

**ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР
НАДПРОВІДНИКОВОЇ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
“АЙСБЕРГ”**

На правах рукопису

КУДЕЛЯ Анатолій Михайлович

**ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ
ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 01.04.03-радіофізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ -1996

0 99 1388

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00739393 (Y)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в державному науково-дослідному центрі надпровідникової електроніки "АЙСБЕРГ" м. Київ та Московському Ордену Леніна і Трудового Червоного Прапора державному педагогічному університеті ім. В.І. Леніна.

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,
професор В. О. ІЛЬІН

Науковий консультант - кандидат тех. наук О. Г. ДЕНІСОВ

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор В. М. ШУЛЬГА

доктор фізико-математичних наук,
доцент В. В. ІЛЬЧЕНКО

Провідна організація - Інститут радіофізики і електроніки
НАН України

Захист відбудеться "20" Вересня 1996 р. о 14⁰⁰ год.
на засіданні Спеціалізованої ради Д 01.01.17 в Київському
університеті ім. Тараса Шевченка за адресою: 252017, Київ, вул.
Володимирська, 64, Київський університет ім. Тараса Шевченка,
радіофізичний факультет, аудиторія 46.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського
університету імені Тараса Шевченка.

Автореферат розіслано "25" липеня 1996 р.

Учений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук А. Г. ШКАВРО

Актуальність.

Серед різноманітних наслідків ефекту Джозефсона виділяється можливість здійснення детектування електромагнітного випромінювання за допомогою слабких зв'язків. Перші широкополосні детекторні пристрої, використовуючі ефект Джозефсона, виявили їх унікальні можливості в міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль. В зв'язку з низькою стабільністю використовуваних слабких зв'язків, вони зрідка використовувались для проведення радіоастрономічних досліджень. Але є і інші області використання широкополосних приймачів з великою ефективністю. Зокрема, детекторні радіометри можуть бути успішно використані для вирішення задач дистанційного зондування підстилаючих поверхонь (суші, світового океану і т.д.). Якраз тут використання багатоеlementних і багатоканальних високочутливих джозефсонівських детекторних радіометрів дає можливість одержання принципіально нової інформації, виявлення тонких ефектів, значного уточнення вже наявних даних, встановлення взаємозв'язків між ними. Гарантом цього є висока чутливість джозефсонівських радіометрів, перевищующих відповідний параметр інших приймальних пристроїв, причому особливо важливим є можливість їх реалізації в мм та субмм діапазонах довжин хвиль.

Створення багатоеlementних прийомних пристроїв в цих діапазонах дозволяє вирішенню задач радіобачення, одержувати інформацію від об'єкта вивчення в реальному масштабі часу, на відміну від аналогічних систем із сканіруючою діаграмою направленості. До цього часу відомо ряд робіт, присвячених створенню надпровідникових багатоеlementних приймачів мм діапазонів хвиль, які, як випливає із публікацій, є лабораторними зразками, призначеними для відпрацювання принципів їх побудови.

Передумовою до початку розробки багатоеlementних радіоприйомних пристроїв мм та субмм діапазонів хвиль послужило створення високоякісних плівкових торцевих джозефсонівських переходів (ТДП) з заданими електрофізичними характеристиками.

Питанням вивчення електрофізичних властивостей ТДП, їх взаємодії з НВЧ випромінюванням і електродинамічною системою, а також створенню приймачів різних діапазонів хвиль на одиночних ТДП присвячена значна кількість робіт. Але одержаний при цьому

досвід не може бути автоматично перенесений на розробку багатоеlementних прийомних систем. І головною причиною цього є постановка нових радіофізичних задач, відсутніх в радіометрах на одиночних елементах. Основними з них є: дослідження ефективності взаємодії НВЧ сигналу мм і субмм діапазонів хвиль з багатоеlementною матрицею ТДП; визначення величини електромагнітної взаємодії декількох ТДП, одного з них як високочутливого детектора електромагнітного випромінювання та другого - як генератора при нестационарному ефекті Джоузефсона, які знаходяться в єдиній електродинамічній системі; пошук оптимальних джерел сигналів калібровки та підшумлення; оптимального способу модуляції для досягнення максимальної чутливості приймального пристрою.

Ціль роботи. Дисертаційна робота присв'ячена експериментальному дослідженню властивостей власної генерації торцевих джоузефсонівських переходів, вивченню процесу детектування електромагнітного випромінювання мм і субмм діапазонів хвиль надпровідниковим нелінійним елементом в схемі радіометра з керованою вольт-амперною характеристикою (ВАХ) під дією керуючого сигналу (КС), створенню моделі та дослідженню радіофізичних характеристик багатоеlementного прийомного пристрою на джоузефсонівських переходах в субмм діапазоні хвиль.

Наукова новизна роботи полягає у вперше одержаних результатах:

- експериментально виявлена і досліджена нелінійна залежність власної потужності випромінювання джоузефсонівської генерації торцевих джоузефсонівських переходів при взаємодії з другим переходом, що знаходиться в єдиній електродинамічній системі з першим;

- експериментально доведено, що ефект підвищення чутливості джоузефсонівського детектора в режимі з керованою вольт-амперною характеристикою є наслідком ослаблення його власної генерації під дією керуючого сигналу; визначена оптимальна величина коефіцієнта зменшення критичного струму переходу, в залежності від величини теплових флуктуацій і відносної частоти, для досягнення максимальної флуктуаційної чутливості;

- досліджені: спектральна щільність низькочастотної напруги джоузефсонівського переходу, при сильному зв'язку з електродинамічною системою, в присутності ще декількох переходів;

динамічні характеристики відгуків і поляризаційні якості надпровідникової Nb-Si-Nb мікросхеми з трьома джозефсонівськими переходами в залежності від одночасного режиму роботи по постійному струму кожного з них;

- експериментально визначена оптимальна величина електромагнітної взаємодії двох джозефсонівських переходів, генераторного і детекторного, що знаходяться в єдиній електродинамічній системі, в залежності від їх режиму роботи по постійному струму;

- запропоновано спосіб модуляції для багатоелементних приймальних пристроїв на джозефсонівських переходах при детектуванні немодульованого електромагнітного випромінювання мм і субмм діапазону хвиль;

- розроблені методики визначення величини поглинання НВЧ сигналу в джозефсонівському переході, величини потужності керуючого сигналу для досягнення максимальної чутливості детектора з керуючою ВАХ.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- показано, що розроблені методики та вимірювальні стенди, в яких в якості надмалощумливого підсилювача низької частоти використовується СКВІД постійного струму, дозволяють проведення вимірів характеристик джозефсонівської генерації торцевих переходів з точністю $\sim(10-20)\%$.

- виміряні величини шумової температури власної генерації торцевих переходів в залежності від режиму роботи по постійному струму, при цьому встановлена можливість використання торцевих джозефсонівських переходів в якості генератора керуючого сигналу, а також джерела сигналу калібровки і підшумлення для детекторного радіометра на джозефсонівських переходах;

- експериментально виявлені умови досягнення максимальної чутливості джозефсонівського детектора з керованою ВАХ;

- запропоновано спосіб поелементної модуляції для багатоелементних приймальних пристроїв на джозефсонівських переходах;

- створена модель і експериментально досліджені радіофізичні характеристики восьмиелементного радіометричного приймача на торцевих джозефсонівських переходах.

На захист вносяться наступні положення:

1. Потужність випромінювання власної генерації джозефсонівського переходу в електродинамічну систему, спряжену з другим переходом, має нелінійну залежність, визначаему відносною частотою та добротністю електромагнітної системи.

2. Підвищення чутливості джозефсонівського детектора в режимі з керованою вольт-амперною характеристикою визначається потужністю керуючого сигналу, і є наслідком придушення власної генерації джозефсонівського переходу при малих значеннях флуктуацій.

3. Спектральна щільність флуктуацій низькочастотної напруги джозефсонівського переходу, в складі трьохелементної надпровідникової мікросхеми, а також відгук на дію електромагнітного сигналу, являється функцією електромагнітного зв'язку з другими елементами мікросхеми.

4. Величина електромагнітної взаємодії двох ТДП, що знаходяться в єдиній електродинамічній системі, визначається їх режимом роботи по постійному струму при малих значеннях флуктуацій.

5. В багатоелементних приймальних системах на ТДП при детектуванні немодульованого електромагнітного випромінювання мм і субмм діапазонів довжин хвиль, для досягнення граничної чутливості, оптимальним способом модуляції являється робота кожного детектора в режимі з керованою вольт-амперною характеристикою під дією керуючого сигналу.

Публікації. Основні результати роботи опубліковані в 5 друкованих статтях, 3 авторських свідоцтвах на винахід та 3 тезисах доповідей.

Апробація. Основні результати роботи доповідались на семінарах в ДНДЦ "Айсберг", ДержНДЦ "Фонон", Московському державному педагогічному університеті, Інституті земного магнетизма, іоносфери та розповсюдження радіохвиль РАН, на семінарах по прикладній надпровідниковій електроніці та біомагнетизму (Жукін XVII, XVIII) в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, міжнародних конференціях по прикладній надпровідності в Чикаго (США) 1992 р., Гетінгені (Німечина) 1993 р., Орlando (США) 1994 р., SPAI - Київ 1995 р., ISRAMT - Київ 1995 р.

Об'єм та структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав та висновку. Об'єм дисертації складає 160 сторінок, включаючи 46 рисунків, 1 фотографії, 5 таблиць та списку літератури із 128 найменувань.

Зміст роботи. У вступі обгрунтована актуальність теми дослідження, сформульовані його основні задачі, показані новизна і практична значимість роботи, приведено короткий зміст дисертації.

В першій главі дано короткий опис фізичних основ детектування електромагнітного випромінювання надпровідниковими нелінійними елементами та їх радіофізичних характеристик у складі коливальних систем при взаємодії з НВЧ сигналом, приводяться електрофізичні якості ТДП і розрахункові формули флуктуаційної чутливості джозефсонівських детекторів з керованою ВАХ, обговорюються особливості побудови багатоеlementних приймальних систем, аналізуються характеристики сучасних одноelementних та багатоеlementних криогенних приймачів. В кінці глави дається постановка вирішуваних в дисертації задач.

В главі 2 розглянуті основні радіофізичні принципи побудови надпровідникового криогенного датчика (КРД), як основи багатоеlementного приймача. Визначено, що основні з них полягають в наступному: - в якості нелінійного надпровідникового елемента повинен використовуватись ТДП; - КРД повинен являти собою детекторний приймач, побудований по схемі з керованою ВАХ під дією керуючого сигналу; - в якості генератора КС, а також в схемах калібровки та підшумлення КРД використовується ТДП; - в мм та субмм діапазонах хвиль вхідний тракт має квазіоптичне виконання.

В главі показано, що для проведення експериментальних досліджень властивостей джозефсонівської генерації і радіофізичних характеристик КРД були розроблені методики та вимірювальні стенди. В одному із основних вимірювальних стендів, на якому були проведені основні дослідження, в якості надмалешумливого підсилювача низької частоти використовувався SQUID постійного струму з полозою підсилення 0-10 кГц і розрішенням по струму $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ А/Гц}^{1/2}$, що дозволило провести вимірювання надмалих низькочастотних сигналів з високою достовірністю. Торкаючись методик, поряд з використанням відомих, були розроблені і нові

методику дослідження, безпосередньо для багатоелементних приймальних пристроїв з джозефсонівськими переходами. Це методику визначення потужності НВЧ випромінювання, поглинутого в джозефсонівському переході, визначення оптимальної потужності керуючого сигналу, вимірювання шумової температури власної генерації ТДП для використання її в якості калібровочного шумового сигналу. Точність вимірювання відповідно складала 12-17% і 10-20% при потужності НВЧ випромінювання $\approx 10^{-10}$ Вт. Методика вимірювання флуктуаційної чутливості мала дві особливості: перша - застосування фільтра низьких частот для обмеження полоси випромінювання калібровочного джерела зі сторони верхніх частот, і друга - проведення вимірювань немодульованого НВЧ випромінювання.

В зв'язку з особливостями передачі НВЧ сигналів в мм і субмм діапазонах довжин хвиль, для апробації викладених принципів створення КРД, як модуля багатоелементної системи, були вибрані три експериментальні моделі: 1) хвилевідна в каналі $7,2 \times 3,4$ мм²; 2) квазіоптична в круглому хвилеводі діаметром 5,2 мм; 3) у вигляді надпровідникової інтегральної мікросхеми з трьома ТДП. В хвилевідних моделях використовувались два і три ТДП одночасно: один як детектор, другий - як генератор КС і третій як генератор шумового сигналу.

Зазначається, що проведення вимірів радіофізичних характеристик ТДП і КРД при потужності НВЧ сигналів $\approx 10^{-10}$ Вт, і такого ж порядку власної потужності випромінювання ТДП, є дуже складною експериментальною задачею. Тому, поряд з використанням надчутливого вимірювача на SQVIDi, другою умовою одержання достовірних результатів вимірів, було оптимальне спряження ТДП, з величиною нормального опору $R_H \approx (1-100)$ Ом, як з вільним простором з $\rho = 120\pi$ Ом, так і хвилевідною системою із $Z_e \approx 200$ Ом. в широкій полосі частот. При цьому враховувалось що, імпеданс джозефсонівського переходу має частотну залежність, яка визначає його зв'язок з електродинамічною системою. Останній на частоті сигналу визначається коефіцієнтом спряження

$$\dot{a} = \frac{4R_e R_H}{|R_e + Z_0 + R_H|^2}, \text{ де } Z_0 - \text{імпеданс переходу, } R_e - \text{активний опір}$$

НВЧ системи. Тому, з ціллю широкополосного спряження ТДП із хвилеводом, був проведений розрахунок і макетування з подальшим

дослідженням характеристик спіральних антен еквіугольного типу з трансформатором імпедансу. Правильність такого підходу було підтверджено в експерименті по визначенню потужності НВЧ сигналу, поглинутому в джоуфсонівському переході. Експеримент був проведений на хвилевідній моделі з двома ТДП, в 8-ми мм діапазоні довжин хвиль, з такими електрофізичними характеристиками: №1 $I_c = 15$ мкА, $R_n = 67$ Ом; №2 $I_c = 30$ мкА, $R_n = 50$ Ом при потужності НВЧ сигналу $P = 1,2 \cdot 10^{-8}$ Вт. Результати експеримента показали, що при коефіцієнті спряження $\dot{a} > 0,75$ і флуктуаціях $\gamma = I_{hf} / 2I_c \leq 0,01$ в джоуфсонівському переході поглинається $\approx 0,75\%$ потужності НВЧ сигналу і що розроблена методика прийнятна для вимірювання коефіцієнта спряження як мікропослоскових спіральних антен, так і приймальних модулів, в яких вона виготовлена в єдиному технологічному циклі з активним елементом. В подальшому останнє було використано при створенні і дослідженні радіофізичних характеристик восьмиелементної лінійної матриці з ДБШ, як прототипа для розробки матриці з джоуфсонівськими переходами. Такий підхід дозволив проводити вимірювання в нормальних умовах. На цих же хвилевідних моделях були проведені дослідження флуктуаційної чутливості, δT , КРД при прийомі модульованого сигналу з p -і-п атенюатором на вході, так і немодульованого в режимі з керуючим сигналом. Результати вимірювань показали, що δT КРД в режимі з керуючим сигналом величиною $P = 2,3 \cdot 10^{-10}$ Вт краще, ніж в модуляційному приблизно в 2 рази і складала в 8 мм діапазоні $\delta T \leq 0,01$ К і в 3 мм діапазоні хвиль - $\delta T \leq 0,08$ К при $\tau = 1$ с, величина $NEP = 0,8 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}. Потужність споживання генератором КС та генератором шуму на ТДП складала менше ніж 10^{-7} Вт.

Вказується, що строгий аналіз взаємодії двох ТДП в приймальному пристрої з керуючим сигналом, у випадку недостатнього спряження $\dot{a} < 0,5$, ТДП-генератора УС, можливе виникнення паразитної модуляції, знижуючої δT . Остання обставина вимагає розгляду питання їх електромагнітної "розв'язки" за допомогою невзаємного елемента. З цієї метою були провені дослідження оптимальних характеристик невзаємних елементів (НЕ) для роботи в КРД. Вихідними даними для визначення характерис-

тик НЕ були величина потужності і полоса випромінювання власної генерації ТДП, а також раніше визначена мінімальна величина діючої потужності КС на детекторний ТДП. В результаті проведених досліджень на макетах НЕ в 3 мм діапазоні хвиль було показано, що він повинен мати наступні значення електричних характеристик: прямі втрати $A_{\text{пр}} \leq 2,0$ дБ; зворотні втрати $A_{\text{звр}} \geq 20$ дБ; $\Delta f > 3$ ГГц; $KCXH_{\text{вх,вих}} < 2$, [1,2].

Далі обговорюються результати досліджень радіофізичних характеристик КРД мікрополоскового виконання з трьома ТДП, які проведено в 8 мм діапазоні хвиль. Приведено опис ніобієвої мікросхеми, розміщеної на сапфіровій підкладці, показано, що її конфігурація дозволяє використовувати два переходи для детектування НВЧ сигналів із взаємно-перпендикулярними векторами електричного поля E , а третій - в якості генератора КС, [3]. Вказується ще на один з варіантів приймального модуля гібридно-інтегрального виконання - мікросхеми, поєднуючий на одній підкладці джозефсонівський перехід та підсилювач на основі транзистора з бар'єром Шоткі, [4]. Приводяться наступні результати вимірів радіофізичних характеристик мікрополоскового модуля радіометричного приймача: $\delta T = 0,2$ К при $\tau = 1$ с, $NEP = 2,5 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} при коефіцієнті спряження $\beta = 0,67$ в діапазоні частот 30-37 ГГц. Обговорюється експериментально виявлений ефект динамічної зміни відгуку (збільшення або зменшення приблизно на порядок) відносно автономного випадку одного із ТДП, в залежності від режиму роботи решти двох як по постійному струму так і змінному. Проведений теоретичний аналіз експерименту показав, що збільшення відгуку визначається величиною електромагнітного зв'язку трьох ТДП з хвилеводом та синфазним складенням їх відгуків при наступному режимі їх роботи. Експериментально доведено, що максимум відгуку спостерігається при значеннях $R_d = (0,6-0,8)R_{d\text{max}}$ і $\Omega = \hbar f / 2eV_c \ll 1$ а не визначеного згідно

формули Кантера-Вернона $U_{\text{вих}} \approx \frac{I_0^2 R_d}{4\Omega^2}$, де відгук широкополосно-

го джозефсонівського детектора в області малих напруг зміщення $v / \sqrt{\hbar} \ll \Omega$ пропорційний диференційному опору переходу - R_d і має максимальне значення при $R_{d\text{max}}$. У визначеному режимі роботи, при

коефіцієнті спряження $\alpha=0,7$, загальне збільшення відгуку на ТДП з $R_H > 60$ Ом, досягало ~ 6 дБ по відношенню до автономного випадку. Спостерігаємо зменшення відгуку було значно менше, ~ 4 дБ, і проявлялось при значних напругах зміщеннях, U_{3M} близьких до характерної напруги U_C на двох других переходах. Аналіз ситуації показав, що з підвищенням U_{3M} на них, зменшується R_d , а значить і їх відгук, збільшується потужність власної джозефсонівської генерації, яка як фонова підсвітка знижує чутливість детекторного переходу, як $\delta T \sim [1 + (R_H/R_C)(T_\phi/T)]$. Досліджений ефект має велике практичне значення: при змінній напрузі зміщення на одному з трьох переходів можливе детектування немодульованого НВЧ сигналу двома другими з високим значенням чутливості.

В кінці глави приводяться результати досліджень, дається висновок, що одержані високі значення сигнальних та шумових характеристик досліджених моделей КРД свідчать про можливість реалізації з його допомогою радіометричного каналу по схемі з керуючим сигналом і джерелом підшумлення в багатоелементних приймальних системах.

Глава 3 присвячена експериментальному дослідженню спектральної щільності шумів ТДП, їх власної генерації при нестационарному ефекті Джозефсона, електромагнітній взаємодії декількох ТДП, що знаходяться в єдиній електродинамічній системі та способу модуляції в КРД з керованою ВАХ переходу під дією керуючого сигналу.

В першому розділі проведена оцінка спектральної щільності шумів ТДП, оскільки чутливість детекторного приймача в значній мірі визначають власні шуми використаного нелінійного елемента, а також електродинамічною системою, в яку він включений. Стосовно ТДП, до теперішнього часу немає даних вимірювання спектральної щільності шумів ТДП в широкополосній електродинамічній системі в присутності навіть декількох детекторних елементів, маючих власну генерацію. В зв'язку з цим, в дисертаційній роботі було зроблено розрахунок та експериментальні дослідження спектральної щільності низькочастотної шумової напруги ТДП у складі мікрополоскової матриці із трьох елементів, зв'язаних за допомогою $\lambda/4$ резонаторів, а також частоти зрізу f_{3p} флікер шуму, оскільки вона визначає низькочастотну границю робочого діапазону частот модуляції.

Повна спектральна щільність низькочастотної напруги на джозефсонівському переході, включеному в схему широкополосного детекторного приймача визначається виразом: $S_V^\Sigma = S_V^T + S_V^I + S_V^V + S_V^F + S_V^\Phi$, де S_V^T - спектральна щільність напруги теплових шумів; S_V^I - струму; S_V^V - джозефсонівської генерації; S_V^F - флікер-шуму; S_V^Φ - фонового випромінювання. Перші дві складові визначаються формулами Найквіста і Шоткі та мають порядок величин $(S_V^T)^{1/2} \sim 8 \cdot 10^{-10}$ В/Гц^{1/2} и $(S_V^I)^{1/2} \sim 2eI_{др}R_d^2 = 1,2 \cdot 10^{-10}$ В/Гц^{1/2} при теплових флуктуаціях $\gamma \leq 0,02$; джозефсонівська генерація відносно теплових шумів - $S_V^V = 0,5 S_V^T$; складова S_V^F визначається тільки експериментально. Частота зрізу, $f_{зр}$, визначена для досліджуваних переходів по удвоєнному перевищенню $S_V^F \approx 15 S_V^T$ склала ≈ 1300 Гц. Розрахунок вкладу фонового випромінювання $S_V^\Phi = 2(\eta k T_\phi)^2 \Delta f$, показав, що при вольтватній чутливості $\eta \leq 10^5$ В/Вт та $T_\phi = 300$ К фоновими шумами можливо знехтувати. Інша ситуація виникає, коли ТДП знаходиться в лінійці таких же переходів при умові хорошого спряження, тобто, коли $a = 0,8-1,0$. Тут необхідне врахування випромінювання власної генерації лінійки переходів, сприймаємо кожним з них як фонову підсвітку. Проведений розрахунок S_V^Σ для кожного ТДП в трьох мікросхемах, для автономного випадку, показав, що при $\gamma \leq 0,02$, S_V^Σ перевищує S_V^T в 5-8 разів, а експериментально вимірне значення - $S_V^\Sigma = (10-15) S_V^T$. Експериментально встановлено, що підвищення величини повної спектральної щільності низькочастотної напруги переходу, в складі матриці, визначається шумовою температурою, $T_{ш} = TR_d / R(1 + I_c^2 / 2I^2)$, кожного із переходів мікросхеми в робочому режимі, як фоновим випромінюванням температури T_ϕ . Одержаний результат досліджень досить суттєвий, оскільки дозволяє прогнозувати можливі параметри багатоеlementних приймачів, а також висувати необхідні вимоги до його елементів з метою досягнення максимальної чутливості одноканальних та багатоканальних приймальних систем.

Другий розділ присвячений дослідженню електромагнітної взаємодії декількох (як мінімум двох - генераторного і детекторного)

переходів, що знаходяться в єдиній електродинамічній системі, тому що характер та величини взаємодії переходів в багатоеlementних системах на основі ТДП, також визначають максимальне значення флукуційної чутливості джозефсонівського детекторного радіометричного приймача.

В другій главі обговорювалось питання електромагнітної розв'язки переходів. В зв'язку з проблемами її реалізації в багатоеlementних системах, в дисертаційній роботі експериментально визначені допустимі величини електромагнітної взаємодії переходів, оскільки строгий електродинамічний розрахунок являється самостійною задачею. В експериментальному дослідженні враховувався той факт, що випромінювання кожного із розташованих в електродинамічній системі ТДП значно впливає на ВАХ іншого. Цей вплив в значній мірі визначається спряженням переходу з зовнішньою системою, яке визначається коефіцієнтом a , та приводить до різних ефектів на детекторному та генераторному переходах. В першому з них, значна величина КС приводить, як вже вказувалось, до спрямлення ВАХ детекторного, в результаті чого вольт-ватна чутливість переходу знижується приблизно на два порядки. з майже повним придушенням власної генерації, тобто дія $\sim 100\%$. В другому, коли детекторний працює в режимі максимальної чутливості, тобто при малих U_{3M} з мінімальним $T_{ш}$, його дія на генераторний, мала. Розрахована по експериментальним даним величина цієї дії, при флукуціях $\gamma \leq 0,05$ та відносній частоті $\Omega = \frac{\hbar f}{2eV_c} \ll 1$, не більше, ніж 5% .

Тобто, $T_{ш}$ генераторного може змінюватись на цю величину, чим в більшості випадків можна знехтувати. Але, якщо використовувати ТДП в системі калібровки джозефсонівського радіометра, зазначений вплив повинен враховуватись.

В наступному розділі приведені результати дослідження величини шумової температури, $T_{ш}$, та полоси випромінювання власної генерації ТДП в залежності від напруги зміщення на переході і його нормального опору, а також можливості використання власної генерації ДП для здійснення компенсації радіотеплового випромінювання геофізичного об'єкту з $T_{ш} = 40-500$ К, тобто для забезпечення квазінульового режиму роботи радіометра, а також обговорюється актуальність дослідження, пропонується

нетрадиційне радіофізичне рішення задачі створення системи підшумлення (СП), [5] та можливі варіанти її побудови.

Одним з таких рішень може бути використання наслідка нестационарного ефекта Джозефсона - наявність генерації в надпровідниковому слабкому зв'язку при середній напрузі $\bar{V} \neq 0$ з джозефсонівською частотою $I_{дж} = \frac{2e\bar{V}}{\hbar}$. Полоса випромінювання та його потужність відповідно рівні: $\Delta F = 40R[Om]T[K]$ МГц і $P_{дж} = 0,1I_c \bar{V}$. При типових значеннях характерної напруги $V_c = 1$ мВ (при $\bar{V} = V_c$) і $I_c = 10$ мкА величина потужності власної генерації дуже незначна $\sim P_{дж} = 10^{-9}$ Вт. Такі малі величини потужності в якості КС можуть бути використані для керування приймачем з активним елементом, який має в робочому режимі граничні значення власної шумової температури, $T_{ш}$. В зв'язку з цим було проведено вимірювання $T_{ш}$ джозефсонівського детектора в режимі максимальної чутливості, по відомій методиці, яка використовує лінійну залежність флукуаційної чутливості, δT , від температури фонового шумового випромінювання, $T_{ф}$. Експериментально досліджувались два ТДП з параметрами: №1 - $R_H = 3,4$ Ом, $I_c = 12$ мкА; №2 - $R_H = 27$ Ом, $I_c = 18$ мкА. В експерименті, порівнюючи δT радіометра в умовах, коли на ТДП діє зовнішнє випромінювання спряжених нагрузок з термодинамічними температурами 300 К та 77 К, і власне, відбите від ідеальної НВЧ закоротки на вході пристрою, визначалась шумова температура переходу. Дослідження виконувались в 8 мм діапазоні довжин хвиль. По експериментальній залежності δT від $T_{ф}$ для двох зразків була визначена шумова температура приймача на ТДП, яка склала $T_{ш1} = 70$ К і $T_{ш2} = 60$ К, [6]. Одержані значення добре корелюють з результатами вимірювань, одержаними за допомогою вимірювального радіометра 8 мм діапазону хвиль (67 і 55 К), відповідно.

Вказується, що ці значення $T_{ш}$ визначають мінімальну необхідну величину шумової температури СП для джозефсонівського радіометра. Можливість одержання більших величин $T_{ш}$ була досліджена в радіометрі на ТДП з керованою ВАХ, в якій в якості керуючого сигналу використовувалось випромінювання другого, генераторного, переходу. Вимірювання показали, що власне випромі-

нювання генераторного ТДП ефективно діє на детекторний ТДП, що проявляється в переміщенні ВАХ останнього відносно неопроміненої ВАХ, величина якого може бути порівняна з ефектом, викликаним випромінюванням каліброваного по потужності генератора шуму. Таке порівняння дає можливість допоміжного контролю у визначені ефективної шумової температури випромінювання генераторного ТДП, сприймаемого детекторним переходом. З побудованих експериментальних залежностей визначено, що при малих флуктуаціях $\gamma \leq 0,01$ і відносній частоті $\Omega < 1$ шумова температура випромінювання генераторного переходу лінійно зростає із збільшенням напруги на переході. Максимальне значення $T_{ш}$ складає ~ 450 К, мінімальне ~ 100 К, [7]. Полоси власної генерації досліджених ТДП трохи більше розрахункових значень і складала $\sim 0,8$ та $5,4$ ГГц, що пов'язано як з уширенням лінії генерації під дією флуктуацій так і з експериментальними труднощами її вимірювання. Підсумовується, що діапазон зміни шумової температури випромінювання ТДП достатній для компенсації власної шумової температури більшості геофізичних об'єктів, які досліджуються за допомогою радіометрів мм та субмм діапазону хвиль. Величиною $T_{ш}$ легко керувати змінюючи напругу на переході аналоговим чи цифровим способом. З практичної точки зору важливо, що потужність блока керування в цьому випадку суттєво менше, ніж в будь-якій іншій схемі СП.

В розділі також відмічається, що для калібровки звичайно використовуються джерела білого шуму; ДП таким не є. Проте ТДП з нормальними опорами 100-150 Ом мають полосу генерації 15-25 ГГц, що близько до полоси детекторних радіометрів мм діапазону хвиль, а за таких умов їх власне випромінювання можливо вважати білим шумом. Таким чином, високоомні ТДП мають перевагу, в порівнянні з низькоомними, для використання в якості генераторів як через просте спряження з сигнальним трактом, так і через шумові характеристики.

В останньому розділі розділі приведені результати досліджень процесу детектування електромагнітного випромінювання мм діапазону довжин хвиль джозефсонівським переходом в схемі радіометра з керованою ВАХ під дією КС, в якості якого використовується власне випромінювання другого переходу, [8]. Повідомляється, що досліджувалась флуктуаційна чутливість, δT ,

радіометра на ТДП в залежності від потужності КС. Дослідження проводились в 8 і 3 мм діапазонах хвиль, на хвилевідному макеті з двома ТДП, де детектором був ТДП з параметрами $I_c = 8$ мкА; $R_H = 47$ Ом, генератором - з параметрами $I_c = 80$ мкА, $R_H = 13$ Ом. Показано, що вираш в чутливості, в порівнянні зі звичайно використовуючою модуляційною схемою, складає біля двох разів, незалежно від джерела КС і визначається зменшенням власних шумів переходу біля ~ 8 дБ за рахунок придушення джоєфсонівської генерації під дією керуючого сигналу. В якості джерел КС використовувались газорозрядна лампа типу ГШ-6 та власна генерація другого джоєфсонівського переходу, потужність випромінювання якого керувалась величиною U_{3M} . а також виявлена немонотонна залежність δT від величини U_{3M} на генераторному ТДП, тобто потужності КС, на відміну від монотонної, одержаної в першому випадку та передбаченою теорією. Експериментально визначено, що немонотонність, тобто наявність двох мінімумів δT , визначається нелінійною залежністю потужності випромінювання власної генерації джоєфсонівського переходу - генератора КС - в електродинамічну систему, спряжену з другим, детекторним переходом. Фізично це пов'язано з тим, що з підвищенням U_{3M} від 0 до характеристичної напруги, V_c , на генераторному ТДП, зростають частота та потужність випромінювання джоєфсонівської генерації, які впливають на детекторний перехід, що має як власну генерацію, так і є нелінійним частотнозалежним навантаженням генераторного при

відносній частоті $\Omega = \frac{\hbar f}{2eV_c} \ll 1$. В утвореній коливальній системі,

з кінечною добротністю кожного із контурів, при полосах частот $\Delta f_{дет.} \gg \Delta f_{ген.}$, взаємній разстройці на $\Delta f_{ген.}/2$ відносно $I_{дж. ген.}$, з підвищенням U_{3M} - Ω приближається до 1, що і приводить до появи двох мінімумів δT , тобто двох значень $P_{КС} = P_{опт} = P_{опт} \sim 10^{-10}$ Вт. Вказується, що результати досліджень мають важливе прикладне значення: вказують інтервал допуску $I_{опт}$ на можливу нестабільність потужності УС до $\sim 10\%$ від значення $P_{опт} \sim 10^{-10}$ Вт, визначають вимоги до електрофізичних характеристик переходів - $V_c > 0,7$ мВ, $\gamma \leq 0,002$, використаних в якості джерел КС, і, саме головне для багатоеlementних приймальних джоєфсонівських систем, визна-

чають можливість мінімізації їх чутливості в мм та субмм діапазонах довжин хвиль $U_{\text{ЗМ}}$ на генераторному переході програмним способом. Таким чином показано, що схема радіометра с керованою ВАХ суттєво відрізняється від модуляційної і дозволяє досягти найвищої чутливості детекторного приймача при використанні в ньому ТДП.

Глава 4 присвячена реалізації одержаних результатів радіофізичних досліджень в моделі восьмиканального широкополосного джозефсонівського радіометра на ТДП в режимі з керованою ВАХ. В ній викладені принципи його моделювання, описуються особливості блоків і систем радіометра, приводяться результати досліджень його радіофізичних характеристик.

В розділі 4.1 дається обґрунтування схеми побудови радіометра. Визначається, що це детекторний приймач з керованою ВАХ. В якості джерел керуючого сигналу і сигналу підшумлення використовується ТДП.

В розділі 4.2 приведено опис створеної матричної мікросхеми з планарними антенами, а також конструкція детекторної секції, яка вміщує лінійку із 8 детекторних ТДП, генераторів КС і сигналу підшумлення, виконаних на ТДП.

Розділ 4.3 присвячений вибору та розгляду характеристик тракту каналізації НВЧ сигналу та криогенній системі радіометра. Показано, що вибраний квазіоптичний променевід з фторопластовими лінзами завдовжки 960 мм на частоті 220 ГГц мав втрати $\sim 0,8$ дБ. В якості криогенної системи використовувалась посудина Дьюара КГ 40/45, в якій розміщувався макет восьмиканального радіометричного приймача.

В розділі 4.4 приведена практична схема радіометричного приймача, складеного із криогенного зонду, з НВЧ трактом і блоком попереднього підсилення, та блока радіометричної обробки, вміщуючого інтерфейсну плату зв'язку з ПЕОМ.

Розділ 4.5 включає в себе обговорення питань обробки радіометричних сигналів та їх відображення.

Розділ 4.6 присвячений моделюванню восьмиканального приймача, вивченню процесу побудови образу протяжного джерела сигналу і його температурного контрасту.

В розділі 4.7 приведені результати досліджень радіофізичних характеристик восьмиелементного радіометричного джозефсонівсько-

го приймача: флукуаційна чутливість, частотні полоси прийому каналів, динамічний діапазон, діаграми направленості, перехідного ослаблення між каналами прийому.

В висновку приводяться основні результати роботи.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Розроблені методики:

а) визначення величини потужності НВЧ керуючого сигналу, яка поступає на детекторний ТДП та визначення оптимальної величини придушення критичного струму детекторного переходу;

б) поглинання потужності НВЧ сигналу в КРД з двома ТДП;

г) вимірювання флукуаційної чутливості багатоелементних радіометричних приймачів.

2. Вперше експериментально визначена спектральна щільність низькочастотних шумів ТДП в складі трьохелементної надпровідникової мікросхеми .

3. Вперше на основі експериментальних досліджень взаємодії двох ТДП, включених в тракт НВЧ-детектора, показано можливість їх ефективного використання в схемі радіометра з керуючим сигналом як в якості детектора, так і в якості генератора керуючого сигналу .

4. Експериментально досліджена залежність флукуаційної чутливості радіометра з керуючим сигналом від глибини модуляції, визначеною його потужністю .

5. Вперше досліджена оригінальна модель надпровідникової мікросхеми з трьома ТДП, дозволяюча вести прийом немодульованого НВЧ сигналу одночасно двох ортогональних поляризацій.

6. Вперше вивчені особливості детектування електромагнітного випромінювання субмм діапазону хвиль матричними джозефсонівськими приймальними елементами.

7. Вперше показано, що для побудови матричного криогенного приймача безумовна перевага схеми радіометра з керованою ВАХ,

яка дозволяє досягти фактично граничної чутливості при мінімальних габаритах, вазі та енергоспоживанні.

8. Вперше створено одиночний прийомний канал - криогенний радіометричний датчик, елемент багатоканальної прийомної системи. Досліджені його характеристики в 8 мм діапазоні хвиль. Вперше в радіометричному приймачі детекторного типу для підсилення низькочастотної модулюючої напруги використаний підсилювач низької частоти на СКВІДі постійного струму.

9. Вперше створено макетний зразок восьмиелементного детекторного джозефсонівського радіометра на ТДП з керованою ВАХ в субмм діапазоні довжин хвиль та досліджені його радіофізичні характеристики.

Основні результати опубліковані в роботах:

1. Невзаимное устройство. а.с. N1335094 //Куделя А.М., Красников И.И., Пчелинцев В.Ю.

2. Циркулятор. а.с. N1445490 //Куделя А.М., Пчелинцев В.Ю.

3. Гудков А.Л., Ильин В.А., Куделя А.М. и др. Трехэлементный сверхпроводниковый интегральный модуль//Известия ВУЗов. Радиоэлектроника.- 1995 г., N11. с.74-78.

4. Радиометрический датчик. а.с. N1648174.//Денисов А.Г.,Куделя А.М., Бондарев И.А. 1991.

5. Куделя А.М., Ильин В.А., Денисов А.Г. Исследование собственной генерации торцевых джозефсоновских переходов//Сборник научных трудов НАН Украины.- Сверхпроводниковая электроника и биомагнетизм.- 1994. с. 38-45.

6. Ильин В.А., Куделя А.М., Ларкин С.Ю. Использование торцевых джозефсоновских переходов в радиометре с управляемой ВАХ//Сверхпроводимость: физика, химия, техника.- 1995. Т.8 N1 с.137-141.

7. Куделя А.М., Ильин В.А., Денисов А.Г. Детектирование СВЧ излучения торцевыми джозефсоновскими переходами в режиме с управляющим сигналом//Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1992. №11. С. 65-69.

8. Денисов А.Г., Ильин В.А., Куделя А.М. Исследование характеристик собственной генерации торцевых джоузефсоновских переходов. // Радиотехника и электроника. Т. 41. №4. 1996. С. 457-764.



Підп. до друку 27.06.96. Об'єм 1,2 д. с. Зак. 41. Тир. 50 пр.
Надруковано на фірмі ЧП Лавров, Київ - 252166, пр. Лісний 21

AB

35.388

AB 35.388