

## 4. Електронні пристрої на основі нестационарного ефекту Джозефсона

### 4.1. Джозефсонівський генератор

Коливання джозефсонівського струму при  $V_0 \neq 0$  з частотою  $\omega_d = 2eV_0/\hbar$  можуть бути використані для створення НВЧ генератора з перебудовою частоти. При узгодженні імпедансів ДК  $Z_d$  та лінії передачі  $Z_l$ :

$$Z_d = Z_l, \quad (4.1)$$

максимальна потужність джозефсонівського генератора

$$P_{max} < 1/8 I_0 V_0. \quad (4.2)$$

Знак « < » в (4.2) присутній тому, що енергія постійного струму витрачається не тільки на генерацію частоти  $\omega_d$  – вона виділяється у вигляді теплоти на активному опорі контакту, йде на генерацію вищих гармонік та т. ін.. Практично  $P_{max}$  не буває більшою за  $\sim 0.1 I_0 V_0$ . Оцінка  $P_{max}$  для трохсантиметрового діапазону довжин хвиль ( $V_0 \approx 20$  мкВ) приводить до значення  $P_{max} \sim 10^{-8}$  Вт. Це значення потужності дуже мале й суттєво звужує область застосування джозефсонівських генераторів. На теперішній час отримано експериментально потужність випромінювання з ДК  $\sim 10^{-9}$  Вт у трохсантиметровому діапазоні довжин хвиль при ККД  $\sim 2\%$ .

Із збільшенням частоти генерації згідно з (4.2) вихідна потужність повинна збільшуватись. При  $eV = 2\Delta$ , вона має максимум, а з подальшим збільшенням частоти через руйнування надпровідних пар,  $P_{max}$  прямує до нуля, залишаючись не нульовою аж до довжин хвиль  $\sim 0.1$  мм.

Ще одним доволі значним недоліком джозефсонівських генераторів є велика ширина лінії випромінювання  $\Delta\omega_d$ , обумовлена тим, що при флуктуаційній зміні напруги на ДК, змінюється частота генерації. Аналіз показує (див.[3], с. 103), що

$$\Delta\omega_d = 2 \left( \frac{2\pi}{\Phi_0} \right)^2 R_0 kT \quad (4.3)$$

$$\Delta f_d (\text{МГц}) \cong 40 R_0 (\text{Ом}) T (\text{К}),$$

де  $T$ - температура ДК.

Із (4.3) випливає, що ширина лінії випромінювання перевищує 100 МГц. Існує декілька способів зменшення значення  $\Delta\omega_d$ . Один із них базується на включенні ДК у об'ємний резонатор з добротністю  $Q$ . При цьому, як видно з рис.2.19 (б), на ВАХ з'являються ділянки зі значенням похідної  $dI/dV \rightarrow 0$ . Вибір робочої точки на цій ділянці призводить до мінімального впливу флуктуацій напруги на ДК. При цьому  $\Delta f_d$  зменшується у  $Q^2$  разів і може досягти значень  $\sim 1$  кГц; при цьому однак втрачається одна з найбільших переваг джозефсонівського генератора – можливість електронної перебудови.

Другий спосіб зменшення  $\Delta\omega_d$  полягає у зменшенні активного опору, який є джерелом шумової напруги (див. 4.3), шляхом шунтування контакту опором  $R_u \ll R_0$ . Таке шунтування може бути здійснене ввімкненням ДК у кільце з резистивною ділянкою (див. рис. 4.1). Однією з переваг схеми ввімкнення ДК у резистивне кільце є можливість задання на контакті напруги  $V$ , незалежної від властивостей самого контакту. За допомогою (4.3) легко

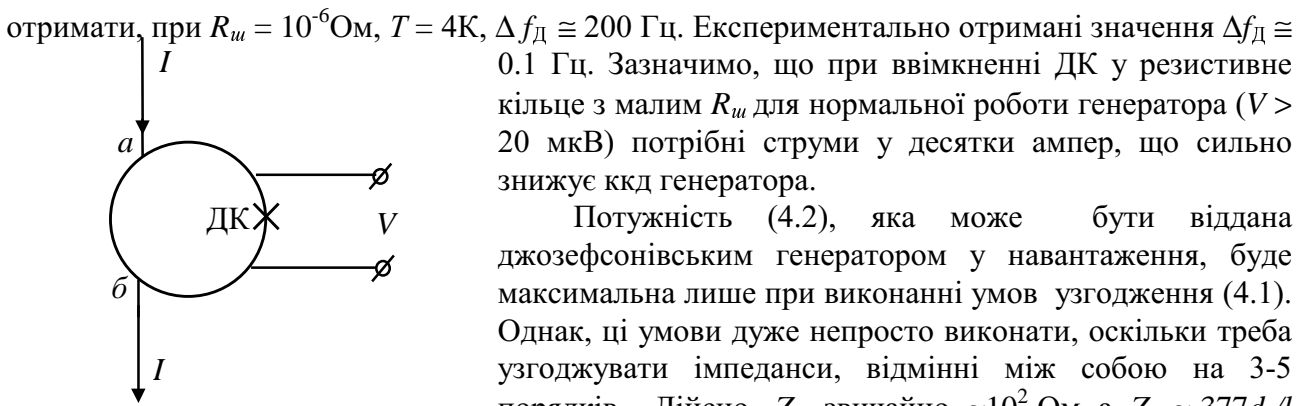


Рис. 4.1. Контакт у резистивному кільці. а,б - ділянка з нормальним опором  $R_{ш} \ll R_0$ .

Потужність (4.2), яка може бути віддана джозефсонівським генератором у навантаження, буде максимальна лише при виконанні умов узгодження (4.1). Однак, ці умови дуже непросто виконати, оскільки треба узгоджувати імпеданси, відмінні між собою на 3-5 порядків. Дійсно,  $Z_{л}$  звичайно  $\approx 10^2$  Ом, а  $Z_{д} \approx 377d/l \approx 10^{-3}$  Ом. Вираз для  $Z_{д}$  приведений для випадку апроксимації ДК мікросмужковою лінією завширшки  $l$  та висотою  $d$ . Узгодження таких різних імпедансів можна виконати за допомогою об'ємних резонаторів. Зв'язок ДК з резонатором може відбуватися як по електричному

полю, так і (у випадку ДК у надпровідному або у резистивному кільці) по магнітному полю. Зв'язок тунельних ДК з лінією передачі або з узгоджувачами резонаторами може відбуватися через один із надпровідних електродів ДК, якщо його товщина менше скін-шару: ККД тут досягає 4%.

Труднощі узгодження призводять до того, що найбільш перспективним є таке використання джозефсонівських генераторів, де не існує випромінювання у лінію передачі, а це випромінювання використовується для самонакачування різних нелінійних ефектів в самому ДК.

Через нелінійність ДК у спектрі генерації присутні, як видно з (2.28), і вищі гармоніки. При цьому амплітуда гармонік із зростанням їх номера  $k$  падає досить повільно (як функція Бесселя  $J_k(V_1/V_0)$ ). При  $k \gg 1$  перший максимум  $\max J_k(x) \approx 0.67 k^{-1/3}$  ( $x \cong k$ ). На сьогодні на ВАХ ДК фіксують сходинки, що відповідають 103-ій гармоніці 72 ГГц. По випромінненню знайдені 2-а та 3-я гармоніки, що були відповідно на два та чотири порядки менш інтенсивні ніж основна гармоніка.

Найбільш радикальним методом боротьби з трьома основними недоліками джозефсонівських генераторів (мала потужність, некогерентність, низький вхідний опір) є використання лінійних ланцюжків або плоских ґраток великого масива сфазованих джозефсонівських генераторів.

Якщо  $N$  - число генераторів, що працюють когерентно, то потужність їх сумарного випроміннення може в  $N^2$  раз перевищувати потужність випроміннення окремого генератора, тому що при цьому складаються не потужності, а амплітуди окремих генераторів. Через взаємну синхронізацію в  $N$  разів буде зменшена шумова ширина лінії випроміннення  $\Delta\omega_{д}$ , у стільки ж разів може зрости сумарний опір джозефсонівських генераторів, що ввімкнені в лінію передачі.

Один з варіантів реалізації лінійного ланцюжка джозефсонівських генераторів зображений на рис. 4.2. На цьому рисунку шість джозефсонівських контактів ввімкнені послідовно в мікросмужкову лінію передічі, за постійним струмом всі контакти ввімкнені паралельно. Для взаємної синхронізації контактів необхідно, щоб кожен з них знаходився у електромагнітному полі, що випромінюється всіма іншими контактами, для чого їх слід, наприклад, розташувати на відстанях, які були б суттєво меншими довжини електромагнітної хвилі або всередині резонатора.

За допомогою ґраток ДК у наш час вже отримані обнадійливі результати. Наприклад, у трьохсантиметровому діапазоні 99 ДК забезпечували потужність  $P \sim 10^{-6}$  Вт при смузі випроміннення  $\Delta f_{д} \sim 20$  кГц. Цей пристрій вже може у деяких випадках використовуватися в

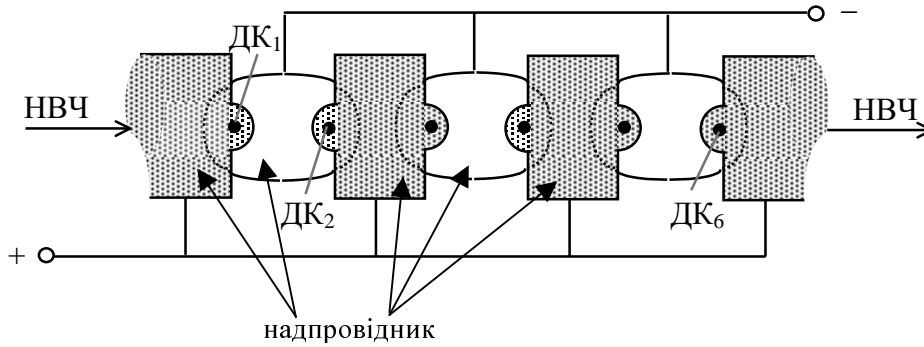


Рис. 4.2. Лінійний ланцюжок 6 джозефсонівських контактів- синхронізованих генераторів НВЧ.

якості гетеродина. У іншому пристрої 500 ДК у діапазоні 400-500 ГГц генерували потужність 50 мВт при шумовій смузі 0,1 – 1 МГц.

На теперішній час вже існують перші вдалі спроби реалізації джозефсонівських генераторів на базі лінійних ланцюжків джозефсонівських контактів на ВТНП. 200 ДК, що створені бікристалічною границею двох ВТНП, генерували потужність до 1 мВт у трьохсантиметровому діапазоні довжин хвиль.

Існує і інший підхід до створення генератора НВЧ на основі ДК. При цьому використовується випромінювання, викликане рухом джозефсонівських вихорів (флюксонів) у довгих тунельних SIS контактах. У цьому випадку один ДК може генерувати потужність ~ 0,1 мкВт у смузі 1 МГц на частотах до 500 ГГц. Вже створений лабораторний макет SIS - змішувача з гетеродином на довгому ДК. Невирішеною проблемою є високі фазові шуми і широка спектральна смуга випромінювання.

#### 4.2. Параметричний підсилювач на основі ДК

У розділі 2.7 було показано, що джозефсонівський контакт має від'ємний опір  $R^-$  на частоті  $\omega > \omega_d$ . Якщо контакт розмістити у резонаторі з добротністю  $Q$ , то при  $|R^-| > R = \omega_0 L / Q$  у резонаторі з'являться коливання на частоті  $\omega_0^*$ . Тут  $\omega_0$  та  $L$ - власна частота та еквівалентна індуктивність резонатора. Якщо  $|R^-| < R$ , то система контакт-резонатор є одночастотним регенеративним підсилювачем на частоту  $\omega_0 > \omega_d$ . Один з експериментальних макетів такого підсилювача працював у 3-х см діапазоні довжин хвиль при температурі  $T=4.2$  К. Він використовував коаксиальний напівхвильовий резонатор з точковим контактом  $Nb-Ta$ , опір якого  $R_0 \sim 1$  Ом, шумова температура одночастотного підсилювача  $T_N \cong 42T$ .

Індуктивність ДК  $L_d$  може змінюватись у часі під дією самонакачки ( $V_0 \neq 0$ ), а також під дією зовнішнього електромагнітного сигналу частоти  $\omega_1$  та амплітуди  $V_1$ . В останньому випадку можна реалізувати параметричний підсилювач із зовнішньою накачкою.

Дійсно, згідно (2.26) та (2.34) при  $V_0=0$ ,  $V_2=0$  маємо:

\*/ Ці коливання називаються "неджозифсонівською" генерацією, вони мають більш широкую лінію випромінювання (~ в 6 раз), ніж джозефсонівська генерація, стабілізована аналогічним об'ємним резонатором.

$$L_D = \hbar / 2eI_0 \cos \varphi$$

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2eV_1}{\hbar\omega_1} \sin \omega_1 t. \quad (4.4)$$

Для стійкої роботи такого підсилювача необхідно, щоб  $L_D$  знаходилась на ділянці позитивних значень або  $|\varphi| < \pi/2$ . Ця вимога накладає обмеження на потужність накачки ( $\sim V_1^2$ ), що призводить до неможливості використання усіх потенціальних можливостей підсилювача. Для усунення цього обмеження ДК включається у надпровідникове кільце з індуктивністю  $L_K$  такою, щоб для всіх  $\varphi$   $L_K^{-1} + L_D^{-1} > 0$ . Такий параметричний підсилювач є, взагалі кажучи, СКВІДом змінного струму і всі міркування, зроблені раніше про шуми СКВІДу, мають місце і зараз. Наприклад, шумова температура підсилювача  $T_N = T\omega_c / \omega_D \ll T$ , де  $\omega_c$ - частота сигналу,  $\omega_c + \omega_x = \omega_1$ ,  $\omega_x$ - частота холостого контуру.

Параметричний підсилювач з самонакачкою ( $V_0 \neq 0$ ) не потребує зовнішнього генератора, накачкою слугує власна джозефсонівська генерація. Але завдяки її немонохроматичності (див. § 4.1) такий підсилювач має значно гірші шумові характеристики ніж підсилювач з зовнішньою накачкою.

### 4.3. Квадратичний детектор

Для створення детектору НВЧ на основі ДК може бути використаний факт зменшення нульової сходинок ВАХ контакту під дією електромагнітного сигналу. Згідно (2.32) величина сходинок (див. рис.4.3)

$$\frac{I_{\pm}}{I_0} \approx j_0 \left( \frac{2eV_c}{\hbar\omega_c} \right) = 1 - \frac{e^2}{\hbar^2\omega_c^2} V_c^2 = 1 - \alpha P, \quad (4.5)$$

де  $V_c$  та  $\omega_c$ - амплітуда та частота сигналу,  $P \sim V_c^2$  - його потужність.

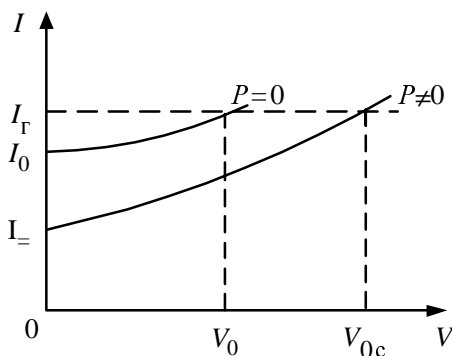


Рис. 4.3. ВАХ ДК з генератором струму  $I_\Gamma$  під дією потужності НВЧ  $P$ .

З рис.4.3 видно, що ВАХ ДК під дією НВЧ потужності  $P$  знижується, у результаті чого, падіння напруги на детекторі збільшується на  $\Delta V = V_{0c} - V_0$ .  $\Delta V$  пропорційне диференційному опору ДК  $dV/dI$ , і, згідно (4.5), квадрату напруги НВЧ (або  $\sim P$ ). У зв'язку з останньою обставиною, даний детектор є квадратичним детектором чи детектором потужності. Апроксимуючи ВАХ на рис.4.2 прямими лініями та вважаючи у відповідності із (4.5)  $I_{\pm}/I_c = 1 - \alpha P$ , легко отримати

$$\Delta V = \frac{dV}{dI} I_0 \alpha P = \eta P, \quad (4.6)$$

де  $\eta$ - вольт-ватна чутливість квадратичного детектору<sup>\*/</sup>. Залежність  $\eta$  від частоти визначається формулою (4.5), згідно з якою  $\eta \sim \omega^{-2}$ , зв'язком з лінією передачі, резонансними властивостями як об'єму, у якому знаходиться ДК, так і самого контакту, величиною щілини надпровідника  $\Delta$ . Чутливість детектора сильно знижується при  $\hbar \omega_c > \Delta$ , однак залишається помітною величиною аж до  $\hbar \omega_c \approx 10\Delta$  (див., наприклад, рис.17.17 в [1]). Похідна  $dV/dI$  також залежить від частоти, вона максимальна поблизу частот  $\omega_c = \frac{m}{n} 2eV_0/\hbar$ , що відповідають сходинкам напруги на ВАХ (див. рис. 2.20). При роботі детектора близько сходинок (селективний режим) чутливість детектора збільшується, однак він стає вузькосмуговим. Шуми детектора, як і у випадку СКВІДу, залежать в основному від активного опору контакту, шумова потужність

$$P_N = V_N / \eta, \quad (4.7)$$

де  $V_N$  визначається формулою (3.20).

На цей час отримані такі характеристики квадратичних детекторів на ДК. Робочі частоти - до  $\sim 1000$  ГГц ( $\lambda = 0.3$  мм). Чутливість  $\eta \approx 10^5$  В/Вт ( $\lambda = 3$  мм). Інерційність -  $10^{-10}$  сек. Еквівалентна шумова потужність  $P_N / (\Delta f)^{1/2} = 3 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $\omega_c/2\pi = 120$  ГГц та  $10^{-14}$  Вт / Гц<sup>1/2</sup> при  $\omega_c/2\pi = 300$  ГГц ( $\lambda = 1$  мм). Теоретично можливе значення  $P_N / (\Delta f)^{1/2} \approx 10^{-17}$  Вт / Гц<sup>1/2</sup> при  $\lambda \cong 3$  мм.

Селективне детектування суттєво звужує полосу детектора, однак виграшу у параметрах тут на сьогодні не отримано:  $\Delta\omega_c/2\pi \sim 300$  МГц,  $\omega_c/2\pi \cong 187$  ГГц,  $P_N/(\Delta f)^{1/2} = 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Практично схема детектора складається з модуляторів падаючого випромінення або робочого струму контакту, що працюють разом з синхронними детекторами, налаштованими на частоту модуляції (див., наприклад, рис. 22.3 в [3]).

#### 4.4. Перетворення коливань за допомогою ДК

Раніше при розгляді ДК під дією електромагнітних коливань була досліджена тільки постійна складова джозефсонівського струму. Змінні складові можуть бути легко проаналізовані за допомогою загального виразу (2.28). Якщо покласти для спрощення  $V_0 = \omega_D = 0$ , то можна записати у явному вигляді декілька доданків з суми (2.28)

<sup>\*/</sup> Згідно з більш точною резистивною моделлю ДК з генератором струму при  $I \cong I_0$ :

$$\Delta V = \frac{I_c^2 \partial V / \partial I}{4I_0 \omega_c^2} \left( \frac{2e}{\hbar} I_0 R_0 \right)^2; \quad \eta = \frac{R_0}{2V_0 \omega_c^2} \left( \frac{2e}{\hbar} I_0 R_0 \right)^2, \quad I_c - \text{амплітуда сигналу.}$$

$$\begin{aligned}
I = I_0 \{ & j_0 \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_1} \right) j_0 \left( \frac{2eV_2}{\hbar\omega_2} \right) \sin \varphi_0 + \\
& + j_1 \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_1} \right) j_{-1} \left( \frac{2eV_2}{\hbar\omega_2} \right) \sin [\varphi_0 + (\omega_2 - \omega_1)t] + \\
& + j_1 \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_1} \right) j_1 \left( \frac{2eV_2}{\hbar\omega_2} \right) \sin [\varphi_0 - (\omega_2 - \omega_1)t] + \\
& + j_1 \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_1} \right) \times j_{-2} \left( \frac{2eV_2}{\hbar\omega_2} \right) \sin [\varphi_0 + (2\omega_2 - \omega_1)t] + \dots \}.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Перший доданок в (4.8) відповідає за вже досліджений ефект (2.32) зменшення постійної складової максимального струму через контакт у присутності електромагнітних полів. Другий доданок описує явище зміщення частоти вниз, у результаті якого струм крізь контакт змінюється з частотою, яка дорівнює різниці частот коливань  $\omega_2 - \omega_1$ , які діють на ДК. Можливість перетворення частоти вгору помітна при дослідженні третього доданку в (4.8). Четвертий доданок описує перетворення частоти донизу за допомогою гармонік падаючого випромінювання. Нагадаємо, що через особливі властивості ДК ефекти перетворення можуть відбуватися з підсиленням сигналу. Всі згадані явища виявлені експериментально й використовуються для створення прийомних пристроїв на ДК. При цьому до контакту підводяться два сигнали: сигнал, що досліджується, на частоті  $\omega_c = \omega_1$  та сигнал гетеродину на частоті  $\omega_r = \omega_2$ . Напруга проміжної частоти, яка знімається з контакту, має частоту  $\omega_n = \omega_r - \omega_c$  у випадку перетворення частоти донизу;  $\omega_n = \omega_r + \omega_c$  у випадку перетворення частоти вгору;  $\omega_n = n\omega_r - \omega_c$  у випадку перетворення частоти вниз на гармоніках гетеродину.

У якості гетеродину може бути використаний як зовнішній генератор, так і власна джоузефсонівська генерація контакту. В останньому випадку потрібна ретельна стабілізація частоти генерації, оскільки всі флуктуації гетеродина переносяться на проміжну частоту, й може так статися, що  $\Delta\omega_d \cong \omega_n$ .

Змішувач на ДК, як і квадратичний детектор, є високочастотним пристроєм, що працює до  $f_c \sim 10^{12}$  Гц. На сьогодні з допомогою ДК зареєстрований сигнал проміжної частоти від лазера на  $\text{CO}_2$  ( $\lambda \sim 10$  мікрон, частота 30 ТГц). Велика нелінійність ДК призводить до того, що вже при міліватних рівнях гетеродина й сигналу стає можливим реєстрування сигналу проміжної частоти при перетворенні частоти донизу на більш ніж сотій гармоніці гетеродину. На точковому  $\text{Nb-Nb}$  контакті була виділена проміжна частота  $f_n = 9$  ГГц при змішуванні частоти сигналів від лазера на парах води ( $f_c \sim 3822$  ГГц) та 401-ої гармоніки гетеродину на клістріні з частотою  $f_r \sim 9.5$  ГГц. Аналогічні досліди проведені з лазером на  $\text{HCN}$  ( $f_c = 891$  ГГц, 964 ГГц). Все це означає, що вже зараз на ДК створені практичні прийомні пристрої для не дуже малих сигналів, що перекривають всю ділянку електромагнітного спектру від інфрачервоного випромінювання до НВЧ-діапазону.

Для прийому гранично малих сигналів безумовно потрібно використати безпосередню взаємодію сигналу з першою гармонікою гетеродину. Для стабілізації ДК при великих потужностях гетеродину, як і у випадку параметричних підсилювачів, слід включати ДК у надпровідне кільце, інакше кажучи, слід використати у якості змішувача високочастотний СКВІД. Для отримання великих напруг проміжної частоти необхідно підвищувати проміжну частоту (див. формулу (3.16)), для чого можна використати режим з перетворенням частоти вгору. Коефіцієнт підсилення перетворення частоти на ДК, як і у випадку квадратичного

детектора, залежить від значення  $dV/dI$ , тобто від вибору робочої точки. Робоча точка береться взагалі поблизу нульової сходинки, де похідна  $dV/dI$  максимальна.

Чутливість приймача із змішувачем залежить від величини шуму, що додається при перетворенні частоти сигналу до проміжної частоти  $\omega_p$ , та звичайно характеризується відповідною шумовою температурою  $T_N$ . Сильна нелінійність ВАХ та наявність в ДК власної генерації створюють умови для перетворення «вниз» по частоті не тільки корисного сигналу, але і множини ВЧ компонент шуму. У результаті, як показує теорія та експеримент,

$T_N$  змішувача на ДК у десятки разів перевищує його фізичну температуру. Частотна область використання змішувачів з ДК складає 30 - 500 ГГц. Для частот  $\sim 100$  ГГц найменше досягнуте значення  $T_N \sim 100$  К. Як квадратичні детектори, так і змішувачі на ДК широко не використовуються. Причиною цього є недостатня стабільність властивостей (при використанні точкового контакту)

Рис. 4.4. Перетворювачі частоти «вгору» на СКВІДі.

$\Gamma_1, \Gamma_2$  – перший та другий гетеродин.

та у підвищеному рівні шуму. Разом з тим вони по своїм властивостям в області від 500 до  $\sim 1000$  ГГц перевищують, напевно, приймачі, що базуються на ефекті Шоткі та одночастинкових тунельних переходах (див. § 6.3).

Практична схема прийомного пристрою з перетворювачем частоти вгору на СКВІДі зображена на рис. 4.4. Сигнал на напівпровідниковому детекторі змішується з коливанням гетеродину й утворюється перша проміжна частота  $f_{p1} = f_{\Gamma 1} - f_c$ . На СКВІДі внаслідок биття  $f_{p1}$  та  $f_{\Gamma 2}$  виникає друга проміжна частота  $f_{p2} = f_{p1} + f_{\Gamma 2}$ , що лежить звичайно у 3-х сантиметровому діапазоні, де існують найбільш чутливі ПВЧ. Схема має еквівалентну потужність шуму  $\sim 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $f_c \sim 100$  ГГц,  $f_{p1} \sim 1$  ГГц,  $f_{p2} \sim 10$  ГГц. При використанні режиму перетворення частоти «вниз» чутливість перетворювачів на ДК того ж порядку, що й квадратичних детекторів.

#### 4.5. Спектрометр та спектроаналізатор на основі ДК

Можливість простої перебудови джозефсонівського генератора робить його зручним пристроєм для використання у спектрометрах та спектроаналізаторах. Ідея спектрометра на основі ДК полягає у наступному. В середині резистивного кільця з ДК чи кільця з двома ДК розміщується речовина, що досліджується, і яка виявляє резонансне поглинання на частоті  $\omega_{рез}$ , після чого знімають ВАХ ДК. При  $\omega_d = \omega_{рез}$  буде існувати сходинка струму, тому що джозефсонівське випромінювання, що знижує ВАХ ДК по осі струмів (див. рис.4.3), буде поглинатись у речовині, у результаті чого, його дія на контакт зменшиться. У практичних схемах спектрометрів для підвищення чутливості знімають не ВАХ, а похідну  $dV/dI$ , на якій більш чітко проглядаються сходинки струму. Можливі також схеми, аналогічні схемі високочастотного СКВІДу, у яких вимірюють не ВАХ контактів, а напругу на контурі проміжної частоти  $\omega_p$ , що пов'язаний зі СКВІДом та збуджується зовнішнім генератором. При  $\omega_d - \omega_p = \omega_{рез}$ ,  $\omega_p - \omega_d = \omega_{рез}$ ,  $\omega_d = \omega_{рез}$  ця напруга буде зменшуватись, тому що частина енергії контура буде поглинатись у речовині. На такій схемі був знайдений ядерний магнітний резонанс на атомах  $C_0^{59}$ , поглинання при цьому становило  $10^{-16}$  Вт.

Поява сходинки на ВАХ контакту, що знаходиться під випромінюванням НВЧ, дає можливість сконструювати спектроаналізатор на основі ДК. Якщо свіувати напругу  $V_0$ , що прикладається до ДК, отримаємо ряд сходинок (або піків на графіку залежності похідної

$dV/dI=f(V_0)$ . По місцезнаходженню та інтенсивності цих піків можна робити висновки про частоту та потужність діючих на ДК випромінювань. Таким чином були проаналізовані сигнали від дуже високочастотних джерел, у тому числі лазерів на парах води. При цьому потрібна була потужність близько декількох міліват. Для створення аналізаторів спектра міліметрового та субміліметрового діапазону з більшою чутливістю можна використовувати перетворювачі частоти донизу на основі ДК з самонакачкою або з накачкою від зовнішнього гетеродину.

#### 4.6. ДК як еталон напруг

Фундаментальне співвідношення (2.12)  $\omega_D=(2e/\hbar)V_0$  для джозефсонівських контактів дозволяє зв'язати напругу на ДК з найбільш точно вимірюваною на сьогодні величиною – частотою. Можливі декілька методів вимірювання  $V_0$  на основі ДК. Один з них базується на вимірюванні частоти випромінювання з контакту. Однак, через некогерентність та слабкість такого випромінювання, цей метод має малу точність. Якщо застосувати способи підвищення монохроматичності випромінювання, то можливі ефекти затягування частоти та зумовлене ними відхилення від залежності (2.12). Інший метод – це фіксація напруги першої сходинки на ВАХ або першого максимуму на залежності  $dI/dV=f(V_0)$  при опроміненні контакту когерентною частотою  $\omega_0$ . Напруга першого максимуму  $V_0=\omega_0\hbar/2e$  залежить лише від стабільності та точності визначення  $\omega_0$ , а не від крутизни першої сходинки, яка визначається шумами ДК. Застосуванням для опромінення контакту високостабільних лазерів та систем послідовно з'єднаних ДК для підвищення  $V_0$ , відносна похибка еталонів напруги на сьогодні доведена до  $\sim 10^{-8}$ .

Джозефсонівський еталон напруги в деяких країнах вже служить стандартом вольт. Наприклад, в США це зроблено в 1972 році, з 1998 р. в джозефсонівському стандарті використовуються 18992 переходи, що дають напругу 10 В.

За допомогою еталону напруги шляхом точного виміру  $\omega_0$  та  $V_0$  вдалось підвищити точність вимірів фундаментальної константи  $e/h$  та всіх пов'язаних з нею фізичних констант.