

УДК 538.945

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ НА ТУННЕЛЬНОМ ПЕРЕХОДЕ СВЕРХПРОВОДНИК-ИЗОЛЯТОР-СВЕРХПРОВОДНИК

© 2011 г. К. В. Калашников, А. В. Худченко, А. Б. Барышев, В. П. Кошелец

Поступила в редакцию 26.01.2010 г.

Проведено теоретическое исследование работы гармонического смесителя на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник. Найдена зависимость мощности сигнала промежуточной частоты от параметров входных сигналов и напряжения смещения на туннельном переходе. Выполнено экспериментальное измерение такой зависимости, получено качественное и удовлетворительное количественное совпадение экспериментальных данных с теоретическими.

ВВЕДЕНИЕ

В ИРЭ РАН совместно с Институтом космических исследований Нидерландов (SRON) был предложен и создан сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) с диапазоном частот 500...650 ГГц [1, 2]. Этот приемник предназначен для исследования атмосферы Земли в режиме наклонного зондирования с борта высотного аэростата – проект Terahertz Limb Sounder (TELIS) [3]. Первый испытательный полет успешно проведен в марте 2009 года. Цель полета – получение информации о распределении по высоте концентрации различных атмосферных газов (H_2^{18}O , HDO , ClO , O_2 , изотопы O_3 , HCl , NOCl).

В СИП на микросхеме размерами 4 мм × 4 мм × 0.5 мм объединены малошумящий смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) с квазиоптической антенной, сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) на потоке магнитных вихрей в распределенном джозефсоновском туннельном переходе и гармонический смеситель (ГС), используемый в системе фазовой стабилизации частоты СГГ.

Упрощенная схема СИП с системой стабилизации частоты СГГ изображена на рис. 1. На СИС-смесителе происходит перемножение сигнала СГГ и сигнала от наблюдаемого источника, принимаемого антенной. В результате перемножения

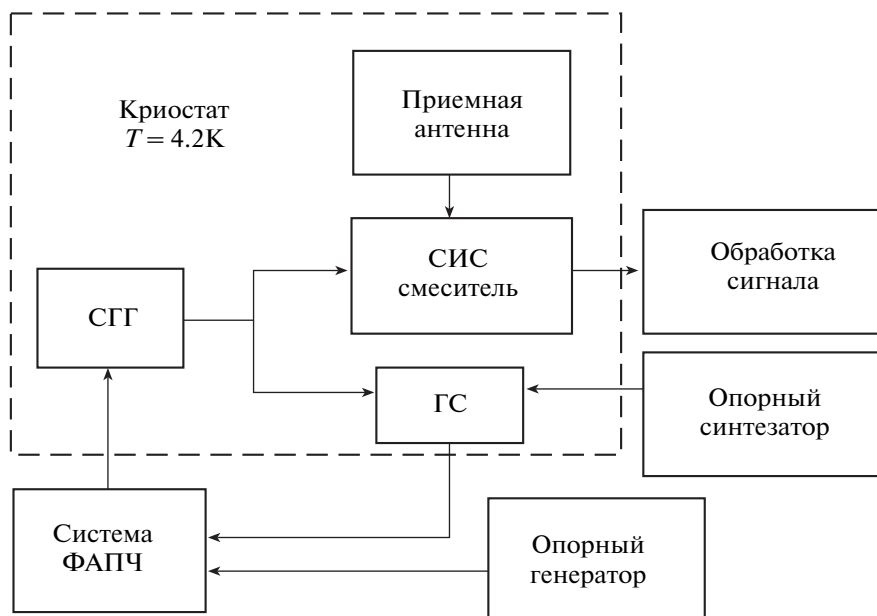


Рис. 1. Упрощенная схема СИП.

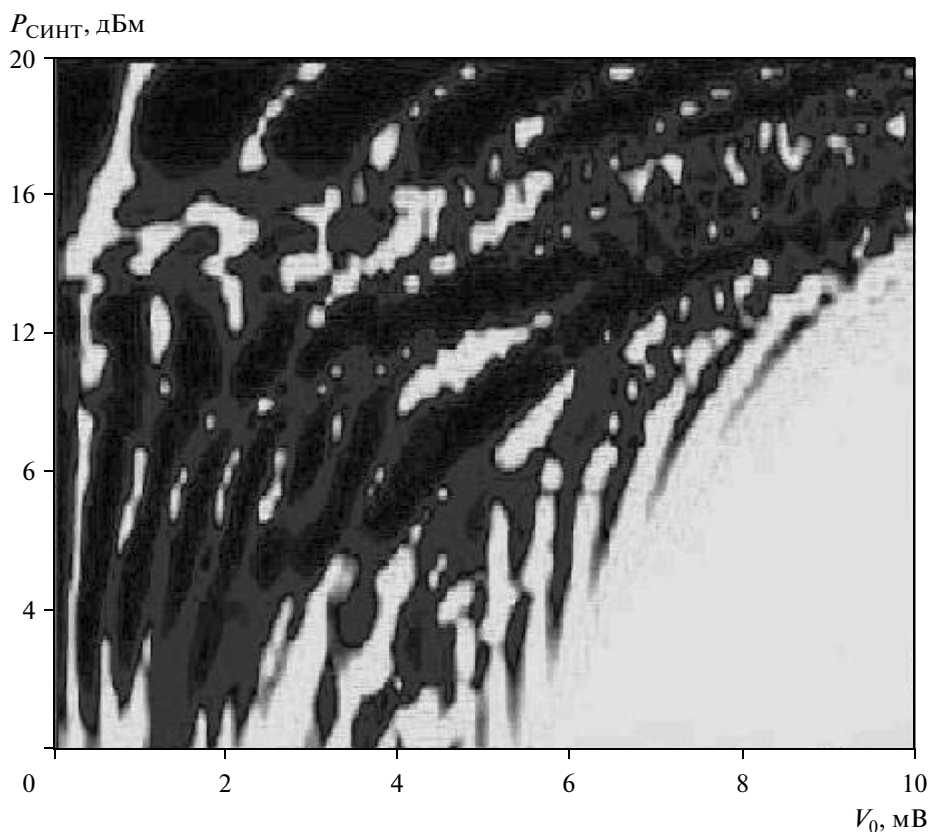


Рис. 2. Характерная экспериментальная зависимость мощности ПЧ от напряжения смещения и мощности сигнала синтезатора ($f_{\text{СГГ}}=497$ ГГц, $f_{\text{синт}}=21$ ГГц, $k=24$).

принимаемый сигнал понижается по частоте в диапазон 4...8 ГГц и поступает сначала на “холодный” НЕМТ усилитель, а затем на усилители, находящиеся вне криостата. Часть мощности СГГ ответвляется на гармонический СИС-смеситель, в котором смешивается с “ k ”-й гармоникой перестраиваемого опорного синтезатора (использовались частоты в диапазоне 18..23 ГГц), в результате чего возникает сигнал промежуточной частоты (ПЧ) для системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ):

$$f_{\text{ПЧ}} = \pm (f_{\text{СГГ}} - kf_{\text{синт}}). \quad (1)$$

Система ФАПЧ синхронизирует СГГ по фазе к опорному генератору. Такая система необходима для повышения стабильности генератора, а также для улучшения его спектральных характеристик, которые определяют спектральные свойства СИП [4].

Для эффективной и стабильной работы системы ФАПЧ важно иметь достаточно мощный выходной сигнал ГС. Такой сигнал значительно больше шумов ПЧ-сигнала, определяемых усилителями и самим ГС, что позволяет получить хорошее соотношение сигнал/шум. Экспериментально установлено, что величина сигнала ПЧ сильно изменяется при варьировании напряжения смещения ГС и сложным образом зависит от мощностей и частот

сигналов, подаваемых на ГС [3]. Одна из типичных зависимостей мощности $P_{\text{ПЧ}}$ сигнала ПЧ от напряжения смещения ГС V_0 и мощности сигнала опорного синтезатора $P_{\text{синт}}$ представлена на рис. 2. Изменение цвета от светлого к темному соответствует росту величины $P_{\text{ПЧ}}$. До последнего времени не была теоретически объяснена представленная картина.

В работе [5] описано использование СИС-перехода в качестве субгармонического смесителя для гетеродинного приемника, работающего при малых номерах гармоник $k=2...5$. В работе [6] представлено использование ГС на СИС-переходе с номерами гармоник $k > 30$ для снятия диаграммы направленности антенны. В данной работе приведены измеренные зависимости мощности выходного сигнала ГС от напряжения смещения для различных мощностей сигнала высокой частоты (ВЧ). Данная работа посвящена теоретическому описанию, моделированию работы ГС на СИС-переходе, а также его экспериментальному исследованию для проверки полученных теоретических результатов. Это нужно для полного понимания свойств ГС и его эффективного использования в криоэлектронных устройствах, в частности для максимизации выходного сигнала ПЧ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
ГАРМОНИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ
НА СИС-ПЕРЕХОДЕ

Основной целью расчета ГС является определение зависимости выходного сигнала ПЧ от параметров подаваемых сигналов и напряжения смещения на СИС-переходе.

Подробное теоретическое описание работы СИС-перехода под воздействием СВЧ сигналов приведено в [7–9]. Однако в работе [7] сделаны упрощающие предположения о малости приложенных сигналов и шунтировании емкостью перехода высших гармоник сигнала опорного синтезатора. В работах [8, 9] приведен метод описания СИС-перехода для общего случая, когда мощности подаваемых сигналов могут принимать любые значения. Представленная модель является наиболее полной на сегодняшний день. На ее основе решается самосогласованная задача для СИС-перехода, включенного во внешнюю цепь, в [9] проведены вычисления некоторых характеристик ГС на СИС-переходе.

Предлагаемая работа описывает ГС на основе упрощенной и более наглядной теории, являющейся развитием работы [10] на случай нескольких приложенных к туннельному переходу сигналов. Такая модель не учитывает влияние внешней цепи на накачку СИС-перехода. Однако данная модель приводит к верным качественным и удовлетворительным количественным результатам, совпадающим с результатами работы [9]. Данный факт указывает на то, что в ней учтены основные моменты, являющиеся определяющими при формировании выходного сигнала ГС.

Рассмотрим модель слабозаимодействующих квазичастиц без учета спиновых эффектов под действием периодического электрического поля, аналогичную представленной в работе [10].

Волновая функция квазичастицы с энергией E без приложенного переменного электрического поля имеет вид $\Psi = f(x, y, z) \exp(-iEt/\hbar)$, где $f(x, y, z)$ – некая функция координат, i – мнимая единица, t – время, \hbar – постоянная Планка. Эта волновая функция является собственной для гамильтониана невозбужденной системы \hat{H}_0 . При приложении к электродам СИС-перехода двух периодических сигналов напряжение на переходе равно $V_{\omega_1} \cos(\omega_1 t) + V_{\omega_2} \cos(\omega_2 t)$, где ω_1 и ω_2 – круговые частоты первого и второго сигналов соответственно. Тогда гамильтониан системы квазичастиц запишем в виде $\hat{H} = \hat{H}_0 + eV_{\omega_1} \cos(\omega_1 t) + eV_{\omega_2} \cos(\omega_2 t)$, где \hat{H}_0 – гамильтониан невозбужденной системы, \hat{H} – гамильтониан системы под воздействием двух гармо-

нических сигналов, e – заряд электрона. Новую волновую функцию ищем в виде

$$\Psi = f(x, y, z) \times \exp(-iEt/\hbar) \left(\sum_n B_n \exp(-in\omega_1 t) \right) \times \left(\sum_m C_m \exp(-im\omega_2 t) \right),$$

где B_n и C_m – неизвестные функции.

Подставляя волновую функцию в уравнение Шредингера $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$, получаем уравнения для B_n и C_m :

$$2nB_n = \frac{eV_1}{\hbar\omega_1} (B_{n+1} + B_{n-1}),$$

$$2mC_m = \frac{eV_2}{\hbar\omega_2} (C_{m+1} + C_{m-1}).$$

Решая эти уравнения, находим

$$B_n = J_n \left(\frac{eV_1}{\hbar\omega_1} \right),$$

$$C_m = J_m \left(\frac{eV_2}{\hbar\omega_2} \right),$$

где $J_i(x)$ – функция Бесселя порядка i .

Таким образом, решением уравнения Шредингера является волновая функция:

$$\Psi = f(x) \exp(-iEt/\hbar) \left(\sum_n \sum_m J_n \left(\frac{eV_{\omega_1}}{\hbar\omega_1} \right) J_m \left(\frac{eV_{\omega_2}}{\hbar\omega_2} \right) \times \exp[-i(n\omega_1 + m\omega_2)t] \right). \quad (2)$$

Отсюда видно, что энергетические уровни квазичастиц расщепляются на уровни, описываемые волновыми функциями Ψ_{nm} с энергиями $E + n\hbar\omega_1 + m\hbar\omega_2$; $n, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, и, соответственно, с вероятностями заполнения этих уровней, пропорциональными $J_n \left(\frac{eV_{\omega_1}}{\hbar\omega_1} \right) J_m \left(\frac{eV_{\omega_2}}{\hbar\omega_2} \right)$.

Квазичастичный туннельный ток возникает при переходе квазичастиц с одного электрода СИС-перехода на другой. Этот ток в случае приложения постоянного напряжения описывается комплексной функцией токового отклика $j(V)$, вычисленной в работе [11] и имеющей вид $j(V) = iI_{dc}(V) + I_{KK}(V)$

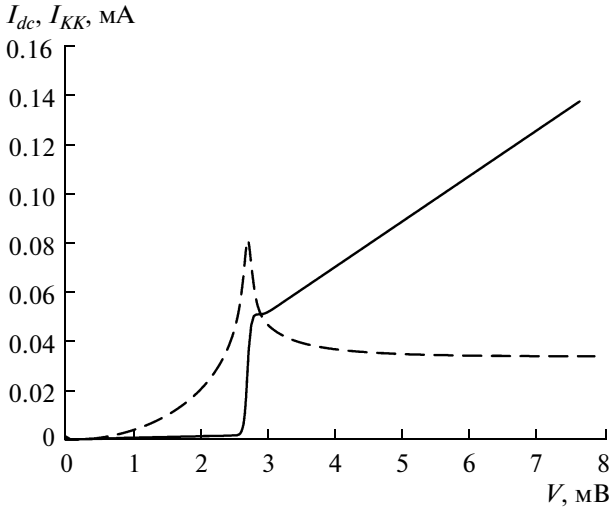


Рис. 3. Мнимая (сплошная линия) и действительная (пунктирная линия) части функции $j(V)$, используемой в расчете.

(рис. 3). Здесь $I_{dc}(V)$ является вольт-амперной характеристикой (ВАХ) СИС-перехода, а функция $I_{KK}(V)$ связана с $I_{dc}(V)$ соотношением Крамерса–Кронига.

Отметим, что для расчетов не вычисляли функцию $I_{dc}(V)$, а брали ее из экспериментальных данных. Таким образом, вся информация о щелевом напряжении и скачке тока на щели содержится в ВАХ ГС.

При поглощении кванта излучения квазичастица увеличивает свою энергию на $\hbar\omega$, что эквивалентно приложению к переходу напряжения $\hbar\omega/e$. Туннельный ток в этом случае определяется функцией $j(V + \hbar\omega/e)$. Поскольку квазичастица может поглотить сразу несколько фотонов энергий $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$, для нахождения полного туннельного тока нужно суммировать функции токового отклика $j_{nm} = j\left(V + \frac{n\hbar\omega_1}{e} + \frac{m\hbar\omega_2}{e}\right)$ с учетом вероятности квазичастичного туннелирования. Вероятность перехода квазичастицы состояния Ψ_{nm} в состояние Ψ_{lk} определяется матричным элементом $\langle\Psi_{nm}|\Psi_{lk}\rangle$, где

$$\begin{aligned} |\Psi_{nm}\rangle &= f(x) \exp(-iEt/\hbar) \times \\ &\times \left(J_n \left(\frac{eV_{\omega_1}}{\hbar\omega_1} \right) J_m \left(\frac{eV_{\omega_2}}{\hbar\omega_2} \right) \exp[-i(n\omega_1 + m\omega_2)t] \right), \\ \langle\Psi_{lk}| &= g(x) \exp(iEt/\hbar) \times \\ &\times \left(J_l \left(\frac{eV_{\omega_1}}{\hbar\omega_1} \right) J_k \left(\frac{eV_{\omega_2}}{\hbar\omega_2} \right) \exp[i(l\omega_1 + k\omega_2)t] \right). \end{aligned}$$

Чтобы найти полный ток через переход, необходимо просуммировать такие матричные элементы по различным n, m, l, k :

$$I(V, t) = \text{Im} \sum_n \sum_m \sum_l \sum_k J_n(\alpha_1) J_l(\alpha_1) J_m(\alpha_2) J_k(\alpha_2) \times \exp[-i((n-l)\omega_1 + (m-k)\omega_2)t] j\left(V + \frac{n\hbar\omega_1}{e} + \frac{m\hbar\omega_2}{e}\right).$$

Делая замену в индексах суммирования ($n-l \rightarrow l; m-k \rightarrow k$), получаем следующую формулу:

$$I(V, t) = \text{Im} \sum_n \sum_m \sum_l \sum_k J_n(\alpha_1) J_{n+l}(\alpha_1) J_m(\alpha_2) \times J_{m+k}(\alpha_2) \exp[-i(l\omega_1 + k\omega_2)t] j\left(V + \frac{n\hbar\omega_1}{e} + \frac{m\hbar\omega_2}{e}\right), \quad (3)$$

$$\text{где } \alpha_i = \frac{eV_{\omega_i}}{\hbar\omega_i}.$$

Заметим, что функцию (3) можно записать в виде

$$I(V, t) = a_0 + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \times \sum_{k=0}^{\infty} (2a_{lk} \cos((l\omega_1 + k\omega_2)t) + 2b_{lk} \sin((l\omega_1 + k\omega_2)t)), \quad (4)$$

где a_0 – член суммы, соответствующий $l=0, k=0$. Звездочка у знаков суммы означает, что суммирование проводится по l и k , не равным нулю одновременно.

Таким образом, при приложении к СИС-переходу двух сигналов, как следует из формулы (3), на выходе получаем сигналы на всех частотах, которые можно описать формулой $l\omega_1 + k\omega_2$, где l и k – целые числа. Для практики важен случай, реализуемый в ГС, а именно: частота первого сигнала близка к кратной частоте второго сигнала, т.е. $\omega_1 - k\omega_2 \ll \omega_2$. Здесь для удобства обозначения полагаем $\omega_1 \equiv 2\pi f_{\text{ВЧ}}, \omega_2 \equiv 2\pi f_{\text{синт}}$. Тогда амплитуду тока на промежуточной частоте $f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{ВЧ}} - kf_{\text{синт}}$ запишем в виде

$$I_{\text{ПЧ}} = \sqrt{a_{lk}^2 + b_{lk}^2}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_{lk}(V) &= \\ &= \sum_{n,m} J_n(\alpha_1) J_m(\alpha_2) \left[J_{n+l}(\alpha_1) J_{m-k}(\alpha_2) + \right. \\ &\left. + J_{n-1}(\alpha_1) J_{m+k}(\alpha_2) \right] I_{dc} \left(V + \frac{n\hbar\omega_1}{e} + \frac{m\hbar\omega_2}{e} \right), \end{aligned}$$

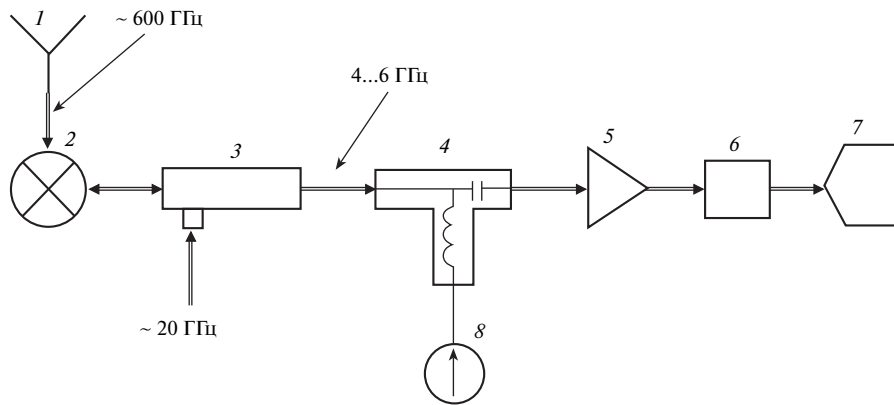


Рис. 4. Схема экспериментальной установки измерения характеристик ГС на СИС-переходе: 1 – антенна, 2 – ГС, 3 – направленный ответвитель, 4 – ответвитель для задания смещения СИС-перехода, 5 – система усилителей, 6 – полосовой фильтр, 7 – измеритель мощности, 8 – источник тока, позволяющий задавать напряжение смещения на СИС-переходе.

$$b_{lk}(V) = \sum_{n,m} J_n(\alpha_1) J_m(\alpha_2) \left[J_{n+1}(\alpha_1) J_{m-k}(\alpha_2) - J_{n-1}(\alpha_1) J_{m+k}(\alpha_2) \right] I_{KK} \left(V + \frac{n\hbar\omega_1}{e} + \frac{m\hbar\omega_2}{e} \right).$$

Формула (5) выражает искомую зависимость амплитуды тока на промежуточной частоте $f_{ПЧ}$ от частот и мощностей сигналов ВЧ и опорного синтезатора и, таким образом, является главным теоретическим результатом данного раздела.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГС НА СИС-ПЕРЕХОДЕ

Для проверки результатов, полученных теоретически, недостаточно экспериментальных данных, представленных в [3, 5, 6]. Поэтому был проведен эксперимент по измерению зависимостей величины выходного сигнала ГС на СИС-переходе от мощностей входных сигналов и напряжения смещения ГС $P_{ПЧ}(V_0, P_{синт})$, т.е. картин, аналогичных представленной на рис. 2.

В эксперименте использован одиночный СИС-переход, изготовленный в виде пленочной структуры Nb–AlO_x–Nb площадью 1 мкм². Нормальное сопротивление перехода равно ~25 Ом, щелевое напряжение – 2.8 мВ.

Для измерения характеристик ГС на СИС-переходе, обусловленных квазичастичным туннелированием, джозефсоновская компонента тока была подавлена внешним магнитным полем. Это является отличительной особенностью от случая, представленного на рис. 2. Экспериментально установлено, что критический ток существенно влияет на вид зависимости $P_{ПЧ}(V_0, P_{синт})$. Его нестабильность и изменение от эксперимента к эксперименту вы-

зывают смену картины $P_{ПЧ}(V_0, P_{синт})$. Однако вариации критического тока не изменяют положения больших пиков, расположенных в верхней части рис. 2.

Схема эксперимента представлена на рис. 4. СИС-переход 2 с антенной 1 размещен в заливном криостате при температуре 4.2 К. Сигнал, подаваемый на антенну, имеет частоту порядка 600 ГГц. Он сгенерирован в результате прохождения сигнала синтезатора частотой около 25 ГГц через умножитель на основе сверхрешетки, работающий на 27-й гармонике. Сигнал опорного синтезатора частотой порядка 20 ГГц задан через порт –20 дБ направленного ответвителя 3. Выходной сигнал смесителя на ПЧ 4...6 ГГц, проходя ответвитель 3 и элемент для задания постоянного тока смещения СИС-перехода 4, поступает на вход системы ПЧ усилителей 5. Далее он проходит через узкополосный (ширина полосы пропускания 30 МГц) фильтр 6 и попадает на измеритель мощности 7. Ток смещения задается блоком управления 8. Для измерений использовалась автоматическая система IRTECON [12].

3. СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Для сравнения результатов эксперимента и теоретических расчетов выполнена предварительная калибровка мощности ВЧ-сигнала по вызываемому им уровню накачки СИС-перехода. Калибровка выполнена следующим образом: на ГС подавали один сигнал ВЧ, после чего измеряли скачок тока при смещении СИС-перехода 2.5 мВ. После этого в расчете подбирали такой коэффициент α_1 , который вызывает соответствующую накачку перехода в расчете.

Калибровка для мощности опорного сигнала $P_{синт}$ отдельно не была проведена. Величина $P_{синт}$ характеризует мощность сигнала на выходе генератора, а не

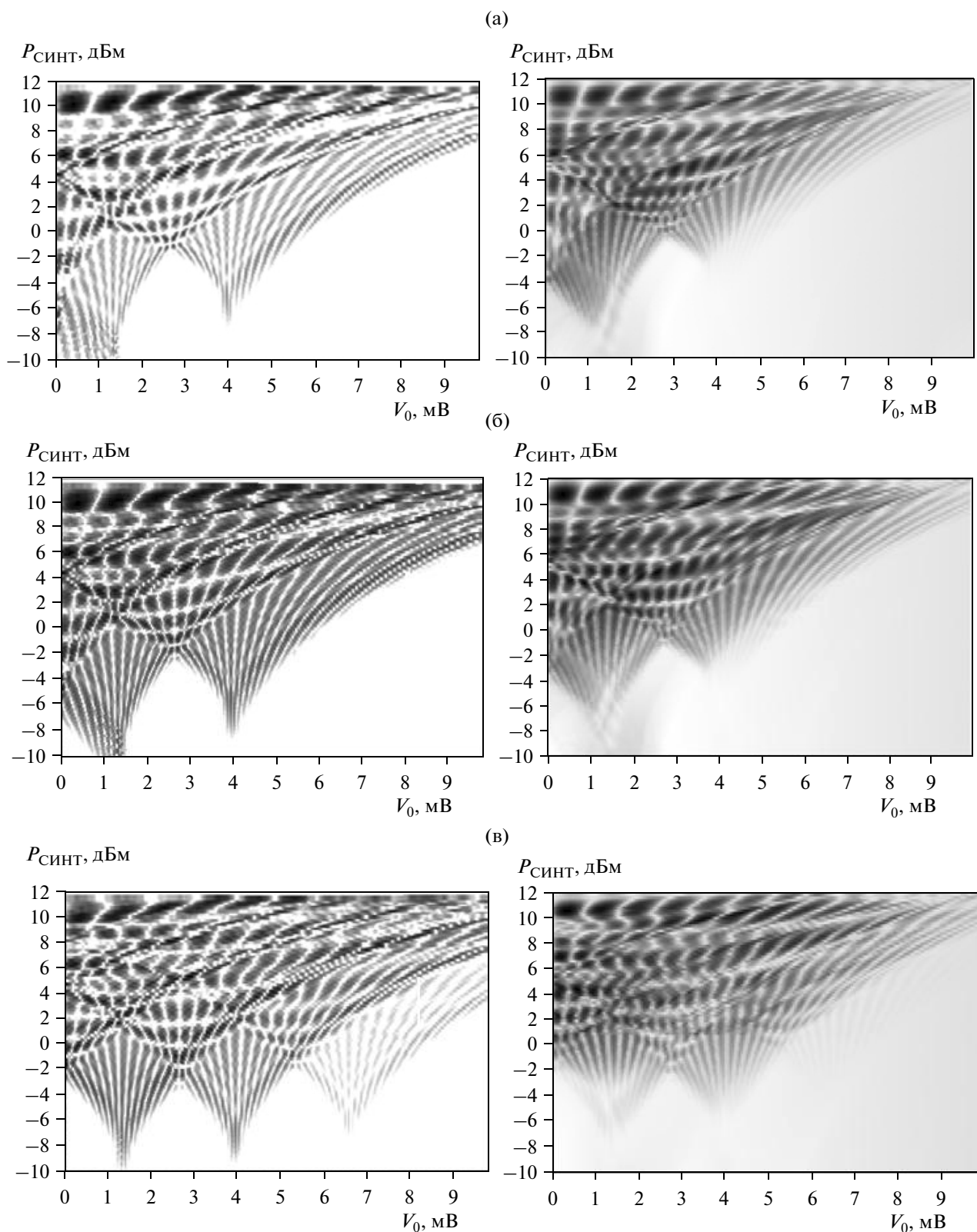


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (слева) и теоретических (справа) зависимостей $P_{ПЧ}(V_0, P_{СИНТ})$ для разных мощностей сигнала ВЧ: а – накачка сигналом ВЧ составляет 15% от скачка тока на щели, б – 30%, в – 55%; $f_{ВЧ} = 635$ ГГц, $f_{СИНТ} = 18$ ГГц, 35-я гармоника. Шкала динамического диапазона выходного сигнала равна 22 дБ.

сигнала, доходящего до перехода. Доходящая мощность уменьшается на 20 дБ в направленном ответвителе 3 (рис. 4) и падает в соединительных кабелях. Теоретические зависимости $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ были смещены на константу по оси $P_{с\text{инт}}$ (ось ординат) до совпадения с экспериментальными.

После калибровки проведен анализ экспериментальных и рассчитанных зависимостей $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$, представленных на рис. 5. Из сравнения видно, что общая картина расчетных данных согласуется с экспериментально. Следует отметить совпадение динамических диапазонов по мощности синтезатора. Зависимость $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ имеет сложный вид, похожий на интерференционную картину. Для представленной частоты ВЧ сигнала, равной 635 ГГц, при малых мощностях $P_{с\text{инт}}$ видны два пучка линий. Центры пучков расположены симметрично относительно щелевого напряжения и приближаются к нему с уменьшением частоты $f_{ВЧ}$. Частота и число линий в пучке растут линейно с номером гармоники, т.е. при уменьшении частоты синтезатора $f_{с\text{инт}}$. В основании пучка линии идут вертикально и интервал между ними равен $2f_{с\text{инт}}/k_{\text{дж}}$, где $k_{\text{дж}}$ – постоянная Джозефсона, равная 483.6 ГГц/мВ, что соответствует ширине квазичастичной ступени на ВАХ ГС, накачанной сигналом синтезатора. При больших величинах $P_{с\text{инт}}$ линии пучков пересекаются и образуют систему пиков, период которых увеличивается с ростом $P_{с\text{инт}}$.

Наличие критического тока перехода сильно изменяет картину $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ при малых $P_{с\text{инт}}$ и не позволяет наблюдать пучки линий. Однако большая подаваемая мощность $P_{с\text{инт}}$ подавляет его проявление, и широкие пики существуют независимо от наличия критического тока. Верхняя граница представленных картин $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ обусловлена тем, что дальнейшее увеличение $P_{с\text{инт}}$ в эксперименте приводит к резкому уменьшению мощности выходного сигнала ГС для использованных переходов.

При построении сечения трехмерной картины $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ для определенной фиксированной мощности $P_{с\text{инт}}$ получаем зависимости $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$, аналогичные полученным экспериментально в [6] и теоретически в [9] (рис. 6).

Анализ характера картины $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ при изменении номера гармоники k и одинаковых мощностях сигналов ВЧ и синтезатора показывает, что при нулевом напряжении смещения для четной гармоники наблюдается максимум мощности сигнала ПЧ, а для нечетной – минимум. Это согласуется с экспериментом, что проиллюстрировано на рис. 7а, 7б, соответствующих номерам гармоник $k = 34$ и 35. Такая особенность поведения сигнала ПЧ при $V_0 = 0$ следует из анализа равенства (5). При нулевом напряжении смещения имеем

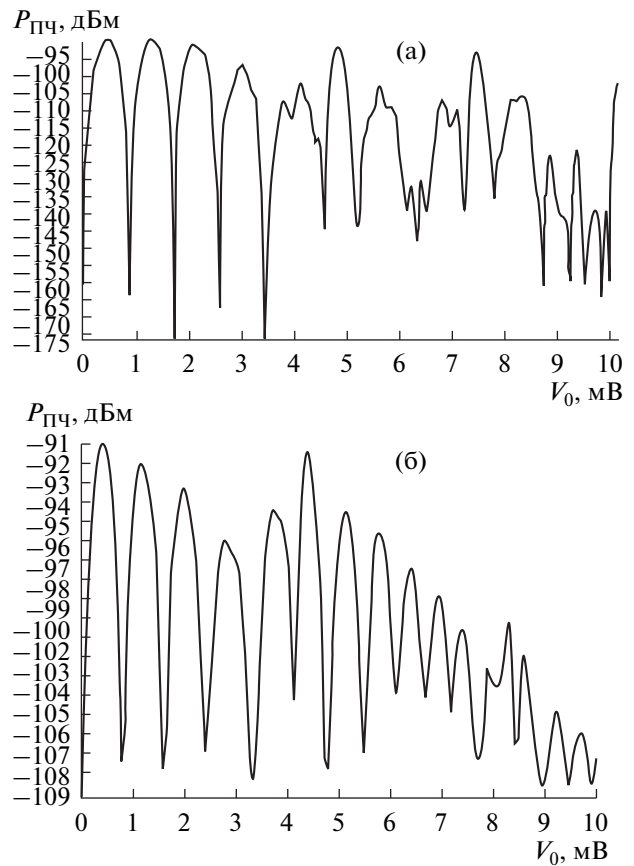


Рис. 6. Сечение зависимости, изображенной на рис. 5б, на уровне 10,5 дБм: а – расчет, б – эксперимент.

$$V_0 = 0;$$

$$J_{-n}(\alpha) = (-1)^n J_n(\alpha);$$

$$I_{dc}(-V) = -I_{dc}(V);$$

$$I_{КК}(-V) = I_{КК}(V).$$

Разбивая сумму в (5) на четыре суммы с положительными и отрицательными n и m , находим

$$I_{ПЧ}(k) = A(1 + (-1)^k),$$

где A – некоторая функция частот и мощностей приложенных к переходу сигналов. Таким образом, при нечетных k сигнал ПЧ обращается в нуль, а при четных k положителен. Данный результат важен, поскольку для некоторых приложений удобно иметь возможность работать при нулевом напряжении смещения, подбирая соответствующие частоты синтезатора.

Трехмерная картина $P_{ПЧ}(V_0, P_{с\text{инт}})$ позволяет определить величины параметров V_0 и $P_{с\text{инт}}$ для установки системы в рабочую точку. Однако пики имеют различную максимальную мощность ПЧ-сигнала, которая также меняется в зависимости от величины мощности ВЧ-сигнала $P_{ВЧ}$. Исследования теоретических зависимостей показывают, что

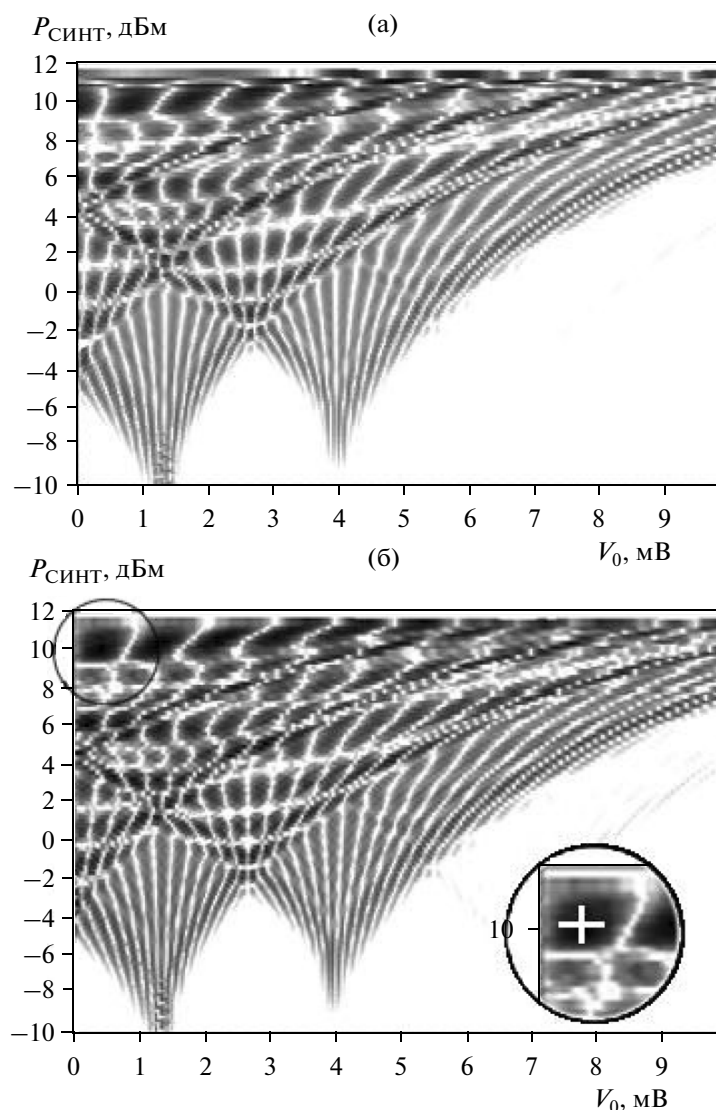


Рис. 7. Сравнение теоретических зависимостей $P_{\text{ПЧ}}(V_0, P_{\text{СИНТ}})$ для разных номеров гармоник синтезатора при $f_{\text{ВЧ}} = 635$ ГГц: а – $f_{\text{СИНТ}} = 18.53$ ГГц, 34-ая гармоника; б – $f_{\text{СИНТ}} = 18$ ГГц, 35-я гармоника. Крестиком на вставке к рис. 7б отмечена точка, для которой построен рис. 8.

для каждого отдельного пика имеется оптимальная мощность $P_{\text{ВЧ}}$, при котором достигается его наибольшая величина $P_{\text{ПЧ}}$. Это видно из рис. 8, где изображена зависимость $P_{\text{ПЧ}}(P_{\text{ВЧ}})$. Такая зависимость вычислена при фиксированных V_0 и $P_{\text{СИНТ}}$, что соответствует пику, отмеченному на рис. 7б. Видно, что при увеличении $P_{\text{ВЧ}}$ выходной сигнал растет линейно, т.е. ГС работает в линейном режиме. Именно этот режим использовался в работе [6] при измерении диаграммы направленности антенны. С увеличением $P_{\text{ВЧ}}$ достигается максимальный сигнал ПЧ, который при дальнейшем росте $P_{\text{ВЧ}}$ заметно уменьшается. Точка максимума $P_{\text{ПЧ}}$ соответствует накачке ГС (ток при смещении перехода на 2.5 мВ) сигналом ВЧ порядка 30% от скачка тока на щели.

Из рис. 6 следует, что для СИС-перехода Nb–AlO_x–Nb площадью 1 мкм² с величиной скачка тока на щели около 100 мкА при $f_{\text{ВЧ}} = 635$ ГГц и $f_{\text{СИНТ}} = 18$ ГГц (35-я гармоника) выходной сигнал может достигать –85 дБм согласно расчетам. Экспериментально получена величина около –90 дБм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе теоретически исследован ГС на туннельном СИС-переходе. Для проверки полученных результатов проведена серия экспериментов, в результате сравнения которых с теорией получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение. Проанализирован отклик гармонического СИС-смесителя в зависимости от

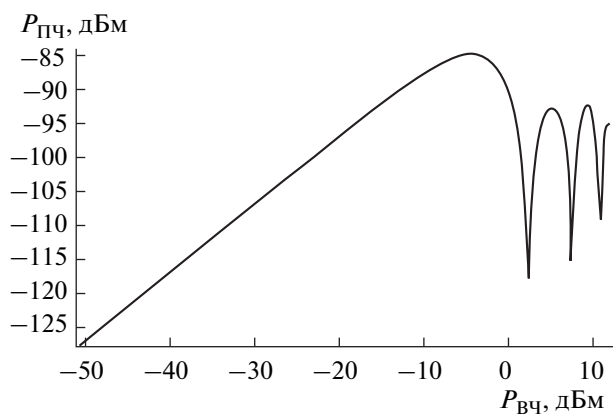


Рис. 8. Теоретическая зависимость мощности сигнала ПЧ от мощности сигнала ВЧ для $V_0, P_{\text{синт}}$, отмеченных крестиком на вставке к рис. 7б. Максимум кривой соответствует току накачки сигналом ВЧ, равному $1/3$ от величины скачка тока на щели.

напряжения смещения и величин подаваемых сигналов. Теоретически объяснено поведение сигнала ПЧ при нулевом напряжении смещения. Оценена мощность сигнала ВЧ, необходимая для максимизации сигнала ПЧ.

Авторы выражают признательность Мено Ван-ден-Бемт за помощь в подготовке эксперимента.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 09-02-00246, 09-02-12172-офи_м), грантом Президента России

для ведущих научных школ НШ-5423.2010.2 и государственным контрактом № 02.740.11.0795.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koshelets V.P., Shitov S.V.* // Superconductor Science and Technology 2000. V. 13. № 5. P. R53.
2. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 9. P. 1273.
3. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B. et al.* // IEEE Trans. 2005. V. AS-15. № 2. Pt. 1. P. 960.
4. *Кошелец В.П., Худченко А.В.* // РЭ. 2006. Т. 15. № 5. С. 633.
5. *Belitsky V.Yu., Serpuchenko I.L., Tarasov M.A., Vystavkin A.N.* // Proc. Int. Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology (ICMWF-89). Beijing. Jun. 19-23, 1989. N.Y.: IEEE, 1989. P. 268.
6. *Baryshev A., Carter M., Hesper R. et al.* // Proc. 13th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 26–28 Mar. 2002. Harvard: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 2002. P. 551.
7. *Tucker J. R., Feldman M. J.* // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1055.
8. *Withington S., Kittara P., Yassin G.* // J. Appl. Phys., 2003. V. 93. № 12. P. 9812.
9. *Kittara P., Withington S., Yassin G.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. № 2. P. 024508.
10. *Tien P.K., Gordon J.P.* // Phys. Rev. 1963. V. 129. № 2. P. 647.
11. *Werthamer N.R.* // Phys. Rev. 1966. V. 147. № 1. P. 255.
12. *Ermakov A.B., Shitov S.V., Baryshev A.M. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. AS-11. № 1. Pt. 1. P. 840.