



УКРАЇНА

(19) UA (11) 47061 (13) U
(51) МПК (2009)
G01R 27/26МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНДЕНСОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

1

2

(21) u200908893

(22) 26.08.2009

(24) 11.01.2010

(46) 11.01.2010, Бюл.№ 1, 2010 р.

(72) ГУБІН ОЛЕКСІЙ ІВАНОВИЧ, ЛАВРИНОВИЧ
ОЛЕКСАНДР АНТОНОВИЧ, ТАРАБАН СЕРГІЙ
ІГОРОВИЧ, ЧЕРПАК МИКОЛА ТИМОФІЙОВИЧ(73) ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ
ІМ. О.Я. УСИКОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ(57) Пристрій для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища, що містить прямокутний хвилевід з фланцем, який має зріз під кутом α до його широкої стінки, мікрохвильовий генератор та приймач, який **відрізняється** тим, що на фланці з боку гострого кута зрізу хвилеводу уздовж його широкої стінки на відстані l виконана канавка глибиною d і шириною w , причому $l+d+w < \lambda_v/4$, де λ_v - довжина хвилі в хвилеводі.

Корисна модель належить до галузі мікрохвильової техніки (надвисокі частоти - НВЧ), а саме, до вимірювальної техніки, де потрібно визначати характеристики конденсованого середовища, які обумовлюють його якість при застосуванні у різних галузях народного господарства, науки та медицини.

В даний час активно розвивається мікрохвильова техніка в таких напрямках як космічний зв'язок і дистанційне зондування, а також мобільний зв'язок, де зростаюче застосування знаходять пристрої на основі матеріалів з високотемпературних надпровідників (ВТНП), які надають нові можливості і перспективи в розробці ефективних пристроїв і радіофізичних підсистем. Низькі втрати, широка смуга, низький рівень шумів, швидкісні характеристики, обумовлені надпровідністю, досить привабливі для досягнення високих технічних характеристик відповідних пристроїв [Hein M. High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies. - Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999. - 394p.]. Однією з основних фізичних характеристик, знання якої визначає співвідношення полів на поверхні провідника, і яка застосовується при вивченні можливостей практичного використання різного роду ліній передачі і резонансних систем, є поверхневий імпеданс Z_s . Поверхневий імпеданс є комплексною величиною $Z_s = R_s + iX_s$, де R_s - поверхневий опір, який визначає втрати енергії електромагнітної хвилі при відбиванні від надпровідника. Уявна частина поверхневого імпедансу (реактанс) X_s , визначає недисипативну енергію, що запасається в поверхнево-му шарі надпровідника. Z_s пов'язаний з

комплексною провідністю виразом $Z_s = (i\omega\mu_0/\sigma_1 - i\sigma_2)^{1/2}$, де σ_1 - дійсна та σ_2 - уявна компоненти провідності, які можна записати наступним чином

$$\sigma_1 = 2\omega\mu_0 R_s X_s / (R_s^2 + X_s^2), \quad \sigma_2 = \omega\mu_0 (X_s^2 - R_s^2) / (R_s^2 + X_s^2).$$

Для нормального стану ВТНП (коли $T \geq T_c$) $R_s(T) = X_s(T) = (\omega\mu_0/2\sigma_n(T))^{1/2}$, $\sigma_n \equiv \sigma_1 (T \geq T_c)$, $\sigma_2 = 0$. Вимірювання температурних залежностей $Z_s(T)$ у абсолютних одиницях, що дозволяє визначати $\sigma_s(T)$, є експериментальною перевіркою будь-якої теорії як феноменологічної, так і макроскопічної, яка описує електромагнітні властивості надпровідника [Vendik I.B., Vendik O.G., Karpakov D. High Temperature Superconductor Devices for Microwave Signal Processing. Part I, Superconducting Microwave Circuits. - СПб.: ТОО „Складень“, 1997. - 135 с.].

Відомо, що при температурі рідкого азоту ВТНП мають значно менші значення поверхневого імпедансу, ніж традиційні матеріали мікроелектроніки. А це означає, що аж до певних високих частот використання надпровідникових плівок може радикально понизити втрати корисного сигналу. Через різну частотну залежність поверхневого опору для нормально провідних матеріалів ($R_s \sim f^{1/2}$) і надпровідників ($R_s \sim f^2$) цей вигравш можна отримати тільки на частотах, що лежать нижче області перетину цих залежностей, зокрема для ВТНП - нижче -150 ГГц. Цей діапазон частот охоплює практично весь робочий діапазон частот сучасної НВЧ мікроелектроніки. Таким чином, в надпровідному (S) стані різні пристрої на основі надпровідних плівок матимуть значні переваги в

(19) UA (11) 47061 (13) U

порівнянні з традиційними з погляду втрат енергії корисного сигналу. [Черпак Н.Т., Величко А.В. Високотемпературные сверхпроводники в микроволновой технике. //Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 2000.- №4.- С.3-47].

Вивчення мікрохвильових властивостей різних матеріалів, включаючи високотемпературні надпровідники (ВТНП), має важливе значення як при дослідженні їх фізичних особливостей, так і при створенні пристроїв на їх основі. Для цього використовують різні підходи і методи [Zhi-Yuan Shen. High-Temperature Superconducting Microwave Circuits. -Boston-London.: Artech House, 1994. - 272p.; Менде Ф.Ф., Спицын А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. - К.: Наукова думка, 1985. - 240с.; Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматгиз, 1963.- 404с.].

Відомий пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу зразків ВТНП [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]. В його основу покладено використання діелектричного резонатора Хаккі-Колемана на низьких типах коливань TE_{011} . Резонатором Хаккі-Колемана є діелектричний диск, затиснутий парою провідних площин, в якому збуджуються об'ємні типи коливань. Замість діелектрика використовується сапфір як матеріал з найменшими втратами. Оскільки електромагнітна енергія в основному зосереджена всередині діелектричного диска, то радіаційними втратами можна знехтувати. Одною з важливих переваг такого пристрою є те, що радіаційні втрати в резонаторі малі. Це обумовлено тим, що основна частина електромагнітної енергії уздовж радіального напрямку відбивається від межі повітря-діелектрик. Невелика частина енергії, яка знаходиться поза діелектриком, спадає по експоненціальному закону. Таким чином, при виборі діелектрика з достатньо великою діелектричною проникністю і розміру ВТНП зразків набагато більше діаметра діелектричного циліндра, радіаційними втратами можна нехтувати. Також слід відзначити і те, що пристрій надає можливість не застосовувати процедуру калібрування, тобто вимірювання є прямими.

До недоліків такого пристрою слід віднести необхідність використання двох ВТНП зразків, при цьому вимірювання дають усереднене значення R_s двох ВТНП зразків. Для використання даного пристрою в міліметровому діапазоні виникають труднощі, обумовлені малими розмірами резонатора, а також зниженням ефективності зв'язку при збудженні резонатора традиційними методами. Вказані обставини приводять до того, що підхід, в основу якого положено резонатор Хаккі-Колемана, може використовуватися в частотному діапазоні до 24 ГГц, тобто в класичному мікрохвильовому діапазоні.

Відомий пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу, в якому було розширено частотний діапазон до міліметрових хвиль [N.T. Cherpak,

A.A. Barannik, Yu.V. Prokopenko et al. 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]. Шляхом застосування квазіоптичних сапфірових резонаторів у формі диска підвищено точність та чутливість приладу для вимірювання поверхневого опору надпровідників.

До недоліків такого пристрою слід віднести необхідність застосовувати для вимірювання двох плівок ВТНП.

Відомий пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу [Баранник О.О., Буняєв С.О., Прокopenko Ю.В., Філіпов Ю.Ф., Черпак М.Т., Пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу надпровідників //Патент на корисну модель №16620, Бюл. №8, 2006]. На основі використання квазіоптичних сапфірових резонаторів у формі тіл обертання на плоскій основі та з твірною з кутом нахилу до основи меншим за 90° немає потреби в використанні двох зразків при вимірюванні.

До недоліків такого пристрою слід віднести різке зниження чутливості при переході надпровідника у нормальний стан, складність у багатьох випадках обробки результатів вимірювання, а також робота, як правило, на одній резонансній частоті. Ці недоліки можна віднести до загальних недоліків резонаторних методів дослідження матеріалів.

Відомий пристрій для вимірювання поверхневого імпедансу [Wu P.H. and Min Q. Calculations of the microwave conductivity of high- T_c superconducting thin films from power transmission measurements //J. Appl. Phys. - 1992 - V. 71. - P. 5550-5553]. В його основу покладено використання нерезонансної техніки, заснованої на вимірюванні мікрохвильової потужності, що пройшла через ВТНП плівку.

До недоліків слід віднести те, що для вимірювання можуть використовуватися тільки тонкі зразки (порядка 10 нм для ВТНП), які розміщені в поперечному перетині хвильоводу. Для товстіших плівки і об'ємних зразків з великою провідністю σ , розташованих перпендикулярно поздовжній осі хвильоводу, коефіцієнт віддзеркалення, близький до одиниці, і змінюється незначно при зміні їх мікрохвильової провідності навіть у великих межах. Внаслідок цього перехід ВТНП із нормального стану в надпровідний слабо відбивається на температурній залежності коефіцієнту відбиття $\Gamma = |\Gamma_e|^{1/2}$.

Найближчим по своєму технічному рішенняу є пристрій, в основу якого покладено використання падіння електромагнітної хвилі на поверхню досліджуваного зразка під ковзними кутами, що надає можливість отримати підвищення чутливості коефіцієнту відбиття до змінювання провідності товстих плівки на порядок і більше [Губин А.И., Лавринович А.А., Черпак Н.Т. Микроволновое отражение ВТН П образцов в волноводных Е-структурах //Письма в ЖТФ - 2001 - т.27, вып.8 - С.64-67] порівняно з випадком, коли плівка розташована перпендикулярно відносно напрямку поширення хвилі у хвильоводі та коли коефіцієнт відбиття мало змінюється при змінюванні їх мікрохвильової провід-

ності навіть у великих межах. В пристрої використовувався хвилевід перерізом 5.2×2.6 мм. Зміни відбивальної здібності $|\Gamma|^2$ і фази ψ коефіцієнта відбиття вимірювалися при зміні температури досліджуваного зразка в інтервалі 77-300K з застосуванням фазового моста. Вимірювання виконувалися при орієнтації зразка у хвилеводі відносно напрямку поширення хвилі в ньому під кутом $\theta = 80^\circ$. Знайдено, що фактор збільшення чутливості $|\Gamma|$ до зміни провідності зразка досягає 6. Результати вимірювання фази та амплітуди коефіцієнта відбиття використовуються для визначення поверхневого імпедансу Z_s або комплексної діелектричної функції ϵ , в залежності від зовнішніх умов (температура, магнітне поле та інше).

До недоліків слід віднести те, що на фланці хвилевода, на якому розташовується досліджуваний зразок, між поверхнею фланця та зразком, вздовж хвилевода (де має місце гострий кут $90^\circ - \theta$ і велика концентрація електромагнітного поля) утворюється мікроканал, який призводить до втрат енергії поля та зниженню чутливості пристрою.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення пристрою для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища шляхом підвищення ефективності взаємодії електромагнітної хвилі з досліджуваним зразком, розташованим в площині електричного поля під ковзним кутом до напрямку поширення хвилі, що забезпечить надійність та розширення діапазону його використання.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища, який складається із хвилеводу з фланцем, який має зріз під кутом α до його широкої стінки, мікрохвильовий генератор та приймач, згідно корисної моделі, на фланці з боку гострого кута зрізу хвилеводу уздовж його широкої стінки на відстані l виконана канавка глибиною d і шириною w , причому $l+d+w < \lambda_w/4$, де λ_w - довжина хвилі в хвилеводі.

Суть корисної моделі пояснюється ілюстраціями:

на Фіг.1 зображено пристрій для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища з канавкою;

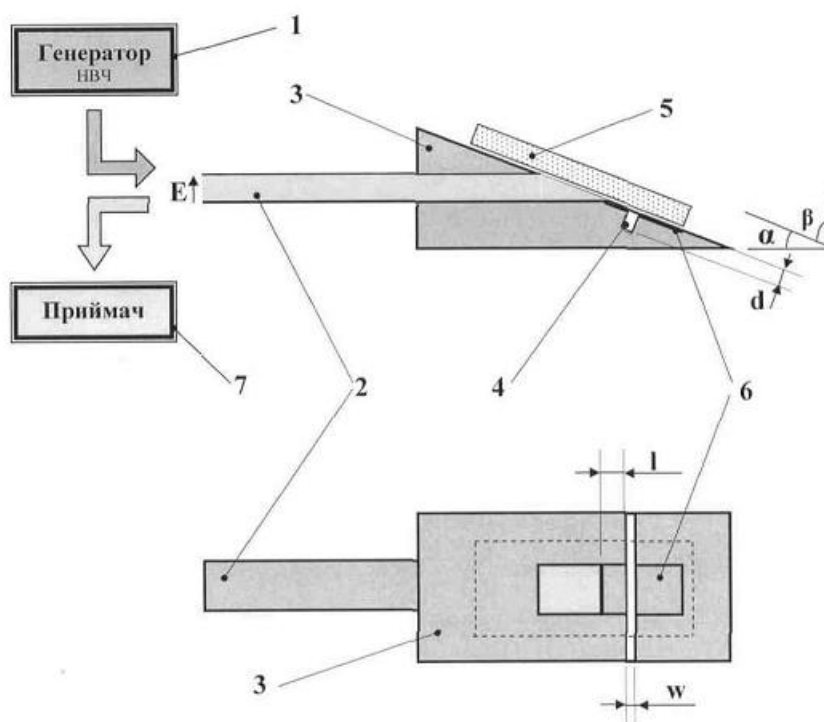
на Фіг.2 наведено частотну залежність коефіцієнта відбиття зразка від розмірів канавки.

Запропонований пристрій для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища містить в собі генератор НВЧ 1, лінію передачі у вигляді прямокутного хвилеводу 2, в якому поширюється хвиля основного типу H_{10} , який має зріз під кутом α до широкої стінки хвилеводу, фланець 3, канавку 4, виконану на фланці з

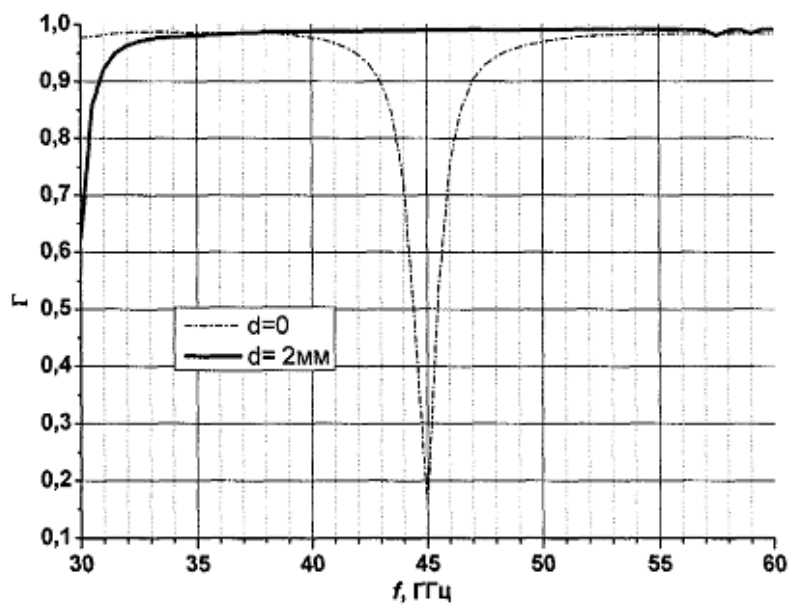
боку гострого кута зрізу хвилеводу уздовж його широкої стінки на відстані l , глибиною d і шириною w , причому $l+d+w < \lambda_w/4$, де λ_w - довжина хвилі в хвилеводі, досліджуваний зразок 5 та приймач 7.

Запропонований пристрій працює таким чином: в прямокутному хвилеводі 2 розповсюджується хвиля H_{10} типу, яка взаємодіє з досліджуваним зразком 5, розташованим на фланці 3. Частина хвилі після відбиття від досліджуваного зразка 5 повертається назад, а частина попадає до мікроканалу 6, який утворюється недосконалістю поверхонь фланця 3 і досліджуваного зразка 5, де розповсюджується по ньому і після відбиття від канавки 4 повертається у хвилевід 2. Причому, для повернення хвилі з мікроканалу 6 до хвилеводу 2 має виконуватися умова для канавки $l+d+w < \lambda_w/4$. В іншому випадку, хвиля поширюється по мікроканалу 6 і попадає у вільний простір, що означає появу паразитних втрат мікрохвильової енергії.

Запропонований пристрій для вимірювання мікрохвильових властивостей конденсованого середовища було досліджено у широкому діапазоні частот (30-60 ГГц). Проведено розрахунки частотної залежності коефіцієнта відбиття $\Gamma(f)$ від розмірів канавки 4 (Фіг.2). Як зразок матеріалу для вимірювання використовувалася мідь. Показано, що за відсутності канавки 4 частотна залежність коефіцієнта відбиття має резонанс, який спостерігається на частоті 45 ГГц, пов'язаний з розміром мікроканалу 6, висота якого не перевищує 10 мкм. При розмірах канавки $w = 0.3$ мм та $d = 2$ мм резонанс зникає і коефіцієнт відбиття Γ у смузі пропускання хвилеводу дорівнює 1. Таким чином, при зазначених умовах спостерігається практично сто відсоткове повернення електромагнітної хвилі H_{10} , після її взаємодії з досліджуваним зразком 5, до хвилеводу 1 і приймача 7. Теоретичні розрахунки було підтверджено експериментальними дослідженнями, в яких використовувалися зразки матеріалів з різним коефіцієнтом відбиття Γ . Це - мідь, чавун та ВТНП. Дослідження проводилися на частоті 41 ГГц при температурі 300 К. Показано, що, дійсно, умови виникнення резонансів для різних матеріалів різні, тобто вони залежать не тільки від розмірів мікроканалу, а і від провідності зразків. Використання запропонованої канавки 4 призводить до того, що резонанс зникає, тобто частотна залежність коефіцієнта відбиття Γ стає монотонною у всьому діапазоні дослідження. Таким чином, застосування канавки 4, виконаної на фланці 3 з боку гострого кута зрізу хвилеводу уздовж його широкої стінки, підвищує точність вимірювань, а з ним і чутливість при дослідженні різних матеріалів у широкому температурному та частотному діапазонах.



Фиг. 1



Фиг. 2