Исследование режимов смешения туннельных сверхпроводниковых структур

К.В. Калашников[1,2,*], А.А. Артанов[1,2], Л.В. Филиппенко[1], В.П. Кошелец[1,§]

1 Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва.

2 Московский физико-технический институт, пер. Институтский, 9, Долгопрудный.

*kalashnikov@hitech.cplire.ru, §valery@hitech.cplire.ru

Исследованы различные режимы работы туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник на основе трехслоек $Nb/AlO_x/Nb$ и Nb/AlN/NbN в качестве смесителя (в диапазоне 0,1-10 ГГц) и гармонического смесителя (для частот порядка 600 ГГц и 20 ГГц). Проведено сравнение квазичастичного и джозефсоновского режимов смешения, исследовано влияние параметров СИС-перехода на его смесительные свойства. Показано, что в некоторых приложениях, таких как использование СИС-перехода в качестве криогенного гармонического фазового детектора, джозефсоновский режим может быть предпочтительнее квазичастичного, поскольку позволяет реализовать как больший сигнал (на 7 дБ), так и большее соотношение сигнал/шум (на 4 дБ) по сравнению с квазичастичным. Также показана перспективность использования джозефсоновского режима смешения в системах мультиплексирования сигналов для сверхпроводниковых детекторов.

Смесительные сверхпроводниковые наноструктуры на основе туннельных переходов широко используются в приемных системах терагерцевого диапазона. В данных системах эффект Джозефсона традиционно считался паразитным, приводящим лишь к появлению дополнительного шума, в связи с чем критический ток переходов подавлялся магнитным полем. В представленной работе показано, что в некоторых приложениях джозефсоновское смешение является предпочтительным режимом работы.

Одним из новых применений туннельного СИС-перехода является его использование в качестве криогенного гармонического фазового детектора (КГФД) для сверхширокополосных систем стабилизации излучения криогенных терагерцевых генераторов. Ранее было продемонстрировано, что функциональное объединение гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе позволяет значительно расширить полосу синхронизации системы ФАПЧ и улучшить спектральное качество [1]. Тем не менее, поскольку качество синхронизации напрямую зависит от амплитуды выходного сигнала КГФД, необходимы оптимизация режимов работы и исследование режимов смешения. Исследование мощности выходного сигнала проводилось в режиме гармонического смесителя (ГС), когда на туннельном СИС-переходе $Nb/AlO_x/Nb$ происходило смешивание сигнала внешнего синтезатора (лампы обратной волны) частоты около 600 ГГц с сигналом опорного синтезатора частоты около 20 ГГц, конкретные значения подбирались таким образом, чтобы сигнал промежуточной частоты (ПЧ) попадал в полосу каскада усилителей 4-8 ГГц. Сигнал ПЧ после прохождения узкополосного перестраиваемого ЖИГ-фильтра анализировался с помощью спектроанализатора либо измерителя мощности. На рис. 1 приведены спектры пониженного по частоте сигнала синтезатора для различных режимов смешения: пунктирная кривая соответствует полностью подавленному внешним магнитным полем критическому току, штриховая – подавлению эффекта Джозефсона большой (около 12 дБм) мощностью опорного синтезатора, сплошная – оптимальному смешению при неподавленном криттоке.

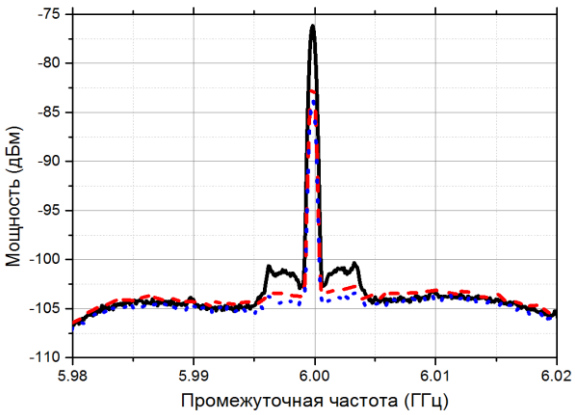

Рис. 1. Пониженные по частоте спектры опорного синтезатора для различных рабочих точек смесителя

Из приведенных графиков видно, что при использовании как джозефсоновской, так и квазичастич-

ной нелинейностей (сплошная линия) выходной сигнал увеличивается на 7.5 дБ по сравнению с лишь только квазичастичным (штриховая и пунктирная линии), при этом уровень шума возрастает лишь на 3 дБ. Большая эффективность джозефсоновского преобразования приводит к тому, что использование системы ФАПЧ на основе КГФД для стабилизации линии излучения длинного джозефсоновского перехода (ДДП) шириной 17.8 МГц позволяет синхронизировать до 86% мощности, тогда как подавление эффекта Джозефсона в КГФД уменьшает эту величину до 68%. Таким образом, джозефсоновский режим является более предпочтительным для эффективного функционирования СИС-перехода в качестве КГФД.

Была исследована зависимость эффективности работы ГС на основе СИС-перехода от его площади. С этой целью была создана серия образцов, содержащих СИС-переходы с разными геометрическими размерами (площади от 1 до 5 мкм^2) и интегрированным генератором на основе ДДП. На переходе происходило смешение сигнала ДДП частотой около 600 ГГц и опорного синтезатора частотой около 20 ГГц, сигнал на промежуточной частоте 6 ГГц попадал на измеритель мощности. Для каждого образца были измерены зависимости мощности ПЧ-сигнала от напряжения смещения и мощности опорного синтезатора для джозефсоновского и квазичастичного режимов смешения. Измерения показали, что эффективность работы СИС-перехода в качестве КГФД от его размеров зависит слабо, при этом максимальный выходной сигнал СИС-перехода в режиме квазичастичного смешения достигает -83 дБм, а в джозефсоновском около -75 дБм для площади перехода 3.2 мкм^2, что соответствовало скачку тока на щели I_g = 800 мкА.

Еще одним перспективным применением смесителей на туннельных СИС-переходах является их использование в системах мультиплексирования для считывания сигнала с многопиксельных приемников, основанных на болометрах на краю сверхпроводящего перехода [2]. Для изучения возможности использования СИС-перехода в качестве преобразователя вверх по частоте были измерены потери преобразования сигнала частотой 223 МГц в сигнал 5.223 ГГц с помощью гетеродина 5 ГГц в зависимости от параметров сигналов. На рис. 2 представлена зависимость потерь преобразования от напряжения смещения на переходе для мощности гетеродина –40 дБм в различных режимах смешения.

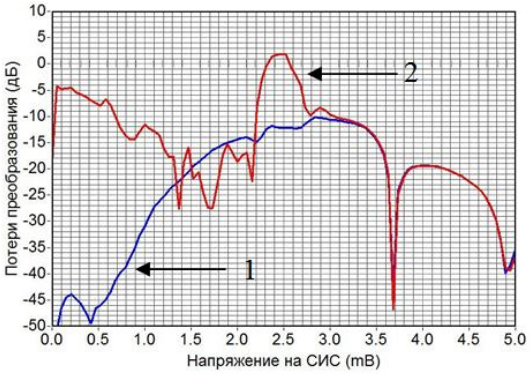

Рис. 2. Потери преобразования вверх по частоте сигнала 223 МГц в зависимости от напряжения смещения на СИС-переходе с подавленным критическим током (кривая 1) и без его подавления (кривая 2)

Как видно из данного графика, в квазичастичном режиме реализуется более плавная зависимость потерь преобразования от смещения, что существенно при выборе рабочей точки смесителя. С другой стороны, в квазичастичном режиме потери преобразования значительно превосходят потери в джозефсоновском, поэтому последний может быть более предпочтительным.

Таким образом, в данной работе показано, что в некоторых практических приложениях смесителей на основе СИС-переходов является желательным наличие не только квазичастичной, но и джозефсоновской нелинейности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение №14.613.21.0046; идентификатор RFMEFI61315X0046).

Литература

1. Kalashnikov K.V. *et al.* Harmonic phase detector for phase locking of cryogenic terahertz oscillators // App. Phys. Lett., 103, 102601 (2013).
2. de Lange G. Feasibility of a Frequency-Multiplexed TES Read-Out Using Superconducting Tunnel Junctions //Journal of Low Temperature Physics., V. 176, 3-4, 408 (2014).