

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ ТОРЦЕВЫХ
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

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

Как уже сообщалось [1], для использования в качестве высокочувствительных СВЧ детекторов весьма перспективными являются джозефсоновские торцевые переходы $Nb-Si^*-Nb$ с прослойкой из поликристаллического кремния, выполненные по интегральной технологии [2]. Пороговая чувствительность джозефсоновских детекторов практически определяется их низкочастотными шумами, поэтому важно знать величину НЧ шумов джозефсоновского перехода, закономерности их появления и связь шума с параметрами и характеристиками перехода.

В данном сообщении приводятся предварительные результаты экспериментальных исследований низкочастотных шумов торцевых переходов с сопротивлениями $R_N = 20-80$ Ом и значениями $V_C = I_C R_N \sim 350-500$ мкВ в зависимости от величины тока смещения \bar{I} через переход, т.е. в различных характерных точках вольт-амперных характеристик.

Измерения НЧ шумов торцевых переходов производились на спектроанализаторе СК4-72 в диапазоне частот 0.1-20 кГц при эффективной шумовой полосе пропускания 100 Гц. Исследуемые переходы помещались в экранированную детекторную камеру широкополосного СВЧ приемника 8 мм диапазона, конструкция которого аналогична описанной в [1]. Ток смещения на переход подавался от батарейного источника тока через систему охлаждаемых фильтров. Шумовое напряжение, возникающее в переходе, усиливалось малошумящим усилителем, поступало на вход спектроанализатора и регистрировалось на самописце. Для согласования входа предусилителя с джозефсоновским переходом применялся охлаждаемый до 4.2 К согласующий трансформатор. Измерительная система калибровалась по тепловым шумам резисторов при 300 К и 4.2 К. Величина шума, приведенная к входу трансформатора при включении вместо перехода резистора с сопротивлением 50 Ом, составляла $2 \cdot 10^{-10}$ В/Гц^{1/2}.

Наряду со спектральными измерениями регистрировались: вольт-амперная характеристика $\bar{V}(\bar{I})$, дифференциальное сопротивление R_d и отклик $U_{вых}$ перехода на СВЧ сигнал с частотой $f = 38$ ГГц в зависимости от напряжения смещения на переходе. Также производилось измерение шумового напряжения $\bar{U}_ш(\bar{V})$ на частоте 1 кГц усилителем У2-8 с шумовой полосой пропускания $\Delta f = 14$ Гц.

Как уже отмечалось [1], исследуемые переходы в зависимости от толщины полупроводниковой прослойки и от серии к серии демонстрируют разнообразие характеристик. Для шумовых измерений были выбраны переходы, отличающиеся друг от друга как параметрами

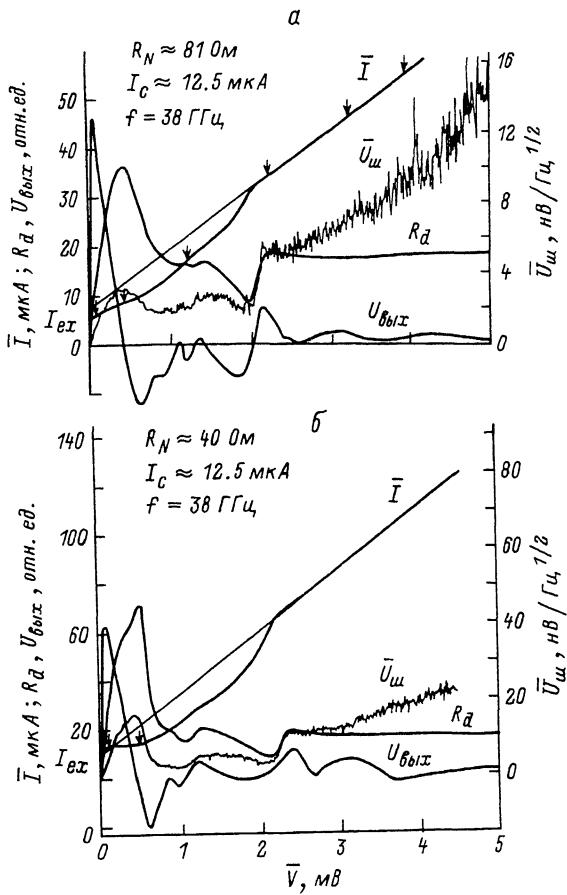


Рис. 1. ВАХ, R_d , $U_{ш}$ и отклик $U_{вых}$ переходов: а) „малозумящего“, б) „сильнозумящего“.

рами, так и поведением ВАХ, R_d , $U_{вых}$, $\bar{U}_{ш}$ в зависимости от напряжения смещения.

Полученные зависимости шумового напряжения на переходе от частоты свидетельствуют о наличии разброса этих характеристик и о существовании как „малозумящих“, так и „сильнозумящих“ переходов. Отличия наблюдаются не только в величине шума, но и в виде спектров шума этих переходов.

На рис. 1, а представлены характеристики „малозумящего“ перехода с $V_C \sim 500$ мкВ. ВАХ перехода имеет значительный флуктуационный загиб, так что отношение $R_{dmax}/R_N \sim 2$. На ВАХ и на зависимости $R_d(\bar{V})$ отчетливо выражена щелевая особенность при $V_g \sim 2$ мВ. Величина избыточного тока $I_{ex} \sim 1.5 I_C$. Отклик на СВЧ сигнал принимает максимальное значение в области флуктуационного загиба при $\bar{I} \sim 5$ мкА. Вольт-ваттная чувствительность

данного перехода, измеренная на входе приемника, на частоте 38 ГГц составляет $1.1 \cdot 10^5$ В/Вт.

Зависимость $\bar{U}_{ш}(\bar{V})$ на частоте 1 кГц полностью повторяет все изменения зависимости $R_d(\bar{V})$ до значений $\bar{V} = V_g$, на щелевой особенности шум резко увеличивается и далее линейно возрастает с увеличением напряжения на переходе до $\bar{V} \sim 4$ мВ. Изменение наклона зависимости $\bar{U}_{ш}(\bar{V})$, наблюдаемое при больших напряжениях, связано, по-видимому, с нагревом перехода протекающим по нему током. Однако величина шумового напряжения пропорциональна величине R_d только на начальном участке ВАХ; при $\bar{V} > 400$ мкВ изменение величины шума не пропорционально R_d , что связано с вкладом дробового и фликкерного шумов.

О характере изменения величины и природы шума дают представление приведенные на рис. 2 спектральные зависимости эффективного шумового напряжения на переходе, измеренные при разных значениях тока смещения, обозначенных на ВАХ стрелками (рис. 1).

При малых значениях тока смещения $\bar{I} \sim I_c$ (для анализа выбиралась величина тока, при которой отклик на СВЧ сигнал имел максимальное значение) „малошумящие“ переходы демонстрировали почти постоянное шумовое напряжение во всем интервале исследуемых частот, т.е. вклад шума типа $1/f$ незначителен. Величина эффективного шумового напряжения составляла 0.5–0.6 нВ/Гц^{1/2}, что в 4 раза превосходит расчетные значения шума джозефсоновского перехода в тепловом пределе [3]. При увеличении тока смещения через переход наряду с общим возрастанием уровня шума на всех частотах происходило преимущественное увеличение шумового напряжения на низких частотах ($f < 5$ кГц), т.е. спектры приобретали вид, характерный для шума $1/f$.

Характеристики одного из „сильношумящих“ переходов, число которых составляет незначительную часть от общего числа исследованных переходов, представлены на рис. 1, б. Характерной чертой этих переходов является крутой загиб вольтамперной характеристики при $\bar{V} \rightarrow 0$, так что начальный участок ВАХ почти параллелен оси напряжений. Отношение $R_{dmax}/R_N = 5$, избыточный ток немного меньше критического. Величина отклика на СВЧ сигнал $\sim 2.1 \cdot 10^4$ В/Вт

Поведение $\bar{U}_{ш}(\bar{V})$ на частоте 1 кГц практически не отличается от хода этой зависимости у „малошумящих“ переходов, однако величина эффективного шумового напряжения в несколько раз больше при всех значениях напряжения смещения. Спектральные зависимости „сильношумящих“ переходов, представленные на рис. 2 штриховыми линиями, имеют вид, свойственный фликкер-шуму, при всех значениях $\bar{I} > I_c$.

Приведенные выше значения вольтваттной чувствительности торцевых переходов к СВЧ излучению с частотой 38 ГГц измерялись на входе приемника, в котором не были приняты специальные меры по обеспечению согласования перехода с СВЧ трактом. Величина мощности, поглощаемой непосредственно в переходе, по нашим экспериментальным оценкам составляла менее 10% мощности, поступающей на вход приемника.

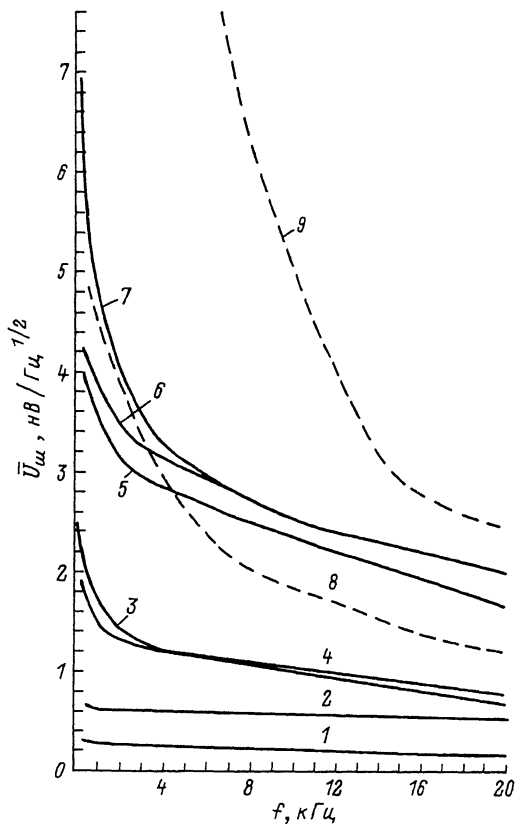


Рис. 2. Изменение эффективного шумового напряжения от частоты при различных значениях тока $i = \bar{I}/I_c$ через переход. Сплошные линии — для „малозумящего“ перехода: 1 — $i=0$, 2 — $i=0.85$, 3 — 1.26, 4 — 2.5, 5 — 5.2, 6 — 7.0, 7 — 8.5. Штриховые линии — для „сильношумящего“ перехода: 1 — $i=0.98$, 2 — 1.15.

Измерения, проведенные на аналогичном по конструкции приемнике 4 мм диапазона, дают значения вольтваттной чувствительности порядка единиц на 10^4 В/Вт.

Таким образом, предварительные измерения НЧ шумов джозефсоновских торцевых переходов $Nb-Si^*-Nb$ показывают, что большинство переходов при малых величинах тока смещения имеют величину шума порядка десятых долей нановольта. Значения пороговой мощности, приведенные ко входам приемников 4 мм и 8 мм диапазонов, в нашем случае составляли $10^{-14} \div 10^{-15}$ Вт/Гц $^{1/2}$ соответственно. Улучшение степени согласования переходов с СВЧ трактом приемников позволит почти на порядок улучшить эти значения и приблизиться к теоретическому пределу [3].

Наличие „сильношумящих“ переходов связано, по-видимому, со структурными дефектами пленок или с особенностями технологического цикла. При практическом применении данных переходов необходимо производить отбор их по шумовым параметрам.

Выяснение природы составляющих НЧ шума и связь низкочастотных шумов с параметрами переходов требуют дальнейших тщательных измерений.

Л и т е р а т у р а

- [1] Гудков А.Л., Куликов В.А., Лаптев В.Н., Матвеев Л.В., Махов В.И. – Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 9, с. 527–532.
- [2] Гудков А.Л., Лихарев К.К., Махов В.И. – Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 23, с. 1423–1428.
- [3] Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами, М.: МГУ, 1978.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн АН СССР

Поступило в Редакцию
16 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 14

26 июля 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СПЕКТРА ЧАСТОТ ПЛОСКОГО ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕРКАЛ

А.М. Ф у р с о в, Ю.И. Л е о н о в,
Б.М. Б у л г а к о в

В настоящей работе получены теоретические результаты, показывающие, что при определенных условиях ступенчатая деформация зеркал, формирующих открытую колебательную систему, приводит к снижению уровня дифракционных потерь открытого резонатора (ОР). Исследованы также эффекты, связанные с межмодовым взаимодействием и преобразованием структуры полей компонент спектра ОР в процессе деформации зеркал.

Рассмотрим собственные колебания в плоском ОР, геометрия которого представлена на рис. 1, а. Строгое решение задачи, ориентированное на поиск собственных частот ОР вида $\alpha = \frac{\omega}{\lambda} = \alpha' - i\alpha''$ (α' – безразмерная частота, $\alpha'' > 0$ – декремент затухания), как функции безразмерной высоты ступени $\tilde{h} = l - b/a$, осуществляется с помощью предложенного в данной работе подхода, в основе которого лежат: метод обобщенной матрицы рассеяния [1] и волноводная концепция „удержания“ поля в объеме открытой колебательной системы [2].