

Проектирование СПИС преобразователя частота-напряжение для эталона Вольта на основе цепочек джозефсоновских переходов

А.Л. Гудков¹, А.А. Гогин¹, А.И. Козлов¹, А.Н. Самусь¹, И.Я. Краснополин²

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

² ФГУП ВНИИ Метрологической Службы, krasnopolin@vniims.ru

Аннотация — Представлены результаты проектирования отечественных сверхпроводниковых интегральных схем (СПИС) практического применения на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/Al/AlO_x/Nb (SIS типа) для эталона напряжения постоянного тока 1 В. Изложены особенности проектирования СПИС на основе цепочек джозефсоновских переходов, включенных в щелевую сверхпроводниковую линию открытого типа (копланарная линия), результаты экспериментальной проверки функционирования и метрологические характеристики СПИС.

Ключевые слова — Джозефсоновский переход, переход SIS типа, щелевая (копланарная) линия, цепочка переходов, эталон Вольта.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные СПИС преобразователей частота-напряжение для эталона Вольта содержат около 10^4 - 10^5 джозефсоновских переходов туннельного типа на основе структур Nb/Al/AlO_x/Nb или Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb [1],[2]. Единица электрического напряжения – Вольт воспроизводится в настоящее время с помощью эффекта Джозефсона [2]-[4]. Под действием электромагнитного излучения СВЧ диапазона, на вольтамперных характеристиках (ВАХ) переходов Джозефсона появляются ступени тока при напряжениях, которые определяются частотой СВЧ-излучения, фундаментальной константой Джозефсона $K_J = 483597,9$ ГГц/В и номером ступени (целым числом). Для одиночного туннельного перехода Джозефсона максимальное воспроизводимое квантованное напряжение составляет $n \cdot V_n \approx 1$ мВ, где n – номер ступеньки, $V_1 \approx 140$ мкВ – напряжение первой ступеньки при использовании излучения частотой 70 ГГц. Поэтому для достижения уровня 1 В требуется более 1000 переходов (обычно 2000 - 3000), а для достижения уровня 10 В - более 10000 переходов (обычно 15000-25000), включенных последовательно по постоянному току и последовательно-параллельно по СВЧ. В основном используются переходы Nb/Al/AlO_x/Nb [2]-[6], так называемые SIS (сверхпро-

водник – изолятор – сверхпроводник) переходы, причем слой Al используется настолько тонким, чтобы параметры нижнего электрода из Nb не ухудшились из-за эффекта близости.

II. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ СПИС

При проектировании джозефсоновской СПИС 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.

Для использования СПИС в эталонах напряжения необходимо изготовить SIS переходы с низкой критической плотностью тока $j_c = 10 - 20$ А/см², чтобы плазменная частота переходов $F_p = (e j_c / \pi \hbar C_s)^{1/2}$ была существенно меньше частоты накачки F , где C_s – удельная емкость туннельного перехода. Указанное условие гарантирует существование под действием СВЧ-мощности стабильных квантовых ступенек на ВАХ переходов Джозефсона, пересекающих ось напряжений (ступенек при нулевом токе).

Также как критическая плотность тока, геометрические размеры переходов строго ограничены условием однородного распределения постоянного и переменного токов по сечению барьера, с одной стороны, и условием получения амплитуды ступенек по току достаточной величины (30 - 100 мкА), с другой.

1. Длина джозефсоновского перехода l в направлении распространения СВЧ-излучения не должна превышать величины l_{max} пространственной модуляции тока частоты накачки $\omega = 2\pi F$ [2],[3]:

$$l < l_{\max} < \lambda_j [6j_c / \omega C_s V_n]^{1/2},$$

где: λ_j - джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля в переход, $V_n = (n/K_J)F$ - амплитуда напряжения n-й ступеньки тока.

2. Ширина джозефсоновского перехода w , в направлении перпендикулярном направлению распространения СВЧ-излучения, должна быть меньше половины длины волны основного геометрического резонанса в переходе w_{\max} [2],[3]:

$$w < w_{\max} = l/[2F(\mu_0 dC_s)^{1/2}],$$

где: $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума, $d = t + \lambda_{L1} + \lambda_{L2}$ - сумма толщины диэлектрика в переходе и лондоновской глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводниковые пленки, образующие электроды перехода.

Таким образом, для туннельных переходов Джозефсона их основные параметры жестко оптимизированы: $J_c = 10 - 20$ А/см² (для частоты накачки $F \sim 70$ ГГц), ширина переходов 30 - 50 мкм, длина 10 - 20 мкм. При этом критический ток переходов может лежать в пределах 100 - 300 мкА, а амплитуда ступенек по току 30 - 100 мкА. Для туннельного барьера хорошего качества (малые токи утечки, высокое сопротивление R_{sg} в области напряжений ниже щели $V_g = 2,8$ мВ) на одном переходе можно достичь ступеней с напряжением до 1 мВ ($n = 7$). В этом случае микросхема для эталона Вольта может состоять всего из 1500-2000 переходов Джозефсона для воспроизведения напряжения на уровне 1 - 1,018 В. Поскольку размеры переходов достаточно большие, требования к фотолитографии не очень жесткие: стандартная контактная литография с разрешением 0,5 - 1 мкм должна обеспечить малый разброс параметров отдельных переходов в цепочке.

III. КОНСТРУКЦИЯ СПИС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТА-НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ЭТАЛОНА ВОЛЬТА

Простой и эффективный метод распределения внешнего сигнала в микросхемах стандарта Вольта состоит в размещении цепочки джозефсоновских переходов в микрополосковую или копланарную щелевую сверхпроводниковую линию. Таким образом, цепочка переходов может рассматриваться как микрополосковая линия, по которой происходит распространение сигнала, поглощаемого на другом конце согласованной нагрузкой. В данном случае распространение происходит почти без потерь и согласованная нагрузка препятствует образованию отраженных волн.

На рис. 1 представлен фрагмент конструкции цепочки джозефсоновских переходов, включенных в щелевую линию открытого типа (копланарная линия).

Схема включения переходов в щелевую линию позволяет исключить при изготовлении кристаллов 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].

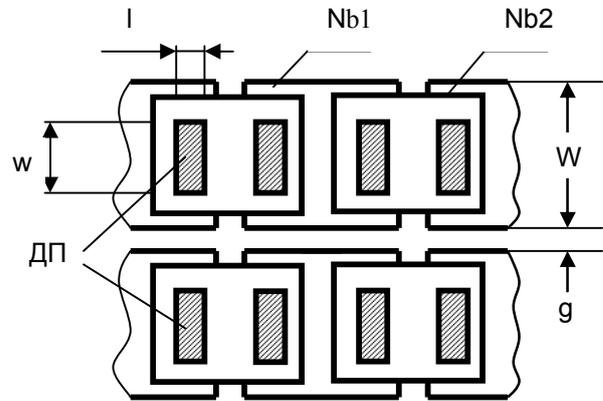


Рис. 1. Фрагмент конструкции СПИС на основе цепочки джозефсоновских переходов (ДП) Nb/Al/AIO_x/Nb

Волновое сопротивление копланарных полосок вычисляется по формуле [7]:

$$Z_0 = (120\pi/\epsilon_{\text{eff}}) \cdot (K(k)/K'(k)),$$

где ϵ_{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 величину W , расчетные значения Z и известные величины поверхностного сопротивления R_s в формулу [3] для коэффициента потерь

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

можно оценить ожидаемую величину потерь мощности СВЧ для диапазона частот $f = 70 \dots 90$ ГГц. Для интересующего диапазона частот величина поверхностного сопротивления ниобия составляет $R_s = 1,3 \cdot 10^{-3} \dots 2,4 \cdot 10^{-4}$ Ом [3]. В конструкции СПИС использованы туннельные переходы с размерами 20×50 мкм², ширина микрополосков составляла $W = 68$ мкм, ши-

рина щели $g = 4$ мкм. Расчеты показывают, что основным преимуществом конструкции на основе цепочек переходов, включенных в открытую щелевую линию, является значительно, в несколько раз, более низкий коэффициент потерь $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-4}$, обусловленный высоким импедансом $Z = 40 - 50$ Ом щелевой линии. Для сравнения, при тех же геометрических параметрах, 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 [2],[3].

Общий вид конструкции СПИС преобразователя частота-напряжение для эталона Вольты 1В представлен на рис.2. Микросхема состоит из цепочки $N = 2400$ джозефсоновских переходов $Nb/Al/AlO_x/Nb$, включенных в щелевую сверхпроводниковую линию. Линейный участок щелевой линии содержит по 400 переходов Джозефсона $Nb/Al/AlO_x/Nb$. Всего таких ветвей на кристалле образовано 6, таким образом, общее количество джозефсоновских переходов составляет $N = 6 \times 400 = 2400$. Длина каждого линейного участка с переходами Джозефсона $Nb/Al/AlO_x/Nb$ равна 6,4 мм.

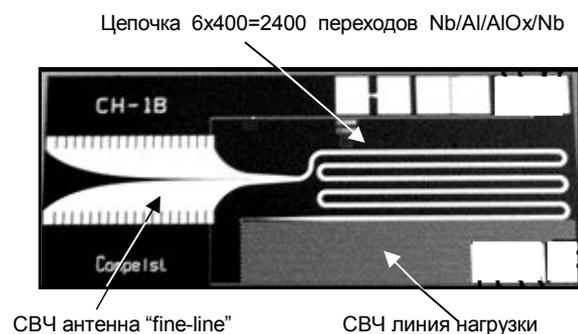


Рис. 2. Общий вид конструкции СПИС преобразователя частота-напряжение основе цепочки джозефсоновских переходов $Nb/Al/AlO_x/Nb$ (размер кристалла 15×6 мм²)

Преимуществом данной конструкции СПИС является отсутствие делителя мощности СВЧ – все 2400 переходов Джозефсона включены последовательно в одну цепочку, расположенную на выходе СВЧ антенны. Щелевая линия с переходами Джозефсона нагружена через переходной согласующий трансформатор на длинную сверхпроводниковую щелевую линию СВЧ нагрузки, закороченную на ее конце, образованную двумя ниобиевыми микрополосками шириной 10 мкм и расстоянием между ними 4 мкм. Суммарная длина сверхпроводниковой линии нагрузки составляет около 16 см. Экспериментальные исследования характеристик длинной сверхпроводниковой щелевой линии дают реальную величину потерь $\alpha = 0,2$ дБ/см. При использовании длинных микрополосковых щеле-

вых 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 сверхпроводниковом микрополоске щелевого типа, при длине порядка $l = 15 - 20$ см, могут составить достаточную величину $\alpha \approx 3$ дБ.

Имеется только один отвод от середины всей цепочки джозефсоновских переходов, т.е. имеется возможность наблюдать вольтамперную характеристику двух цепочек по 1200 переходов. Наблюдение вольтамперной характеристики всей микросхемы с 2400 переходами в благоприятном случае позволит получить на микросхеме устойчивые ступеньки при напряжениях выше 1 В.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИС

Вольтамперная характеристика (ВАХ) СПИС регистрировалась цифровым способом с использованием аналогового источника смещения. Из ВАХ, с погрешностью около 10%, оценивались основные характеристики образцов: критический ток I_c , нормальное сопротивление R_n , характерное напряжение $V_c = I_c \cdot R_n$. Под действием СВЧ-излучения диапазона 66 - 76 ГГц изучалась зависимость ширины квантовых ступеней $\Delta I(P_{rf})$ и критического тока $I_c(P_{rf})$ от СВЧ-мощности P_{rf} .

На рис. 3 представлена типичная вольтамперная характеристика СПИС для полной цепочки 2400 переходов $Nb/Al/AlO_x/Nb$.

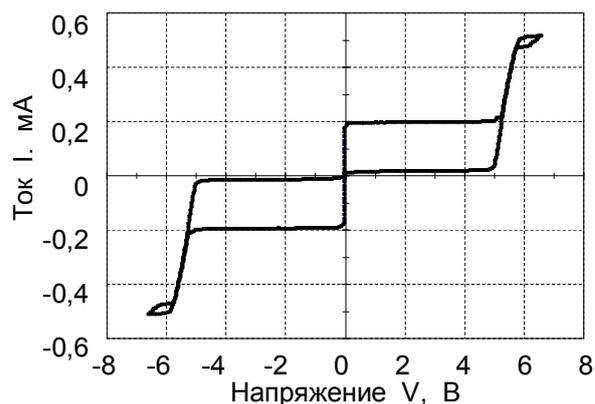


Рис. 3. Вольтамперная характеристика СПИС полной цепочки 2400 переходов $Nb/Al/AlO_x/Nb$

Критический ток переходов $Nb/Al/AlO_x/Nb$ находился в диапазоне $I_c = 0,2 - 0,3$ мА, плотность критического тока $J_c = 20 - 30$ А/см², нормальное сопротивление, пересчитанное на один переход $R_n = 5,6 - 6,6$ Ом. Характерное напряжение переходов $V_c = 1,2 -$

1,5 мВ. Суммарное напряжение энергетической щели для полной цепочки равно $\text{Sum } V_g = 6,2 - 6,5$ В. Величина токов утечки при напряжениях $V < V_g$ не превышала $I_{sg} = 10 - 15$ мкА. Таким образом, величина плазменной частоты, равная для данных переходов $F_p = 20 - 30$ ГГц, существенно меньше частоты накачки $F = 66 - 76$ ГГц, что удовлетворяет условиям п.1. На отдельных кристаллах разброс характеристик джозефсоновских переходов не превышает 10 %, что удовлетворяет основным требованиям для СПИС практического применения.

На рис.4 представлена вольтамперная характеристика СПИС под действием СВЧ излучения частотой $F = 66,7$ ГГц.

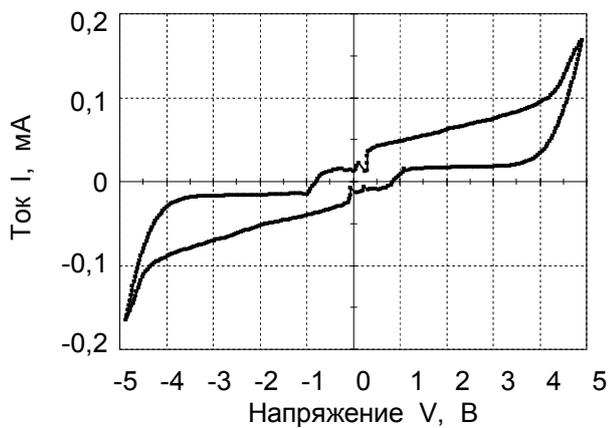


Рис. 4. Вольтамперная характеристика СПИС (2400 переходов) под действием СВЧ излучения частотой 66,7 ГГц, затухание в тракте 1 дБ, ~ 15 мВт на входе антенны *fin-line*

Токовые квантовые ступени на разных образцах занимают по оси напряжений область примерно $\pm (1,0 \dots 1,8)$ В. При напряжениях около 1 В амплитуда одиночных ступеней составляет $\Delta I_n (1 \text{ В}) = 40 - 50$ мкА. При этом ступеньки стабильные и вертикальные при относительно небольшой СВЧ мощности $P = 9 - 10$ Дб.

Простота настройки на ступень $V = 1,018$ В позволяет произвести калибровку стабилитронной меры Fluke 732В по образцу СПИС. На рис. 5 приведены результаты измерений выходного напряжения меры Fluke 732В из состава эталона ВЭТ13-12-04 (ВНИИМС) по джозефсоновской СПИС (№ В-3). Одна точка – среднее двух циклов измерений с реверсом полярности напряжения, один цикл содержит 20 отсчетов нуль-индикатора – цифрового нановольметра Keithley 182. Между первыми 5-ю точками и 6-ю следующими – перерыв около 30 мин. Один цикл с реверсом полярности продолжается 1-2 минуты. Результат измерений:

Среднее значение $V_f = 1,018091608$ В
СКО $S = 11$ нВ

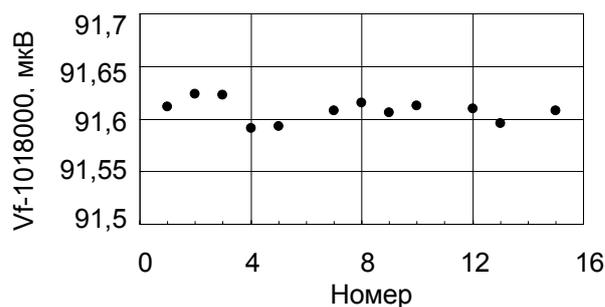


Рис. 5. Калибровка меры Fluke 732В по изготовленной СПИС на частоте $F = 73,8$ ГГц

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция и проведена проверка функционирования первых отечественных сверхпроводниковых интегральных схем практического применения на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/Al/AlOx/Nb (SIS типа) для эталона напряжения постоянного тока 1 В. Метрологические характеристики СПИС позволяют проводить калибровку стабилитронных мер напряжения и цифровых вольтметров. Погрешность сличения джозефсоновской меры на основе СПИС с традиционными мерами из состава государственного или вторичных эталонов не более $5 \cdot 10^{-8}$ (ГОСТ 8.027-01).

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. – М: Наука. 1985, - 320 с.
- [2] 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.
- [3] Poepel R., The Josephson Effect and Voltage Standards// *Metrologia*. – 1992. - V.29. - P. 153 - 174.
- [4] Kohlmann J., Mueller F., Behr R., Krasnopolin I.Y., and Niemeyer J. Improved 10 V Josephson voltage standard arrays // Paper presented at EUCAS'97.
- [5] Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А. И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я. Сверхпроводниковая ИС на основе переходов Джозефсона // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. - 2007. - № 6. - С. 90 – 93.
- [6] Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Крюк В.В., Самусь А.Н., Краснополин И.Я. Джозефсоновская СПИС эталона напряжения постоянного тока на основе SIS переходов // 6 Всероссийская научно-техническая конференция. Метрологическое обеспечение обороны и безопасности РФ. Материалы конференции. п. Поведенки, Московской обл. - 2006. - С. 27 – 30.
- [7] 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.