

02,01

Джозефсоновские контакты из высокотемпературных сверхпроводников для эталонов напряжения

© А.М. Клушин¹, Е.Е. Пестов^{¶1,2}, М.А. Галин¹, М.Ю. Левичев¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

[¶] E-mail: pestov@ipmras.ru

Представлены результаты исследования высокочастотных свойств многоконтактных джозефсоновских схем из высокотемпературных сверхпроводников и особенности их использования в эталонах напряжения.

Авторы благодарят за частичную поддержку гранты РФФИ № 15-02-05793, № 15-42-02469, № 16-32-00686, а также грант РНФ № 15-12-10020.

1. Введение

Решение многих задач в области разработки перспективных аналоговых и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники связывается в настоящее время с использованием многоэлементных джозефсоновских структур. Среди них особое место занимают когерентно осциллирующие цепочки джозефсоновских контактов, которые используются как при разработке генераторов джозефсоновского излучения, так и в эталонах напряжения [1–4]. Принципиальная важность последнего применения связана с тем, что неизвестны другие физические эффекты, которые могли бы составить конкуренцию эффекту Джозефсона в квантовой метрологии по точности воспроизведения единицы напряжения. Основой использования эффекта Джозефсона в квантовой метрологии является тот факт, что под воздействием внешнего электромагнитного поля с частотой f на вольт-амперной характеристике (ВАХ) контакта возникают ступени тока при напряжениях

$$V_n = n_f / K_J, \quad (1)$$

где $K_J = 2e/h = 483.5979 \text{ GHz/mV}$ — постоянная Джозефсона, а n — целое число. Квантованное напряжение (1), возникающее на одном джозефсоновском контакте, обычно мало, и для его увеличения необходимо включение последовательно большого числа синхронно осциллирующих контактов. Важнейшими условиями для синхронизации цепочек контактов являются малый разброс их параметров, а также наличие электродинамической системы, обеспечивающей эффективное и равномерное взаимодействие контактов с внешним электромагнитным излучением.

Современные технологии изготовления джозефсоновских контактов из ниобия позволяют синхронизировать внешним сигналом цепочки из нескольких десятков тысяч контактов. Эти микросхемы являются основой национальных эталонов напряжения во многих странах мира, включая Россию [4,5]. Однако необходимость охлаждения ниобиевых микросхем до температуры жидкого

гелия и связанные с этим высокие эксплуатационные расходы, а также ограниченное число фирм [6,7], выпускающих эти микросхемы, сдерживают применение указанных приборов в региональных центрах метрологии и стандартизации.

В настоящей работе рассмотрены условия синхронизации внешним сигналом цепочек шунтированных бикристаллических джозефсоновских контактов, работающих при температуре 77 К. Успешное решение данной задачи приведет к созданию новых эталонов, что расширит область применения этих приборов в квантовой метрологии и радиоизмерительной технике.

2. Джозефсоновская микросхема из бикристаллических контактов: технология и требования к параметрам

Как уже отмечалось выше, для увеличения выходного напряжения микросхемы V джозефсоновские контакты соединяют последовательно и пропускают через них общий ток смещения. Параметры контактов и условия их работы выбираются таким образом, чтобы на каждом контакте возникало напряжение (1), а суммарное напряжение было равно

$$V = NV_J, \quad (2)$$

где N — количество джозефсоновских контактов. Условие (2) накладывает жесткие ограничения на разброс параметров контактов и высокие требования к равномерности их облучения внешним сигналом с частотой f . Как было показано ранее [8,9], выполнение условия (2) возможно при работе на первой суммарной ступени тока ($n = 1$), если использовать джозефсоновские контакты с примерно одинаковыми сопротивлениями R и характерной частотой $f_c \geq f$, где $f_c = K_J I_c R$, а I_c — критический ток контакта. Выводы, полученные в [8] для контактов из ниобия, были подтверждены позднее при изучении цепочек джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [10].

На современном этапе только технология, основанная на использовании бикристаллических контактов, позволяет изготавливать из них цепочки на основе высокотемпературных сверхпроводников с требуемыми параметрами и воспроизводимым образом. Основные этапы этой технологии включают в себя выбор подходящей бикристаллической подложки, выращивание на этой подложке эпитаксиальной тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника, формирование рисунка схемы методами фотолитографии и ионного травления.

Для напыления использовались бикристаллические подложки из окиси иттрия, стабилизированной цирконием (YSZ), с углом разориентации кристаллических осей $2 \times 12^\circ$. На этих подложках размером 10×10 мм и толщиной 0.5 мм выращивалась при температуре 665°C эпитаксиальная пленка из высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) толщиной 100–300 нм, которая затем покрывается тонким слоем золота. Напыление двухслойной структуры проводилось в [11]. Пленка золота наносилась при температуре около 100°C в одном вакуумном цикле с YBCO, что гарантирует низкие удельные контактные сопротивления порядка $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ между двумя слоями.

Двухслойная пленочная структура используется для создания цепочек шунтированных бикристаллических контактов. Шунтирование необходимо для уменьшения разброса нормальных сопротивлений контактов, что, как отмечалось ранее, необходимо для реализации условия (2). Для создания микросхемы использовались стандартная фотолитография и травление ионами аргона. В результате формировалась цепочка джозефсоновских контактов в виде меандра, схематически изображенная на рис. 1. На рис. 2 в увеличенном масштабе показана часть этой цепочки. Джозефсоновские контакты образуются в месте пересечения мостиками бикристаллической границы. На участке подложки длиной примерно 8 мм располагались до 640 таких контактов.

Рассмотрим в рамках резистивной модели [12] влияние индуктивности шунта на вольтамперные характеристики (ВАХ) джозефсоновских контактов. В этой модели через контакт протекают три тока. Во-первых, джозефсоновский сверхпроводящий ток $I_c \sin \varphi$, где φ — разность фаз волновых функций. Во-вторых, ток через нормальное сопротивление контакта R_N . В-третьих, ток I_s через шунт, состоящий из сопротивления R_s и индуктивности L_s . Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение джозефсоновского контакта в этой модели, решалась численно для различных значений безразмерной индуктивности $\beta_L = L_s/L_c$, где $L_c = \Phi_0/2\pi I_c$ — индуктивность джозефсоновского контакта. На рис. 3 изображены расчетные зависимости нормированной амплитуды первой ступени тока $\delta \equiv \Delta I_1/I_c$ от нормированной частоты облучения $\Omega = f/f_c$ для оптимальных значений СВЧ-мощности. Сплошная линия соответствует известному случаю, следующему из резистивной модели для $\beta_L = 0$ [12]. При возрастании β_L (рис. 3) относительная амплитуда ступени слегка пре-

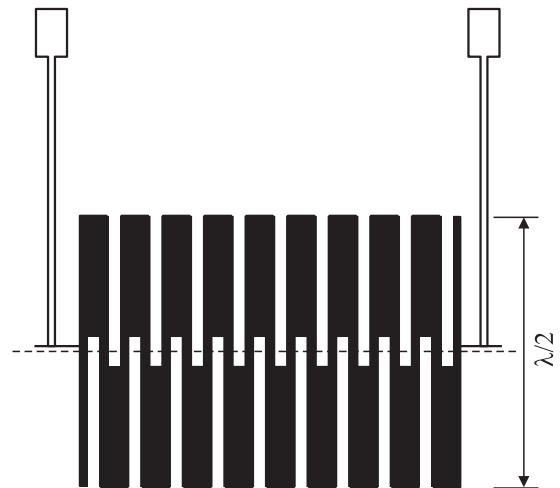


Рис. 1. Схематическое изображение топологии цепочки бикристаллических контактов.

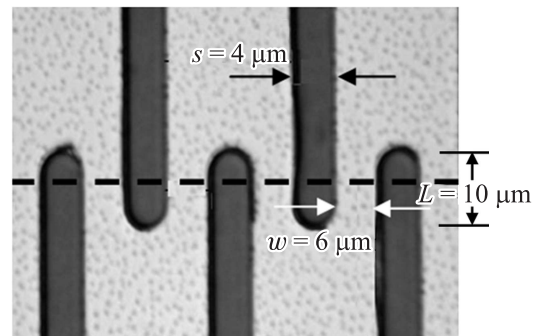


Рис. 2. Фотография структурированной пленки из ВТСП в форме меандра. Бикристаллическая граница показана пунктирной линией.

вышает соответствующие значения δ для $\beta_L = 0$ при низких частотах $\Omega < 0.2$. Однако при значениях $\Omega > 0.3$ относительная амплитуда ступени уменьшается по сравнению с классическим случаем. Относительное подавление первой ступени δ возрастает с β_L и достигает 20% для $\beta_L = 3$ и 35% для $\beta_L = 6$.

Для экспериментальной проверки полученных численным методом результатов была измерена зависимость δ от Ω для различных значений β_L . Для изменения индуктивности шунта мы варьировали как его ширину w от 3 до $18 \mu\text{m}$, так и длину от 20 до $4 \mu\text{m}$. Изменение индуктивности контакта L_c достигалось также благодаря варьированию критического тока в диапазоне от 0.1 до 5 мА за счет понижения температуры в дьюаре с жидким азотом в диапазоне от 80 до 65 К. В эксперименте, в отличие от численного моделирования (рис. 3), были измерены только максимальные значения амплитуд ступеней тока. Поэтому эти результаты сравниваются с расчетной зависимостью для $\beta_L = 0$ [12]. Результаты измерений представлены на рис. 4 для экспе-

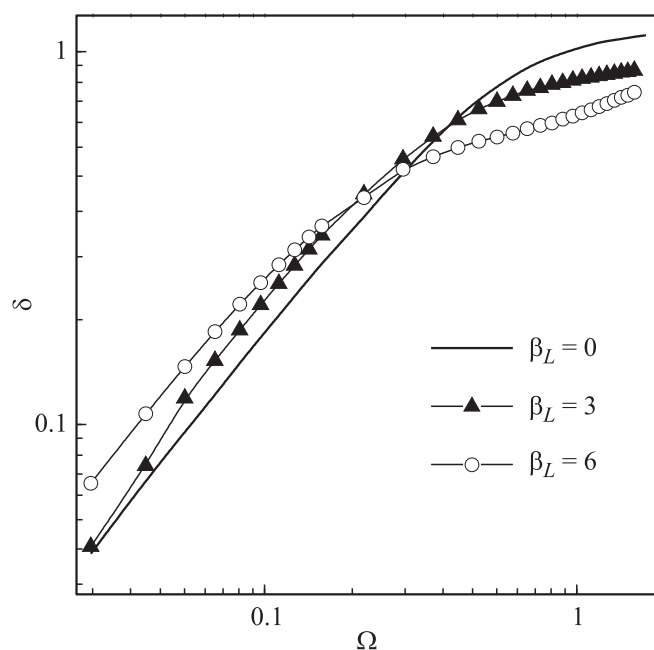


Рис. 3. Расчетные зависимости высоты ступени от частоты.

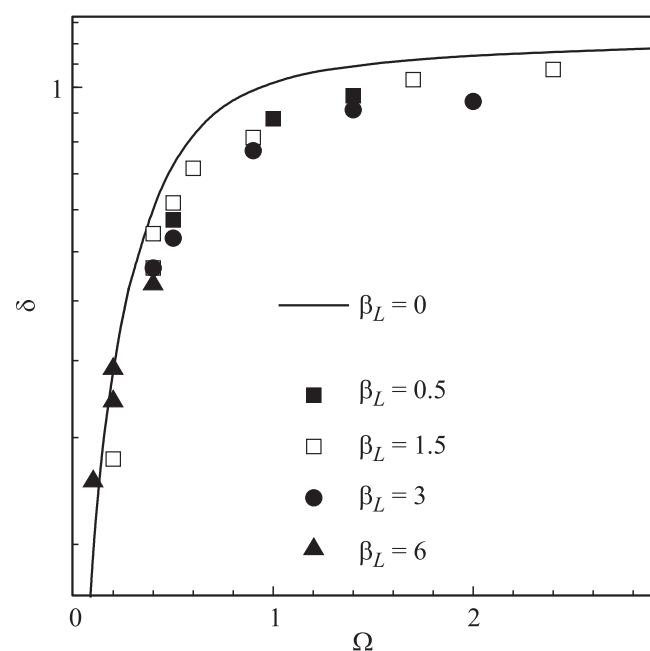


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетная (сплошная линия) зависимости высоты ступени от частоты.

риментальных значений β_L от 0.5 до 6. При малых значениях нормированной частоты $\Omega < 0.2$ высота ступеньки δ следует зависимости, рассчитанной для $\beta_L = 0$ (сплошная линия) даже для больших индуктивностей $\beta_L = 6$ (сплошные треугольники). Однако с ростом частоты отличие значений δ от кривой, вычисленной для $\beta_L = 0$, возрастает с Ω . Для малых значений $\beta_L \leq 1.5$ (квадраты и сплошные квадраты) измеренные значения δ

немного меньше расчетных величин для $\beta_L = 0$ при всех значениях Ω от 0.3 до 2.5. В соответствии с расчетами, приведенными на рис. 4, высота ступени уменьшается на 20% для $\beta_L = 3$ (сплошные кружки) и $\Omega = 1$.

Расчетные зависимости высоты первой ступени тока от мощности СВЧ-излучения приведены на рис. 5. Видно, что максимальная величина ступени падает с ростом β_L от $\delta = 1$ для $\beta_L = 0$ (сплошная линия) до $\delta = 0.65$ для $\beta_L = 6$ (треугольники). Также важно отметить усиление зависимости амплитуды ступени от СВЧ-мощности. Это приводит к тому, что возрастают требования к равномерности распределения СВЧ-тока вдоль цепочки последовательно включенных контактов, а также требования к равномерности распределения критических токов контактов в цепочке. Например, если мы примем величину разброса критических токов контактов в цепочке равной $\delta I = 2$ (см. рис. 5), то максимальная величина амплитуды суммарной ступени уменьшится с $\delta = 0.8$ для $\beta_L = 0$ до $\delta = 0.5$ для $\beta_L = 6$. Интересно отметить, что с ростом β_L амплитуда ступени не убывает до нуля в зависимости от мощности, как это характерно для случая $\beta_L = 0$. Эта особенность также наблюдалась экспериментально.

Приведенные на рис. 3–5 результаты показывают, что джозефсоновские контакты шунтируются эффективно как на постоянном, так и переменном токах только на низких частотах $\Omega \leq 0.2$. На этих частотах импеданс контакта определяется в основном активной частью $R_s > 2\pi f L_s$, и его поведение хорошо описывается резистивной моделью при $\beta_L = 0$. На высоких частотах $\Omega > 0.3$ ситуация осложняется. Импеданс шунта становится реактивным и определяется индуктивностью шунта. В этом случае эффективность шунтирования на переменном токе падает с ростом β_L , так как импе-

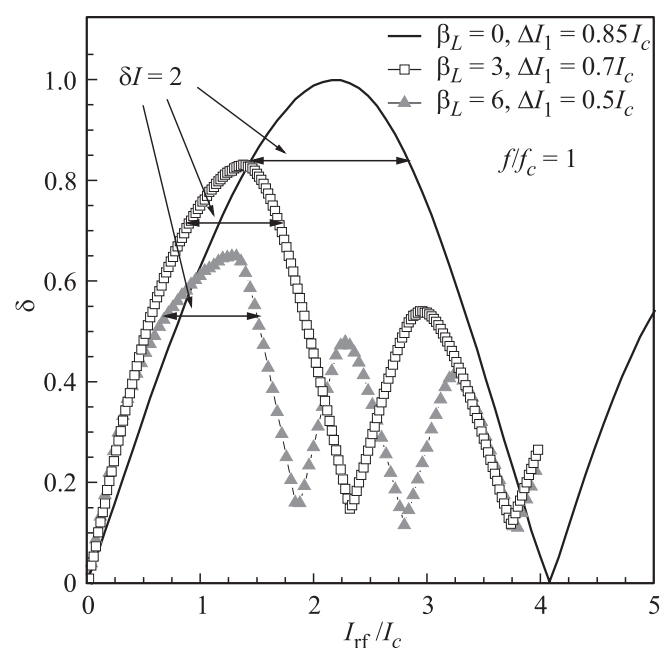


Рис. 5. Зависимость высоты ступени тока от мощности.

данс шунта на переменном токе становится больше, чем импеданс джозефсоновского контакта. Отметим, что значительное подавление ступеней тока с ростом β_L характерно только для контактов с малой емкостью, например, ВТСП контактов. В шунтированных контактах с большой емкостью уменьшение амплитуды ступенек не наблюдается до больших значений $\beta_L = 8$ [13,14].

Проведенные расчеты показали, что заметное отклонение от резистивной модели начинается при $\beta_L = 1.5$. Это условие ограничивает максимальное значение критического тока величиной $I_{c, \max} \approx 0.75\Phi_0/\pi L_s$. Для оценки $I_{c, \max}$ необходимо определить индуктивность шунта L_s , которая зависит от его геометрических размеров. Ширина мостика должна удовлетворять известному условию $w < 4\lambda_j$, где λ_j — джозефсоновская глубина проникновения, чтобы оставаться в пределе точечного контакта. Минимальная длина бикристаллического мостика определяется в основном точностью совмещения бикристаллической границы с серединой мостика при фотолитографии и обычно равна $4\mu\text{м}$. Для типичной величины поверхностной индуктивности $L_{\square} = 1\text{ рН}$ получаем $I_{c, \max} \approx 0.7\text{ мА}$. Это ограничение, во-первых, затруднит применение шунтированных контактов в программируемых эталонах Вольта, для надежной работы которых необходимо иметь $I_{c, \max} > 1\text{ мА}$. Во-вторых, оно может оказаться существенным, если учесть влияние тепловых шумов на наклон ступеней тока при азотных температурах. Данное ограничение может быть снято при использовании нешунтированных бикристаллических контактов.

3. СВЧ-зонд для облучения массивов бикристаллических контактов

Джозефсоновская структура размещалась в измерительном зонде, погружаемом в сосуд Дьюара с жидким азотом. Основу зонда составляет круглый волновод длиной $l = 65\text{ см}$, который в выбранном диапазоне частот $70\text{--}76\text{ GHz}$ является сверхразмерным (рис. 6, *a*). Оба конца волновода заканчиваются переходами на стандартный волновод WR12. К концу волновода, который погружается в сосуд Дьюара, подсоединен круглый рупор. После рупора размещается образец с джозефсоновскими контактами, поверхность которого ориентирована параллельно плоскости апертуры рупора. За образцом также может размещаться металлическое зеркало, позволяющее улучшить согласование внешнего излучения с джозефсоновской структурой. Конструкция зонда позволяет менять взаимное положение рупора, образца и зеркала, а также поворачивать рупор вокруг оси. Снаружи зонд герметично закрывается металлическим корпусом, а также экраном из пермаллоя для защиты микросхемы от внешних магнитных полей. Перед измерениями внутрь корпуса напускается гелий, который обеспечивает эффективное охлаждение микросхемы при погружении зонда в жидкий азот, а также защищает образец от воздействия влаги при отогреве.

К противоположному концу волновода подключается источник электромагнитного излучения. Он представляет собой твердотельный умножитель на 8, на который подается сигнал от синтезатора частот в диапазоне от 8.5 до 9.5 GHz . Полость умножителя имеет вид отрезка прямоугольного волновода с торцевой стенкой. Основная мода в полости возбуждается с помощью штыря, ориентированного вдоль узкой стенки волновода (рис. 6, *b*, вставка). Таким образом, полость умножителя, круглый волновод, рупор и металлическое зеркало образуют СВЧ-резонатор. Его длина зависит от размера промежутков между рупором, образцом и зеркалом и варьируется в пределах $73\text{--}77\text{ см}$ (рис. 6, *b*). Данный резонатор играет важнейшую роль в процессе согласования джозефсоновских контактов с внешним излучением. Для определения влияния частотного спектра резонатора мы исследовали зависимость амплитуды критического тока от частоты внешнего сигнала в диапазоне от 73 до 75 GHz . Значительное подавление критического тока наблюдалось на нескольких частотах, интервал между которыми был примерно равен $\Delta f = 200\text{ MHz}$. Данные осцилляции определяются именно указанным выше СВЧ-резонатором, так как эффективная длина $c/2\Delta f = 75\text{ см}$, где c — скорость света, с точностью до $2\text{--}3\%$ совпадает с расстоянием между торцевой стенкой умножителя и согласующим зеркалом. Учет изменения волнового числа в круглом и прямоугольном волноводах для данных оценок несущественен, так как поперечное волновое число основной моды круглого волновода много меньше волнового числа в среде, а длина отрезков прямоугольного волновода мала по сравнению с общей длиной резонатора. Обычно только на одной из частот мы наблюдали ступени тока максимальной амплитуды. На основании этих данных можно предположить, что только на этой частоте и возбуждается мода, в которой реализуется равномерное распределение электромагнитного поля на поверхности образца.

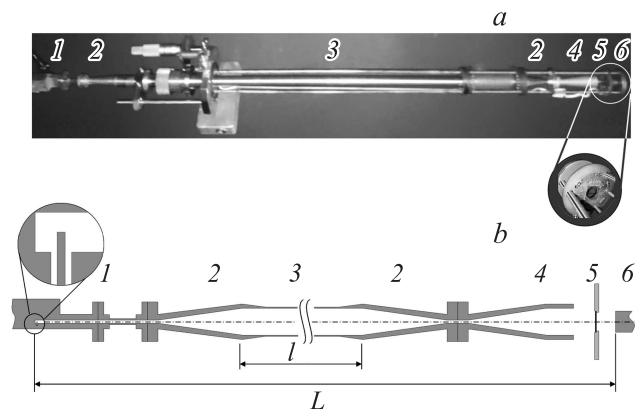


Рис. 6. Внешний вид (*a*) и схема (*b*) измерительного зонда: 1 — умножитель, 2 — волноводные переходы, 3 — круглый волновод, 4 — круглый рупор, 5 — образец на текстолитовом держателе, 6 — зеркало.

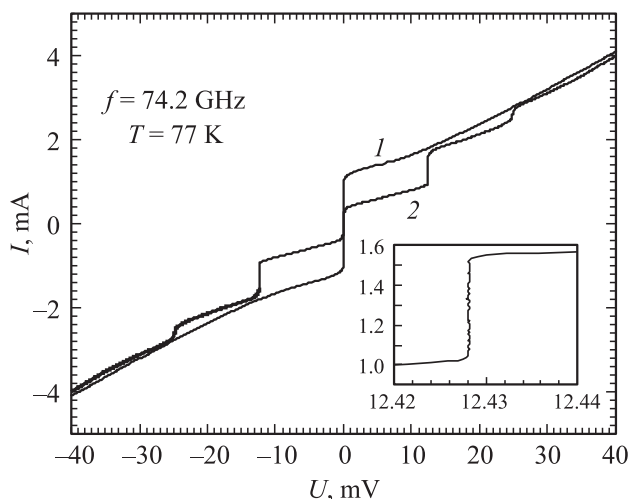


Рис. 7. ВАХ 81 джозефсоновского контакта без облучения (1) и при облучении (2) сигналом на частоте $f = 74.24$ GHz. На вставке в увеличенном масштабе показана ступенька тока при напряжении 12.428 mV.

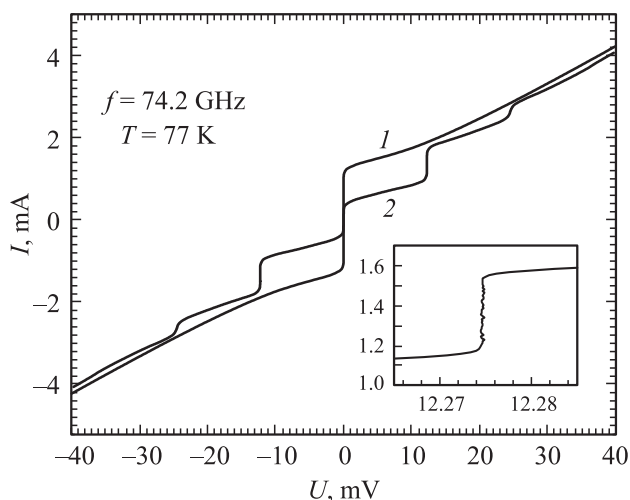


Рис. 8. ВАХ 80 джозефсоновских контактов без облучения (1) и при облучении (2) сигналом на частоте $f = 74.2$ GHz. На вставке в увеличенном масштабе показана ступенька тока при напряжении 12.275 mV.

4. Результаты исследования массивов бикристаллических контактов

С учетом проведенного анализа была разработана схема из 640 бикристаллических джозефсоновских контактов. Схема была изготовлена на подложке YSZ, толщина пленки YBCO равнялась 150 nm, а золотой пленки — 30 nm. Топология цепочек из шунтированных бикристаллических контактов (рис. 1, 2) была спроектирована с учетом оптимизации взаимодействия массива джозефсоновских контактов с внешним электромагнитным полем. Для этого размер меандра в направлении, перпендикулярном вектору электрического поля, был

выбран равным $\lambda_{\text{eff}}/2 = 0.48$ mm, где λ_{eff} — эффективная длина волны в подложке, диэлектрическая постоянная которой $\epsilon = 26$. Таким образом, каждый полосок меандра образует полуволновой резонатор на частоте порядка 75 GHz с максимумом тока в области джозефсоновского контакта [15].

На рис. 7, 8 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ) двух секций микросхемы, включающие 80 и 81 джозефсоновских контактов и работающие при температуре кипения жидкого азота. Среднее значение критического тока на обоих образцах было равно $I_c = 0.9$ mA, а среднее сопротивление шунтированных контактов равнялось $R = 0.14$ Ω . Характерное напряжение контактов $V_c = I_c R = 126$ μV являлось оптимальным для получения суммарных ступеней тока при облучении на частоте, близкой к 75 GHz.

При воздействии сигнала на частоте $f = 74.2$ GHz на ВАХ цепочек возникали суммарные ступени тока при

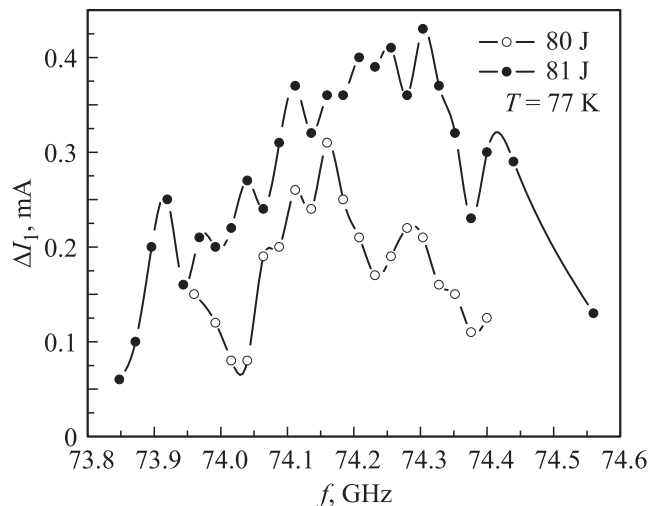


Рис. 9. Зависимость размаха ступеней по току от частоты облучения.

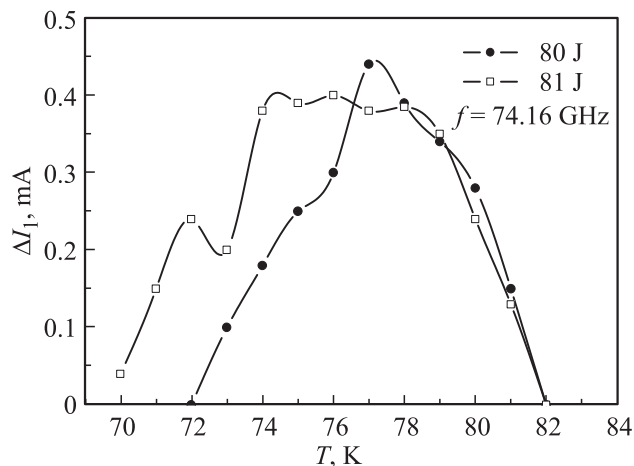


Рис. 10. Зависимость размаха ступеней по току от температуры.

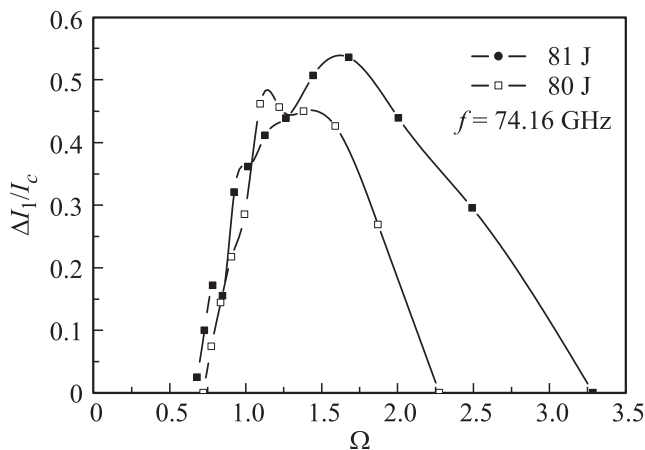


Рис. 11. Зависимость размаха ступеней по току от нормированной частоты облучения.

напряжениях 12.275 мВ и 12.428 мВ соответственно. При параллельном включении секций на выходе микросхемы возникало разностное напряжение $\Delta V_J \cong 153 \mu\text{V}$, которое может использоваться, для прецизионного измерения наклона ступенек. Измерения с разрешением порядка 1 нВ показали, что размах ступеней по току составлял примерно $100 \mu\text{A}$ на ВАХ обеих секций. При последовательном соединении этих секций суммарное квантовое выходное напряжение $V_J \cong 25 \text{ мВ}$ может использоваться в эталоне напряжения при калибровке резистивных делителей [16].

Мы исследовали также зависимость размаха суммарных ступенек по току от частоты (рис. 9) и температуры (рис. 10). Была выявлена сильная частотная зависимость высоты ступени, что осложняет настройку согласования цепочки контактов с внешним облучением. Одновременно ступени тока с амплитудой более $300 \mu\text{A}$ наблюдались в частотном интервале не более 100 МГц. С другой стороны, температурная зависимость была более слабая, и в диапазоне температур около 1 К можно было наблюдать ступени с большим размахом по току.

На рис. 11 приведена зависимость амплитуды ступенек от нормированной частоты облучения Ω , которая подтверждает выводы, полученные ранее в [8]. Наибольший размах ступеней по току наблюдается при $\Omega = 1-2$. Для синхронизации контактов внешним сигналом на частотах $\Omega < 1$ требуется меньший, чем реализован у нас, разброс критических токов и более равномерное распределение по амплитуде СВЧ-тока в цепочке. С другой стороны, при больших Ω амплитуда ступенек падает из-за недостатка поступающей на образец СВЧ-мощности, так как амплитуда требуемой мощности растет пропорционально Ω^2 [9].

5. Заключение

Были проанализированы требования к джозефсоновским контактам, выполнение которых необходимо для

синхронизации больших массивов контактов. Несмотря на неизбежный разброс критических токов δI_c и нормальных сопротивлений δR , синхронизация возможна при нормированных характерных частотах $\Omega \geq 1$ и малых величинах δR . Однако сильное шунтирование контактов приводит к ограничению максимального критического тока, что затрудняет использование контактов при азотных температурах. При использовании шунтированных контактов с большими критическими токами возрастают отличия ВАХ контактов от резистивной модели: уменьшаются амплитуды ступенек по току, а также увеличиваются требования к равномерности распределения СВЧ-тока. Эти особенности затрудняют синхронизацию больших массивов контактов и получение суммарных ступенек с большим размахом по току. Проведенный анализ показывает, что существует очень узкий диапазон параметров контактов и очень высокие требования к однородности распределения СВЧ-тока, при выполнении которых можно ожидать синхронизацию контактов и наблюдение суммарных ступеней по току. При последовательном включении двух секций микросхемы получены ступени тока при напряжениях $\sim 25 \text{ мВ}$, которые используются в эталоне напряжения с азотным уровнем охлаждения джозефсоновских контактов [16].

Авторы благодарят В.А. Маркелова, А.И. Елькину и Н.В. Рогожкину за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] G. Wang, Z. Zhang, Y. Lu, J. Xu, K. Zhou. Meas. Sci. Technol. **27**, 015003 (2016).
- [2] J. Lee, R. Behr, L. Palafox, A. Katkov, M. Schubert, M. Starkloff, A.C. Böck. Metrologia **50**, 612 (2013).
- [3] T.M. Benseman, A.E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, K. Kadowaki, J.R. Cooper, G. Balakrishnan. Supercond. Sci. Technol. **26**, 085016 (2013).
- [4] J. Kohlmann. „Quantum Standards for Voltage“. In: Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications / Ed. P. Seidel, Wiley-VCH (2015). P. 807–827.
- [5] В.С. Александров, А.С. Катков, А.С. Телитченко. Измерительная техника **3**, 6 (2002).
- [6] Hyprs Inc <http://www.hypres.com/>.
- [7] Supracon AG <http://www.supracon.com/>.
- [8] С.И. Боровицкий, А.М. Клушин, Т.Б. Коротина, А.Е. Парийский, С.К. Хоршев, П.А. Шишарин. Письма в ЖТФ **11**, 663 (1985).
- [9] R.L. Kautz. J. Appl. Phys. **78**, 5811 (1995).
- [10] А.М. Klushin, W. Prusseit, E. Sodtke, S.I. Borovitskii, L. Amantuni, H. Kohlstedt. Appl. Phys. Lett. **69**, 1634 (1996).
- [11] Ceraco GmbH, www.ceraco.de.
- [12] К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. Системы с джозефсоновскими контактами. МГУ, М. (1978). 446 с.
- [13] J. Hassel, H. Seppä, L. Grönberg, I. Suni. Rev. Sci. Technol. **74**, 3510 (2003).
- [14] Yu.M. Shukrinov, I.R. Rahmonov, K.V. Kulikov, P. Seidel. Eur. Phys. Lett. **110**, 47001 (2015).
- [15] А.М. Klushin, M. He, M.Yu. Levitchev, V.V. Kurin, N. Klein. J. Phys. Conf. ser. **97**, 012268 (2008).
- [16] Мера напряжения N4-21, <http://www.kvarz.com/general/N4-21.html>.