



УКРАЇНА

(19) UA (11) 16620 (13) U
(51) МПК (2006)
G01R 27/04МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ІМПЕДАНСУ НАДПРОВІДНИКІВ

1

2

(21) u200602036

(22) 24.02.2006

(24) 15.08.2006

(46) 15.08.2006, Бюл. № 8, 2006 р.

(72) Баранник Олександр Анатолійович, Буняєв Сергій Олександрович, Прокопенко Юрій Володимирович, Філіпов Юрій Федорович, Черпак Микола Тимофійович

(73) ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ
ІМ. О.Я. УСИКОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ

(57) Пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу надпровідників, що містить квазіоптичний діелектричний резонатор, виконаний у вигляді тіла обертання, основа якого розташована на поверхні надпровідника, та пов'язаний з мікрохвильовим генератором та приймачем за допомогою діелектричних хвильоводів, який **відрізняється** тим, що твірна тіла обертання не паралельна осі його обертання, а дотичні до твірної у будь-якій її точці складають з основою кут, не більший 90° .

Корисна модель, що пропонується, належить до галузі мікрохвильової техніки для визначення поверхневого імпедансу надпровідників у мікрохвильовому, зокрема, міліметровому діапазоні хвиль та може застосовуватися в тих галузях народного господарства та науки, де мікрохвильові властивості надпровідників є основними та/або обумовлюють характеристики мікрохвильових приладів. Він може застосовуватися також для вимірювання мікрохвильових властивостей нормальних провідників та для безконтактного моніторингу їх провідності.

Вимірювання поверхневого імпедансу $Z_s = R_s + iX_s$ є технічною задачею для визначення мікрохвильових властивостей надпровідників, а також науково-дослідною задачею визначення поверхневого опору R_s та поверхневого реактансу X_s зазначених матеріалів. Вимірювання поверхневого опору R_s надпровідників становить складну задачу, тому що ця величина є дуже малою. Наприклад, навіть у 8 мм діапазоні при температурі рідкого азоту (77K) для плівки високотемпературного надпровідника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ $= 5-7$ мОм. При зниженні частоти R_s зменшується пропорційно квадрату частоти. На відміну від нормальних провідників з нормальним скін-ефектом для надпровідників поверхневий реактанс не дорівнює поверхневому опору і його треба вимірювати також [Менде Ф.Ф., Спицын А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников // Киев: Наукова думка, 1985, 240с.].

Для вимірювання та дослідження імпедансних властивостей надпровідників у мікрохвильовому діапазоні найчастіше використовуються резонансні методи. При цьому вимірюються величини добротності та резонансні частоти резонатора без зразка та з ним. Відмінність відомих методів полягає лише в типах резонаторів, що використовуються, формах зразків, способах їх розміщення в резонаторах, методиці досліджень [Zhi-Yuan Shen. High-Temperature Superconducting Microwave Circuits. - Boston-London.: Artech House, 1994. 272p.]. Як правило, одні і ті ж резонатори використовуються для вимірювання R_s і X_s . Найважливішими характеристиками всіх способів вимірювання імпедансних властивостей є їх точність та чуттєвість. Обидві характеристики залежать від того, яку частину від загальних втрат в резонаторі складають втрати енергії в надпровіднику. Останні дуже малі порівняно з втратами в нормальних металах, тому останні бажано виключити зовсім.

З цією метою для розробки техніки вимірювання мікрохвильового поверхневого опору було запропоновано використовувати циліндричні діелектричні резонатори з об'ємними коливаннями нижчих типів, у яких торцевими стінками були надпровідні плівки на діелектричних підкладках (субстратах) [Mazierska J. and Wilker Ch. Accuracy Issues in Surface Resistance Measurements of High Temperature Superconductors using Dielectric Resonator (Corrected), IEEE Trans. Appl. Superconduct. - 2001. - Vol.11, №4. - P.4140-4147]. Перевагою такого пристрою є те, що електроди-

(13) U
(11) 16620
(19) UA

намічна задача стосовно цього резонатора розв'язується прямо і процес вимірювання не потребує калібрування за відомими зразками. Важливо також, що резонатор можна виготовити із діелектрика з дуже малими втратами, тобто з малим тангенсом втрат (наприклад, для сапфіру при $T=77\text{K}$ у 8мм діапазоні хвиль $\text{tg}\delta \leq 10^{-5}$), що забезпечує високу точність та чуттєвість вимірювань).

Основним недоліком відомого пристрою є необхідність вимірювання двох плівок. Тобто в даному випадку вимірюється величина, яка є середньою для двох зразків надпровідника, що знижує точність вимірювання.

Недоліком є також практична неможливість використати діелектричний резонатор з нижчими типами коливань у міліметровому діапазоні через надмірне зменшення розмірів резонатора і пов'язану з цим трудність ефективного зв'язку резонатора з лініями передачі, що додатково зменшує точність та чуттєвість способу вимірювання.

Найбільш близьким по технічній суті аналогом (прототипом) є пристрій для вимірювання поверхневого мікрохвильового імпедансу плівок високотемпературних надпровідників [Cherpak N.T., Barannik A.A., Prokopenko Yu.V., Filipov Yu.F., Vitusevich S. Accurate Microwave Technique of Surface Resistance Measurement of Large-area HTS Films using Sapphire Quasioptical Resonator // IEEE Trans. on Appl. Supercond. - 2003. -Vol.13, №2, - P.3570-3573]. Цей пристрій має квазіоптичний діелектричний резонатор, виконаний у формі тіла обертання - циліндра, основу якого розміщено на поверхні надпровідника. Оскільки циліндричний резонатор має дві основи, то обидві основи стикаються з надпровідниками, тобто створюється сандвіч із двох надпровідників - плоских плівок, між якими знаходиться діелектричний циліндричний диск. Резонатор зв'язується з мікрохвильовими генератором та приймачем за допомогою діелектричних хвильоводів. У резонаторі збуджується хвиля типу шепочучої галереї, які є азимутальними хвилями вищого порядку, що дає змогу збільшити розміри резонатора у міліметровому діапазоні, а використання діелектричних хвильоводів допомогло підвищити ефективність збудження резонатора. Сама геометрія резонатора допускає послідовний розв'язок електродинамічної задачі на основі рівнянь Максвелла. Пристрій допускає вимірювання також температурної залежності поверхневого реактансу плівок надпровідників [Cherpak N.T., Barannik A.A., Prokopenko Yu.V., Vitusevich S. Microwave impedance characterization of large-area HTS films: novel approach, Superconductivity Science and Technology, vol.17, №7, p.899-903, 2004].

Перевагою цього пристрою є можливість проведення імпедансних вимірювань надпровідників у широкому діапазоні мікрохвильових частот, включаючи міліметровий діапазон.

Недоліком цього пристрою є необхідність використовувати дві плівки в одному акті вимірювання. У цьому випадку для вимірювання індивідуальних мікрохвильових характеристик треба провести цілий цикл із трьох вимірювань різних пар, складених із трьох різних плівок [процедура

"round robin", див. вище Zhi-Yuan Shen. High-Temperature Superconducting Microwave Circuits. - Boston-London.: Artech House, 1994. 272p.], що дуже непрактично.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити відомий пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу надпровідників шляхом зведення кількості вимірювань до одного, що дозволить підвищити точність вимірювань індивідуальних характеристик надпровідникових матеріалів.

Поставлена задача вирішується тим, що у пристрої для вимірювання поверхневого імпедансу надпровідників, що містить квазіоптичний діелектричний резонатор, виконаний у вигляді тіла обертання, основа якого розташована на поверхні надпровідника, та пов'язаний з мікрохвильовим генератором та приймачем за допомогою діелектричних хвильоводів, згідно корисній моделі тірна тіла обертання не паралельна осі його обертання, а дотичні до твірної у будь-якій її точці складають з основою кут, не більший 90° .

Суть корисної моделі пояснюють ілюстрації: на Фіг.1 зображено схему пристрою для вимірювання імпедансних властивостей надпровідників; на Фіг.2 показано резонатор у пристрої-прототипі; на Фіг.3-5 показано геометрію трьох резонаторів - тіл обертання, що відповідають зазначеній вимозі залишатися високодобротними з однією плівкою надпровідника.

Запропонований пристрій для вимірювання мікрохвильового поверхневого імпедансу містить у собі діелектричний резонатор 1, виконаний у вигляді тіла обертання, основа якого розташована на поверхні надпровідника 2 (плівка на підкладці 3). Діелектричні хвильоводи 4 з одного боку закриті узгодженими навантаженнями 5, а з іншого - під'єднані до генератора 6 та приймача 7. Діаметр тіла обертання вибраний таким чином, щоб по периметру основи тіла укладалося задане число довжин хвиль (>10). Для виготовлення резонатора слід вибирати матеріал з малими діелектричними втратами (лейкосапфір, високоомний кремній, алмаз та інші). Як видно із Фіг.3, твірна тіла обертання може бути дугою, що утворює півкулю, відрізком прямої лінії, що утворює зрізаний конус (Фіг.4), дугою зі спряженою прямою, що утворює "сплюснену каплю" (Фіг.5). Така форма тіла обертання забезпечує малі радіаційні втрати та належну ефективність взаємодії мікрохвильового поля з надпровідником.

Запропонований пристрій працює таким чином: у діелектричному резонаторі 1 дзеркальними діелектричними хвильоводами збуджуються хвилі шепочучої галереї. Спектр резонансних частот резонатора вимірюється по схемі "на проходження" при слабкому зв'язку резонатора з хвильоводами. При цьому вимірюється добротність Q , після чого визначається поверхневий опір згідно з виразом

$$R_S = \frac{1}{A_S} (Q^{-1} - k \text{tg} \delta)$$

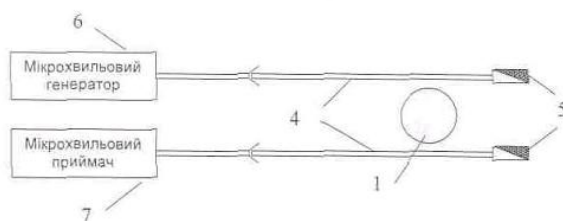
де k і A_S обчислюються, а $\text{tg} \delta$ вимірюється попередньо. Зокрема, коефіцієнт k дуже близький до 1, а коефіцієнт A_S зараз обчислюється аналітичне

тільки для півкулі, в інших випадках для обчислення цих коефіцієнтів можна використати сучасні комерційні програмні продукти (наприклад, Microwave studio), призначені для розрахунку мікрохвильових структур.

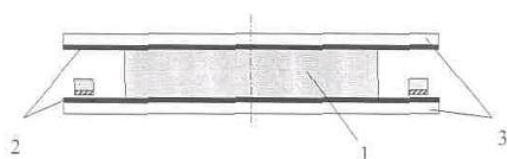
Для визначення температурної залежності поверхневого реактансу вимірюються температурні залежності частоти резонатора з нормальним металом, який характеризується нормальним скін-ефектом, та частоти резонатора з надпровідником. Вимірюється також температурна залежність R_s нормального провідника. Ці дані дозволяють отримати залежність $\Delta X_s(T)$. При можливості проводити вимірювання у широкому температурному інтервалі можна також визначити і абсолютне значення поверхневого реактансу, застосовуючи відомі теоретичні моделі поверхневого імпедансу,

та зіставляючи їх з експериментальними залежностями $\Delta X_s(T)$.

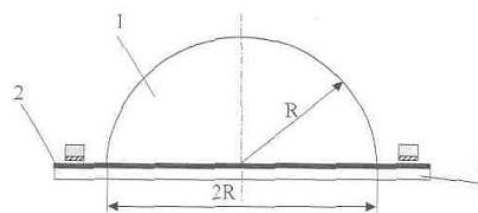
Запропонований пристрій для вимірювання імпедансних властивостей надпровідників було змодельовано, використовуючи тефлоновий резонатор у формі півкулі та зрізаного конусу в діапазоні частот 35-40 ГГц. Діаметр основи дорівнював 78 мм. Кут α зрізаного конусу (висота дорівнювала 39 мм) зменшувався від 0 до 30°. Вимірювалися резонансні частоти та добротність. Пристрій випробуваний на добре відомих провідниках (мідь, титан). Визначалися $\tan \delta$ тефлона та коефіцієнт A_s для півкулі, а також A_s в залежності від кута α для конуса. Отримано результати по поверхневому опору, добре узгоджені із довідниковими даними.



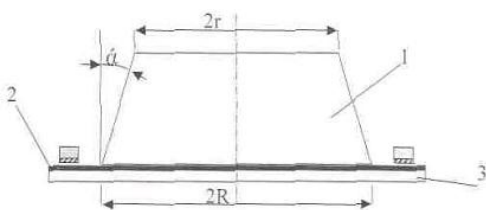
Фіг. 1



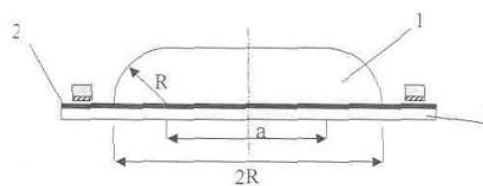
Фіг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4



Фіг. 5