеспечить согласование по входу и выходу [68]. Более того, оптимизируя конструкцию низкочастотных цепей, в таких последовательно-параллельных цепочках можно обеспечить компенсацию емкости сверхпроводникового перехода при условии минимизации паразитной емкости межпереходных соединений.

Принцип последовательно-параллельного включения СИС переходов был экспериментально исследован в смесителях волноводного типа на мм волнах в диапазонах частот 40 - 180 ГГц [A1, A11 - 12]. На рис. 3.4 представлены варианты последовательно – параллельного объединения СИС переходов, использованные в экспериментальных смесителях волноводного типа. Конструкции смесителей разработаны С. Шитовым.

Структуры изготавливались на кварцевых подложках размером 15\*24 мм и толщиной  $0.15 \div 0.2$  мм. На подложке в зависимости от дизайна изготавливалось  $32 \div 44$  чипов. В качестве смесительных элементов использовались цепочки, содержащие от 2 до 11 СИС переходов площадью  $1.2 \div 8$  мкм<sup>2</sup> каждый. Сопротивление испытанных образцов в нормальном состоянии на постоянном токе было в пределах 9 - 24 Ом. Разработанная технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках описана в параграфе 3.4.

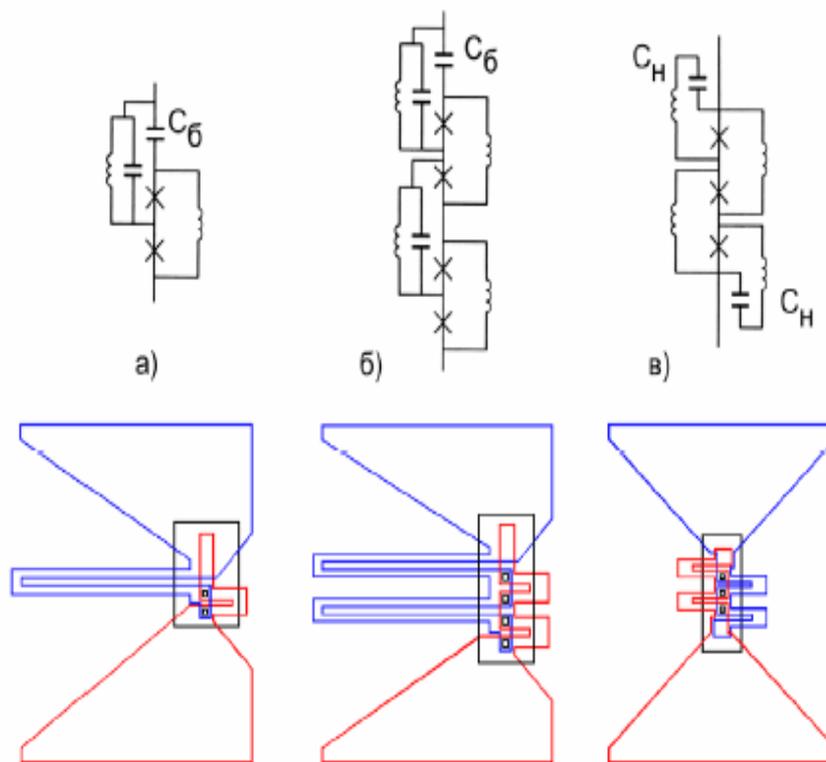


Рис. 3.4. Три варианта последовательно-параллельного объединения СИС переходов, использованные в экспериментальных смесителях волноводного типа. Вверху показаны эквивалентные схемы, внизу – геометрия соответствующих структур, находящихся в канале волновода (подводящие электроды и фильтры НЧ не показаны). На эквивалентных схемах СИС переходы показаны крестиками, а на эскизах область туннельного барьера - маленькими квадратиками. Конструкция смесителей разработана С.В. Шитовым.

После напыления контактных площадок и тестирования (тестировалась каждая третья схема) подложка разрезалась на отдельные чипы размером  $0.7 \div 0.75 \times 7.2$  мм. Примеры изготовленных структур различных конфигураций представлены на рис. 3.5.

На основе оптимизированных систем СИС переходов был создан ряд практических малошумящих приемников для радиоастрономии, которые были успешно испытаны на радиотелескопах обсерватории Онсала (Швеция) и Метсахови (Финляндия).

На рис. 3.6 представлена структурная схема приемного комплекса для радиоастрономических исследований на 13,8 м радиотелескопе обсерватории Метсахови Хельсинского технологического университета (Финляндия) в двух частотных диапазонах - 3-х мм и 2-ух мм. Приемный комплекс построен как композиция трех супергетеродинных преамплиц. Приемник 2-х мм диапазона длин волн - одноканальный, работает в вертикальной поляризации. Два приемника 3-х мм диапазона длин волн, работающих одновременно во взаимно ортогональных поляризациях, снабжены трансформатором и делителем поляризаций и имеют сведенную в единый пучок диаграмму облучения антенны телескопа. Одновременная работа двух частных каналов не предусмотрена, однако смена каналов наблюдения на телескопе осуществляется за несколько минут заменой гетеродинного делителя пучка. Приемники комплекса одинаковы по структуре и построены по супергетеродинной схеме со смесителем на входе. Волноводные смесители изготовлены на основе структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb. Микросхема СИС-смесителя представляет собой цепочку из 5 СИС переходов, включенных последовательно по СВЧ и параллельно по постоянному току и промежуточной частоте, а также элементы согласования и смещения. Площадь каждого перехода  $2 \text{ мкм}^2$ , плотность тока  $j_c = 1.5 \div 2 \text{ кА/см}^2$ . СИС смесители изготавливались на кварцевых подложках толщиной 0.2 мм.

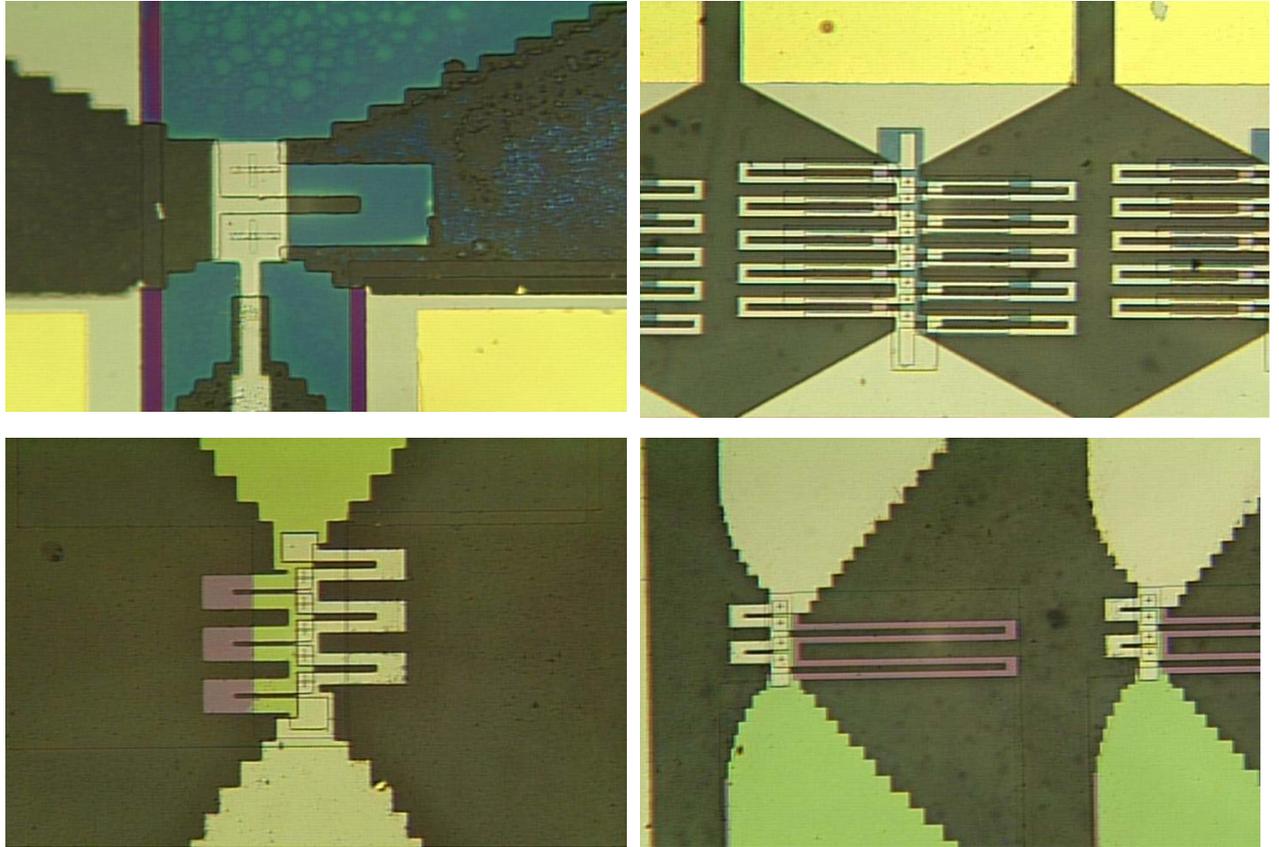


Рис. 3.5. Примеры изготовленных структур различной конфигурации

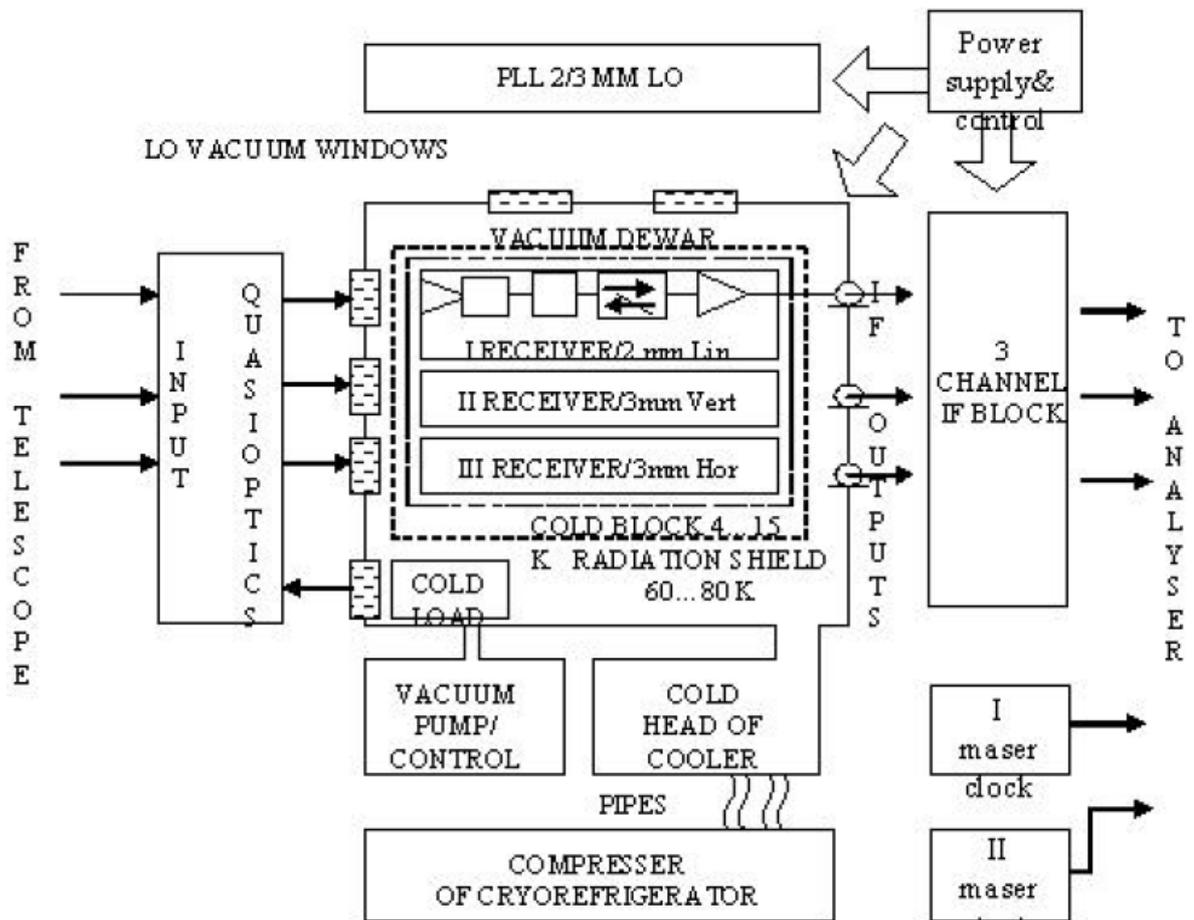


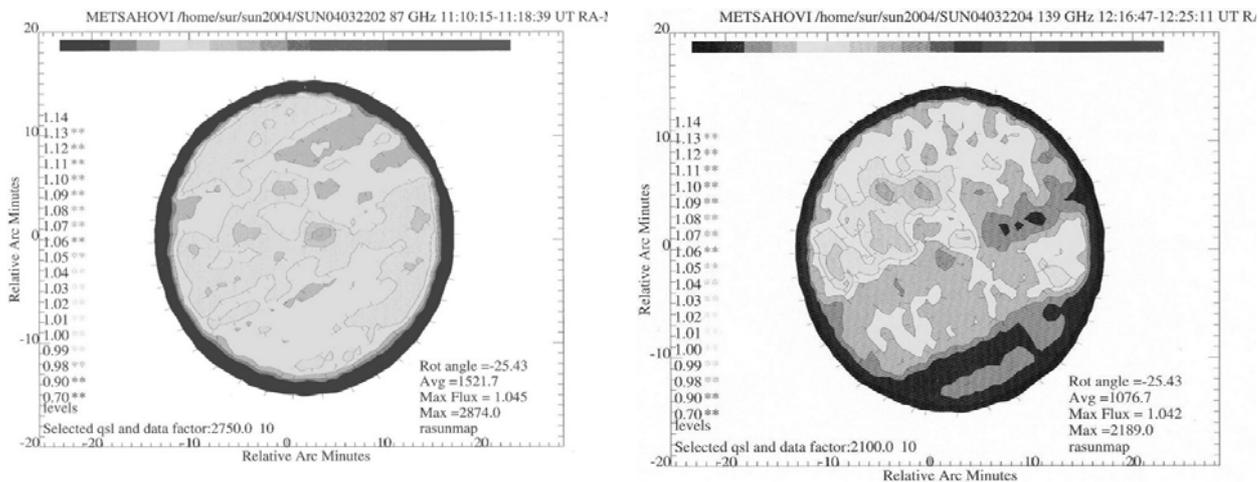
Рис. 3.6. Блок-схема двухчастотного двухполяризационного приемника

Однополосная шумовая температура приемника в обоих частотных каналах составляет 50 - 100К. Начиная с апреля 2004 г. приемный комплекс находится в режиме эксплуатации как один из штатных приемников 13.8 м радиотелескопа обсерватории Метсахови Хельсинского технологического университета. В качестве тестового цикла практических наблюдений, несмотря на плохие погодные условия, было проведено одновременное в двух поляризациях и в обоих частотных каналах картирование активных зон поверхности Солнца, представленное на рис. 3.7(а). Затем было проведено несколько циклов радиоастрономических наблюдений в режиме интерферометра со сверхдлинной базой. Вторым элементом интерферометра при этом был телескоп в Пико-Велетта. Полученные данные были доставлены на большой Боннский коррелятор. Результаты обработки, представленные на рис. 3.7(б), продемонстрировали высокую корреляцию полученных сигналов в обеих поляризациях и подтвердили пригодность созданного комплекса для решения радиоастрономических задач [A117].

### **3.4 Разработка технологии изготовления СИС переходов на кварцевых подложках.**

Топология электродов для волноводных смесителей с интегральной компенсацией емкости перехода в виде петель индуктивности заметно усложнилась. Изготовление таких структур методом взрывной литографии по маске из позитивного резиста не давало хорошего результата: профиль нижнего электрода имел неровный край, возникали закоротки между отдельными участками нижнего электрода и механические повреждения. Для решения этих проблем и получения хорошего края пленки необходимо использовать маску из специального резиста *AZ5214E* с нависающим профилем. Но на прозрачных кварцевых подложках применение его невозможно из-за вторичной засветки фоторезиста отраженным от столика

a)



b)

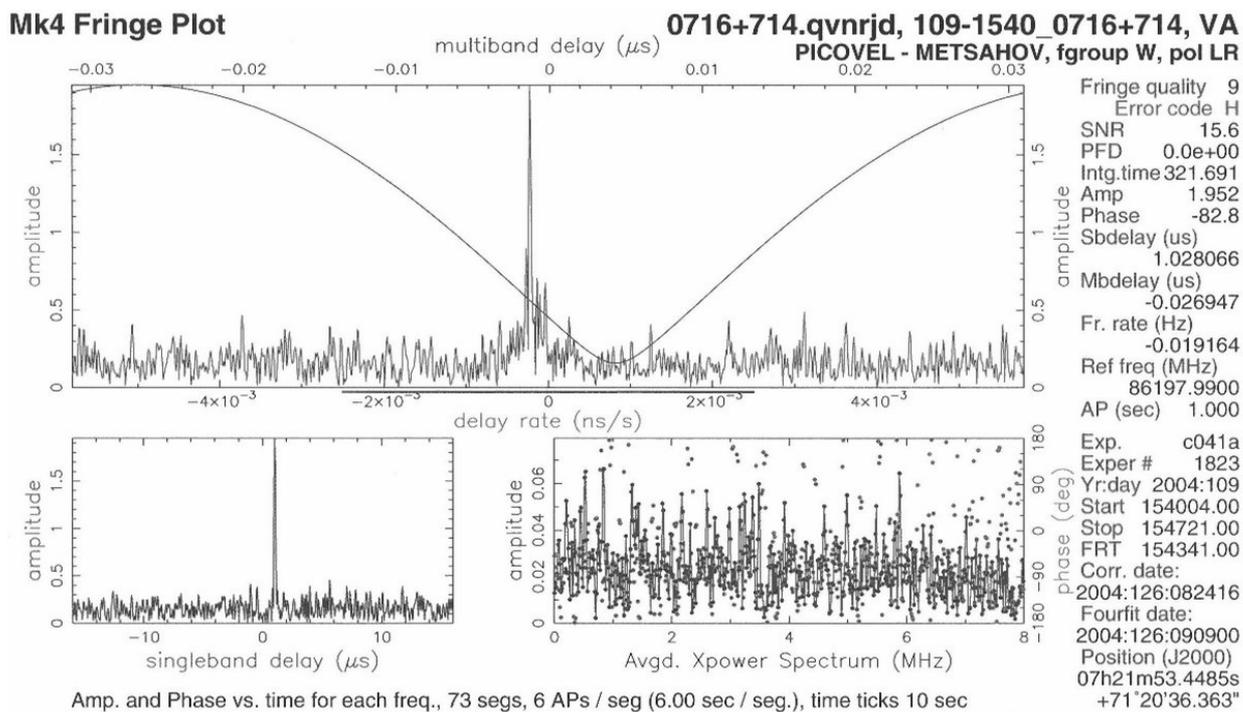


Рис. 3.7. Тестовые сканы Солнца в 3 –х (а) и 2-х (б) мм диапазонах (а) и результаты обработки на Боннском корреляторе результатов СДБ наблюдений (б).

светом. Была разработана технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках, основные этапы которой представлены на рис. 3.8

На всю кварцевую подложку осаждался слой Nb (monitor layer) толщиной, равный толщине верхнего электрода трехслойной структуры 100 nm. Затем методом взрывной литографии формировалась геометрия нижнего электрода. Трехслойная структура Nb/Al-AlOx/Nb осаждалась в едином вакуумном цикле (рис. 3.8.1). Оба металла, Nb и Al, напылялись DC магнетронным распылением. Во время напыления подложка плотно прижималась к водоохлаждаемому медному держателю с помощью специальной рамки. Теплопередача между подложкой и держателем дополнительно увеличивалась за счет вакуумной смазки. После напыления нижнего электрода из Nb проводилось напыление Al и его последующее термическое окисление при комнатной температуре в атмосфере чистого кислорода при давлении  $9 \cdot 10^{-2}$  мбар в течении 20 мин. Окисление проходило в динамическом режиме: через флуометр устанавливался поток  $O_2$  20 sccm, откачка камеры осуществлялось турбомолекулярным насосом. Динамический режим окисления, в отличие от статического режима, позволяет формировать туннельный барьер с более контролируемыми и воспроизводимыми значениями  $RnA$  в диапазоне от 10 до  $110 \Omega \cdot \mu^2$ . Размер переходов задавался с помощью фотолитографии и плазмохимического травления (RIE). Monitor layer служил также визуальным контролем окончания процесса RIE.

Для получения хорошо воспроизводимых переходов с площадью 1-2  $\mu\text{m}^2$  и уменьшения разброса параметров СИС переходов при изготовлении цепочек нами применялся метод двукратного формирования окон типа «крест на крест» [70]. Сначала формировалось первое «окно» из резиста в виде длинной (10  $\mu\text{m}$ ) и узкой (1 - 2  $\mu\text{m}$ ) полоски. По этой резистивной маске проводилось травление верхнего Nb электрода, легкая анодизация ( $7 \div 10$  В) и напыление первого слоя изоляции толщиной 170 nm (рис. 3.8.2).

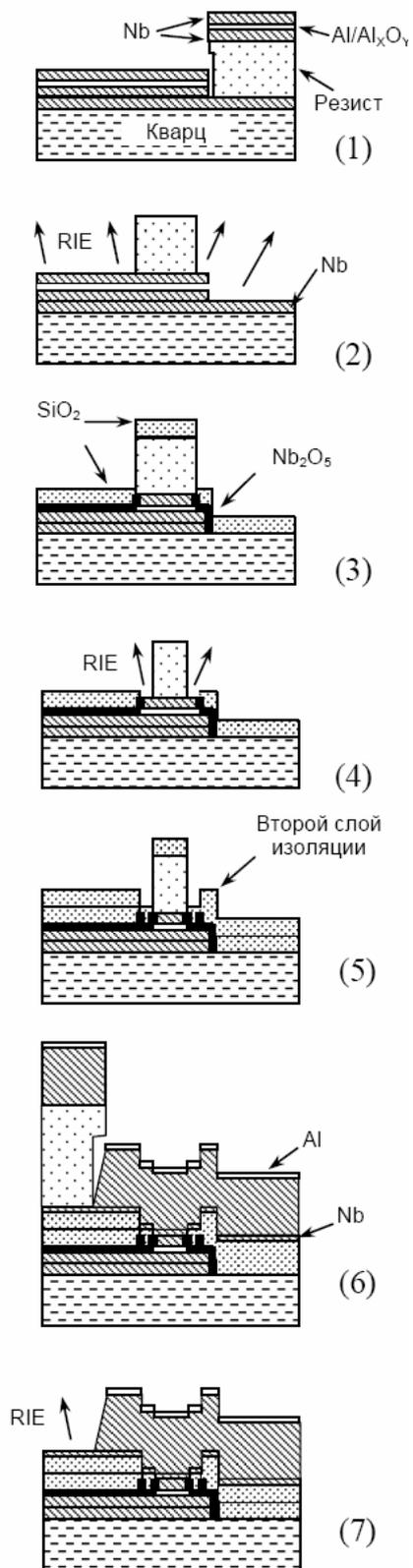


Рис. 3.8. Последовательность слоев при изготовлении СИС переходов на кварцевых подложках.

На следующем этапе, после проведения взрывной литографии (lift off метод), формировалась вторая длинная резистивная полоска, расположенная перпендикулярно первой. По этой маске также проводилось травление, анодизация и напыление второго слоя изоляции (рис. 3.8.3). Таким образом, на пересечении этих двух полосок формировался переход четкой квадратной формы. Изоляция между электродами достигалась с помощью анодизации до напряжения 10 V и осаждения дополнительного слоя SiO<sub>2</sub> (рис. 3.8.5). Перед формированием резистивной маски для замыкателя на всю подложку осаждался слой Nb толщиной 20 nm, который необходим для создания маски из резиста *AZ5214E* с нависающим профилем (см. выше). Затем DC магнетронным распылением осаждался Nb замыкатель (толщиной 500 - 600 nm) и слой Al (100 nm) (рис. 3.8.6). После проведения взрывной литографии и контроля качества края пленки замыкателя, тонкий слой Nb удалялся дополнительным процессом RIE по маске из Al (рис. 3.8.7).

### **3.5 Квазиоптический приемник на основе туннельного СИС перехода**

Альтернативой волноводным конструкциям являются квазиоптические (открытые) конструкции с планарной микроволновой антенной [71]. Интегральные подстроечные элементы могут быть изготовлены на одной подложке с СИС переходом и антенной в едином технологическом цикле. На рис. 3.9 (а) представлен вариант СИС приемника с эквиугольной спиральной антенной, нагруженной на вход трансформатора. На рис.3.9 (б) показана центральная часть структуры: спиральная антенна диаметром 3.4 мм и СИС переход площадью 6 мкм<sup>2</sup>, расположенный на конце микрополосковой линии трансформатора длиной 270 мкм и шириной 5 мкм. Конструкция такого приемника предложена В.Ю. Белицким.

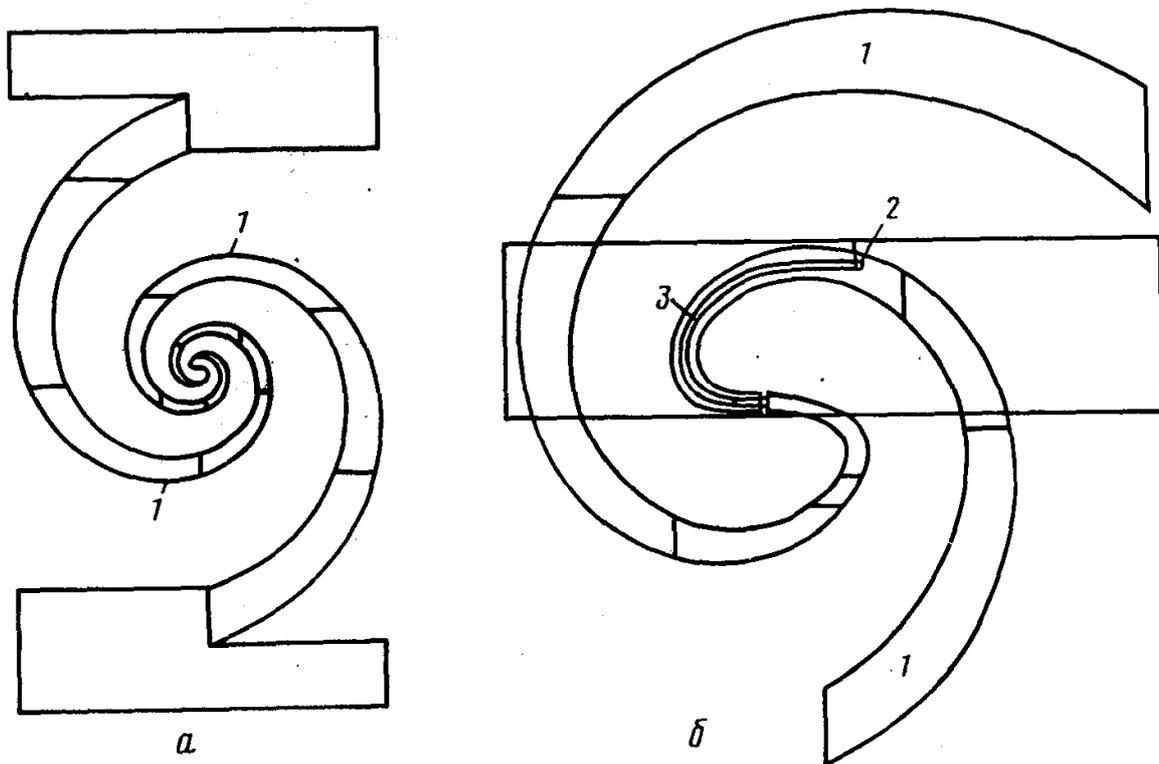


Рис. 3.9. Общий вид приемной структуры (а) и центральная часть подробно (б): планарная антенна (1), СИС переход (2), микрополосковый трансформатор (3).

К качеству СИС переходов для этой конструкции предъявлялись жесткие требования. СИС переходы, изготовленные на кварцевых подложках, должны быть высокого качества ( $\delta V_g < 100$  мкВ,  $R_j/R_n > 30$ ), с минимально допустимым разбросом параметров ( $R_n = 14 \text{ Ом} \pm 2\%$ ). Изготовление таких структур стало возможным после разработки технологии изготовления СИС переходов на кварцевых подложках и выбора оптимальных режимов напыления [А9, А14 - 15, А18 - 19, А26 - 28, А44, А47 - 48, А57 - 58].

На рис. 3.10 представлены результаты измерения шумовой температуры на теплый вход СИС смесителя. Лучшие значения шумовой температуры СИС смесителя на теплый вход системы на частоте 109,8 ГГц при центральной частоте ПЧ 1,4 ГГц (DSB) составили  $28 \pm 7$  К на первой квазичастичной ступени. В рамках сотрудничества между ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и Королевской Академии наук Швеции в 1992 году описанный смеситель был испытан в Чалмерском технологическом университете (г. Гетеборг) с 3-линзовой системой ввода сигнала. На частоте 106 ГГц была получена шумовая температура приемника 31.2 К, что являлось рекордно низкой шумовой температурой для приемников квазиоптического типа на этой частоте.

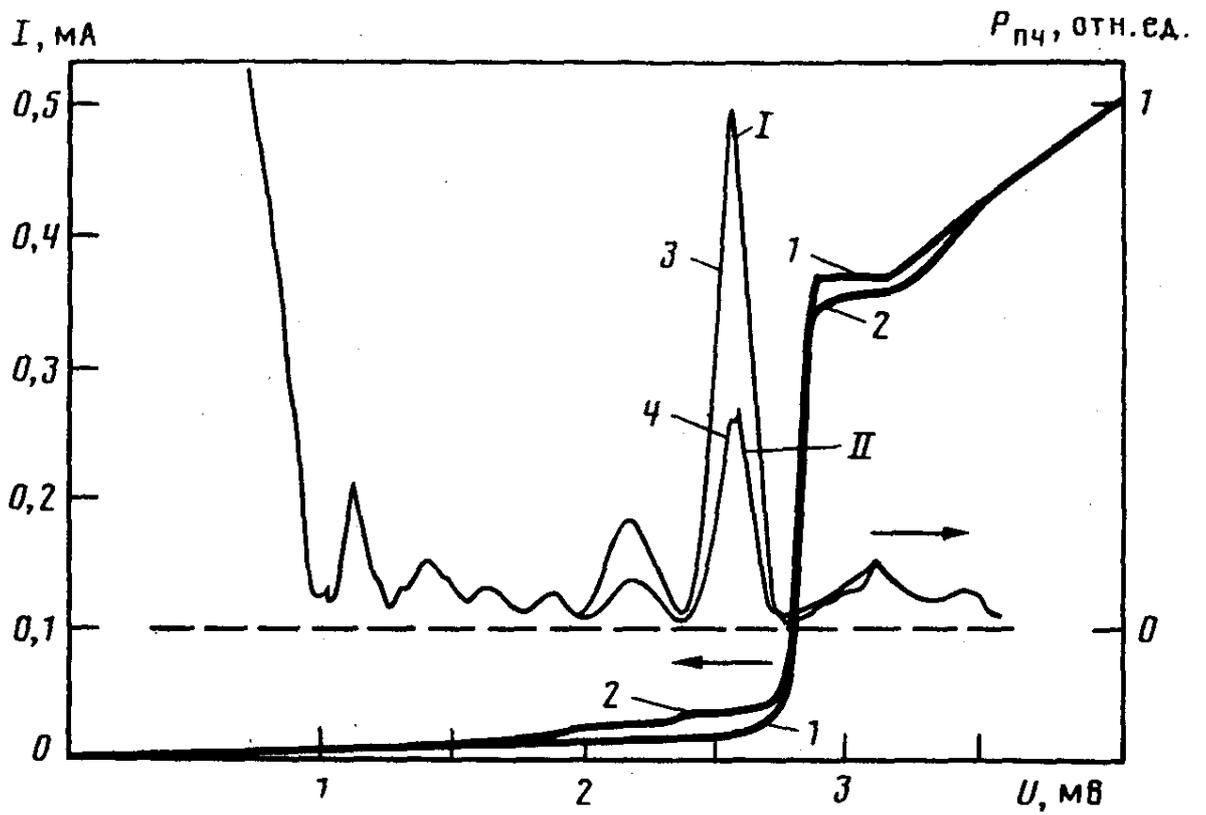


Рис. 3.10. Автономная ВАХ СИС перехода (1), ВАХ под воздействием гетеродина (2), ПЧ-отклик на горячую (274 К, I) и холодную (100 К, II) нагрузки (3, 4).

### 3.6 Выводы по Главе 3

В результате проведенных исследований были оптимизированы технологические режимы изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/AlOx/Nb. Были найдены условия, когда механические напряжения в пленках ниобия минимальны.

В результате проведенной оптимизации были получены переходы с отношением сопротивлений под и над щелью  $R_j/R_n \geq 40$ , величиной  $V_m = I_c \cdot R(2 \text{ мВ}) \geq 50 \text{ мВ}$  и размытием щелевого скачка  $\delta V_g \leq 100 \text{ мкВ}$ . Разброс основных параметров по подложке был менее 1% для переходов  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  и не превышал 5 для переходов  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ .

На основе оптимизированных систем СИС переходов был создан ряд практических малошумящих приемников для радиоастрономии, которые были успешно испытаны на радиотелескопе обсерватории Онсала (Onsala, Швеция).

Разработан криоэлектронный приемный комплекс для радиоастрономических исследований на 13,8 м радиотелескопе обсерватории Метсахови Хельсинского технологического университета (Финляндия) в двух частотных диапазонах- 3-х мм и 2-ух мм. Приемник построен по супергетеродинной схеме с СИС-смесителями на входе. Однополосная шумовая температура приемника в обоих частотных каналах составляет 50-100 К. С апреля 2004 года и по настоящее время при помощи данного приемника выполнена серия успешных циклов радиоастрономических наблюдений, в том числе в режиме интерферометра со сверхдлинной базой.

## **Глава 4. Интегральные сверхпроводниковые структуры**

Разработка и совершенствование технологии СИС структур, включающих в себя детекторы и джозефсоновские осцилляторы [А20 - 25, А30, А33, А37, А38], позволило найти подходы к изготовлению интегральных микросхем, содержащих (в различных комбинациях) несколько нелинейных элементов для детектирования или преобразования частоты, планарные антенны, микрополосковые линии, трансформаторы импеданса и фильтры для передачи, согласования и разделения сигналов, а также интегрированный источник гетеродина субмиллиметровых волн и цепи стабилизации его частоты.

### **4.1 Интегральный сверхпроводниковый приемник (СИП).**

Смесители на основе туннельных СИС переходов безусловно являются наилучшим входным устройством в мм и субмм диапазонах длин волн, их шумовая температура ограничена только квантовым пределом. Гетеродинные СИС приемники используются в качестве штатных устройств на большинстве радиотелескопов. Однако при повышении частоты принимаемого излучения более 300 ГГц наблюдается существенное поглощение сигнала парами воды в атмосфере. Именно поэтому все субмм радиотелескопы располагаются на значительной высоте или устанавливаются на борту специальных самолетов и спутников. При этом большие габариты, вес и высокая стоимость генераторов гетеродина в субмм диапазоне длин волн являются основными факторами, ограничивающими широкое использование субмм приемников. Отсутствие компактных и легко перестраиваемых источников гетеродина в субмм диапазоне длин волн

является серьезной проблемой, которая обуславливает необходимость разработки интегральных сверхпроводниковых генераторов для работы совместно с СИС смесителями.

В нашей лаборатории была предложена концепция полностью сверхпроводникового интегрального приемника субмм волн, где в одной микросхеме объединены несколько планарных сверхпроводниковых компонентов - СИС смеситель с квазиоптической антенной, криогенный генератор гетеродина с системами стабилизации частоты. В будущем возможна интеграция усилителя промежуточной частоты, а также устройств для оцифровки принимаемого сигнала и его обработки в реальном масштабе времени.

Одним из наиболее перспективных криогенных генераторов гетеродина является Flux-Flow Oscillator (ФФО), основанный на однонаправленном вязком движении магнитных вихрей в длинном джозефсоновском переходе [73, 74]. Скорость и плотность потока флаксонов и, следовательно, мощность и частота излучаемого сигнала могут настраиваться независимо совместной подстройкой токов смещения и магнитного поля. Сверхпроводниковый ФФО был детально исследован в диапазоне частот 100 - 750 ГГц. На частоте около 400 ГГц была зарегистрирована мощность более 1 мкВт, что достаточно для накачки СИС смесителя [75, А 46]. Была продемонстрирована возможность перестройки частоты и мощности ФФО при изменении тока смещения и/или магнитного поля. В различных экспериментах было показано, что спектральная ширина линии излучения ФФО составляет величину порядка 1 МГц [74-76, А 78].

К преимуществам ФФО перед другими джозефсоновскими осцилляторами, с точки зрения технологии его изготовления, можно отнести отсутствие субмикронных размеров и, как следствие, относительную толерантность к отклонениям геометрических размеров. Однако для такого длинного (до 1 мм) СИС перехода очень важна его однородность, так как

захват вихрей на неоднородностях барьера или электродов препятствует плавному течению вихрей магнитного поля, что затрудняет частотную перестройку ФФО.

## 4.2 Микросхема интегрального приемника.

Упрощенная принципиальная схема квазиоптического интегрального приемника со смесителем на одиночном СИС переходе представлена на рис. 4.1. На рис. 4.2 представлен общий вид центральной части чипа.

СИС переход размещен в центре двойной дипольной антенны, рассчитанной на центральную частоту 500 ГГц; на эту же частоту была настроена микрополосковая структура для компенсации емкости туннельного СИС перехода. Симметрия антенны позволила использовать с обеих сторон одинаковые подводы к смесителю с компланарными фильтрами для предотвращения утечки принимаемого сигнала. Правые фильтры (рис. 4.2) использовались для подсоединения СИС смесителя на постоянном токе и промежуточной частоте (ПЧ). Правые подводы использовались для подключения FFO [A39-42, A51-54, A61-63, A65-67, A69, A74].

Все соединения, как на постоянном токе, так и СВЧ выполнены с помощью сверхпроводниковых линий на основе пленок Nb со структурой Nb/SiO<sub>2</sub>/Nb, которые призваны обеспечивать малые потери на субмиллиметровых волнах, отсутствие захваченного магнитного потока (пиннинга вихрей магнитного поля) и высокие значения критического тока (более 100 мА).

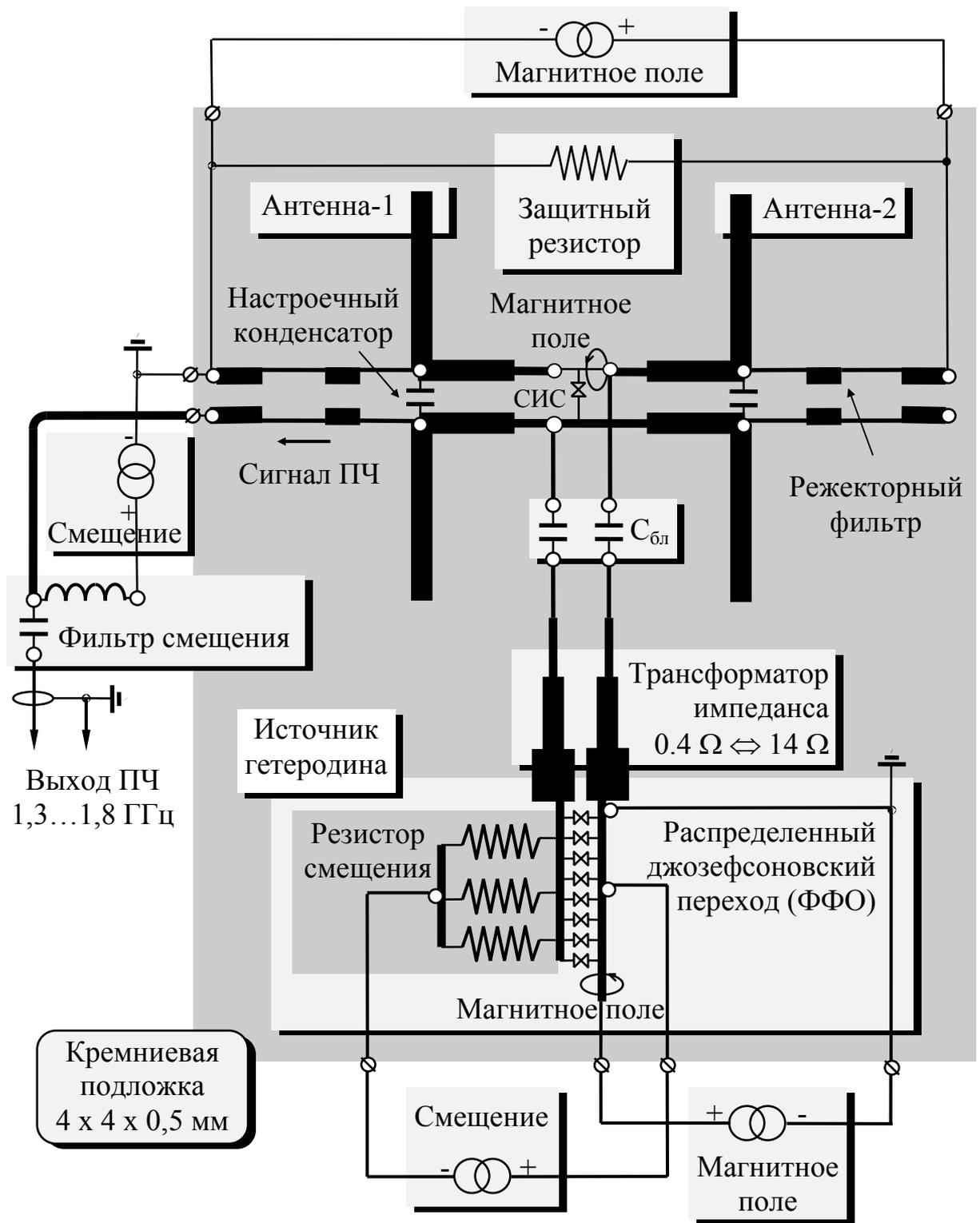


Рис. 4.1. Упрощенная схема интегрального приемника со смесителем на одиночном СИС переходе. Схема разработана С. В. Шитовым и В. П. Кошельцом.

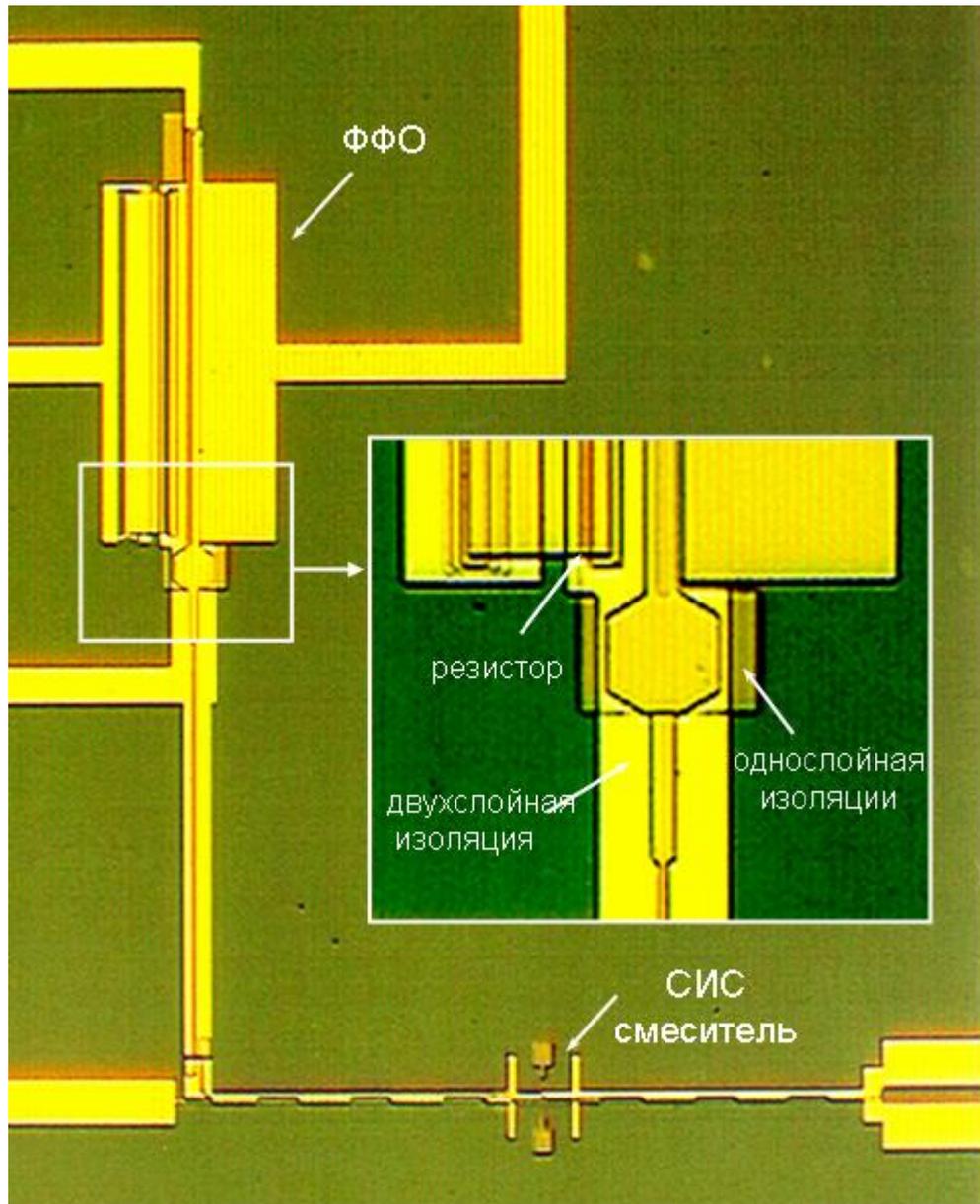


Рис. 4.2. Центральная часть микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника на частоту 500 ГГц. На увеличенной вставке показан трансформатор импеданса ФФО, где используются два различных слоя изоляции.

#### 4.2.1. Технология изготовления микросхемы СИП.

Интегральные приемники изготавливались как в нашей лаборатории, так и в лаборатории SRON/FDL (г. Гронинген, Нидерланды).

Подложка, на которой изготавливается микросхема приемника, должна быть частью оптической системы, то есть должна быть изготовлена из того же материала, что и линза. Это вносит некоторые различия в технологический процесс изготовления микросхем для кварцевой или кремниевой оптики. Первые интегральные приемники [А 37 - 42] изготавливались на кварцевых подложках 15\*24 по технологии, описанной в Главе 3. Решение перейти на кремниевые подложки ( $\epsilon = 11,7$ ) было продиктовано следующими соображениями. 1) Монокристаллический кремний легко обрабатывается и из него, в отличие от кварца, достаточно просто изготовить асферические оптические элементы. 2) Чистый кремний имеет низкие диэлектрические потери на субмм волнах и в то же время поглощает значительную часть инфракрасного излучения. 3) Качество СИС структур на кремнии практически всегда выше, чем на кварце, за счет лучшей стабилизации температурного режима (хорошей теплопроводности подложки). В качестве подложек использовался монокристаллический высокоомный кремний, полированный с одной стороны и толщиной 0.5 мм. Размер подложек для первых дизайнов интегрального приемника составлял 15\*24 мм, для последующих - 2". Основные шаги изготовления представлены схематически на рис. 4.3. Последовательность слоев и параметры их напыления представлены в табл. 4.1.

На очищенную в горячем (80°C) растворе кислоты (30 мл  $\text{NH}_4\text{OH}$  25%, 30 мл  $\text{H}_2\text{O}_2$  30% , 150 ml DI воды) кремниевую пластину напылялся слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предотвращающий травление кремниевой пластины в процессе изготовления структуры.

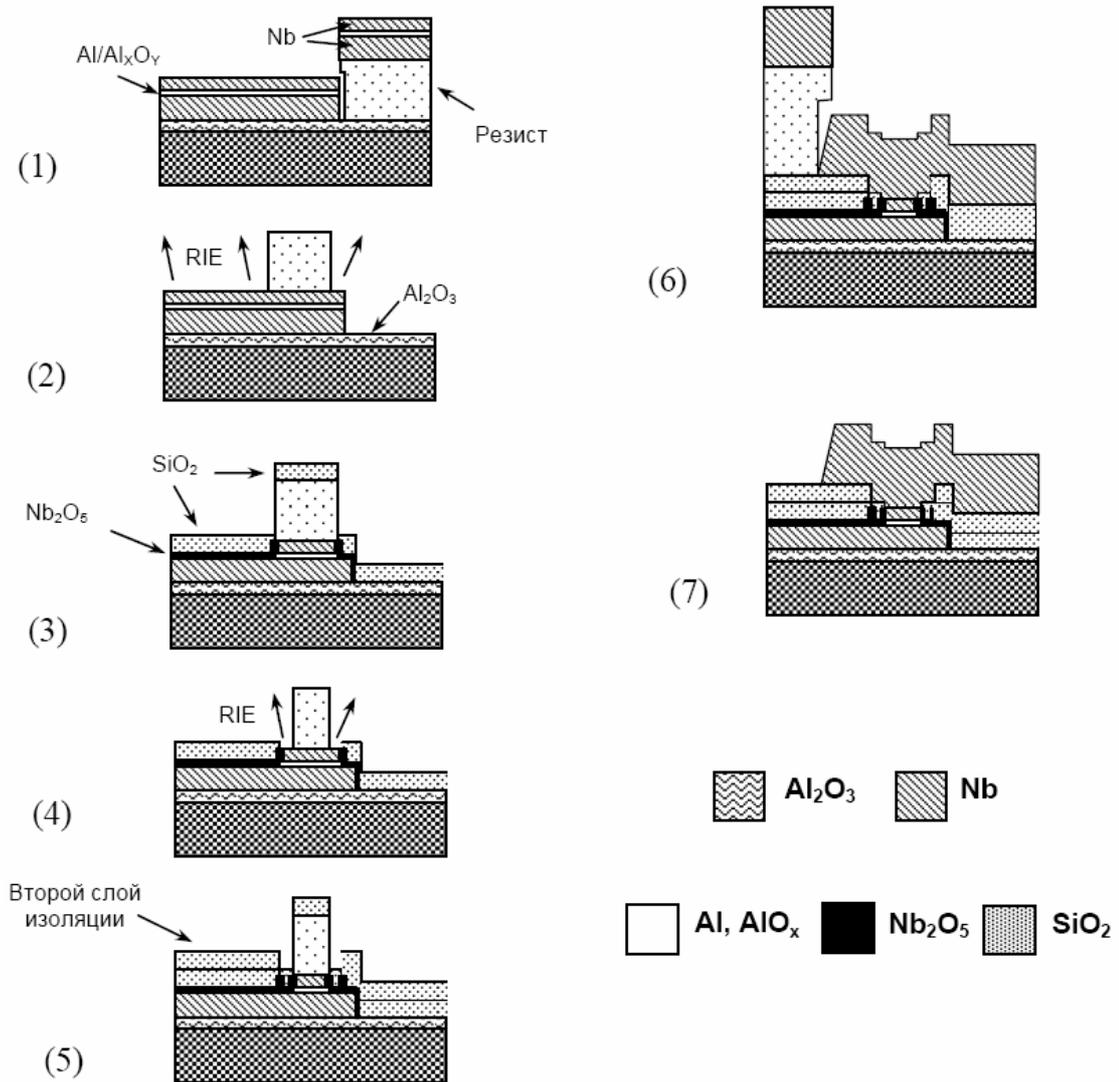


Рис. 4.3 Диаграмма, поясняющая процесс изготовления многослойной интегральной схемы для приемника субмиллиметровых волн на кремниевой подложке:

- (1) формирование нижнего электрода и напыление трехслойной структуры;
- (2) формирование первого окна;
- (3) RIE, анодизация и напыление первого слоя изоляции;
- (4) формирование второго окна и RIE;
- (5) анодизация и напыление второго слоя изоляции;
- (6) формирование верхнего электрода;
- (7) финальная структура; процесс осаждения Au не показан.

**Таблица 4.1 Основные слои и режимы напыления  
при изготовлении микросхемы интегрального приемника.**

Материал	Назначение	Толщина (нм)	Параметры напыления
$Al_2O_3$	буферный слой	100	Ar, 20 мТорр, 0.75 нм/с
Nb	нижний электрод	200	Ar, 8 мТорр, 1.5 нм / с
Al/ $AlO_x$	туннельный барьер	7/1	Ar, 8 мТорр, 0.36 нм / с, O <sub>2</sub> , 10 мТорр, 20 мин
Nb	верхний электрод	100	Ar, 8 мТорр, 1.5 нм / с
$Nb_2O_5$	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
$SiO_2$	изоляция-1	150	Ar, 20 мТорр, 0.24 нм / с
$Nb_2O_5$	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
$SiO_2$	изоляция-2	100	Ar, 20 мТорр, 0.24 нм / с
Al	резистор	200	Ar, 8 мТорр, 0.36 нм / с
Nb	замыкатель	500-650	Ar, 8 мТорр, 1.5 нм / с
Al/Au	контактные площадки	10/100	Ar, 8 мТорр, 0.36 нм / с Ar, 8 мТорр, 3.0 нм / с

Геометрия нижнего электрода формировалась методом взрывной литографии (шаг (1) на рис. 4.3). Трехслойная структура Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb осаждалась в едином вакуумном цикле. Оба металла, Nb и Al, напылялись dc магнетронным распылением. После напыления нижнего электрода Nb проводилось напыление Al и его последующее термическое окисление при комнатной температуре в атмосфере чистого кислорода. Использовались напылительные установки Leybold-560 и Nordico-2000 при изготовлении в ИРЭ и SRON/FDL соответственно.

Для формирования СИС переходов микронных размеров использовались два метода. Первый метод, который мы называем «традиционным», заключается в формировании квадратного окна в слое изоляции SiO<sub>2</sub>. Второй метод – это так называемый метод изготовления окон «крестом». Важно отметить, что согласно требованиям rf дизайна, при изготовлении интегральных приемников осаждалось два слоя изоляции. В обоих случаях два перекрывающихся окна формировались методом SNEAP, используя позитивный фоторезист SPR2-1.3FX (шаги (2)-(5) на рис. 4.3). Отличие заключалось в том, что для квадратных окон площадь перехода определяло первое окно (1\*1 мкм) из двух *концентрических* окон, в то время как для переходов, изготовленных «крестом», площадь перехода - это область пересечения двух *перпендикулярных* полосок, размером 1\*6 мкм каждая. Фотография формирования СИС переходов этими двумя методами представлена на рис. 4.4.

Площадь СИС перехода составляет около 1 мкм<sup>2</sup>, точность совмещения слоев – около 0,5 мкм.

Типичные параметры реактивно-ионного травления (RIE): давление смеси газов CF<sub>4</sub> +3% O<sub>2</sub> 250 мбар, мощность 35 Вт. Изоляционные слои SiO<sub>2</sub> осаждались rf магнетронным напылением в установке Leybold - Z400. Резистор для ФФО формировался в месте большого СИС перехода. Чтобы удалить верхний ниобий трехслойной структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb, этот

большой «переход» стравливался реактивно-ионным травлением, процесс которого автоматически останавливался на слое Al. Алюминий трехслойки затем удалялся жидкостным травлением в растворе КОН. Нормальный металл (резистор) осаждался на место туннельного барьера методом взрывной литографии.

Геометрия замыкателя формировалась методом взрывной литографии (шаг 6 на рис. 4.3). Замыкатель из Nb осаждался dc магнетронным распылением, толщина составляла 500-650 нм. На последнем этапе изготовления методом взрывной литографии формировались контактные площадки из золота.

После изготовления подложка разрезалась на отдельные чипы размером 5\*5 мм. На подложке 15\*24 мм размещалось 10 чипов, на 2'' пластине - 50 чипов.

В смесителе использовались СИС переходы размером  $1\div 2 \text{ мкм}^2$  (в зависимости от варианта прибора). Большие размеры были выбраны для увеличения выхода годных приборов, однако, большинство экспериментальных исследований выполнялось с СИС переходами малой площади, так как они требуют меньше мощности СВЧ накачки, которая может быть реализована в более широкой полосе перестройки ФФО. Распределенный джозефсоновский переход (ФФО) имел длину около 500 мкм и ширину  $3\div 5 \text{ мкм}$ . Плотность критического тока составляла  $j_c = 5\div 8 \text{ кА/см}^2$ , что соответствует удельному сопротивлению барьера  $R_n S = 25\div 40 \text{ Ом} \cdot \text{мкм}^2$  и джозефсоновской глубине проникновения около 4 мкм. Всего по разработанной технологии автором изготовлено ~ 600 микросхем интегрального приемника различных дизайнов. Выход годных составлял ~ 80% по предварительным dc тестам и ~ 25% после rf отбора.

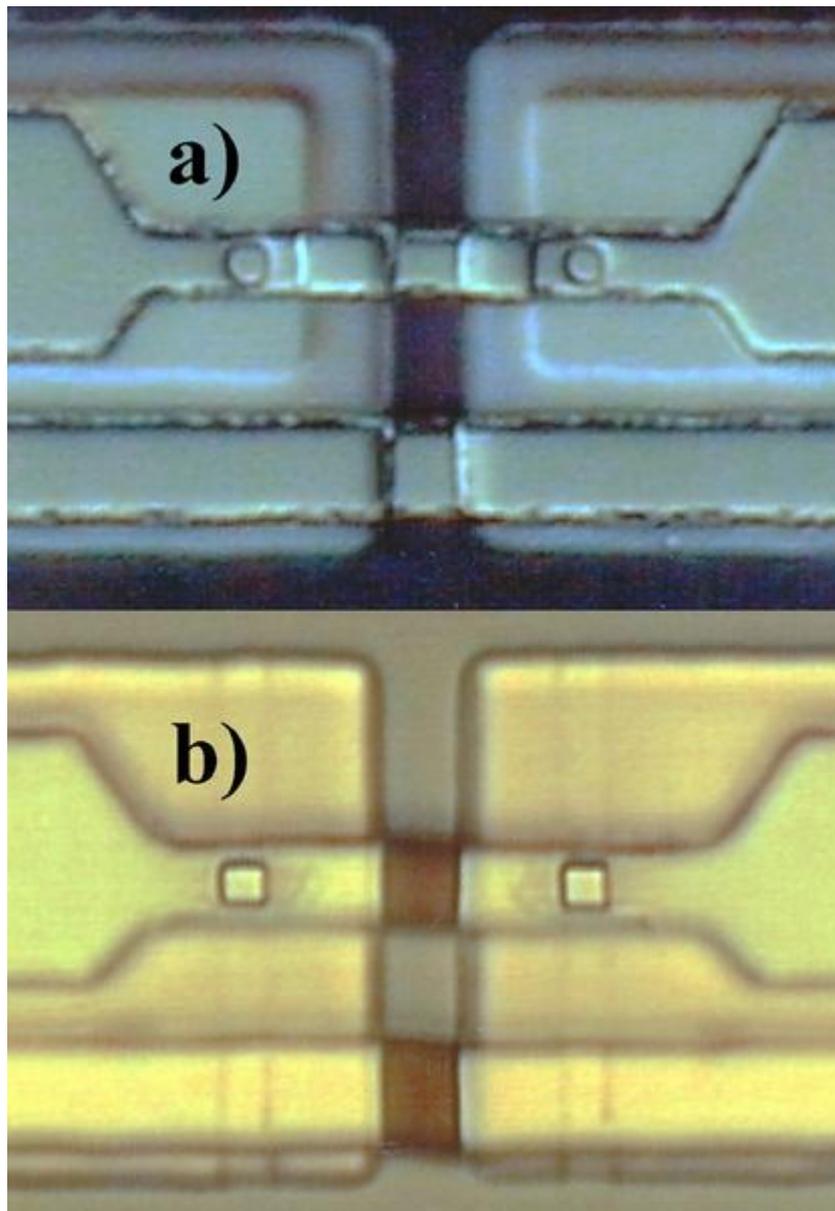


Рис. 4.4. Два способа формирования переходов: традиционный метод (а) и метод формирования «крестом» (b).

#### 4.2.2 Особенности RIE процесса при формировании перехода методом «крест».

Как уже упоминалось выше, для формирования СИС переходов микронных размеров использовались два метода. Первый метод, который мы называем «традиционным», заключается в формировании квадратного окна в слое изоляции  $\text{SiO}_2$ . Второй метод – это так называемый метод изготовления окон «крестом» (рис. 4.4). Из рисунка видно, что второй метод позволяет получать переходы правильной квадратной формы. Мы обнаружили, что второй процесс RIE при этом методе формирования окон должен быть по времени дольше, что можно объяснить сложностью вытравливания Nb сквозь узкую щель в первом слое изоляции [A88]. Причем, чем меньше размер перехода, тем меньше скорость травления ниобия. Скорость травления Nb при формировании первого окна 0.6 нм/сек, а скорость при втором процессе RIE уменьшается до 0.2÷0.3 нм/сек. Если Nb вытравливается не полностью и остается по краям перехода (в виде тонкого черного канта), то вольт-амперные характеристики такого перехода ухудшаются. Это можно объяснить тем, что оставшийся тонкий ниобий имеет плохие сверхпроводниковые свойства – низкое  $T_c$  и меньшее значение  $V_g$ . На рис. 4.5 показаны этапы формирования перехода: а) до второго RIE (сформирована вторая длинная резистивная полоска); б) после второго RIE (ниобий полностью стравился).

Сверхпроводящие схемы на основе микрополосков, изготовленных методом тонких пленок, предъявляют жесткие требования к точности толщин слоев, в особенности изоляции (лучше 10%). Мы контролировали толщину каждого слоя изоляции с помощью профилометра “Alfa step”. Во время второго процесса реактивно-ионного травления Nb первый слой изоляции также подвергается травлению (скорость травления  $\text{SiO}_2 \sim 0.1$  нм/сек), поэтому толщина первого слоя изоляции измерялась дважды –

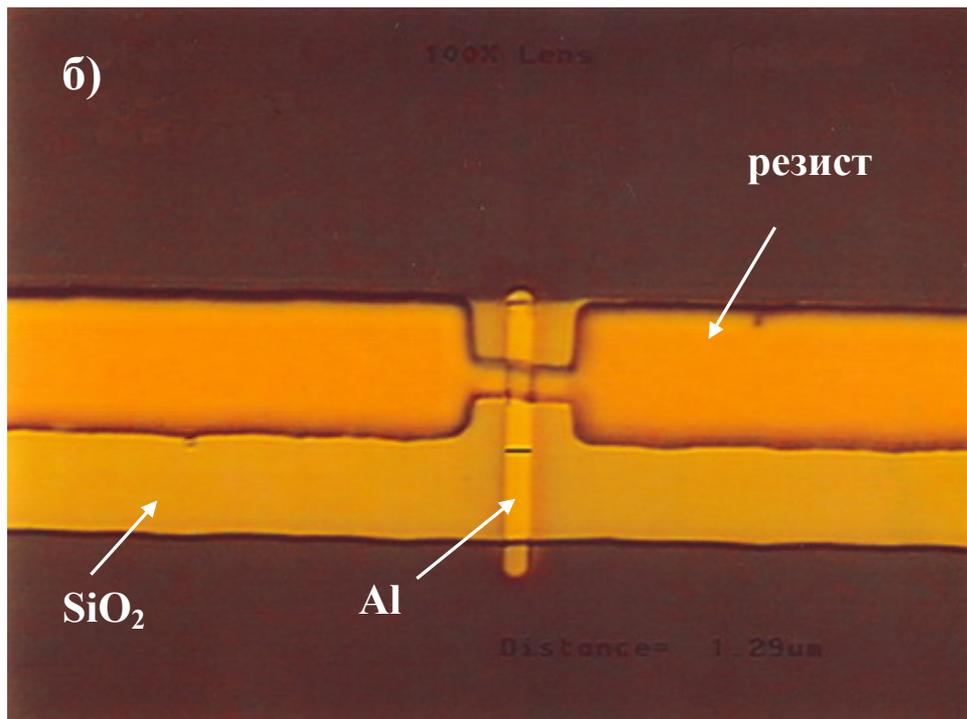
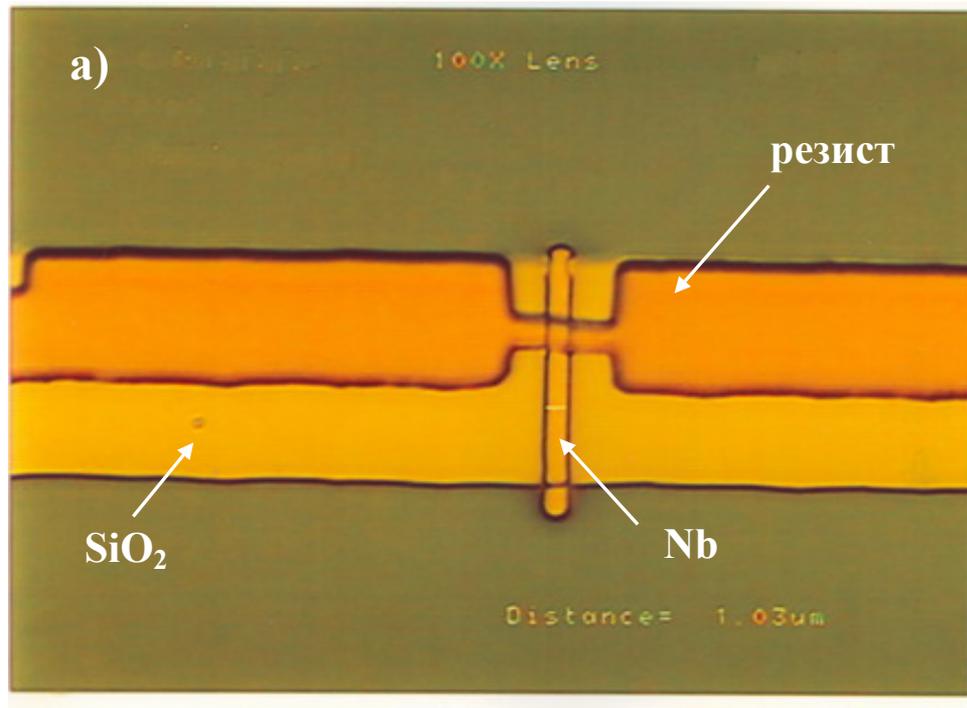


Рис. 4.5 Процесс формирования перехода методом «крест»:  
 а) до второго RIE (сформирована вторая длинная резистивная полоска);  
 б) после второго RIE (ниобий полностью стравился).

до и после травления. Для того, чтобы добиться правильной суммарной толщины изоляции, толщина второго слоя  $\text{SiO}_2$  корректировалась и напылялась большее на величину, равную той, на которую уменьшилась толщина первой изоляции во время второго процесса реактивно-ионного травления.

#### **4.2.3 Оптимизация края пленок микрополосковой линии.**

Для управления микросхемой интегрального приемника используются 4 источника постоянного тока. Два источника тока нужны для смещения СИС перехода и для его контрольной линии, чтобы локализованным магнитным полем подавить эффект Джозефсона в смесителе. Два других независимых источника используются для смещения ФФО и для его контрольной линии, которая задает на нем другое значение локального магнитного поля. Это необходимо для независимой оптимизации эффекта Джозефсона в осцилляторе (источнике гетеродина). Выделение тепла в такой микросхеме определяется, главным образом, энергопотреблением ФФО и составляет не более 50 мкВт. В других сверхпроводящих элементах системы выделение тепла либо отсутствует, либо пренебрежимо мало.

На рис. 4.6 показан крупно смеситель с антенной двойной диполь. На рис. 4.7 хорошо видна тонкая линия инъекции гетеродина шириной около 1 мкм, которая обеспечивает высокий импеданс подсоединения (около 80 Ом). От точности выполнения этого элемента зависит точность баланса мощности гетеродина и потери сигнала при передаче от антенн к смесительному элементу.

К особенностям схемы можно отнести наличие защитного резистора, изготовленного из золота, который имеет сопротивление доли Ома и шунтирует узкую (3 мкм) сверхпроводящую контрольную линию СИС смесителя. Назначение этого резистора – предотвратить перегрузку СИС

смесителя током источника магнитного поля, что может произойти при переходе контрольной линии в нормальное (резистивное) состояние, вызванное нежелательным вхождением вихрей магнитного потока из-за неоднородностей сверхпроводниковой пленки, которая, как было сказано выше, может нести ток, близкий к критическому. Перестройка частоты ФФО производится магнитным полем тока, пропускаемого по пленке нижнего электрода, который играет роль контрольной линии.

Изготовление тонкой линии настроечного элемента СИС смесителя, способной одновременно обеспечить согласование по СВЧ с малыми потерями, а также выдержать ток, необходимый для полного подавления эффекта Джозефсона, является одним из наиболее критических моментов во всей процедуре изготовления микросхемы. Теоретически, микрополосковая линия из ниобия над экраном толщиной более 200 нм имеет критический ток около 1 ампера. Однако в цепи магнитного поля, конкретно, в СВЧ фильтрах, пленка контрольной линии не имеет экрана (рис. 4.8). При отсутствии экрана ток в пленке концентрируется у ее краев, что приводит к понижению критического тока цепи магнитного поля. В силу этого эффекта критический ток пленки может снизиться больше, чем на порядок, в особенности, если химико-физические свойства края пленки не оптимизированы. Неоднородности края пленки способствуют захвату вихрей магнитного поля, то есть разрушению сверхпроводимости. Экспериментально было установлено, что пленка с истонченным краем имеет значительно более низкий критический ток (вплоть до 10 мА). Пример такой структуры приведен на рис. 4.9. Причина такой аномалии может быть объяснена, как недостаточно оптимизированным процессом взрывной литографии (слишком широкий нависающий край фоторезиста), так и недостаточно плавной формой края нижележащих пленок изолятора. Последняя проблема является одной из ключевых в технологии тонких пленок.

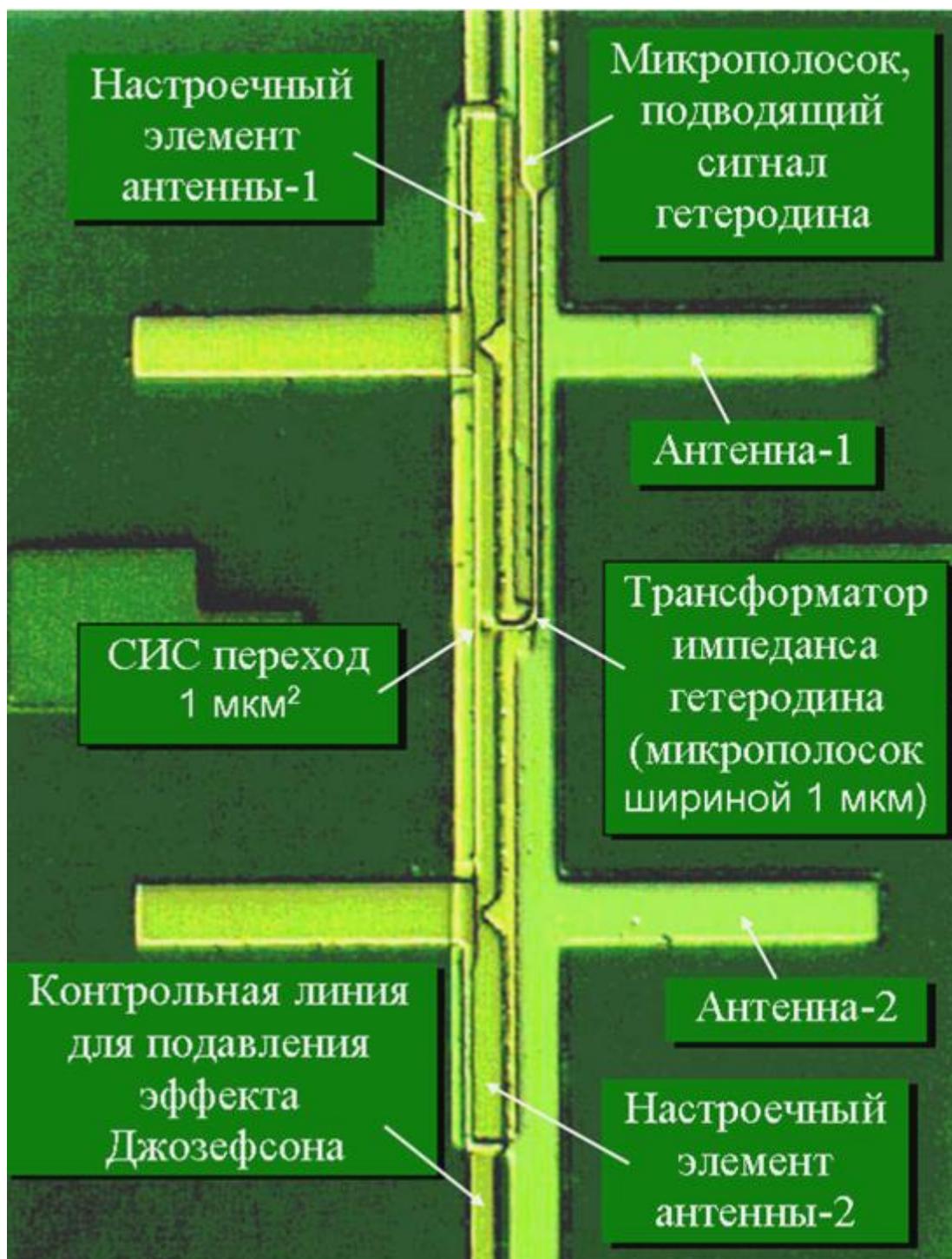


Рис. 4.6. Смеситель сверхпроводящего интегрального приемника на частоту 500 ГГц с двойной дипольной антенной. Поле зрения 100 мкм \* 150 мкм.

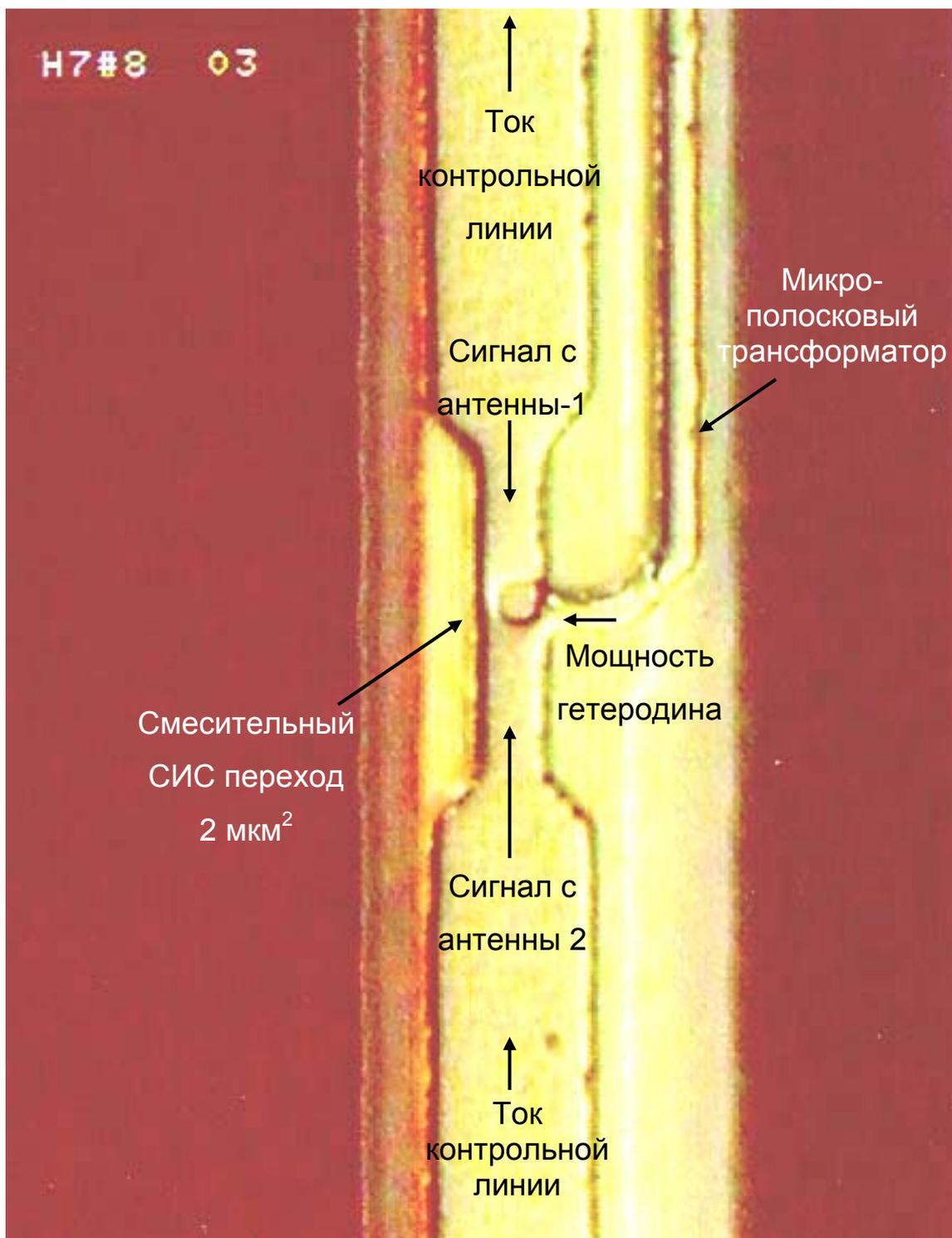


Рис. 4.7 Центральная часть смесителя сверхпроводникового интегрального приемника с одиночным СИС переходом.

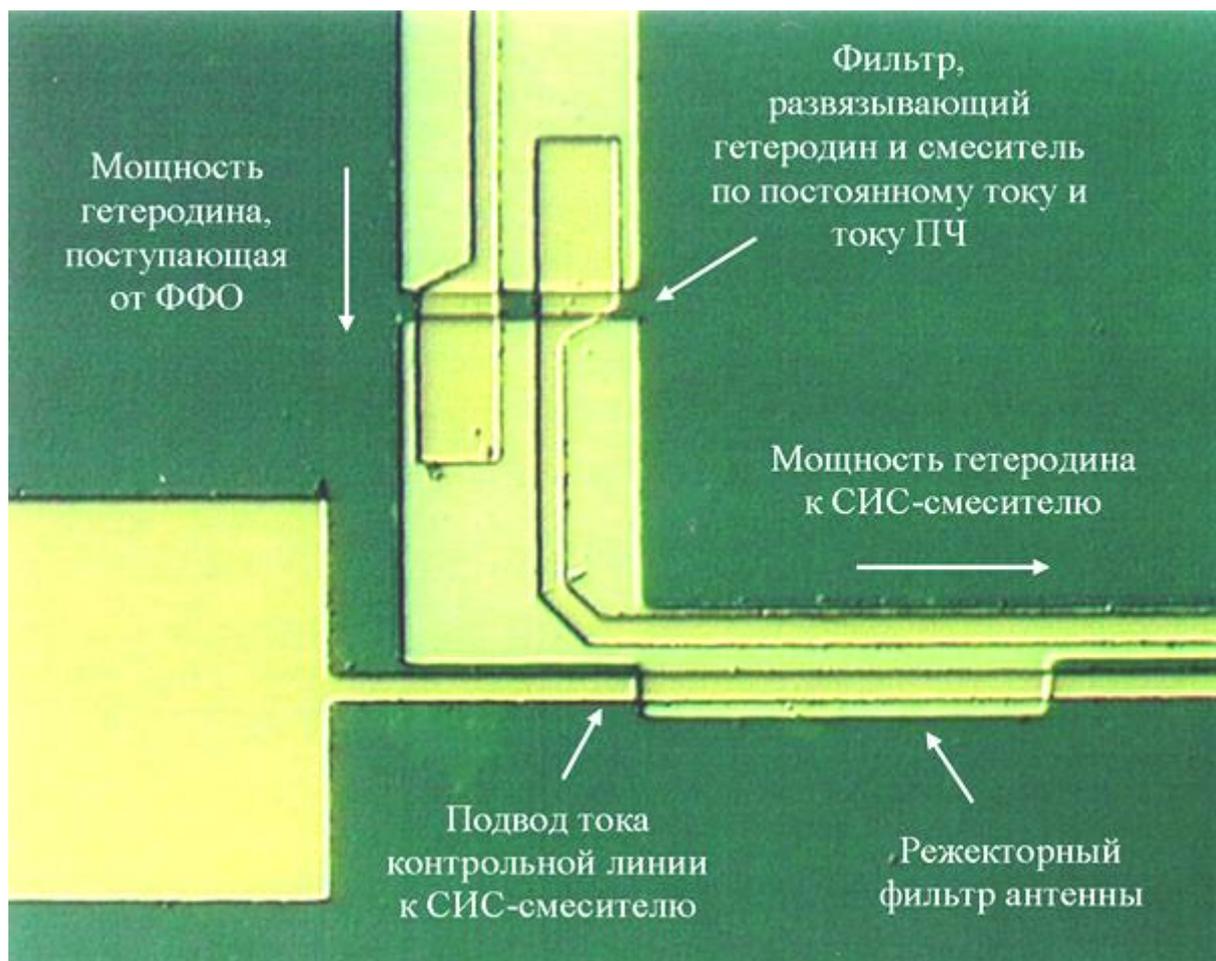


Рис. 4.8 Фотография широкополосного СВЧ фильтра (400-600 ГГц), встроенного в микрополосковую линию. Фильтр блокирует ток ПЧ и разрывает оба электрода микрополосковой линии по постоянному току; использован для подачи мощности гетеродина от ФФО к СИС смесителю интегрального приемника. Здесь же показана топология контрольной линии магнитного поля, включенной в состав полосового стоп-фильтра СВЧ.

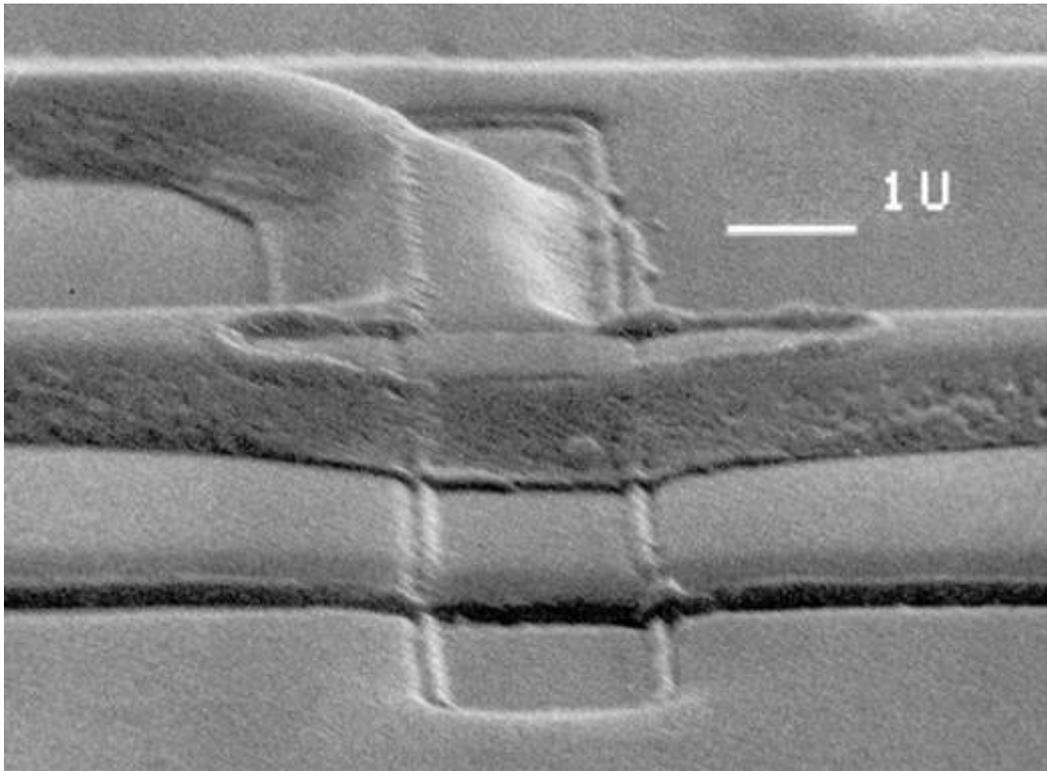


Рис. 4.9 Фото центральной части СИС смесителя, выполненное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Фото демонстрирует топологию крестообразного СИС-перехода микронного размера, а также истонченный край пленки верхнего электрода (контрольной линии СИС-смесителя), изготовленную методом нависающей маски фоторезиста

Были проведены исследования по изготовлению замыкателя с вертикальным профилем. Такой профиль можно было бы получить, используя метод прямой литографии (метод травления) вместо метода взрывной литографии. При прямой литографии пленка, в которой формируется рисунок, нанесена на подложку до формирования слоя резиста. Передача рисунка на пленку осуществляется травлением. Рисунок, получаемый на пленке, соответствует рисунку маски.

Формирование замыкателя методом травления не принесло положительных результатов. Травление толстой пленки Nb (толщина замыкателя 500-650 нм) приводило к подтраву тонкой линии инъекции гетеродина, ширина которой в готовом виде должна быть 1 мкм. Дальнейшие исследования были направлены на оптимизацию процесса взрывной литографии, а именно, выбора параметров формирования резистивной маски. Экспериментально были подобраны следующие режимы: 1) фоторезист AZ5214E (в данном случае он используется в качестве позитивного резиста) наносится на подложку методом центрифугирования в течение 30 секунд со скоростью вращения 4000 г $\cdot$ м; 2) сушка при 90°C в течение 20 мин; 3) засветка резиста 17 сек при интенсивности лампы 4.2 мВт/см<sup>2</sup>; 4) проявление резиста 40 сек в КОН.

Оптимизация края пленки позволила увеличить критический ток до значения более 150 мА, что является заведомо достаточным для правильной работы СИС смесителя. Результат тестирования улучшенной структуры верхнего электрода представлены на рис. 4.10.

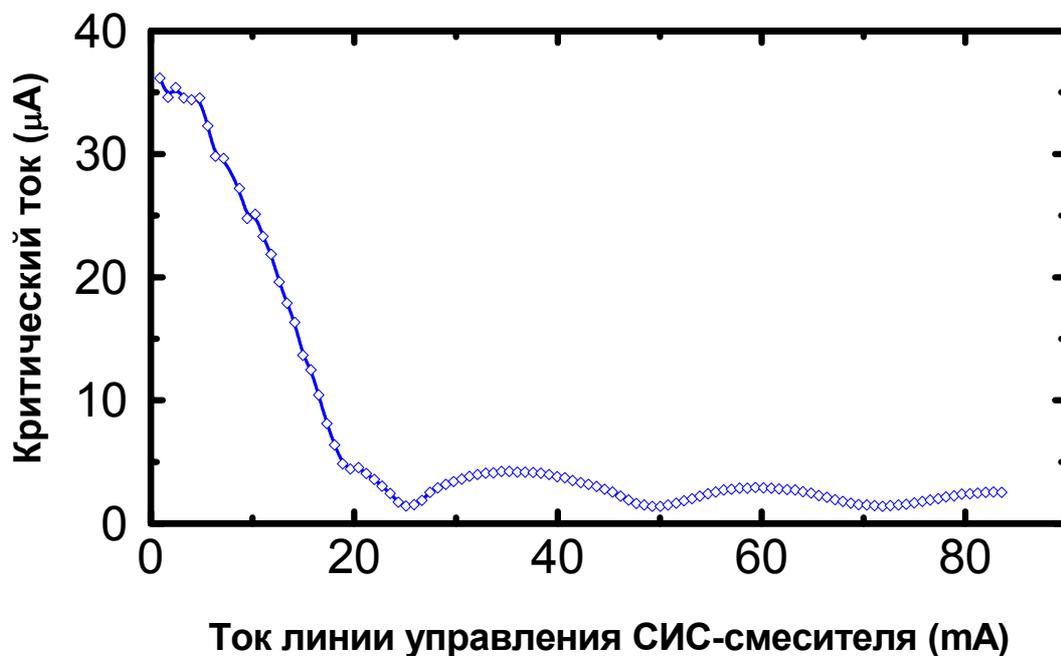


Рис. 4.10. Результат тестирования улучшенной интегральной контрольной линии СИС-смесителя, необходимой для подавления эффекта Джозефсона. Видно уверенное достижение третьего минимума критического тока СИС-перехода.

#### 4.2.4 Экспериментальное исследование интегрального приемника.

Испытания интегрального приемника проводились так же, как и тестовые измерения ФФО, в тщательно сконструированном двухслойном цилиндрическом магнитном экране, который устанавливался в гелиевый криостат с оптическим окном. Квазиоптический луч антенны переключался с помощью системы зеркал (модулятора) между холодным (78 К) и горячим (295 К) поглотителями. Поглотители играли роль абсолютно черного тела, для которого спектральная плотность излучения характеризуется его физической температурой. Проводилось также сравнение шумовой температуры приемника на основе сверхпроводниковой интегральной микросхемы при использовании внутреннего и внешнего источников гетеродина. Внешний гетеродин позволял получить несколько лучшую шумовую температуру, что можно объяснить вкладом амплитудно-модулированного шума внутреннего гетеродина (ФФО). Следует отметить, что в балансном варианте интегрального приемника (описан ниже) амплитудные шумы ФФО подавлялись, что выразилось в падении шумовой температуры ниже 100 К.

Для управления микросхемой интегрального приемника путем взаимной оптимизации всех четырех источников смещения, а также сбора экспериментальных данных была использована компьютерная система «IRTECON». Эта же система использовалась для тестирования чипов на этапе их предварительного отбора сразу после изготовления (подробнее описано в Главе 2). Кроме измерения ВАХ микросхемы, установки и поддержания необходимых токов смещения, система «IRTECON» может выполнять сложные вычисления и преобразования с данными, а также управлять ходом эксперимента.

### 4.3 Приемник с балансным СИС смесителем

Балансный смеситель был задуман с целью обеспечить максимальную связь с гетеродином, не принося в жертву связь СИС смесителя по сигналу. Общим свойством балансных схем является подавление синфазных помех, которые в нашем случае могут быть представлены амплитудной модуляцией мощности ФФО. Однако для достижения высоких значения подавления помех необходима хорошая балансировка структуры, что в первую очередь определяется одинаковостью электрических параметров двух СИС переходов смесителя, включая цепи согласования и подвода сигнала. Особенность схемы является противофазный сигнал ПЧ, возникающий на двух смесительных переходах. Для их объединения использовались внешний фазовращатель. Мощность гетеродина подводится, как и в случае одиночного смесителя, по микрополосковой линии шириной 4 мкм и длиной около 1 мм, протянутой поверх СВЧ стоп-фильтров одной из антенн. Связь этой линии со смесителем и последовательное возбуждение цепочки из двух СИС переходов осуществляется посредством приложения СВЧ напряжения к щели, разделяющей два смесительных СИС перехода, как показано на рис. 4.11. Реактивное замыкание линии гетеродина на щель производится за счет разомкнутого на конце отрезка той же линии, играющего роль блокировочного конденсатора.

Подтверждением эффективности балансного смесителя с внутренним гетеродином может служить экспериментальный факт – шумовая температура балансного интегрального приемника уверенно достигла границы в 100 К (рис. 4.12). Это составляет менее 10 фотонов, что признано критерием для лучших СИС приемников с внешним гетеродином.

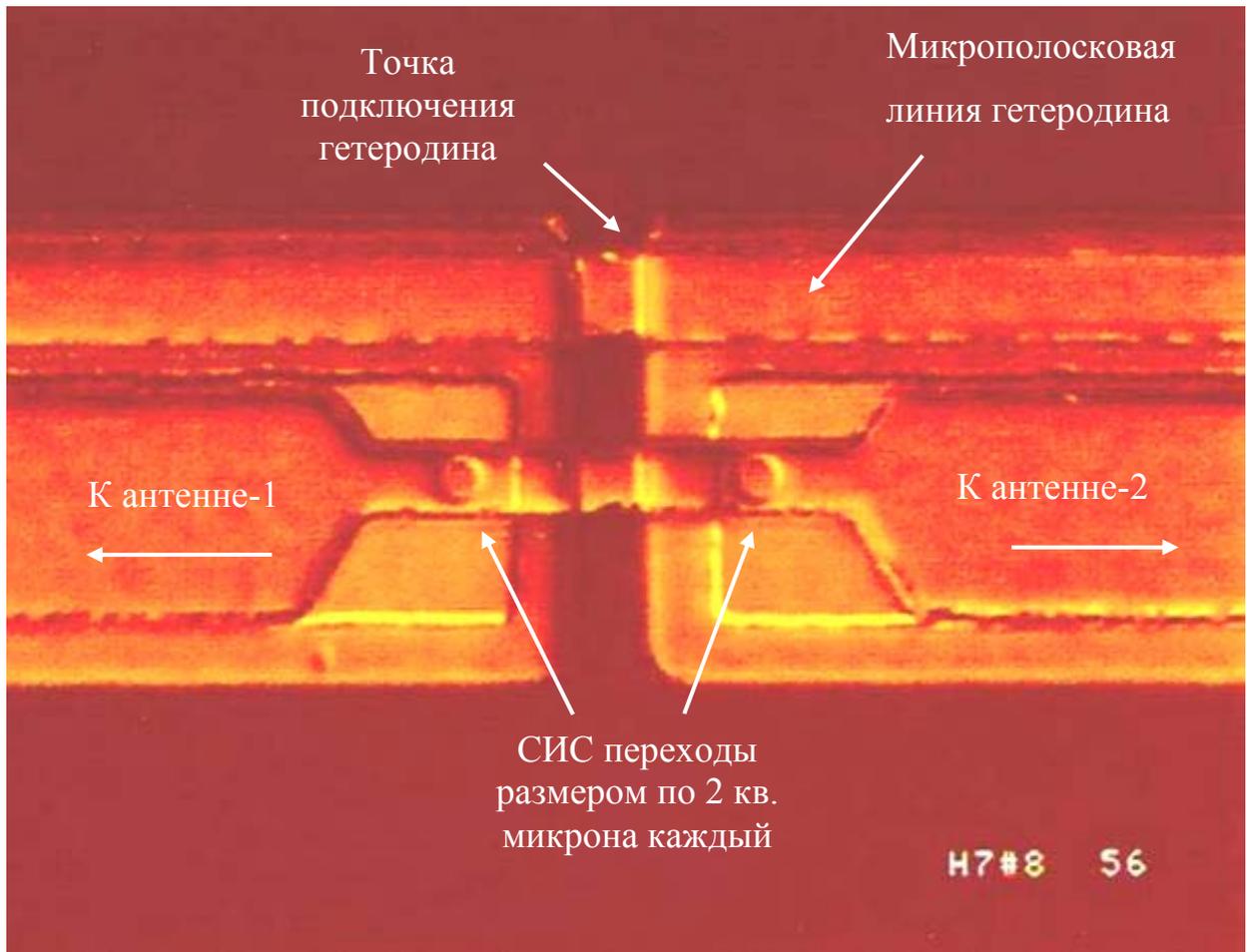


Рис. 4.11. Центральная часть балансного СИС смесителя сверхпроводникового интегрального приемника на 500 ГГц.

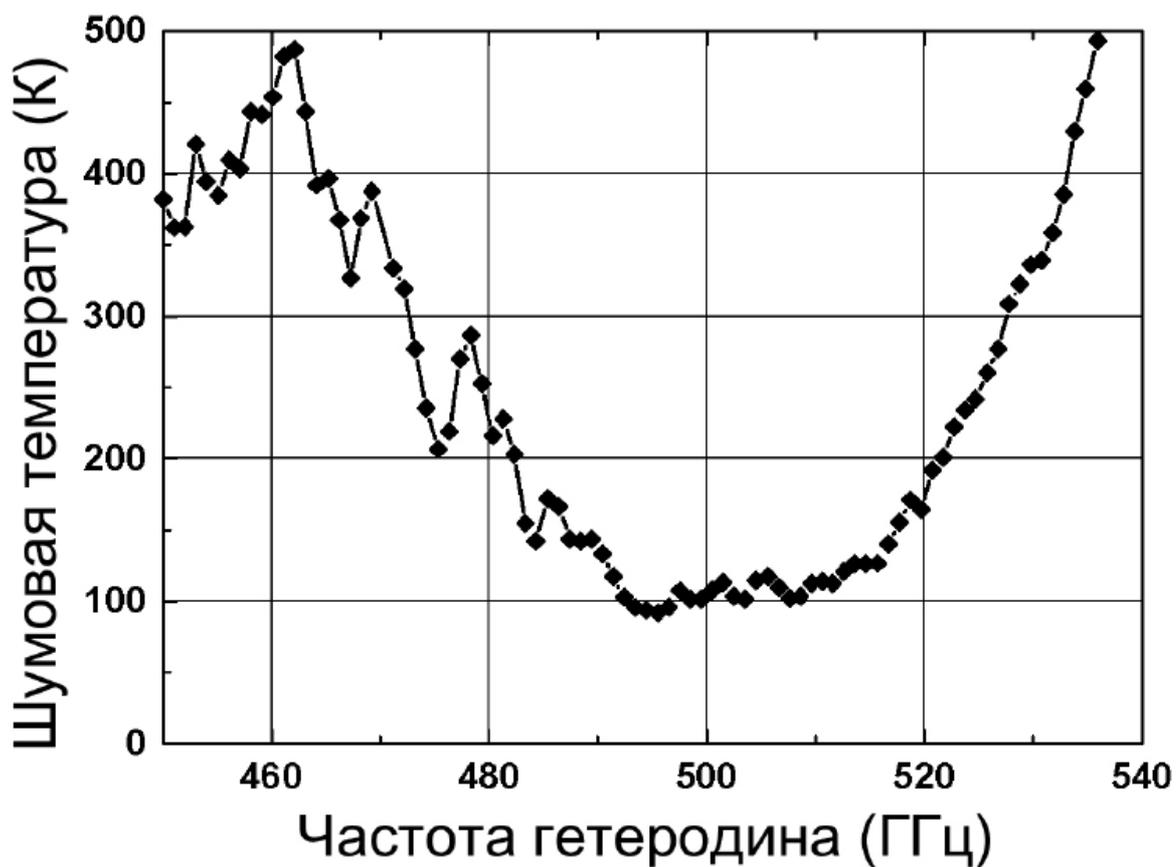


Рис. 4.12 Шумовая температура сверхпроводникового интегрального приемника с балансным СИС смесителем и внутренним гетеродином на основе ФФО. Экспериментальные данные получены и обработаны В.П. Кошельцом и А.М Барышевым с применением программы “IRTECON”.

#### 4.4 Примеры применения интегрального приемника

Была разработана приемная матрица из 9-ти пикселей на основе *небалансного* варианта приемной микросхемы (рис. 4.13). Такая матрица устанавливалась внутри магнитного экрана, аналогичного тому, что использовался при исследовании одиночного интегрального приемника, но большего размера. Магнитный экран с матрицей внутри монтировался на холодное дно вакуумного криостата. Исследовались центральный и один из крайних пикселей, чтобы определить возможное влияние близко расположенных стенок экрана.

На основе того же небалансного чипа был создан лабораторный СВЧ тестер, с помощью которого в университете города Эрлангена (Германия) был проведен уникальный эксперимент по регистрации излучения терагерцового диапазона из слоистой туннельной структуры ВТСП [77].

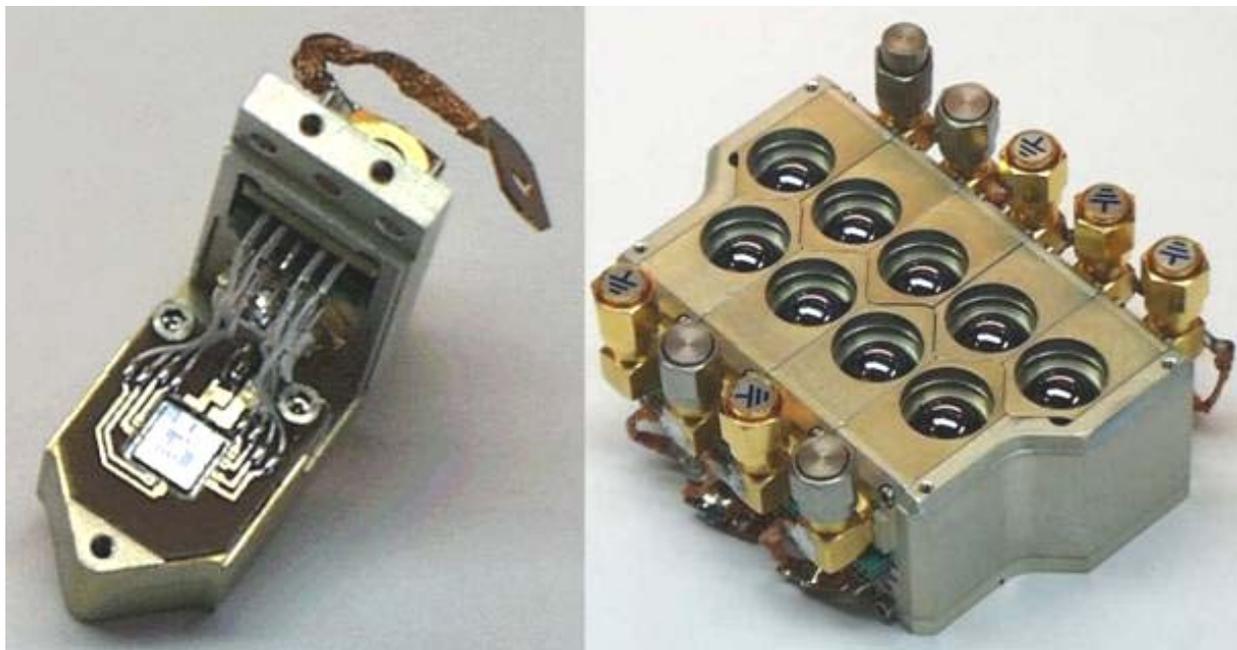


Рис. 4.13 Фотографии детекторного блока матричного приемника на диапазон частот 450-550 ГГц, содержащего девять независимых и взаимозаменяемых пикселей. Каждый пиксель представлен квазиоптическим интегральным приемником (слева). Пиксель показан с тыльной стороны, со стороны приемного чипа размером 4 x 4 мм, установленного на микроволновой линзе (на левом рисунке не видна). Сборка из девяти пикселей показана со стороны входной апертуры (справа); видны кремниевые линзы с полимерным просветляющим покрытием. Конструкция матричного приемника разработана с участием инженеров Национального института космических исследований Нидерландов (SRON-Groningen).

## 4.5 Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для проекта TELIS.

Для большинства практических применений интегрального приемника необходима стабилизация частоты гетеродина и синхронизация его к опорному генератору. В нашей лаборатории в рамках международного проекта TELIS (Terahertz Limb Sounder) совместно с Институтом космических исследований Нидерландов (SRON) была разработана концепция полностью сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) субмм волн. СИП для проекта TELIS объединяет на одной микросхеме малошумящий СИС смеситель, планарную сверхпроводниковую антенну, сверхпроводниковый генератор на потоке джозефсоновских вихрей (ФФО), использующийся в качестве гетеродина, и гармонический смеситель (ГС) для стабилизации частоты этого генератора [A104, A106 - 108, A111, A118 - 120]. При подаче лишь постоянного питания от батарей эта микросхема работает как супергетеродинный приемник в субмм диапазоне длин волн, не требуя никакого дополнительного СВЧ оборудования. Спектрометр предназначен для исследования распределения в атмосфере различных соединений (таких, как ClO, BrO, O<sub>3</sub>, HCl, HOCl, воды H<sub>2</sub>O и трех ее изотопов, и многих других) в режиме лимбового зондирования с борта высотного аэростата. Основное зеркало телескопа может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, обеспечивая лимбовое (наклонное) сканирование в диапазоне высот от верхней стратосферы (30 – 40 км) до верхней тропосферы (10 км). Неохлаждаемый квазиоптический тракт мультиплексирует принятый сигнал, распределяя его на несколько измерительных каналов, работающих одновременно. Специальное управляемое зеркало может направить на входную апертуру каждого из каналов для радиометрической калибровки излучение абсолютно черного тела или излучение холодного неба. При помощи охлаждаемого

квазиоптического тракта, схема которого подробно описана в работах [73, 74], исследуемый сигнал фокусируется на антенне микросхемы СИП. Сама микросхема устанавливается на поверхности кремниевой линзы [A104, A107], которая закреплена в специальном блоке, обеспечивающем охлаждение микросхемы вместе с окружающими ее элементами, а также крепление платы с первичными фильтрами, по которой передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания чипа (рис. 4.14)

Концепция СИП [78] выглядит очень привлекательной для TELIS, благодаря широкому диапазону перестройки ФФО. В настоящее время, частотный диапазон большинства применяемых гетеродинных приемников ограничен возможностью перестройки гетеродина. В твердотельных умножающих цепях диапазон перестройки не превышает обычно 10-15 % от центральной частоты. В СИП диапазон, в основном, определяется настроечной структурой СИС смесителя и согласующей цепью между ним и ФФО; при использовании СИС смесителя с двумя переходами может быть получен диапазон перестройки 30 – 40 %. В базовом варианте проекта TELIS канал СИП будет работать в диапазоне 600 - 650 ГГц, с перспективой дальнейшего увеличения диапазона до 500 - 650 ГГц. Целью является достижение однополосной шумовой температуры приемника менее 400 К во всем интересующем диапазоне частот (для базовой опции в диапазоне 600 - 650 ГГц ожидается минимальная шумовая температура всего лишь 200 К).

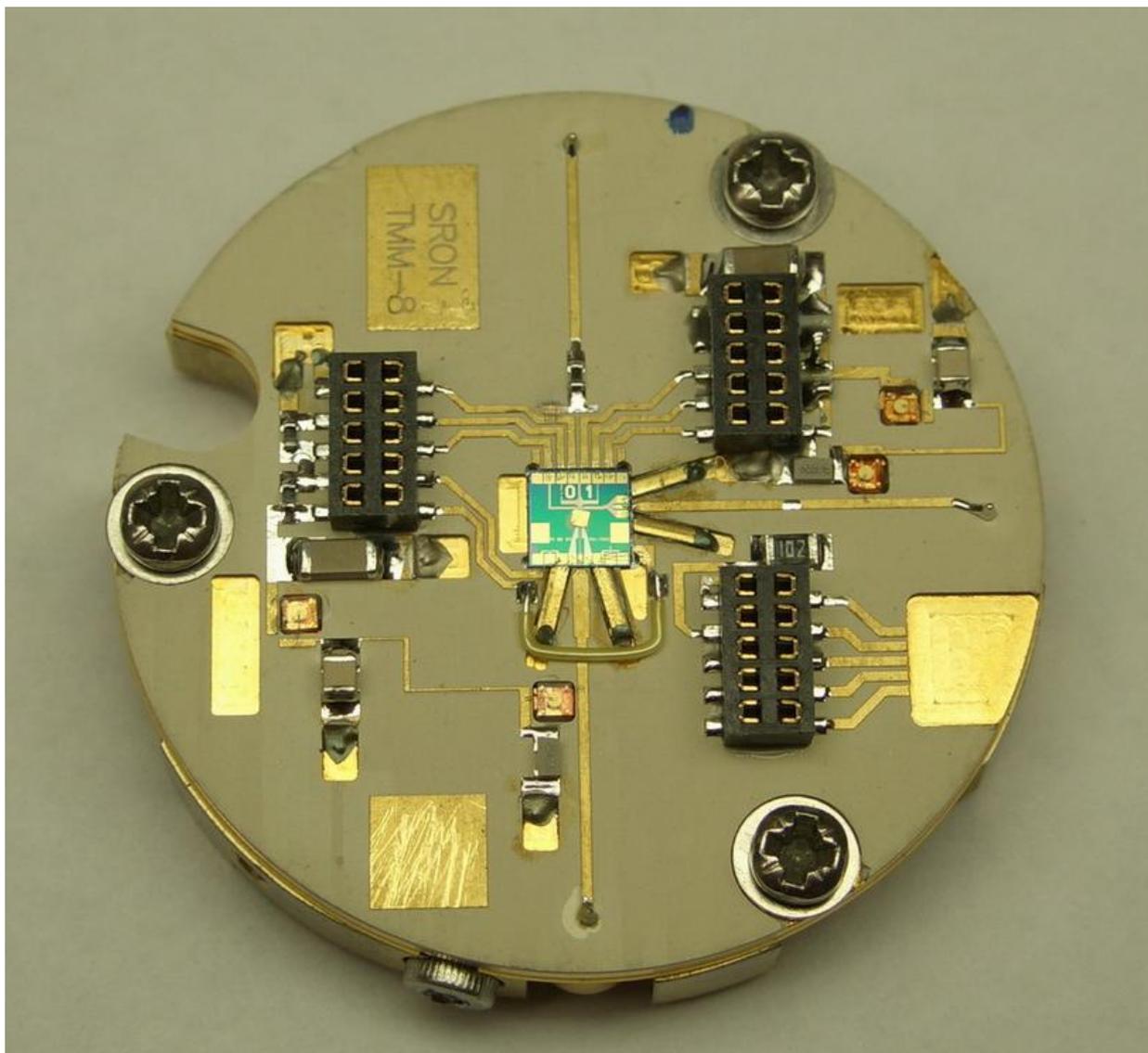


Рис.4.14 Фотография микросхемы СИП, смонтированная на линзе в смесительном блоке с платой смещения.

#### 4.5.1 Технология изготовления микросхема интегрального приемника для проекта TELIS.

Сверхпроводниковый интегральный приемник для проекта TELIS объединяет на одной микросхеме с размерами 4 x 4 x 0,5 мм малошумящий СИС смеситель с квазиоптической антенной, сверхпроводниковый генератор на потоке джозефсоновских вихрей (ФФО), использующийся в качестве гетеродина, и гармонический смеситель (ГС) для фазовой стабилизации частоты этого генератора. Фото микросхемы представлено на рис. 4.15. Хотя все элементы приемника, расположены на площади примерно 1 мм x 1 мм, размеры чипа, главным образом, определяются размером контактных площадок, выбранным достаточно большим для облегчения процесса их присоединения к внешней системе посредством ультразвуковой сварки. На рис. 4.16 показана микрофотография центральной части микросхемы.

Исходя из требований проекта (частотный диапазон 500-650 ГГц, шумовая температура менее 250 К, спектральное разрешение менее 1 МГц), были сформулированы основные требования к технологии изготовления микросхем: плотность критического тока  $j_c = 5 \div 8 \text{ кА/см}^2$ , площади переходов должны быть для СИС переходов  $0.8 \text{ мкм}^2$ , для ГС -  $1.0 \text{ мкм}^2$  и ФФО –  $6400 \text{ мкм}^2$ . Точность совмещения слоев менее 0.5 мкм, разброс по толщинам слоев < 10%.

Последовательность слоев при изготовлении микросхемы интегрального спектрометра такая же, как и при изготовлении интегрального приемника на одиночном СИС переходе (рис. 4.3). Новые технологические требования к изготовлению микросхемы потребовали проведения оптимизации всех процессов напыления. Толщины слоев и режимы напыления представлены в таблице 4.2.

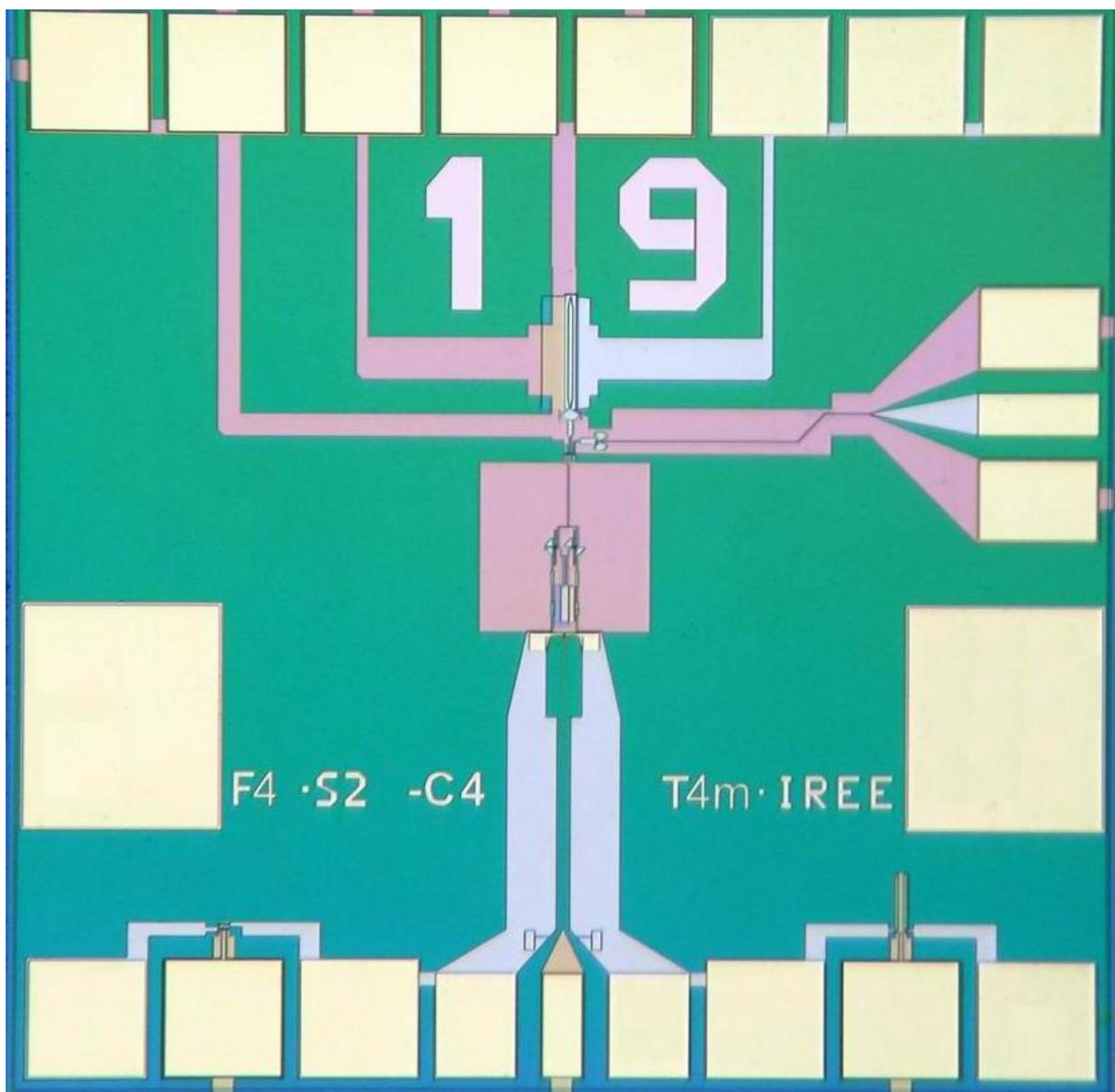


Рис.4.15 Фотография микросхемы интегрального приемника для проекта TELIS.

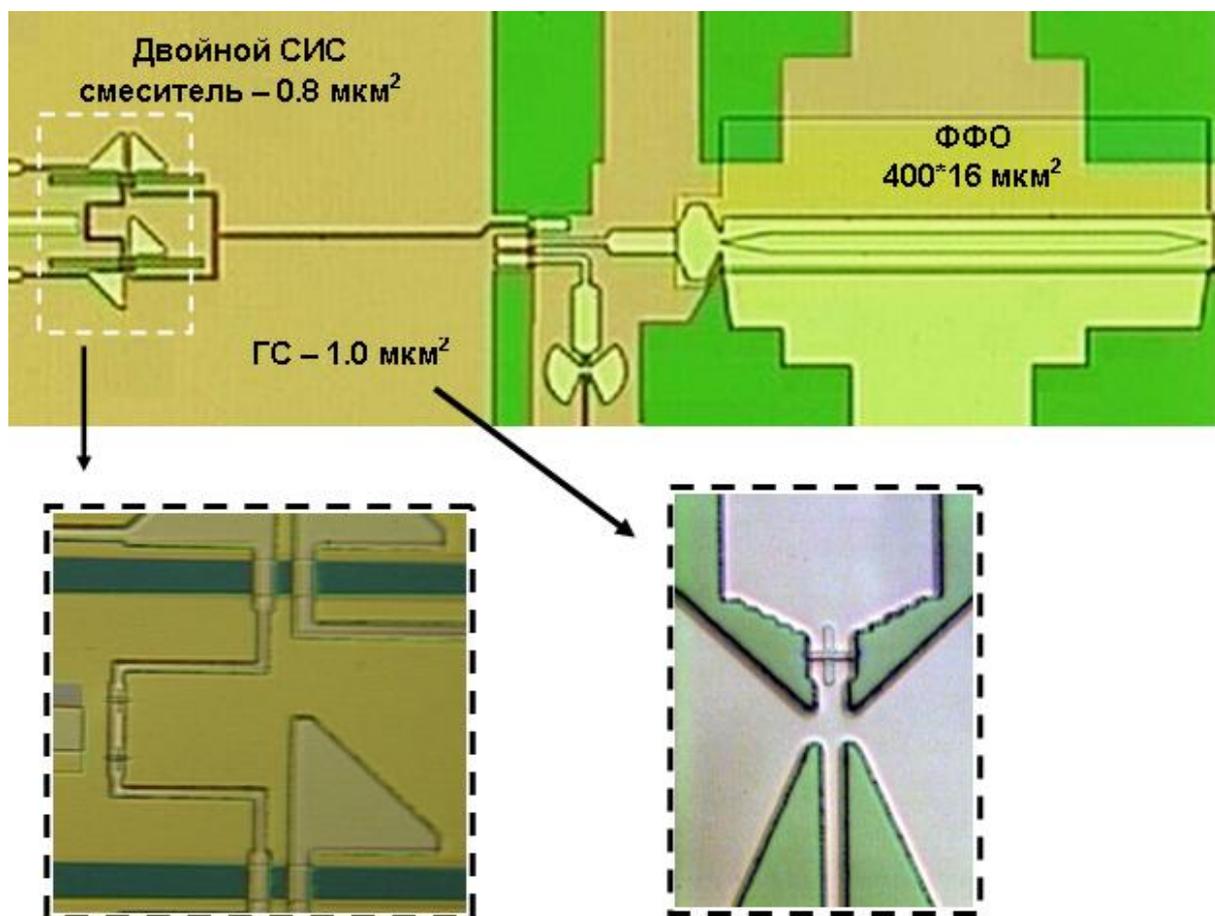


Рис. 4.16. Микрофотография центральной части микросхемы СИП. Показаны основные элементы интегрального приемника. Размер видимой части 1.5 x 1 мм. На увеличенных фрагментах показаны смеситель с двумя СИС переходами и гармонический смеситель (ГС).

**Таблица 4.2 Основные слои и режимы напыления при изготовлении микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника для проекта TELIS на основе туннельных переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb.**

Материал	Назначение	Толщина (нм)	Параметры напыления
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	буферный слой	100	Ar, $7.1 \times 10^{-3}$ мбар, 598 Вт, 0.17 нм/с
Nb	нижний электрод	200	Ar, $9.2 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 2 нм/с
Al/Al <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	туннельный барьер	7/1	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 78 Вт, 0.2 нм/с, O <sub>2</sub> , $2.0 \times 10^{-2}$ , 20 мин
Nb	верхний электрод	80	Ar, $9.5 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 2 нм/с
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
SiO <sub>2</sub>	изоляция-1	200	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 410 Вт, 0.27нм/с
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
SiO <sub>2</sub>	изоляция-2	200	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 410 Вт, 0.27нм/с
Nb	замыкатель	600-650	Ar, $9.5 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 2 нм/с
Al/Au	Контактные площадки	10/100	Ar, $1.5 \times 10^{-2}$ мбар, 700 В, 0.1 нм/с Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 0.17 нм/с

После изготовления подложка размером 24\*24 мм разрезалась на отдельные чипы. После проведения всесторонних измерений по постоянному току, несколько чипов с «хорошими» ВАХ СИС-переходов и ФФО и достаточной накачкой ГС в требуемом диапазоне отбираются для дальнейших исследований с помощью Фурье-спектрометра (ФС) и измерений шумовой температуры.

По данной технологии было изготовлено около 50 подложек с различными дизайнами СИП (Т2, Т2м, Т3, Т4), на каждой из которых размещалось 21 микросхема интегрального приемника. Выход годных, например, для подложки Т2м-031, составляет > 90%.

#### **4.5.2 Оптимизация процессов изготовления СИС переходов субмикронных размеров.**

Формирование туннельных переходов субмикронных размеров является одной из ключевых задач при изготовлении микросхем сверхпроводникового интегрального приемника. Такие переходы должны быть высокого качества, не менять свои характеристики при многократных термоциклированиях, обладать хорошей воспроизводимостью и малым разбросом параметром по подложке. Наиболее важным требованием при изготовлении микросхем СИП оказалась итоговая площадь переходов, так как даже изменение площадей на 0.1-0.2 мкм приводит к значительному сдвигу рабочей частоты.

Для выполнения этих требований необходимо было провести оптимизацию условий формирования резистивной маски субмикронных размеров методами оптической литографии, а также провести исследование процесса реактивно-ионного травления и найти оптимальные условия анизотропного травления пленки Nb с минимальным и контролируемым подтравом.

Для формирования резистивной маски мы использовали позитивный резист *Microposit S1813 Shipley Corporation*. Резист наносился методом центрифугирования в течение 50 сек при частоте вращения 5000 об/мин, толщина резиста при этом составляет 1,14 мкм. Такая тонкая толщина резиста выбрана сознательно, так как точность передачи изображения напрямую зависит от толщины фотослоя. Для увеличения адгезии фотослоя к подложке использовался гексаметилдисилазан ( $C_6H_{19}NSi_2$ ), парами которого подложка обрабатывалась перед нанесением фоторезиста.

Первая термическая сушка фоторезиста проводилась в сушильном шкафу при  $95^{\circ}C$  в течение 30 мин. Подбор оптимального времени экспонирования осуществлялся экспериментально, при этом учитывалась взаимосвязь режимов экспонирования, времени проявления и температуры проявителя. Экспонирование производилось на установке MA150 фирмы "Karl Zuss". Оптимальное время экспонирования составило 17 сек при интенсивности лампы  $4.2 \text{ мВт/см}^2$ . Проявление проводилось в растворе проявителя MF312+H<sub>2</sub>O в соотношении 1:1 в течение 45 сек. Во избежание нарушения качества передачи изображения при контактной фотолитографии (локальные дефекты, неточное совмещение, неточная передача заданных фотошаблоном размеров) каждый этап литографического процесса сопровождался тщательным контролем с помощью микроскопа.

Были проведены исследования зависимости скорости травления Nb при разных мощностях (30, 50 и 100 Вт) от давления газов CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub> и смеси газов CF<sub>4</sub> +3%O<sub>2</sub>. Графики представлены на рис. 4.17. Замечено, что скорость травления Nb от SF<sub>6</sub> в рабочей камере при невысоких мощностях разряда (30-50 Вт) мало меняется с изменением рабочего давления в камере. При более высоких мощностях разряда (100 Вт) скорость травления линейно возрастает с увеличением рабочего давления. Скорость травления Nb от давления CF<sub>4</sub> в рабочей камере линейно возрастает с увеличением рабочего

давления при низких и высоких мощностях разряда. Скорость травления Nb от давления смеси газов  $\text{CF}_4+3\%\text{O}_2$  возрастает с увеличением мощности.

Были подобраны следующие режимы травления:  $\text{O}_2$  2 sccm,  $\text{CF}_4$  34 sccm,  $1.5 \cdot 10^{-1}$  мбар, 50Вт. Скорость травления Nb  $\sim 6 \text{ \AA}/\text{сек}$ .

Известно, что наиболее существенными факторами, влияющими на процесс реактивно-ионного травления, являются [75, 76]:

- Состав рабочего газа – доминирующий фактор, определяющий скорость травления;
- Давление рабочего газа в камере. При понижении давления возрастает анизотропность процесса травления, так как возрастает длина свободного пробега химически активных частиц, в результате чего вероятность их попадания на боковые стенки подвергаемых травлению элементов снижается;
- Мощность ВЧ разряда. Как правило, с увеличением мощности скорость травления монотонно возрастает до определенного значения, пока режим не стабилизируется;
- Скорость потока. Скорость потока рабочего газа определяет максимально возможный приток к подложке реакционно-способных компонент;
- Температура. Температурная зависимость скорости реактивного ионно-плазменного травления определяется главным образом влиянием температуры на скорость протекания химических реакций. Для обеспечения однородных и воспроизводимых скоростей травления необходимо контролировать температуру подложки. Основной причиной нагрева теплоизолированных подложек является их разогрев плазмой. Кроме того, заметный вклад в повышение температуры может вносить тепло, выделяемое в результате протекания экзотермических реакций травления;

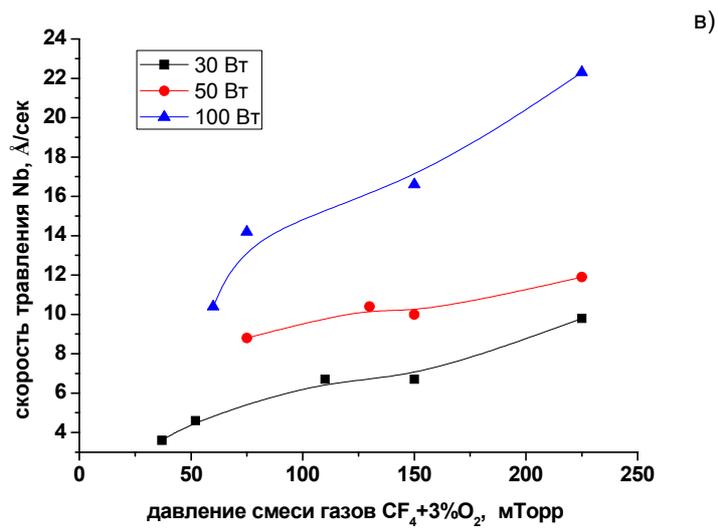
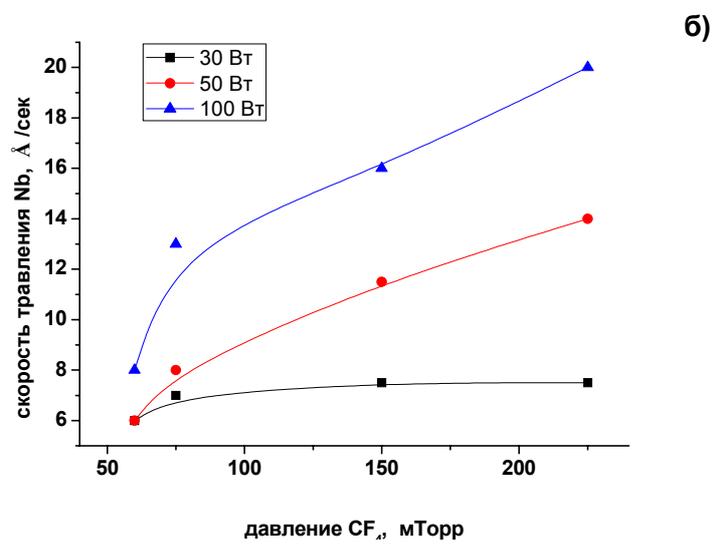
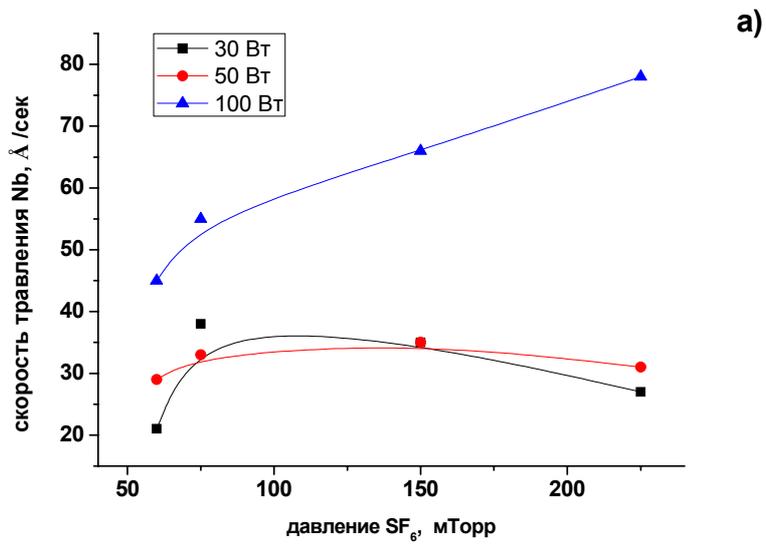


Рис. 4.17. Зависимости скорости травления Nb от давления газа SF<sub>6</sub> (а), CF<sub>4</sub> (б) и смеси газов CF<sub>4</sub>+3% O<sub>2</sub> (в).

- Загрузочный эффект. Проявляется в уменьшении скорости травления материала при увеличении площади его обработки, начиная с какого-нибудь граничного значения. То есть, процесс лимитируется доставкой химически активных частиц к поверхности обрабатываемого материала.

Поэтому в процессах реактивного ионного травления необходимо постоянно контролировать такие динамические параметры, как подаваемая мощность, давление, скорость расхода газа и подвергаемая травлению площадь.

Травление ниобия проводилось в установке «March Jupiter II» (подробно установка описана в Главе 2), оборудованной водоохлаждаемым нижним электродом, температура которого поддерживалась во время процесса при 19<sup>0</sup>С. Контроль окончания процесса травления осуществлялся визуально по подложке-«свидетелю» с пленкой Nb, толщина которой соответствовала толщине верхнего электрода трехслойной структуры. Площадь готовых СИС переходов контролировался с помощью оптического микроскопа, а также определялась из ВАХ тестовых подложек-«свидетелей», трехслойка которых напылялась в едином цикле с микросхемами СИП.

#### 4.6 СИП на основе структуры Nb/Al-AlN/NbN.

Расширение частотного диапазона сверхпроводниковых приемных устройств до 1 ТГц весьма желательно для большинства практических приложений. Рабочая частота сверхпроводящих схем с переходами Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb и настроечными структурами из ниобия ограничена частотами до 700 ГГц, так как энергия фотонов на частотах выше 700 ГГц больше энергетической щели ниобия, что приводит к существенным потерям в ниобиевых настроечных структурах. Качество СИС переходов на основе структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb при  $RnA \leq 20 \div 25 \text{ Ом} \cdot \text{мкм}^2$  заметно ухудшается и  $Rj/Rn$  не превышает 20. В нашей лаборатории П.Н. Дмитриевым была разработана технология изготовления туннельных переходов с барьером из Al-AlN и верхним электродом NbN, что позволило поднять значение целевого напряжения до 3.7 мВ (это соответствует джозефсоновской частоте 900 ГГц). Использование структур Nb/Al-AlN/NbN обеспечивают значительное улучшение качества СИС переходов (при  $j_c = 5 \div 8 \text{ кА/см}^2$  параметр качества  $Rj/Rn > 30$ ) и могут быть рекомендованы в качестве смесительного элемента в микросхемах СИП для проекта TELIS.

Были изготовлены и исследованы несколько серий интегральных приемников на основе структуры Nb/Al-AlN/NbN [A121, A125]. В наших схемах верхний электрод как СИС переходов микронного и субмикронного размеров, так и верхний электрод ФФО, длиной в сотни микрон, были выполнены из NbN. На верхний электрод переходов (NbN) напылялся слой Nb, формирующий токоведущие линии и СВЧ структуры для передачи сигнала и согласования элементов схемы. Поскольку частотный диапазон для СИП в проекте TELIS лежит в диапазоне ниже щелевой частоты Nb, использование настроечных структур из ниобия предпочтительнее, так как потери в ниобиевых настроечных структурах меньше по сравнению с NbN. В то же время, фотолитографические шаблоны, разработанные для Nb СИП,

могут использоваться и для изготовления приемников с Nb/Al-AlN/NbN переходами, так как небольшое изменение импеданса ФФО из-за замены туннельного барьера на AlN, а верхнего электрода на NbN, не приводит к сильному изменению импеданса и рассогласованию структур.

Последовательность слоев и режимы изготовления микросхемы на основе Nb/Al-AlN/NbN представлены в таблице 4.3. Режимы травления NbN при формировании геометрии переходов следующие: давление смеси газов  $\text{CF}_4 + 4\% \text{O}_2$   $1 \cdot 10^{-1}$  мбар, мощность 50 Вт, время травления 2 мин.

На рис. 4.18 показаны ВАХ СИС переходов на основе туннельной структуры Nb/Al-AlN/NbN (площадь около  $2 \text{ мкм}^2$ ) с накачкой от Nb/Al-AlN/NbN ФФО (сплошная линия – накачанная ВАХ, пунктирные – с накачкой на различных частотах). Можно видеть, что ФФФ обеспечивает более чем достаточную мощность для накачки СИС смесителя в тестовой схеме с низкими потерями в цепи согласования, настроенной на частоты 500-700 ГГц. Для работы СИП этой мощности также достаточно.

**Таблица 4.3 Основные слои и режимы напыления при изготовлении микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника для проекта TELIS на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN.**

Материал	Назначение	Толщина (нм)	Параметры напыления
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	буферный слой	100	Ar, $7.1 \times 10^{-3}$ мбар, 598 Вт, 0.17 нм/с
Nb	нижний электрод	200	Ar, $9.2 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 2 нм/с
Al/AlN	туннельный барьер	7/1	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 78 Вт, 0.2 нм/с, N <sub>2</sub> , $2.9 \times 10^{-2}$ , 2 мин 30 с
NbN	верхний электрод	80	Ar+N <sub>2</sub> , $9.6 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 1.2 нм/с
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
SiO <sub>2</sub>	изоляция-1	200	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 410 Вт, 0.27нм/с
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	анодная изоляция	14-18	7.5-10 В
SiO <sub>2</sub>	изоляция-2	200	Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 410 Вт, 0.27нм/с
Nb	замыкатель	600-650	Ar, $9.5 \times 10^{-3}$ мбар, 510 Вт, 2 нм/с
Al/Au	Контактные площадки	10/100	Ar, $1.5 \times 10^{-2}$ мбар, 700 В, 0.1 нм/с Ar, $6.0 \times 10^{-3}$ мбар, 0.17 нм/с

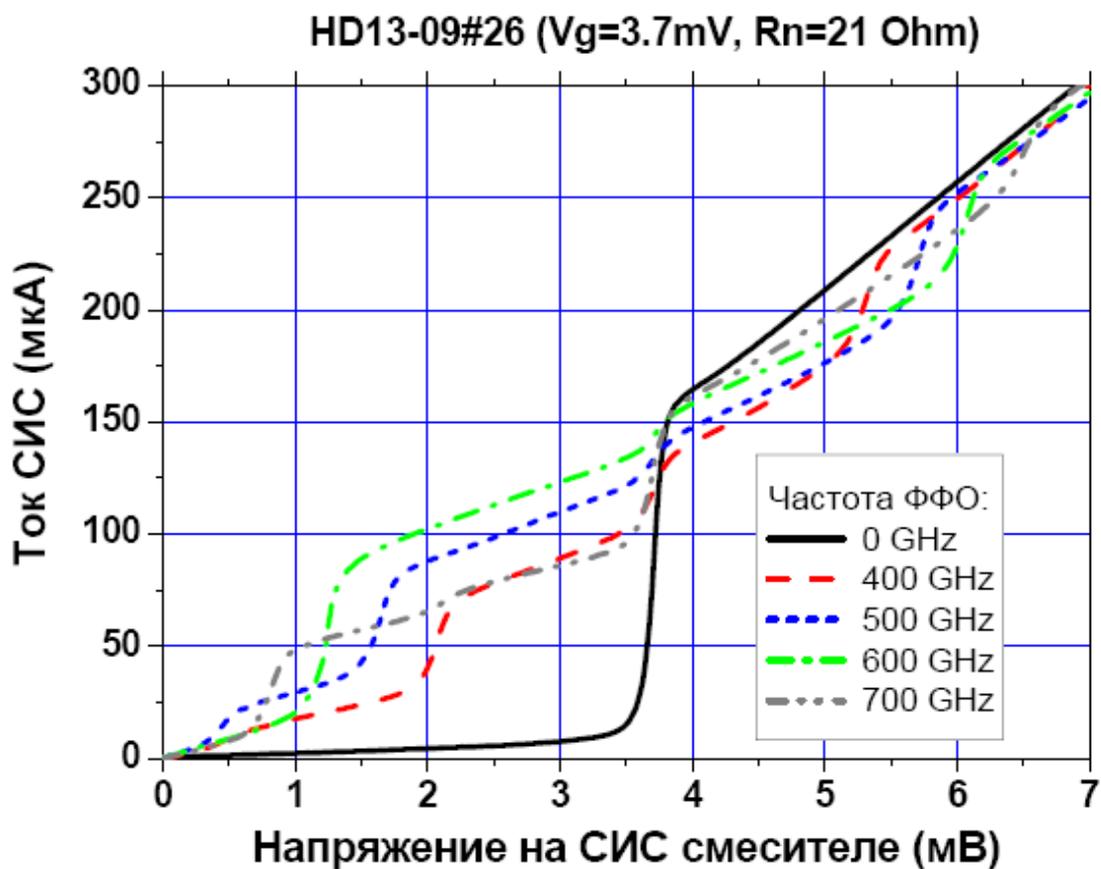


Рис. 4.19. Автономная ВАХ СИС-смесителя на основе структуры Nb/AlN/NbN и ВАХи для разных частот сигнала гетеродина, подаваемого от интегрального ФФО на основе структуры Nb/AlN/NbN. Измерения выполнены М.Ю. Торгашиним.

#### 4.7 Технология изготовления микросхем интегрального приемника, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

Как уже говорилось выше, для улучшения частотных характеристик СИС смесителей, таких как ширина входной полосы смесителя, требуются туннельные СИС переходы с минимальной степенью влияния шунтирующей ёмкости, которая определяется параметром  $\gamma_c = 2\pi \cdot f \cdot R_n \cdot A \cdot C_{eff}$ , то есть переходы с минимальным значением  $R_n A$ . С другой стороны, увеличение плотности тока ФФО выше  $5 \text{ кА/см}^2$  приводит к заметному усилению эффекта джозефсоновской самонакачки и уширению линии, что делает невозможной реализацию режима фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генератора с достаточно высоким спектральным качеством. Поэтому для оптимальной работы всего приемника в целом плотность тока СИС смесителя должна быть порядка  $8 \text{ кА/см}^2$  (дальнейшее увеличение плотности тока требует СИС переходов субмикронных размеров для получения требуемых импедансов), а для ФФО и гармонического смесителя составлять приблизительно  $4 \text{ кА/см}^2$ .

Для реализации этой задачи была также оптимизирована технология, позволившая впервые изготовить микросхемы СИП, объединяющие структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

Первым этапом на очищенную кремниевую пластину размером  $24 \times 24 \text{ мм}$  rf магнетронным распылением напылялся буферный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $100 \text{ нм}$ . Затем формировалась резистивная маска с нависающим профилем с геометрией, обратной геометрии нижнего электрода трехслойной структуры той части, где расположен СИС смеситель. Трехслойная структура напылялась в едином вакуумном цикле, туннельный барьер формировался с оптимальной для СИС смесителя плотностью тока  $j_c = 8 \text{ кА/см}^2$ . После проведения lift-off и тщательного контроля профиля

структуры и чистоты подложки, формировалась новая резистивная маска с геометрией, обратной геометрии нижнего электрода трехслойной структуры той части, где расположен гармонический смеситель и ФФО. При этом уже сформированная трехслойная структура для СИС смесителя закрывалась фотослоем. Затем опять напылялась трехслойная структура, но туннельный барьер формировался с плотностью тока, оптимальной для ФФО и ГС, т.е.  $4 \text{ кА/см}^2$ . После проведения взрыва мы получали на подложке полностью сформированные две структуры с разными плотностями тока, геометрия которых соответствовала нижнему электроду сверхпроводникового интегрального приемника. Стоит отметить, что толщины электродов для структур с разными плотностями тока должны быть одинаковыми.

Дальнейшее изготовление СИП проходило аналогично технологии, разработанной для изготовления СИП с одной трехслойной структурой.

На рис. 4.19 представлена микрофотография центральной части СИП, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе (а) и увеличенная фотография места совмещения этих структур (б).

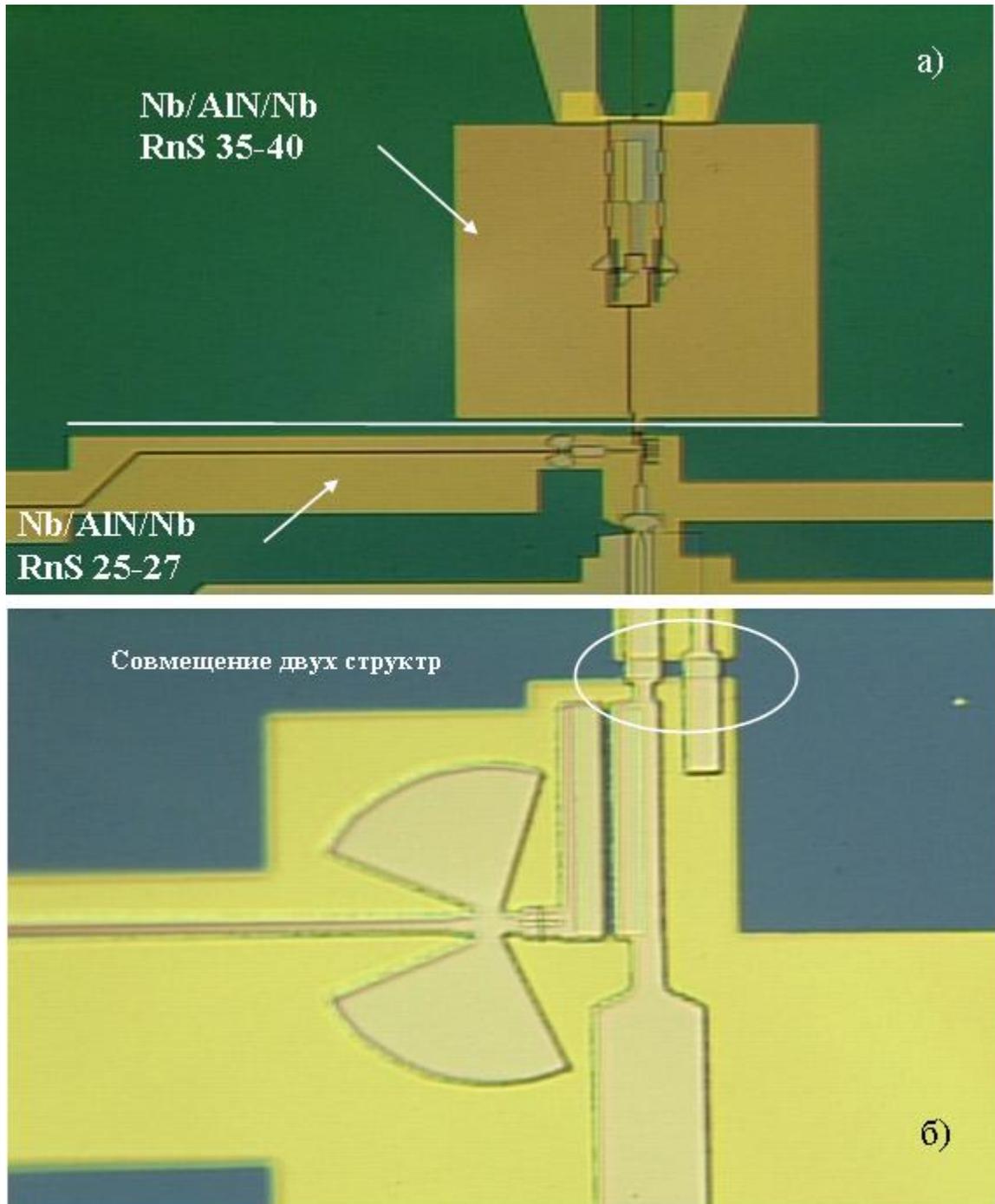


Рис. 4.19. Микрофотография центральной части СИП, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе (а) и увеличенная фотография места совмещения этих структур (б).

#### 4.9 Выводы по Главе 4.

В процессе создания микросхем интегрального приемника была апробирована концепция эффективной изоляции управляющих магнитных полей с помощью интегральных контрольных линий. Было проведено исследование и разработаны технологические подходы к созданию контрольных линий на основе пленок Nb с малыми СВЧ-потерями и высоким критическим током, вплоть до 150 мА при ширине пленки около 3 мкм. В результате была получена оптимальная связь между СИС смесителем и сверхпроводниковым джозефсоновским осциллятором (ФФО), а также низкие шумовые температуры квазиоптических СИС-смесителей с интегральными линиями магнитного поля. Экспериментальное исследование сверхпроводниковых приемных интегральных микросхем с внутренним гетеродином продемонстрировало, что их использование позволяет не только принципиально снизить вес, энергопотребление и стоимость приемников, но и реализовать низкую шумовую температуру всего устройства.

При исследовании квазиоптического интегрального приемника с балансным СИС смесителем, интегрированным с источником гетеродина на основе ФФО, был достигнут необходимый баланс во всех цепях микросхемы, что говорит о высоком качестве технологического процесса. Была реализована шумовая температура приемника менее 100 К на частоте 500 ГГц при ширине полосы около 20 %, что находится на уровне лучших приемных систем, использующих внешний источник гетеродина.

Надежность технологического процесса сверхпроводниковых приемных микросхем можно продемонстрировать на примере девятиэлементного матричного приемника на центральную частоту 500 ГГц, каждый пиксель которого представлен независимой *сверхпроводниковой приемной микросхемой*, содержащей внутренний источник гетеродина.

Были изготовлены и исследованы микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника реализована шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Первый тестовый полет проведен в июне 2008 г. на полигоне Терезина в Бразилии.

Разработана технология изготовления микросхем интегрального приемника, позволяющая объединять структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

## Глава 5. Детекторы рентгеновского излучения на основе туннельных переходов

В настоящее время в России и за рубежом проводятся работы по созданию новых детекторов рентгеновского и оптического излучения на основе сверхпроводящих туннельных переходов (СТП) [81-83]. Эти детекторы должны обладать высоким энергетическим разрешением и низким порогом регистрации по энергии. Конструктивно СТП-детекторы представляют собой СИС переход – два сверхпроводящих электрода, разделенных тонким слоем изолятора. Поглощение кванта излучения в одном из электродов приводит к разрыву куперовских электронных пар и возникновению неравновесных квазичастиц, туннелирование которых через изолирующий слой образует сигнал детектора.

Число возникающих квазичастиц  $N_0$  пропорционально энергии кванта излучения  $E$  и обратно пропорционально ширине сверхпроводящей щели  $\Delta$  в электроде, в котором поглощается квант. Поскольку  $\Delta$  имеет порядок миллиэлектронвольта, число образующихся квазичастиц на три порядка больше, чем в обычных полупроводниковых детекторах. Именно это определяет возможность существенно улучшить энергетическое разрешение и снизить порог регистрации в туннельных детекторах. Ожидаемое энергетическое разрешение для детекторов с электродами из Nb составляет 4-10 эВ для рентгеновской линии 6 кэВ. При таком энергетическом разрешении детекторы становятся чувствительными к химическому сдвигу рентгеновских линий и могут быть использованы в рентгенофлуоресцентном анализе для определения не только количества элемента, но и его химического состояния.

## 5.1 Общие требования к разработке СТП-детекторов.

Приступая к разработке и изготовлению СТП детекторов, необходимо определить ряд параметров: выбрать материал электродов, площадь и форму электродов, толщину электродов, прозрачность туннельного барьера, расположение и вид токоподводящих дорожек и т.д.

Материал электродов. При выборе материала необходимо прежде всего учитывать температуру сверхпроводящего перехода  $T_c$ , которая фактически определяет диапазон рабочих температур детектора. Рабочая температура должна быть много ниже  $T_c$  (более чем 10 раз), чтобы обеспечить вымораживание тепловых квазичастиц и снижение туннельного тока до уровня, обеспечивающего малый вклад электронных шумов в ширину линии детектора.

В данной работе в качестве основного материала электродов использовался ниобий. Nb имеет наибольшую среди элементов температуру сверхпроводящего перехода ( $T_{c_{Nb}} = 9.1 \text{ K}$ ), поэтому рабочая температура детекторов может находиться в области температур, обеспечиваемых путем откачки паров жидкого гелия (1.1 – 1.5 K).

Важнейшее значение при выборе материала для СТП детекторов, является наличие технологии изготовления туннельных барьеров. Для пленок ниобия разработана и широко применяется технология, основанная на создании изолирующего барьера с помощью окиси алюминия  $AlO_x$  [84, 85]. Суть этой технологии подробно описана в главе 2. Достоинствами СИС переходов на основе структуры Nb/Al- $AlO_x$ /Nb является стабильность туннельных характеристик в условиях многократных циклов охлаждения и нагрева и возможность подгонки прозрачности туннельного барьера в зависимости от задач эксперимента.

### Площадь электродов.

Площадь СТП детекторов ограничена целым рядом факторов. Одним из основных факторов является электрическая емкость детектора, которая в значительной степени определяет уровень электронных шумов. СТП детекторы характеризуются относительно большой емкостью, которая обусловлена малой толщиной туннельного барьера. Так, туннельный переход площадью  $150 \times 150 \text{ мкм}^2$  имеет емкость около 1000 пФ. При такой большой емкости для обеспечения необходимого уровня шумов при работе с реально существующими усилителями необходимо иметь исключительно малый тепловой туннельный ток, порядка 1 нА, и большое дифференциальное сопротивление  $R_d$ , на уровне 1 МОм. В то же время, туннельные переходы имеют малое нормальное сопротивление  $R_N$  (при  $T > T_c$ ), на уровне долей Ома, которое необходимо для обеспечения высокой скорости туннелирования неравновесных квазичастиц. Как упоминалось выше, для получения предельных электрических характеристик проводят охлаждение детекторов до температур много ниже  $T_c$ , когда происходит вымораживание туннельного квазичастичного тока. Однако этот процесс ограничен токами утечки, которые также возрастают при увеличении площади детектора. В результате, площадь порядка  $2 \times 10^4 \text{ мкм}^2$  фактически является предельной для СТП детекторов.

Следует также отметить, что размеры туннельных переходов не должны превышать джозефсоновскую глубину проникновения [11]. При приложении магнитного поля к туннельным переходам с размерами большими, чем джозефсоновская глубина проникновения, переход становится распределенным и его динамика определяется движением нескольких магнитных флаксонов, вызывающих искажение и нестабильность вольт-амперных характеристик. Расчеты показывают, что

для туннельных переходов, использованных в настоящей работе, джозефсоновская глубина проникновения составляет примерно 100-200 мкм.

В результате, в данной работе мы исследовали СТП детекторы, площади которых варьировались от 400 до  $2 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ .

Толщина электродов. Как правило, толщина поглощающей области детектора должна обеспечивать эффективное поглощение квантов выбранной энергии, т.е. величина  $\mu_{ab}\rho d$  должна быть порядка единицы, где  $\mu_{ab}$  – массовый коэффициент поглощения,  $\rho$  – плотность,  $d$  – толщина электрода. Если в качестве типичной энергии рентгеновских квантов в мягкой области принять 6 кэВ, то толщина ниобиевого электрода должна составлять около 4 мкм.

Надо отметить, что скорость туннелирования неравновесных квазичастиц обратно пропорциональна толщине электрода. При толщинах порядка 4 мкм скорость туннелирования была бы чрезмерно малой, по сравнению с типичными скоростями потерь квазичастиц, что приводило бы к фактическому исчезновению сигнала детектора.

В работах [85] была сделана попытка создания СТП-детектора с большой толщиной поглощающего электрода. В качестве поглотителя использовались пластины монокристаллов Nb или Ta толщиной несколько десятков микрометров, на поверхности которых напылялись многослойные туннельные переходы Al(1)/AlO<sub>x</sub>/Al(2)/Nb. Слой Al(1) толщиной около 50 нм служил ловушкой для неравновесных квазичастиц и обеспечивал достаточно высокую скорость туннелирования. Энергетическое разрешение детектора составило 150 эВ и ограничивалось сопротивлением интерфейса монокристалл - туннельный переход.

При выборе нами толщины электродов СТП детекторов мы руководствовались компромиссом между технологическими требованиями, необходимыми для создания высококачественных туннельных переходов с малыми токами утечки, и требованием достаточной эффективности

поглощения квантов выбранной энергии. Поэтому толщина электродов выбиралась в диапазоне от 100 до 300 нм, что соответствовало эффективности примерно 5% при поглощении квантов с энергий 6 кэВ.

С точки зрения эффективности поглощения рентгеновских квантов некоторое преимущество имеет другой сверхпроводник, а именно, тантал. В области энергий до  $\approx 10$  кэВ тантал в 2 раза сильнее поглощает рентгеновские кванты по сравнению с Nb. Однако температура сверхпроводящего перехода Ta ниже, чем у Nb и составляет  $T_{c(Ta)} = 4.5$  К [86]. Соответственно, и рабочие температуры таких СТП-детекторов несколько ниже и находятся в области температур откачки паров He-3, т.е. при температурах вблизи 0.3 К. В настоящее время изготовление СТП детекторов на основе тантала освоено в ряде лабораторий за рубежом. Вследствие более низких рабочих температур исследования СТП-детекторов с танталовыми электродами в данной работе не проводилось.

Геометрическая форма электродов. При выборе формы электродов, в первую очередь принимались во внимание условия подавления постоянного джозефсоновского тока магнитным полем. Если электрод имеет в плане форму прямоугольника и магнитное поле  $H_0$  приложено в плоскости туннельного барьера вдоль его боковой грани, то величина джозефсоновского тока уменьшается с магнитным полем по следующему закону [11]:

$$I_J = I_{J_0} \left| \frac{\sin(\pi B_0 \cdot a d_{ef} / \Phi_0)}{\pi B_0 \cdot a d_{ef} / \Phi_0} \right| \quad (5.1)$$

где  $I_{J_0}$  – туннельный джозефсоновский ток в нулевом поле,  $B_0$  – индукция приложенного магнитного поля,  $a$  - длина грани прямоугольника, перпендикулярная магнитному полю,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока,  $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-7}$  Гс\*см<sup>2</sup>,  $d_{ef}$  – эффективная толщина перехода,  $d_{ef} = 2\lambda_L + t$ ., где  $\lambda_L$  – лондоновская глубина проникновения,  $t$  – толщина изолирующего слоя.

Рабочее магнитное поле должно выбираться таким образом, чтобы, во-первых, собственно джозефсоновский ток был равен нулю и, во-вторых, чтобы в ближайшем максимуме джозефсоновский ток был заметно меньше квазичастичного тока в рабочей точке. Выполнение второго условия обеспечивает устойчивость рабочей точки относительно различного рода флуктуаций. Простые оценки показывают, что в данной геометрии необходимое магнитное поле должно превышать 1000 Гс. К сожалению, столь большие поля уже могут оказывать влияние на сверхпроводящие свойства материалов, а также могут приводить к захвату магнитных вихрей и другим нежелательным эффектам. Поэтому форма электродов и ориентация магнитного поля выбирались таким образом, чтобы обеспечить более быстрое ослабление джозефсоновского тока с магнитным полем.

При приложении магнитного поля вдоль диагонали квадратного или ромбического электрода уменьшение джозефсоновского тока идет быстрее, по квадратичному закону [87]. Оценки показывают, что приемлемое ослабление джозефсоновского тока может быть достигнуто уже в полях 100 – 200 Э. Исходя из вышесказанного, в данной работе мы исследовали туннельные детекторы, имеющие в плане форму ромба, и магнитное поле прикладывалось вдоль его диагонали.

Прозрачность туннельного барьера. Туннельный барьер характеризуется удельным нормальным сопротивлением  $\rho_N = R_N \cdot S$ . В работе [88] показано, что скорость туннелирования квазичастиц  $\gamma_T$  для простого туннельного перехода S-I-S (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) дается следующим выражением:

$$\gamma_T = (4N_F(0)d\rho_N)^{-1}, \quad (5.2)$$

где  $N_F(0)$  – плотность электронов на поверхности Ферми для одного направления спина,  $d$  – толщина электрода. Поскольку в СТП-детекторах

скорость туннелирования должна быть максимальной, то сопротивление туннельного барьера должно быть минимально возможным.

Ограничения на прозрачность барьера возникают вследствие токов утечки. Нормальное сопротивление туннельного барьера определяется толщиной изолирующего слоя, которая фактически составляет несколько межатомных расстояний. При уменьшении толщины изолирующего слоя увеличивается вероятность образования локальных закороток, т.е. областей, где изолирующий слой отсутствует. Ток через подобную закоротку отвечает контакту металл-металл и не зависит от температуры. При достаточно низких температурах закоротки фактически определяют ВАХ детектора. С точки зрения СТП-детекторов токи утечки не должны превышать тепловой квазичастичный ток в рабочей точке, либо, по крайней мере, должны иметь достаточно малые значения, чтобы не вносить заметные электронные шумы. Уровень токов утечки зависит от деталей технологии изготовления туннельных переходов. В настоящей работе были изготовлены и исследованы туннельные переходы с удельными сопротивлениями от 100 до 2000 Ом/μм<sup>2</sup>.

Токоподводящие дорожки. Общее требование к конструкции туннельных детекторов состоит в том, чтобы обеспечить максимально возможную скорость туннелирования неравновесных квазичастиц при сохранении минимальной скорости их потерь. Токоподводы являются одним из каналов потерь квазичастиц. Неравновесные квазичастицы могут диффузионно уходить по токоподам из области туннелирования и, затем, рекомбинировать. Наиболее простым решением является использование токоподводов малого сечения, что должно ограничить диффузию квазичастиц. В тестовых СТП-детекторах, исследованных в настоящей работе, использовались токоподводы малой ширины  $5 \div 10$  мкм.

## 5.2 Микросхемы СТП-детекторов.

Микросхема СТП-детектора (рис. 5.1) представляет собой кремниевую пластину размером 5 мм × 5 мм с пятью туннельными детекторами. Детекторы обозначались буквами А, D, В, С, Е и имели различные площади электродов: 400, 400, 1600, 6400 и 20000 мкм<sup>2</sup> соответственно.

По периметру чипа располагались контактные площадки. К верхним электродам каждого детектора были подсоединены по две контактные площадки. Токоподводы к нижним электродам объединялись и выходили к двум общим контактным площадкам. Размеры контактных площадок были примерно 1 мм × 1 мм. План-схема отдельного СТП-детектора изображена на рис. 5.2. Электроды детекторов имели в плане форму ромба с отношением диагоналей 1:2 или 1:4. Геометрические размеры детекторов приведены в Таблице 5.1. Размеры нижнего электрода могли совпадать с размерами верхнего, или превышать их на 2.5 мкм вдоль нормали к стороне электрода. Токоподводящие дорожки (1 на рис. 5.1) подходили к тупым углам ромбических электродов и на расстояниях около 0.25 мм имели ширину 5 ÷ 10 мкм. Магнитное поле для подавления джозефсоновского тока прикладывалось в плоскости туннельного перехода (в плоскости чипа) перпендикулярно длинной диагонали ромба, вдоль токоподводящих дорожек. Такая ориентация магнитного поля позволяла минимизировать размагничивающий фактор детектора и снизить вероятность захвата магнитных вихрей.

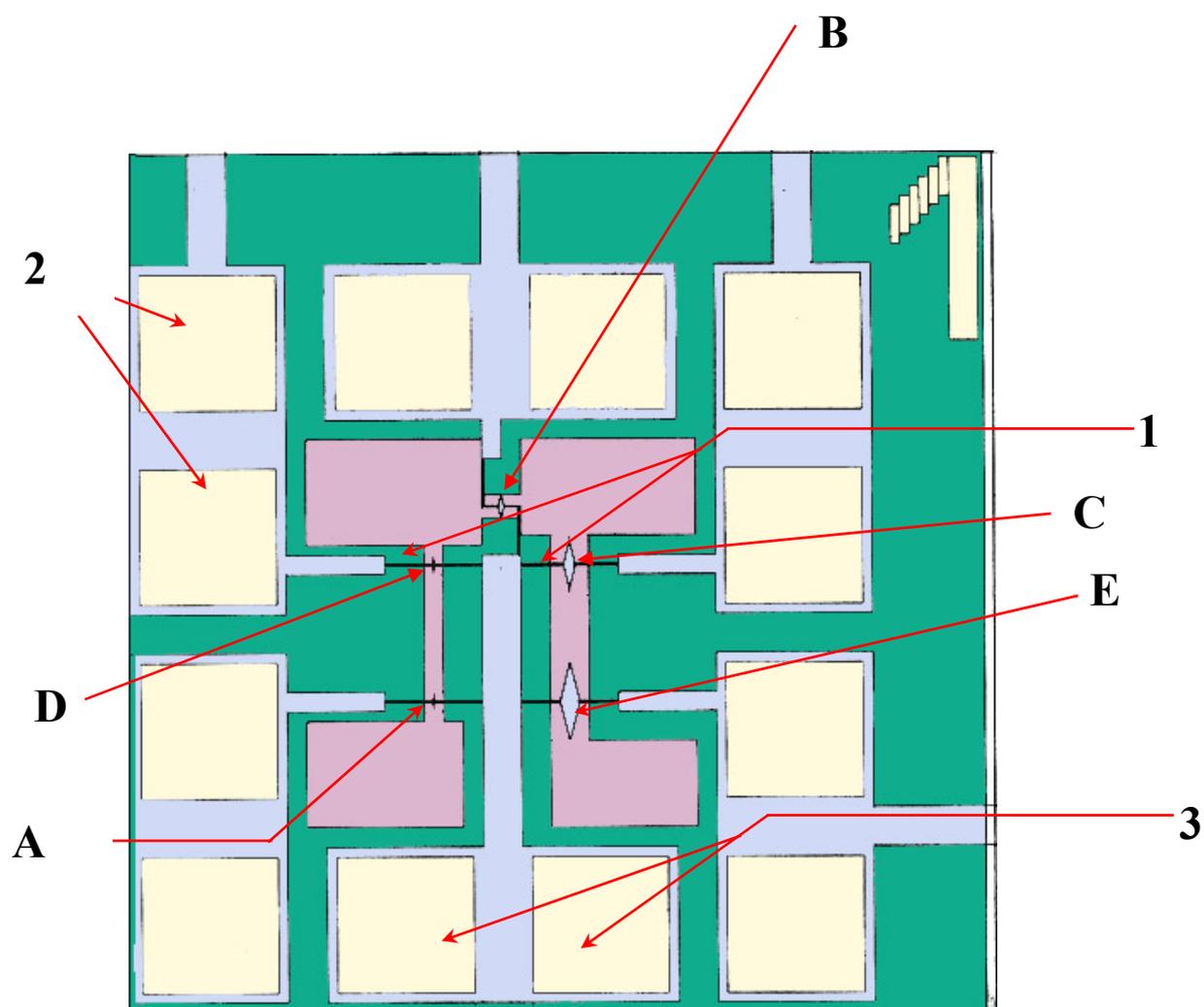


Рис.5.1 Микросхема СТП-детектора.

Буквами А, В, С, D и Е обозначены СТП - детекторы.

1-токоподводящие дорожки, 2- контактные площадки верхнего электрода,  
3- контактные площадки нижнего электрода.

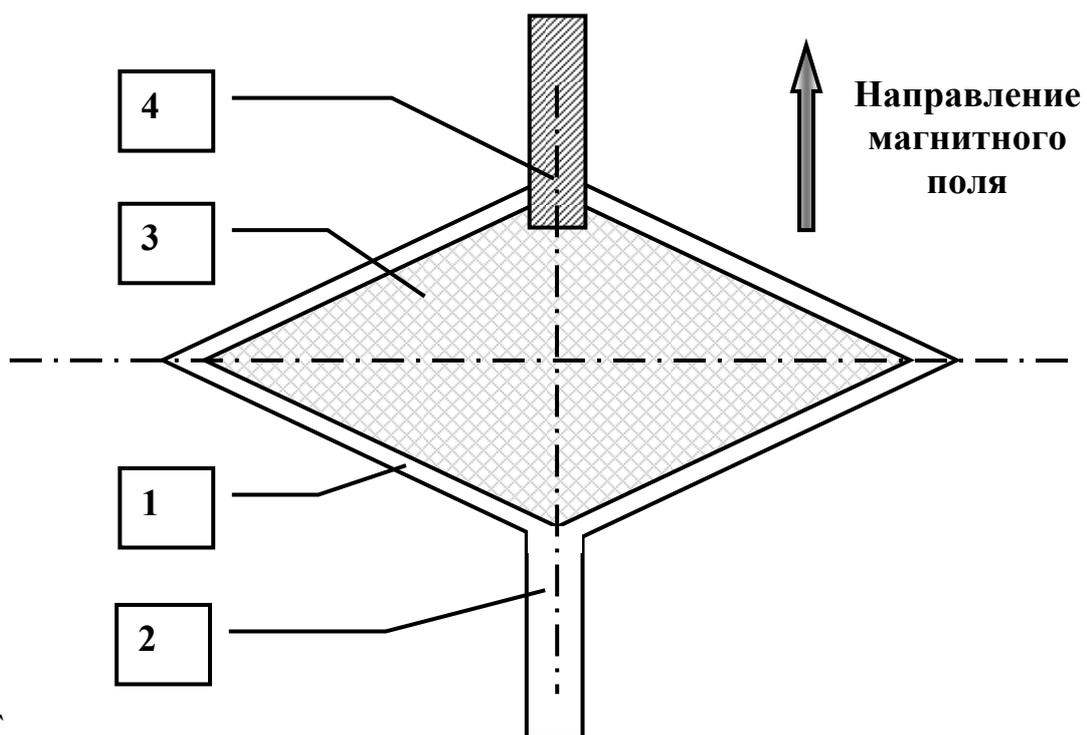


Рис. 5.2. СТП-детектор. Вид сверху.

1 – нижний электрод, 2 – токоподводящая дорожка к нижнему электроду,  
3 – верхний электрод, 4 - токоподводящая дорожка к верхнему электроду

### А. СТП детекторы с отношением диагоналей 2:1

N	Обозначение СТП	Длины диагоналей, мкм		Площади электродов, мкм <sup>2</sup>		Ширина токо- подвода, мкм
		Нижний электрод	Верхний электрод	Нижний электрод	Верхний электрод	
1	A	50 × 25	40 × 20	625	400	6
2	D	50 × 25	40 × 20	625	400	6
3	B	90 × 45	80 × 40	2025	1600	8
4	C	170 × 85	160 × 80	7225	6400	10
5	E	290 × 145	280 × 140	21025	19600	10

### В. СТП детекторы с отношением диагоналей 4:1

N	Обозначение СТП	Длины диагоналей, мкм		Площади электродов, мкм <sup>2</sup>		Ширина токо- подвода, мкм
		Нижний электрод	Верхний электрод	Нижний электрод	Верхний электрод	
1	A	76 × 19	56 × 14	722	392	6
2	D	76 × 19	56 × 14	722	392	6
3	B	140 × 35	120 × 30	2450	1800	8
4	C	260 × 65	240 × 60	8450	7200	10
5	E	420 × 105	400 × 100	22050	20000	10

В соответствии с данной схемой был разработан и изготовлен набор фотошаблонов, которые использовались для изготовления детекторов. Фотошаблоны были спроектированы таким образом, что одновременно изготавливалось 4 чипа с СТП-детекторами (см. рис. 5.3). Два чипа, обозначенные цифрами 1 и 3, имели детекторы ромбической формы с отношением диагоналей 4:1, один чип (номер 4) имел детекторы с отношением диагоналей 2:1. На чипе с номером 2 были расположены два детектора специальной формы с двумя туннельными переходами на каждом. Чипы располагались в четвертях квадрата, сверху и снизу от которого находились по 8 больших контактных площадок, которые были подсоединены к контактным площадкам отдельных детекторов. Вся конструкция в целом представляла собой стандартный тестовый чип, который использовался в различных разработках ИРЭ РАН. Размеры этого чипа 24 мм × 15 мм.

После проведения всех операций по изготовлению СТП-детекторов (см. параграф 5.3), данный чип закреплялся в специальную криогенную вставку, которая погружалась в транспортный гелиевый дьюар типа СТГ-40. Здесь проводилось предварительное измерение ВАХ СТП-детекторов при температуре  $T=4.2$  К в нулевом магнитном поле. Если ВАХ имели приемлемые параметры, проводилось разрезание большого чипа на отдельные чипы СТП-детекторов, которые передавались для дальнейших исследований в НИИЯФ МГУ.

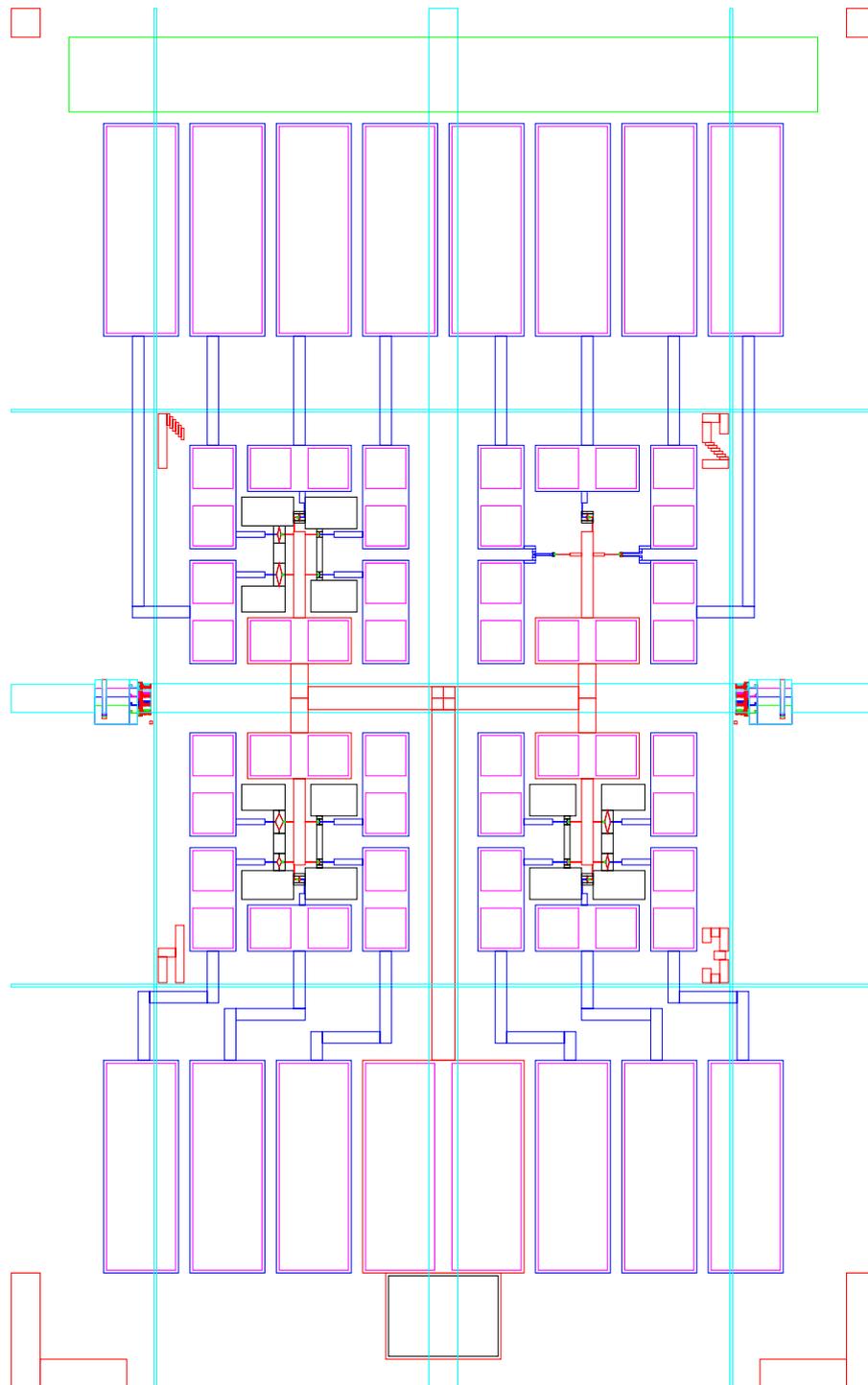


Рис.5.3. Стандартный тестовый чип СТП-детектора.

### 5.3. Методика изготовления СТП-детекторов.

Идея использования ловушки для квазичастиц, предложенная в работе [88], оказалась весьма плодотворной при разработке сверхпроводящих туннельных детекторов. С одной стороны, путем создания ловушки вблизи туннельного барьера удается повысить вероятность туннелирования и ослабить влияние процессов потерь квазичастиц. С другой стороны, существует возможность подавить сигнал (сделать электрод пассивным), если создать ловушку в электроде на той стороне, которая не прилегает к туннельному барьеру. В обоих случаях туннельные переходы становятся многослойными, и их поведение усложняется из-за эффекта близости и свойств поверхностей раздела между слоями. Тем не менее, использование ловушек позволяет изменять туннельные характеристики переходов таким образом, чтобы улучшить спектроскопические характеристики детекторов.

В работе [89] использовали Al покрытие на верхнем электроде Nb/Al туннельных переходов и ожидали более чем в 100 раз снизить отклик этого электрода на облучение рентгеновскими лучами. В действительности оказалось, что уровень сигнала уменьшился всего в 6 раз. Это объяснялось существованием другого тонкого Al слоя-ловушки вблизи туннельного барьера.

Данные для Nb/Al переходов с нижним электродом, сделанным пассивным при помощи Ta ловушки в этом электроде, успешно описаны при помощи теоретической модели [90], учитывающей диффузию квазичастиц и потери на краях в активном электроде.

В работе [91] использовались детекторы рентгеновского излучения с туннельными переходами, имеющими Al ловушки в обоих электродах, активном и пассивном. Сигнал пассивного электрода был ослаблен в 2-5 раз, однако использование нижней Al пленки в качестве основы для дальнейшего напыления всех последующих слоев оказалось неудачным с точки зрения

качества самих переходов. Таким образом, улучшить разрешение путем использования ловушек в работах [89-91] не удалось.

В данной работе исследовались детекторы с разными многослойными структурами нижнего и верхнего электродов (приведены в Таблице 5.2). Для улучшения условий туннелирования квазичастиц вблизи туннельного барьера напылялся подслоя Al толщиной 10-30 нм. Свойства этого слоя определялись эффектом близости с прилегающим слоем Nb [92]. Для ослабления потерь квазичастиц на внешней поверхности верхнего электрода наносился дополнительный слой соединения NbN. Для создания ловушек для захвата квазичастиц в пассивных электродах использовались слои из Al или Ti, которые наносились на внешние поверхности электродов (в частности, в нижнем электроде со стороны подложки).

Одной из основных проблем изготовления СТП-детекторов являлось обеспечение малых токов утечки. Как будет показано, приемлемый уровень токов утечки составляет около 100 нА при напряжении 1 мВ, что соответствует сопротивлению утечки 10 кОм. Только в этом случае туннельные переходы имеют малый уровень электронных шумов и могут быть испытаны в качестве детекторов излучения. Именно с этой точки зрения, варьировалась методика приготовления СТП, подбирались толщины близостных слоев, а также прозрачность туннельного барьера. Оптимизация всех параметров СТП-детекторов с точки зрения токов утечки являлось одной из задач настоящей работы.

Для каждой структуры детекторов разрабатывалась своя методика изготовления.

Как уже говорилось выше, использование Al ловушки в нижнем электроде казалось весьма перспективным. Но, к сожалению, реализовать технологически такую структуру оказалось достаточно сложно. Переходы получались низкого качества, с большими токами утечки.

**Таблица 5.2. Основные структуры электродов исследованных СТП - детекторов.**

N	Нижний электрод	Верхний электрод	Примечание
1	Nb/Al	Nb/NbN	Введение отражающего слоя NbN в верхнем электроде
2	NbN/Nb/Al	Nb/Al/Au	Нижний электрод основной
3	Nb	Al/Nb/NbN	Введение Al близостного слоя-ловушки в верхний электрод + внешний отражающий NbN слой
4	Al/Nb	Al/Nb/NbN	Введение пассивного (killed) Al-слоя в нижний электрод
5	Ti/Nb	Al/Nb/NbN	Введение пассивного (killed) Ti-слоя в нижний электрод
6	Ti/Nb	Nb/NbN	Отсутствие близостного Al-слоя в верхнем электроде

Идея изготовить структуру, когда нижний электрод NbN/Nb/Al является основным, поглощающим кванты излучения, электродом, а верхний электрод содержит Al ловушку, казалась интересной. Такую структуру можно было изготовить, напылив на Al еще дополнительный слой золота. В результате проведенных исследований была разработана методика и изготовлены туннельные переходы на основе структуры NbN/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb/Al/Au.

Для структуры с верхним многослойным электродом из Nb/Al/Au, с толщинами слоев 100/5/100 нм соответственно, были найдены условия формирования геометрии перехода методами жидкостного травления золота и алюминия, с последующим реактивно ионным травлением ниобия. Перед жидкостным травлением маска из фоторезиста задубливалась в течение 20 минут при 120° С. Травление золота проводилось в растворе KI : I : вода (115 г : 65 г : 100 мл), скорость травления составляла 3.3 nm/sec. Подтрав резиста составлял 0.3 мкм. Травление Al проводилось в растворе KOH, скорость травления 0.5 nm/sec. Затем по этой же маске проводилось реактивно ионное травление Nb в смеси газов CF<sub>4</sub> + O<sub>2</sub> (в соотношении 9:3) при давлении 0,13 Торг и мощности 150 Вт. Скорость травления Nb составляла 1.4 nm/sec.

ВАХ таких туннельных переходов имели приемлемое качество с  $R_j/R_n = 25$ , но получить хорошие спектры не удалось. Возможно, это связано с тем, что площадь нижнего электрода примерно на 10 % больше площади верхнего электрода (рис. 5.2) (переходы с «юбкой»). При поглощении кванта излучения в области «юбки», квазичастицы будут вынуждены диффундировать в поперечном направлении, чтобы достичь зоны туннелирования. Очевидно, что это приводит к ослаблению сигнала и деградации спектра в целом.

Впервые нами было предложено использовать в качестве слоя ловушки титан [A97, A101, A105, A112 - 116, A122, A123]. Критическая

температура сверхпроводящего перехода Ti  $T_c=0,4$  К (для объемного образца) и ожидалось, что такая ловушка окажется даже более эффективной, чем Al ( $T_c=1,2$  К) при рабочей температуре 1,3 К.

Последовательность этапов изготовления туннельных детекторов на основе структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN представлена на рис. 5.4. В качестве подложки использовался кремний размером 15×24 мм с напыленным слоем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (100 нм), являющийся защитным слоем при формировании переходов реактивно-ионным травлением. Геометрия нижнего электрода формировалась методом «взрывной» литографии. На первом этапе напылялась многослойная структура Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN (рис. 5.4.1). Осаждение многослойной структуры проводилось в едином вакуумном цикле в установке *Leybold Heraeus L-560 UV*. Металлы осаждались магнетронным распылением. Перед напылением слоев для очистки поверхности подложки и улучшения адгезии пленки проводилось ионно-лучевое травление в течение 3 минут (Ar  $1.0 \cdot 10^{-2}$  мбар, P= 225 Вт). После напыления первого слоя Al проводилось его термическое окисление при комнатной температуре в атмосфере чистого кислорода. Затем камера откачивалась в течение 10÷20 минут для удаления остаточного кислорода. Напыление структуры завершалось осаждением второго слоя Al и слоев Nb и NbN. Формирование геометрии перехода осуществлялось методом RIE (травление NbN и Nb) и жидкостным травлением Al (рис. 5.4.2). Реактивно ионное травление проводилось в смеси газов CF<sub>4</sub> и O<sub>2</sub> при давлении  $2 \cdot 10^{-1}$  мбар и мощности 50 Вт. Травление Al проводилось в растворе KOH.

После анодирования до 20÷25 В напылялся слой изоляции SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм (этап 3 рис.5.4). После вскрытия окон в слое изоляции напылялся замыкатель из Nb (этап 4 на рис. 5.4). На последнем этапе напылялись контактные площадки из золота. Режимы изготовления структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN приведены в Таблице 5.3.

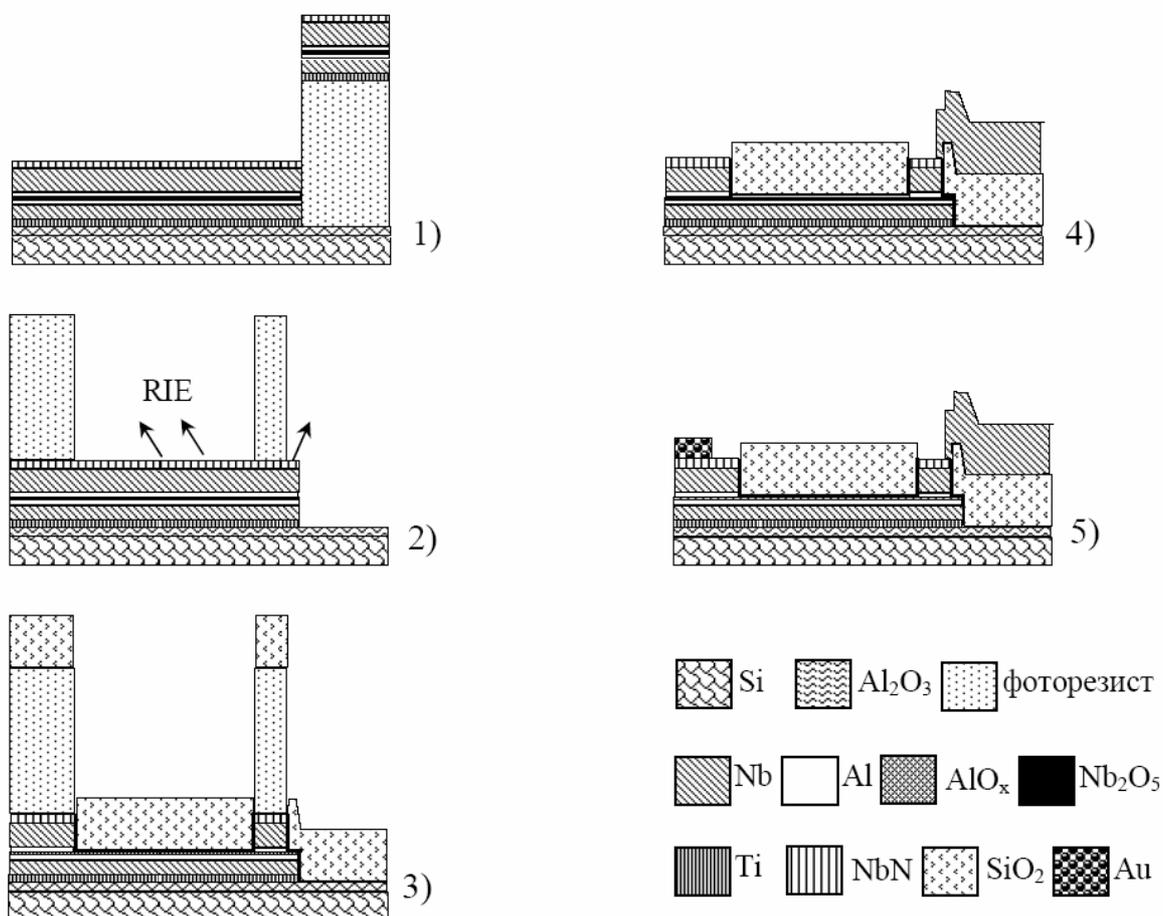


Рис. 5.4 Этапы изготовления СТП-детекторов.

- 1) осаждение структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN на маску из фоторезиста;
- 2) формирование геометрии перехода методом RIE;
- 3) анодирование и напыление слоя изоляции SiO<sub>2</sub>;
- 4) напыление Nb токопровода к верхнему электроду;
- 5) формирование Au контактных площадок.

**Таблица 5.3. Режимы изготовления СТП- детекторов на основе структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN**

Наименование слоя	Материал	Параметры напыления	Толщина, нм
Буферный слой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ar $1 \times 10^{-2}$ mbar; RF Power 240 W; $v=0.15$ nm /sec	100
Многослойный нижний электрод	Ti	Ar $6.0 \times 10^{-3}$ mbar; RF Power 598 W, DC-Pot: 265 V; $v=0.37$ nm /sec	30
	Nb	Ar $9.0 \times 10^{-3}$ mbar , DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec	150
	Al	Ar $6.4 \times 10^{-3}$ mbar, DC Power 78 W, $v=0.2$ nm /sec	8
Туннельный барьер	AlO <sub>x</sub>	O <sub>2</sub> $6 - 8 \times 10^{-1}$ mbar; 30 min	
Многослойный верхний электрод	Al	Ar $6.4 \times 10^{-3}$ mbar, DC Power 78 W, $v=0.2$ nm /sec	10- 13
	Nb	Ar $9.0 \times 10^{-3}$ mbar , DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec	200
	NbN	Ar+N <sub>2</sub> $9.8 \times 10^{-3}$ mbar; DC Power 510 W; $v=1.2$ nm /sec	30
Слой изоляции	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20-25 V	
Слой изоляции	SiO <sub>2</sub>	Ar $6.1 \times 10^{-3}$ mbar; RF Power 417 W, DC pot. 882 V; $v=2.7$ nm /sec	300
Замыкатель	Nb	Ar $9.0 \times 10^{-3}$ mbar , DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec	500
Контактные площадки	Au	Ar: $6 \times 10^{-3}$ mbar; 700 V $v=1.7$ nm /sec	100

Для оптимизации напыления пленок NbN были проведены исследования зависимости  $T_c$  и  $\rho_{уд}$  от давления азота при фиксированном давлении аргона. Пленки нитрида ниобия напылялись в установке Leybold Heraeus L-560 UV в смеси газов аргона и азота при фиксированном потоке Ar 140 sccm и DC мощности 510 Вт. Поток N<sub>2</sub> изменялся от 8 sccm до 18 sccm. В процессе термоциклирования образца от комнатной до гелиевой температуры происходило измерение электрического сопротивления и определение критической температуры. Удельное сопротивление пленок вблизи  $T_c$  определяет ВЧ потери при гелиевой температуре. Остаточное сопротивление (RRR) определялось как отношение сопротивлений образца при температурах 300 К и 20 К. Экспериментально установлено, что пленки с наибольшим  $T_c$  и наименьшим удельным сопротивлением получаются при давлении смеси газов Ar+N<sub>2</sub>  $9.8 \times 10^{-3}$  mbar ( Ar 140 sccm, N<sub>2</sub> 13 sccm).

На рис. 5.5 приведены электронные фотографии СТП-детекторов, проведенные на сканирующем электронном микроскопе XYZ-10 НИИЯФ МГУ. Видно, что детекторы имеют четкие геометрические формы и заданные размеры. На фото видны детали детекторов: области острых и тупых углов электродов, области юбки нижнего электрода, токоподводы и области их контактов с электродами. Неровности боковых граней детекторов можно оценить в 0.2 – 0.3 мкм, что является естественным пределом при использовании контактной фотолитографии.

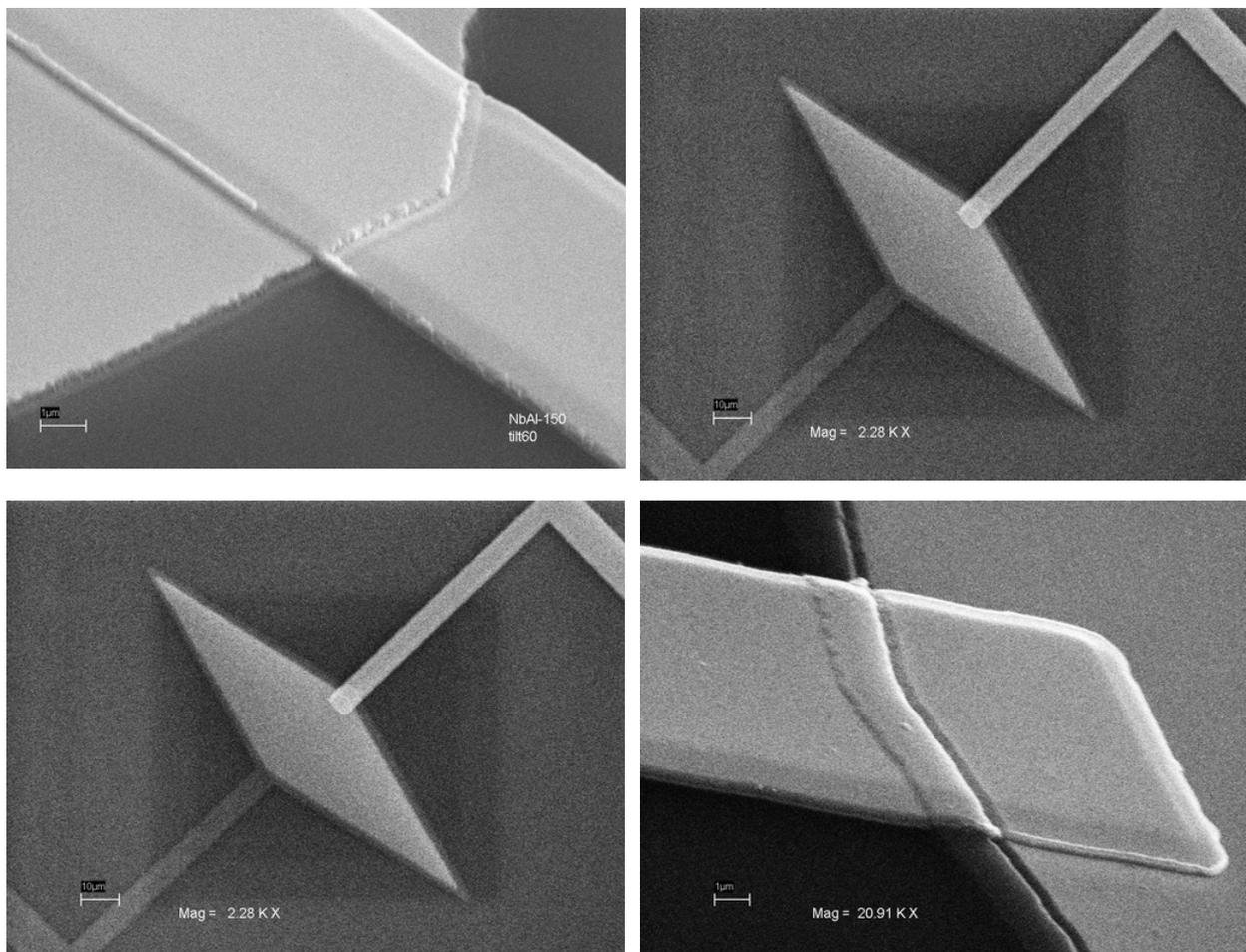


Рис. 5.5. Исследование СТП детекторов на сканирующем электронном микроскопе XYZ-10 НИИЯФ МГУ.

## 5.4 Экспериментальные характеристики СТП -детекторов.

### 5.4.1. Основные параметры ВАХ СТП-детекторов

На рис. 5.6 (кривая 1) приведена типичная ВАХ симметричного туннельного перехода Nb/Al,AlOx/Nb, измеренная при температуре  $T=4.2$  К в нулевом магнитном поле. Измерения проводились в режиме задания «постоянного тока», т.е. сопротивление детектора  $R_d \ll R_L$  – выходного сопротивления источника. Прежде всего, отметим гистерезис ВАХ, когда ветвь, соответствующая возрастанию тока (прямая ветвь), отличается от обратной ветви, получаемой при уменьшении тока. При нулевом напряжении на прямой ветви ВАХ наблюдается ток, отвечающий джозефсоновскому туннелированию куперовских пар. Максимальное значение этого тока принято называть джозефсоновским туннельным током,  $I_J$ .

При повышении тока свыше  $I_J$  происходит переброс рабочей точки на крутой участок ВАХ, соответствующий щелевому напряжению  $V_g$ . Величина  $V_g$  равна сумме щелевых параметров нижнего и верхнего электродов,  $\Delta_b$  и  $\Delta_t$ , соответственно.

$$eV_g = (\Delta_b + \Delta_t) \quad (5.3)$$

При дальнейшем увеличении тока, ВАХ проходит локальный максимум (гребень, cusp), часто называемый «коленообразной особенностью», связанный с сингулярностью плотности квазичастичных состояний вблизи границы сверхпроводящей щели, а затем ВАХ выходит на линейный участок. В этой области определяется нормальное сопротивление туннельного перехода,  $R_N$ . Сопротивление  $R_N$  соответствует сопротивлению туннельного перехода при температурах выше температуры сверхпроводящего перехода.  $R_N$  характеризует прозрачность перехода. Как правило, СТП-детекторы имели вблизи туннельного барьера

дополнительный слой из алюминия, который использовался для создания энергетической ловушки для неравновесных квазичастиц. ВАХ туннельного перехода Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al(2)/Nb/NbN с толщиной Al(2) слоя 13 нм приведена на рис. 5.6 (кривая 2). Из рисунка видно, что дополнительный Al(2) слой уменьшает щелевое напряжение  $V_g$  и размывает щелевую часть ВАХ.

Для более точного определения параметров ВАХ, отвечающих туннелированию квазичастиц (квазичастичная ветвь), прикладывалось магнитное поле, которое подавляло джозефсоновский ток.

На рис. 5.7 кривая 1 соответствует ВАХ симметричного туннельного перехода Nb/Al,AlO<sub>x</sub>/Nb, когда сверхпроводящие щели нижнего и верхнего электродов примерно равны ( $\Delta_b = \Delta_t$ ). Щелевое напряжение  $V_g$  определялось как напряжение при пересечении прямой, соответствующей квазичастичному току, с касательной к щелевому участку ВАХ. Для симметричного перехода из значения  $V_g$  определяются величины сверхпроводящей щели:

$$\Delta_b = \Delta_t = V_g/2e \quad (5.4)$$

Кривая 2 на рис. 5.7 соответствует ВАХ туннельного перехода с Al-слоем толщиной 13 нм, в котором сверхпроводящие щели нижнего и верхнего электродов различны ( $\Delta_b \neq \Delta_t$ ) (асимметричный переход). ВАХ имеет гистерезис, который обусловлен локальным максимумом тока при напряжении  $V_m$ , равном разности щелей нижнего и верхнего электродов:

$$eV_m = |\Delta_b - \Delta_t| \quad (5.5)$$

Из соотношений (5.3) и (5.5) определялись величины щели для нижнего и верхнего электродов.

$$\Delta_1 = (V_g + V_1)/2e, \quad \Delta_2 = (V_g - V_1)/2e \quad (5.6)$$

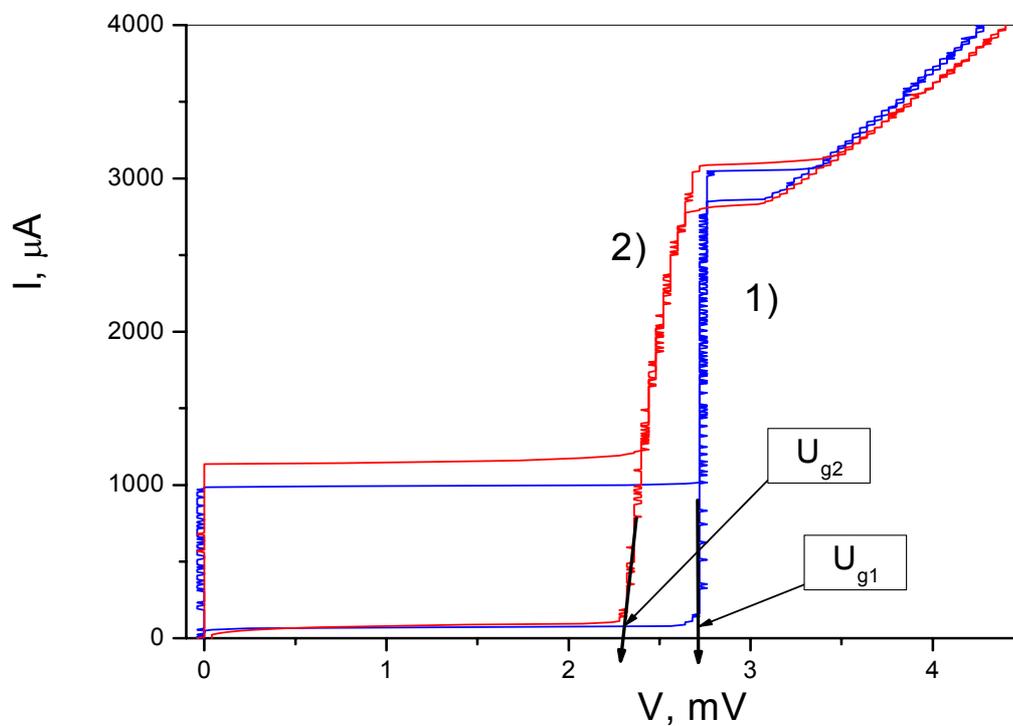


Рис. 5.6. ВАХ туннельного перехода при температуре  $T = 4.2$  К,  $V = 0$   
 1) симметричный туннельный переход Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb  
 2) переход Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al(2)/Nb/NbN с дополнительным слоем алюминия Al(2) толщиной 13 nm в верхнем электроде. (Измерения выполнены В.А. Андриановым).

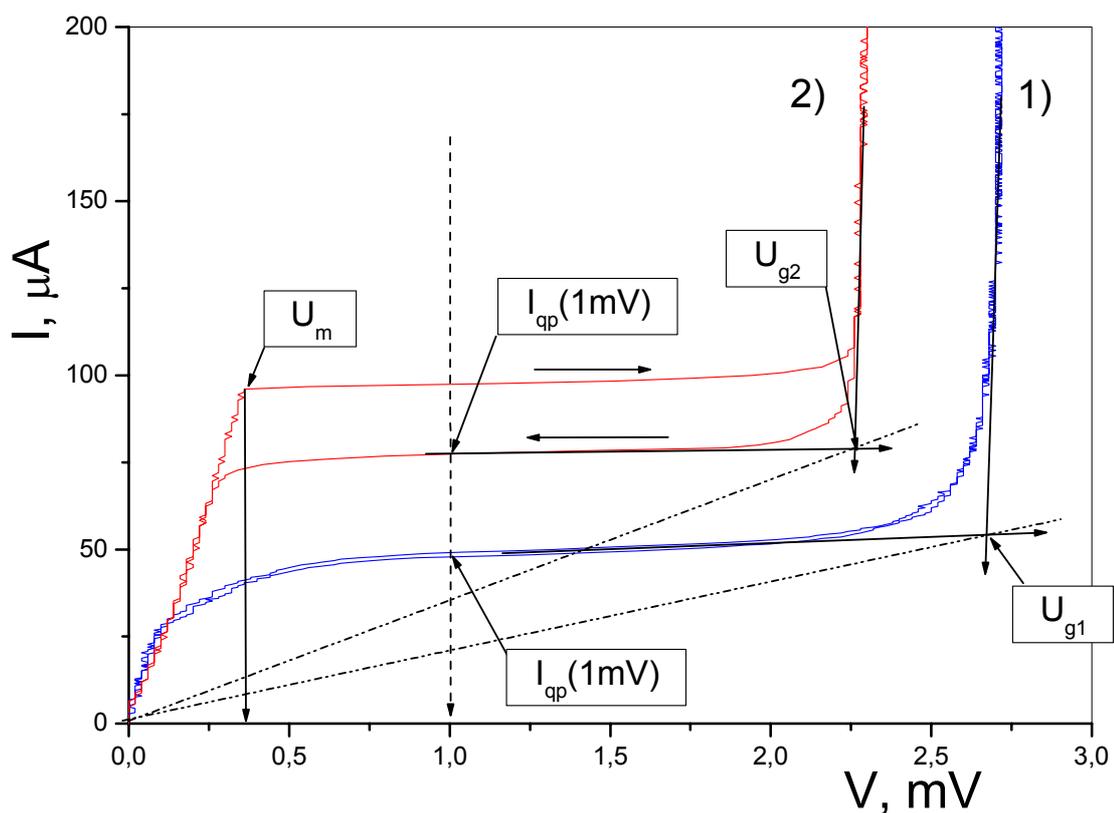


Рис. 5.7. Квазичастичные ВАХ при  $T = 4.2$  К в магнитном поле 60 Г.

Кривая 1) соответствует симметричному туннельному переходу Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb, когда сверхпроводящие щели нижнего и верхнего электродов примерно равны,  $\Delta_b = \Delta_t$ .

Кривая 2) соответствует асимметричному туннельному переходу Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al(2)/Nb/NbN с дополнительным Al-слоем,  $\Delta_b \neq \Delta_t$ .

(Измерения выполнены В.А. Андриановым).

Какое именно значение  $\Delta$  относится к нижнему или верхнему электроду нельзя определить из данных ВАХ. Однако, дополнительная информация о структуре туннельного перехода, как правило, позволяет однозначно идентифицировать электроды. Электрод, имеющий вблизи барьера, более толстый Al-слой, имеет меньшую величину щели  $\Delta$ .

В качестве характеристики квазичастичного тока, выбиралось значение тока на обратной ветви ВАХ при удобном напряжении, например при  $V_d=1\text{mV}$ ,  $I_{qp}(1\text{mV})$ .

Для характеристики качества переходов используется очень полезная характеристика – отношение  $R_j/R_n$ . Значение сопротивления утечки  $R_j$  определялось как сопротивление касательной к ВАХ, проведенной из нуля и лежащей ниже ВАХ (см. рис. 5.7). В идеальном туннельном переходе отношение  $R_j/R_n$  зависит только от величины сверхпроводящей щели и температуры измерения. В реальных структурах существуют различные дополнительные вклады в туннельный ток, такие как, например, токи утечки, вклады многократного туннелирования и т.д., что приводит к уменьшению  $R_j/R_n$ . Величина  $R_j/R_n$  характеризуют качество изготовления туннельных переходов и позволяют оценить вклад токов утечки.

Таким образом, из ВАХ, измеренных при  $T=4.2\text{ K}$ , определялись следующие параметры туннельных переходов:

- Сверхпроводящая щель нижнего электрода -  $\Delta_b$  .
- Сверхпроводящая щель верхнего электрода -  $\Delta_t$  .
- Нормальное сопротивление -  $R_n$ .
- Джозефсоновский ток  $I_J$ .
- Квазичастичный ток  $I_{qp}(1\text{mV})$ .
- Отношение  $R_j/R_n$ .

### 5.4.2. ВАХ СТП-детекторов при $T=4.2$ К (эксперимент)

Измерения ВАХ СТП-детекторов проводились, как правило, при 2-х температурах: при гелиевой температуре  $T=4.2$  К и при рабочей температуре детектора  $T=1.3$  К. При гелиевой температуре определялись основные параметры туннельного перехода ( $R_n$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta t$  и  $I_{qp}(1mV)$ ). На основании этих данных делалось заключение, насколько конкретный образец отвечает требуемым параметрам. Измерения проводились как в нулевом магнитном поле, так и в магнитных полях, достаточных для подавления постоянного джозефсоновского тока и ступенек Фиски, которые затрудняли правильное определение параметров туннельного перехода. Магнитное поле прикладывалось в плоскости туннельного барьера, параллельно короткой диагонали ромбов. Обычно магнитного поля с индукцией 60-100 Г было достаточно для наблюдения неискаженной квазичастичной ВАХ.

Как уже упоминалось, критическим параметром для работы СТП-детекторов является уровень токов утечки. Наличие дополнительных вкладов в туннельный ток не позволяет существенно снизить его при охлаждении детектора и обеспечить тем самым необходимые электрические характеристики. Можно указать несколько источников дополнительного тока утечки:

1. Сверхпроводящие закоротки туннельного барьера. В этом случае в ВАХ появляется сверхпроводящий ток при нулевом напряжении, который не модулируется и не подавляется магнитным полем. Данные закоротки возникают при дефектах изолирующего барьера, в результате которых возникает локальный контакт двух сверхпроводников  $S1/S2$ .

2. Резистивные закоротки. Эти закоротки проявляют себя, как шунтирующие туннельный переход сопротивления. Такие дефекты могут возникать по периметру туннельного барьера в процессе изготовления туннельных переходов (при травлении и анодизации боковых граней).

В некоторых случаях уже при гелиевых температурах ВАХ оказывались сильно искажены вследствие сверхпроводящих закоронок или больших токов утечки. Это позволяло сразу отбраковывать данные СТП-детекторы.

Достаточно часто дополнительные вклады в туннельный ток были слабо заметны при гелиевых температурах, однако становились доминирующими при более низких температурах. В ряде случаев обнаружению дефектных туннельных переходов помогало сравнение ВАХ для СТП-детекторов, находящихся на одном чипе, но имеющих различные площади. На рис. 5.8(а) и 5.8 (б) представлены нормированные ВАХ для туннельных переходов одного чипа. Отметим, что нормировка на площадь или на нормальное сопротивление перехода представляется наиболее естественной. Однако, площади туннельных переходов, хотя и близки к площадям использованных контактных масок, всегда отличны от них в результате «подтравы» в процессе изготовления. Поэтому точные значения площадей туннельных барьеров неизвестны. Что касается нормального сопротивления  $R_N$ , оно хорошо определялось для СТП-детекторов с малыми площадями (А, D и В детекторы), однако для больших туннельных переходов при токах, отвечающих нормальному участку ВАХ, происходил перегрев тонких подводящих проводов, в результате чего нормальные сопротивления определены не были. На рис. 5.8(а) приведены нормированные на  $R_N$  ВАХ двух СТП-детекторов с площадями электродов  $S = 400 \text{ мкм}^2$  (А-детектор) и  $S = 1600 \text{ мкм}^2$  (В-детектор). По оси У отложено произведение  $I_d \cdot R_N$ . Из рисунка видно, что кривые ВАХ подобны и лишь немного отличаются ( $\approx 6\%$ ) масштабом по оси У.

На рис. 5.8(б) приведены четыре ВАХ, нормированные на значение туннельного тока при напряжении  $V_d = 1 \text{ мВ}$ . Из рис. 5.8(б) видно, что кривые ВАХ 1, 2, 3, отвечающие туннельным переходам с площадями  $400 \text{ мкм}^2$ ,  $1600 \text{ мкм}^2$ ,  $6400 \text{ мкм}^2$  практически совпадают. Вместе с тем для

кривой 4, отвечающей переходу с площадью  $20000 \text{ мкм}^2$ , наклон при напряжении  $V_d \approx 2.0 \text{ мВ}$  заметно больше, чем у остальных кривых. Если бы значение  $R_N$  было определено, то отношение  $R_j/R_n$  для данного перехода оказывалось существенно меньше, чем для остальных кривых. Из этих данных следует, что туннельный переход 4 имеет большие токи утечки и не может быть использован в качестве СТП-детектора. Действительно, последующие измерения ВАХ при температуре  $T=1.3 \text{ К}$  подтвердили этот вывод. Переход имел сверхпроводящую закоротку на уровне нескольких микроампер и дифференциальное сопротивление в рабочей области около  $100 \text{ Ом}$ . В результате он имел очень высокий уровень шума и не мог быть использован в качестве детектора.

Полученные экспериментальные данные по измерению токов утечки на ВАХ были использованы для корректировки технологии изготовления СТП-детекторов. В частности, были скорректированы процедуры анодизации (анодирование до  $25 \text{ В}$  вместо  $10\text{-}12 \text{ В}$ ) и жидкостного травления. Это позволило заметно улучшить качество туннельных переходов и увеличить полезный выход переходов с малыми токами утечки. Рис. 5.8(б), демонстрирующий идентичность ВАХ для 80% туннельных переходов, расположенных на одном чипе, свидетельствует о достаточно высоком уровне разработанной технологии.

Вместе с тем, следует отметить, что тест туннельных переходов при  $T=4.2 \text{ К}$  не являлся достаточным. Туннельные переходы с большими площадями (С и Е переходы) имели нормальное сопротивление на уровне  $0.01 \text{ Ом}$  и сопротивление  $R_j$  в диапазоне нескольких Ом. Шунтирующие сопротивления утечки большие, чем  $100 \text{ Ом}$  практически не различимы на ВАХ при  $T=4.2 \text{ К}$ . Поэтому окончательный вывод о пригодности конкретных образцов туннельных переходов для работы в качестве детекторов мог быть получен только в измерениях при низких температурах.

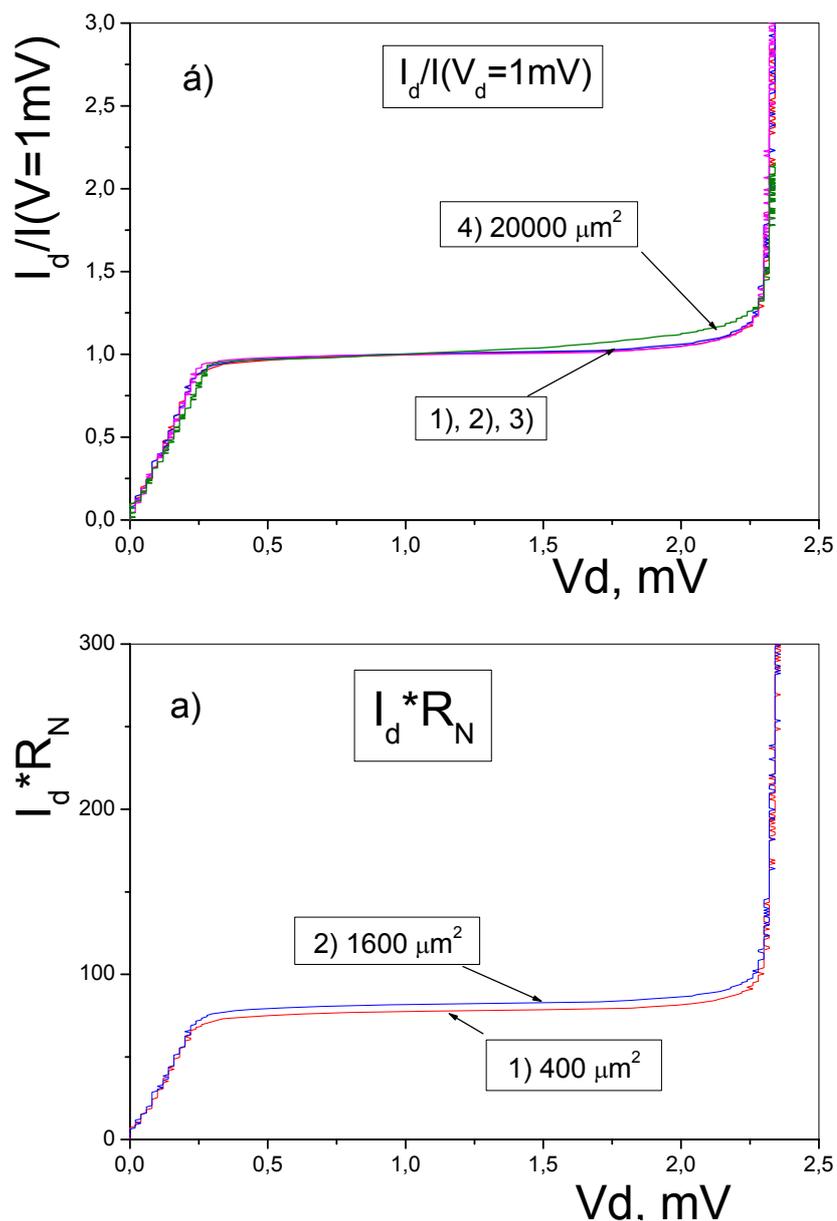


Рис. 5.8. Нормированные ВАХ для туннельных переходов одного чипа.  
 а) ВАХ для А и В переходов, нормированные с использованием  $R_N$ : ( $I_d * R_N$ ) от  $V_d$ .  
 б) ВАХ, нормированные на значение туннельного тока при напряжении  $V_d = 1 \text{ mV}$ . Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют СТП-детекторам, имеющим различные площади электродов: 400  $\mu\text{m}^2$ , 1600  $\mu\text{m}^2$ , 6 400  $\mu\text{m}^2$  и 20 000  $\mu\text{m}^2$ , соответственно. (Измерения выполнены В.А. Андриановым).

### 5.4.3. Результаты тестирования СТП-детекторов

Охлаждение СТП-детекторов до температур существенно более низких, чем  $T_c$  проводится для замедления процессов рекомбинации квазичастиц, а также с целью уменьшения теплового туннельного тока до уровня, обеспечивающего малые электронные шумы детектора.

Дополнительная информация о свойствах туннельного перехода может быть получена из температурной зависимости туннельного тока  $I_{qp}(T)$ . Экспоненциальное уменьшение теплового туннельного тока должно позволить получить при низких температурах необходимые для работы детектора электрические параметры, т.е. большое дифференциальное сопротивление и низкий туннельный ток.

На рис. 5.9 приведены ВАХ, измеренные при различных температурах в интервале 4.2-1.4 К для туннельного перехода Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN с толщинами слоев 30/100/8/13/150/30 нм.

Из рис. 5.9 видно, что подслой из Ti не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади с параметром качества  $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$  (при  $T = 1.3 \text{ K}$ ).

Сверхпроводящие туннельные переходы со структурой Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN (толщиной 30/100/8/13/150/30 нм) были исследованы в качестве детекторов рентгеновского излучения с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана.

Амплитудные спектры, возникающие при облучении сверхпроводящих туннельных переходов рентгеновским излучением Mn K $\alpha$  (5,9 кэВ) и K $\beta$  (6,4 кэВ), регистрировались при температурах около 1,35 К. Зарядовочувствительный предусилитель работал при комнатной

температуре. Одновременно с помощью цифрового осциллографа регистрировались серии импульсов.

На рис. 5.10 (б-г) показаны амплитудные спектры импульсов двух туннельных переходов (площадью 6400 и 20000 мкм<sup>2</sup>). Спектр на рис.5.10 (б) для перехода площадью 6400 мкм<sup>2</sup> демонстрирует наилучшее энергетическое разрешение: ширина на половине высоты 78 эВ. Вклад электронных шумов составляет 50 эВ, собственная ширина линии детектора менее 60 эВ. На рис.5.10 (в) видна линия от нижнего электрода, скрытая на рис.5.10 (б) благодаря более высокому уровню дискриминации. Сигнал пассивного электрода более чем в 8 раз ослаблен по сравнению с сигналом активного, энергетическое разрешение около 1 кэВ.

Распределение времен нарастания и амплитуд импульсов, полученное из обработки оцифрованных сигналов, показано на рис.5.10 (а). Группа импульсов с большими амплитудами соответствует поглощению  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  линий в активном электроде, группа с малыми амплитудами - в пассивном.

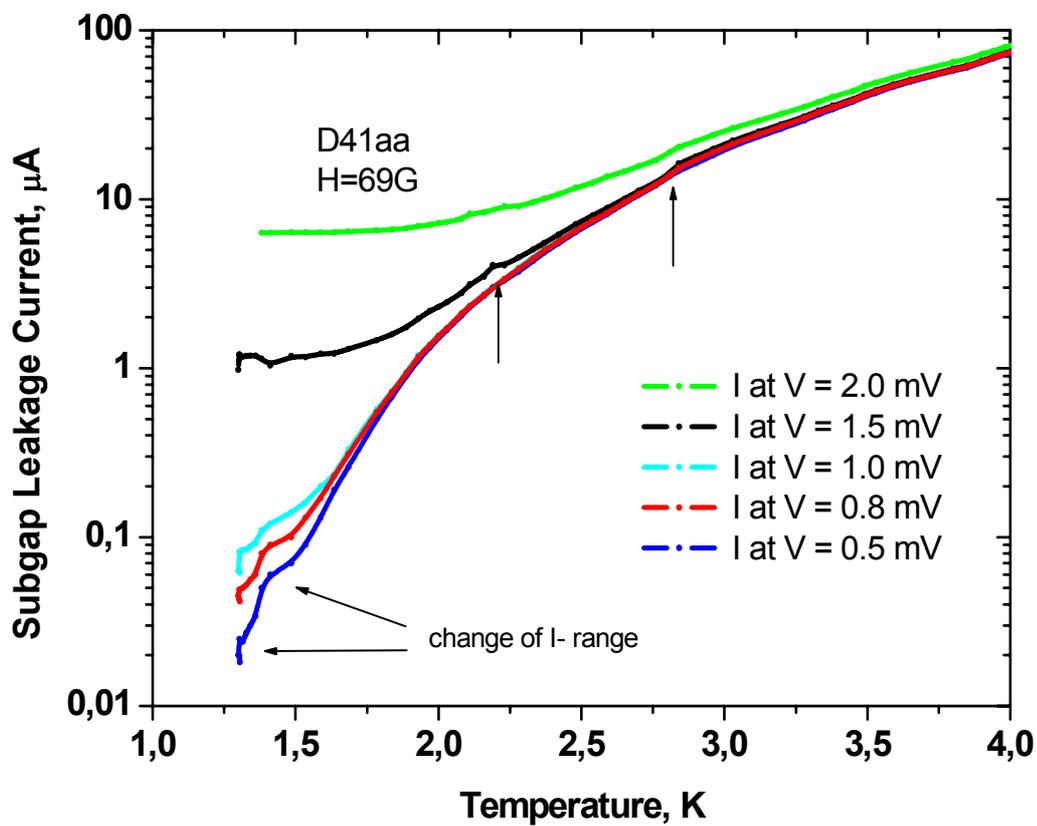


Рис. 5.9 Зависимость тока утечки СТП-детекторов  $\text{Ti/Nb/Al-AlO}_x/\text{Al/Nb/NbN}$  от температуры, измеренного при различных напряжениях. (Измерения выполнены И.Л. Ромашкиной и М.Г. Козиным).

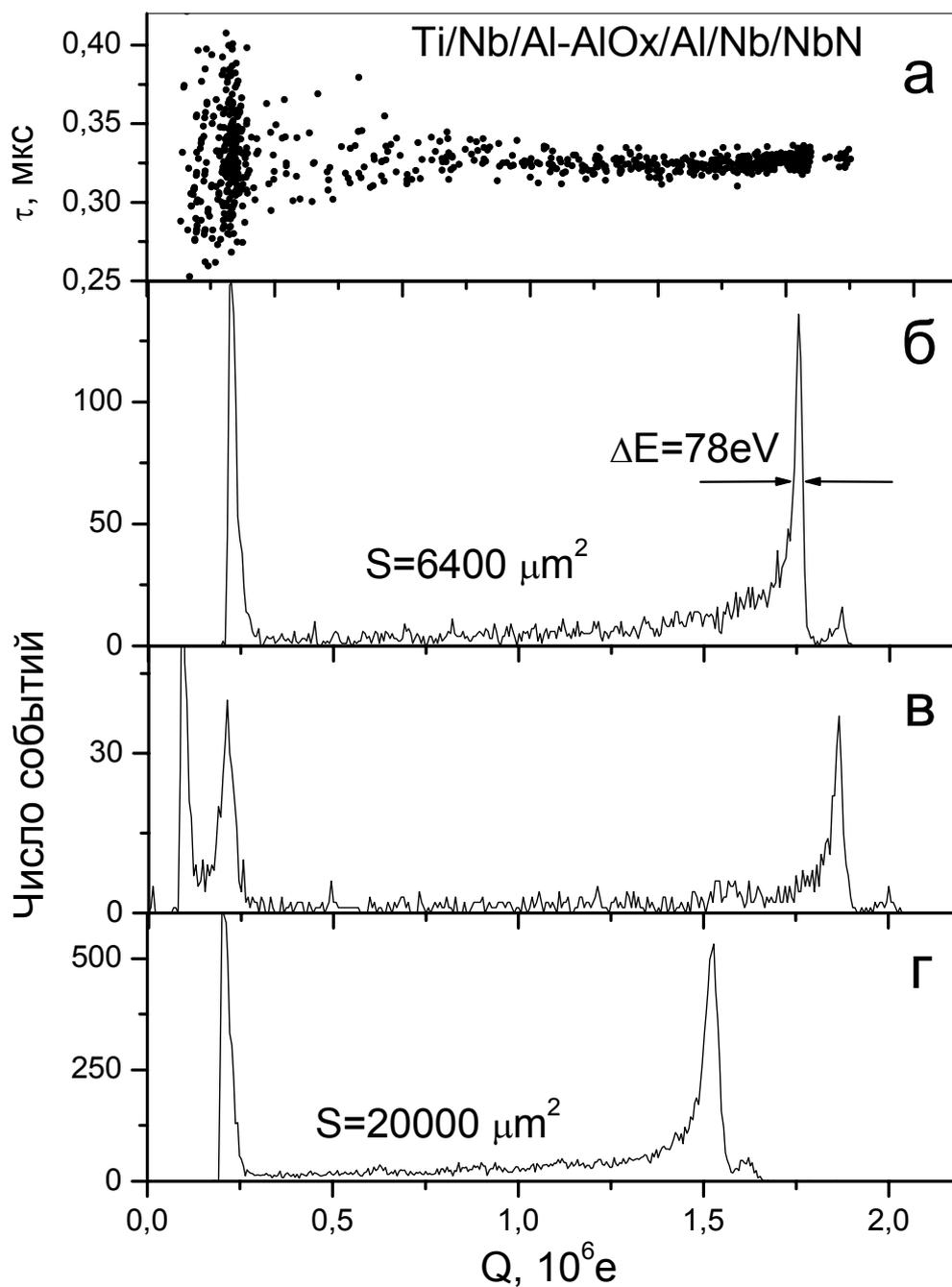


Рис. 5.10 Распределение времен и амплитуд (а) и амплитудные спектры (б - г) импульсов детекторов с пассивным электродом:

а, б)  $S = 6400 \text{ мкм}^2$ ,  $T = 1,34 \text{ К}$ ,  $H = 127 \text{ Гс}$ ,  $V = 0,428 \text{ мВ}$ ;

в)  $T = 1,38 \text{ К}$ ,  $H = 104 \text{ Гс}$ ,  $V = 0,532 \text{ мВ}$ ;

г)  $S = 20000 \text{ мкм}^2$ ,  $T = 1,34 \text{ К}$ ,  $H = 104 \text{ Гс}$ ,  $V = 0,350 \text{ мВ}$

(Измерения выполнены И.Л. Ромашкиной и М.Г. Козиным).

## 5.5 Выводы по главе 5.

Разработана технология создания сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана.

Были изготовлены и исследованы микросхемы детекторов на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN. Проведенный подбор толщин и режимов напыления всех слоев, а также режимов формирования туннельного барьера позволил изготавливать многослойные структуры Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN с малыми токами утечки, пригодными для использования их в качестве детекторов рентгеновского излучения. Применение сверхпроводящих туннельных переходов с нижним титановым слоем позволило избежать удвоения сигнала в амплитудных спектрах, уменьшить уровень туннельных шумов, ослабить влияние граничных условий за счет уменьшения длины диффузии неравновесных квазичастиц.

Показано, что использование подслоя из Ti не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные туннельные переходы большой площади. Наилучшее энергетическое разрешение, измеренное в НИИЯФ МГУ для детектора площадью 6400 мкм<sup>2</sup>, составило 78 эВ при вкладе электронных шумов 50 эВ. Сигнал пассивного электрода в 8 раз меньше сигнала активного электрода.

## Глава 6. Новые методы формирования СИС переходов

Для реализации предельных параметров СИС приемников и их продвижения в область терагерцовых частот необходимы туннельные переходы, площадь которых существенно меньше  $0.5 \text{ мкм}^2$ . Это требует разработки принципиально новых методов формирования таких структур и оптимизации режимов их изготовления. Кроме того, для большинства перспективных применений нужны сложные многоэлементные микросхемы с малым разбросом параметров и воспроизводимыми характеристиками. Возможные решения этих задач рассматриваются в данной главе.

### 6.1 Концепция метода химико-механической полировки (CMP).

Изготовление СИС переходов площадью менее  $0.5 \text{ мкм}^2$  является одной из ключевых задач для получения предельных параметров квантовых смесителей в терагерцовой области частот (особенно при использовании переходов с высокой плотностью тока и, следовательно, малым удельным сопротивлением). Стандартная UV300 контактная фотолитография из-за своей ограниченной разрешающей способности не позволяет получать элементы менее  $0.5 \text{ мкм}$ . Для получения структур с хорошо воспроизводимыми субмикронными размерами становится обоснованно использование принципиально новых источников экспонирования, одним из которых является электронная литография. Другой проблемой при изготовлении СИС переходов субмикронных размеров является формирование электрического контакта верхнего замыкателя к туннельному переходу, который невозможно осуществить обычными методами взрывной литографии. Решение этой задачи возможно с помощью метода химико-механической полировки (CMP).

Впервые метод CMP при изготовлении субмикронных СИС переходов разработали на фирме IBM [79], а авторы [80, 93 - 96] усовершенствовали этот процесс для изготовления сверхпроводниковых приборов.

Смысл процесса химико-механической полировки состоит в следующем: 1) методом взрывной литографии формируется геометрия нижнего электрода и напыляется трехслойная структура; 2) травлением по маске из фоторезиста формируется СИС переход; 3) после удаления резиста на всю подложку осаждается слой диэлектрика; 4) с помощью установки для химико-механической полировки, диэлектрик сполировывается до уровня верхнего электрода, формируя тем самым электрический контакт к туннельному переходу; 5) методом взрывной литографии формируется топология замыкателя.

CMP полировка является высокоточным процессом, в процессе которого поверхность подложки обрабатывается химически активной средой и механическими частицами. Последние удаляют продукты химических реакций с микровыступов на обрабатываемой поверхности, что ускоряет их стравливание. Образец с помощью воска крепится на специальный держатель, который затем закрепляется в полировальной головке. Полировальный диск и полировальная головка могут совершать независимые друг от друга эллиптические вращения, скорости которых варьируются в пределах от 0 до 60-70 об./сек. Во время процесса происходит непрерывная подача полировального состава к трущимся поверхностям. Диск имеет специальные желоба для протекания раствора. Полировальный раствор содержит порошок из твердого материала (например, диоксид кварца или алмаз) с размерами частиц  $\sim 1 \div 10$  нм, а щелочная среда раствора ( $\text{pH} \sim 9 \div 11$ ) позволяет ему вступать в реакцию с поверхностью образца, на продукты реакции которой впоследствии воздействует

абразивный порошок. Во время движения поверхность диска, при взаимодействии с выступами на образце, деформируется, что создает область повышенного давления на неровности и способствует более высокой скорости планаризации неровностей, чем остальной поверхности. Тем самым создаются условия для получения равномерной поверхности образца в целом.

В наших исследованиях мы использовали установку “Allied TechPrep 8”. Схема установки для химико-механической полировки представлена на рис. 6.1

## **6.2 Формирование СИС переходов субмикронного размера методами СМР и электронно-лучевой литографии.**

Была разработана технология изготовления тестовых СИС переходов с использованием двухэтапного проведения процесса химико-механической полировки. Диаграмма, поясняющая процесс изготовления, представлена на рис. 6.2.

На первом этапе методом взрывной литографии формировалась трехслойная структура Nb/Al-AlN/NbN, толщины нижнего и верхнего электродов составляли 200 нм (рис. 6.2.1). Геометрия переходов с размерами от  $1 \text{ мкм}^2$  до  $0.03 \text{ мкм}^2$  формировалась с помощью электронно-лучевой литографии. Использовался электронный негативный резист SAL-601. Электронно-лучевая литография изготавливалась в МГУ. На рис. 6.3 представлены фотографии резистивных масок. Высокочастотное плазмо-химическое травление субмикронных переходов проводилось в подобранных оптимальных режимах: давление газа  $\text{CF}_4$  составляло  $7 \cdot 10^{-2}$  мбар, мощность 30 Вт, скорость травления  $3.6 \text{ \AA}/\text{сек}$ . Такое низкое давление рабочего газа выбрано специально для получения анизотропного травления. После травления маска из фоторезиста удалялась (рис. 6.2.2).

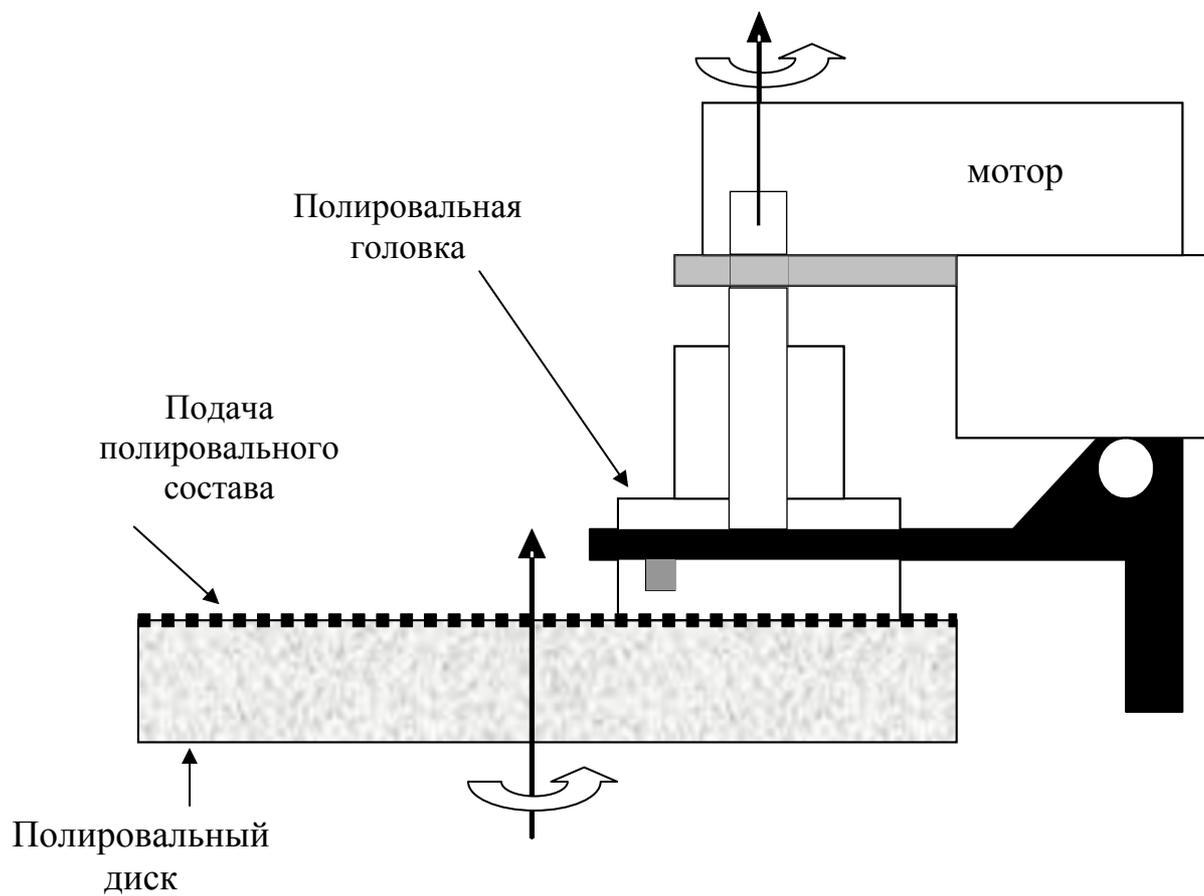


Рис. 6.1. Схема установки химико-механической полировки.

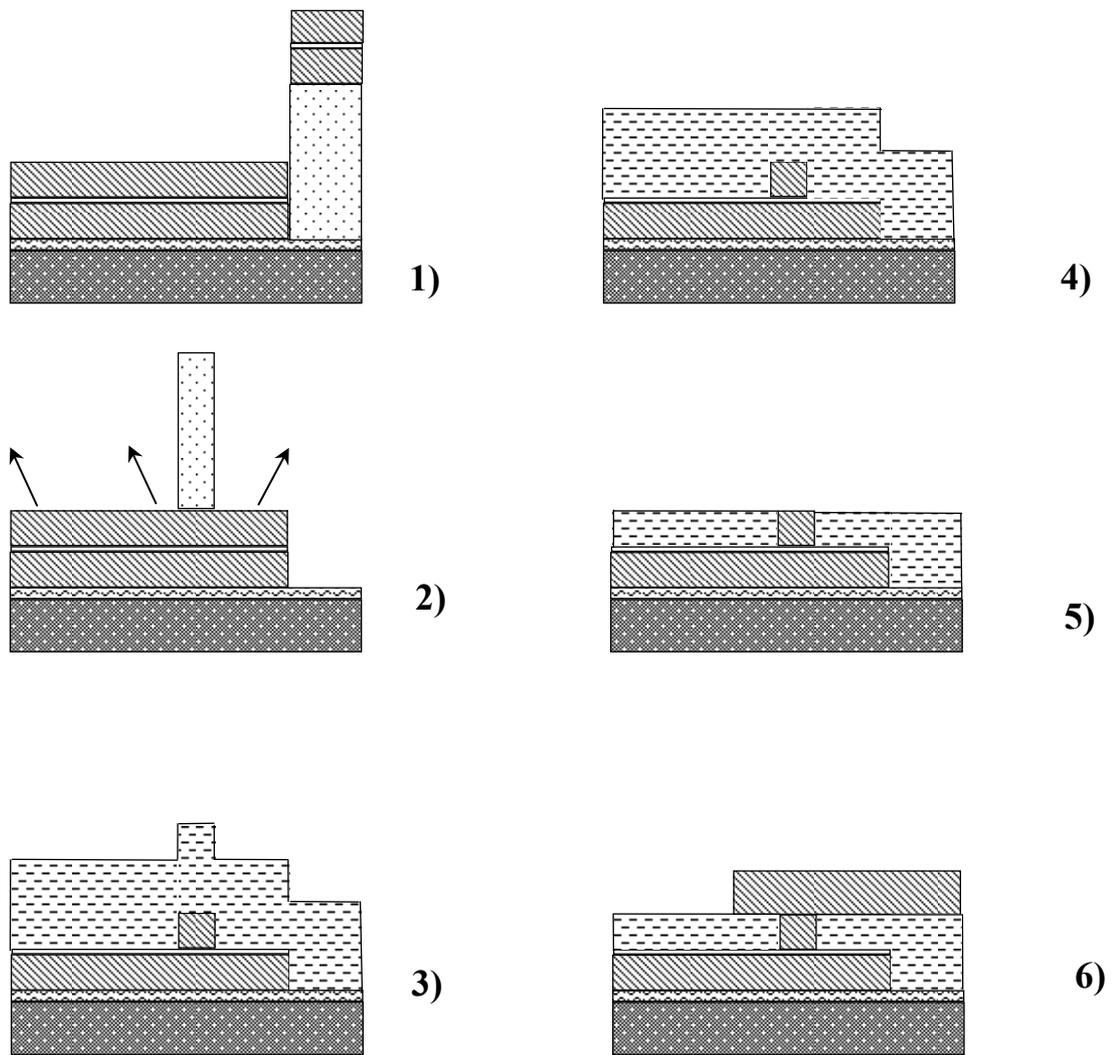


Рис 6.2. Диаграмма, поясняющая процесс изготовления СИС переходов методом CMP: 1) напыление трехслойной структуры; 2) формирование перехода с помощью RIE; 3) напыление изоляции; 4) первый этап CMP; 5) второй этап CMP; 6) формирование замыкателя из ниобия.

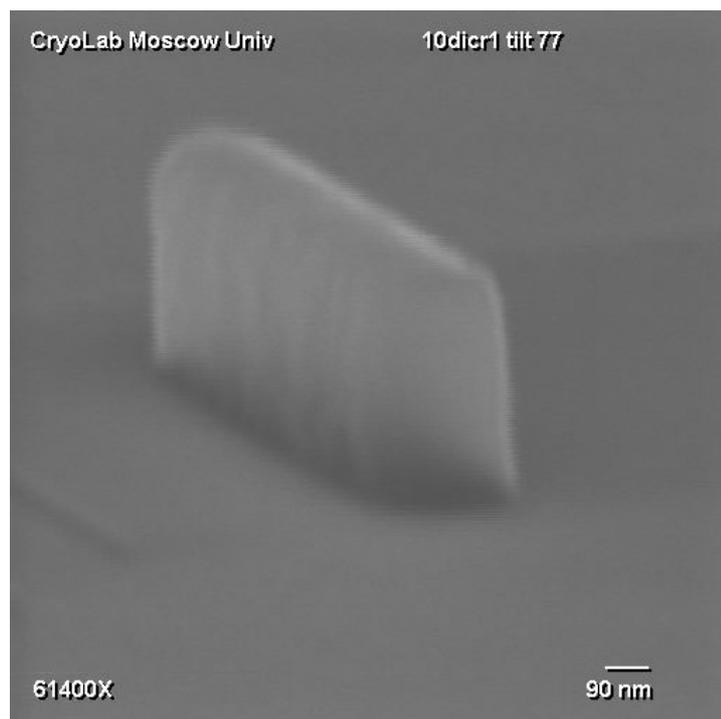
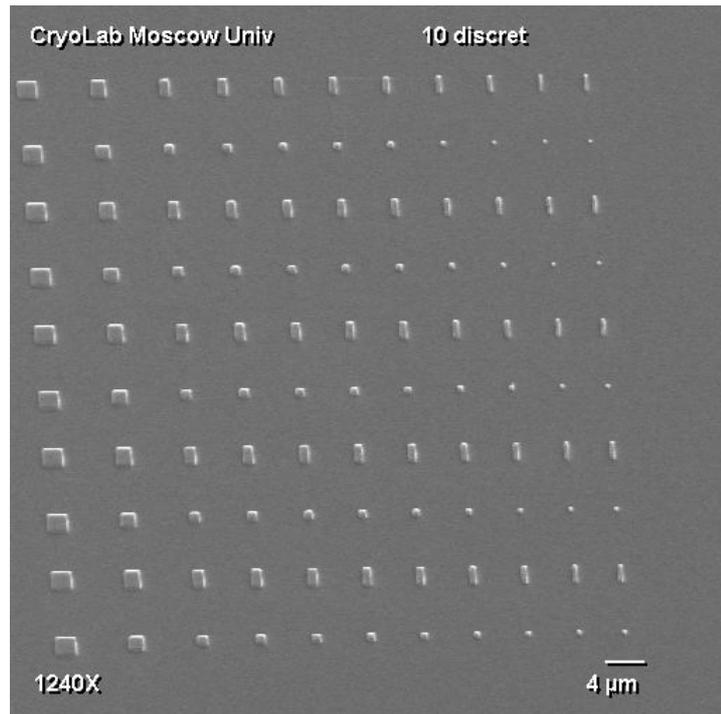


Рис. 6.3. Микрофотографии резистивных масок, изготовленных в МГУ с помощью электроннолучевой литографии.

Сформированная таким образом структура запылялась слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной не менее 400 нм (рис. 6.2.3). Процесс СМР проводился в два этапа: вначале с помощью жесткого шлифовального диска с частичками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  размером 0.3 мкм проводилось удаление слоя двуокиси кремния толщиной 200 нм в районе элементов с минимальным геометрическим размером (порядка 100 мкм и менее). Скорость удаления изоляции при этом составляла  $\sim 60$  нм/мин. Процесс окончания первого этапа СМР контролировался с помощью профилометра. Далее с помощью другого полировочного диска проводилось более медленное (скорость 10 нм/мин) удаление оставшейся пленки  $\text{SiO}_2$  с тем, чтобы достичь поверхности ниобия. Процесс окончания второго этапа СМР контролировался с помощью профилометра и визуально с помощью микроскопа. На последнем этапе методом взрывной литографией формировался замыкатель. Качество изготовленных СИС переходов оценивалось по их вольт-амперным характеристикам.

Экспериментально установлено, что на качество СИС переходов, изготовленных по такой технологии, влияет толщина изоляции. Были изготовлены тестовые структуры, в которых толщина напыленной пленки  $\text{SiO}_2$  варьировалась от 300 нм до 700 нм. Переходы хорошего качества получались только, если толщина изоляции была не менее 400 нм. Это можно объяснить возможными механическими повреждениями туннельного перехода во время первого этапа проведения СМР жестким полировочным диском. Установлено, что чем больше толщина пленки, остающаяся после первого этапа над поверхностью перехода, тем выше качество перехода. Но поскольку скорость стравливания при втором этапе СМР достаточно низкая, то оптимальной толщиной  $\text{SiO}_2$  можно считать 500-550 нм.

С помощью такой технологии были изготовлены переходы Nb/Al-AlN/Nb различного размера, с площадью вплоть до  $0.03 \text{ мкм}^2$  и плотностью тока до  $20 \text{ кА/см}^2$ . Вольт-амперная характеристика представлена на рис. 6.4.

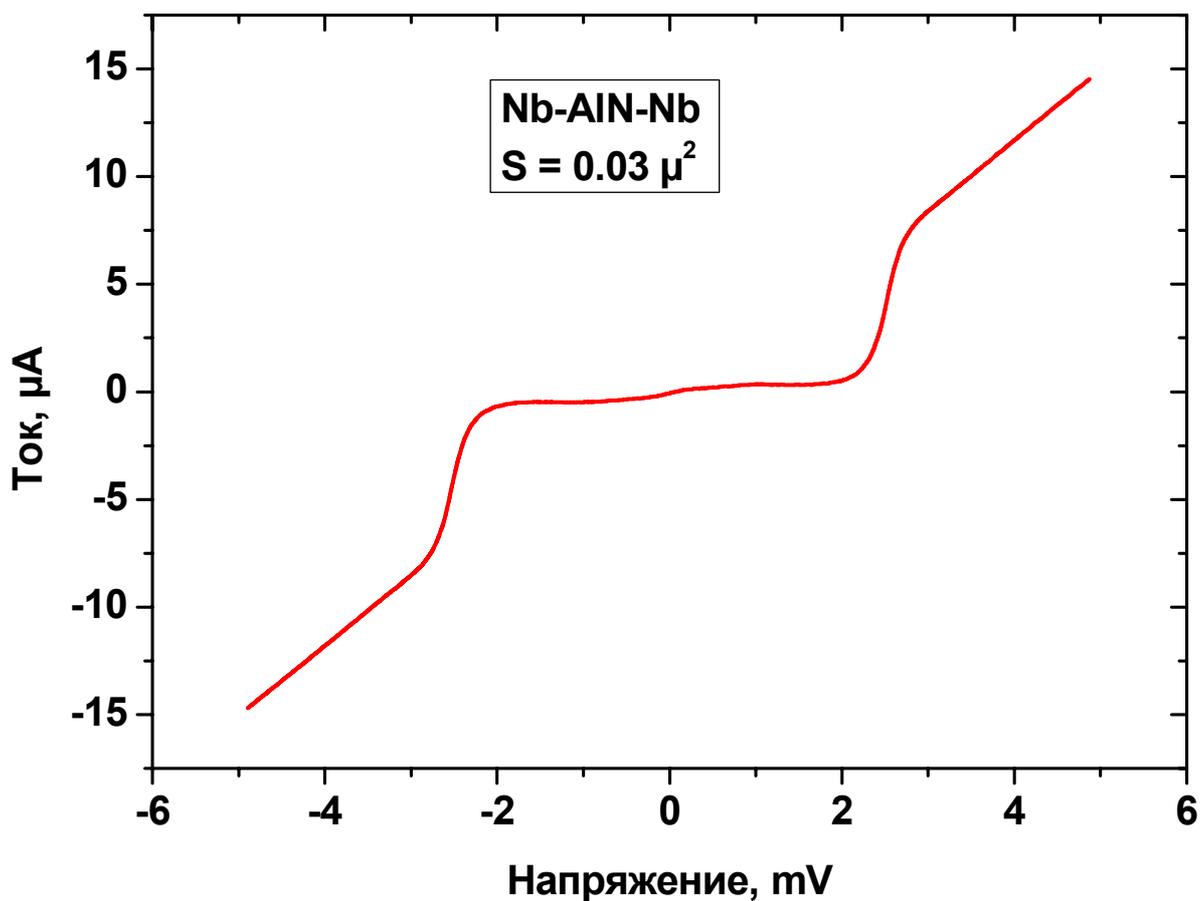


Рис. 6.4. Вольт-амперная характеристика СИС перехода на основе структуры Nb/Al-AlN/Nb, изготовленного методами СМР и электронно-лучевой литографии. Площадь перехода  $A = 0.03 \text{ мкм}^2$ ,  $R_j/R_n = 14$ ,  $R_n \cdot A = 10 \text{ } \Omega \text{ мкм}^2$  [A92].

### 6.3. Исследование способов формирования многоэлементных схем.

Устойчивый интерес, проявляемый к цепочкам джозефсоновских переходов в течение последних десятилетий, обусловлен, главным образом, двумя причинами: возможностью изготовления на их основе стандартов вольта [97, 98], а также перспективами создания криогенных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового излучения с возможностью перестройки частоты. В последнее время, однако, сфера научного и практического интереса к цепочкам джозефсоновских переходов значительно расширилась. Это связано как с развитием цифровой криогенной микроэлектроники на основе идеи Быстрой Одноквантовой Логики, где цепочки джозефсоновских переходов являются важнейшими схемными компонентами, так и с научным интересом к таким вопросам как индуцированные колебания джозефсоновской фазы в микроволновой области, квантование энергетических уровней, квантовые вычисления и др.

В самом общем виде цепочка джозефсоновских переходов представляет собой микросхему многих (вплоть до  $10^4$ ) последовательно-параллельных включенных джозефсоновских переходов и элементов электромагнитной связи. Для большинства вышперечисленных применений необходимо, чтобы джозефсоновские переходы имели планарный размер порядка 1 мкм и плотность критического тока выше  $10^3$  А/см<sup>2</sup>. Кроме того, разброс электрофизических параметров переходов: нормального сопротивления и критического тока не должен превышать 10 %. В совокупности это образует комплекс достаточно жестких требований к технологии изготовления цепочек джозефсоновских переходов: изготовление микросхем, содержащих от 100 до  $10^4$  переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронного и субмикронного размеров с высокой плотностью критического тока (вплоть до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>) с разбросом параметров менее 10%.

### 6.3.1 Технологический процесс изготовления джозефсоновских цепочек.

При изготовлении джозефсоновских цепочек использовались два технологических процесса, различающиеся способом формирования слоя изоляции трехслойной структуры. В одном из этих процессов изоляция формировалась с помощью метода химико-механической полировки, что в будущем может быть необходимо для изготовления цепочек, содержащих переходы субмикронных размеров.

Ниже перечислены основные технологические ступени изготовления джозефсоновских цепочек

1. Процесс с формированием изоляции методом взрыва:

- Осаждение трехслойной структуры Nb(200 нм)/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb(200 нм) с последующим взрывом для формирования нижнего электрода;
- Литография для формирования планарных размеров переходов (16, 8 и 3 мкм<sup>2</sup>) с последующим плазмохимическим травлением и анодизацией;
- Осаждение изоляционного слоя SiO<sub>2</sub> (450 нм) с последующим взрывом;
- Осаждение верхнего электрода из Nb (600 нм) и формирование его топологии методом взрыва.

2. Процесс с формированием изоляции методом химико-механической полировки:

- Осаждение трехслойной структуры Nb(200 нм)/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb(200 нм) с последующим взрывом для формирования нижнего электрода;
- Литография для формирования планарных размеров переходов (16, 8 и 3 мкм<sup>2</sup>) с последующим плазмохимическим травлением;
- Осаждение изоляционного слоя SiO<sub>2</sub> (600 нм) с последующей двухстадийной химико-механической полировкой;

- Осаждение верхнего электрода из Nb(600 нм) и формирование его топологии методом взрыва.

При разработке технологии изготовления джозефсоновских структур средней степени интеграции моделью послужили цепочки переходов. Для изготовления цепочек специально был создан фотолитографический шаблон, содержащий 24 чипа с количеством переходов в цепочках от 10 до 1000 шт. Изготовление образцов происходило на кремниевой монокристаллической подложке имеющей форму квадрата со стороной 24 мм.

Результаты измерений представлены на рис. 6.5 - 6.8. Из рисунка видно, что измеренные характеристики очень высокого качества с отношением  $R_j/R_n$  порядка 25, разброс параметров в смысле среднеквадратичного отклонения не превышает 2% для  $n = 100$  и 3.5% для  $n = 1000$ .

Надо отметить, что для изготовления цепочек с помощью метода СМР требуется изготовление специальных масок. Известно, скорость и равномерность планаризации существенным образом зависят от геометрии и размера слоев, на которых располагаются переходы [95]. В нашем фотошаблоне размеры нижнего электрода не превышают 30 мкм, а на расстоянии в 90 мкм расположен уже участок размером в 500 мкм, который полностью «экранирует» первые пять переходов цепочек. По этой причине планаризация происходит неравномерно. При правильном выборе топологии схем возможно дальнейшее уменьшение разброса параметров многоэлементных схем.

Таким образом, нами была экспериментально продемонстрирована возможность изготовления схем средней степени интеграции с достаточно малым разбросом параметром, достаточным для большинства практических приложений.

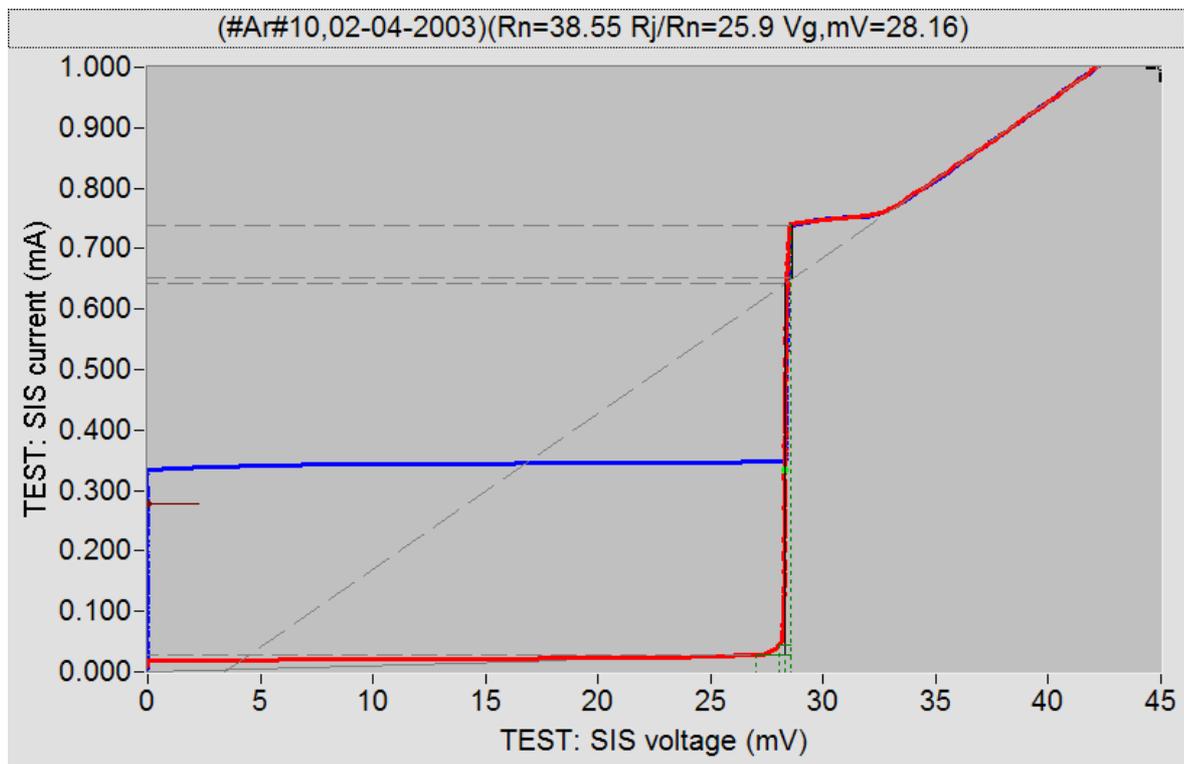


Рис. 6.5 ВАХ цепочки, состоящей из 10 СИС переходов площадью  $8 \text{ мкм}^2$  и плотностью тока  $5 \text{ кА/см}^2$ .

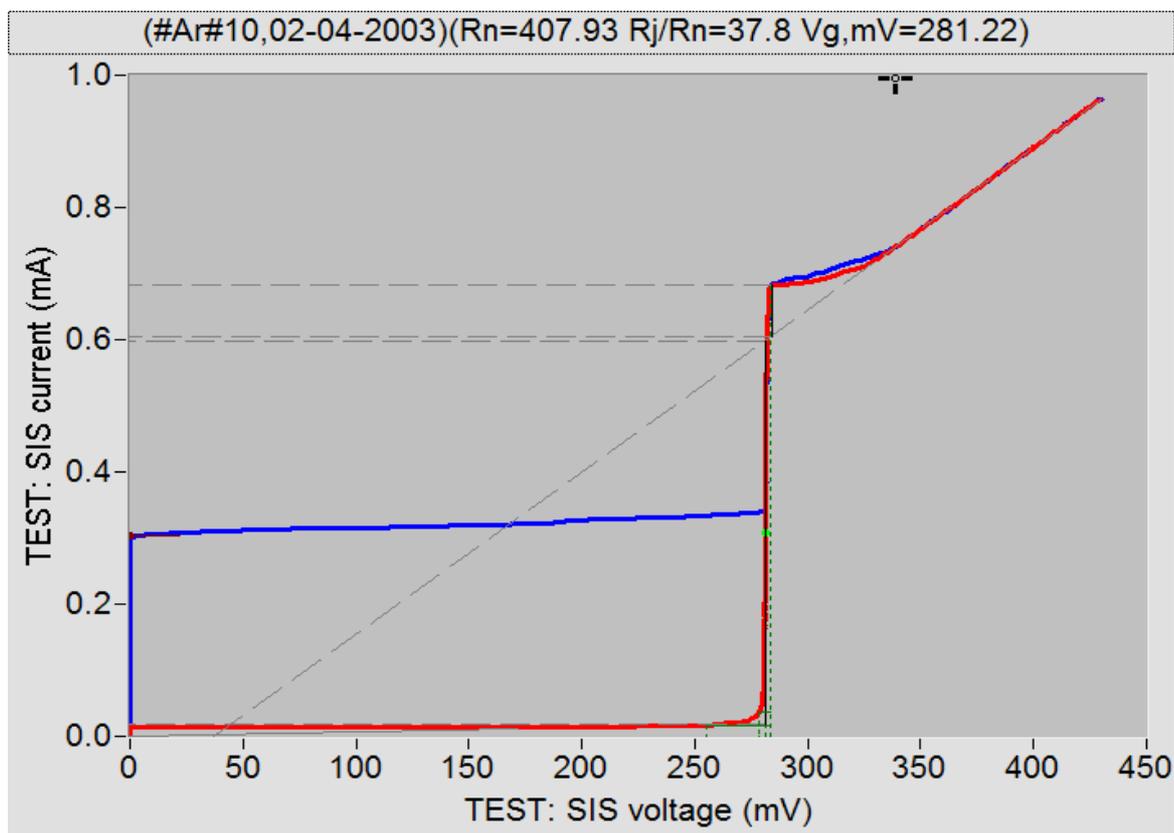


Рис. 6.6 ВАХ цепочки, состоящей из 100 СИС переходов площадью  $8 \text{ мкм}^2$  и плотностью тока  $5 \text{ кА/см}^2$ .

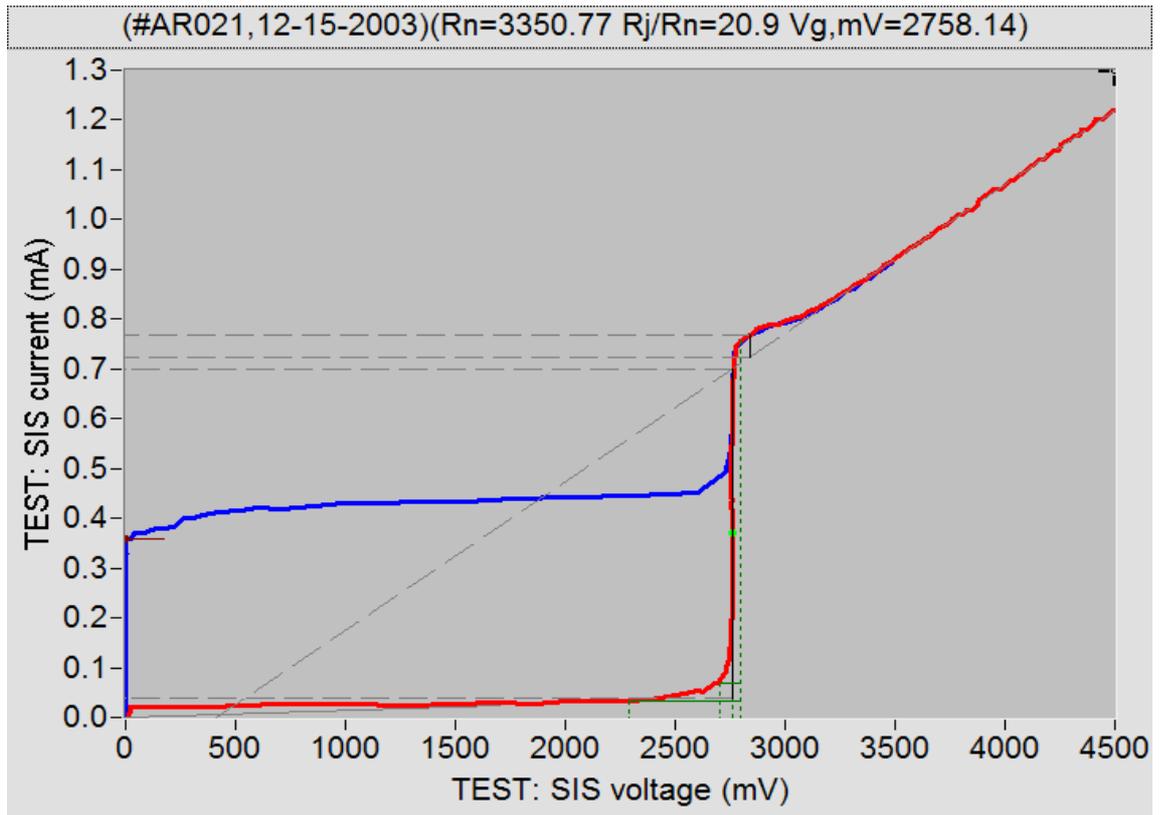


Рис. 6.7 ВАХ цепочки, состоящей из 1000 СИС переходов площадью  $8 \text{ мкм}^2$  и плотностью тока  $5 \text{ кА/см}^2$ .

#### **6.4 Выводы по главе 6.**

Разработаны новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе

С помощью методов электроннолучевой литографии (EBL) и химико-механической полировки (CMP) изготовлены и измерены туннельные переходы с площадью перехода вплоть до  $0.03 \text{ мкм}^2$  и  $R_j/R_n > 10$

Исследованы способы формирования многоэлементных схем средней степени интеграции с числом элементов до 1000. Показано, что с помощью разработанного автором технологического процесса возможно изготовление цепочек туннельных переходов с разбросом основных параметров не превышающих 2% для  $n = 100$  и 3.5% для  $n = 1000$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты.

1. Проведено исследование по оптимизации технологии изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb микронного размера. Найдены условия, при которых механические напряжения в пленках Nb минимальны; изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода)  $R_j/R_n > 40$ . Использование изготовленных автором приемных структур позволило получить шумовую температуру приемника 70 К на частоте 100 ГГц. Разработана технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках для использования их в волноводных смесителях, что позволило создать серию малошумящих приемников, успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия).

2. Создана технология изготовления СИС переходов субмикронного размера для многослойных СВЧ микросхем, работающих в диапазоне частот 100-700 ГГц. Данная технология позволяет получать СИС переходы с плотностью тока до  $10 \text{ кА/см}^2$ , размытием щелевой особенности  $\delta V_g < 150 \text{ мкВ}$  и разбросом параметров по подложке порядка 10 %. Впервые изготовлена микросхема сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), объединяющая в себе СИС смеситель с квазиоптической антенной и сверхпроводящий генератор на потоке джозефсоновских вихрей, шумовая температура которого на частоте 480 - 520 ГГц составила 100 К. Разработана технология изготовления микросхем интегрального приемника, позволяющая объединять структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

3. Разработана технология изготовления интегральных сверхпроводниковых СВЧ микросхем на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN. Микросхема сверхпроводникового интегрального спектрометра субмиллиметровых волн представляет собой однокристалльную СВЧ микросхему СИП, в которую для фазовой синхронизации частоты

гетеродина включен гармонический смеситель. Были изготовлены и исследованы микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника реализована шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Первый тестовый полет проведен в июне 2008 г. на полигоне Терезина в Бразилии.

4. Предложена конструкция и оптимизирована технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры  $Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN$  с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. Показано, что использование подслоя из  $Ti$  не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади с параметром качества  $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$  (при  $T = 1.3 \text{ K}$ ). Наилучшее энергетическое разрешение, измеренное в НИИЯФ МГУ для детектора площадью  $6400 \text{ мкм}^2$ , составило 78 эВ при вкладе электронных шумов 50 эВ. Сигнал пассивного электрода в 8 раз меньше сигнала активного электрода.

5. Разработаны новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе. С помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки изготовлены и измерены туннельные переходы с площадью перехода вплоть до  $0.03 \text{ мкм}^2$  и  $R_j/R_n > 10$ . Исследованы способы формирования многоэлементных схем средней степени интеграции с числом элементов до 1000. Показано, что с помощью разработанного автором технологического процесса возможно изготовление цепочек туннельных переходов с разбросом основных параметров не превышающих 2% для  $n = 100$  и 3.5% для  $n = 1000$

## Публикации по теме диссертационной работы

- [A1] Ermakov An. B., Koshelets V.P., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shitov S.V., Vystavkin A.N. SNAP structures with Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb junctions for MM wave receivers // IEEE Trans on Magn. 1989. V. MAG-25, No. 2. P. 1060 - 1063.
- [A2] Журавлев Ю.Е., Кошелец В.П., Матлашов А.Н., Серпученко И.Л., Филиппенко Л.В. Интегральный ПТ-СКВИД с предусилителем на основе дополнительного ПТ-СКВИДа. // ЖТФ.-1990. Т. 60, В. 9.
- [A3] Belitsky V.Yu., Filippenko L.V., Koshelets V.P., Serpuchenko I. L., Tarasov M.A., Shitov S.V. Superconducting tunnel junction noise generator and SIS mixer noise measurements // Proc. 20th European Microwave Conference. 1990. V. 1. P. 816 - 820.
- [A4] Filippenko L.V., Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Koshelets V.P., Likharev K.K., Mukhanov O.A., Rylov S.V., Semenov V.K., Vystavkin A.N. Experimental Implementation of Analog - to - Digital Converter Based on Reversible Ripple Counter. // IEEE Trans on Magn., V. MAG-27, No.2, pp. 2464 - 2467, (1991).
- [A5] Matlashov A.N., Koshelets V.P., Zhuravlev Yu.E., Kalashnikov R.V., Kovtonyuk S.A., Filippenko L.V. High Sensitive Magnetometers and Gradiometers with Flux Focusers. // IEEE Trans on Magn., V. MAG-27, No.2, pp. 2963 - 2966, (1991).
- [A6] Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shchukin A.V. High Quality Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb Tunnel Junctions for microwave and SFQ Logic Devices // IEEE Trans on Magn., V. MAG-27, No.2, pp. 3141 - 3144, (1991).
- [A7] Babayan G.E., Filippenko L.V., Ovsyannikov G.A., Uvarov O.B., Koshelets V.P. Fabrication and Properties of Superconducting Double-Barrier Structures. // Super. Sci. Technology. v.4, p. 476-478, (1991).

- [A8] Tarasov M.A., Belitsky V.Yu., Prokopenko G.V., Filippenko L.V., Koshelets V.P. DC SQUID RF Amplifier with External MM-wave Pumping and Its Testing by SIS Junction Noise // Super. Sci. Technology. v.4, pp. 644-646, (1991).
- [A9] Belitsky V.Y., Tarasov M.A., Kovtonjuk S.A., Filippenko L.V., Kaplunenko O.V. Low Noise Completely Quasioptical SIS Receiver for Radioastronomy at 115 GHz.// 21st European Microwave conference Digest, September 1991.
- [A10] Ermakov An.B., Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shchukin A.V. High Quality Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb Tunnel Junctions for Microwave Receivers and Digital SFQ Devices // Superconductivity: Physics, Chemistry, Technique (In Russian), V. 4, No 10, pp 2034 -2033, (1991).
- [A11] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Superconducting Millimeter wave Oscillators // ICEC/ICMC, Report EC-D3, Kiev-92, 1992.// Cryogenics, V.32, pp. 501-504, (1992).
- [A12] Vystavkin A.N., Tarasov M.A., Koshelets V.P., Shitov S.V., Belitsky V.Yu., Kovtonjuk S.A., Kaplunenko O.V., Prokopenko G.V., Filippenko L.V., Shchukin A.V., Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Turygin S.Yu. SIS Junction mm Wave Receivers // Proceedings of 22-nd European Microwave Conference, Helsinki, Finland, pp.981-986, (1992).
- [A13] Goldobin E.V., Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Filippenko L.V. Wide Frequency Band Sampling System to Test RSFQ Logic // ICEC/ICMC, Report EC-DP11, Kiev-92, ICEC Supplement, Cryogenics, vol.92, pp.549-552, (1992).
- [A14] В.Ю. Белицкий, М.А. Тарасов, С.А. Ковтонюк, Л.В. Филиппенко. Малозумящий квазиоптический приемник на основе туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», том 37, стр. 1311-1315, (1992).

- [A15] Belitsky V.Y., Tarasov M.A., Kovtonjuk S.A., Filippenko L.V., Kaplunenko O.V. Low Noise Completely Quasioptical SIS Receiver for Radioastronomy at 115 GHz // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, v. 13, 4, pp. 389-395, (1992).
- [A16] Kovtonjuk S.A., Belitsky V.Y., Tarasov M.A., Filippenko L.V., Kaplunenko O.V., Ermakov An.B., Kollberg E.A., Lindström C.-O., Jacobsson S.W. Vertically Integrated SIS Array for MM Wave Mixers // International Symposium on Signals, Systems and Electronics, Paris, France, Proc. Pp. 93-95, September 1-4, (1992).
- [A17] A. Vystavkin, M. Tarasov, V. Koshelets, S. Shitov, V. Belitsky, S. Kovtonjuk, O. Kaplunenko, G. Prokopenko, L. Filippenko, V. Kuplunenko, M. Khabipov, S. Turigin. SIS Junction MM Wave Receivers // Proc. of Int. Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Technol., Beijing, China, Aug. 17-21, pp. 43-45, (1992).
- [A18] Jacobsson S.W., Belitsky V., Filippenko L.V., Kovtonjuk S.A., Koshelets V.P., Kollberg E.L. Quasi-optical 0.5 TGz SIS Reciever with Twin Junctions Tuning Circuit. // The 18<sup>th</sup> Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Univ. of Essex, UK, Vol. SPIE 2104, pp. 267-268, 1993.
- [A19] Shitov S.V., Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Schaeffer H.H.A., Stadt, van de H., Graauw de M.W.M. Quasioptical SIS array mixer of series RF/parallel IF design: toward THz frequency // Proc. EUCAS'93. 4-8 October (1993), Goettingen, Germany.
- [A20] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Fisher G. M., and Mygind J. Variable microwave SIS attenuator // Presented at Internetal Superconducting Electronics Conference ISEC'93, Boulder, Colorado, USA, August (1993).
- [A21] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Fisher G.M., Mygind J. Superconducting mm wave attenuator // Proc. Low-Temperature Conf. (LT-20), USA, 1993.

- [A22] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Fisher G. M., Mygind J. Josephson tunnel junction attenuator // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63, No. 23. P. 3218-3220.
- [A23] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V., Fisher G. M., Mygind J. Integrated flux-flow oscillators for submillimeter wave receivers // Presented at Low Temperature Conference LT-20, Eugene, Oregon, USA, August (1993), Physica B, V. 194-196, pp. 81-82, (1994).
- [A24] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Superconducting millimeter wave oscillators and SIS mixers integrated on a chip // IEEE Trans. on Appl. Supercond. V. 3, No. 1. P. 2524-2527, (1993).
- [A25] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Integrated SIS Receiver with Superconducting Local Oscillator. // Superconductivity: Physics, Chemistry, Technique (In Russian), V. 6, No 3, pp 651 - 660, (1993).
- [A26] Belitsky V.Yu., Jacobsson S.V., Filippenko L.V., Kovtonjuk S.A., Koshelets V.P., Kollberg E.L. 0.5 THz SIS Receiver with Twin Junctions Tuning Circuit // Proc. 4<sup>th</sup> Space Terahertz Technology Conference, p.538, March 30 – April 1, Los Angeles, USA, (1993).
- [A27] Belitsky V.Yu., Jacobsson S.V., Filippenko L.V., Kovtonjuk S.A., Koshelets V.P., Kollberg E.L. Low Noise Quasioptical SIS Receiver for 450-520 GHz Band // XXV Russian national Conf. on Radioastronomy, Russia, Pushkino, Sept. 20-24, Conf. Proc. pp. 87-89, (1993).
- [A28] V.Yu. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, S.A. Kovtonjuk, V.P. Koshelets, E.L. Kolberg. Quasi-optical 0.5 THz SIS Receiver with Twin Junction Tuning Circuit // presented at 18<sup>th</sup> Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, Univ. of Essex, UK, vol. SPIE 2104, pp. 267-268, (1993).
- [A29] G.A. Ovsyannikov, M.A. Kokoulin, L.V. Filippenko, M.A. Tarasov. The arrays of short-range interacting Josephson junctions. // 4 Int. Supercond. Electron. Conf., Aug. 11-14, 1993, Boulder, CO, USA, pp. 363-364.

- [A30] M.A. Tarasov, G.V. Prokopenko, S.W. Jacobsson, V.P. Koshelets, S.A. Kovtonjuk, C. Holmstedt, L.V. Filippenko, I.L. Serpuchenko, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin, E.L. Kollberg. Experimental studies of Josephson mixing in SIS junctions with 500 GHz band local oscillator. // 3 Int. Conf. on MM-Wave and Far Infrared Science and Technol., Aug. 22-26, 1994, pp. 149-152.
- [A31] A. Vystavkin, M. Tarasov, G. Prokopenko, S. Shitov, S. Jacobsson, V. Koshelets, S. Kovtonjuk, C. Holmstedt, L. Filippenko, I. Lapitskaya, E. Kollberg. Studies of Josephson mixing in SIS junctions.// 24 European Microwave Conf., 5-8 Sept., 1994, pp. 1949-1954
- [A32] Shitov S.V., Koshelets V.P., Shchukin A.V., Baryshev A.M., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V., Graauw, de Th., Mees J., Schaeffer H., Stadt, van de H. Experimental study of a superconducting integrated receiver at submillimeter wavelengths // Proc. 19-th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Sendai, Japan, 17- 20 October 1994. P. 122-123.
- [A33] M.A. Tarasov, G.V. Prokopenko, G.A. Ovsyannikov, I.L. Serpuchenko, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, O.Yu. Polyanski, A.N. Vystavkin. Quasioptical Josephson Direct Detectors for MM-Wave Spectrum Analysis // Proceedings of International Conference on Millimeter and Submillimeter Waves and Applications, San Diego, USA, p.220-228, vol. 2211, (1994).
- [A34] М.А. Тарасов, Г.В. Прокопенко, С.В. Якобссон, В.П. Кошелец, С.А. Ковтонюк, К.Н. Холмстедт, Л.В. Филиппенко, И.Л. Серпученко, С.В. Шитов, А.Н. Выставкин, Э.Л. Колберг. Преобразование на джозефсоновской нелинейности и шумы в СИС смесителе на 500 ГГц // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», № 12, стр. 2090-2102, (1994).
- [A35] G.A. Ovsyannikov, K.V. Pobydsey, L.V. Filippenko. Nonequilibrium Phenomena in Superconducting Double-Barrier Structure Nb/Nb'/Nb // Physica B 194-196, North-Holland, pp. 2397-2398, (1994).
- [A36] M. Tarasov, G. Prokopenko, L. Filippenko, I. Lapitskaya, A. Vystavkin. Noise of Josephson conversion near Shapiro steps in SIS junctions. // 7-th Vilnius

Conf. on Fluct. Phenom. In Phys. Syst., Oct. 4-7, 1994, Palanga, Lithuania, p.63.

- [A37] Mygind J., Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Flux flow Josephson oscillators for submillimeter receivers // Superconductivity and Superconducting Materials Technologies (Invited, P. Vincenzini, editor). Techna Srl, P. 735-743, (1995).
- [A38] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Lapitskaya I.L., Mygind J. Integrated flux flow oscillators for sub-mm wave receivers. // Nonlinear Superconducting Devices and High-Tc Materials. World Scientific Publishing Co., P. 383-401, (1995).
- [A39] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, H. van de Stadt, J. Mess, H. Schaeffer, T. de Graauw. Integrated Sub-MM Wave Receivers // IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, pp. 3057-3060,(1995).
- [A40] Shitov S.V., Koshelets V.P. , Lapitskaya I.L., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Graauw, de Th., Schaeffer H., Stadt, van de H., Luinge W. A superconducting planar integrated receiver for the frequency range 430-480 GHz // Proc. 6 Int. Symp. Space THz Technol. Caltech, Pasadena, USA, March 1995. P. 324-337.
- [A41] Koshelets V.P., Shitov S.V., Baryshev A.M., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Graauw de T., Luinge W., Stadt, van de H., Schaeffer H., and Mygind J. First implementation of the fully superconducting 500 GHz receiver with integrated flux-flow oscillator // Applied Superconductivity 1995. Institute of Physics Conf. Series (Bristol and Philadelphia), IOP Publishing Ltd., 1995. No. 148. P. 731-736.
- [A42] A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, T. de Graauw, W. Luinge, H. van de Stadt, H. Schaeffer. A Fully Superconducting 500 GHz Receiver with Integrated Flux-Flow Oscillator // presented at ISEC'95, Nagoya, Japan, September 18-21, 1995, report 10-39, pp. 419-421, (1995).
- [A43] M.A. Tarasov, G.V. Prokopenko, V.P. Koshelets, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko. Integrated rf Amplifier Based on dc SQUID // presented on

- ASC-94, Boston, USA, report EUA-5, (1994). IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, pp. 3226-3229 (June 1995).
- [A44] V.Yu. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, C. Holmstedt, V.P. Koshelets, E. Kollberg. Fourier Transform Spectrometer Studies (300-1000 GHz) of Nb-Based Quasi-Optical SIS Detectors // IEEE Trans on Appl Supercond., Vol. 5, No. 3, pp. 3445-33451 (September 1995).
- [A45] A.V. Shchukin, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, and J. Mygind Linewidth of the Flux Flow Oscillators for Sub-mm Wave Receivers // presented at ISEC'95, Nagoya, Japan, September 18-21, 1995, report 10-38, pp. 416-418, (1995).
- [A46] S.V. Shitov, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, H. Golstein, T. de Graauw, W. Luinge, H. Schaeffer, H. van de Stadt. Recent Development of Integrated Receiver for Submm Applications // Extended Abstracts of XX International Conference on Infrared and Mm Waves. Orlando, Florida, December 11-15, (1995)
- [A47] V.Yu. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, E.L. Kolberg. Teoretical and Experimental Studies of Nb-based Tuning Circuits for THz SIS Mixers // 6th Space Terahertz Technology Symposium, March 21-23, Caltech, Pasadena USA, Conferece Proc., pp. 87-102, (1995).
- [A48] Belitsky V. Yu., Filippenko L.V., Jacobsson S.W., Kollberg E.L. Broad Band Twin Junction Tuning Circuit for Submillimeter SIS Mixer // Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 10, N.2, pp. 74-78, October5, (1995).
- [A49] M. Tarasov, L. Filippenko, A. Baryshev, A. Vystavkin, T.de Graauw, W. Luinge. Experimental studies of SQUID amplifier at 1 GHz with SIS mixer as a source of signal. // EUCAS'95, 3-6 July 1995, Edinburgh, Scotland., pp. 763-768
- [A50] M. Tarasov, V. Vystavkin, L. Filippenko. Performance margins and application area of SQUID amplifiers. // 25 European Microwave Conf., Bologna, Italy, 4-8 Sept. 1995, pp. 1118-1122.

- [A51] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Golstein H., Graauw de T., Luinge W., Schaeffer H., Stadt, van de H. First implementation of a superconducting integrated receiver at 450 GHz // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68 (9). P. 1273-1275.
- [A52] Shitov S.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Graauw, de Th., Gao J.-R., Luinge W., Stadt, van de H., Whyborn N. D., Lehikoinen P. Development of a superconducting integrated receiver for application in imaging arrays // Proc. of 7th Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville, Univ. of Virginia, March 1996. P. 417-425.
- [A53] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Graauw, de Th., Luinge W., Golstein H., Schaeffer H., Stadt, van de H. Integrated submm wave receivers with superconducting local oscillator // Proc. XXV General Assembly URSI. Lille, France, September 1996.
- [A54] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Graauw, de Th., Luinge W., Golstein H., Schaeffer H., Stadt, van de H., Gao J.-R. Integrated submillimetre heterodyne receivers // Proc. 30th ESLAB Symp. ESTEC, the Netherlands, September 1996. V. ESA SP-388. P. 193-202.
- [A55] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Mygind J. Linewidth of submillimeter wave flux flow oscillators // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 699-701.
- [A56] М.А. Тарасов, З.Г. Иванов, Л.В. Филиппенко, А.Н. Выставкин. Механизм подавления шумов в сверхпроводниковом квантовом интерференционном усилителе. // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», том 41, № 11, с. 1398-1405, 1996
- [A57] V.Yu. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, E. Kollberg, A.N. Vystavkin. Wide-band 500 GHz SIS receiver // Radiotechnika & Electronica" (In Russian) Vol. 41, No 1, pp. 123-128, (1996).
- [A58] V. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, An.B. Ermakov, E.L. Kollberg and A.N. Vystavkin. Broadband laboratory receiver for 500 GHz

based on quasioptical SIS mixer. // "Radioengineering and Electronics" (in Russian), vol. 41, No. 1, pp. 123-128, 1996.

- [A59] A. Vystavkin, M. Tarasov, V. Kaplunenko, L. Filippenko, I. Abramova. 600 GHz superconducting receiver integrated circuit comprising log-periodic antenna, SIS mixer and SQUID array local oscillator. // Int. Conf. on MM&Submm Waves and Appl., Denver, CO, 5-8 Aug., 1996, pp. 84-85.
- [A60] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., and Mygind J. Linewidth of frequency locked flux flow oscillators for sub-mm wave receivers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 2905-2908.
- [A61] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Luinge W., Golstein H., Stadt, van de H., Gao J.R., Graauw, de Th. An integrated 500 GHz receiver with superconducting local oscillator // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 3589-3592.
- [A62] Shitov S.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Luinge W., Gao J.- R., Lehikoinen P. Recent progress of a submillimeter superconducting integrated receiver for imaging applications // Proc. ESA Symp. "The Far Infrared and Submillimetre Universe". 1997. V. ESA SP-401. P. 433-436.
- [A63] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Ermakov A.B., Luinge W., Gao J.R., Lehikoinen P. Integrated submm wave receivers with superconducting local oscillator // Proc. EUCAS'97. 30 June - 3 July 1997, the Netherlands. Report 4Pa-6. Inst. of Phys. Conf. Ser. Number 158, pp 389-392, (1997).
- [A64] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Mygind J., Ustinov A.V. Self-pumping effects and radiation linewidth of Josephson flux-flow oscillators // Phys. Rev. B. 1997. V. 56, No. 9. P. 5572-5577.
- [A65] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Shchukin A.V., Prokopenko G.V., Ermakov A.B. Integrated submm wave receiver with superconductive local oscillator // Proc. X Trilateral German-Russian-Ukrainian seminar on HT<sub>c</sub>S. N. Novgorod, 11-15 Sept. 1997. P. 83.

- [A66] Shitov S.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Gao J.-R., Golstein H., Graauw, de Th., Luinge W., Stadt, van de H., Whyborn N. D., Lehikoinen P. Study of a quasioptical superconducting integrated receivers for imaging applications at 400-700 GHz // Proc. 8 Int. Symp. Space Terahertz Technol. Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, March 1997. P. 281-290.
- [A67] Shitov S.V., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Koshelets V.P. Luinge W., Baryshev A.M., Gao J.-R., Lehikoinen P. Recent progress on the superconducting imaging receiver at 500 GHz // Proc. 9 Int. Symp. Space Terahertz Technol. 1998.
- [A68] N. Martucciello, J. Mygind, V.P. Koshelets, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, R. Monaco. Fluxon Dynamics in Long Annular Josephson Tunnel Junctions // Phys. Rev. B, vol **57**, No 9, pp. 5444-5449, (1998).
- [A69] Shitov S.V., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Luinge W., Gao J.-R. Superconducting chip receivers for imaging application // IEEE Trans. Appl. Supercond, V. 9, P. 3773-3776, (1999).
- [A70] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Vaks V.L., Mygind J., Baryshev A.B., Luinge W., Golstein H. Flux-flow oscillators for sub-mm wave integrated receivers.// IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9. P. 4133-4136.
- [A71] Mygind J., Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Vaks V.L., Baryshev A.M., Luinge W., Whyborn N. External Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillator // Extended Abstracts of ISEC'99. Berkeley, CA, USA, June 1999. P. 83-85.
- [A72] Mygind J., Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Vaks V.L., Baryshev A.B., Luinge W., Whyborn N. Josephson flux flow oscillators; 1 Hz phase locking at 270-440 GHz.// Proc. Danish Physical Society Annual Meeting. Nyborg Strand, Denmark, 1999. P. 41.
- [A73] Mygind J., Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Vaks V.L., Baryshev A.B. Linewidth and phase locking of Josephson flux flow oscillators

// Proc. of Vortex Matter in Superconductors at Extreme Scales and Conditions (Vortex'99). Crete, Greece, 1999.

- [A74] Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Vaks V.L., Baryshev A.M., Luinge W., and Mygind J. Superconducting integrated submm wave receivers // Proc. 24th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (IR&MMW'99). September 5-10, Monterey, CA, USA, 1999.
- [A75] Baryshev A.M., Yulin A.V., Kurin V.V., Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Dmitriev P.N., Filippenko L.V. Cherenkov flux-flow oscillators: output power and linewidth // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1999. V. 9, No. 2. P. 3737-3740.
- [A76] Shitov S.V., Koshelets V.P., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Baryshev A.M., Luinge W., Gao J.-R. Concept of a superconducting integrated receiver with phase-lock loop // Proc. 10-th Int. Symp. Space Terahertz Techn., Charlottesville, Univ. of Virginia, March 1999, P.447-458.
- [A77] J. Mygind, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn. Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillators // Supercond. Sci. Technol, **vol. 12**, pp. 720-722, (1999).
- [A78] A.M. Baryshev, A.V. Julin, V.V. Kurin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko. Forward and Backward Wave in Cherenkov Flux-Flow Oscillators // Supercond. Sci. Technol, **vol. 12**, pp. 967-969, (1999).
- [A79] M.A. Nordahn, M.H. Manscher, J. Mygind and L.V. Filippenko. Experimental Observation of Subharmonic Gap Structures in Long Josephson Junction // Supercond. Sci. Technol, **vol. 12**, pp. 963-966, (1999).
- [A80] Shitov S.V., Koshelets V.P., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Vaks V.L., Baryshev A.M., Luinge W., Whyborn N.D., Gao J.-R. A superconducting integrated receiver with phase-lock loop // IOP Conf. Ser. 2000. No. 167, V. 2. P. 647-650, (2000).

- [A81] Koshelets V.P., Baryshev A.M., Mygind J., Vaks V.L., Shitov S.V., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Luinge W., Whyborn N. Externally phase locked sub-mm flux flow oscillator for integrated receiver // IOP Conf. Ser. 2000. No. 167, V. 2. P. 713-716.
- [A82] Koshelets V.P., Ermakov A.B., Shitov S.V., Dmitriev P.N., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Luinge W., Mygind J., Vaks V.L., Pavel'ev D.G. Externally phase locked sub-mm wave flux flow oscillator for integrated receiver // Proc. 11 Int. Symp. Space Terahertz Technol. Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1-3 May 2000. P. 532-541.
- [A83] Shitov S.V., Shtanyuk A.M., Koshelets V.P., Prokopenko G.V., Filippenko L.V., Ermakov An.B., Levitchev M., Veretennikov S.V., Kohlstedt H. and Ustinov A.V. Integrated superconducting receiver as a tester for sub-millimeter devices at 400-600 GHz // Proc. 11 Int. Symp. Space Terahertz Technol. Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1-3 May 2000. P. 359-367.
- [A84] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Vaks V.L., Mygind J., Baryshev A.B., Luinge W., Whyborn N. Phase locking of 270-440 GHz Josephson flux flow oscillator // Rev. of Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 1. P. 289-293.
- [A85] Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Baryshev A.M., Luinge W., Mygind J. Integrated fully superconducting submm receivers // Presented at EURESCO Conference "Future Perspectives of Superconducting Josephson Devices". Aquafreda di Maratea, Italy, 4-6 July 2000.
- [A86] Shitov S.V., Koshelets V.P., Prokopenko G.V., Filippenko L.V., Ermakov A.B., Shtanyuk A.M., Levitchev M., Kohlstedt H., Veretennikov A.V., Ustinov A.V. Integrated superconducting receiver as 400-600 GHz tester for coolable devices // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2001. V. 11, No. 1. P. 832-835.

- [A87] Koshelets V.P., Ermakov A.B., Shitov S.V., Dmitriev P.N., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Luinge W., Mygind J., Vaks V.L., Pavel'ev D.G. Superfine resonant structure on IV-curves of long Josephson junction and its influence on flux flow oscillator linewidth // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2001. V. 11, No. 1. P. 1211-1214.
- [A88] Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Koshelets V.P., and Gao J.R. Integrated superconducting receiver: fabrication and yield // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2001. V. 11, No. 1. P. 816-819.
- [A89] Shitov S.V., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Filippenko L.V., Ermakov An.B., Khodos V.V., Vaks V.L. A superconducting spectrometer with phase-locked Josephson oscillator // *Proc. 13-th International Symposium on Space Terahertz Technology.* Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, March 26-28, 2002. P. 411-420, (2002).
- [A90] Koshelets V.P., Shitov S.V., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Sobolev A.S., Torgashin M.Yu., Khodos V.V., Vaks V.L., Graauw de T. Wesselius P.R., Mahaini C., Mygind J. Superconducting submm integrated receiver with phase-locked local oscillator // (Представлено) 3<sup>rd</sup> International School/Workshop for Young Scientists "From Andreev Reflection to the International Space Station". Björkliden, Kiruna, Sweden, April 4-11, 2002.
- [A91] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.V. Khodos, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind. Towards a Phase-Locked Superconducting Integrated Receiver: Prospects and Limitations // presented at SDP'2001, Tokyo, Japan, June 2001, *Physica C*, **367**, pp. 249 - 255, (2002).
- [A92] P.N. Dmitriev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, G.V. Prokopenko, S.A. Kovtonyuk, and V.P. Koshelets. High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 13, No 2, pp. 107-110, June 2003.
- [A93] S.V. Shitov, V.P. Koshelets, An.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov, W.-J. Vreeling, P.R. Wesselius, V.V. Khodos, V.L. Vaks. An

Integrated Receiver with Phase-Locked Superconducting Oscillator // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 13, No 2, pp. 684-687, June 2003.

- [A94] S.V. Shitov, V.P. Koshelets, P.A. Yagoubov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, O.V. Koryukin, An.B. Ermakov, and R.W.M. Hoogeveen. SIR Chip for TELIS // Abstract for the Fourteenth International Symposium Space TeraHertz Technology, Tucson, Arizona, USA, April 22-24, 2003
- [A95] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, T. de Graauw, P.R. Wesselius, S. Kohjiro, Z. Wang. Integrated Submillimeter and Terahertz Receivers with Superconducting Oscillator // Abstract for the Workshop “Cryogenic Receiver Technology for Submillimeter Waves” in the scope of the International Microwave Symposium (IMS-2003), Philadelphia, USA, June 8-13, 2003.
- [A96] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, A.L. Pankratov, V.V. Kurin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. Superconducting Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receiver // Abstract for the European Applied Superconductivity Conference EUCAS’2003, Sorrento, Italy, p. 55, September 2003; submitted to *Superconducting Science and Technology*, 2003.
- [A97] M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.A. Andrianov, V.N. Naumkin, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. STJ X-ray Detectors with Titanium Sublayer // Proceedings of the 10-th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-10), Genoa, Italy, 2003; *Nuclear Instruments and methods in Physics Research*, A 520, pp 250-253, 2004.
- [A98] В.П. Кошелец, С.В. Шитов, Л.В. Филиппенко, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, А.С. Соколев, М.Ю. Торгашин. Сверхпроводниковые интегральные приемники субмм волн // Известия ВУЗов «Радиофизика», том XLVI, № 8-9, стр. 687-701, (2003).
- [A99] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. Integrated Submillimeter and Terahertz Receivers with Superconducting Local

Oscillator // presented at the 8<sup>th</sup> International Workshop "From Andreev Reflection to the International Space Station" Björkliden, Kiruna, Sweden, March 20-27, 2004

- [A100] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, A.L. Pankratov, V.V. Kurin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. Superconducting Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receiver // *Superconducting Science and Technology*, v. 17, pp. \$127-\$131, 2004.
- [A101] M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.A. Andrianov, V.N. Naumkin, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. STJ X-ray Detector with Titanium Sublayer // *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A* 520 (2004) 250-253
- [A102] R. Russo, M. Cirillo, F. De Matteis, M. Casalboni, V. Merlo, P. Proposito, L.V. Filippenko, S. Schutzmann. Toward Optical and Superconducting Circuit Integration // *Supercond. Sci. Technol*, vol. 17, pp. S456 -S459, 2004.
- [A103] N. Gronbech-Jensen, M.G. Castellano, F. Chiarello, G. Torrioli, M. Cirillo, L. Filippenko, R. Russo, and C. Cosmelli. Microwave-induced Thermal Escape in Josephson Junction // *Phys. Rev. Lett.*, 93, 107002, 2004.
- [A104] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. Superconducting Integrated Receiver for TELIS // *“IEEE Trans. on Appl. Supercond.”*, vol. 15, pp. 960-963, 2005.
- [A105] Козин М.Г., Ромашкина И.Л., Сергеев С.А., Нефедов Л.В., Андрианов В.А., Наумкин В.Н., Кошелец В.П., Филиппенко Л.В. Детектор рентгеновского излучения на сверхпроводящих туннельных переходах с пассивным электродом, содержащим титановый слой. // *Известия РАН серия физическая*, том 69, N1, стр. 36-38 (2005)
- [A106] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко. Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы. //

Всероссийский семинар по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, март, 2005

- [A107] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко. Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы. // Известия ВУЗов «Радиофизика», том XLVIII, № 10-11, стр. 947-954, 2005.
- [A108] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen, and W. Wild. Superconducting Submm Integrated Receiver with Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for TELIS // Abstract for *the 16th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Sweden, May 2005, p. 108, Conference Proceedings ISSTT 2005, p.276-271.
- [A109] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, and V.B. Borisov. Superconducting Flux-Flow Oscillators for THz Integrated Receiver // presented at the second Franco-Russian Seminar on Nanotechnologies., Lille, France, August 2005.
- [A110] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin. Development of the Flux-Flow Oscillators for Submm Integrated Receiver // Extended Abstract of the ISEC 2005, September 2005, the Netherlands, p. PL-07.
- [A111] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W.J. Vreeling, W. Wild, and O.M. Pylypenko. Superconducting Submm Integrated Receiver for TELIS // *presented at the 7<sup>th</sup> European Conference on Applied Superconductivity EUCAS '05*, September 2005, Vienna. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1377 -1381.
- [A112] V.A. Andrianov, L.V. Filippenko, V.P. Gorcov, V.P. Koshelts, M.G. Kozin. Superconducting Tunnel Junction Detectors. The Problems of the Energy

resolution. // Abstract for LV National Conference On Nuclear Physics, Saint-Petersburg, Russia, July 2005.

- [A113] V.A. Andrianov, M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. X-Ray Fluorescence Detecting by Superconducting Tunnel Junction // Abstract for LV National Conference On Nuclear Physics, Saint-Petersburg, Russia, July 2005.
- [A114] V.A. Andrianov, L.V. Filippenko, V.P. Gorkov, V.P. Koshelets. Quasiparticle Recombination in STJ X-Ray Detectors // presented at the 11<sup>th</sup> International Workshop on Low Temperature Detectors, Tokyo, Japan, July 2005.
- [A115] V.A. Andrianov, L.V. Filippenko, V.P. Gorkov and V.P. Koshelets. Recombination losses in STJ X-ray detectors with killed electrode. // *presented at the 7<sup>th</sup> European Conference on Applied Superconductivity EUCAS '05*, September 2005, Vienna. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1311 - 1314.
- [A116] V.A. Andrianov, L.V. Filippenko, V.P. Gorkov, V.P. Koshelets. Quasiparticle recombination in STJ X-rays detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A 559, pp. 683 – 685, 2006.
- [A117] В.Ф. Вдовин, А.И. Елисеев, И.И. Зинченко, И.В. Кузнецов, И.В. Лапкин, А.М. Штанюк, В.П. Кошелец, Л.В. Филиппенко, С.В. Шитов, О.М. Пилипенко, А. Муджунен, Е. Ойнаскаллио, Дж. Пелтонен, С. Урпо. Двухчастотный дуполяризационный сверхпроводниковый приемник для радиоастрономических исследований в миллиметровом диапазоне волн. // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», т.50, №9, стр. 1207 -1211, 2005
- [A118] V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // The Joint International Workshop "Nanosensors and Arrays of Quantum Dots and Josephson Junctions for space applications" combined with the 10th International Workshop "From Andreev

Reflection to the Earliest Universe" Вјцrkliden, Kiruna, Sweden, April 1-9, 2006

- [A119] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В. и Вакс В.Л. Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн для мониторинга атмосферы. // 4-ая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, ноябрь 2006 г.
- [A120] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // "IEEE Trans. on Appl. Supercond.", vol. 17, pp. 336-342, 2007.
- [A121] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, and P.A. Yagoubov. Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits // IEEE Trans. on Appl. Supercond.", vol. 17, pp. 379-382, 2007.
- [A122] M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. A Pulse-Height Spectrum from a M6ssbauer <sup>57</sup>Co Source Registered with a Superconducting Tunnel Detector. // *Instruments and Experimental Techniques*, 2006, Vol. 49, No. 6, pp. 868–871. 6 Pleiades Publishing, Inc., 2006. Original Russian Text 6 2006, *published in Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, 2006, No. 6, pp. 135–139.
- [A123] V.A. Andrianov, V.P. Gor'kov, V.P. Koshelets, L.V. Fillipenko. Superconducting Tunneling Detectors of X-ray Radiation. Issues Concerning the Energy Resolution. // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, Vol. 41, No. 2, pp. 215–222, 2007. Original Russian Text, V.A. Andrianov, et al, 2007, published in *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, Vol. 41, No. 2, pp. 221–228, 2007.
- [A124] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov,

- R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS. // *“IEEE Trans. on Appl. Supercond.”*, vol. 17, pp. 336-342, 2007
- [A125] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko and P.A. Yagoubov. Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits // *“IEEE Trans. on Appl. Supercond.”*, vol. 17, pp.379- 382, 2007.
- [A126] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В. Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований. // Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2007.
- [A127] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В., Ягубов П.А. Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований. // Известия ВУЗов «Радиофизика», Том 1, № 10–11, стр. 935-940, 2007.
- [A128] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild. Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS. // presented at the *17th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Pasadena, CA, USA, March 2007, report 10-5
- [A129] Заявка № 2006 142 799 с приоритетом от 05.12.2006 «Криогенный генератор гетеродина на основе распределённого туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ», авторы Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Торгашин М.Ю. Решение о выдаче патента РФ от 01.11.2007.
- [A130] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev,

M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hooegeveen, G.de Lange, and W. Wild. Superconducting integrated receivers for radio astronomy and atmospheric monitoring. // 11-th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2007), Washington D.C., USA, June 2007.

- [A131] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hooegeveen, and W. Wild. Superconducting Integrated Submm Wave Receiver // presented at the Frontiers of Josephson Physics and Nanoscience (FJPN07), 7th International AQDJJ conference, Italy, September 2007.
- [A132] V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, N.V. Kinev, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, G. de Lange, W. Wild, R.W.M Hooegeveen. Development of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS. // Joint International Workshop "A new generation of ultra-sensitive detectors for dark energy and cosmology experiments", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 30 -April 6, 2008
- [A133] Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Pavel N. Dmitriev, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin. Phase-locked Local Oscillator for Superconducting Integrated Receiver. // presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, April 2008, report 7-5.
- [A134] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Y. Torgashin, G. de Lange, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hooegeveen, W. Wild. Development and Characterization of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS. // Abstract for the Applied Superconductivity Conference ASC-2008. Chicago, USA, August 2008, invited report 3EPE03.

## Цитируемая литература

- [1]. Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. –М. Изд-во Моск. Университета, 1978.
- [2]. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М.: Наука, 1985.
- [3]. R. Doll, M. Nabauer. Experimental Proof of Magnetic Flux Quantization in Superconducting Cylinders. // Phys. Rev. Lett., 1961, v.7, No 2, p. 51-52
- [4]. B.S. Deaver, W.M. Fairbank . Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders. // Phys. Rev. Lett., 1961, v.7, No 2, p. 43-46.
- [5]. П. Де Жен. Сверхпроводимость металлов и сплавов. Пер. с англ., М.: Мир, 1968
- [6]. B.D. Josephson. Possible New Effects in Superconductive Tunneling.// Phys. Lett., 1962, V.1, No 7, P. 251-253
- [7]. W.C. Stewart. Current-Voltage Characteristics of Josephson Junction.// Appl. Phys. Lett., 1968, V. 12, P. 271-27.
- [8]. D.E. Mc Cumber. Effect of ac Impedance of dc Voltage- Current Characteristics of Superconductor Weak-Link Junction. // J. Appl. Phys., 1968, v.39, p. 3113-3118.
- [9]. Р. Парменьтье. Флюксоны в распределенных джозефсоновских контактах. В книге «Солитоны в действии» под ред. К. Лонгрена и Э. Скотта, пер. с англ., М. Мир, 1981, с. 185-209.
- [10]. К.К. Likharev. Dynamics of Josephson junctions and circuits. // Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- [11]. A. Barone, G. Paterno. Physics and applications of the Josephson Effect, A Wiley-Interscience Publication, 1982, p. 14.
- [12]. W. Anacker, K. R. Grebe, J. H. Greiner, S. K. Lahiri, K. C. Park, and H. H. Zappe, "Lead alloy Josephson junctions," U. S. Patent Nr. 3, 733, 526, 1973.
- [13]. J. M. Eldridge and J. Matisoo, "Fabrication of variable current density Josephson junctions," U. S. Patent Nr. 3, 816, 173, 1974.

- [14]. Lahiri S.K., Basavaiah S. Lead Alloy Josephson Junctions with Pb-Bi. Counter Electrodes. // *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 36, pp. 334-336, 1980.
- [15]. Broom R.F., Raider S.I., Oosenbrug A., Dreke R.E., Walter W. Niobium Oxide – Barrier Tunnel Junction.// *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1980, v. 27, pp. 1998-2008.
- [16]. H. Seifarth and W. Rentsch, “V-VOx-Pb Josephson tunnel junctions of high stability,” *Phys. Status Solidi*,” vol. 17, p.166, 1973.
- [17]. J. Halbritter. NbOx growth and tunneling through NbOx. // *IEEE Trans. Magn.*, vol. 21, p. 858, 1985
- [18]. S. Korohashi, S. Hasuo. All refractory Nb/YbOx/Nb Josephson Junction. // *J. Appl. Phys.*, 1986, v.60, p. 3774-3778.
- [19]. S. Morohashi, S. Hasuo. I-V characteristics of Nb/TaOx/Nb Josephson Junctions. // in *Extended abstracts, 1987, Int. Superconductivity Electronics Conf., Tokyo*, p.305-307.
- [20]. D. W. Jillie, H. Kroger, L. N. Smith, E. J. Cukauskas, and M. Nisenoff. Niobium nitride – niobium tunnel junctions with sputtered amorphous silicon barriers. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 41, p. 897, 1982
- [21]. Y. Tarutani, Y. Yamada, and U. Kwabe. V-Si/SiO-MoRe superconducting tunnel junctions.// *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 1983, p. 326, March 1981.
- [22]. H. Kroger, L. N. Smith, D. W. Jillie, and J. B. Thaxter. Improved Nb-Si-Nb SNAP Devices. // *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 19, p. 783, 1983.
- [23]. H. Kroger, L.N. Smith, and D.W. Jillie. Selective niobium anodisation process for fabrication Josephson tunnel junctions. // *Appl. Phys. Lett.*, v. 39, 1981, p. 280-282.
- [24]. Gurwitch M., Washington M.A., Huggens H.A. High Quality Refractory Josephson Tunnel Junction Utilizing Thin Aluminium Layers. // *Appl. Phys. Lett.*, 1983, v. 42, p. 472-474.

- [25]. Rowell J.M., Gurwitch M., and Geerk J. Modification of Tunnelling Barrier on Nb by a Few Monolayers of Al. // *Phys. Rev. B*, 1981, v. 24, p. 2278-2281.
- [26]. Huggins H.A. and Gurwitch M. Preparation and Characteristics of Nb-Al-Oxide-Nb Tunnel Junctions. // *J. Appl. Phys.*, 1985, v. 57, pp. 2103-2109.
- [27]. Morohashi S., Shinoki F., Shoji A., et al. High Quality Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson Junction. // *Appl. Phys. Lett.*, 1985, v. 46, pp. 2103-2109.
- [28]. Nakagawa H., Nakawa K., Kurosawa I., et al. Nb/Al-oxide/Nb Tunnel Junctions for Josephson Integrated Circuits. // *Jap. J. of Appl. Phys.*, 1986, v. 25, No 1, P. L70-L72.
- [29]. T. Imamura, T. Shiota, and S. Hasuo, "Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb Josephson junctions: I - Sputtered Nb films for junction electrode," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 2, p. 1, 1992.
- [30]. T. Imamura and S. Hasuo, "Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb Josephson junctions: II - Deposition of thin Al layers on Nb layers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 2, p. 84, 1992.
- [31]. T. Imamura and S. Hasuo, "Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb Josephson junctions: III – Annealing stability of AlO<sub>x</sub> tunneling barriers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 2, p. 222, 1992.
- [32]. Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths. // *Rev. of Mod Phys.*, 4, 1055-1113, 1985.
- [33]. Blundel R.& Tong C.E. Submillimeter receivers for radio astronomy. // *Proc. IEEE*. 80, 1702-1720, 1992.
- [34]. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, S.V. Kovtonyk, An.B. Ermakov, N.D. Whyborn and C.-O. Lindstron. Ultra-low-noise 100 GHz Receiver Based on Parallel Biased SIS Arrays. // *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 406-408, 1991.
- [35]. A. Karpov, J. Blondell, M. Voss, K.H. Gundlach. Four photons sensitivity heterodyne detection of Submillimeter radiation with superconducting tunnel junctions. // *IEEE Trans. On Appl. Superconductivity*, Vol. 5, N 2, pp. 3304-3307, 1995.

- [36]. J. Zmuidzinas and H.G. LeDuc. Quasi-optical slot antenna SIS mixers. // IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech., vol.40, pp. 1797-1804, 1992.
- [37]. J. Zmuidzinas, N.G. Ugras, D. Miller, M. Gaidis, H.G. LeDuc, J.A. Stern. Low-noise slot antenna SIS mixers. // IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, vol. 5, No. 2, p. 3053, 1995.
- [38]. M.C. Gaidis, H.G. LeDuc, Mei Bin, D. Miller, J.A. Stern, and J. Zmuidzinas. // Characterisation of Low Noise Quasi-Optical SIS Mixers for the Submillimeter Band . // IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques, p. 1130-1139, 1996
- [39]. S.C. Shi and N. Noguchi. Low-noise Superconducting Receivers for Millimeter and Submillimeter Wavelengths. // IEICE Trans. Electron., v. E81-C, pp. 1584-1594, 1998.
- [40]. Longacre A.Jr. and Shapiro S. Proc. of Symp. On Submillimeter wave, N.Y., 1970, p.295
- [41]. K.K. Likharev and V. Semenov, „RSFQ logic/memory family: a new Josephson junction technology for sub-terahertz clock frequency digital systems,“ IEEE Trans. Appl. Supercond. 1, pp. 3-28, 1991
- [42]. Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Khohlov D.Yu., A.F. Kirichenko, V.P. Koshelets, and S.A. Kovtonyuk. Experimental Implementation of SFQ NDRO Sell and 8-bit ADC // IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, 1993, vol. 3, no. 1, pp. 2662-2665
- [43]. M. Maezawa and A. Shiji // Appl. Phys. Lett., vol. 70, p. 3603-3605, 1997
- [44]. L. Young. Anodic Oxide Films. // New York: Academic Press, 1961, vol. 15, ch.2-4
- [45]. R.E. Joynson, C.A. Neugebauer, and J.R. Rairden. Thin film of niobium for cryotronground planes. // J. Vac. Sci. Technol., vol. 4, pp. 171-178, 1967.
- [46]. X. Meng and T. Van Duzer. Light-Anodization Process for High-Jc Micron and Submicron Superconducting Junction and Integrated Circuit Fabrication. // IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 91-94, 2003.

- [47]. Gert de Lange, Jean-Michel Krieg, Netty Honingh, Alexandre Karpov, Sergey Cherednichenko. Performance of the superconducting mixers for the HIFI Instrument. // presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, April 2008, report 4-2.
- [48]. Pan S.-K., Kerr A.R., Lamb J.W., and Feldmann. SIS Mixers at 115 GHz Using Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Junctions. // NRAO, 1987, Electronics Division Internal Report No 268, p. 1-46
- [49]. Feldman M.J. An Analytic Investigation of the Superconductor Quasiparticle Mixer in the Low Power limit. // IEEE Trans. On Magn., 1991, V. MAG-27, No. 2, P. 2646-2649.
- [50]. T. Imamura and S. Hasuo. Effect of Intrinsic Stress on Submicrometer Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Junctions. // IEEE Trans., vol. 25, no. 2, pp. 1119- 1122, 1989.
- [51]. M. Bushan and E.M. Macedo. Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Trilayer Process for the Fabrication of Submicron Josephson Junctions and Low-Noise DC SQUIDS. // Appl. Phys. Lett., vol. 58, no. 12, pp. 1323-1325, 1991.
- [52]. H.Nakagawa, K. Nakaya, I. Kurosawa, S. Takada, H. Hayakawa. Nb/Al-oxide/Nb Tunnel Junctions for Josephson Integrated Circuits. // Jpn. J. of Appl. Phys., vol. 25, no. 1, pp. L70-L72, 1986.
- [53]. M. Yuda, and K. Kuroda. Niobium-stress influence on Nb/Al-oxide/Nb Josephson Junctions. // J. Appl. Phys., vol. 63, no. 7, pp. 2352-2357, 1988
- [54]. C.T. Wu. Intrinsic Stress of Magnetron-Sputtered Niobium Films. // Thin Solid Films, vol. 64, pp. 103-110, 1979
- [55]. T. Imamura, H. Hoko, S. Hasuo. Characterisation of Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb junction structures by anodisation spectroscopy. // IEEE Trans.Magn., 1989, v. 25, pp. 1131-1134.
- [56]. R. Glang, R.A. Holmwood,, and R.L. Rosenfeld : Rev.Sci. Instrum. 36 ,7
- [57]. J. Hlavac. The Technology of Glass and Ceramics. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1983, p. 177.

- [58]. P.Feautrier, M. Hanus and P.Febvre . Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb junctions for a 380 GHz SIS receiver. // Supercond. Sci. Technol. 5 (1992) pp.564-568
- [59]. Tsukada K., Kawai J., Uehara G., Kado H. Relationship of Nb surface morphology and Al coverage to the intrinsic stress of magnetron-sputtered Nb films. // IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, no. 1, pp. 2944-2946, 1993.
- [60]. McCrath W.R., Richards P.L., Smith A.D., H. Van Kampen, Balchelor R.A., Prober D.E., Samthanam P.// Appl. Physys. Lett., 1981, v. 39, no. 8, pp. 655-659
- [61]. Smith A.D., Richards P.L. // IEEE Trans., v. ED-27, 1980, no. 10, pp. 1909-1914
- [62]. Rudner S., Claeson T. // Appl. Physys. Lett., 1979,v. 34, no. 10, p. 711-715
- [63]. Dolan G.J., Phillips T.G., Woody D.P. // Appl.Phys.Letters. 1979.V. 34. №5. P.347
- [64]. Rudner S., Feldman M.J., Kollberg E., Claeson T. // IEEE Trans. 1981. V. MAG.-17. №2. P. 690
- [65]. Feldman M.J., Rudner S. // Rev. Infrared and Millimeter Waves. 1983. V.1. №1. P.47.
- [66]. McGrath W.R., Raisanen A.V., Richards P.L. // IEEE Trans. On Magn., 1985, vol. MAG-21, № 2, p. 212
- [67]. Rudner S., Feldman M.J., Kollberg E., Claeson T. // IEEE Trans., 1981 V. MAG-17. № 2, p. 690
- [68]. Feldman M.J. An Analytic Investigation of the Superconductor Quasiparticle Mixer in the Low Power Limit. // IEEE Trans. On Magn., 1991, V. MAG-27, No. 2, P.2646-2649
- [69]. J. Krug and H. Spohn, in *Solids far from Equilibrium*, edited by C. Godreche (Cambridge University Press, Cambridge, 1991)
- [70]. M. Aoyagi, A. Shoji, S. Kosaka, F. Shinoki, and S. Takada. A 1 μm crossline junction process. // in *Advances in Cryogenic Engineering Materials*. Vol.32. New York . Plenum. 1986. pp. 557-563

- [71]. Wengler M.J., Woody D.P., Miller R.E., Phillips T.G. A low noise receiver for millimeter and Submillimeter wavelengths. // *Int.J. Infr. and MM Waves*, 1985, V. 6, No. 8, pp. 697-706.
- [72]. Солимар Л. Туннельные эффекты в сверхпроводниках и их применение. М.: Мир, 1974
- [73] T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Irie, and K. Yoshida. // *J. Appl. Phys.* 54, 3302 (1983); see also *J. Appl. Phys.* 56, Pt.II, 3284 (1984); *J. Appl. Phys.* 58, Pt. III, 441 (1985); *J. Appl. Phys.* 63, Pt. IV, 1130 (1988)
- [74] Y.M. Zhang, D. Winkler, and T. Claeson, *J. Appl. Phys.* 62, 3195 (1993)
- [75] J. Mygind, V. Koshelets, A.V. Shchukin, S.V. Shitov, and I.L. Lapitskaya. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 5, 3057 (1995)
- [76] V.P. Koshelets, A.V. Shchukin, I.L. Lapitskaya, and J. Mygind. // *Phys. Rev. B* 51, 6536 (1995).
- [77] I. E. Batov, X. Y. Jin, S. V. Shitov, Y. Koval, P. Müller, A. V. Ustinov. Detection of 0.5 THz radiation from intrinsic Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Josephson junctions. // *Appl. Phys. Lett.* 88, 262504-1 (2006) (Received 1 February 2006; accepted 5 May 2006; published online 28 June 2006)].
- [73]. P.A. Yagoubov, J. Dercksen, R.W.M. Hoogeveen, V.P. Koshelets, O.V. Koryukin, and O.M. Pylypenko, “550-650 GHz spectrometer development for TELIS”, Abstract for the 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Sweden, May 2005, p. 156.
- [74]. R.W.M. Hoogeveen, P.A. Yagoubov, A. de Lange, A.M. Selig, V.P. Koshelets, B.N. Ellison and M. Birk, “Superconducting Integrated Receiver development for TELIS”, presented at the 12th International Symposium on Remote Sensing, 19-22 September 2005, Bruges, Belgium.
- [75]. Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Назаров В.А. Реактивное ионное травление: Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. 1984 Вып. 1(1010). М.: ЦНИИ «Электроника»
- [76]. Зи С. Технология СБИС. М.: Мир 1986

- [77]. T.T. Foxe, B.D. Hunt, C. Rogers, A.W. Kleinsasser, and R.A. Buhrman. Reactive ion etching of niobium. // *J. Vac. Sci. Technol.*, 19(4), 1981, pp. 1394-1397.
- [78]. Koshelets V.P. and Shitov S.V. *Superconductor Science and Technology*. // 2000
- [79]. M.B. Ketchen, D. Pearson, A.W. Kleinsasser, and et.all. Sub-mm, planarized, Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb Josephson process for 125 mm wafers developed in partnership with Si technology. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 2609-2611, 1991.
- [80]. M. Blushan, Z. Bao, B. Bi, N. Kamp, K. Lin, A. Oliva, R. Rouse, Siyuan Han, and J.E. Lukens. A planarized process for low-T<sub>c</sub> electronic applications. // *Extended Abstracts of 5<sup>th</sup> International Superconductive Electronics Conference, Nagoya*, pp. 17-19, 1995
- [81]. N.E. Booth, D.J. Goldie. *Supercond. Sci. Technol.*, 9, 493 (1996)
- [82]. В.С. Шпинель, В.А. Андрианов, М.Г. Козин. // *Известия РАН серия физическая*, том 59 (11), N1, стр. 36-38 (2005)
- [83]. Proc. 10th Int. Workshop of Low Temperature Detectors (LTD-10) [*Nucl. Instr. Meth. A*, 520 (2004)]
- [84]. S. Morohashi, and S. Hasuo, "Experimental investigations and analysis for high-quality Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junctions", *J. Appl. Phys.*, vol. 61, pp. 4835-4849, 1987
- [85]. H. Netel, M. Frank, S. E. Labov, G. H. Campbell, C. A. Mears, E. Brunet, L. J. Hiller and M. A. Lindeman "Development of a prototype superconducting X-ray spectrometer using a Ta crystal as an absorber *NIM P. A370*, 1996, P. 47-49
- [86]. Th. Nussbaumer, F. Finkbeiner, Ph. Lerch, A. Zehnder and H. R. Ott "Fabrication of Nb and Ta/Al/AlO<sub>x</sub>/Al/Nb tunneling junction X-ray detectors: a list of problems" *NIM A370, №1, 1996, P.115-116*
- [87]. R.L. Peterson *Cryogenics* 31 (1991) 132
- [88]. Booth N.E.//*Appl. Phys. Lett.*, 1987. V.50. P.293.
- [89]. Le Grand J.B.//*Ph. D. Thesis, Utrecht University, Utrecht, 1994.*

- [90]. Luiten O.J., van der Berg M.I. et al.// Proc. 7th Int. Workshop Low Temp. Det. (LTD-7), Munich, Germany, 27 Jul.-2 Aug. 1997: ed. S. Cooper, Max Planck Inst. Phys.,1997, p. 25.
- [91]. Andrianov V.A., Dmitriev P.N. et al.//Proc. 9th Int. Workshop Low Temp. Det. (LTD-9), Madison, Wisconsin, USA, 23-27 Jul., 2001: eds. F.S. Porter et al.,
- [92]. A.A.Golubov, E.P.Houwman, J.G.Gijsbertsen, V.M.Krasnov, J. FLokstra,H.Rogalla “Proximity effect in superconductor-insulator-superconductor Josephson tunnel junctions: theory and experiment”, Physical Review B, vol.51, 2 pp. 1073-1089, 1995 .
- [93]. H. Numata, S. Nagasawa, M. Tanaka, and S. Tahara. Fabrication Technology for High-Density Josephson Integrated Circuits using Mechanical Polishing Planarization. //IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9,no. 2, pp. 3198-3201, 1999.
- [94]. Z. Bao, M. Blushan, S. Han, and J.E.Lukens. Fabrication of High Quality, Deep-Submicron Nb/Alox/Nb Josephson Junction Using Chemical Mechanical Polishing. // IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 5, no. 2, 1995, pp. 2731-2734P
- [95]. P. Puetz, K. Jacobs. E-Beam SIS Junctions Fabrication using CMP and E-Beam Defined Wiring Layer.// 10<sup>th</sup> International Symposium on Space Terahertz Technology, 1999, pp. 118-129
- [96]. M. Blushan, R. Rouse and J. Lukens. Characterization of chemical mechanical polishing of interlevel dielectric in superconducting circuits. // Proceeding of VMIC, p.216, 1994
- [97]. C. A. Hamilton, R. L. Kautz, R. L. Steiner, and Frances L. Lloyd. A Practical Josephson Voltage Standard at 1 V. //IEEE Electron Device Lett. EDL-6, 623-625 (1985).
- [98]. R. L. Kautz and Frances L. Lloyd, Precision of Series-Array Josephson Voltage Standards. // Appl. Phys. Lett. 51, 2043-2045(1987).