

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ РАДИОМЕТРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТОРЦЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

Л. А. Гудков, В. А. Куликов, В. Н. Лаптев, Л. В. Матвеев, В. И. Мазов

В миллиметровом диапазоне длин волн наилучшая флуктуационная чувствительность была реализована на радиометрах с детекторами на основе точечных сверхпроводящих джозефсоновских контактов [1, 2]. Недостатками точечных контактов являются невоспроизводимость характеристик и недостаточная механическая стабильность, не позволяющие создать радиометр со стабильными характеристиками, в результате чего радиометры с точечными джозефсоновскими контактами не нашли практического применения в радиоастрономии.

Создание высококачественных стабильных тонкопленочных джозефсоновских переходов позволяет решить эту задачу.

В данной работе сообщается о предварительных результатах исследования характеристик макетов широкополосных радиометров модуляционного типа 8- и 4-мм диапазонов с детекторами на основе высокостабильных торцевых джозефсоновских переходов из тугоплавких материалов Nb—Si*—Nb.

Блок-схемы радиометров аналогичны схеме, применявшейся в радиометре с точечным контактом [2]. СВЧ часть каждого радиометра состоит из СВЧ приемника и модулятора-переключателя на сверхразмерных волноводах сечением 23×10 мм с облучающими рупорами на входах. Частота модуляции 400 Гц.

СВЧ приемник на 8 мм выполнен в виде отрезка волновода сечением 7.2×3.6 мм, длиной около 90 см с короткозамыкающим поршнем на конце, регулируемым снаружи джюара. Для СВЧ приемника на 4 мм был использован сверхразмерный волновод сечением 11×5.5 мм, соединенный плавным пирамидальным переходом с детекторной камерой, выполненной в виде отрезка волновода основного сечения 3.6×1.8 мм с короткозамыкающим регулируемым поршнем на конце.

В обоих макетах кремниевая пластина с тонкопленочным переходом вставлялась в прорез шириной 0.5 мм в центре широкой стенки волновода вдоль направления распространения волны H_{10} . Подключение перехода к блоку задания тока смещения осуществлялось с помощью упругих прижимных контактов. Для снижения уровня наводок на токовых проводах устанавливались охлаждаемые RC фильтры.

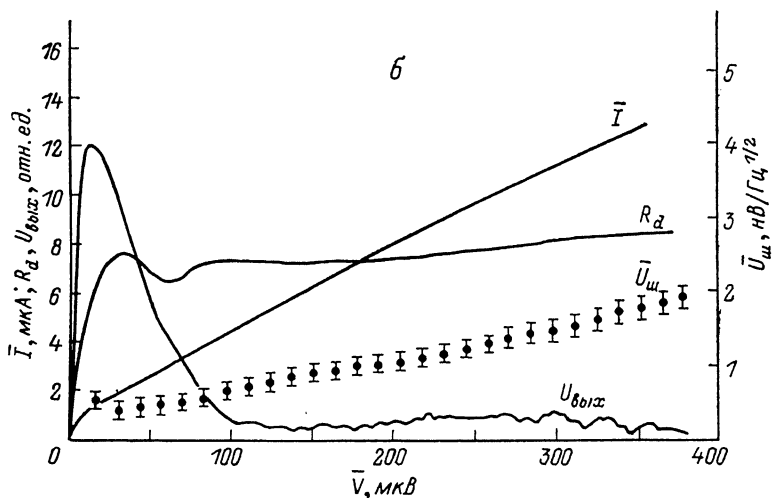
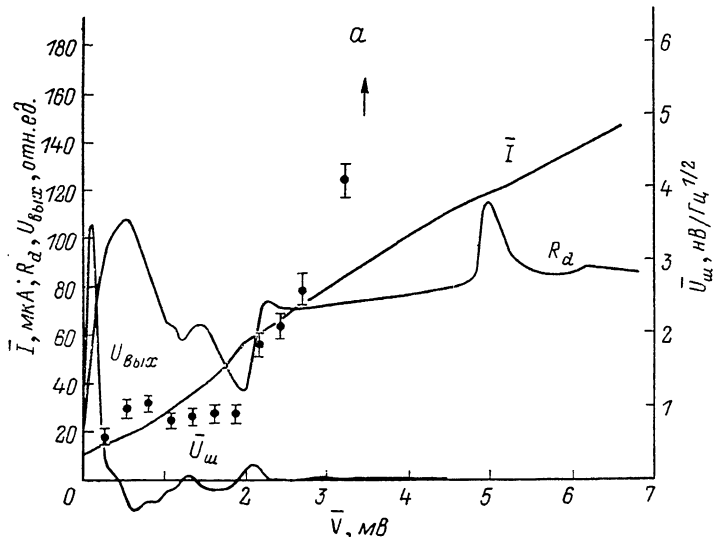
НЧ сигнал с перехода усиливался малошумящим предварительным усилителем, на входе которого располагался охлаждаемый до температуры жидкого гелия тороидальный трансформатор с коэффициентом трансформации $n=8$. С выхода предварительного усилителя сигнал поступал на основной усилитель, обеспечивающий усиление и синхронное детектирование сигнала, и регистрировался на самописце.

В качестве детектирующих элементов использовались торцевые джозефсоновские переходы Nb—Si*—Nb, выполненные интегральным способом на кремниевых подложках [3]. Джозефсоновский переход формировался на торце сверхпроводящей пленки Nb, служащей базовым электродом. Величина площади отдельного перехода составляла 0.4 мкм^2 , расчетные величины емкости $(0.3 \div 1.0) \cdot 10^{-14}$ Ф в зависимости от толщины кремниевой прослойки. Нормальные сопротивления переходов находились в пределах от 30 до 150 Ом, плотности критических токов исследованных переходов $j_c = 2 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$.

На рисунке, а, б для примера приведены характеристики используемых в радиометрах джозефсоновских переходов. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) этих переходов по виду аналогичны ВАХ точечных контактов.

На рисунке, а представлены характеристики перехода, величина нормального сопротивления которого, определенная по наклону ВАХ непосредственно за щелевой особенностью, составляла 46 Ом. Значение характерного напряжения $V_c = I_c R_N \sim 500 \text{ мкВ}$. На ВАХ этого перехода наблюдается отчетливая щелевая особенность при $V_g \approx 2 \text{ мВ}$ и избыточный ток $I_{ex} \sim 15 \text{ мкА}$, типичные для точечных джозефсоновских контактов. Величина шумового напряжения, измеренного на частоте 1 кГц, на начальном участке пропорциональна $R_d(\bar{V})$; за щелевой особенностью наблюдается резкое увеличение шума, которое может быть связано с перегревом перехода, подтверждением чему служит изменение наклона ВАХ и появление особенности на R_d в области напряжений $\bar{V} \sim 5 \text{ мВ}$. Для данного перехода величина шумового напряжения в рабочей точке, т. е. при напряжении, соответствующем максимальному отклику перехода, составляла $U_{ш} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ В/Гц}^{1/2}$.

При облучении перехода слабым монохроматическим излучением ($P \sim 10^{-11}$ Вт) с частотами $f=38$ и 75 ГГц отклик наблюдается при $\bar{V}=38$ и 100 мкВ соответственно, что согласуется с расчетами работы [4], из которых следует, что при уменьшении частоты воздействующего сигнала, т. е. при уменьшении $\Omega=f/V_c\Phi_0^{-1}$, амплитуда отклика должна увеличиваться, а величина напряжения, при котором отклик достигает максимума, уменьшаться. Зависимость $U_{\text{вых}}(\bar{V})$ пропорциональна производной от R_d . Величина отклика данного перехода, измеренная на входе приемника, равна $\eta_v=2 \cdot 10^5$ В/Вт на частоте 38 ГГц и $\eta_v=2 \cdot 10^4$ В/Вт на



ВАХ, зависимости дифференциального сопротивления R_d , выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и шумового напряжения $U_{\text{ш}}$ от напряжения смещения на переходах с параметрами: $R_N=46$ Ом, $V_c \sim 500$ мкВ (а) и $R_N=137$ Ом, $V_c \sim 140$ мкВ (б).

частоте 75 ГГц. При увеличении мощности СВЧ излучения на ВАХ этого перехода появляется структура четких ступеней, осциллирующих при изменении мощности излучения.

На рисунке, б показаны начальные участки характеристик перехода с нормальным сопротивлением $R_N=137$ Ом и критическим током $I_c \sim 1$ мкА.

Характеристики этого перехода сильно размыты шумами, щелевая особенность при $V_g=2$ мВ (на рисунке не показано) слабо выражена, максимальное значение R_d практически не превышает величину R_N . При воздействии сильного СВЧ сигнала происходит лишь общее понижение ВАХ, ступени не наблюдаются. Уровень шума в рабочей точке на частоте 1 кГц составляет $6 \cdot 10^{-10}$ В/Гц^{1/2}, величина отклика на частоте 38 ГГц $\eta_v=8.5 \cdot 10^4$ В/Вт.

Из анализа характеристик двух вышеприведенных переходов видно, что при различных параметрах переходов и неодинаковом поведении характеристик вольт-ваттные чувствитель-

ности их сравнимы по величине. Это можно объяснить тем, что величина отклика зависит как от качества перехода, характеризующегося величиной V_c , так и от степени согласования перехода с СВЧ трактом, которая зависит от величины сопротивления перехода и конструкции детекторной камеры.

Подробное исследование характеристик переходов данного типа с нормальными сопротивлениями свыше 30 Ом было проведено для девяти переходов. При небольших отличиях в форме ВАХ и отклика, обусловленных различием в величине нормального сопротивления, все переходы имели высокую вольт-ваттную чувствительность порядка $8 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$ В/Вт на частоте 38 ГГц и $(1 \div 2) \cdot 10^4$ В/Вт на частоте 75 ГГц и низкий уровень шума $\sigma_{ш} = (0.5 \div 1.0)$ нВ/Гц^{1/2} в рабочей точке, который в 3—5 раз превышает теоретическое значение шума, следующее из резистивной модели. Уровень шума точечных джозефсоновских контактов превышал теоретическое значение на один-полтора порядка.

Наилучшие значения наименьшей обнаружимой мощности, таким образом, составляли $NEP = 2 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2} на частоте 38 ГГц и $NEP = 2 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} на частоте 75 ГГц. Динамический диапазон, как и у точечных контактов, порядка 30—35 дБ.

При работе в радиометрическом режиме калибровка радиометров осуществлялась по внешним эталонам излучения — черным телам, выполненным из специальной резины и устанавливаемым перед облучателями. Использовались два эталона, один из них имел температуру окружающего воздуха, другой охлаждался жидким азотом. В процессе лабораторных испытаний была получена флуктуационная чувствительность $\delta T = 0.004 \div 0.006$ К на 8-мм макете радиометра и $\delta T = 0.03 \div 0.05$ К на 4-мм макете радиометра при постоянной времени выходного фильтра $\tau = 1$ с.

Входные полосы радиометров оценивались согласно методу, описанному в [5], и составляли 20—25 % от основной частоты.

Так как в процессе хранения и многократных изменений температуры от комнатной до гелиевой тонкопленочные джозефсоновские переходы не изменяют своих параметров, радиометры на их основе имеют высокую чувствительность и стабильные по времени характеристики, т. е. являются весьма перспективными для применения в радиоастрономии.

Авторы благодарны В. В. Мигулину за постоянное внимание к работе.

Литература

- [1] Антюх Е. В., Дивин Ю. Я., Заболотный В. Ф. и др. Астрон. журн., 1979, т. 56, № 1, с. 216—218.
- [2] Кисляков А. Г., Куликов В. А., Матвеев Л. В., Чернышев В. И. Письма в астрон. журн., 1982, т. 8, № 4, с. 253—256.
- [3] Гудков А. Л., Лихарев К. К., Махов В. И. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 23, с. 1423—1428.
- [4] Завалиев В. П., Лихарев К. К. РИЭ, 1978, т. 23, № 5, с. 1061—1071.
- [5] Harifuss H. J., Gundlach K. H., Schmidt V. V. J. Appl. Phys., 1981, v. 52, N 9, p. 5411—5413.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн АН СССР
Троицк Московской обл.

Поступило в Редакцию
5 мая 1987 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХЛОРИДНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ РЕАКТОРАХ

А. Д. Быховский, Ю. В. Жилев, И. П. Ипатова, А. Ю. Куликов, Ю. Н. Макаров

Перспективным подходом, позволяющим исследовать процессы роста слоев, является математическое моделирование. В настоящее время оно успешно применяется для изучения роста слоев кремния [1], арсенида галлия в МОС-гидридной системе [2, 3]. Несмотря на то что хлоридная система достаточно глубоко изучена экспериментально и достигнуто качественное понимание протекающих в ней процессов, пока нет математической модели, адекватно описывающей рост слоев арсенида галлия с учетом взаимодействия газового потока и подложки.