

также, что замена кислорода фтором влияет на T_c , повышая ее до 155 К [3], а ионы F^- и OH^- изоэлектронны и имеют почти равный кристаллохимический радиус.

Авторы благодарят Б.П. Захарченко за внимание к работе и полезные обсуждения и С.Л. Шохора за участие в проведении измерений.

Л и т е р а т у р а

- [1] S t r o b e l P. et al. - Nature, 1987, v. 327, p. 306-308.
[2] D a v i d W.I. et al. - Nature, 1987, v. 327, p. 310-312.
[3] O v s h i n s k y S.P. et al. - Phys. Rev. Lett., 1987, v. 58, N 24, p. 2579-2581.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
5 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 7

12 апреля 1988 г.

НАСЫЩЕНИЕ И ШУМЫ КВАНТОВОГО СВЧ ДЕТЕКТОРА НА СВЕРХПРОВОДИКОВЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ

В.Ю. Б е л и ц к и й, А.Н. В ы с т а в к и н,
И.Л. С е р п у ч е н к о, М.А. Т а р а с о в

Одной из причин сравнительно малого числа практических детекторов на нелинейности квазичастичного тока в туннельных переходах сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) является предубеждение, что их динамический диапазон примерно такой же, как и у СИС смесителей, которые могут насыщаться от источника с шумовой температурой около 20 К [1]. В случае СИС смесителя проблему насыщения можно решить сужением входной полосы, что нежелательно для детектора, т. к. приводит к снижению флуктуационной чувствительности за счет снижения радиометрического выигрыша. Другой путь увеличения мощности насыщения - применение последовательных цепочек СИС переходов - в детекторе приводит к снижению отклика пропорционально числу переходов в цепочке [2].

Для прямого детектора на СИС переходах в квантовом режиме поглощение одного кванта излучения приводит к туннелированию одного электрона и предельный отклик:

$$r_i = \frac{\Delta I_{ВЫХ}}{\Delta P_{ВХ}} = e / \hbar \omega. \quad (1)$$

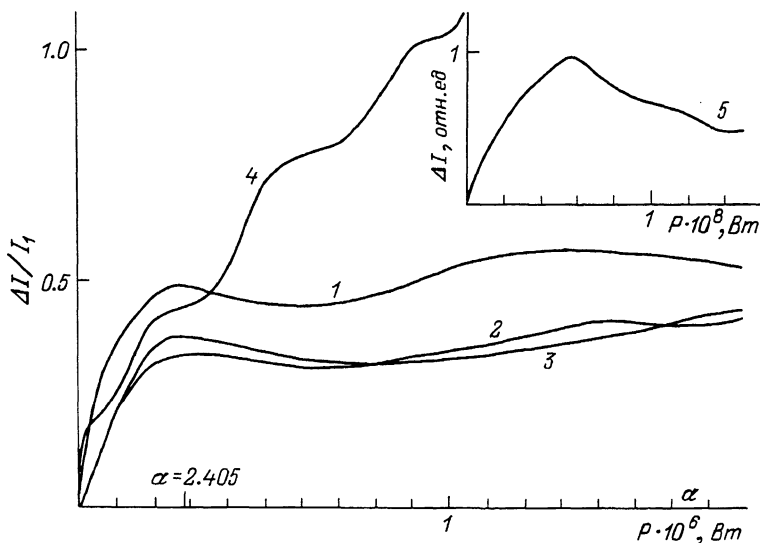


Рис. 1. Зависимость амплитуды продекректированного сигнала ΔI_0 от его мощности P_{BX} . 1 - численно рассчитанная для идеализированного СИС перехода зависимость $\Delta I_0(P_{BX})$, 2 - то же для реального СИС перехода с ВАХ (рис. 2), 3 - экспериментально измеренная зависимость в случае $R_{HH} = 1$ Ом, 4 - то же в случае $R_{HH} = 300$ Ом, 5 - экспериментально измеренная зависимость отклика на джозефсоновской нелинейности СИС перехода для $R_{HH} = 1$ Ом.

Флуктуационная чувствительность определяется дробовым шумом тока смещения, квадрат шумового тока на выходе:

$$\overline{\Delta I_m^2} = 2eI_0\Delta f, \quad (2)$$

где e - заряд электрона, Δf - выходная полоса, I_0 - ток смещения. Мощность, эквивалентную шуму (NEP), можно получить из (1) и (2):

$$NEP = \sqrt{\overline{\Delta I_m^2}}/r_i. \quad (3)$$

Для определения динамических характеристик СИС детектора воспользуемся известным выражением [3] для приращения выпрямленного тока в зависимости от приложенного СВЧ сигнала:

$$\Delta I_0 = \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(\alpha) I_{dc}(V_0 + \Delta V_0 + n\hbar\omega/e) - I_{dc}(V_0), \quad (4)$$

где $\alpha = eV_{CB4}/\hbar\omega$, $I_{dc}(V)$ - вольт-амперная характеристика (ВАХ), V_0 - смещение рабочей точки, $J_n(\alpha)$ - функция Бесселя первого рода. Результаты численного расчета зависимости $\Delta I_0(P_{BX})$ в слу-

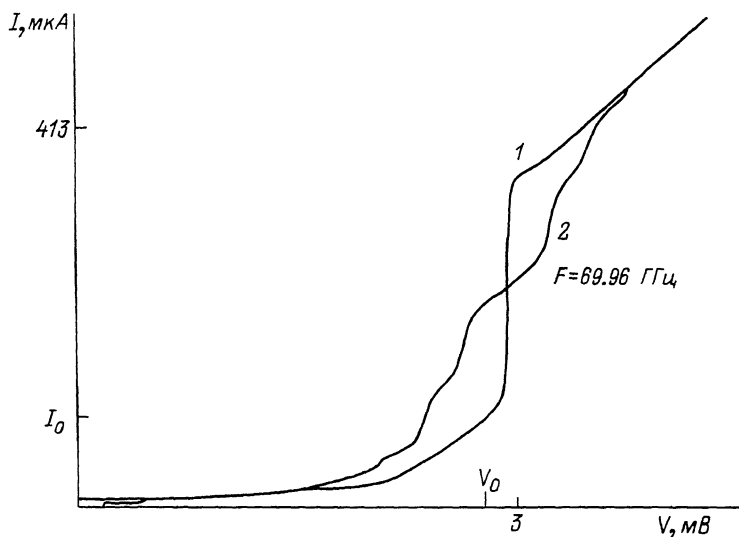


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) СИС перехода [5] со структурой $Nb-Al_2O_3-Nb$, $R_N \sim 10$ Ом, площадь 50 мкм^2 . 1 - автономная ВАХ, 2 - ВАХ в случае СВЧ воздействия мощностью $P_{\text{вх}} = P_{\text{нас, дет}}$.

чае $\Delta V_0 = 0$ от мощности сигнала приведены на рис. 1 для идеализированного СИС перехода с сопротивлением утечки $R_y = 10 R_N$, $\hbar\omega/e = 0.1 V_g$, где R_N - нормальное сопротивление, а V_g - напряжение, соответствующее энергетической щели. Кривая 2 на рис. 1 рассчитана для реального перехода, ВАХ которого приведена на рис. 2, кривая 1. Расчет производился на основании (4) с суммированием в пределах 10 членов ряда, что обеспечивало достаточную точность расчетов вплоть до $\alpha = 5$. Из приведенных кривых видно, что насыщение СИС детектора наступает при уровне входного сигнала, соответствующем $\alpha_0 = 2.405$, т. е. при мощности входного сигнала, приведенной к СИС переходу:

$$P_{\text{нас, дет}} = V_{\text{СВЧ}}^2 / 2R_{\text{СВЧ}} = (\alpha_0 \hbar\omega/e)^2 / 2R_{\text{СВЧ}} \quad (5)$$

и с учетом того, что $R_{\text{СВЧ}} = (0.3-0.5)R_N$,

$$P_{\text{нас, дет}} = 5.8-9.6 \hbar\omega/e R_N. \quad (6)$$

Полученное значение близко к оценке мощности насыщения СИС детектора [2]. Из (2) и (6) легко получить выражение для динамического диапазона СИС детектора, которое может быть представлено в виде:

$$\Delta_{\text{дет}} = \frac{P_{\text{нас}}}{NEP} = 0.25 \alpha_0^2 V_g / R_N (2e \Delta F I_0)^{1/2} = 0.25 \alpha_0^2 I_1 / I_{\text{ш}}. \quad (7)$$

В обычном для СИС детектора случае $I_{\perp} = V_g/R_N = 3 \cdot 10^{-4}$ А, $I_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ А, $\Delta f = 1$ кГц получим $D_{\text{дет.}} = 67$ дБ. Реальный динамический диапазон с учетом фликкер-шума и 1 дБ нелинейности окажется не хуже 50 дБ.

Механизм насыщения квантового СИС смесителя несколько отличается от механизма насыщения детектора. Зависимость чувствительности смесителя от напряжения смещения представляет собой последовательность максимумов, отстоящих друг от друга на величину $V = \hbar\omega/e$. Смеситель будет работать в линейном режиме пока амплитуда напряжения на промежуточной частоте меньше этого напряжения V . Если же рабочая точка под действием напряжения ПЧ смещается, то наблюдается замедление роста сигнала ПЧ в зависимости от входного сигнала [4]. Мощность насыщения смесителя [4]:

$$P_{\text{нас. см.}} = (\gamma \hbar\omega/e)^2 / 2L R_{\text{ПЧ}}, \quad (8)$$

где L - потери преобразования смесителя, $R_{\text{ПЧ}}$ - входное сопротивление тракта ПЧ. Коэффициент γ определяет воздействие сигнала на ВАХ в случае, когда его мощность сравнима с мощностью генератора, при этом $\gamma \lesssim 1$. Для СИС смесителя в полосе УПЧ ΔF :

$$NEP_{\text{см.}} = (2e\Delta F I_0) R_d / L, \quad (9)$$

считая $R_d = R_{\text{ПЧ}}$, получим динамический диапазон СИС смесителя:

$$A_{\text{см.}} = (\hbar\omega/e)^2 / 4e I_0 \Delta F R_d^2 = (\Delta I_{\text{СТ}} / \Delta I_{\text{м}})^2, \quad (10)$$

где $\Delta I_{\text{СТ}} = \hbar\omega/e R_d$. Для $F = 70$ ГГц, $I_0 = 10^{-5}$ А, $R_d = 50$ Ом, $\Delta F = 2 \cdot 10^8$ Гц получим $D_{\text{см.}} = 40$ дБ. Линейный динамический диапазон смесителя с учетом ограничения чувствительности шумами УПЧ и 1 дБ нелинейности будет явно менее 30 дБ. Полученное в эксперименте значение динамического диапазона [1, 4] составило менее 20 дБ.

На рис. 1 кривая 3 представляет экспериментально полученную зависимость детекторного отклика при $R_{\text{НЧ}} = 1$ Ом, а кривая 4 - аналогичную зависимость для $R_{\text{НЧ}} = 300$ Ом. В последнем случае в аргументе выражения (4) нельзя пренебречь величиной ΔV_0 . На динамической характеристике это проявляется в уменьшении протяженности линейного участка, однако при этом диапазон однозначной зависимости $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{вх}}$ расширяется на 3.9 дБ; такой режим можно использовать для измерений при соответствующей предварительной калибровке. Максимальная чувствительность по току и наибольшая протяженность линейного участка достигается при условии $R_{\text{НЧ}} \leq 2\hbar\omega/eI_1 = R_{\text{свч}}$ и для детектора легко осуществляется шунтированием СИС перехода по низкой частоте. Для смесителя снижение $R_{\text{ПЧ}}$ также может быть использовано для расширения динамического диапазона. Анализ результатов численного моделирования [6] показывает, что при определенном соотношении проводимостей источ-

ника сигнала и перехода такое снижение сопротивление не приводит к ухудшению параметров смесителя.

Для измерения NEP и динамического диапазона СИС детектора мы использовали усилитель с минимальной шумовой температурой 3.5 К совместно с охлаждаемым до температуры жидкого гелия трансформатором. Получено: $NEP=10^{-12}$ Вт и динамический диапазон $D_{дет}=46.4$ дБ. В случае применения более высококачественных переходов с меньшим [5] током утечки значение NEP может быть улучшено. Если учесть, кроме того, рассогласование СИС перехода при изменении уровня входного сигнала, то получим $D_{дет}^*=52$ дБ, а $NEP=1.2 \cdot 10^{-13}$ Вт.

В последнее время вновь возник интерес к детекторам на нелинейности джозефсоновского тока [7]. Кривая 5 на рис. 1 показывает экспериментально полученную зависимость детекторного отклика джозефсоновского детектора при $R_{нч}=1$ Ом в режиме измерения с шунтом. Насыщение наступает при уровне мощности входного сигнала на 17 дБ ниже, а уровень шумов примерно на 7 дБ выше шума квазичастичного детектора, т. е. динамический диапазон джозефсоновского детектора на 24 дБ меньше, чем у квазичастичного детектора.

Таким образом, динамический диапазон квазичастичного СИС детектора составляет 52 дБ и на 24 – 30 дБ превосходит динамический диапазон джозефсоновского детектора и квазичастичного смесителя. Измеренная NEP СИС детектора составила 10^{-13} Вт и в 2 раза превышает мощность дробового шума, рассчитанную по формуле (3), что может объясняться фликкер-шумом. Показано, что динамический диапазон квантовых СИС детектора и смесителя зависит от нагрузки на промежуточной и низкой частоте и может быть расширен с применением УПЧ и УНЧ с малым входным сопротивлением, например на основе СКВИДов.

Авторы выражают признательность Ан.Б. Ермакову за помощь в проведении расчетов на ЭВМ.

Л и т е р а т у р а

- [1] D'A d d a r i o L.R. – Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1984, v. 5, N 11, p. 1419–1442.
- [2] F e l d m a n M.J. – J. Appl. Phys., 1986, v. 60, N 7, p. 2580–2582.
- [3] R i c h a r d s P.L., S h e n T.M. – IEEE Trans. on Electron Dev., 1980, ED-27, N 10, p. 1909–1920.
- [4] T u c k e r J.R., F e l d m a n M.J. – Rev. Mod. Phys., 1985, v. 57, N 4, p. 1055–1113.
- [5] Б е л и ц к и й В.Ю., В ы с т а в к и н А.Н., К о ш е л е ц В.П., О в с я н н и к о в Г.А., С е р п у ч е н к о И.Л., Ш и т о в С.В. – Труды 16 Международного симпозиума по физике низких температур и криоэлектронике, ГДР, Бад Бланкенбург, 3–7 декабря 1984 г., с. 18–33.

- [6] H a r t f u s s H.J., T u t t e r M. – Int. J. Infra-
red and Millimeter Waves, 1983, v. 4, N 6, p. 993-1014.
- [7] Г у д к о в А.Л., К у л и к о в В.А., Л а п т е в В.Н.,
М а т в е е ц Л.В., М а х о в В.И. – Письма в ЖТФ, 1986,
т. 12, № 9, с. 527-533.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
20 августа 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 7

12 апреля 1988 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ
ПРИ СМЕЩЕНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО
 N_2 И СМЕСИ CO_2/H_2O В СИСТЕМЕ
СВЕРХЗВУКОВЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТРУЙ

В.Ф. Л е б е д е в

Особенность образования инверсии населенностей при смешении струй колебательно-возбужденного N_2 и CO_2/H_2O заключается в одновременном протекании процессов колебательной релаксации и выравнивания газодинамических параметров потока. При умеренных степенях колебательной неравновесности ($T_v \approx 2000$ К) возможно их раздельное рассмотрение и исследование [1]. Важную роль при этом могут сыграть параметры подобия, а наибольший интерес, по-видимому, представляют соотношения подобия для измеряемых величин, в частности при исследовании релаксационных процессов – для коэффициента усиления слабого сигнала K_y .

Анализ выражения для коэффициента усиления с использованием простейшей модели релаксации одного блока [1] позволяет выявить в движущейся однородной трехкомпонентной среде $N_2/CO_2/H_2O$ приближенный параметр подобия вида:

$$\xi_c^2 (\exp(\theta/T_{v0}) - 1)^{-1} P_0 / \sqrt{T_0} x, \quad (1)$$

где ξ_c – мольная доля CO_2 в смеси (мольная доля H_2O предполагается постоянной); T_{v0} – колебательная температура, характеризующая начальную неравновесность смеси; P_0 и T_0 – соответственно характерные давления и температура; x – продольная координата. Следует отметить, что введение в параметр подобия характерного давления P_0 , а также комплекса с T_{v0} в виде (1) справедливо для чисто столкновительного режима уширения спектральных линий и при неучете заселенности нижних уровней симметричного и деформационного типов колебаний молекулы CO_2 .

Обработка экспериментальных данных по измерению коэффициента усиления за срезом блока осесимметричных сопел, реализующего