

# Проектирование СПИС преобразователя частота-напряжение для программируемого эталона Вольта

А.Л. Гудков<sup>1</sup>, А.И. Козлов<sup>1</sup>, А.Н. Самусь<sup>1</sup>, И.Я. Краснополин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО "Компэлст", ФГУП "НИИ Физических Проблем им. Ф.В. Лукина", gudkov@niifp.ru

<sup>2</sup> ФГУП ВНИИ Метрологической Службы, krasnopolin@vniims.ru

**Аннотация** — Представлены результаты проектирования отечественных сверхпроводниковых интегральных схем (СПИС) практического применения на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/a-Si/Nb SNS типа для программируемого эталона напряжения на 1 В. Изложены особенности проектирования СПИС преобразователя частота-напряжение (ПЧН) на основе массива из 8192 джозефсоновских переходов, включенных в щелевую сверхпроводниковую линию открытого типа (копланарная линия) и с делителем СВЧ мощности. Продемонстрированы результаты экспериментальной проверки функционирования СПИС ПЧН. Рассмотрена также перспектива развития элементной базы СПИС ПЧН с использованием стеков джозефсоновских переходов SDS типа.

**Ключевые слова** — джозефсоновский переход, переход SIS типа, переход SNS типа, переход SDS типа, стек переходов, щелевая (копланарная) линия, преобразователь частота-напряжение (ПЧН).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные сверхпроводниковые интегральные схемы (СПИС) для эталонов Вольта содержат последовательные цепочки около  $10^4$  -  $10^5$  джозефсоновских переходов [1]. Цепочки могут быть сформированы с использованием различных типов джозефсоновских переходов, электрофизические свойства которых необходимо учитывать при конструировании СПИС [2]. В основном используются два типа переходов: туннельные переходы Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb, так называемые переходы SIS (superconductor – insulator – superconductor) [3], [4], и джозефсоновские переходы с непосредственной (нетуннельной) проводимостью – Nb/a-Si/Nb, так называемые переходы SNS (superconductor – normal metal – superconductor) [5], [6]. На основе переходов Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb созданы СПИС эталонов напряжения постоянного тока на 1 В и 10 В [1], [7], [8]. Несмотря на высокую точность воспроизведения единицы напряжения, такие эталоны обладают двумя существенными недостатками. Во-первых, квантовые токовые ступени на вольтамперной характеристике (ВАХ) цепочки переходов под действием внешнего СВЧ-излучения не разнесены по току. Поэтому установка рабочей точки на требуемую ступень является слож-

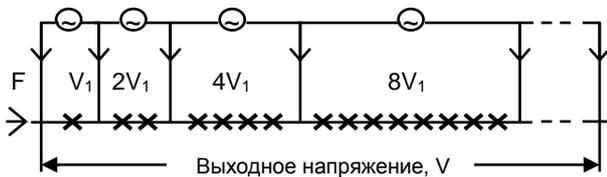
ной процедурой, требующей ручного управления. Во-вторых, даже у идеальной СПИС эталона напряжения постоянного тока время жизни рабочей точки на определенной ступени конечно из-за влияния флуктуаций. В результате рабочая точка может произвольным образом перескакивать на соседние ступени. У джозефсоновских переходов SNS типа эти недостатки отсутствуют, так как ВАХ – однозначная (безгистерезисная) функция, и ступени разнесены по току. Поэтому для создания программируемого джозефсоновского эталона Вольта (ПДЭВ, Programmable Josephson Voltage Standard (PJVS)) со стабильным выходным напряжением и возможностью быстрой перестройки этого напряжения под управлением компьютера требуются переходы Джозефсона SNS типа с однозначной вольтамперной характеристикой. Необходимость развития современных квантовых эталонов напряжения и повышение уровня метрологического обеспечения стимулируется потребностью в производстве высокоточной, конкурентно способной радиоэлектронной измерительной аппаратуры.

В настоящей работе представлены результаты разработки и экспериментального исследования СПИС преобразователя частота-напряжение (ПЧН) для программируемого эталона Вольта на основе массива цепочек 8192 планарных джозефсоновских переходов Nb/a-Si/Nb, в которых a-Si-прослойка легирована вольфрамом (W). Рассмотрена также перспектива развития элементной базы СПИС ПЧН с использованием стеков джозефсоновских переходов SDS (superconductor – doped semiconductor – superconductor) [9].

## II. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ СПИС ПЧН

Джозефсоновская СПИС для программируемого эталона Вольта состоит из последовательной цепочки джозефсоновских переходов, разбитых на двоичные секции (Рис. 1). Под действием внешнего электромагнитного излучения СВЧ диапазона частоты  $F$  на ВАХ переходов Джозефсона появляются токовые ступени Шапиро при напряжениях, которые определяются частотой  $F$ , фундаментальной константой Джозефсона  $K_J = 483597,9$  ГГц/В и числом переходов в двоичной секции. Для одиночного перехода Джозефсона воспроиз-

водимое квантованное напряжение составляет  $V_1 = 144,75 \text{ мкВ}$  – напряжение первой ступеньки при  $F = 70 \text{ ГГц}$ . Поэтому для достижения уровня 1 В требуется не менее 8000 переходов. От каждого двоичного сегмента цепочки делаются отводы для независимой подачи токов смещения. Напряжения, генерируемые последовательно соединенными переходами цепочки, суммируются. Таким образом, подавая токи смещения в бинарные группы  $m$  - разрядной цепочки, можно устанавливать выходное напряжение  $V$  в любое из  $\pm (2^m - 1)$  значений в диапазоне от  $-1,14 \text{ В}$  до  $+1,14 \text{ В}$ , при общем числе переходов в цепочке 8192.



**Рис. 1. Схема конструкции СПИС программируемого эталона Вольта на основе бинарных цепочек джозефсоновских переходов**

При проектировании джозефсоновской СПИС ПЧН для использования в эталонах Вольта необходимо выполнить следующие основные требования:

- 1) Все переходы по постоянному току соединены последовательно в цепочку.
- 2) На все переходы подается внешнее СВЧ-излучение одинаковой мощности.
- 3) Рабочая ступенька тока должна иметь достаточно большую амплитуду и быть достаточно стабильной в процессе измерения напряжения.
- 4) Микрополосковая структура, содержащая цепочку джозефсоновских переходов, должна иметь хорошее согласование с внешним СВЧ-трактом.
- 5) Микрополосковая структура с цепочкой джозефсоновских переходов должна на конце иметь согласованную СВЧ нагрузку для исключения паразитных отражений СВЧ сигнала.

Для СПИС ПДЭВ требуются переходы SNS типа с критической плотностью тока  $j_c = 10^3 - 3 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$  и размерами в плане не более  $10 \times 10 = 100 \text{ мкм}^2$ , чтобы получить амплитуду критического тока в диапазоне  $I_c = 1 - 3 \text{ мА}$ . Оптимальная ширина ступеней тока, почти равная амплитуде критического тока  $I_1 = I_c$ , достигается при выполнении соотношения  $F = 1-2 \cdot F_c$ , где  $F_c$  – характерная частота перехода. Поэтому хорошего качества ступени (максимальной амплитуды) должны наблюдаться для переходов, у которых характерное напряжение достаточно велико  $V_c = I_c \cdot R_n = 130 - 150 \text{ мкВ}$ .

Геометрические размеры переходов ограничены условием однородного распределения постоянного и переменного токов в переходе. Масштаб поперечных размеров определяется джозефсоновской глубиной проникновения магнитного поля в переход Джозефсона  $\lambda_J = (\hbar / [2e\mu_0 j_c (d + 2\lambda)])^{1/2}$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $e$  – заряд электрона,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость ва-

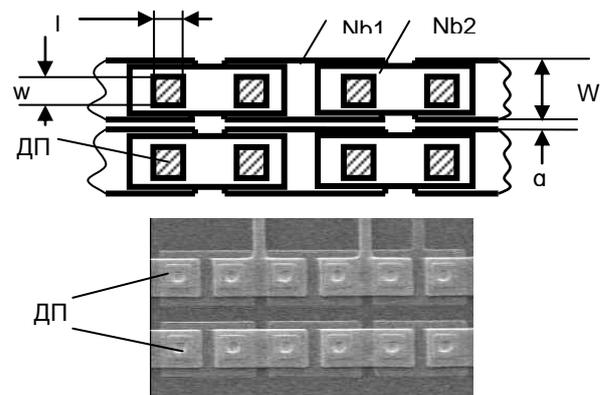
куума,  $d$  – толщина нормальной прослойки перехода, а  $\lambda$  – лондоновская глубина проникновения поля в сверхпроводник (для Nb  $\lambda \sim 100 \text{ нм}$ ). Согласно [10] однородное распределение тока в переходах SNS реализуется, пока длина  $l$  и ширина переходов  $w < 4\lambda_J$ . Для  $j_c = 10^3 - 3 \cdot 10^3$  джозефсоновская глубина проникновения  $\lambda_J \sim 10 - 6 \text{ мкм}$ .

Таким образом, для переходов SNS типа их основные параметры могут быть оптимизированы и соответствовать приведенным выше значениям. На данном этапе проектирования СПИС ПЧН выбраны размеры переходов  $9 \times 9 \text{ мкм}^2$ , что при использовании стандартной литографии обеспечивает хорошую воспроизводимость их параметров.

### III. КОНСТРУКЦИЯ СПИС ПЧН

Простой и эффективный метод распределения СВЧ-мощности в микросхемах стандарта Вольта состоит в размещении цепочки джозефсоновских переходов в микрополосковой или копланарной щелевой сверхпроводниковой линии. Таким образом, цепочка переходов может рассматриваться как микрополосковая линия, по которой происходит распространение волны, поглощаемой на другом конце согласованной нагрузкой. В данном случае распространение происходит почти без потерь, и согласованная нагрузка препятствует образованию отраженных волн.

На рис. 2 представлен фрагмент конструкции цепочки джозефсоновских переходов, включенных в щелевую линию открытого типа (копланарная линия).



**Рис. 2. Фрагмент конструкции и фото цепочки джозефсоновских переходов (ДП) Nb/a-Si/Nb для СПИС ПЧН**

Схема включения переходов в щелевую линию позволяет исключить при изготовлении кристаллов СПИС операцию нанесения толстого слоя диэлектрика и дополнительного слоя ниобия в качестве сверхпроводящего экрана, как это необходимо в случае использования микрополосковой линии классического типа [2], [4].

Волновое сопротивление копланарных полосок вычисляется по формуле [11]:

$$Z_o = (120\pi / \epsilon_{\text{eff}}) \cdot (K(k) / K'(k)) ,$$

где  $\epsilon_{\text{eff}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки ( $\sim 6,5$  для подложки из Si с  $\epsilon = 13$ ),  $K(k)$  и  $K'(k)$  – полные эллиптические интегралы первого рода, фактор  $k$  вычисляется через размеры линии ( $g$ -ширина щели,  $W$ -ширина полоски,  $h$ - высота подложки из Si):

$$k = \tanh(\pi g/4h)/\tanh(\pi(W+g/2)/2h),$$

а  $K'(k)$  отличается от  $K(k)$  тем, что в качестве аргумента эллиптического интеграла берется

$$k' = (1 - k^2)^{1/2}.$$

Для щелевой линии, расположенной на кремниевой подложке, волновое сопротивление равно:

$$Z = Z_0(\epsilon_{\text{eff}})^{-1/2}.$$

Подставляя ширину полоски  $W$ , расчетные значения  $Z$  и известные величины поверхностного сопротивления  $R_s$  в формулу [2] для коэффициента потерь

$$\alpha[\text{дБ/м}] = 8,68 \cdot R_s / Z \cdot W,$$

можно оценить ожидаемую величину потерь мощности СВЧ в сверхпроводящих элементах линии (без учета потерь в переходах) для диапазона частот  $f = 70 \dots 90$  ГГц. В этом диапазоне поверхностное сопротивление ниобия составляет  $R_s = 1,3 \cdot 10^{-3} \dots 2,4 \cdot 10^{-4}$  Ом [2]. Расчеты показывают, что для ширины микрополосок  $W = 21$  мкм и ширины щели  $g = 4$  мкм коэффициент потерь  $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-4}$  Дб/переход. Для сравнения, при тех же геометрических размерах для традиционно используемой в стандартах напряжения микрополосковой линии, расположенной над сверхпроводящим экраном, при толщине диэлектрика 1,5 мкм волновое сопротивление линии составляет  $Z = 5 - 6$  Ом, а величина коэффициента потерь составляет  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$  Дб/переход [1], [2]. Таким образом, основным преимуществом конструкции на основе цепочек переходов, включенных в открытую щелевую линию, является в несколько раз более низкий коэффициент потерь, обусловленный высоким импедансом  $Z = 40 - 50$  Ом щелевой линии.

Из-за отсутствия шунтирующей емкости в SNS переходах диссипация мощности на нормальном сопротивлении самих переходов  $R_n \sim 0,05$  Ом может привести к затуханию амплитуды волны СВЧ  $\sim 1 - \exp(-N \cdot R_n / 2Z_0)$ , где  $N$  - число переходов в линии СВЧ. Однако вопрос о затухании в переходах SNS изучен пока недостаточно: наблюдаемое затухание в некоторых образцах соответствует приведенной формуле, а в некоторых – нет. Во всяком случае, установлено, что это затухание слабо зависит от положения рабочей точки на ступени ВАХ или на ветви  $I = 0$ .

На фото рис. 3 представлен общий вид изготовленного кристалла СПИС ПЧН с цепочкой  $N = 8192$  джозефсоновских переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb планарного типа и отдельные его фрагменты. Размеры кристалла (подложка из высокоомного кремния толщиной  $\sim 0,35$  мм) в плане  $15 \times 8$  мм<sup>2</sup>. В начале схемы формируется антенна типа fin-line [8] для согласования с волноводным трактом 4-мм диапазона с экспоненциальным переходом на две микрополоски, образующие копланарную щелевую линию с шириной щели 4 мкм. В схему

СПИС ПЧН введен делитель СВЧ мощности на основе четвертьволнового трансформатора (конструкция разработана по аналогии с Т-разветвлениями в полосковых линиях [11]). Чтобы согласовать импедансы двух линий с переходами Джозефсона с  $Z = 57$  Ом, импеданс линии после антенны перед разветвлением должен составлять  $\sim 28,5$  Ом. Для выполнения этого требования в данной конструкции Т-образный делитель мощности введен на участке где ширина полосок составляет 126 мкм. Потом скачком - разветвление на два направления основной линии с шириной микрополосок 21 мкм. Дальше сделан плавный поворот каждой основной щелевой линии на 90 градусов.

Цепочка  $16 \times 512 = 8192$  переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb

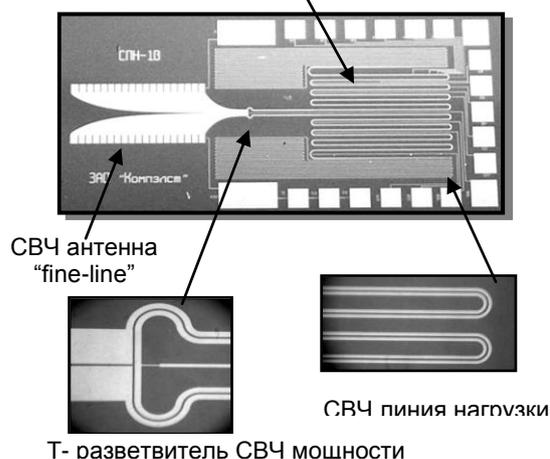


Рис. 3. Общий вид и фрагменты конструкции СПИС ПЧН на основе цепочки 8192 джозефсоновских переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb (размер кристалла  $15 \times 8$  мм<sup>2</sup>)

После разветвления на обеих микрополосках формируется массив из 16 последовательно соединенных цепочек по 512 переходов Джозефсона Nb/ $\alpha$ -Si/Nb в каждой. Таким образом, общее количество джозефсоновских переходов составляет  $N = 16 \times 512 = 8192$ . Площадь планарных переходов составляет  $9 \times 9$  мкм<sup>2</sup>. Длина линейного участка с 512 переходами Джозефсона Nb/ $\alpha$ -Si/Nb равна 4 мм. Микрополоски с переходами Джозефсона нагружены через переходный согласующий трансформатор на длинную щелевую линию, закороченную на ее конце, образованную двумя ниобиевыми микрополосками шириной 10 мкм и расстоянием между ними 4 мкм. Суммарная длина сверхпроводниковой линии нагрузки составляет около  $2 \times 14$  см = 28 см.

От разных мест микрополосковой линии предусмотрены отводы, позволяющие наблюдать отдельно ВАХ цепочек двоичных групп: 2, 4, 8, ..., 512, 1024, 2048, 4096. Имеется также возможность наблюдать ВАХ всей микросхемы с 8192 переходами.

Преимуществом данной конструкции СПИС ПЧН является наличие только одного делителя мощности СВЧ – все 8192 переходов Джозефсона включены последовательно в две цепочки по 4096 переходов. Экспериментальные исследования характеристик длинной

сверхпроводниковой щелевой линии дают реальную величину потерь  $\alpha = 0,2$  дБ/см. При использовании длинных микрополосковых щелевых линий в качестве нагрузки необходимо учитывать, что они являются линиями открытого типа, поэтому в них могут быть велики также потери на излучение. Таким образом, омические потери СВЧ в сверхпроводниковой щелевой линии при длине  $L = 15 - 20$  см, могут составить  $\approx 3 - 4$  дБ.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИС ПЧН

Вольтамперная характеристика СПИС ПЧН регистрировалась цифровым способом с использованием цифрового источника смещения. Из ВАХ с погрешностью около 5% оценивались основные параметры переходов:  $I_c$ ,  $R_n$  и  $V_c$ . Под действием СВЧ излучения диапазона 69 - 75 ГГц изучалась зависимость ширины квантовых ступеней  $\Delta I(P_{rf})$  и критического тока  $I_c(P_{rf})$  от СВЧ-мощности.

Предварительные исследования на постоянном токе экспериментальных образцов СПИС ПЧН показали, что значения критического тока одиночных переходов лежат в диапазоне  $I_c = 1 - 5$  мА, значения характерного напряжения  $V_c = I_c \cdot R_n = 75 - 95$  мкВ обусловлены на данном этапе исследований низкими значениями нормального сопротивления переходов  $R_n = 0,04 - 0,06$  Ом.

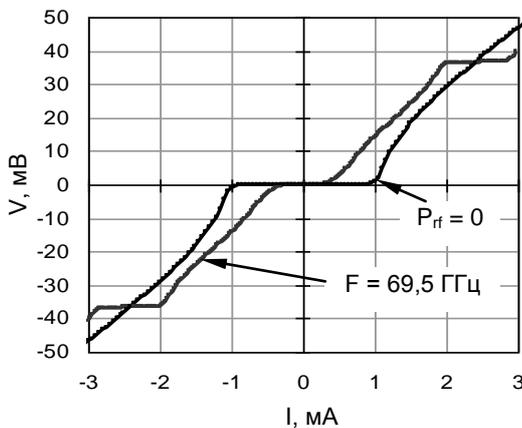


Рис. 4. ВАХ бинарной цепочки 256 переходов Nb/a-Si/Nb и под действием излучения частоты  $F = 69,5$  ГГц

На рис. 4 приведена статическая ВАХ и ВАХ под действием СВЧ облучения с  $F = 69,5$  ГГц одной из секций 256 переходов, расположенных в линии длиной 4 мм.

Статическая ВАХ имеет достаточно резкий выход из ветви критического тока ( $I > I_c$ ), что свидетельствует о малом разбросе характеристик переходов. Под действием СВЧ-излучения частоты 69,5 ГГц на ВАХ наблюдаются плоские ступени при напряжениях  $V_N = \pm 36,789$  мВ, что точно соответствует числу переходов  $N = 256$ . При большем разрешении (100 мкВ/дел.)

установлено, что плоский участок ступени составляет  $\sim 200$  мкА.

На рис. 5 представлена ВАХ бинарной цепочки 4096 переходов под действием СВЧ излучения частотой  $F = 69,3$  ГГц.

В этом образце СПИС ПЧН ступень расположена при напряжении  $V = 586,2$  мВ. Однако, при более высоком разрешении ширина плоской части ступени составляет не более 100 мкА, по-видимому, из-за разброса параметров переходов. Полученные данные исследованных бинарных цепочек переходов, а также секции 4096 переходов свидетельствуют о том, что в принципе конструкция микросхемы СПИС ПЧН работоспособна.

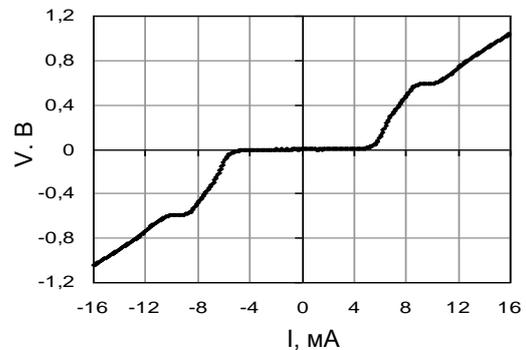


Рис. 5. ВАХ бинарной цепочки 4096 переходов под действием излучения частоты  $F = 69,3$  ГГц

Проведен анализ потерь в линии СВЧ с переходами Nb/a-Si/Nb для образцов микросхем, исследованных в данной работе. Установлено, что выбранная длина согласованных нагрузок в конструкции дает более однородное распределение СВЧ-мощности по джозефсоновским переходам. Оценки затухания амплитуды СВЧ-тока в линии с переходами Джозефсона согласуются с результатами измерений.

На рис. 6. показана зависимость максимальной ширины ступени  $dI_{max}$  от частоты СВЧ-излучения с линиями согласованных нагрузок (секция 512 переходов).

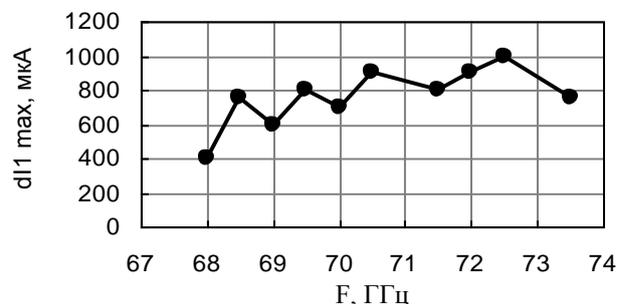


Рис. 6. Зависимость максимальной ширины ступени  $dI_{max}$  от частоты СВЧ-излучения для секции 512 переходов

Видно, что частотная характеристика ширины ступени довольно плавная, что свидетельствует об однородном распределении СВЧ-мощности по цепочкам переходов Джозефсона в конструкции

микросхемы. Небольшой рост  $dI_1$  с частотой связан с увеличением СВЧ-мощности синтезатора от края рабочего диапазона (68 ГГц) к его середине (72 - 73 ГГц).

Таким образом, экспериментально подтверждено, что в конструкции СПИС ПЧН отсутствуют отражения от концов линий согласованных нагрузок.

#### V. ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ СПИС ПРОГРАММИРУЕМОГО ЭТАЛОНА ВОЛЬТА

Перспектива развития элементной базы СПИС программируемых эталонов Вольта связана с двумя важными аспектами направлений исследований в области сверхпроводниковой наноэлектроники. Первый из них относится к развитию самих джозефсоновских переходов. Дело в том, что достичь значений  $V_c \geq 150$  мкВ в планарных переходах SNS типа большой площади практически невозможно из-за слишком хорошей проводимости N-прослойки и, соответственно, малой величины  $R_n$ . Чтобы повысить  $R_n$ , необходимо уменьшить концентрацию легирующей примеси в  $\alpha$ -Si прослойке. В этом случае произойдет смена механизма транспорта тока от чисто металлической проводимости к проводимости, связанной с упругими и неупругими процессами транспорта электронов через прослойку, что приведет, как следствие, к изменению формы ВАХ переходов. Джозефсоновские переходы с такой прослойкой следует относить к переходам SDS типа, которые в настоящее время активно изучаются [9].

Второй аспект связан с малым напряжением первой ступени одиночного джозефсоновского перехода. Поэтому, для изготовления СПИС эталона на 10 В необходимо 100 000 джозефсоновских переходов. Такое количество переходов занимает большую площадь и значительно увеличивает размеры СПИС. Кроме того, с увеличением длины цепочек возрастает проблема равномерного распределения СВЧ мощности по всем джозефсоновским переходам. Естественным решением этой проблемы является укладывание планарных переходов в стопки, т.е. формирование стеков джозефсоновских переходов. Количество переходов в стеке зависит от совершенства технологии и может достигать 10 и более в одном стеке.

Использование стеков джозефсоновских переходов для задач метрологии является перспективным направлением [12], [13]. Максимальное воспроизводимое напряжение СПИС пропорционально количеству переходов в стеке. Планарные стеки джозефсоновских переходов представляют собой вертикальные столбики из N-го количества джозефсоновских переходов, вырезанные литографическими методами из заранее сформированной многослойной сверхпроводниковой гетероструктуры. Технология изготовления стеков аналогична технологии изготовления планарных переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb.

На рис. 7 показаны чертеж в разрезе и микрофотография стека на основе гетероструктуры Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -

Si/Nb, изучение которого проводилось в данной работе.

Толщина  $\alpha$ -Si прослойки варьировалась в пределах 7 – 9 нм. Толщина промежуточного электрода между прослойками составляла 30 нм. Проведенный контроль параметров тестовых стеков Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/  $\alpha$ -Si/Nb при гелиевых температурах показал, что параметры и характеристики переходов являются достаточными для решения практических задач различного назначения.

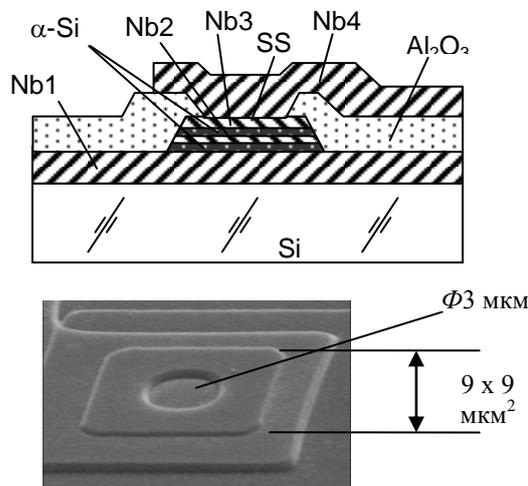


Рис. 7. Конструкция и фото планарного стека из двух джозефсоновских переходов на основе сверхпроводниковой гетероструктуры Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -Si/Nb

На рис. 8 показана типичная ВАХ одиночного планарного стека на основе сверхпроводниковой гетероструктуры Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -Si/Nb в статическом режиме и при облучении с частотой 75 ГГц.

Как видно, критические токи джозефсоновских переходов в стеке почти идентичны и равны  $I_c = 0,22$  мА, при этом суммарное характерное напряжение в стеке достигает значительной величины  $V_c = 0,35$  мВ. Таким образом, в данном стеке хорошо выполняется условие  $F_c/F > 1$ , при котором амплитуда джозефсоновских ступеней тока достигает максимальной величины.

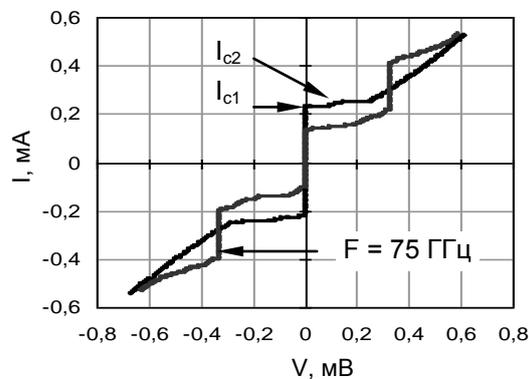
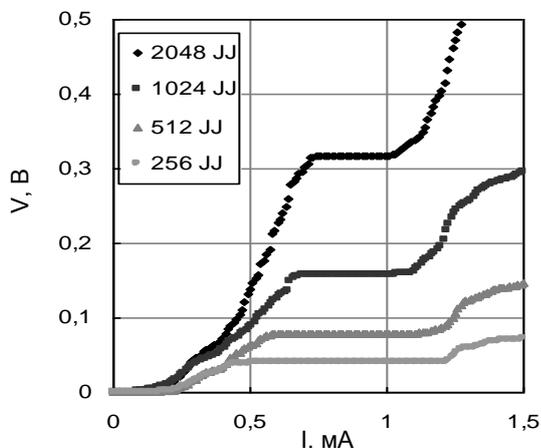


Рис. 8. ВАХ одиночного планарного стека на основе сверхпроводниковой гетероструктуры Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -Si/Nb

На рис. 8 видно, что при воздействии СВЧ частотой 75 ГГц положение токовой ступеньки по оси напряжений равно удвоенному напряжению  $V_1$  первой ступеньки тока одиночного джозефсоновского перехода  $V = 2 \cdot V_1 = 2 \cdot 155 \text{ мкВ} = 310 \text{ мкВ}$ , а амплитуда ступеньки  $I_1$  по величине почти равна амплитуде критического тока  $I_1 = I_c = 0,22 \text{ мА}$ .

На рисунке 9 приведены ВАХ 4-х бинарных секций тестового образца СПИС ПЧН с 1024 стеками на основе гетероструктуры Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -Si/Nb под действием СВЧ-излучения частоты 75 ГГц.



**Рис. 9.** ВАХ 4-х секций СПИС ПЧН под действием СВЧ излучения частоты 75 ГГц

Как видно на рис. 9, ступени Шапиро в 4-х секциях имеют перекрывающуюся область по току  $\sim 200 \text{ мкА}$  вокруг  $I = 0,8 \text{ мА}$ . Микросхемы с такими характеристиками уже можно использовать в качестве ПЧН программируемого эталона Вольта. Максимальное воспроизводимое напряжение в данной тестовой конструкции СПИС составляет 0,316 В.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось разработать достаточно эффективную конструкцию СПИС ПЧН и продемонстрировать правильное функционирование первых экспериментальных образцов микросхем на основе массива 8192 джозефсоновских переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb для программируемого эталона Вольта. Экспериментально подтверждена перспективность новой элементной базы для СПИС ПЧН, основанной на джозефсоновских переходах SDS типа и стеках на их основе. На основании проведенных исследований также можно отметить, что в технологии изготовления джозефсоновских микросхем существуют еще проблемы, связанные с качеством технологических процессов.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии и Минобрнауки России.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mueller F., Schulze H., Behr R., Kohlmann J., Niemeyer J. The Nb-Al technology at PTB - a common base for different types of Josephson voltage standards // *Physica* - 2001. - V. C354. - P. 66 - 70.
- [2] Poepel R., The Josephson Effect and Voltage Standards // *Metrologia*. - 1992. - V. 29. - P. 153 - 174.
- [3] Гудков А.Л. Джозефсоновские переходы и области их применений // *Электронная промышленность*. - 2004. - № 3. - С. 77 - 87.
- [4] Shubert M., May T., Wende G., Fritzsche L., Meyer H.-G. Coplanar strips for Josephson voltage standard circuits // *Applied Phys. Letters*. - 2001. - V. 79. - № 7. - P. 1009 - 1011.
- [5] Гудков А.Л., Катков А.С., Козлов А.И., Краснополин И.Я., Самусь А.Н. СПИС программируемого эталона Вольта и перспектива развития элементной базы // *Приборы*. - 2011. - № 11 (137). - С. 19 - 25.
- [6] Gudkov A.L., Gogin A.A., Kozlov A.I., Samys A.N., Krasnopolin I.Ya. Characteristics of Nb/ $\alpha$ -Si/Nb Josephson junction arrays at frequencies of 68 - 75 GHz // *Abstracts of International Conference "Micro- and nanoelectronics - 2009"*. October 5<sup>th</sup>-9<sup>th</sup>, 2009. Moscow - Zvenigorod, Russia. - P. P1-29.
- [7] Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я. Эталон напряжения постоянного тока. Сверхпроводниковая ИС на основе переходов Джозефсона // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. - 2007. - № 6. - С. 90 - 93.
- [8] Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я. Проектирование СПИС преобразователя частота - напряжение для эталона Вольта на основе цепочек джозефсоновских переходов // *Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции "МЭС - 2010"*. 4 - 8 октября 2010 г. - С. 624 - 627.
- [9] Гудков А.Л., Куприянов М.Ю., Самусь А.Н. Свойства планарных джозефсоновских переходов Nb/ $\alpha$ -Si/Nb с различной степенью легирования  $\alpha$ -Si-прослойки // *ЖЭТФ*. - 2012. - Т. 141. - Вып. 3. - С. 1 - 14.
- [10] Kautz R.L. Shapiro steps in large-area metallic-barrier Josephson junctions // *Journal of Applied Physics*. - 1995. - V. 78. - № 9. - P. 5811-5819.
- [11] Gevorgian S., Berg H. Line capacitance and impedance of coplanar-strip waveguides on substrates with multiple dielectric layers // *Microwave Conference 2001, 31 st European Volume, Issue, 24 - 26 Sept. 2001*. - P. 1 - 4.
- [12] Hadacek N., Dresselhaus P.D., Chong Y., Benz S.P., and Bonevich J.E. Fabrication and measurement of tall stacked arrays of SNS Josephson junctions // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* - Jun. 2004. - V. 15. - № 2. - P. 110 - 113.
- [13] Yamamori H., Ishizaki M., Sasaki H., and Shoji A. Operating margins of a 10 V programmable Josephson voltage standard circuit using NbN/TiN<sub>x</sub>/NbN/TiN<sub>x</sub>/NbN double-junction stacks // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* - June 2007. - V. 17. - № 2. - P. 858 - 863.