

05; 06

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОЙ ОДНОКВАНТОВОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

А. Н. Выставкин, В. К. Каплуенко, В. П. Кошелец, К. К. Лихарев,
В. В. Мизулин, О. А. Муханов, Г. А. Овсянников,
В. К. Семенов, И. Л. Серпученко

Разработана и экспериментально исследована тестовая структура для проверки основных узлов недавно предложенной резистивной одноквантовой логики. Структура включает генератор одноквантовых импульсов, отрезок нейристорной линии для их передачи, усилители для размножения и объединения импульсов, а также универсальный логический элемент ИЛИ—НЕ. Функционирование схемы проверялось измерением постоянных напряжений \bar{V} на различных элементах структуры, величины которых связаны с частотами проходящих информационных импульсов соотношением Джозефсона $f = \bar{V}/\Phi_0$. Структура была выполнена с использованием сверхпроводниковых переходов на основе пленок ниобия с минимальной площадью 10×10 мкм и плотностями критического тока $j_c = 2 \div 5 \cdot 10^2$ А/см², шунтированных внешними резисторами с сопротивлениями ~ 1 Ом, что обеспечивало малые значения нормированной емкости переходов ($\beta_c \leq 1$) и относительно большие значения характерного напряжения $I_c R_N \simeq 200 \div 500$ мкВ.

Испытания показали работоспособность всей тестовой схемы на тактовых частотах до 30 ГГц, а самого логического элемента — до 48 ГГц.

Введение

В последнее время значительный интерес вызывают цифровые джозефсоновские структуры, в которых информация хранится в виде одиночных квантов магнитного потока Φ_0 , а передается в виде коротких импульсов напряжения с площадью

$$\int V(t) dt = \Phi_0. \quad (1)$$

В отличие от других известных логических схем на одиночных квантах магнитного потока (использующих линии передачи на распределенных переходах [1], регистра сдвига типа магнитного челнока [2] или параметрические квантроны [3, 4]) в рассматриваемой структуре одноквантовые импульсы передаются по резистивным, а не чисто индуктивным линиям, и затем последующие элементы цепи производят их регенерацию до номинального уровня (1). Такой принцип дает возможность передавать импульсы на неограниченное расстояние, по мере надобности производя их регенерацию специальными усилителями. В качестве таких усилителей могут использоваться одиночные джозефсоновские переходы с малой емкостью ($\beta_c \leq 1$), смещенные постоянным током I_0 , меньшим критического значения I_c (можно использовать и более сложные структуры с такими же переходами [5–8]).

Первым устройством, в котором использовался этот принцип кодирования информации, был двоичный счетчик для прецизионного аналого-цифрового преобразователя. Это специализированное функциональное устройство было предложено Сильвером с сотрудниками [9] и позднее реализовано в работах [5, 10], при этом было продемонстрировано его функционирование на частотах до 100 ГГц [10].

Успех в разработке этих простейших элементов сделал актуальной проблему построения более сложных логических устройств. В работе [5] было отмечено, что, используя двухконтактный интерферометр на переходах с малой емкостью, можно построить логический элемент И. Однако предложенный элемент практически нереализуем, так как его работа основана на временном совпадении сверхкоротких (пикосекундных) импульсов. Более того, даже реализация надежного элемента И недостаточна для создания полной системы логических функций.

В работах [7, 8, 11] было показано, что такую полную систему можно реализовать, если использовать более оптимальный принцип представления цифровой информации. В элементах этой системы одноквантовые импульсы передаются по двум линиям. По первой из них передаются информационные импульсы, а по второй тактовые, причем логическая единица представляется на-

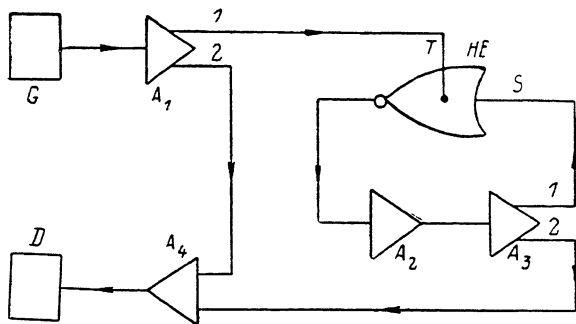


Рис. 1. Блок-схема исследуемой тестовой резистивной одноквантовой структуры, которая состоит из генератора G , усилителей-расширителей A_1 , A_3 , усилителя A_2 , усилителя-объединителя A_4 , детектора D и логического элемента ИЛИ—НЕ.

личием, а логический ноль — отсутствием информационного импульса между двумя тактовыми. Такое представление информации позволяет создать полную систему логических структур, включая элемент НЕ—ИЛИ, наиболее критичный при разработке цифровых схем на основе джозефсоновских переходов. Численный расчет таких структур показал [7, 8, 11], что даже с использованием джозефсоновских переходов с характерным напряжением $V_c = I_c R_N \approx 500$ мкВ такие «резистивно-одноквантовые» схемы с питанием постоянным током могут иметь тактовую частоту до 60 ГГц, что намного выше, чем любые ранее известные логические устройства.

Целью настоящей работы являлось проведение экспериментальных исследований базисных компонентов резистивно-одноквантовой логики, включая элемент НЕ, который в этой логике практически совпадает с элементом ИЛИ—НЕ, достаточным для выполнения любых логических операций.

1. Идея и блок-схема эксперимента

На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной логической структуры. Периодические одноквантовые импульсы с генератора G регенерируются и размножаются буферным каскадом (усилителем-расширителем) A_1 , с выхода 1 которого эти импульсы поступают в качестве тактовых на элемент НЕ. Если в промежутке между этими двумя тактовыми импульсами на информационный вход S инвертирующего элемента не поступает аналогичного импульса, то тактовый импульс проходит на выход элемента. Выходной импульс задерживается в усилителе A_2 , размножается усилителем A_3 и с его выхода 1 поступает на информационный вход S элемента НЕ. Если время задержки этой цепи меньше, чем период тактовых импульсов, то следующий такой импульс не пройдет на выход. Таким образом, при нормальном функционировании частота импульсов, проходящих через усилитель A_2 , составляет половину от исходной частоты f_0 импульсов, проходящих через усилитель A_1 . Эти две серии импульсов объединяются усилителем A_4 , и, таким образом, на детектор D поступают импульсы с частотой $3/2f_0$.

2. Принципиальная схема

На рис. 2 показана принципиальная схема исследуемой логической структуры. На этом рисунке не показаны вспомогательные элементы схемы: резисторы, шунтирующие джозефсоновские туннельные переходы; индуктивности, неизбежно существующие при соединении элементов; джозефсоновские переходы больших размеров, обеспечивающие сверхпроводящие контакты между пленочными слоями схемы. Кроме того, не показан резистивный делитель общего тока питания $I_{\text{пнт}}$, который обеспечивал токи смещения, показанные на рис. 2 стрелками, кроме тока генератора $I_{\text{гн}}$, выведенного отдельно. Помимо этого имелась возможность независимой подстройки каждого из джозефсоновских элементов схемы.

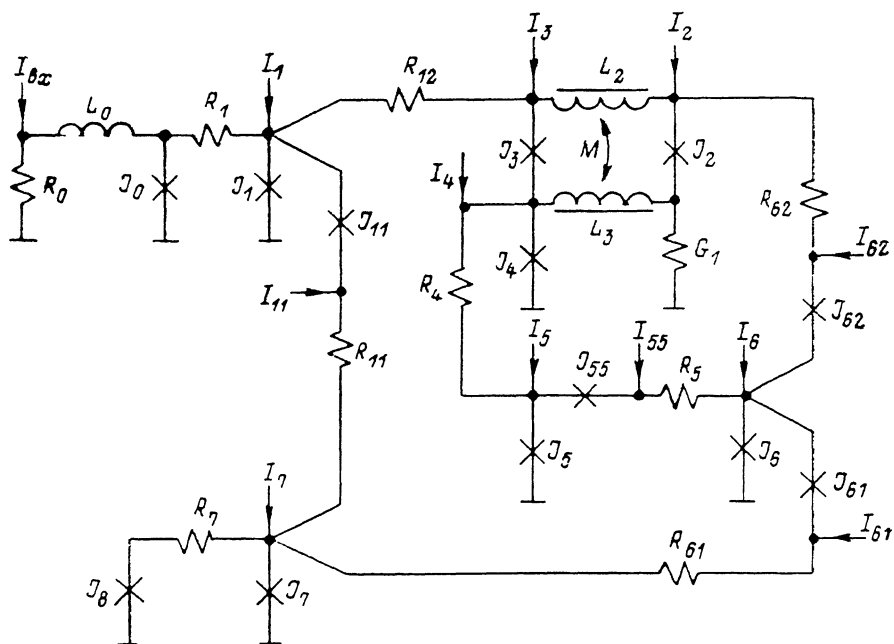


Рис. 2. Принципиальная схема тестовой структуры.

Стрелками обозначены токи питания, а также точки измерения постоянных напряжений V_i .

Для наглядного представления процессов, происходящих при работе схемы, на рис. 3 показаны основные эпюры напряжений, которые были получены при численном моделировании с помощью программы КОМПАСС [12].

Генератор G представляет собой джозефсоновский переход J_0 , на который при помощи индуктивности L_0 и сопротивления R_0 подается постоянное напряжение V_0 . Это напряжение вызывает генерацию переходом J_0 одноквантовых импульсов (1) с частотой $f_0 = V_0/\Phi_0$. Эти импульсы поступают на усилитель-расширитель A_1 (рис. 3, а), состоящий из джозефсоновских переходов J_1 и J_{11} , постоянный ток питания которых меньше критического значения. Поступающий на переход J_1 одноквантовый импульс увеличивает ток через него до значения выше критического, что вызывает изменение на 2π джозефсоновской разности фаз на переходе J_1 , т. е. происходит регенерация импульсов. Постоянный ток смещения через переход J_{11} выбран таким образом, что этот переход обеспечивает однонаправленное распространение импульсов от J_1 к усилителю-объединителю A_4 (переход J_7). Аналогичные импульсы через резистор R_{12} поступают на тактовый вход элемента НЕ.

Логический элемент НЕ состоит из двухконтактного интерферометра (элементы J_2, J_3, L_2, L_3), перехода J_4 и шунта G_1 . При определенных токах смещения (I_3 и I_2) интерферометр обладает двумя устойчивыми состояниями, которые различаются направлением тока, циркулирующего в кольце интерферометра.

В зависимости от состояния интерферометра ток в переходе J_3 либо близок, либо существенно меньше критического значения. Поэтому тактовый импульс, воздействующий на пару включенных последовательно переходов J_3, J_4 , будет вызывать 2π -скачок разности фаз одного из этих переходов и тем самым будет либо менять состояние интерферометра, либо проходить на выход схемы НЕ (рис. 3, *г*).

Этот выходной импульс поступает через резистор R_4 на усилитель A_2 , образованный переходами J_5 и J_{55} , раздваивается усилителем-расширителем A_3 (переходы J_6, J_{61}, J_{62}) и через R_{62} передается на информационный вход инвертора (рис. 3, *б*), а через R_{61} на объединяющий усилитель A_4 . Усилитель состоит из джозефсоновского перехода J_7 , который смещен постоянным током $I_7 < I_c$

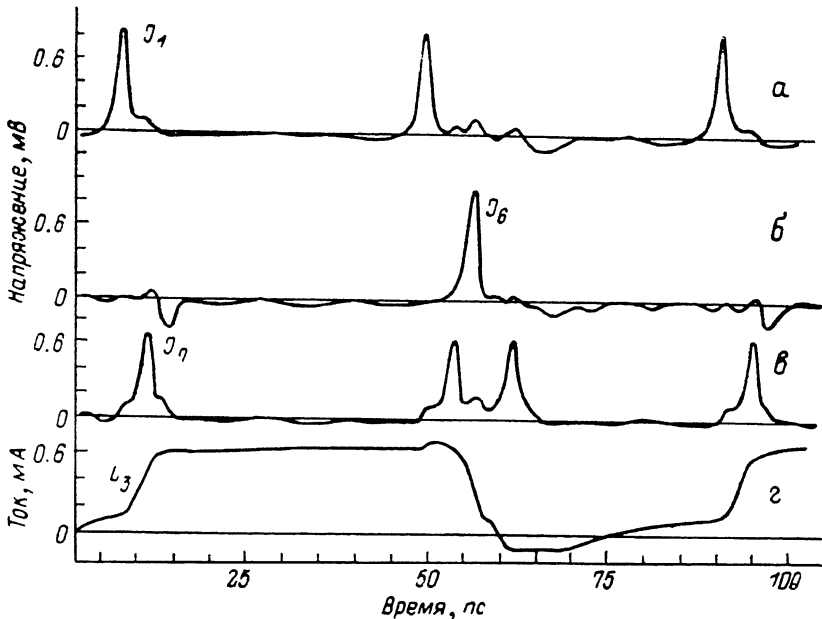


Рис. 3. Эпюры напряжений, полученных в результате численного моделирования, на джозефсоновских переходах J_1, J_6, J_7 и эпюра тока, текущего через индуктивность L_3 .

При моделировании были заданы следующие параметры: $I_{c0}=I_{c1}=I_{c6}=I_{c7}=1$ мА, $I_{c4}=I_{c8}=0.75$ мА, $I_{c11}=I_{c2}=I_{c3}=I_{c5}=I_{c61}=I_{c62}=0.5$ мА, $I_1=I_{11}=I_3=I_{61}=I_{62}=I_5=0.4$ мА, $I_7=0.93$ мА, $I_{55}=I_4=I_2=I_4=0.2$ мА, $I_3-I_2=0.28$ мА, $R_1=R_{12}=R_{11}=R_5=0.2$ Ом, $R_6=0.3$ Ом, $R_7=0.5$ Ом, $R_{61}=1/G_1=R_4=0.25$ Ом, $R_{62}=0.1$ Ом, $L_0=8$ пГн, $L_2=L_3=11$ пГн, $M=0.6L_2$. Напряжение на генераторе $V_0=50$ мкВ, что соответствует частоте джозефсоновской генерации $f \approx 25$ ГГц.

и нагружен через резистор R_L на несмещенный переход J_L . Этот узел служит для объединения импульсов, поступающих через резисторы R_{11} и R_{61} (рис. 3, *в*), для их поглощения в цепи R_L, J_L , а также в качестве детектора D .

Одноквантовые импульсы (1) имеют весьма малую длительность и амплитуду (в нашем случае соответственно 3 пс и 0.8 мВ), поэтому для их непосредственного наблюдения требуется достаточно сложное экспериментальное оборудование [13]. В данной работе использовалась методика, обычно применяемая при исследовании одноквантовых джозефсоновских структур [5, 10]: для определения частоты следования одноквантовых импульсов f_i через данный переход проводится измерение постоянного напряжения на нем $\bar{V}_i = \Phi_0 f_i$. Таким образом, признаком правильного функционирования исследуемой структуры является то, что в некотором интервале напряжений генератора выполняются следующие соотношения в точках схемы:

$$\begin{aligned} V_0 & \text{ на } J_1, J_{61}, \\ 1/2 V_0 & \text{ на } J_2 - J_6, J_{11}, \\ 3/2 V_0 & \text{ на } J_7. \end{aligned} \quad (2)$$

3. Методика изготовления и конструкция тестовой структуры

На рис. 4 показаны фотографии исследуемой структуры до и после формирования верхнего электрода. Структура выполнена с минимальной шириной линии 10 мкм и с использованием всего двух сверхпроводниковых слоев. Это обу-

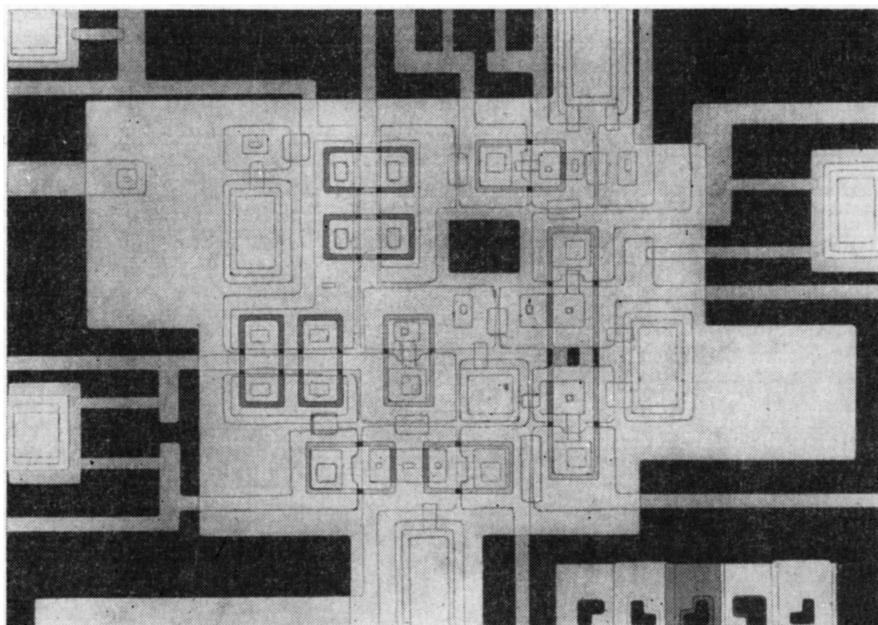
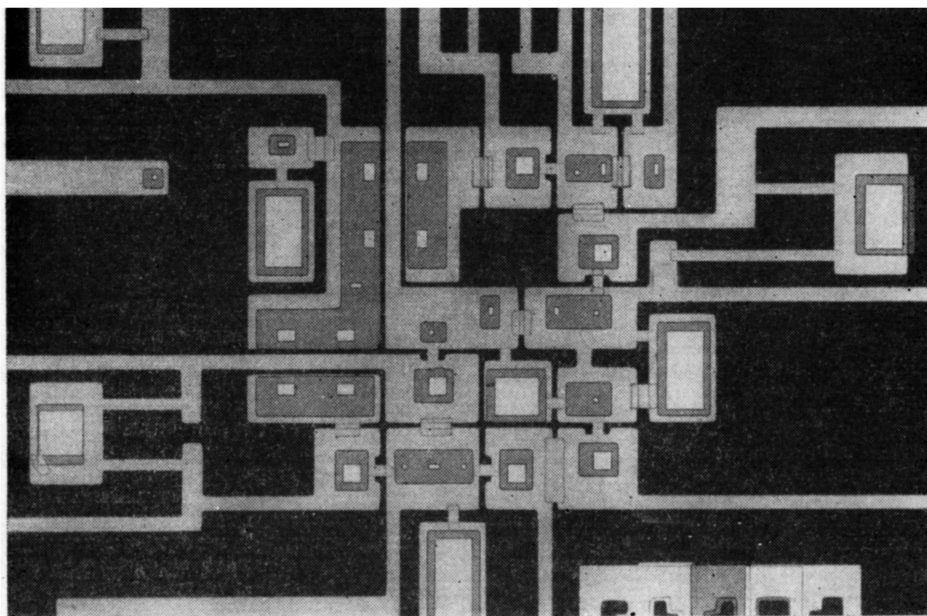


Рис. 4. Фотографии исследуемой структуры до формирования верхнего электрода (а) и после нанесения всех слоев (б).

словило необходимость широкого применения вспомогательных джозефсоновских переходов большой площади для перевода рабочих токов с одного слоя на другой. Относительно большие сверхпроводящие индуктивности L_2 и L_3 изготавливались в виде узких полосок соответственно верхнего и нижнего элект-

тродов, расположенных над щелями в противоположных электродах; при этом взаимное расположение полосок обеспечивало требуемую индуктивную связь между индуктивностями ($M \approx 0.6L_2$). В качестве джозефсоновских переходов использовались структуры Nb—Al₂O₃—Nb [14, 15].

Схематический разрез небольшого участка исследуемой структуры представлен на рис. 5. Образцы изготавливались на кремниевой подложке 1, покрытой защитным слоем 2 Al₂O₃ толщиной ~200 нм. В качестве шунтов 3 использовались пленки молибдена толщиной ~100 нм с сопротивлением на квадрат $R_{\square}^{4,2} \approx 1$ Ом, получаемые ВЧ катодным распылением. Геометрия шунтов формировалась с помощью химического травления; для последующих слоев использовался метод «взрывной» фотолитографии. Нижний 4 и верхний 5 электроды из ниобия толщиной соответственно 200 и 400 нм наносились магнетронным распылением. В качестве изолятора 6 использовался двойной слой монооксида

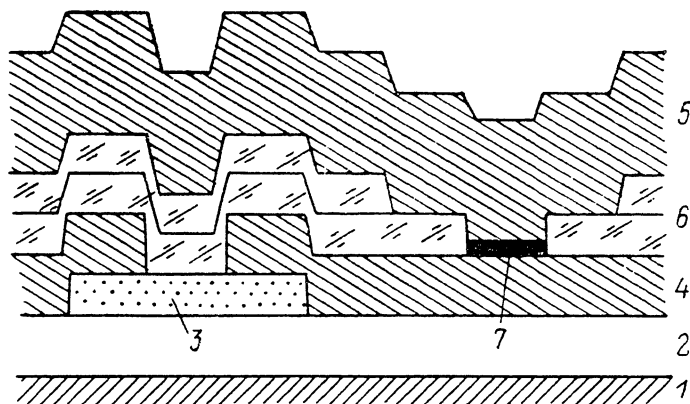


Рис. 5. Схематический разрез участка исследуемой структуры.

кремния суммарной толщиной 300 нм, в котором формировались окна для рабочих туннельных джозефсоновских переходов 7 площадью 100, 150 и 200 мкм², а также для вспомогательных переходов большей площади, обеспечивающих переход со слоя на слой. Туннельный барьер образовывался методом термического окисления [15] тонкой пленки Al, напыляемой на нижний электрод после его чистки в ВЧ разряде.

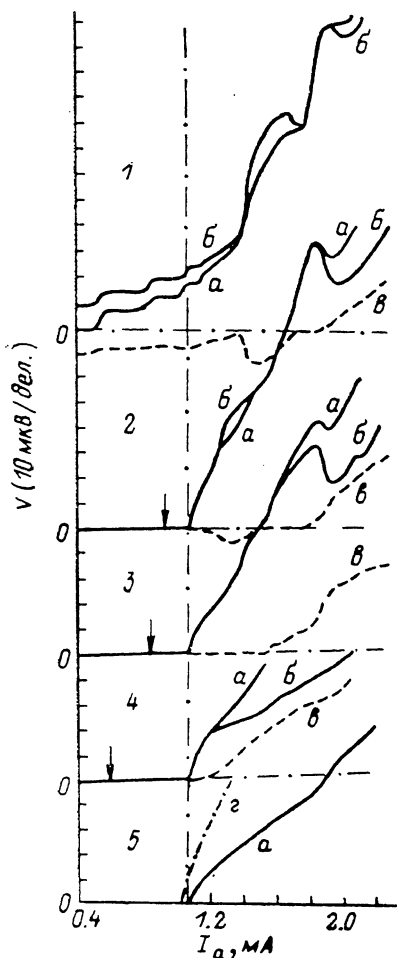
Изготовленные таким образом переходы имели плотность критического тока $j_c = 0.2 \div 0.5$ кА/см², малые токи утечки ($V_m > 10$ мВ) и не меняли своих характеристик при многократном термоциклировании. Разброс плотности токов по подложке не превышал $\pm 5\%$.

4. Результаты эксперимента

Все эксперименты с тестовой схемой проводились при температуре $T = 4.2$ К. Прежде чем настраивать схему целиком, следовало убедиться в правильности работы ее отдельных частей. Во-первых, необходимо было проверить сам факт передачи одноквантовых импульсов от одного перехода к другому. Пример такой проверки показан на рис. 6. Автономные ВАХ переходов *a* и *b* приведены на рис. 6, 5. Остальные ВАХ получены при фиксированном токе I_0 через переход *b* и временной развертке тока I_a через переход *a*. Для случая, когда ток I_0 выше критического (рис. 6, 1), на ВАХ наблюдается область взаимной синхронизации переходов (см. обзор [16]). Если I_0 меньше критического значения (рис. 6, 2—4), то постоянное напряжение на переходе *a* появляется одновременно с напряжением на переходе *b*, как только ток I_a превысит соответствующее критическое значение. Это явление естественно объясняется тем, что импульсы, возникающие в переходе *a*, передаются на переход *b* и регенерируются последним. Из рис. 6 видно, что наибольший диапазон такой регенерации ($\delta I_a / I_c \approx$

$\approx 50\%$) наблюдается при токе $I_G \approx 0.85$ мА, что близко к расчетному значению $I_G = 0.8 I_c$.

Настройка всей тестовой структуры проводилась следующим образом. Сначала в схему задавался один общий ток питания $I_{\text{пит}}$; при этом, подключая вольтметр к каждому из переходов, можно было определить значения ($I_{\text{пит}}$), при которых на i -м переходе появлялось ненулевое напряжение. Затем, установив для $I_{\text{пит}}$ уровень приблизительно на 20 % ниже минимального из значений ($I_{\text{пит}}$), мы проводили измерение параметров интерферометра. Для этого



через интерферометр независимо от общего тока $I_{\text{пит}}$ пропускались два дополнительных тока I_{24} и I_{23} . Ток I_{24} пропускался между точками I_2 и I_4 (рис. 2), а ток I_{23} между точками I_2 и I_3 . Затем производилось измерение критического значения тока I_{24} от тока I_{23} , который создает дополнительный поток через интерферометр. Полученные кривые хорошо соответствовали известной зависимости критического тока двухконтактного интерферометра от магнитного потока [17]. После этого выставлялась рабочая точка интерферометра путем фиксации токов I_{23} и I_{24} . Величина I_{23} устанавливалась таким образом, чтобы критическое значение I_{24} было минимальным, а сам ток I_{24} был задан меньшим этого критического значения на величину порядка половины глубины модуляции зависимости критического тока интерферометра от потока. Такой выбор рабочей точки обеспечивал одинаковые условия для двух стабильных состояний интерферометра.

После настройки интерферометра на генератор G подавался ток I_{in} и измерялись напряжения во всех точках схемы; при необходимости для обеспечения соотношений (2) производилась дополнительная подстрой-

Рис. 6. Зависимости напряжений на двух соседних переходах (G и A_1) от тока в переходе a при фиксированных токах $I_G = 1.05$ (1), 0.95 (2), 0.85 (3), 0.6 (4), 0.0 мА (5) в переходе $б$.

a — разностное напряжение $V_G = V_a - V_b$, $б$ — зависимость V_G от тока I_G при $I_a = 0$.

ка токов питания отдельных переходов (реально для правильной работы схемы требовалось не более двух-трех подстроек).

По описанной выше методике было измерено несколько образцов, изготовленных по одинаковой технологии, но отличающихся величиной плотности критического тока j_c . Практически на всех образцах удавалось наблюдать правильную работу схемы, но лишь в узкой области напряжений вблизи нуля (примерно до 5 мкВ). Анализ экспериментальных данных показал, что при низких значениях критического тока $j_c \approx 0.2 \div 0.3$ кА/см² из-за сильного шума шунтирования переходов Γ неудовлетворительно работал объединитель A_4 , который неправильно воспринимал два близко идущих импульса (рис. 3, в). Для улучшения работы этого элемента был изготовлен образец с большими критическими токами ($j_c \approx 0.5$ кА/см²), однако при этом нормированная индуктивность L_3 интерферометра оказалась близкой к 5, т. е. существенно больше номинальной [1, 3]. В целях уменьшения этой индуктивности поверх всей структуры был нанесен изолирующий слой фоторезиста А2-1350 толщиной ~ 0.5 мкм и экран из пленки свинца толщиной ~ 500 нм. В результате этого характерное значение LI_c/Φ_0

интерферометра уменьшилось до 2.5 и рабочий диапазон существенно расширился.

На рис. 7 показаны экспериментальные соотношения напряжений в различных точках схемы, которые измерялись при медленном изменении тока генератора I_{in} для образца с экраном. Видно, что соотношения (2) выполняются (по крайней мере с экспериментальной точностью лучше, чем 0.5 %) вплоть до напряжения $V_1 \approx 60$ мкВ, что соответствует частоте генерируемых одноквантовых импульсов $f \approx 30$ ГГц. Как показывает эксперимент и численное моделирование, на этой частоте нарушается только режим работы объединителя A_4 , а логический элемент ИЛИ—НЕ и линия задержки ($J_4, J_5, J_6, J_{55}, J_{62}$) могут работать при более высоких частотах.

По этой причине мы провели дополнительный эксперимент специально для проверки работоспособности элемента ИЛИ—НЕ на высокой частоте. В этом эксперименте производилась настройка только элементов интерферометра и линии задержки, при этом проводились измерения напряжений на элементах $J_4, J_5, J_6, J_{55}, J_{62}$ в зависимости от напряжения V_{34} на интерферометре, которое измерялось между точками V_3 и V_4 (рис. 2). Напряжения изменялись по-

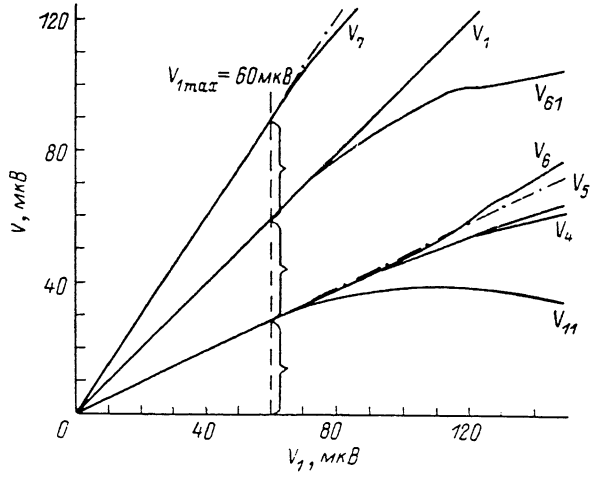


Рис. 7. Экспериментально измеренные зависимости напряжений в различных точках схемы от напряжения V_1 на генераторе, полученные при медленном изменении тока генератора I_{in} .

прежнему посредством изменения тока I_{in} генератора, но такая схема измерения позволяла не учитывать процессы прохождения импульсов в той части схемы, которая не выходит в элемент ИЛИ—НЕ. В таком режиме удалось наблюдать правильную работу логического элемента ИЛИ—НЕ в диапазоне напряжений от $V_{34} = 73$ мкВ (исходная частота импульсов ≈ 35 ГГц) до $V_{34} \approx 98$ мкВ (частота ≈ 48 ГГц).

Мы провели также предварительные исследования допустимых отклонений параметров схемы от номинальных значений. На частоте исходных импульсов около 10 ГГц схема сохраняла правильный режим работы при отклонении токов питания ± 2.5 %.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрировано функционирование тестовой схемы, содержащей основные элементы резистивной одноквантовой логики, на частотах до 50 ГГц. Этот результат был достигнут в простейшей по конструкции (и далекой от оптимальности) схеме, содержащей только два сверхпроводящих слоя, по которым выполнялась литография. Фотолитография проводилась с очень умеренным разрешением (минимальные размеры в плане ~ 10 мкм). Однако даже в этом случае достигнутая частота значительно выше, чем в других сверхпроводниковых логических схемах, и несколько превышает рекордные результаты, достигнутые в аналогичных по сложности схемах на арсениде галлия [18].

Проведенные нами теоретические оценки показывают, что за счет схематехнической и технологической оптимизации предложенной логики возможно увеличение тактовой частоты простейших устройств до 400 ГГц, а допустимого разброса параметров до $\pm 20-30$ %.

Авторы выражают благодарность Ж. И. Алферову, К. А. Валиеву и Е. П. Велихову за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Nakajima K., Onodera Y., Ogawa Y. J. // Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 4. P. 1620—1627.
- [2] Fulton T. A., Dynes R. S., Anderson P. W. // Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. N 1. P. 28—35.
- [3] Likharev K. K. // IEEE Trans. on Magn. 1977. Vol. 13. N 1. P. 245—247.
- [4] Likharev K. K., Rylov S. V., Semenov V. K. // IEEE Trans. on Magn. 1985. Vol. 21. N 3. P. 947—950.
- [5] Silver A. H., Phillips R. R., Sandell R. D. // IEEE Trans. on Magn. 1985. Vol. 21. N 2. P. 204—207.
- [6] Nakajima K., Oya G., Sawada Y. // IEEE Trans. on Magn. 1983. Vol. 19. N 3. P. 1201—1204.
- [7] Муханов О. А., Семенов В. К. // Препринт МГУ. № 9. М., 1985.
- [8] Likharev K. K., Mitchenov O. A., Semenov V. K. // SQUID'85. Berlin: Walter de Gruyter, 1985. P. 1103—1108.
- [9] Hurrel J. P., Pridmore-Brown D. C., Silber A. H. // IEEE Trans. Electron Dev. 1980. Vol. 27. N 10. P. 1887—1896.
- [10] Hamilton C. A., Lloyd F. L. // IEEE Electron. Dev. Lett. 1982. Vol. 3. N 11. P. 335—338.
- [11] Выставкин А. Н., Кошелец В. П., Лухарев К. К. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 5. С. 286—290.
- [12] Semenov V. K., Odintsov A. A., Zorin A. B. // SQUID'85. Berlin: Walter de Gruyter, 1985. P. 71—75.
- [13] Wolf P. // Josephson effect — achievements and trends / Ed. A. Barone. Naple, 1985. P. 449—463.
- [14] Gurvitch M., Washington M. A., Haggins H. A. // IEEE Trans. Magn. 1983. Vol. 19. N 3. P. 791—794.
- [15] Выставкин А. Н., Кошелец В. П., Овсянников Г. А. и др. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 5. С. 290—295.
- [16] Jain A. K., Likharev K. K., Lukens J. E., Sauvageau J. E. // Phys. Rep. 1984. Vol. 109. N 6. P. 309—426.
- [17] Лухарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 320 с.
- [18] Abe M., Mimura T., Nishiuchi K. et al. // IEEE Quant. Electr. 1986. Vol. 22. N 9. P. 1870—1879.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
6 июля 1987 г.
