

## СВЧ КОММУТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

*О. Г. Вендик, А. Я. Зайончковский, А. В. Ипатов,  
С. Г. Колесов, С. Б. Красиков, О. В. Пахомов,  
А. С. Рубан, Д. Н. Чарторижский*

Приведены экспериментальные результаты исследований модулятора и переключателя см-диапазона длин волн, реализованных на основе пленочных сверхпроводниковых переключаемых элементов. Использование перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно в сверхпроводниковых пленках позволило реализовать малошумящие коммутирующие устройства СВЧ-диапазона с заглушением в открытом состоянии не более 0.2 дБ, в закрытом 20...50 дБ, временем переключения  $10^{-7}$ ... $10^{-6}$  с при мощности управления 10...50 мВт.

The results of experimental investigations of the modulator and commutator for cm-wavelength range, realized on the basis of the filmy superconducting switching components. The use of transition from super-conducting state to normal and back in superconductor films made it possible to realize the low-noise commutating devices for superhigh frequency range.

The attenuation in them is no larger than 0.2 dB in the open state, and 20...50 dB in the close one: the switching time is  $10^{-7}$ ... $10^{-6}$  s, the control power being 10...50 mW.

Интерес к сверхпроводниковым СВЧ коммутирующим устройствам (СКУ) связан с возможностью снижения эквивалентной шумовой температуры модуляционных радиометров, работающих при гелиевых температурах и широко использующихся, в частности, в радиоастрономии [1]. Принцип действия таких устройств основывается на переключении сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в нормальное, для чего сверхпроводник подвергают воздействию магнитного поля, электрического тока или оптического излучения [2, 3]. Изучение энергетических и временных характеристик процесса переключения пленочных сверхпроводниковых структур [4—7] показало принципиальную возможность создания быстродействующих коммутирующих устройств с достаточно малыми значениями потребляемой мощности. Однако до настоящего времени не было выполнено систематических исследований, направленных на практическую реализацию СКУ в СВЧ-диапазоне, удовлетворяющих совокупности предъявляемых к ним технических требований и конкурентноспособных по отношению к устройствам на ферритах и полупроводниках [8, 9].

В настоящей статье рассмотрены особенности пленочных сверхпроводниковых переключаемых элементов и приведены экспериментальные результаты исследований модулятора и переключателя см диапазона длин волн на их основе. Принятые конструкторско-технологические решения ориентированы на возможность совмещения СКУ с другими микроэлектронными устройствами на сверхпроводниках в единой интегральной схеме.

**Пленочные сверхпроводниковые переключаемые элементы.** В качестве переключаемых элементов СКУ использовались отрезки копланарной или микрополосковой линии передачи, выполненные из пленок ниобия, полученных методами электронно-лучевого или термоионного осаждения на подложках из сапфира, поликора и ситалла. В процессе изготовления экспериментальных образцов СКУ требуемая конфигурация пленки обеспечивалась методом фотолитографии. Переключение элемента осуществлялось пропусканием по центральной полоске копланарной линии или по верхней полоске микрополосковой линии управляющего тока  $I_r$ , обеспечивающего перевод полоски из сверхпроводящего

состояния в нормальное. Размеры переключаемого элемента определяют основные параметры СКУ.

Толщина полоски переключаемого элемента  $h$ , равная толщине пленки ниобия, выбирается из условия реализации достаточно больших значений коэффициента затухания СВЧ-сигнала при нормальном состоянии переключаемого элемента  $\alpha_N$ . Требуемая для достижения значений  $\alpha_N \geq 1$  дБ·мм<sup>-1</sup> величина  $h$

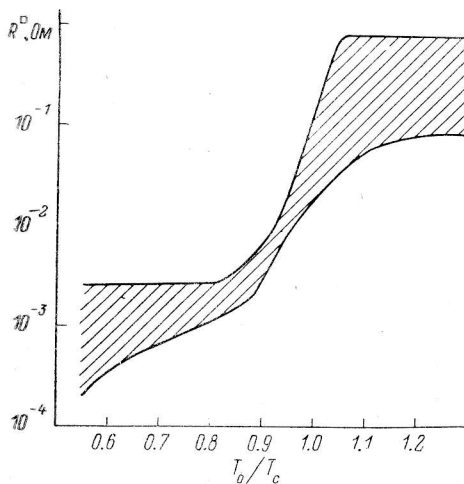


Рис. 1. Область значений поверхностного сопротивления.

оказывается меньше глубины скин-слоя  $\delta_N$  в пленке ниобия, находящейся в нормальном состоянии. В сверхпроводящем состоянии глубина проникновения СВЧ-поля определяется лондоновской глубиной проникновения  $\lambda_L \ll \delta_N$  [10]. Для получения малых значений коэффициента затухания  $\alpha_S$  необходимо обеспечить выполнение условия  $h > \lambda_L$ . При этом  $\alpha_S$  является функцией толщины и температуры пленки, так как от этих параметров зависит величина поверхностного сопротивления  $R^□$  пленки. На рис. 1 представлена область значений  $R^□$  для использованных пленок в интервале приведенных температур  $0.55 \leq T_0/T_c \leq 1.3$  на частоте 7.5 ГГц. Для каждой пленки значение  $T_c$  указано в таблице. Верхняя и нижняя границы области соответствуют пленкам минимальной и максимальной толщины (см. таблицу). Из рис. 1 следует, что при прочих одинаковых

условиях использование пленок большей толщины приводит к уменьшению значений  $\alpha_S$  и  $\alpha_N$ . Толщина и рабочая температура пленки оказывают влияние также и на другие параметры СКУ. В частности, значения управляющего тока  $I_y$  и мощности  $P_y$ , потребляемой СКУ от источника управляющего тока, возрастают с увеличением  $h$  и уменьшением  $T_0/T_c$ .

Ширина полоски переключаемого элемента  $W$  определяет величину критического тока  $I_c$  и, следовательно, значения  $I_y$  и  $P_y$ . Для их уменьшения следует стремиться к минимально возможной величине  $W$ . При использовании микрополосковой линии эта величина определяется главным образом допустимым максимальным значением волнового сопротивления.

Параметры переключаемого элемента

Параметр	Номер образца						
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3.1
Материал подложки	Сапфир			Поликор		Ситалл	
Параметры полоски							
Толщина $h$ , нм	50	130	130	30	160	170	150
Ширина $W$ , мкм	20	20	20	7	26	26	10
Длина $l$ , мм	10	11	7.5	1.2	11	11	10
Критическая температура $T_c$ , К	6.8	5.7	6.5	5.5	6.5	7.5	4.7
Ширина перехода $\Delta T_H = T_N - T_c$ , К	0.4	0.8	0.45	0.2	1.6	1.5	1.3
Поверхностное сопротивление постоянному току при $T_0 = T_N - R^□$ , Ом	3.2	0.8	1	3.4	0.98	0.57	1.2
Критический ток $I_c$ , мА	21	18	7.7	33	7	20	15
Коэффициент затухания $\alpha_N$ , дБ·мм <sup>-1</sup>	8.5	2.5	3.3	17.5	2.4	2.1	3.1
Мощность управления при $L_N = 20$ дБ	9	29	16.5	0.4	32	59	5.5
$P_y$ , мВт							
Термическое сопротивление пленка—термостат $R_T$ , $10^5$ К·м <sup>2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	0.9	1.9	1.8	3.1	2.3	1.7	2.2
Приведенная температура термостата $T_0/T_c$	0.9	0.84	0.89	0.73	0.92	0.72	0.94

Длина переключаемого элемента  $l$  определяет величину затухания СВЧ-сигнала как в сверхпроводящем ( $L_S$ ), так и в нормальном ( $L_N$ ) состояниях пленки. Возможность реализации больших значений  $l$  и малых значений  $W$  зависит от размеров и плотности пор в используемых пленках. Пленки, из которых изготавливались экспериментальные образцы СКУ, характеризовались плотностью пор  $10 \dots 50 \text{ см}^{-2}$  при максимальном размере поры  $15 \dots 30 \text{ мкм}$ .

Протекание управляющего тока по участку переключаемого элемента, перешедшему в нормальное состояние, приводит к его нагреву. Теплофизические характеристики структуры пленка—подложка—термостат определяют температурный режим элемента. Основную роль при этом играют контактное термическое сопротивление пленка—подложка  $R_{\text{пт}}$  и теплопроводность подложки  $\kappa$ . Теплопроводность подложки определяет быстродействие СКУ, а  $R_{\text{пт}}$  — величину потребляемой мощности  $P_{\text{в}}$ . Величина  $P_{\text{в}}$  зависит также от ширины сверхпроводящего перехода пленки  $\Delta T_{\text{п}} = T_{\text{н}} - T_{\text{с}}$ \*. Для уменьшения  $P_{\text{в}}$  целесооб-

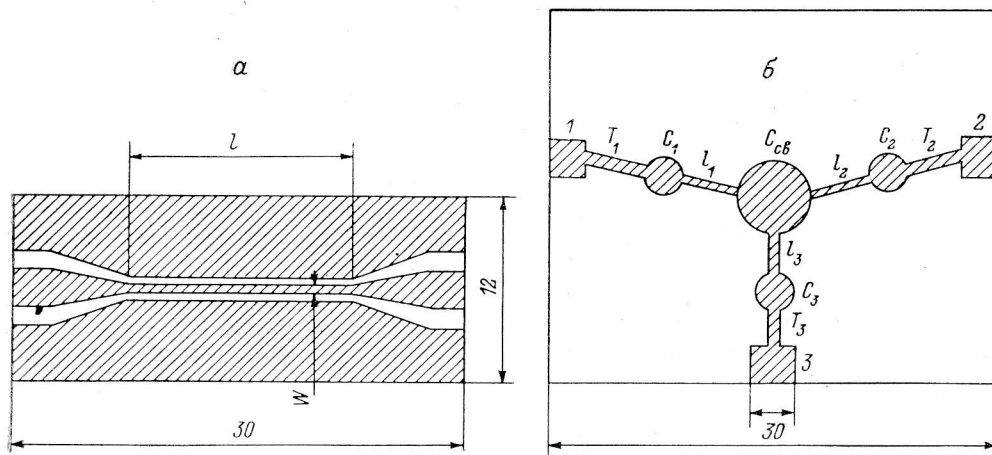


Рис. 2. Топологии модулятора (а) и переключателя (б).

разно использовать пленки с малыми значениями  $\Delta T_{\text{п}}$  и структуры с большими значениями  $R_{\text{пт}}$ .

В таблице приведены указанные выше параметры переключаемых элементов экспериментальных образцов СКУ. Там же даны значения других параметров структуры пленка—подложка, оказывающих существенное влияние на характеристики СКУ. Эти параметры получены в результате обработки и интерпретации измерений электродинамических характеристик СКУ, которые приведены в следующих разделах.

**Экспериментальные результаты.** Экспериментальные исследования проведены на макетах четырехполюсного (модулятор) и шестиполюсного (переключатель) коммутирующих устройств.

Модуляторы (рис. 2, а) выполнены в виде отрезков копланарной линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом, состоящих из переключаемого элемента, параметры которого приведены в таблице (обр. 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 3.1) и согласующих переходов длиной 8...11 мм. Использование копланарной линии связано с возможностью реализации 50-омной линии при ширине центральной полоски переключаемого элемента, не превышающей 10...20 мкм.

Переключатель (рис. 2, б) выполнен в виде трехплечей Y-образной системы, реализованной на основе микрополосковой линии передачи. Связь между плечами осуществлена посредством связанных резонансных контуров с квазисосредоточенными элементами. Контур образован короткими отрезками линий, длины которых  $l_1 = l_2 = l_3$ , и конденсаторами  $C_1 = C_2 = 0.35 \text{ пФ}$  и  $C_3 =$

\*  $\Delta T_{\text{п}}$  определялась как температурный интеграл, в пределах которого сопротивление переключаемого элемента постоянному току изменялось от значения, равного сопротивлению всего элемента в нормальном состоянии  $R_N$ , до нуля.

$=0.4$  пФ. Резонансная частота контуров  $7.5$  ГГц. Связь контуров осуществляется конденсатором  $C_{св}=3.5$  пФ. Отрезки линий, длины которых обозначены как  $l_1$  и  $l_2$ , являются переключаемыми элементами. Их параметры идентичны и приведены в таблице (обр. 1.4). Отрезок линии, длина которого обозначена как  $l_3$ , имеет ширину полоски  $W_3=30$  мкм, что обеспечивает сохранение сверхпроводящего состояния в ней в рабочем интервале значений управляющего тока. Включение контуров в микрополосковый тракт с волновым сопротивлением  $50$  Ом осуществлялось в каждом плече через четвертьволновые трансформаторы с волновым сопротивлением  $150$  Ом ( $W_T=100$  мкм). Нагруженная добротность контуров в сверхпроводящем состоянии равнялась  $10$ . Переход в нормальное состояние переключаемого элемента в одном из плеч, например  $1$ , происходит при пропускании управляющего тока по полоскам плеч  $1$  и  $3$ . При этом реализуются условия — для прохождения СВЧ-сигнала с малым затуханием между входами плеч  $2$  и  $3$ . Развязку плеча  $1$  относительно плеч  $2$  и  $3$  можно в определенных пределах регулировать подбором величины  $C_{св}$ . При пропускании управляющего тока через плечи  $2$  и  $3$  СВЧ-сигнал канализируется между входами плеч  $1$  и  $3$ .

Для подключения модуляторов и переключателя к измерительному тракту использовались стандартные коаксиально-полосковые переходы. Управляющий ток подводился через включенные в измерительный тракт фильтры нижних частот.

Экспериментальные макеты помещались на медное основание, обеспечивавшее теплоотвод от переключаемого элемента к термостату. Эффективность этого теплоотвода в дальнейшем характеризуется термическим сопротивлением подложка—термостат  $R_{нт}$ .

Измерения характеристик макетов СКУ проводились в жидком или газообразном гелии в интервале температур  $T_0=4.2 \dots 2.5$  К. Мощность подводимого СВЧ-сигнала выбиралась так, чтобы обеспечить независимость измеряемых характеристик СКУ от ее величины и составляла  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  Вт. Экспериментальные исследования состояли в определении зависимостей коэффициентов передачи СКУ от температуры термостата, мощности, потребляемой от источника управляющего тока, и частоты СВЧ-сигнала.

В отсутствие управляющего тока температурные зависимости коэффициента передачи модуляторов соответствовали изменению  $R^{\square}$  от температуры (рис. 1). При  $T_0 \geq T_N$  затухание СВЧ-сигнала в модуляторах практически не зависело от температуры и составляло  $20 \dots 50$  дБ для различных образцов. В области сверхпроводящего перехода затухание резко уменьшалось при понижении температуры и при  $T_0=T_c$  (соответствующей сопротивлению постоянному току  $0.1$  Ом) для разных образцов составляло  $0.5 \dots 2.5$  дБ. При уменьшении температуры до  $T_0/T_c \leq 0.85$  затухание во всех исследованных модуляторах уменьшалось до значений, не превышающих  $0.2$  дБ.

При фиксированной температуре термостата  $T_0 < T_c$  исследовалось влияние мощности, рассеиваемой в переключаемом элементе за счет пропускания по нему управляющего тока, на величину коэффициента передачи СКУ. Зависимость сопротивления переключаемого элемента от величины управляющего тока нелинейна, что существенно влияет на режим работы цепи источника управляющего тока. Как показано в работе [11], стационарный режим характеризуется величиной тока  $I_p$ :

$$I_p \left[ \frac{W^2 h (T_N - T_0)}{R_T \rho_N} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\rho_N$  — удельное сопротивление пленки в нормальном состоянии, а  $R_T$  — термическое сопротивление единицы площади пленки, характеризующее эффективность теплопередачи пленка—термостат. Величина тока  $I_p$  не зависит от длины участка пленки, в пределах которого температура пленки превышает  $T_c$ . Эта длина определяется величиной мощности источника управляющего тока. В наших экспериментах в качестве источника управляющего тока использовался регулируемый источник с постоянным внутренним сопротивлением  $50$  Ом. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов передачи модулято-

ров от величины мощности  $P_y$ , рассеиваемой управляющим током в переключаемом элементе при указанных в таблице значениях температуры термостата. Наклонные участки этих зависимостей связаны с изменением длины нормально-проводящей области полоски переключаемого элемента. При этом температура полоски равна или несколько превосходит  $T_N$ . В таблице приведены значения  $P_y$ , соответствующие значению  $L=20$  дБ для исследованных образцов.

В качестве иллюстрации влияния температуры термостата на параметры СКУ на рис. 4 представлены зависимости от приведенной температуры термостата значений  $P_y$ , соответствующих началу горизонтального участка на кривой  $L(P_y)$ , и величины  $L(P_y=0)$  для обр. 1.1. Увеличение  $P_y$  при уменьшении  $T_0/T_c$  объясняется необходимостью перегрева пленки относительно термостата на величину  $T_n - T_0$ .

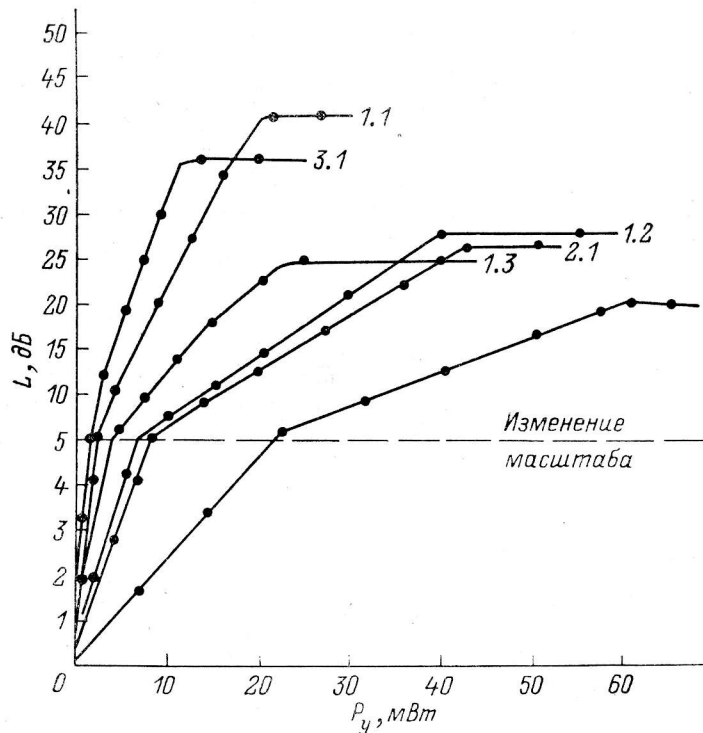


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи модуляторов от мощности управления на частоте 7.7 ГГц.

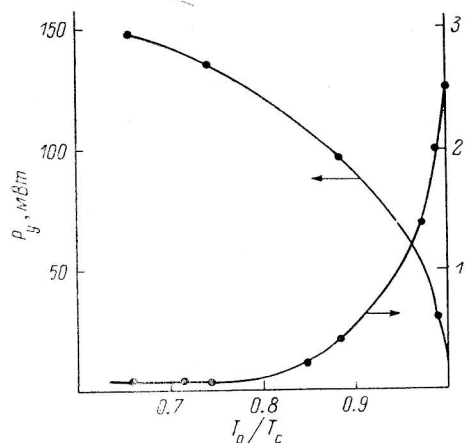
В таблице представлены для каждого образца значения  $R_{\text{т}}$ , определенные по экспериментальным данным с использованием соотношения (1). Сопротивление  $R_{\text{т}}$  можно представить в виде:  $R_{\text{т}} = R_{\text{пт}} + R_{\text{нт}}$ . Расчетные значения  $R_{\text{нт}}$ , полученные с учетом значений коэффициента теплопроводности материала подложек и их геометрических размеров, составили  $0.7 \dots 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$  для подложек из сапфира и поликора и  $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$  для подложек из ситалла. Сопоставление значений  $R_{\text{т}}$  и  $R_{\text{нт}}$  указывает на определяющую роль контактного термического сопротивления  $R_{\text{пт}}$  при использовании подложек из сапфира и поликора. Этот вывод согласуется с представлениями о теплопередаче от пространственно ограниченного источника тепла через его границу с диэлектриком [12].

В пределах диапазона частот  $(7.7 \pm 0.2)$  ГГц неравномерность коэффициента передачи модуляторов не превосходила  $\pm 0.2$  дБ при  $P_y = 0$  и  $1 \dots 3$  дБ при  $P_y > 0$ . Коэффициент стоячей волны (КСВн) в указанном диапазоне частот не превышал  $1.2 \dots 1.3$  при  $P_y = 0$  и  $1.5 \dots 2$  при  $P_y > 0$ .

Измерения эквивалентной температуры шума модуляторов были выполнены методом двух нагрузок с использованием аппаратуры радиотелескопа РАТАН-

600 [1]. В пределах точности измерений ( $\pm 5$  К) не зафиксировано шумов, превышающих равновесные тепловые шумы переключаемого элемента.

Переключатель характеризовался затуханием СВЧ-сигнала не более 0.5 дБ при развязке плеч не хуже 20 дБ в диапазоне частот  $(7.5 \pm 0.5)$  ГГц. Рис. 5 иллюстрирует влияние мощности управления на величину развязки. Малые по сравнению с модуляторами значения  $P_y$ , соответствующие выходу зависимости



$L(P_y)$  на горизонтальный участок, объясняются меньшими значениями ширины и длины полоски переключаемого элемента (см. таблицу). В указанном выше диапазоне частот КСВн на входе плеча, в котором переключаемый элемент находится в сверхпроводящем состоянии, не превышал 1.5, а на входе плеча, в котором переключаемый элемент переведен в нормальное состояние, — 2.5.

Рис. 4. Зависимости мощности управления  $P_y$  и затухания в сверхпроводящем состоянии  $L_s$  от приведенной температуры.

Быстродействие СКУ исследовалось путем наблюдения формы огибающей СВЧ сигнала на выходе модулятора при воздействии импульсов управляющего тока длительностью  $\tau_n = 3 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-1}$  с с периодом следования  $T_n = 10^{-3} \dots 1$  с. В качестве источника управляющего тока использовался генератор прямоугольных импульсов с внутренним сопротивлением 50 Ом. На рис. 6 представлен

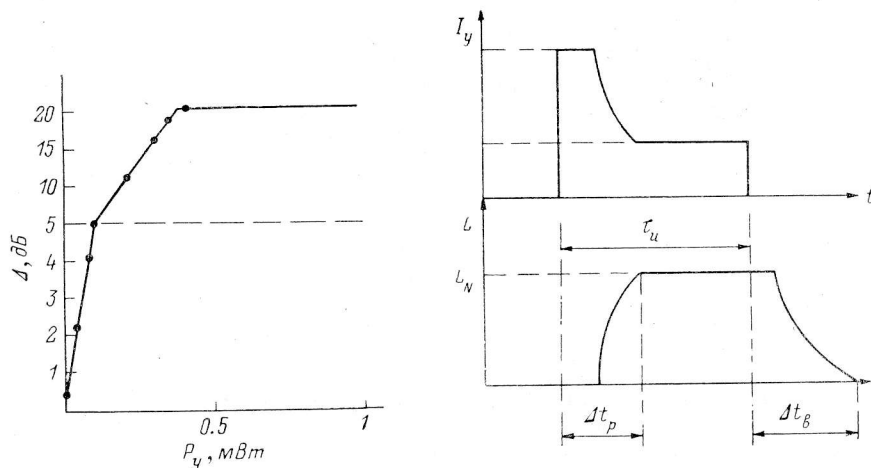


Рис. 5. Зависимость развязки плеч переключателя от мощности управления.

Рис. 6. Вид зависимостей управляющего тока  $I_y$  и коэффициента передачи  $L$  от времени.

типичный вид зависимостей управляющего тока и затухания СВЧ-сигнала от времени.

При воздействии импульса тока амплитудой  $I_m > I_c$  установление стационарного значения затухания СВЧ-сигнала, соответствующего переходу переключаемого элемента в нормальное состояние, происходило в течение интервала времени  $\Delta t_p$ , длительность которого определялась отношением  $I_m/I_c$ . Для значений  $I_m/I_c = 5 \dots 10$  величина  $\Delta t_p$  изменялась от  $5 \cdot 10^{-8}$  с до  $5 \cdot 10^{-9}$  с соответственно. После окончания импульса управляющего тока восстановление сверхпроводящего состояния переключаемого элемента происходило за время  $\Delta t_n \ll$

$\leq 10^{-6}$  с для образцов на подложках из сапфира и поликора. Для обр. 3.1 на подложке из ситалла получено  $\Delta t_{\text{в}} \approx 10^{-2}$  с. Значения  $\Delta t_{\text{в}}$  согласуются с расчетными значениями постоянных времени остывания подложек. Результаты подробных исследований кинетики процессов разрушения и восстановления сверхпроводящего состояния в пленках ниобия при воздействии импульсов тока приведены в работе [7].

При воздействии периодической последовательности импульсов управляющего тока происходит увеличение постоянной составляющей температуры пленки  $T_{\text{пл}}$  относительно температуры термостата  $T_0$ . Для того чтобы величина  $T_{\text{пл}}$  не превысила критическую температуру пленки  $T_c$ , температура термостата  $T_0$  должна удовлетворять следующему условию:

$$T_0 \leq T_c - \Delta T_{\text{п}} \frac{R_{\text{пт}}}{R_{\text{пн}}} e^{\frac{\tau_0(q-1)}{\tau_{\text{т}}}} \quad (2)$$

где  $q$  — скважность импульсов управляющего тока, а  $\tau_{\text{т}}$  — время тепловой релаксации медного основания, на котором расположен модулятор или переключатель. В наших экспериментах величина  $\tau_{\text{т}}$  составляла 0.2 . . 0.5 с при термостатировании в парообразном гелии.

Полученные в процессе исследований экспериментальные данные о разработанных конструкциях СКУ в сочетании с анализом расчетных зависимостей поверхностного сопротивления от частоты [13] позволяют сделать вывод о целесообразности использования реализованных конструкторско-технологических решений для создания коммутирующих устройств в диапазоне до 100 ГГц.

#### Литература

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры // М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Вендик О. Г., Козырев А. Б. Сверхпроводниковые пленки в СВЧ микроэлектронике // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1983. 26, № 10. С. 18—28.
3. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках / Под ред. В. Н. Алфеева. М.: Радио и связь, 1985. 232 с.
4. Gray K. E., Lenihan T., Tarazon J. Thin film superconducting switches // IEEE Trans. Magn. 1979. Vol. 15, nr 1. P. 175—177.
5. Потери на СВЧ в сверхпроводниковых пленках во внешних магнитных полях / В. Н. Алфеев, Б. Н. Формозов, Я. В. Жарков и др. // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1973. 12. С. 107—109.
6. Исследование режимов работы криотрона, управляемого излучением гетеролазера // О. Г. Вендик, А. Я. Зайончковский, С. Г. Колесов, Л. Л. Терещенко // Изв. вузов. Приборостроение. 1985. № 12. С. 59—61.
7. Разрушение и восстановление сверхпроводящего состояния в широких пленках ниобия при воздействии импульсов транспортного тока / О. Г. Вендик, А. Я. Зайончковский, С. Г. Колесов и др. // ФНТ, 1986, 12, № 6. С. 576—583.
8. Неохлаждаемые и криогенные модуляторы радиометров радиотелескопа РАТАН-600 на основе коммутаторов с магнитной памятью / Г. М. Афанасьев, А. Б. Берлин, В. Я. Гольнев и др. // Тез. докл. 17-й Всесоюз. конф. «Радиоастрономическая аппаратура». Ереван, 1985. С. 204—205.
9. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
10. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Попов В. И. Системы с малой диссипацией. М.: Наука, 1981. 144 с.
11. Scosroil W. J., Beasley M. R., Tinkham M. Self-heating hotspots in superconducting thin-film microbridges // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45, nr 9, P. 4054—4066.
12. Vaer J. Resistance thermique de contact entre isolateurs // Phys. Kondens. Materie. 1968. Nr. 8. P. 1—30.
13. Изменение параметров микрополосковой линии при ее переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние / О. Г. Вендик, А. Б. Козырев, А. Ю. Попов, М. Бельски // ЖТФ, 1986. 56, № 1. С. 173—177.

Поступила в редакцию 10 ноября 1986 г.