

личина отклика пропорциональна дифференц. сопротивлению R_d ДП и обратно пропорциональна f^2 . Для смещений вблизи ступеньки отклик резонансным образом зависит от f , т. е. является селективным. В основу конструкции квадратичных детекторов положена схема обычного модуляца. радиометра, а в качестве ЧЭ чаще всего используется сверхпроводящий точечный контакт, смещение на к-ром задаётся в максимуме R_d . В области высоких частот ($f \sim 100-200$ ГГц) лучшие из полученных значений P_{Π} достигают $10^{-14}-10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2}. Спектральная область чувствительности детекторов простирается до ~ 1000 ГГц, при этом, однако, P_{Π} ухудшается с ростом f .

В гетеродинах приёмниках излучения нелинейности ВАХ ДП используется для смещения поступающего сигнала с частотой f с сигналом внеш. гетеродина f_T и с дальнейшим усилением по промежуточной частоте $f_{\Pi} = |f - f_T|$. Общая схема приёмника аналогична обычным гетеродинам приёмникам с нелинейным смесительным элементом (см. Радиоприёмные устройства). Наилучшая эффективность преобразования частот получается при задании смещения на ДП в точке максимума R_d (обычно между 0 и V_1 — первой ступенькой). Чувствительность приёмника со смесителем зависит от величины шума, добавляемого при преобразовании частоты сигнала к f_{Π} , и обычно характеризуется соответствующей шумовой температурой T_N . Сильная нелинейность ВАХ и наличие в ДП собств. генерации создают условия для преобразования «вниз» по частоте не только полезного сигнала, но и мн. ВЧ-компонентов шума. В результате, как показывают теория и эксперимент, T_N смесителя на основе ДП в десятки раз превышает его физ. темп-ру. Частотная область использования смесителей с ДП составляет 30—500 ГГц. Для частот ~ 100 ГГц наименьшее достигнутое значение T_N равняется ≈ 100 К. Как квадратичные детекторы, так и гетеродинами приёмники на основе ДП широко не применялись. Причина этого в недостаточной стабильности свойств обычно используемых в них сверхпроводящих точечных контактов и в повыш. уровне шума. Вместе с тем по своим возможностям они в ВЧ-области (100—1000 ГГц) превосходят, по-видимому, приёмники, основанные на Шоттки эффекте и одночастичных туннельных переходах (см. Туннельный эффект).

В туннельных переходах сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник (СИС) при напряжении смещения $V = 2\Delta/e$, где Δ — ширина энергетич. щели сверхпроводника, начинается туннелирование отд. электронов, к-рому соответствует резкий рост тока через переход (рис. 4). Большая нелинейность ВАХ такого одно-

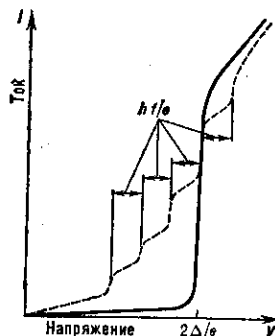


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного перехода сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник. Сплошная кривая — ВАХ без действия излучения, штриховая кривая — ВАХ при действии излучения с частотой f .

частичного туннелирования может быть использована для прямого детектирования эл.-магн. излучения. Отклик приёмного элемента СИС в этом случае определяется как изменение тока через переход на единицу мощности падающего излучения. В случае низких частот отклик пропорционален крутизне ВАХ, а при частотах $hf > \delta V$, где δV — ширина области роста тока вблизи энергетич. щели, предельное значение от-

клика соответствует квантовому пределу hf/e . Пороговая чувствительность P_{Π} такого детектора ограничивается шумом тока смещения. В квантовом пределе P_{Π} пропорциональна корню квадратному из числа фотонов, поглощённых за время, соответствующее обратной ширине полосы детектора, и вызывающих изменение тока в детекторе, равное ср. шумовому току. Достигнутое значение $P_{\Pi} = 2,6 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2} для частоты 36 ГГц очень близко к квантовому пределу и является наилучшим для детекторов миллиметрового диапазона. В комбинаров. туннельном переходе сверхпроводник — изолятор — нормальный металл было осуществлено детектирование излучения с частотами ≈ 600 ГГц, величина отклика при этом также была близка к квантовому пределу.

Резкая нелинейность ВАХ переходов СИС используется для создания смесителей миллиметрового диапазона. Первоначально СИС использовался только как нелинейное сопротивление по схеме обычного классич. смесителя. В этом режиме для туннельного перехода Pb(Bi) были получены малые потери преобразования (≈ 2 дБ), а шумовая темп-ра 3 ± 4 К (на частоте ≈ 36 ГГц). Позднее теоретически и экспериментально было показано, что в результате происходящего в СИС процесса туннелирования, сопровождаемого поглощением фотонов падающего излучения, $hf > \delta V$, выходной импеданс может принимать очень большие значения и даже становиться отрицательным. Подобные эффекты наблюдаются при смещении, несколько меньшем $2\Delta/e$, и в этом случае преобразование сигнала может осуществляться с большим усилением. Реализация больших усилений на практике приводит к неустойчивой работе приёмника. Поэтому наиб. выгодным оказался режим работы с таким усилением, при к-ром шумовая темп-ра усилителя промежуточной частоты, пересчитанная к смесителю, соответствует уровню шумовой темп-ры смесителя T_N . В таком режиме на оловянном СИС с крутой ВАХ при усилении ≈ 4 дБ удалось достичь значений $T_N = 9 \pm 6$ К для частоты 36 ГГц. Смесители на основе СИС получили довольно широкое распространение и на практике применяются разл. варианты их конструкций. Частотная область их использования 30—300 ГГц. Значение T_N близко к квантовому пределу hf/k и по этому параметру СИС-смесители превосходят и смесители на основе джозефсоновских переходов и на основе эффекта Шоттки. По своей чувствительности они достигли уровня *мазеров*, будучи вместе с тем более высокочастотными и широкополосными, чем последние. Частотный диапазон СИС-смесителей со стороны высоких частот ограничивается шунтирующим действием собств. ёмкости перехода и возрастанием вклада дополнит. (джозефсоновского) шума с увеличением частоты. Для повышения рабочих частот перспективным является использование сверхпроводящих материалов с высокой критической температурой.

Высокая чувствительность описанных выше С. п. и, в ряде случаев близкая к квантовому пределу, делает целесообразным их применение прежде всего для регистрации чрезвычайно слабых потоков эл.-магн. излучения — в спектроскопии, астрономии, биологии, медицине и во многих физ. измерениях.

Лит.: Надь Ф. Я., Приёмники миллиметрового и субмиллиметрового излучения на основе джозефсоновских переходов, «ПТЭ», 1975, № 1, с. 7; Кошелев В. П., Овсянников Г. А., Криогенные СВЧ устройства, «Зарубежная радиоэлектроника», 1983, № 6, с. 31; Хребтов И. А., Сверхпроводниковые болометры, «ПТЭ», 1984, № 4, с. 5; Tucker J. R., Feldman M. J., Quantum detection at millimeter wavelengths, «Rev. Mod. Phys.», 1985, v. 57, № 4, p. 1055.

Ф. Я. Надь.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ МАГНИТ — электромагнит, в к-ром ток, создающий магн. поле, протекает в осн. по сверхпроводнику, вследствие чего омические потери в обмотке С. м. весьма малы. С. м. наматывают сверхпроводящим проводом, состоящим, как правило, из волокон сверхпроводящего материала (напр., сплава