

06; 09

© 1990 г.

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СКВИДЫ С МИКРОМОСТИКОВЫМИ КОНТАКТАМИ

*И. Ю. Антонова, В. М. Закосаренко, Е. В. Ильичев, В. И. Розенфланц,
В. А. Тулин*

Сообщается об изготовлении пленочных сверхпроводящих микромостиков следующими способами: а) напылением через металлическую маску (мостики переменной толщины); б) формированием структуры с помощью электронной литографии (мостики Дайема); в) формированием структуры с использованием рельефа подложки и электронной литографии (мостик сверхпроводник—нормальный металл—сверхпроводник). На основе полученных структур реализованы гибридный и пленочный ВЧ сквиды.

Джозефсоновские туннельные контакты, используемые в настоящее время в сквидах, имеют значительную емкость, что вызывает гистерезис на вольт-амперной характеристике (ВАХ) [1]. Для получения однозначной ВАХ приходится шунтировать контакт нормальным проводником, что понижает его сопротивление. Мостиковые джозефсоновские структуры, как правило, имеют пренебрежимо малую емкость, однако до последнего времени они не получили широкого распространения, что в значительной мере связано с тем обстоятельством, что для получения приемлемых характеристик необходимо формирование перемычки с размером порядка длины когерентности сверхпроводника ($\xi(0)$ для ниобия 380 \AA [2]), что является чрезвычайно сложной задачей. В последнее время с развитием новых методов литографии появилась возможность изготавливать структуры с размерами, близкими к требуемым.

В настоящей работе исследовались различные микромостики и возможность их использования в радиочастотных сквидах.

В качестве материала для сверхпроводящих пленок был выбран ниобий, что обусловлено его достаточно высокой механической прочностью, устойчивостью к химическим воздействиям и удовлетворительными сверхпроводящими характеристиками. Подложками служили пластины диаметром 76 мм из кремния марки КДБ-10.

Использование кремниевых пластин определяется их широкой распространенностью в микроэлектронике, а также тем, что при комнатной температуре подложка имеет довольно высокую проводимость, шунтируя микромостик и предохраняя его от перегорания в процессе изготовления и монтажа, в то время как в жидком гелии кремний становится диэлектриком.

Напыление ниобия проводилось на установке высокочастотного магнетронного распыления. Давление остаточных газов перед напылением не превышало $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Рабочее давление аргона во время напыления составляло $5 \cdot 10^{-1}$ Па, плотность мощности на мишени 4.1 Вт/см^2 . Для удаления загрязнений с подложки проводилось предварительное ее травление в высокочастотном разряде. Для устранения захвата газовых примесей при росте пленки на подложку во время напыления подавалось отрицательное напряжение 40—60 В. Специального нагрева или охлаждения подложки при напылении не проводилось. Скорость роста пленки составляла 2—2.5 нм/с. Такие параметры напыления обеспечивали критическую температуру пленок T_c не ниже 9 К при отношении сопротивлений $\gamma = R_{300}/R_{10}$ не ниже 3.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) всех типов микромостиков проводились в жидком гелии при температуре 4.2 К четырехконтактным методом.

Мостики переменной толщины

Одним из самых простых способов формирования микромостиков является напыление через маску. Для этой цели мы использовали трехслойную свободную ферромагнитную маску [3] с рабочим зазором от 0.8 до 2 мкм. Вследствие конечной толщины маски в области микромостика создается «эффект ущелья», приводящий к меньшей толщине пленки в узком зазоре и к размыванию профиля мостика. На рис. 1 представлен профиль мостика, снятый на профилометре Talystep. Таким образом, реализуется мостик переменной толщины, который предпочтителен как джозефсоновский контакт [4]. Из-за деформации маски и ее

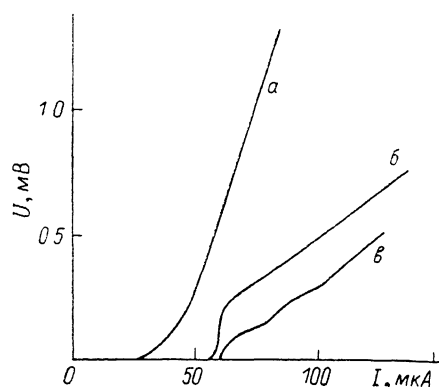
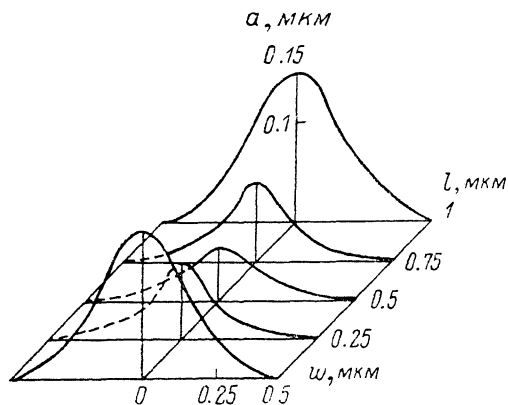


Рис. 1. Профиль микромостика, напыленного через маску, снятый с помощью профилометра Talystep.

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики микромостиков.

a — массивный микромостик, *b* — мостик Дайема, *в* — мостик типа *s-p-s*.

неплотного прилегания к подложке геометрические размеры микромостиков меняются от опыта к опыту. Кроме того, наложение маски на подложку затрудняет обезгаживание и плазменную чистку подложки, что приводит к уменьшению γ .

Указанные особенности приводят к большому разбросу параметров микромостиков на пластине (за один цикл на пластине $\varnothing 76$ мм формируется 70 микромостиков). Среди них с безгистерезисной ВАХ и с $I_c < 100$ мкА около 2% от общего числа. Пример ВАХ одного из мостиков показан на рис. *a*.

То обстоятельство, что реализуемые микромостики являются мостиками переменной толщины позволило использовать электролитическое анодирование для «доведения» микромостиков с $100 < I_c < 500$ до $I_c < 100$ мкА не подавляя сверхпроводимость «берегов». Анодирование проводилось в водном растворе NaNO_3 при стабилизации напряжения (константа анодирования ниобия ~ 10 А/В [5]). Капилляр с раствором и введенным в него электродом подводился к подложке так, чтобы в области микромостика образовалась капля электролита диаметром 1—2 мм. Между подложкой и электродом подавалось напряжение 5—30 В. Процесс анодирования прекращался, когда анодный ток становился меньше 1 мкА. Затем измерялась ВАХ микромостика и при необходимости снова проводилось анодирование с увеличением напряжения. Таким образом, были получены образцы с $I_c = 50$ мкА и $I_c R_N = 1$ мВ.

Мостики Дайема

Для получения микромостиков с субмикронными размерами была использована электронная литография. В процессе электронной литографии выполнялись следующие операции: 1) Нанесение на напыленную ниобиевую пленку

резиста ЭРП-40 либо ЭЛП-9. Толщина резиста составляла 0.3—0.4 мкм. 2) Сушка резиста при 170 °С, 30 мин для ЭРП-40 и 180 °С, 40 мин для ЭЛП-9. 3) Экспонирование структуры на усовершенствованном автоматическом электронном литографе, собранном на базе электронного микроскопа ZRM-12. Мостик получался при экспонировании одиночной линии с разрывом, дозами 10 Кл мкм. При определении ширины разрыва учитывалось уширение областей экспонирования за счет рассеяния электронов в резисте и в подложке (так называемый эффект близости в электронной литографии). Экспериментально подобраный оптимальный размер разрыва оказался равным 0.6 мкм. При этом получалась перемычка в резисте с размером 0.2×0.2 мкм. 4) Проявление в смеси метал-этилкетон-изопропиловый спирт в соотношении 1 : 3, 30 для ЭРП-40 и 15 с для ЭЛП-9 при 22 °С. Оставшийся слой резиста использовался в качестве маски для защиты участков пленки при последующем травлении. Травление проводилось в установке высокочастотного плазмо-химического травления в смеси газов $SF_6 + O_2$. Режимы разряда подбирались таким образом, чтобы энергия ионов составляла 10—100 эВ при суммарном давлении рабочего газа 1—6 Па. В этих условиях удовлетворительно воспроизводились структуры в пленке ниобия толщиной до 2000 Å. По описанной технологии были получены мостики с размерами 0.2 мкм.

У 10 % микромостиков Дайема $I_c = 20—100$ мкА и $I_c R_N = 0.3—0.5$ мВ. Пример ВАХ такого микромостика представлен на рис. 2, б.

Мостик типа сверхпроводник—нормальный металл—сверхпроводник (с—н—с)

Для получения с—н—с мостика мы использовали рельеф подложки. Технологические процессы травления кремниевых пластин хорошо разработаны в микроэлектронике и позволяют формировать рельеф глубиной до долей микрона

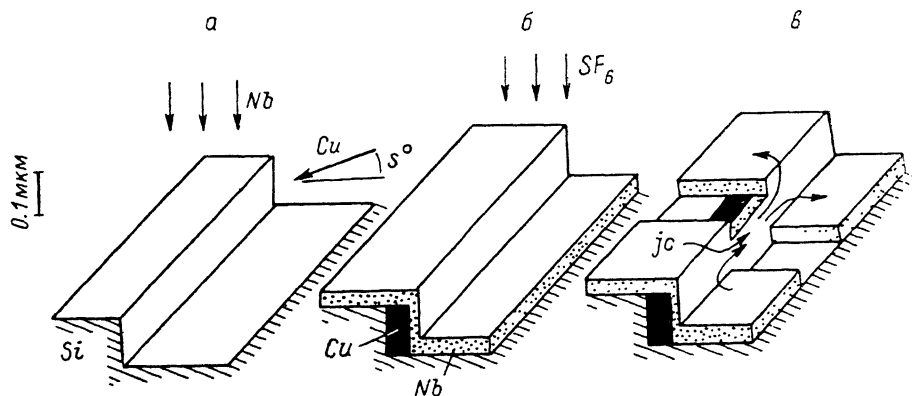


Рис. 3. Схематическое изображение с—н—с мостика на разных стадиях его приготовления.

с точностью 10 %. Используя для ограничения размеров микромостика заранее подготовленный рельеф возможно получение микромостиков с субмикронными размерами. Мы использовали ступеньку, сформированную на подложке, для ограничения ширины микромостика, длина которого определялась электронной литографией. Последовательность операций при этом была следующей. Сначала на подложку фотолитографией наносилась маска из фоторезиста ФП-383, представляющая собой чередование полос шириной 3 мкм с периодом 6 мкм. Затем через эту маску проводилось плазмо-химическое травление кремния на требуемую глубину в диапазоне 0.1—0.3 мкм. После снятия фоторезиста на подложке оставалась ступенька, схематически показанная на рис. 3, а. На эту ступеньку методом термического испарения в вакууме из вольфрамового испарителя напылялась пленка меди или золота. Подложка была ориентирована так, что направление пучка паров меди составляло угол $< 5^\circ$ с плоскостью подложки и было перпендикулярно ребру ступеньки. В результате на вертикальную

гравь ступеньки осаждалась пленка меди толщиной 70 нм, в то время как на поверхности подложки ее толщина не превышала 5 нм. После напыления нормального металла подложка помещалась в установку магнетронного напыления, в которой после предварительной чистки в плазме аргона и удаления слоя меди более 5 нм производилось магнетронное напыление ниобия. Толщина ниобиевой пленки составляла <0.2 мкм на поверхности подложки и около 50 нм на вертикальной грани ступеньки (рис. 3, б).

Подложка с пленкой покрывалась позитивным электронным резистом и проводилась сначала электронная литография одиночной линии пересекающей ступеньку, затем плазмохимическое травление ниобия. В результате этого ниобиевая пленка разделялась на два берега, соединенных микромостиком по грани ступеньки (рис. 3, в). Ширина мостика (<0.2 мкм) определяется высотой ступеньки, а длина (0.2—0.3 мкм) — шириной одиночной линии в электронном резисте. За счет эффекта близости сверхпроводимость в области микромостика частично подавлена, что, как известно [4], предпочтительно для создания джозефсоновского контакта.

Пример ВАХ с—н—с микромостика представлен на рис. 2, в. Характерные значения $I_c R_N = 0.3—0.5$ мВ.

Гибридный ВЧ скивид

Для проверки возможности использования микромостиков в качестве джозефсоновского контакта в высокочастотном (ВЧ) скиvide мы реализовали простую конструкцию гибридного ВЧ скиvida. Конструкция датчика скиvida отвечала следующим требованиям: достаточно надежному сверхпроводящему контакту пленка—массивный металл, учету температурных коэффициентов расширения материала тела датчика скиvida и пленки с подложкой, простой и быстрой смене микромостиков.

Датчик скиvida показан на рис. 4. Кремниевая подложка 3 с микромостиком и контактными площадками прижимается к ниобиевому телу скиvida 5 ниобиевыми пружинами 2. Для увеличения надежности прижимного контакта на теле скиvida сделаны специальные выступы 4, которые попадают на контактные площадки пленочной структуры. В отверстие в теле скиvida, образующем контур квантования, помещена катушка ВЧ накачки 6. Для уменьшения влияния внешних полей тело скиvida с катушкой и микромостиком помещено в корпус из ниобиевой фольги 1, одновременно служащий упором для пружин 2.

Характеристики ВЧ скиvidов измерялись на стенде, блок-схема которого показана на рис. 5. Все измерения проводились в жидком гелии при температуре 4.2 К. Катушка ВЧ накачки, индуктивно связанная с датчиком скиvida, являлась частью $L—C$ -контур с резонансной частотой 30 МГц и ненагруженной добротностью $Q=80$ в жидком гелии.

Контур запитывался током накачки (I_-) резонансной частоты от генератора Г4-151 (рис. 5). Напряжение на контуре (U_-) измерялось с помощью селективного микровольтметра SMV-11, подключенного к контуру через согласующий усилительный каскад (ПУ), собранный на транзисторе КП 307Д. Амплитуда тока накачки управлялась генератором Г6-28, медленно меняющееся (0.3—0.5 Гц) пилообразное напряжение с которого подавалось на вход амплитудной модуляции Г4-151 и одновременно на x -координату самописца Endim. Подавая на y -координату самописца сигнал с SMV-11, мы записывали зависимость напряжения на резонансном контуре от амплитуды тока накачки, т. е. высокочастотную вольт-амперную характеристику (ВЧ ВАХ) скиvida. С помощью источника питания (УИП), подключенного через сопротивление к резонансному контуру, мы меняли постоянный ток в катушке (I_-) ВЧ накачки и тем самым, магнитный поток Φ_- в контуре квантования датчика скиvida (рис. 5, а).

Для записи производной ВЧ ВАХ (зависимости dU_-/dI_- от I_-) на пилообразное напряжение от Г6-28 накладывалось напряжение от звукового генератора Г3-110 с частотой 300—700 Гц. Суммарный сигнал подавался на вход амплитудной модуляции Г4-151. Детектированный сигнал с SMV-11 поступал на селективный нановольтметр Униран-237 и далее на y -координату самописца (рис. 5, б).

Для получения производной сигнальной характеристики (зависимость dU_{\sim}/dI_{\sim} от I_{\sim}) амплитуда тока накачки фиксировалась, а пилообразное напряжение с генератора Г6-28, просуммированное с напряжением с Г3-110, подавалось на катушку ВЧ накачки скивда. В этом случае детектированный сигнал с SMV-11 поступал на селективный нановольтметр Униран-237 и далее через фазочувствительный детектор (ФЧД) на y -координату самописца. На x -координату подавалось напряжение с генератора Г6-28 (рис. 5, в).

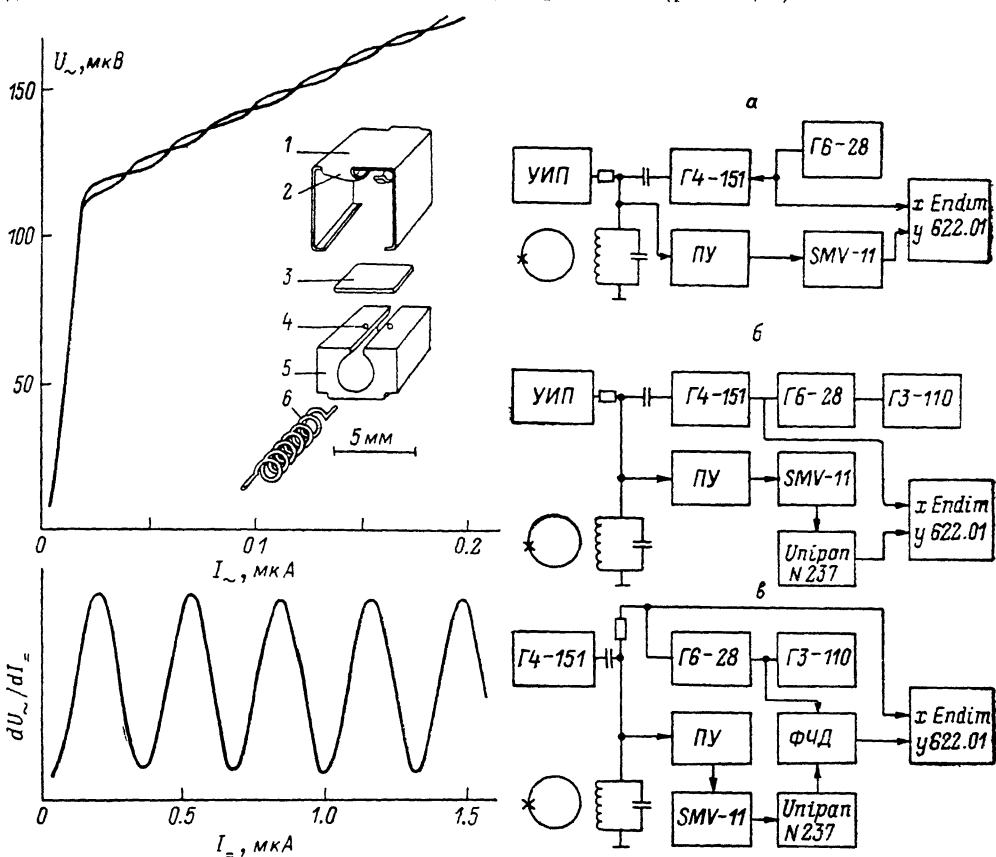


Рис. 4. Конструкция гибридного скивда, ВЧ ВАХ гибридного скивда для целого и полуцелого чисел квантов потока и производная сигнальной характеристики.

Рис. 5. Блок-схема стенда для записи ВЧ ВАХ (а), ее производной (б) и производной сигнальной характеристики (в) ВЧ скивда.

Кроме приведенных схем можно использовать также и другие коммутации приборов, при которых записываются производные dU_{\sim}/dI_{\sim} от I_{\sim} и dU_{\sim}/dI_{\sim} от I_{\sim} . Описанный выше стенд оказался очень удобен для исследования поведения слабых нелинейностей ВЧ ВАХ скивдов. Он использовался нами в работах [6, 7] при исследовании керамических ВЧ скивдов из металлооксидных сверхпроводников и позволил выяснить особенности их работы.

Микромостыки всех указанных типов оказались пригодными для изготовления ВЧ скивдов. На рис. 5 (сверху) представлены две ВЧ ВАХ гибридного скивда, ВАХ которого приведены на рис. 2, а. Верхняя и нижняя кривые (на первой ступени) соответствуют целому и полуцелому числу квантов потока в скивде. Расчет ВЧ ВАХ по теории [3] дает величину $\beta_c = 2\pi L_c I_c / \Phi_0 = 110$, коэффициент преобразования $\eta = dU_{\sim}/d\Phi_{\sim} = 1.7 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ и $k^2 Q^2 = 42$. Собственные шумы датчика оценивались по наклону на ВЧ ВАХ в соответствии с моделью, результаты которой приведены в [1]. Полученные значения $\langle \delta \Phi^2 \rangle^{1/2} / \sqrt{\Gamma \pi} \leq \leq 7 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \pi}$ оказались существенно меньше, чем шумы, определенные из измерений чувствительности прибора, которая составляет $5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \pi}$.

Экспериментально определенная шумовой поток соответствует шумовому напряжению на контуре 2 нВ. Таким образом, шумы определяются электроникой, их снижение возможно за счет уменьшения коэффициента связи K , который в данном случае не является оптимальным. На рис. 5 представлена также производная сигнальной характеристики гибридного сквида (снизу). Видно, что период по постоянному току составляет ~ 0.3 мкА/ Φ_0 .

Пленочный ВЧ сквид

После того как мы убедились в работоспособности микромостиков в гибридном сквиде, мы изготовили простейший вариант пленочного ВЧ сквида. После измерения ВАХ микромостика подложка с микромостиком обрезалась до размера 1.5×6 мм, с краев снимались фаски и подложка опылялась пленкой ниобия толщиной 0.4 мкм со всех сторон. При этом специальные металлические маски закрывали от запыления торцы подложки и область микромостика. В результате получался пленочный ВЧ сквид, схематически показанный на вставке к рис. 6.

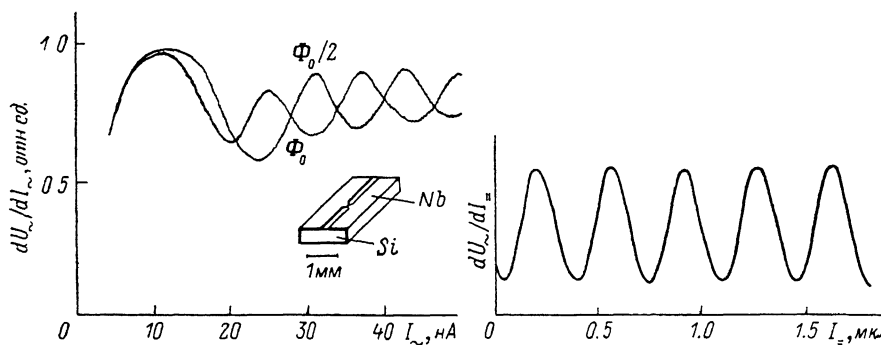


Рис. 6. Вид пленочного сквида, производная ВЧ ВАХ для целого и полуцелого чисел квантов потока и производная сигнальной характеристики.

Производная ВЧ ВАХ одного из пленочных сквидов, сделанного из микромостика переменной толщины с $I_c = 55$ мкА, представлена на рис. 6. Верхняя и нижняя кривые соответствуют целому и полуцелому числам квантов потока в сквиде. На рис. 6 приведена также производная сигнальной характеристики сквида. Период по постоянному току в этом случае составляет 0.3 мкА/ Φ_0 . Чувствительность по магнитному потоку такая же, как и у гибридного сквида, $5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \text{Гц}}$, шумы определяются шумами электроники.

Изготовленные пленочные ВЧ сквиды по приведенным показателям уступают лучшим образцам сквидов с точечными контактами, однако благодаря высокой механической прочности и обусловленной этим надежности и стабильности при многократном термоциклировании изготовленные ВЧ сквиды представляют практический интерес.

Мы благодарны Б. И. Черному за изготовление масок.

Список литературы

- [1] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. Физика и применения. М.: Мир, 1984.
- [2] Maxfield B. W., McLean W. L. // Phys. Rev. A. 1965. Vol. 139. P. 1515.
- [3] Черный Б. И. // Электронная пром-сть. 1980. Вып. 3. С. 24.
- [4] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. М., 1978.
- [5] Диденко А. П., Севрюкова Л. М., Ятис А. А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ структуры. М.: Энергоиздат, 1981. 146 с.
- [6] Закосаренко В. М., Ильичев Е. В., Никифорова Т. В., Тулин В. А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 13. С. 1389.
- [7] Закосаренко В. М., Ильичев Е. В., Тулин В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 140.