

# ЭТАЛОН НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ ИС НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДОВ ДЖОЗЕФСОНА

С распространением нанотехнологий возросли требования к точности измерений электрических величин. В первую очередь это касается промышленности и приборостроения. Многие технические проблемы решаются внедрением фундаментальных квантовых эффектов в метрологию. Работы в этой области ведутся и в России. На технологической базе ЗАО "Компэлст" и ФГУП "НИИФП им. Ф.В. Лукина" созданы первые отечественные сверхпроводниковые интегральные схемы (СПИС) на основе туннельных переходов Джозефсона типа Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb для эталона единицы напряжения с выходом более 1В.

Единица электрического напряжения постоянного тока обычно воспроизводится с применением эталонов, основанных на эффекте Джозефсона\*, – протекании тока между двумя сверхпроводниками, разделенными тонким барьером диэлектрика. Современные СПИС эталонов содержат цепочки из нескольких тысяч переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник туннельного типа [1–3]. Под действием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) переходов появляются ступени тока при напряжениях, которые определяются частотой излучения и номером ступени. Полученные квантованные значения напряжения подчиняются соотношению:

$$V_n = F \cdot n / K_J,$$

где  $F$  – частота СВЧ-излучения, которая контролируется системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с относительной погрешностью  $10^{-10}$ ;  $n$  – целое число;  $K_J$  – фундаментальная константа Джозефсона. Ступени на ВАХ распространяются вплоть до напряжения  $\sim 1$  В.

Для одиночного перехода максимальное воспроизводимое квантованное напряжение определяется соотношением

\* По решению Международного комитета мер и весов константа Джозефсона равна 483597,9 ГГц/В.

А.Гудков, А.Гогин,  
А.Козлов, А.Самусь, И.Краснополин

$n \cdot V_1 \approx 1$  В, где  $n$  – номер ступеньки. Константа  $V_1$  соответствует напряжению первой ступеньки при частоте 70 ГГц (примерно 145 мкВ). Для получения более высоких уровней переходы включают последовательно по постоянному току и последовательно-параллельно по переменному. Чтобы воспроизвести значение 1 В, требуется порядка 2000–3000 переходов, а 10 В – свыше 10000.

На характеристики СПИС накладываются жесткие ограничения. Оптимальное значение критической плотности тока  $j_c$  составляет 10–30 А/см<sup>2</sup>. Плазменная частота переходов  $F_p$  должна быть существенно ниже планируемой рабочей частоты (70 ГГц). В противном случае в переходах Джозефсона возникает динамический хаос.

Плазменная частота рассчитывается по формуле

$$F_p = (e j_c / \pi \hbar C_s)^{1/2},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $C_s$  – удельная емкость перехода.

Условие  $F \gg F_p$  гарантирует существование стабильных ступеней тока на ВАХ переходов. Хорошее качество туннельных переходов достигается при однородном распределении постоянного и переменного токов по сечению барьера. Оптимальными параметрами переходов являются: ширина 30–50 мкм; длина 10–20 мкм; критический ток  $I_c = 100$ –300 мкА; напряжение щелевой особенности  $V_g = 2,5$ –2,8 мВ; токи утечки при напряжениях ниже особенности  $I_{sg} < 10$  мкА. На ВАХ таких переходов амплитуда ступеней по току лежит в диапазоне 30–100 мкА при напряжении

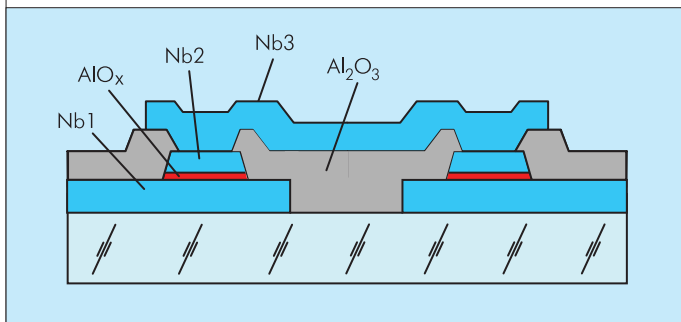
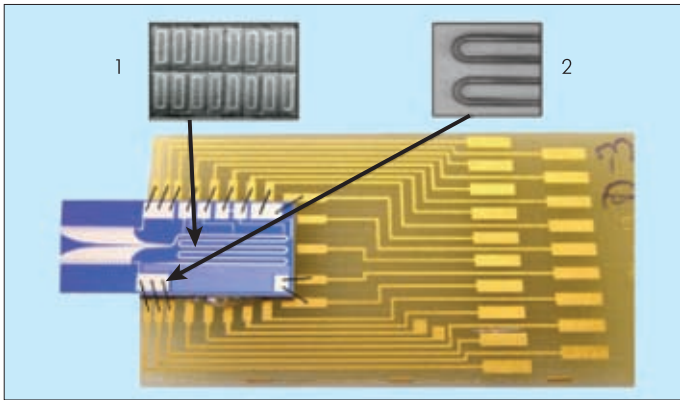


Рис. 1. Фрагмент структуры цепочки джозефсоновских переходов Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb

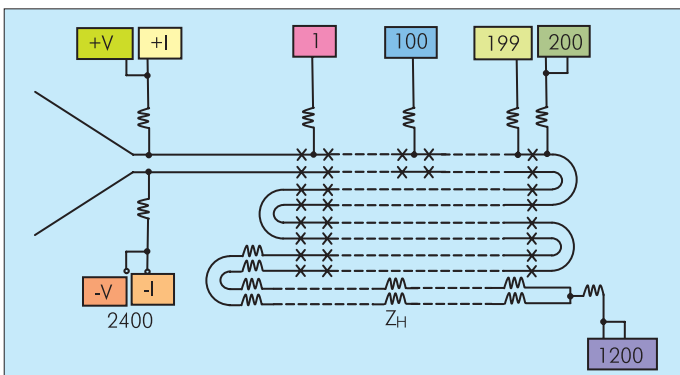


**Рис.2.** СПИС для эталона напряжения (15×6 мм), разваренная на печатную плату размером 33×16 мм: 1 – фрагмент цепочки джозефсоновских переходов Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb; 2 – фрагмент сверхпроводниковой линии нагрузки

до 1 мВ. То есть для микросхемы, рассчитанной на воспроизведение 1 В, потребуется 1500–2000 переходов.

Цепочки джозефсоновских туннельных переходов формируются в виде многослойной структуры с нижними и верхними электродами из тонких пленок ниобия (рис.1). Нижние электроды попарно соединяют туннельные переходы в виде отдельных полосок. Верхние электроды соединяют эти части в сплошную микрополоску, по которой ток течет через все переходы. Экспериментальные образцы СПИС ЗАО "Компэлст" представляют собой кристаллы размером в плане 15×6 мм<sup>2</sup> и содержат цепочки из 2400 джозефсоновских туннельных переходов Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb (рис.2). Две микрополоски размещены на плоскости с установленным зазором между ними. Они образуют щелевую сверхпроводниковую линию открытого типа. Структура Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb формируется в высоковакуумной установке магнетронного распыления SCR–650 фирмы ALCATEL. Нанесение пленок ниобия производится при остаточном давлении в камере  $P_{ост} = (3-5) \cdot 10^{-4}$  Па, толщина пленок составляет 0,2 и 0,1 мкм для нижнего (Nb1) и верхнего (Nb2) электродов соответственно. Толщина слоя алюминия варьируется в диапазоне 5–15 нм. Окисление алюминия производится термически посредством подачи в камеру кислорода при давлении  $P_{O_2} = 3 \cdot 10^4$  Па.

Данные СПИС также содержат антенну типа fin-line для согласования с волноводным трактом 4-мм диапа-

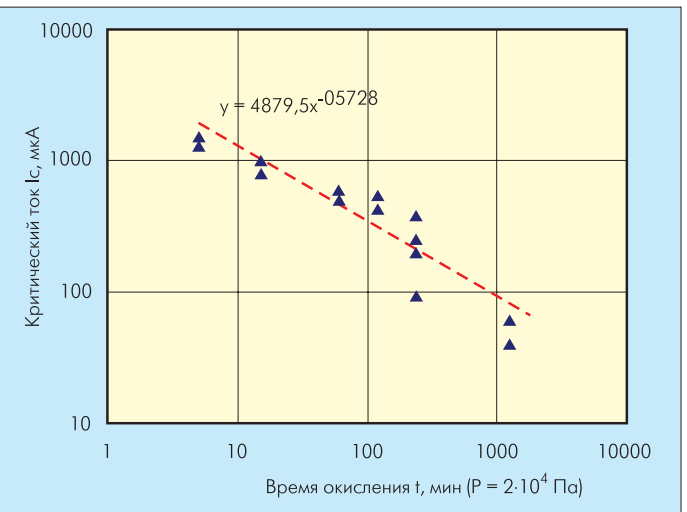


**Рис.3.** Эквивалентная электрическая схема СПИС эталона напряжения на 1 В

## ОБ АВТОРАХ

**Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н** – АО "Компэлст", ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина", тел: (495) 531-25-33, e-mail: gudkov@niifp.ru  
**Краснополин И.Я.** – ФГУП "ВНИИМС", тел: (499) 792-07-04, e-mail: krasnopolin@vniims.ru

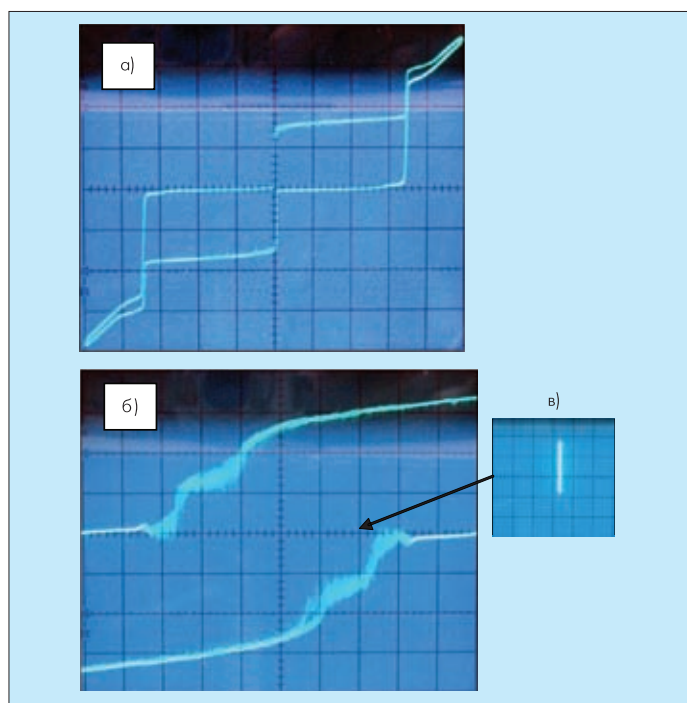
зона (рис.3). На выходе СВЧ-антенны две микрополоски шириной 60 мкм с зазором 4 мкм образуют открытую щелевую линию. Нижние электроды микрополосок состоят из двух цепочек по 200 переходов. Щелевая линия продолжается после поворота на 180° и состоит из шести таких участков. Таким образом общее количество джозефсоновских переходов составляет 2400.



**Рис.4.** Зависимость критического тока туннельных переходов Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Nb от времени окисления при давлении кислорода  $P = 2 \cdot 10^4$  Па

Открытая щелевая линия через согласующий трансформатор соединяется со сверхпроводниковой линией нагрузки длиной около 20 см. Она предназначена для полного затухания мощности рабочей частоты и не имеет туннельных переходов. Ширина микрополосок линии нагрузки составляет 10 мкм, зазор – 4 мкм.

В данной конструкции отсутствует делитель СВЧ-мощности, так как все 2400 переходов включены последовательно.



**Рис.5. ВАХ образца СПИС №С-9 (2400 переходов Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb):**  
**а) – автономный режим (X – 2 В/дел.; Y – 0,2 мА/дел.); б) – под дей-**  
**ствием СВЧ-излучения частоты 74,5 ГГц (X – 0,5 В/дел.; Y – 20 мкА/дел.);**  
**б1) – одиночная ступень при напряжении V<sub>n</sub>=1,2 В (X – 1 мВ/дел.;**  
**Y – 20 мкА/дел.)**

Другое преимущество этой схемы – отсутствие операции нанесения толстого (порядка 1–1,5 мкм) слоя диэлектрика и дополнительного слоя ниобия в качестве сверхпроводящего экрана [4] при изготовлении микросхем.

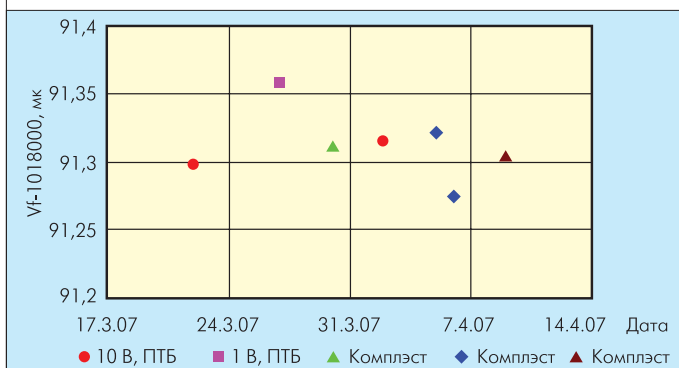
В ходе работ в ЗАО "Компэлст" были получены экспериментальные образцы СПИС, изучены их электрофизические характеристики [3, 5, 6]. Предметом отдельного исследования стало влияние толщины и времени окисления слоя Al на характеристики туннельных переходов.

Для получения туннельных переходов с плотностью критического тока  $j_c = 10\text{--}30 \text{ А/см}^2$  время окисления алюминия должно составлять не менее 4–6 часов (рис.4). При этом в ходе экспериментов рабочая частота превышала значение плазменной частоты более чем в три раза.

В изготовленных экспериментальных образцах СПИС при переходах Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb со значениями критического тока

$I_c = 300 \text{ мкА}$  и плотности критического тока  $j_c = 30 \text{ А/см}^2$  достигаются относительно большие (вплоть до 1,8 мВ) значения характерного напряжения  $V_c = I_c R_n$ . Максимальное напряжение щелевой особенности  $2\Delta_{Nb}$  на ВАХ одиночных туннельных переходов достигает 2,7–2,8 мВ. Значение  $V_g$  на границе Nb/Al может быть существенно ниже из-за подавления параметра порядка за счет эффекта близости. Степень подавления пропорциональна толщине слоя Al, оптимальное значение которой не превышает 5–7 нм. При этом избыточный ток  $I_{sg}$  (при  $V < V_g$ ) на ВАХ одиночных туннельных переходов составляет не более 5–10 мкА. Разброс критических токов на отдельных кристаллах переходов достаточно мал –  $\Delta I_c / I_c \leq 0\%$ .

В ходе исследований на образцах с цепочками из 2400 переходов в ФГУП "ВНИИМС" зарегистрированы квантовые ступени тока под действием СВЧ-излучения в диапазоне 60–79 ГГц при напряжениях 0–1,7 В (рис.5). Амплитуда ступеней при напряжении до 1,018 В составляет примерно 40–60 мкА. Частотная характеристика амплитуды ступе-



**Рис.6. Результаты калибровки выхода 1,018 В меры Fluke 732В по джоузефсоновским микросхемам разной конструкции (образцы 1 В и 10 В – РТВ, Германия; три образца 1 В – ЗАО "Компэлст")**

ней тока имеет осциллирующий характер, что указывает на наличие слабых отражений в СВЧ-линии ИС. Поэтому предмет дальнейших исследований – однородность распределения СВЧ-мощности по цепочке переходов.

Токовая ступенька на уровне 1,018 В не имеет резистивного наклона и достаточно стабильна, а ее время жизни составляет более одной минуты. Это позволяет использовать изготовленные СПИС для калибровки эталонных мер напряжения (рис.6). Разброс результатов калибровки, полученных на разных микросхемах, определяется только типичным шумом вида 1/F стабилитронной меры напряжения. Для меры 732В фирмы Fluke получено среднее значение напряжения  $V_f = 1,018091312 \text{ В}$  со среднеквадратичным отклонением 25 нВ.

Тенденции развития промышленности указывают на потребность роста точности измерений электрических величин примерно на порядок в ближайшие десять лет. Данная задача может быть решена на основе принятой в России с 2002 года новой поверочной схемы для средств измерений элект-



трического напряжения. Поверочная схема содержит: государственный первичный эталон (относительная погрешность  $1 \cdot 10^{-9}$ ); вторичные эталоны сравнения (погрешность  $2 \cdot 10^{-9}$ ) и эталон-копию (погрешность до  $3 \cdot 10^{-8}$ ); эталоны нулевого разряда (погрешность до  $5 \cdot 10^{-8}$ ). Все они могут быть укомплектованы отечественными СПИС с цепочками джозефсоновских переходов. Однако создание устойчивой технологии изготовления высококачественных СПИС для эталонов Вольты с большой степенью интеграции требует больших вложений как в технологическое оснащение, так и в научные разработки предприятий.

Работа проводилась при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, а также федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002 – 2006 годы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Poepel R.** The Josephson Effect and Voltage Standards. *Metrologia*, v.29, 1992, pp.153-174.
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 C354*, 2001, pp. 66–70.
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, pp.1009-1011.
5. **Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я.** Джозефсоновская СПИС эталона напряжения постоянного тока на основе SIS переходов. – Шестая Всероссийская научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение обороны и безопасности РФ": Материалы конференции. – пос. Поведники Московской обл. 2006. Тезисы докладов. Часть I, с.27 – 30.
6. **Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я.** Сверхпроводниковый преобразователь частота напряжение для эталона напряжения постоянного тока на основе джозефсоновских SIS переходов. – Всероссийская научно-техническая конференция. Методы и средства измерений электрических величин. – Туапсе, 2007. Тезисы докладов, с.63–67.



## Новое поколение

### встраиваемых систем

Компания Octagon Systems, один из мировых лидеров в производстве промышленных и встраиваемых IBM PC-совместимых компьютеров для тяжёлых условий эксплуатации, представляет новую линейку встраиваемых компьютеров CORE SYSTEMS. Эти полнофункциональные высокопроизводительные системы предназначены для решения задач, требующих высокой надежности при эксплуатации в жестких условиях. Выпускаемые в двух исполнениях – IND-CORE™ и MIL-CORE™ – системы станут идеальным решением для применения на транспорте, в оборонных системах, в системах безопасности и для задач АСУ ТП.

В базовой комплектации системы будут поставляться с процессорами до 1,8 ГГц и предустановленной памятью до 2 Гбайт, а также типовыми функциями ввода/вывода: Ethernet, USB, последовательные порты, видео. Расширить функциональность можно с помощью плат расширения в формате PC/104, PC/104-Plus и с помощью модулей XBLOCK. Для обеспечения гибкости при внедрении систем на действующие объекты предлагаются три варианта монтажных креплений: стандартная платформа, виброгасящая платформа и плата с функцией быстрого монтажа.

Применение передовых технологий в сочетании с оптимальным выбором компонентов по тепловым, электрическим и механическим параметрам в итоге позволяют получить высокопроизводительные системы с максимальной надежностью и возможностью работы в широком температурном диапазоне – от  $-40^{\circ}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  в зависимости от применяемого процессора.

*По материалам компании ПРОСОФТ.*