

УДК 614.842

М.І. Іванов, Т.М. Курська, І.В. Міщенко

## ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИЙ СИНХРОННИЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНИКОВОЇ КЕРАМІКИ

*Представлені результати експериментальних досліджень синхронного джозефсонівського детектора на основі високотемпературної надпровідникової кераміки (ВНК).*

### Постановка проблеми

Одним зі шляхів удосконалювання параметрів радіоелектронних приладів є охолодження до низьких температур основних елементів радіо- і мікроелектроніки. Зі зменшенням температури, при якій працюють прилади, знижуються шуми, збільшується чутливість і коефіцієнт передачі багатьох нелінійних елементів на основі напівпровідникових надпровідників [1, 2]. У теперішній час ведуться дослідження радіофізичних параметрів нелінійних елементів на основі ВНК.

### Аналіз останніх досягнень і публікацій

Параметри нелінійних джозефсонівських елементів на основі ВНК, що працюють при температурі рідкого азоту ( $T = 77 \text{ }^\circ\text{K}$ ), дотепер детально не досліджені [1]. Відсутня інформація про вольтватну і порогову чутливість джозефсонівських детекторів слабких теплових сигналів в інфрачервоному та НВЧ-діапазонах довжин хвиль.

**Мета статті** – обґрунтування можливості створення високочутливих джозефсонівських детекторів на основі ВНК, що працюють у режимі синхронного детектування сигналів НВЧ-діапазону довжин хвиль.

### Постановка завдання та його вирішення

Джозефсонівський перехід створювався в талієвій ВНК і мав такі геометричні параметри: довжина переходу – 1 мкм, ширина – 0,5 мкм, висота – 0,4 мкм. Розглянемо основні параметри джозефсонівського переходу, що працює в режимі синхронного детектування. Нехай сигнал потужністю  $P_c$  змішується на переході Джозефсона із сигналом гетеродина потужністю  $P$ . Частоти цих сигналів рівні. Тоді середнє значення потужності сигналу  $P_c$  на нульовій різницевій (проміжній) частоті для  $P \gg P_c$

буде мати вигляд

$$P_o = \frac{\beta^2 (P_c P)^{2n}}{R} \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

де  $\beta$  – вольтватна чутливість джозефсонівського переходу;

$R$  – вхідний опір підсилювача різницевої частоти сигналу і гетеродина;

$n$  – коефіцієнт, що характеризує нелінійні властивості змішувача (для напівпровідникових діодів  $n = 0,5$ );

$\varphi$  – різниця фаз між сигналом і гетеродином.

При синхронному детектуванні важливо знати також коефіцієнт передачі джозефсонівського переходу, обумовлений як відношення потужності  $P_o$  до потужності вхідного сигналу  $P_c$ :

$$K = \frac{P_o}{P_c} = \frac{\beta^2}{R} P^{2n} P_c^{2n-1} \cos^2 \varphi. \quad (2)$$

Вираз (2) показує, що при досить великих значеннях  $P$  і  $\beta$  можуть бути отримані високі значення коефіцієнтів  $K$ . З виразів (1) і (2) випливає, що при  $\varphi$ , кратному  $\pi/2$ , ефект детектування відсутній. Функціональна схема вимірів наведена на рис. 1.

Високочастотний сигнал від клістронного генератора 8 (ГЗ-26), ослаблений атенуатором 12 (ДЗ-33А), з однієї сторони через спрямований відгалужувач 11 надходив на циркулятор 10 (ЗЦВ-100 Б), а з іншої сторони проходив прямо через атенуатор 7 (ДЗ-33А) на трійник 6. Перший сигнал був вимірюваним сигналом, що за допомогою циркулятора 10 і перемикача 13 (перемикач на р-і-п діоді) перетворювався в імпульсно-модульований сигнал майже з 100 %-ю модуляцією за амплітудою. Потім цей сигнал послаблявся за амплітудою атенуатором 9 (ДЗ-33А) і також подавався на трійник 6. Другий сигнал визначений тут як сигнал гетеродина. Для запобігання влученню сигналу гетеродина в систему модуляції застосовувався вентиль 5 (Е8-24). Дже-



релом модулюючого сигналу був генератор 14 (ГЗ-18). Від трійника 6 обидва сигнали надходили на джозефсонівський перехід 1, де відбувалося їх перетворення. Перетворений у нульову різницеву частоту детектований сигнал з частотою модуляції 1 кГц через узгоджувальний трансформатор 2 (у цьому блоці знаходиться також джерело зсуву за струмом переходу Джозефсона) з коефіцієнтом передачі 1:15 надходив на вхід селективного підсилювача 3 (У6-4) зі смугою пропускання  $\approx 100$  Гц на частоті вимірів. Осцилограф 4 (31-19В) використовувався для візуалізації приймального сигналу. Експериментальні залежності (рис. 2, 3) отримані для джозефсонівського переходу, у якого опір у нормальному стані складав 30 Ом, а надпровідний критичний струм  $\leq 30$  мкА. Струм зсуву дорівнював 30 мкА і відповідав максимальному відклику переходу на вимірюваний сигнал. Джозефсонівський контакт знаходився в 3-см хвилевідній секції перерізом  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Для узгодження джозефсонівського переходу з хвилеводом був плавний перехід на переріз  $23 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Температура в криостаті 77 °К. Частота НВЧ-генератора, на якій досягалося синхронне детектування за схемою вимірів (рис. 1), дорівнювала 9,4 ГГц.

На рис. 2 наведена залежність відклику джозеф-

сонівського переходу на різницевої частоті у вигляді напруги на ньому від рівня підвідної потужності сигналу  $P_c$ .

Крива 1 відповідає звичайному амплітудному модулюванню без перетворення частоти. Як видно з кривої, закон детектування в області малих сигналів є близьким до квадратичного з помітним відхиленням від нього при сигналах, що перевищують  $10^{-10}$  Вт. Вольтватна чутливість в області квадрати-

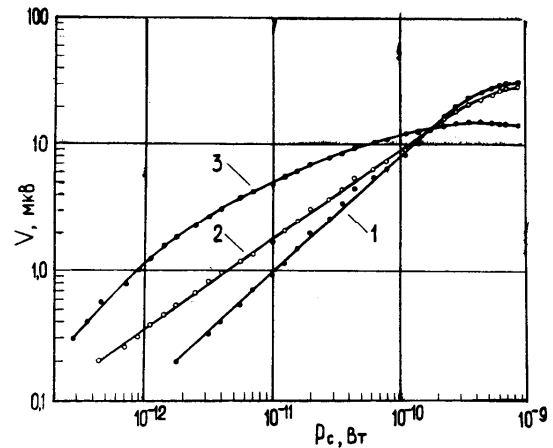


Рис. 2. Залежність напруги нульової різницевої частоти на джозефсонівському переході від потужності НВЧ-сигналу при потужності гетеродина: 1 – 0; 2 –  $1,9 \cdot 10^{-13}$  Вт; 3 –  $6 \cdot 10^{-12}$  Вт

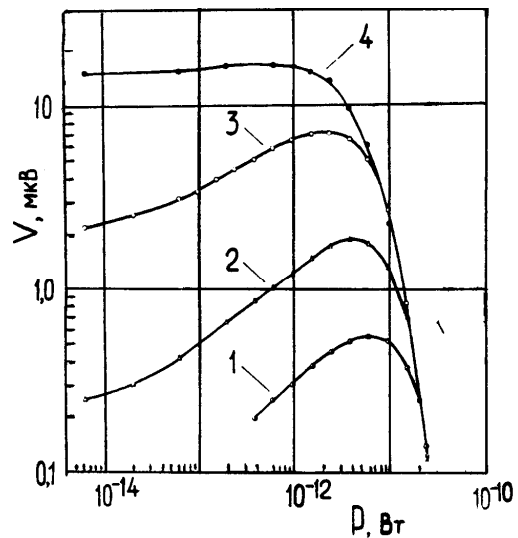


Рис. 3. Залежність напруги нульової різницевої частоти на джозефсонівському переході від потужності гетеродина при потужності НВЧ-сигналу: 1 –  $4,5 \cdot 10^{-13}$  Вт; 2 –  $1,4 \cdot 10^{-12}$  Вт; 3 –  $1,4 \cdot 10^{-11}$  Вт; 4 –  $1,4 \cdot 10^{-10}$  Вт

чного детектування дорівнює  $10^5$  В/Вт. Динамічний діапазон за потужністю для виміряних сигналів – порядку 20 дБ. При потужностях гетеродина  $P < P_c$  (крива 2 на рис. 2) вже спостерігається помітний внесок гетеродина, що виявляється у відхиленні закону детектування від квадратичного і розширенні діапазону вимірюваних сигналів. Крива 2 на рис. 2 відповідає  $P = 1,9 \cdot 10^{-13}$  Вт. З підвищенням потужності гетеродина до  $6 \cdot 10^{-12}$  Вт (крива 3 на рис. 2) відклик джозефсонівського переходу зростає тільки в області слабких сигналів, залежність  $V$  від  $P_c$  має в цьому випадку складний вигляд, що пов'язано зі зменшенням вольтватної чутливості для великих сигналів. Більш наочно це видно з рис. 3, де наведена залежність  $V$  від  $P$  при різних рівнях  $P_c$ .

При потужностях гетеродина, що перевищують  $10^{-11}$  Вт, чутливість джозефсонівського переходу різко падає. Динамічний діапазон за потужністю для гетеродина, визначений як діапазон, де спостерігається сталість коефіцієнта  $n$ , приблизно дорівнює 20 дБ. Таким чином, при  $n = 0,5$  можна одержати вигоду за чутливістю джозефсонівського переходу в результаті гетеродинування рівно на один порядок, що і спостерігається експериментально. Для слабких сигналів, коли  $P > P_c$ , коефіцієнт  $n$  близький до 0,5, а зі зростанням  $P_c$  він убуває. Так, для випадку 1 (рис. 3)  $n = 0,43$ . При цьому коефіцієнт передачі  $K$  змінюється від  $-24$  до  $-13$  дБ. Подальше зростання сигналу послабляє залежність відклику переходу від  $P$ . Для випадку 3  $n = 0,28$ , а коефіцієнт  $K$  набуває значень від  $-16,7$  до  $-9,3$  дБ. Криві 1, 2 і 3 на рис. 3 наведені для потужності сигналу відповідно рівними  $4,5 \cdot 10^{-13}$  Вт,  $1,4 \cdot 10^{-12}$  Вт,  $1,4 \cdot 10^{-11}$  Вт. У кінці динамічного діапазону за потужністю сигналу, коли  $P_c = 1,4 \cdot 10^{-10}$  Вт (крива 4 на рис. 3), наближується до нуля, коефіцієнт  $K \cong -11,9$  дБ. Для визна-

чення коефіцієнта передачі  $K$  потужність  $P_0$  визначалася як  $2/R$ , де  $R$  – опір джозефсонівського переходу.

Таким чином, показана можливість збільшення чутливості джозефсонівського переходу до електромагнітного випромінювання і його коефіцієнта передачі при синхронному детектуванні НВЧ-сигналів. Наведені експериментальні дані про чутливість джозефсонівського переходу не є пороговими. Для визначення порогової чутливості синхронного детектора на основі джозефсонівського переходу необхідно застосовувати гетеродини з низьким рівнем амплітудних і частотних шумів.

### Висновок

Отримані результати показують високу чутливість джозефсонівських переходів на основі ВНК у НВЧ-діапазоні довжин хвиль. Джозефсонівські переходи на основі ВНК витримують багато циклів охолодження і нагрівання та можуть використовуватися в техніці виміру слабких НВЧ-сигналів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Иванов Н.И., Водопьянов Е.А. Панорамный анализатор спектра слабых широкополосных и узкополосных сигналов на основе высокотемпературных слабосвязанных сверхпроводников // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: Фолио. – 2000. – Вып. 10. – С. 58 – 62.
2. Иванов Н.И., Балаклеяский А.В. Разработка комплекса технических средств для проведения экологического мониторинга нефтяных разливов на подстилающих поверхностях // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вип. 5(45). – С. 220 – 224.

Надійшла 16.11.2005

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук старший науковий співробітник В.К. Иванов, Інститут радіофізики та електроніки НАН України, Харків.