

- [6] Ono R.H., Beall J.A., Cromar M.W. et al. // Mat. Appl. Supercond. Conf., San-Francisco. 1988. P. 65-68.
- [7] Ильин И.А., Масленников Н.М., Семенов И.А. // РТЭ. 1989. Т. 34. № 6.
- [8] Rogers C.T., Buhman R.A. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. P. 1279-1282.
- [9] Wiener-Awneer E., Cooper J.E., Kerner G.L. et al. // Mat. Appl. Supercond. Conf., San-Francisco. 1988. P. 210-213.
- [10] Гудков А.Л., Куликов И.Н., Лаптев В.Н. и др. // Препринт ИЗМИР АН СССР, № 9 (763). 26 с.

Московский государственный  
педагогический институт  
им. В.И. Ленина

Поступило в Редакцию  
3 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 22  
05.4; 09

26 ноября 1989 г.

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ПРИЕМНИК 8 ММ ДИАПАЗОНА С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА

А.В. Поладич, Л.П. Стрижко

Малый уровень имеющих дробовый характер собственных шумов туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) и высокая нелинейность их ВАХ позволили, несмотря на трудности согласования, снизить шумовую температуру  $T_R$  приемников мм диапазона до  $\sim 100$  К [1]. Дальнейшее снижение  $T_R$  рассматривалось до настоящего времени в связи с возможностью в СИС-переходах усиления при преобразовании в квантовом режиме, в эксперименте получена  $T_R = 24$  К на 34.5 ГГц [2]. Но условие работы в квантовом режиме  $h\nu/e > V_G$ ,  $V_G$  - интервал нелинейности ВАХ, выполняется или на больших частотах, или в средне- и длинноволновой частях мм диапазона для переходов с очень высокой нелинейностью, часто лишь при  $T < 2$  К, достигаемой откачкой паров гелия. Во многих случаях недостаточно широким остается и динамический диапазон квантового смесителя. В то же время в классическом режиме, где сохраняется описываемая ВАХ связь между мгновенными значениями тока и напряжения и отсутствует усиление, до настоящего времени не удавалось достичь столь же низких, как в квантовом, шумовых температур.

В этом письме мы сообщаем об исследовании приемника на СИС-переходах, работающих в классическом режиме смешения, по параметрам не уступающего квантовым СИС-приемникам, а также квантовым парамагнитным усилителям (мазерам).

Решение задачи создания приемника с низкой шумовой температурой достигнуто оптимизацией основных узлов: входного сигнального тракта, смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

Входной тракт длиной 50 см выполнен на волноводах сечением 7.2x3.4 мм и содержит короткую нейзильберовую тепловую развязку, а также охлаждаемые гелием ответвитель, служащий для ввода гетеродина, и ИК поглотитель, оба с пренебрежимо малыми потерями по сигналу. В целом потери во входном тракте равны 0.4 дБ, из них  $\approx 0.2$  дБ в тепловой развязке. По оценке вклад входного тракта в шумовую температуру приемника не превышает 8 К.

В приемнике применена конструкция смесительной камеры пониженной высоты, подобная описанной ранее [3]. Нелинейность использованных свинцовых СИС-переходов позволяет работать в классическом режиме в 8 мм диапазоне волн. Совместное влияние емкости перехода и индуктивности его электродов приводит к относительно невысокой нагруженной добротности СВЧ контура смесителя и делает приемник при использованной полосе промежуточных частот 430...530 МГц двухполосным. Входная полоса, определенная по изменению потерь преобразования при расстройке гетеродина по частоте с одновременной подстройкой его мощности и при приеме шумового сигнала, составляет  $\approx 2.2$  ГГц по уровню 3 дБ.

Определение потерь преобразования было возможным благодаря калибровке выходного шумового сигнала смесителя в единицах температуры по известной величине дробовых шумов СИС-перехода [4]. Погрешностью этого метода, вызванной различием в согласовании с УПЧ СИС-перехода, смещенного при калибровке на квазичастичную ветвь ВАХ и в рабочую точку при смещении, в нашем случае можно пренебречь. Источником шумового сигнала при определении потерь преобразования смесителя и температуры шума приемника  $T_R$  служила волноводная нагрузка с КСВН  $< 1, 1$ , пристыкованная ко входному фланцу приемника и охлаждаемая при необходимости жидким азотом. Потери преобразования  $L$  определялись как отношение  $\Delta R_{ПЧ}$  (К)/(293-78) К (рис. 1) и включают потери во входном тракте. Минимальная величина  $L$  составила 5.8 дБ для перехода площадью 7 мкм<sup>2</sup>,  $R_N=60$  Ом при 4.2 К (что на  $\approx 0.6$  дБ лучше предыдущего результата [3]). Их зависимость от мощности гетеродина имеет характерный для классического режима широкий минимум - при изменении  $P_{Г}$  на  $\pm \frac{2}{5}$  дБ увеличивается на 0.4 дБ, что позволяло работать без стабилизации мощности гетеродина (генератор на диоде Ганна). Частотная зависимость потерь определяется параметрами фильтра низких частот в цепи питания и сигнала ПЧ и в некоторой степени растущим с частотой влиянием емкости перехода и индуктивности электродов и в основном совпадает с зависимостью  $T_R$ , приведенной на рис. 2.

В классическом режиме смещение всегда происходит с потерями, поэтому согласование смесителя с УПЧ и снижение температуры шума УПЧ имеет особую важность. В созданном нами усилителе удалось, оптимизируя согласование с СИС-переходом и тепловой режим

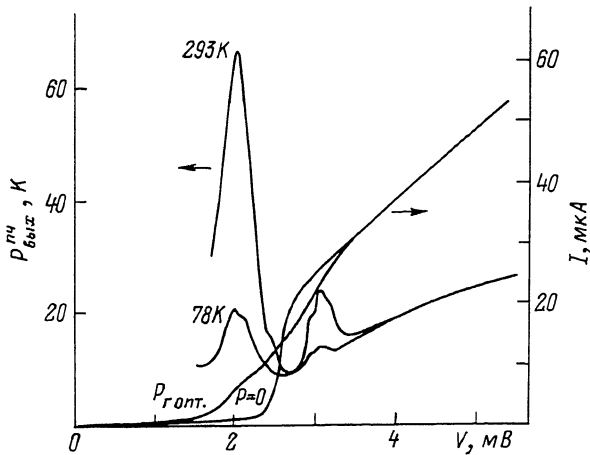


Рис. 1. Выходной сигнал приемника при температуре входной нагрузки 293 К и 78 К и ВАХ СИС-перехода с включенным гетеродином и без него. Шкала температур относится к ПЧ выходу смесителя и калибрована по дробовому шуму СИС-перехода.

первых двух охлаждаемых гелием каскадов, выполненных на транзисторах АП325, снизить  $T_{ПЧ}$  до весьма низкой величины —  $(1, 1...3) \pm 0.3$  К (включая шумы последующих неохлаждаемых каскадов и в зависимости от согласования;  $T_{Ш}$  первого каскада усилителя  $0.5 \pm 0.3$  К).  $T_{ПЧ}$  определялась по известной зависимости дробовых шумов СИС-перехода от напряжения смещения на линейном участке квазиэлектронной ветви ВАХ [4]. Имеющаяся погрешность, связанная с нарушением линейности ВАХ из-за особенностей в плотности фоновых состояний свинца, достаточно мала и проявляется как погрешность геометрических построений по рис. 1, выполняемых при определении  $T_{ПЧ}$  этим методом.

Улучшение характеристик каждого из описанных выше узлов позволило получить низкую шумовую температуру приемника в целом. В полосе частот 30...37 ГГц  $T_R^{DSB}$  не превышает, как правило, 50 К при использовании переходов с  $R_N = 40...200$  Ом и площадью  $< 10$  мкм<sup>2</sup> ( $\omega(R_N = 2...6)$ ), пример частотной зависимости показан на рис. 2. Для получения возможно более низких  $T_R$  необходимо оптимизировать согласование конкретного перехода с УПЧ, одним из лучших при 4.2 К является результат  $T_R^{DSB} = 19_{-4}^{+5}$  К. При подсчете  $T_R$  температуры нагрузки приняты равными 77.35 и 293 К, а указанная погрешность связана, в основном, с возможным их отличием от принятых при подсчете. Благодаря отмеченной выше возможности определения потерь преобразования, можно оценить вклад в  $T_R$  отдельно входного тракта и смесителя. Для этого достаточно использовать выражение

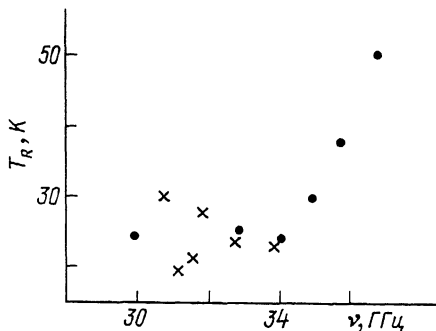


Рис. 2. Частотная зависимость температуры шума приемника (две серии измерений), температура гелиевой ванны 4.2 К.

$$T_R = T_{BX} + L_{BX} T_{СИС} (L_M - 1) + L_{BX} L_M T_{ПЧ},$$

где  $T_{BX}$  – температура шумов входного тракта,  $T_M$  – смесителя,  $T_{СИС}$  – СИС-перехода,  $L_{BX}$  – потери во входном тракте,  $L_M$  – потери преобразования в смесителе, и результаты измерений  $T_R$  (рис. 1) для двух  $L_M$ , например, при разных мощностях гетеродина. Так как  $T_R$  низкие, то довольно мала и абсолютная погрешность такого расчета, но указать погрешность затруднительно в связи с возможным неконтролируемым изменением ТПЧ при переходе с изменением мощности гетеродина в рабочую точку с иным наклоном ВАХ. Оценки сверху составляют:  $T_{BX} < 8$  К,  $T_M < 6$  К для случая  $T_R = 2.3$  К,  $L_M = 6$  дБ.

Работа в классическом режиме позволяет устранить недостаток, свойственный квантовым СИС-приемникам – малый динамический диапазон. Проведенные измерения с использованием газоразрядного генератора ГШ-6 подтвердили преимущество классического режима, приемник сохранял линейность в пределах 1 дБ при входном сигнале по крайней мере 5000 К, что соответствует динамическому диапазону  $\approx 24$  дБ.

Достигнутые чувствительность и динамический диапазон достаточны, в частности, для радиоастрономических применений. Дальнейшее снижение  $T_R$  при сохранении классического режима связано с возможным снижением  $T_{BX}$  на 2...3 К, потерь преобразования в смесителе до  $\approx 4$  дБ и снижением ТПЧ до  $\approx 0.7$  К. Совместно это может обеспечить  $T_R = 1.2...1.3$  К, но в условиях физического эксперимента, когда может быть исключен входной тракт, при охлаждении смесителя до 1.7 К и ниже становится возможной постановка задачи о достижении  $T_R$ , близкой к квантовому пределу чувствительности  $h\nu/k$ .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] T u c k e r J.E., F e l d m a n M.J. // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. N 4. P. 1055-1113.
- [2] F a s e D.W., P r o b e r D.E., M c G r a t h W.R., R i c h a r d s P.L. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. N 16. P. 1098-1100.
- [3] П о л а д и ч А.В., С т р и ж к о Л.П. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 8. С. 1546-1548.
- [4] W o o d y D.P., M i l l e r R.E., W e n g l e r M.J. // IEEE Trans. on MTT. 1985. V. 33. N 2. P. 90-95.

Радиоастрономический  
институт АН УССР,  
Харьков

Поступило в Редакцию  
31 июля 1989 г.