

6. Надпровідні приймачі випромінювання

6.1. Надпровідні болометри

Раніше нами були розглянуті приймачі випромінювання на ДК. В цьому розділі будуть розглянуті приймачі, що використовують для своєї роботи інші принципи. Найпростіший з них - тонкоплівковий надпровідний болометр - пристрій, робота якого базується на зміні опору плівки при нагріванні її випромінюванням, яке досліджується. Такі приймачі можуть реєструвати практично весь спектр електромагнітних коливань, а також α -частинки та електрони. Однак найбільш перспективне їх використання від міліметрового до інфрачервоного діапазону електромагнітних коливань, де на сьогодні важко створити високочутливі детектори інших видів. Найпростіший болометр являє собою надпровідну фольгу або плівку (з олова, алюмінію, нітриду ніобію, танталу, ВТНП та т.ін.), розміщену у кріостаті, та пристрою, що вимірює опір цієї плівки. Постійна часу болометра τ залежить від теплопередачі між плівкою та рідким гелієм, яка може забезпечуватись, наприклад, мідною шиною, парами гелію та ін. Чим інтенсивніша теплопередача, тим менше τ , однак при цьому менші зміни температури плівки, тобто менше чутливість. Для підвищення чутливості надпровідного болометра необхідно, щоб робоча температура плівки $T \cong T_k$, тому що тут має місце максимум похідної dR/dT . При цьому легко отримати чутливість $dR/dT \sim 10^3$ Ом/град. Зменшення теплоємності при переході у надпровідний стан також сприяє збільшенню чутливості.

У практичних схемах болометрів плівка включається у мостову схему. Для усунення впливу шуму типу $1/f$ ця схема живиться від змінної напруги частотою у декілька кілогерц. При зміні температури плівки міст розбалансовується, на його діагоналі з'являється змінна напруга, яка підсилюється вузькосмуговим підсилювачем та подається на синхронний детектор. Для роботи синхронного детектора випромінювання, що падає на болометр, модулюється частотою 10 Гц, ця ж частота поступає і на синхронний детектор.

Для розділення функцій поглинання електромагнітної енергії та реакції на нагрівання зазвичай використовують складені чутливі елементи, наприклад, на плівку Al наноситься плівка Bi. Поглинання Bi близько до 100% та слабо залежать від частоти, з другого боку, плівка Al має дуже вузький надпровідний перехід - $\Delta T \sim 10^{-3}$ К та забезпечує високий коефіцієнт перетворення.

Для збільшення чутливості чутливий елемент кріпиться до термостата на тонких нейлонових нитках, постійна часу при цьому досягає 10 с.

Шуми надпровідного болометра обумовлені термодинамічними флуктуаціями температури плівки при переносі теплоти від чутливого елемента до термостату, флуктуаціями фонового випромінювання, тепловим джонсонівським шумом плівки, електричними наведеннями, створенням бульбашок гелію. Головна причина - термодинамічні флуктуації, вона перевищує тепловий шум плівки, викликаний активним опором плівки R . Звичайно R має величину до декількох десятків кілоом. Флуктуації випромінювання усуваються застосуванням охолоджуваних фільтрів. В цьому випадку порогова чутливість болометра $P_n \cong (4kT^2G)^{1/2}$, де G - коефіцієнт теплового зв'язку чутливого елемента з термостатом. Стала часу визначається співвідношенням: $\tau = C/G$, де C - теплоємність. З урахуванням цього $P_n \sim \tau^{-1}$, що підтверджує наведені вище якісні висновки.

Зараз створені болометри з $P_n \sim 10^{-12} - 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} - зі сталою часу $\tau \sim 10^{-1} - 10^{-4}$ с. Чутливість складеного болометра, про який згадувалося вище, досягає $3 \cdot 10^{-15}$ Вт при частоті модуляції 2 Гц. Для підвищення швидкодії болометра (що приводить до втрати чутливості) збільшується коефіцієнт теплового зв'язку плівки з термостатом, чи вона занурюється

безпосередньо в рідкий гелій чи азот, що забезпечує ефективний відвід тепла від неї. Стала часу таких болометрів зменшується до $10^{-5}-10^{-10}$ с, а $P_n \sim 10^{-2}-10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}.

Теоретична межа чутливості $\sim 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2}. Еквівалентна потужність шуму, наближена до теоретичної межі - $(1,7 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2}, $\tau = 83$ мсек.), отримана на надпровідному болометрі з джозефсонівським контактом.

6.2. Плівкові детектори випромінення

Випромінення, що поглинається у плівці приводить до виникнення високочастотних струмів. За рахунок нелінійності ВАХ плівки (див. розділ 5.4) ці струми будуть продетектовані і на плівці з'явиться різниця потенціалів. Вважаючи, що частоти $\omega \ll \omega_{\text{гр}}$, для аналізу плівкового детектора випромінювання можна скористатися виразом (5.15). У цьому випадку ВАХ плівки симетрична і для отримання ефекту детектування необхідно пропустити крізь плівку постійний струм зміщення $I_{\text{зм}}$. Під дією високочастотного струму $I \cos \omega t$ та струму зміщення на кінцях плівки з'являється постійна різниця потенціалів $\Delta U = A I_{\text{зм}} I^2$, де A -константа, яку можна визначити користуючись виразом (5.15). На відміну від надпровідного болометра плівковий детектор має короткохвильовий поріг $\omega \sim \omega_{\text{гр}}$, але може працювати у широкій області температур T , хоч і має максимальну чутливість знов при $T \rightarrow T_{\text{к}}$. Стала часу детектора τ визначається тільки електричними параметрами плівки - її індуктивністю та опором. Ось чому постійна часу детектора легко досягає значення $\tau \sim 10^{-8}$ с і менше.

Вихідна напруга детектору збільшується із зростанням струму зміщення $I_{\text{зм}}$. Існує оптимальна величина струму зміщення, що визначається як чутливістю детектора, так і відсутністю теплових перевантажень, які приводять до нестійкої роботи детектора. Для різноманітних конструкцій детекторів значення $I_{\text{зм}}$ суттєво відрізняються (від сотень мікроампер до десятків міліампер), однак воно завжди достатньо велике, щоб привести до значного зростання шумів типу $1/f$ у порівнянні з випадком надпровідного болометра. Експериментально показано, що на частотах, менших 100 кГц, шум типу $1/f$ у плівкових детекторах є домінуючим. Для усунення впливу цього шуму необхідно модулювати падаюче на детектор випромінення з частотою більше 100 кГц. У цьому випадку шумові характеристики плівкового детектору близькі до шумових характеристик надпровідних болометрів.

6.3. SIS - прилади

У розділі 2.3 був розглянутий один з можливих процесів тунелювання нормальних електронів з поглинанням фотонів (див. рис.2.10). Цей процес може бути використаний для детектування електромагнітного випромінювання, прилади на основі цього ефекту зветься SIS^{*/} - приладами. ВАХ SIS - переходу зображена на рис. 2.10 (б), в спрощеному вигляді цей графік при $T > 0$ повторено на рис. 6.1, V_0 - робоча напруга, що прикладена до контакту. З рис.6.1 добре видно, що під дією НВЧ випромінення струм через контакти змінюється на величину ΔI . Звернемо увагу на квантовий характер роботи SIS - приладів. Це особливо зрозуміло із розгляду тунелювання з участю фотонів при $T=0$ (див. рис.2.10). Наприклад, при $V = \frac{2\Delta}{e} - \frac{h\omega}{e}$ за відсутності випромінення струму немає взагалі; лише присутність випромінення з частотою більшою за ω приводить до його появи. Згідно рис. 2.10 (а), при поглинанні кожного фотону виникає один електрон провідності. Звідси зрозуміло, що

^{*/} SIS - superconductor - insulator - superconductor.

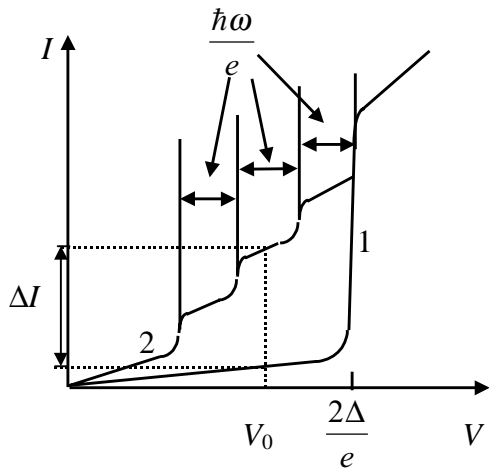


Рис.6.1. ВАХ SIS - переходу при $T>0$: крива 1 - без дії НВЧ, крива 2 - під дією НВЧ з частотою ω .

величина вихідного струму ΔI буде пропорційна числу фотонів, що були поглинені, тобто пропорційна потужності падаючого випромінення. Граничне значення відгуку відповідає квантовій границі $\hbar\omega/e$. Порогова чутливість P_n такого детектора обмежується шумом струму зміщення. В квантовій границі P_n пропорційна кореню квадратному від числа фотонів, які були поглинені за час, що відповідає зворотній ширині смуги детектора, і які викликають зміну струму в детекторі, що дорівнює середньому шумовому струмові. Досягнуте значення $P_n=2,6 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2} для частоти 36 ГГц близьке до квантової границі і є найкращим для детекторів міліметрового діапазону. Частотний діапазон SIS - детекторів

досягає зараз ~ 1000 ГГц, величина відгуку при цьому також близька до квантової границі. На рис. 6.2 наведено порівняння різного типу детекторів міліметрового діапазону довжин хвиль.

У випадку низьких частот $\hbar\omega < \delta V$, де δV - ширина області зростання струму поблизу $\frac{2\Delta}{e}$ (див. рис. 2.10 та 6.1) відгук SIS - детектора пропорційний крутизні ВАХ, як і у звичайних напівпровідникових приладів. Завдяки сильній нелінійності і в даному випадку параметри детектора близькі до граничних.

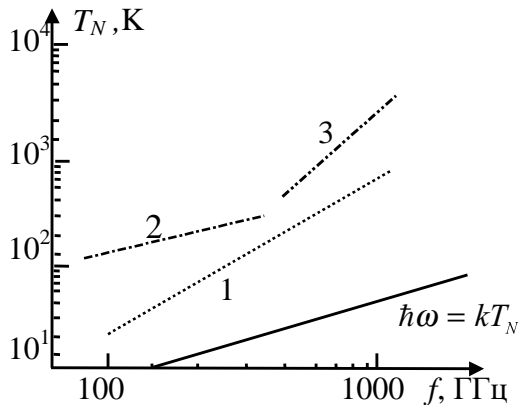


Рис.6.2. Шумова температура T_N детекторів міліметрового діапазону: 1 - SIS -змішувач, 2- змішувач на НТНП ДК, 3- змішувач на діоді Шоттки та НТНП болометр (див.§ 6.1).

Різка нелінійність ВАХ переходів SIS використовується для створення змішувачів міліметрового діапазону. Спочатку SIS - перехід використовувався тільки як нелінійний опір за схемою звичайного класичного змішувача. У цьому випадку для тунельного переходу Рб (Ві) були отримані втрати перетворення (~ 2 дБ), а шумова температура складала 3 ± 4 К (на частоті 36 ГГц). Пізніше теоретично та експериментально було показано, що в результаті процесу тунелювання з поглинанням фотонів падаючого випромінення, що відбувається в SIS, $\hbar\omega > \delta V$, вихідний імпеданс може приймати дуже великі значення і навіть стає від'ємним (див. на рис. 2.10 (б) ділянки ВАХ, що спадають). Подібні ефекти спостерігаються при зміщенні, яке

трохи менше за $\frac{2\Delta}{e}$, і в цьому випадку перетворення сигналу може відбуватися з підсиленням. Реалізація великих підсилень на практиці приводить до нестійкої роботи приймача. Тому найбільш вигідним виявився режим роботи з таким підсиленням, при якому шумова температура підсилювача проміжної частоти, що перерахована до змішувача, відповідає рівню шумової температури змішувача T_N . В такому режимі на SIS з олова з ВАХ з великою крутизною при підсиленні ~ 4 дБ вдалося досягнути значення $T_N=9 \pm 6$ К для

частоти 36 ГГц. Змішувачі на SIS отримали широке розповсюдження в спектроскопії, астрономії, біології та медицині, частотна область їх використання - 30- 300 ГГц. Значення T_N близьке до квантової границі $\hbar\omega / k$ і по цьому параметру SIS змішувачі переважають і змішувачі на основі джозефсонівських переходів, і на основі діодів Шоттки. За своєю чутливістю вони досягають рівня мазерів, разом з тим вони є більш високочастотні та широкополосні, ніж останні. Частотний діапазон SIS змішувачів з боку високих частот обмежується шунтуючою дією власної ємності переходу та зростанням внеску джозефсонівського шуму із збільшенням частоти. Для підвищення робочих частот є перспективним використання ВТНП, які мають більшу критичну температуру та величину 2Δ .

SIS - контакти є перспективними для створення трьохполюсних підсилювальних електронних приладів - аналогів напівпровідникових транзисторів. Один з таких приладів^{**/} та його вольт-амперна характеристика зображені на рис. 6.3. ВАХ на рис. 6.3.(б) обумовлені впливом ефектів нерівноважної надпровідності - при інжекції нормальних електронів в

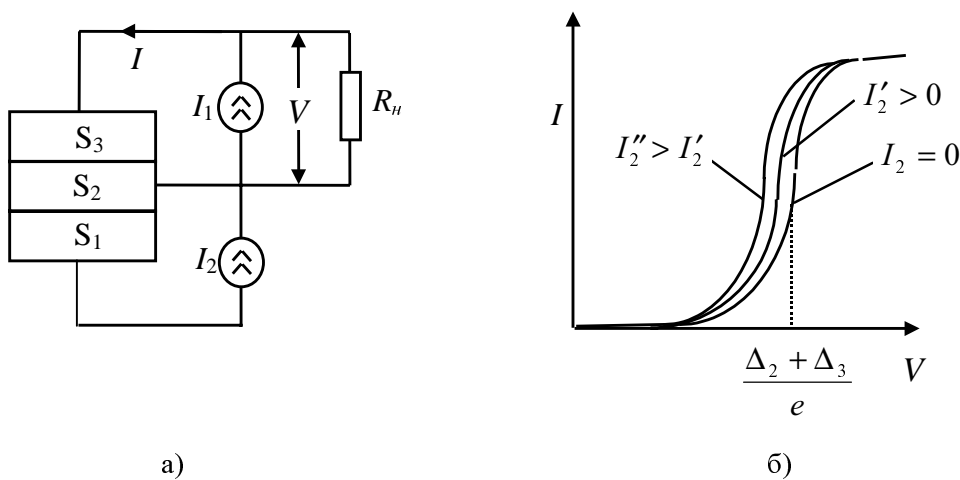


Рис. 6.3. Квітерон; принципіальна схема (а) та ВАХ переходу S_2 - S_3 при $I_2=0$ та $I_2 \neq 0$. S_1 , S_2 , S_3 - надпровідники, які відокремлені один від одного тунельними контактами, прозорими для квазічастинок; R_n - опір навантаження; Δ_2 , Δ_3 - ширина забороненої зони відповідно напровідників S_2 , S_3 .

надпровідник величина його забороненої зони зменшується через те, що зростає число нормальних електронів, що є еквівалентним зростанню еквівалентної електронної температури. Таким чином при інжекції електронів із напровідника S_1 в S_2 ширина забороненої зони останнього зменшується і границя стрибка струму $(\Delta_1 + \Delta_2) / e$ зміщується в бік менших напруг V . Таким чином при наявності вхідного струму $I_2 \neq 0$ вихідна напруга V буде зменшуватися - як і в транзисторі, тут має місце інверсія вихідного сигналу. При цьому досягнуто підсилення у декілька децибел, постійна часу 0,3 нс, витрати енергії в $\sim 10^3$ раз менші, ніж це вимагається для напівпровідникового транзистора.

^{**/} Цей прилад отримав назву квітерон - *quasiparticle-injection tunneling effect*.