

Л и т е р а т у р а

- [1] К о р о н к е в и ч В.П., Л е н к о в а Г.А., М и х а л ь ц е в а И.А. и др. – Автометрия, 1985, в. 1, с. 4–25.
- [2] И г н а т о с я н С.С., С и м о н о в В.П., С т е п а н о в Б.М. – Оптико-механическая промышленность, 1986, в. 1, с. 7–9.
- [3] К о р я б и н А.В., Н е д о п е к и н О.Ю., Ш е н я в с к и й Л.А. В сб.: Методы и устройства оптической голографии. Ленинград, 1983, с. 227–230.
- [4] В о р о н ц о в М.А., М а т в е е в А.М., С и в о к о н ь В.П. – ДАН СССР, сер. Физика, 1986, т. 290, с. 1354–1358.
- [5] П е т р о в М.П., С т е п а н о в С.И., Х о м е н к о А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 269 с.
- [6] Н а г а е в А.П., П а р ы г и н В.П., П а ш и н С.Ю. – Изв. АН СССР, сер. физическая, 1982, т. 46, в. 10, с. 1939–1942.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
16 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

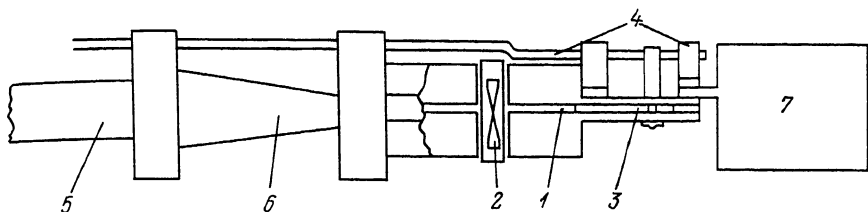
12 мая 1988 г.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТОРЦЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

А.Л. Г у д к о в, В.А. И л ь и н,
В.Н. Л а п т е в, В.И. М а х о в,
И.А. С е м и н, В.С. Э т к и н

В литературе неоднократно сообщалось о создании детекторных радиометров на сверхпроводящих точечных контактах (СТК) Джозефсона. Они успешно использовались для проведения радиоастрономических [1] и геофизических [2] исследований. Как элемент СВЧ-детектора СТК обладает несомненными достоинствами – высоким быстродействием, низким уровнем собственных шумов, большими частотами среза, что позволяет использовать их в миллиметровом диапазоне волн.

В то же время недостатки, присущие точечному контакту (неустойчивость к термоциклированию, разброс параметров, недостаточная механическая стабильность), технически трудно устранимы и сдерживают широкое применение джозефсоновских радиометров. Это стимулирует разработку новых сверхпроводящих элементов с помощью методов интегральной электроники. Одним из наиболее пер-



Конструкция детекторной секции: 1 - волновод сечением $11 \times 1 \text{ мм}^2$, 2 - ТДП, 3 - поршень, 4 - система управления движением поршня, 5 - волновод сечением $11 \times 5.5 \text{ мм}^2$, 6 - пирамидальный переход, 7 - трансформатор.

спективных устройств нам представляется описанный в [3] торцевой джозефсоновский переход (ТДП) типа $Nb-Si^*-Nb$, который, обладая основными достоинствами точечного контакта, более стабилен, устойчив к термоциклированию, а его параметры могут быть точно заданы при изготовлении.

Целью настоящей работы являлось исследование детектирующих свойств ТДП в 15 мм и 4 мм диапазонах волн и определение основных параметров широкополосных детекторных радиометров указанных диапазонов волн при использовании в них торцевых джозефсоновских переходов $Nb-Si^*-Nb$.

Описанные в [3] ТДП изготовлены из ниобия с прослойкой из легированного кремния (Si^*) путем напыления на кремниевую подложку. Площадь перехода $S \approx 0.6-1 \text{ мкм}^2$. При этом сопротивление ТДП в нормальном состоянии $R \sim 30 \text{ Ом}$. Однако для обеспечения их оптимального согласования с волноводным трактом необходимы переходы с R в 5-10 раз большими. Дальнейшее увеличение сопротивления ТДП при сохранении высоких значений характеристического напряжения $V_c = I_c R$ (I_c - критический ток перехода) возможно только за счет уменьшения S . С этой целью были разработаны ТДП с площадью перехода $0.2-0.3 \text{ мкм}^2$, что позволило варьировать величину R от 20 до 400 Ом, изменяя толщину Si^* -прослойки. Таким образом, методами интегральной электроники удалось получить джозефсоновские переходы с параметрами, не уступающими ниобиевым СТК и близкие к ним по физическим свойствам. Эти ТДП в дальнейшем использовались при создании макетов радиометров.

На рисунке показана конструкция детекторной секции, которая использовалась в макетах радиометров 15 мм и 4 мм диапазонов поля. Она представляет собой отрезок волновода (1) сечением $11 \times 1 \text{ мм}^2$. ТДП (2) расположен в прорези широкой стенки волновода. Детекторная секция включает в себя также короткозамыкающий поршень (3) с системой подстройки (4). Рабочая поверхность поршня представляет собой плоское зеркало при работе в 15-мм и цилиндрическое зеркало - 4 мм диапазонах волн. Детекторная секция

Т а б л и ц а

$\lambda, \text{мм}$	№	$R, \text{Ом}$	$I_c^* \times 10^{-6}, \text{А}$	$V_c^* \times 10^{-6}, \text{В}$	$\mathcal{V}^* \times 10^5, \text{В/Вт}$	$NEP^* \times 10^{-15}, \text{Вт/Гц}$	$\delta T^{**} \times 10^{-2}, \text{К}$	$\delta T^{***} \times 10^{-2}, \text{К}$	$\delta T^{***} \times 10^{-2}, \text{К}$
15	1	10	55	550	0.56	7.5	4	-	-
	2	10.5	70	735	0.4	10	13	-	13
	3	45	15	675	4.5	3.4	-	-	-
	4	200	1.5	300	1.5	2.0	1.4	0.7	1.7
	5	230	1.5	345	3.6	1.5	0.8	0.4	-
4	5	230	1.5	345	0.7	4.0	-	-	2.0

* Флюктуационная чувствительность измерена с помощью газоразрядного генератора шума с использованием фильтра нижних частот при температуре фонового излучения $T_{\text{ф}} = 300 \text{ К}$.

** То же, но при $T_{\text{ф}} = 100 \text{ К}$.

*** δT измерена по шумовому излучению согласованной нагрузки.

соединяется с волноводом стандартного сечения (5) с помощью пирамидального перехода (6).

Съем напряжения с перехода производится через охлаждаемый согласующий трансформатор (7) с коэффициентом преобразования $K = 20$. Для защиты от наводок трансформатор помещен в сверхпроводящий экран. Применение трансформатора позволило снизить шумы предварительного УНЧ до значения $\sim 10 \text{ К}$. Одновременно первичная обмотка трансформатора защищает переход от электрических перегрузок.

Исследовались следующие параметры макетов: вольт-ваттная чувствительность \mathcal{V} , мощность, эквивалентная шуму, NEP и динамический диапазон детектора, а также флюктуационная чувствительность δT радиометра на его основе. Методика измерения первых трех параметров стандартна [4], измерения δT имели ряд особенностей. В 4 мм диапазоне волн они проводились с помощью согласованной нагрузки с изменяемой физической температурой, в 15-мм диапазоне этот метод применялся наряду с измерениями с помощью газоразрядного генератора шума ГШ-6. В последнем случае в тракт радиометра вводился фильтр нижних частот с частотой среза $\sim 27 \text{ ГГц}$. Результаты измерений представлены в таблице.

Рассмотрим полученные результаты, сравнивая их с данными, полученными в [5] для радиометра 15 мм диапазона волн на СТК Джозефсона. Прежде всего отметим, что величина V_c у ТДП выше, чем у точечных контактов. Вольтваттная чувствительность детектора на ТДП составляет $(0.4-4.5) 10^5 \text{ В/Вт}$, что несколько ниже, чем у детектора [5]. Мощность, эквивалентная шуму, уменьшается с ростом R , и ее наименьшее значение $NEP = 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Приведенная в [5] величина NEP составляет $\sim 10^{-14} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Таким образом, несмотря на некоторое ухудшение сигнальных характеристик детектора на ТДП по сравнению с СТК, применение тор-

цевых переходов позволяет значительно улучшить шумовые характеристики детектора.

Самой важной характеристикой радиометра является его флуктуационная чувствительность, которая определяет возможности применения приемника. Как видно из таблицы, δT радиометра на ТДП достигает 0.008 К при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с и температуре фонового излучения $T_{\phi} = 300$ К. Снижение T_{ϕ} до ~ 100 К приводит к уменьшению δT примерно в два раза, что находится в хорошем соответствии с теорией [6] и экспериментом [1, 7], проведенным на СТК Джозефсона. Минимально возможное значение δT определяется известной радиометрической формулой [6] и в случае модуляционной схемы построения при полосе приема $\Delta f = 8$ ГГц составляет 0.007 К ($T_{\phi} = 300$ К) и 0.0023 К ($T_{\phi} = 100$ К). Таким образом, значение флуктуационной чувствительности, полученное на ТДП № 5, является предельным. Несколько меньшее значение δT радиометра 15 мм диапазона волн, приведенное в [2], связано, по-видимому, с более широкой полосой последнего, т.к. измерения велись без фильтра нижних частот. В нашем случае коротковолновое излучение не давало вклада в отклик перехода, о чем свидетельствуют близкие значения δT , полученные различными методами (см. таблицу).

В таблице приведены также значения параметров детектора и радиометра на ТДП в 4 мм диапазоне волн. В этом случае исследовался лишь один переход № 5, который был лучшим в 15 мм диапазоне. Видно, что NEP детектора $\sim 4 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2}, а флуктуационная чувствительность составляет ~ 0.02 К при $\tau = 1$ с. Это значение находится в согласии с полученными в [1] величинами δT радиометра на точечном контакте.

Проведенные исследования показали, что применение торцевых джозефсоновских переходов в широкополосных радиометрах весьма перспективно. Уже в настоящее время радиометры на ТДП имеют параметры, близкие к параметрам радиометров на точечных контактах при значительно более высоких эксплуатационных характеристиках. Применение торцевых переходов позволяет создать высокостабильные приемные устройства, пригодные для проведения длительных радиоастрономических и геофизических экспериментов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Куликов В.А., Матвеев Л.В., Мигулин В.В. - Препринт ИЗМИР АН СССР, № 47, М., 1983. 25 с.
- [2] Ильин В.А., Любимова Т.Ф., Шурминова Т.М., Фатыхов К.З., Эткин В.С. - Препринт ИКИ АН СССР, № ПР-694, М., 1982, 57 с.
- [3] Гудков А.А., Махов В.И., Лихарев К.К. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 23, с. 1423-1426.
- [4] Завалеев В.П., Лихарев К.К. - Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 6, с. 1268-1278.

- [5] Ильин В.А., Шурминова Т.М., Эткин В.С. — Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 8, с. 1760–1764.
- [6] Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.М. Радиотелескопы и радиометры, М.: Наука, 1973. 416 с.

Московский государственный
педагогический институт
им. В.И. Ленина

Поступило в Редакцию
5 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

СИНХРОНИЗАЦИЯ И УДВОЕНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В МНОГОМОДОВЫХ СИСТЕМАХ

И.С. Арансон, Н.Ф. Рульков

К настоящему времени достаточно хорошо изучена структура зон синхронизации, возникающей при взаимодействии двухчастотных колебаний в относительно простых системах. В этом случае могут быть использованы модели с малым числом параметров, например одномерные отображения окружности и двумерные отображения кольца в себя [1, 2]. Однако при исследовании более сложных многомодовых систем (например, автогенераторов СВЧ диапазона [3, 4]), проявление синхронизации может быть существенно более многообразным, и зоны синхронизации могут быть качественно иной структуры. Несмотря на обилие экспериментального материала, фактически отсутствуют работы, посвященные систематическому анализу явлений синхронизации в системах с многомерным фазовым пространством¹. Целью нашего сообщения является исследование зон синхронизации, типичных для многомодовых систем и имеющих принципиальные отличия от изученных ранее.

Экспериментально исследуется синхронизация в неавтономном СВЧ автогенераторе с ферритовым резонатором. Установлено, что переход к хаосу в таком генераторе связан с резонансным взаимодействием трех близких по частоте мод резонатора [4, 5, 7]. Поэтому динамика такой системы приближенно описывается шестью дифференциальными уравнениями, зависящими от трех параметров [4]. Это свидетельствует о возможности существования более сложной, чем в [2], бифуркационной структуры синхронизации.

В эксперименте параметры генератора выбирались так, чтобы в отсутствие внешней модуляции наблюдался переход к хаосу через

¹ Нам известна лишь одна работа, где на примере модельных систем обсуждаются подобные явления [6].