



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 48208

(13) C2

(51) 6 G01R21/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ШИРОКОСМУЖНИЙ ДАТЧИК ПРОХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ НВЧ

1

2

(21) 98073447

(22) 01 07 1998

(24) 15 08 2002

(46) 15 08 2002, Бюл. № 8, 2002 р.

(72) Волков Володимир Михайлович, Бортнік  
Сергій Олександрович, Жуков Сергій  
Александрович, RU(73) ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ,  
АКЦІОНЕРНОЄ ОБЩЕСТВО ЗАКРИТОГО ТІПА  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННИЙ КОМПЛЕКС НА-  
УЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА  
ДАЛЬНЕЙ РАДИОСВЯЗИ, RU(56) Авт. свид. СССР № 531403, М. кл. G01R  
21/04, 1995Авт. свид. СССР № 1750371, М. кл. G01R 21/04,  
1995

RU № 94014804, М. кл. G01R 21/04, 1995

Измерения в электронике, Справочник/В. А. Кузнецов,  
В. А. Долгов, В. М. Коневских и др., Под ред.  
В. А. Кузнецова - Энергоатомиздат, 1987 г. с. 142-  
147, 167-168, 178

В. Д. Кукуш, И. К. Овчинников, Я. П. Цар, В. С. Жилков, В. Ф. Пасечник, М. К. Соболев, В. М. Волков. Измеритель отклонений уровня мощности на основе балансного статического калориметра. Вопросы радиоэлектроники. Серия "Радиоизмерительная техника", 1966, вып. 2, с. 104-112.

(57) Широкополосный датчик проходной мощности НВЧ, який містить відрізок коаксимальної лінії з поглинаючою стінкою і батареєю термодпар, який відрізняється тим, що поглинаюча стінка має композитну структуру у вигляді поглинаючого і екрануючого шарів з теплопровідним діелектриком між ними, при цьому поглинаючий шар, повернений в порожнину відрізка коаксимальної лінії, має товщину меншу, ніж глибина скин-шару в робочій смузі частот і виконаний з металу з питомою електропровідністю  $10^4 - 10^6$  См/м, а екрануючий шар, повернений назовні відрізка коаксимальної лінії, має товщину більшу, ніж глибина скин-шару в робочій смузі частот і виконаний з металу з питомою електропровідністю  $10^7 - 10^9$  См/м, при цьому батарея термодпар виконана плівковою і розміщена на зовнішній поверхні поглинаючого шару.

Винахід відноситься до вимірювальної техніки надвисоких частот (НВЧ) і може бути застосований для контролю режиму порожнистої коаксимальної лінії передачі великої і надвеликої потужності у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль як крапковий датчик для комплексних вимірювань проходної потужності, модуля і фази коефіцієнта відбиття і як протяжний датчик проходної потужності у сантиметровому діапазоні в різних радіоелектронних установках великої потужності у прискорювачах заряджених часток, в радіолокаційних, навігаційних та зв'язкових станціях, установках НВЧ нагрівання та сушіння, випробувальних стендах електронних НВЧ приладів.

Відомий термодпарний напівпровідниковий датчик (Измерения в электронике, справочник /В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Коневских и др., Под ред. В. А. Кузнецова - Энергоатомиздат, 1987 г. - 512с. ил. с. с. 142 - 147, 167 - 168, 178).

Датчик являє собою вмонтовану через подовжувач в циліндричний корпус з зовнішньою різьбою об'ємну циліндричну термодпару з нанесенням на її кінець поглинаючим електромагнітну енергію елементом у вигляді шару. Під час укручування датчика в стінку хвильоводу, поглинаючий елемент занурюється у нього і нагрівається. Різниця температур між поглинаючим елементом і корпусом датчика обумовлює виникнення термоерс, котра пропорційна потужності НВЧ у перерізі хвильоводу, де встановлено датчик.

Термодпарні датчики мають низьку чутливість, невеликий динамічний та частотний діапазони, недостатню швидкість, низьку електричну міцність через те, що являють собою неоднорідність в хвильоводі.

Найбільш близьким до заявленого за сукупністю ознак є датчик проходної потужності (В. Д. Кукуш, И. К. Овчинников, Я. П. Цар, В. С. Жилков, В. Ф. Пасечник, М. К. Соболев, В. М. Волков. Измеритель

(13) C2

(11) 48208

(19) UA

отклонений уровня мощности на основе балансного статического калориметра. Вопросы радиоэлектроники. Серия "Радиоизмерительная техника, 1986, вып 2, с 104 - 112). Датчик, який представляє собою прохідну калориметричну секцію (с 107, мал 5), котра складається з двох ідентичних відрізків коаксіальної лінії - високочастотного, який має вхідний і вихідний рознімач для ввімкнення в НВЧ тракт, та компенсаційного. Зовнішні провідники цих відрізків виконані з поглинаючого матеріалу (поглинаючої стінки) - пермалоевої стрічки НМ-79 завтовшки 0,02мм. Частина потужності, що проходить через секцію, поглинається та викликає нагрівання зовнішнього провідника. Різниця температур між секціями фіксується батареєю термопар. На високочастотному і компенсаційному відрізках встановлюються спіралі підігрівачів, необхідних для проведення калібрівки на постійному струмі та досягнення балансу системи. В діапазоні частот затухання, як вказано в статті (с 110, мал 8) сильно змінюється, що призводить до великої похибки вимірювань - до  $\pm 35\%$  в діапазоні октави (с 111). Останні дослідження (В.М. Волков, С.А. Бортник. Затухание в двухслойной поглощающей стенке //Межвед. сб. Радиотехника. 1997, вып 104 с 20 - 28) показують, що затухання в порожнистих коаксіальних лініях з хвилею типу TEM пропорційне квадратному корню з частоти, що не дозволяє створювати широкосмужні датчики без додаткової частотної корекції.

В основу винаходу поставлена задача створення широкосмужного датчика прохідної потужності НВЧ, нове конструктивне виконання якого з двох металевих шарів з діелектричним прошарком поміж ними дозволяє розширити робочу область частот без корекції коефіцієнта передачі, а також забезпечує високі швидкодю, електричну та теплову міцність. Такий технічний результат може бути досягнений, якщо в широкосмужному датчику прохідної потужності НВЧ, що містить відрізок коаксіальної лінії з поглинаючою стінкою і батареєю термопар, згідно з винаходом, поглинаюча стінка має композитну структуру у вигляді поглинаючого та екрануючого шарів з теплопровідним діелектриком поміж ними, при цьому поглинаючий шар, звернений в порожнину коаксіальної лінії, має товщину меншу, ніж глибина скин-шару в робочій смузі частот і виконаний з металу з питомою провідністю  $10^4 - 10^6 \text{ См/м}$ , а екрануючий шар, звернений в зовнішній бік хвилеводу, має товщину більшу ніж глибина скин-шару в робочій смузі частот і виконаний з металу з питомою провідністю  $10^7 - 10^8 \text{ См/м}$ , при цьому батарея термопар виконана плівковою і встановлена на поверхні екрануючого шару. Така конструкція датчика дозволяє розширити робочу смугу частот від сантиметрового до метрового діапазону довжин хвиль без корекції коефіцієнта перетворення, а також забезпечує високі швидкодю (до часток секунди), електричну (до сотень кіловат) та теплову (до  $100 - 150^\circ\text{C}$ ) міцність. На фіг 1 представлена конструкція широкосмужного датчика прохідної потужності НВЧ у розрізі, на фіг 2 наведена залежність температури

нагрівання двохшарової поглинаючої стінки від частоти.

Датчик містить відрізок коаксіальної лінії 1 з поглинаючою стінкою 2, яка складається з поглинаючого 3 і екрануючого 4 шарів, з теплопровідним діелектриком 5 між ними. На поверхні екрануючого шару 4 розміщена батарея плівкових термопар 6. Несучою основою датчика є екрануючий шар 4, виконаний у стінці зовнішнього провідника коаксіальної лінії 1 за допомогою електроерозійного або механічного зняття частини стінки з зовнішнього боку до декількох десятків мікрметрів, або впаювання тонкої металічної фольги  $10 - 50 \text{ мкм}$  у вирізане вікно зовнішнього провідника лінії. На внутрішній поверхні екрануючого шару 4 розміщується діелектричний шар 5 -  $10 \text{ мкм}$  завтовшки з поліімідної плівки, або слюди. На діелектричний прошарок 5 наноситься поглинаючий шар 3, який наприклад вакуумним, плазмовим або клеєвим способом. У якості поглинаючого шару 3 можуть бути використані нікель, ніхром, константан, або інший метал з питомою провідністю  $10^4 - 10^6 \text{ См/м}$ . Плівкова батарея термопар може бути виконана з сурьми та вісмуту. Екрануючий шар 4 може виконуватись з металу з питомою провідністю  $10^4 - 10^6 \text{ См/м}$ , наприклад з міді, срібла, платини. Для зняття термоерс використовуються контактні площадки з виводами 7 "Гарячі" спай 8 термопар 6 розташовані на середині екрануючого шару 4, а "холодні" 9 - в зоні його периферії.

Датчик працює наступним чином. Частина електромагнітної енергії, яка розповсюджується в коаксіальній лінії 1, проникає в поглинаючий шар 3, розсіюється в ньому і нагріває його. Не дивлячись на те, що товщина поглинаючого шару 3 менша глибини скин-шару, за межі коаксіальної лінії 1 електромагнітне поле практично не проникає. Це пояснюється сильним відбиттям плоскої електромагнітної хвилі, що розповсюджується в поглинаючому шарі 3. Ця хвиля спрямована на зовні коаксіальної лінії перпендикулярно її осі і відбивається від межі розподілу середовищ метал-діелектрик та діелектрик-метал. У відповідності з формулою Хагена-Рубенса (Борн М., Вольф Е. Основы оптики М. "Наука", 1970 г. - 855 с.) при нормальному падінні плоскої електромагнітної хвилі на різку межу розподілу середовищ від неї відбивається більше 99,96% усієї електромагнітної енергії хвилі.

$$\mathcal{R} = 1 - \sqrt{\frac{4 \times \mu_0 \sigma}{\pi \times f}} \quad (1)$$

де  $\mathcal{R}$  - відбиваюча здібність металу у відносних частках електромагнітної енергії,

$\sigma$  - питома електропровідність металу,

$\mu_0$  - відносна магнітна проникність вільного простору,

$f$  - частота.

Так, наприклад, на частоті  $1 \text{ ГГц}$  для міді ( $\sigma = 5,98 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ )  $\mathcal{R} = 0,9997$ , а для константану ( $\sigma = 1,98 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ )  $\mathcal{R} = 0,9999$ .

Складові електромагнітного поля в поглинаючому шарі можна записати наступним чином

$$E_{zd} = -\frac{\pi \times \sqrt{\epsilon_0} \cdot F_e(r) + F_m(r)}{2\pi \sqrt{b} r}, \quad (2)$$

$$H_{\phi l} = \frac{I}{2\pi \sqrt{b} r} \frac{F_e(r) - F_m(r)}{F}, \quad (3)$$

$$F_e(r) = (H_0^{(2)}(\beta c) + \frac{\beta}{\sqrt{\epsilon_0}} H_1^{(2)}(\beta c)) e^{-\sqrt{\epsilon_0}(c-r)},$$

$$F_m(r) = (H_0^{(2)}(\beta c) - \frac{\beta}{\sqrt{\epsilon_0}} H_1^{(2)}(\beta c)) e^{-\sqrt{\epsilon_0}(c-r)},$$

$$F = F_e(b) - F_m(b),$$

$H_0^{(2)}$  и  $H_1^{(2)}$  – функції Ханкеля другого роду нульового і першого порядку,

$$q = \sqrt{\omega \mu_0 \sigma}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} - \text{хвильове число},$$

$c$  - зовнішній радіус поглинаючого шару,

$b$  - внутрішній радіус поглинаючого шару,

$\omega$  - циклічна частота,

$\epsilon_0, \epsilon$  - відносна діелектрична проникність

При цьому функція  $F_e(r)$  характеризує падаючу на межу розподілу середовищ складову електромагнітної хвилі, а  $F_m(r)$  - відбиту від неї складову. При цьому вектор Пойтінга в порожнині коаксальної лінії спрямований уздовж осі лінії, а в поглинаючому шарі - перпендикулярно осі лінії передачі.

За рахунок забезпечення доброї теплопровідності між поглинаючим 3 і екрануючим шарами останній нагрівається, збуджуючи термоерс в батареї плівкових термопар, розташований на його зовнішній поверхні. Ця термоерс пропорційна прохідній в навантаження потужності. Коефіцієнт перетворення датчика визначається температурним полем в поглинаючому шарі 3, оскільки нагрівання екрануючого шару повністю визначається нагріванням поглинаючого шару 3. Формули для приросту температури в поглинаючому  $T_1$  і екрануючому  $T_2$  шарах мають вигляд

$$T_1(x, y, z, t) = \frac{16 W_1}{\pi^2 k_1} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{S_{1ij}(x, t) \sin \frac{(2i-1)\pi x}{d} \sin \frac{(2j-1)\pi y}{\ell}}{(2i-1)(2j-1)}, \quad (4)$$

$$T_2(x, y, z, t) = \frac{16 W_1}{\pi^2 k_2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{S_{2ij}(x, t) \sin \frac{(2i-1)\pi x}{d} \sin \frac{(2j-1)\pi y}{\ell}}{(2i-1)(2j-1)}, \quad (5)$$

де  $W_1$  - об'ємна щільність джерел теплоти в

поглинаючому шарі 4,

$k_1$  - коефіцієнт теплопровідності поглинаючого шару,

$d$  - ширина поглинаючої стінки,

$\ell$  - її довжина

Значення коефіцієнта перетворення обчислюється із відношення температури нагрівання поглинаючої стінки до потужності, що передається лінією передачі. Частотна залежність коефіцієнту перетворення датчика визначається, головним чином, товщиною поглинаючого шару 4 - чим менша товщина шару, тим менша залежність коефіцієнта перетворення від частоти. Товщина екрануючого шару на частотну залежність коефіцієнту перетворення практично не впливає. Залежність температури нагрівання двохшарової поглинаючої стінки від частоти при різних товщинах константного поглинаючого шару 4 і товщини 50 мкм мідиного екрануючого шару 3 вказана на фіг. 2.

Якщо товщина поглинаючого шару 4 не перевищує глибини скин-шару в межах робочого діапазону частот (товщина поглинаючої стінки  $\delta = 10$  мкм, глибина скин-шару константану на частоті  $f = 1200$  МГц  $\Delta_s = 10,3$  мкм, глибина скин-шару константану на частоті  $f = 50$  МГц  $\Delta_s = 50,6$  мкм), тоді перепад температури в діапазоні частот 50 - 1200 МГц не перевищує 7%, коли ж товщина більше скин-шару, тоді перепад температури в цьому діапазоні частот становить 1,8 - 4,5 разів (при  $\delta = 20$  мкм і  $\delta = 50$  мкм) (див. фіг. 2). Стала часу датчика може бути оцінена із виразу

$$\tau_{q1} = \frac{1}{\chi_2(\mu_1 + \nu_1)} \left( 1 + \frac{k_1 \delta_1}{k_2 \delta_2} \left( \frac{\chi_2}{\chi_1} - 1 \right) \right), \quad (6)$$

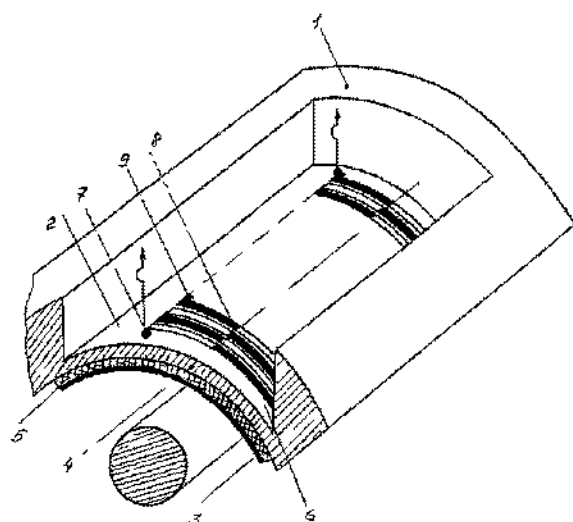
де  $\chi_1, \chi_2$  - коефіцієнти теплопровідності поглинаючого і екрануючого шарів відповідно,

$k_1, k_2$  - їх коефіцієнти теплопровідності,

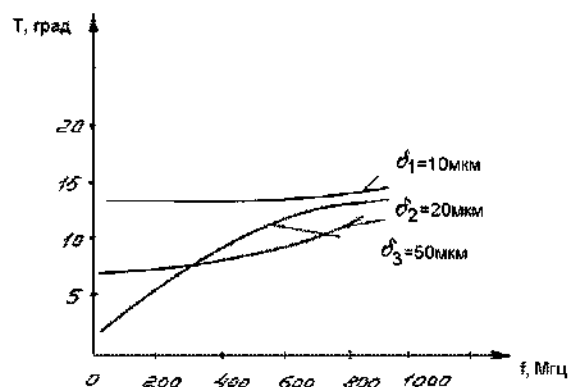
$\delta_1, \delta_2$  - їх товщини,

$$\mu_i = \frac{i\pi}{d}; \quad \nu_j = \frac{j\pi}{\ell}.$$

Як видно із (5) - стала часу датчика визначається розмірами поглинаючої стінки - довжиною, шириною та товщиною, а також теплофізичними параметрами матеріалу поглинаючої стінки і складає частки секунди.



Фиг. 1



Фиг. 2

ДП «Український інститут промислової власності» (Укрпатент)  
вул. Сим'ї Хохлових, 15, м. Київ, 04119, Україна  
(044) 456 – 20 – 90

ТОВ «Міжнародний науковий комітет»  
вул. Артема, 77, м. Київ, 04050, Україна  
(044) 216 – 32 – 71