

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **241253**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **426610**

(22) Data zgłoszenia: **08.08.2018**

(51) Int.Cl.

**G01R 27/00 (2006.01)**

**G01R 27/26 (2006.01)**

---

(54) **Szerokopasmowa metoda pomiaru stałej dielektrycznej cienkich  
podłoży dielektrycznych**

---

(43) Zgłoszenie ogłoszono:  
**10.02.2020 BUP 04/20**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:  
**29.08.2022 WUP 35/22**

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**PIOTR SŁOBODZIAN, Mirków, PL**

**KRZYSZTOF SZOSTAK, Nowa Ruda, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzec. pat. Bartosz Kuriata**

---

**PL 241253 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest szerokopasmowa metoda pomiaru stałej dielektrycznej cienkich podłoży dielektrycznych, przeznaczona do wyznaczania stałej dielektrycznej w szerokim paśmie częstotliwości mikrofalowych.

Metody pomiaru materiału dielektryka w zakresie w. cz. dzielą się na metody rezonansowe (np. rezonatory, wnęki rezonansowe) i nierezonansowe (np. sondy pola bliskiego, linie transmisyjne zwarte na końcu, planarne linie transmisyjne). Metody rezonansowe, polegające na analizie przesunięcia częstotliwości rezonansowej, pozwalają na uzyskanie najdokładniejszych wyników pomiaru stałej dielektrycznej, szczególnie dla materiałów małostratnych, jednak wymagają zwykle precyzyjnego przygotowania geometrii badanej próbki, skomplikowanych układów pomiarowych i przeznaczone są do pomiaru na konkretnych częstotliwościach. Metody nierezonansowe, a w szczególności te bazujące na planarnych strukturach mikropaskowych, do których należy również metoda będąca przedmiotem niniejszego zastrzeżenia patentowego, bazują na pomiarze parametrów transmisyjnych/odbiciowych układu. Wykorzystują linie mikropaskowe i wymagają co najmniej dwóch następujących po sobie pomiarów parametrów rozproszonych (S). Ponadto, cechują się wysoką prostotą implementacji, niewielkim kosztem wykonania badania oraz znacznie mniejszymi wymaganiami w związku z przygotowaniem próbki w stosunku do metod rezonansowych.

Z publikacji: N. Das, S. Voda, and D. Pozar, „Two methods for the measurement of substrate dielectric constant”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 35, no. 7, pp. 636–642, Jul. 1987 oraz M. Q. Lee, S. Nam, „An Accurate Broadband Measurement of Substrate Dielectric Constant”, *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 168–170, Apr. 1996, znana jest metoda dwóch linii, zwana również metodą różnicowej fazy, która wykorzystuje pomiar parametrów S (konfiguracja dwuwrotnika) dwóch mikropaskowych linii transmisyjnych znacznie różniących się długością. Obie linie transmisyjne wykonuje się z jednego fragmentu testowanego materiału. Można również wykorzystać pojedynczą linię mikropaskową, jednak wymaga się, aby została ona skrócona po każdym następującym po sobie pomiarze. Metoda dwóch linii należy do metod samokalibrujących, co w jej wypadku oznacza, że wyeliminowany zostaje efekt niedopasowania impedancyjnego układu i nieciągłości wprowadzonych przez złącza pomiarowe. Metoda różnicowej fazy jest podatna na błędy związane z powtarzalnością montażu złączy pomiarowych oraz ze zbyt małą różnicą długości pomiędzy mierzonymi liniami mikropaskowymi.

Z publikacji: P. M. Narayanan, „Microstrip Transmission Line Method for Broadband Permittivity Measurement of Dielectric Substrates”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 11, pp. 2784–2790, Nov. 2014, znana jest metoda pomiaru dielektryka z wykorzystaniem pojedynczej linii mikropaskowej. Zasada działania metody opiera się na pomiarze parametrów S w konfiguracji dwuwrotnika dla układu, w którym na linię mikropaskową stawia się w równych odległościach trzy specjalnie przygotowane przeszkody. Z punktu widzenia stanowiska pomiarowego jest to bardzo wygodne podejście. Z drugiej jednak strony omawiana metoda jest bardzo wrażliwa na błędy związane z dokładnością pozycjonowania przeszkód i rosnącą wartością stałej dielektrycznej w funkcji częstotliwości. Co więcej, metoda nie nadaje się do opisu stałej dielektrycznej dla częstotliwości  $< 4$  GHz, a akceptowalną dokładność pomiaru osiąga się dopiero przy wcześniejszej przybliżonej znajomości stałej dielektrycznej materiału podłoża. Kolejna niedogodność metody wynika z konieczności użycia linii mikropaskowej o impedancji  $50 \Omega$ , co również wymaga wcześniejszej znajomości stałej dielektrycznej materiału podłoża.

Ze zgłoszenia patentowego CN104407232 (A) znana jest rezonansowa metoda pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej materiału dielektrycznego. System pomiarowy opiera się na wykorzystaniu koncentrycznej wnęki rezonansowej typu otwartego oraz stroika wielkości sprzężenia elektromagnetycznego. W procesie ekstrakcji zespolonej przenikalności elektrycznej wykorzystuje się teorię perturbacji wnęki rezonansowej.

Ze zgłoszenia patentowego US5744970 (A) znana jest inna rezonansowa metoda pomiaru przenikalności elektrycznej materiału dielektrycznego. System pomiarowy składa się z wnęki rezonansowej wypełnionej badanym materiałem, która pobudzana jest z użyciem sondy koncentrycznej. Na zewnątrz wnęki znajduje się zmienna reaktancja w postaci liniowego stroika, służąca do przestrajania rezonansu wnęki. Szukaną przenikalność elektryczną określa się, mierząc długość stroika wykorzystywanego do uzyskania rezonansu wnęki.

Ze zgłoszenia patentowego US2011178748 (A1) znana jest nierezonansowa metoda pomiaru przenikalności elektrycznej materiału dielektrycznego wykorzystująca linie transmisyjne. Metoda polega na użyciu co najmniej dwóch segmentów linii o różnej długości w taki sposób, aby badany materiał

dielektryczny wypełniał ich przekrój poprzeczny. Dla linii transmisyjnej będącej odpowiednikiem różnicy pomiędzy dłuższą i krótszą linią tworzy się pełnofalowy model uwzględniający, oprócz parametrów geometrycznych, również parametry związane ze stratami i dyspersją. Ekstrakcja zespolonej stałej dielektrycznej polega na numerycznym porównaniu, względem określonych kryteriów, uogólnionych, modalnych parametrów rozproszenia  $S$  uzyskanych z pomiarów i symulacji dla różnicowej linii.

Istota szerokopasmowej metody pomiaru stałej dielektrycznej cienkich podłoży dielektrycznych polega tym, że próbkę badanego podłoża dielektrycznego umieszcza się na przewodzącej powierzchni połączonej z masą układu pomiarowego, a na próbce badanego podłoża dielektrycznego umieszcza się przewodzący pasek, tworząc tym samym mikropaskową linię transmisyjną, zaś końce paska podłącza się do wrót dwuwrotowego wektorowego analizatora sieci, a następnie dokonuje się pomiaru parametrów macierzy rozproszenia  $S$ , modyfikuje się szerokość środkowego odcinka przewodzącego paska, dokonuje się ponownego pomiaru macierzy parametrów rozproszenia  $S$  tak zmodyfikowanego paska, a następnie dokonuje się konwersji otrzymanych macierzy rozproszenia  $S$  z obu pomiarów na macierze łańcuchowe oraz znanymi metodami matematycznymi przy pomocy modelu obwodowego całej struktury dokonuje się ekstrakcji względnej stałej dielektrycznej badanego podłoża dielektrycznego.

Korzystnie, modyfikacja szerokości środkowego odcinka niejednorodnej linii mikropaskowej polega na jej zmniejszeniu do szerokości odcinka wejściowego i wyjściowego.

Zaletą metody wykorzystującej zmianę szerokości linii mikropaskowej, będącej przedmiotem niniejszego zgłoszenia patentowego, jest samokalibracja i związana z nią niewrażliwość na niedopasowanie impedancyjne układu, eliminacja błędów związanych z montażem złączy pomiarowych, wykorzystanie tylko jednej linii mikropaskowej o zmiennej szerokości, co znacząco ogranicza błędy związane z niejednorodnością badanego podłoża (zlokalizowany pomiar) oraz upraszcza jej implementację. Co więcej, nie jest wymagana żadna zmiana geometrii badanego materiału, jedynie samej linii mikropaskowej.

Metoda jest bliżej przedstawiona w przykładach realizacji i w oparciu o rysunek, którego fig. 1 przedstawia linię mikropaskową z badanym materiałem w układzie pomiarowym z wektorowym analizatorem sieci przed modyfikacją przewodzącego paska, fig. 2 przedstawia linię mikropaskową z badanym materiałem w układzie pomiarowym z wektorowym analizatorem sieci po modyfikacji przewodzącego paska, fig. 3 przedstawia linię mikropaskową z próbką badanego podłoża, po lewej stronie w rzucie z góry, a po prawej w rzucie z boku, a fig. 4 przedstawia model obwodowy niejednorodnej linii mikropaskowej w postaci kaskady macierzy łańcuchowych opisujących kolejne elementy linii mikropaskowej.

#### P r z y k ł a d 1

Próbkę badanego podłoża dielektrycznego 2 umieszcza się na przewodzącej powierzchni 1 połączonej z masą układu pomiarowego, a na próbce badanego podłoża dielektrycznego 2 umieszcza się przewodzący pasek 3, tworząc tym samym mikropaskową linię transmisyjną, co zaprezentowano na fig. 3. Pasek 3 składa się z trzech połączonych ze sobą segmentów, linii wejściowej 3a, linii środkowej 3b i linii wyjściowej 3c, z których linie skrajne mają jednakową długość i szerokość oraz znajdującą się pomiędzy nimi jedną linię o innych wymiarach, tworząc symetryczną nieciągłość skokową. W tym przypadku dwie linie skrajne 3a, 3c, mają długość po 25 mm i szerokość po 1,8 mm, a znajdująca się pomiędzy nimi linia środkowa 3b ma długość 50 mm i szerokość 5,8 mm. Badany, cienkowarstwowy materiał podłoża 2 ma wysokość 1,524 mm. Końce paska 3 podłącza się do wrót dwuwrotowego wektorowego analizatora sieci 4, stanowiących złącza wysokiej częstotliwości, a następnie dokonuje się pomiaru parametrów macierzy rozproszenia  $S$ , modyfikuje się szerokość środkowego odcinka przewodzącego paska 3, dokonuje się ponownego pomiaru macierzy parametrów rozproszenia  $S$  tak zmodyfikowanego paska. Po modyfikacji wzdłuż linii cięcia: linia środkowa 3b zwężona została do szerokości linii skrajnych 3a, 3c, - 1,8 mm, dzięki czemu usunięto obie nieciągłości skokowe. Następnie dokonuje się konwersji otrzymanych macierzy rozproszenia  $S$  z obu pomiarów na macierze łańcuchowe oraz znanymi metodami matematycznymi przy pomocy modelu obwodowego całej struktury dokonuje się ekstrakcji względnej stałej dielektrycznej badanego podłoża dielektrycznego 2. Model obwodowy opisuje się za pomocą połączenia kaskadowego czwórników opisanych macierzami łańcuchowymi (parametry ABCD), uwidocznionymi na fig. 4, gdzie:  $T_{CL}$  – lewostronne złącze pomiarowe,  $T_{lc}$  – lewostronny/prawostronny, wejściowy segment linii mikropaskowej,  $T_{SL}$  – lewostronna nieciągłość skokowa,  $T_L$  – środkowy segment linii mikropaskowej (modyfikowany),  $T_{SR}$  – prawostronna nieciągłość skokowa,  $T_{CR}$  – prawostronne złącze pomiarowe. Przyjęty model ekstrakcji względnej stałej dielektrycznej materiału podłoża bazuje na siedmioelementowej kaskadzie czwórników, w której wyróżnić można dwuwrotniki związane

ze złączami krawędziowymi, symetrycznymi nieciągłościami skokowymi oraz linią transmisyjną. Przyjęto, że obie nieciągłości skokowe są symetryczne i można opisać je przy użyciu tych samych macierzy transmisyjnych. Korzystając z przedstawionej kaskady można wyprowadzić ogólne wyrażenia opisujące omawiany model przed i po modyfikacji środkowej linii, przy czym modyfikacja powoduje zmianę jedynie trzech elementów kaskady: dwóch czwórników opisujących symetryczne nieciągłości skokowe oraz jednego czwórnika opisującego środkowy segment linii transmisyjnej. Wykonując odpowiednie mnożenia na otrzymanych macierzach wypadkowych kaskady przed i po modyfikacji środkowego segmentu linii transmisyjnej oraz korzystając z zależności na ślad macierzy podobnych, otrzymuje się następujące równanie:  $TR = \text{Tr}(T_2^{-1}T_1) = \text{Tr}(T_{S2}^{-1} \cdot T_{L2}^{-1} \cdot T_{S2}^{-1} T_{S1} T_{L1} T_{S1})$ , gdzie:  $T_1$  – macierz łańcuchowa uzyskana na podstawie pomiaru przed modyfikacją szerokości linii,  $T_2$  – macierz łańcuchowa uzyskana na podstawie pomiaru po modyfikacji szerokości linii,  $T_{L1}$  – macierz łańcuchowa modelu środkowego segmentu linii mikropaskowej przed modyfikacją,  $T_{L2}$  – macierz łańcuchowa modelu środkowego segmentu linii mikropaskowej po modyfikacji,  $T_{S1}$  – macierz łańcuchowa modelu obwodowego symetrycznej nieciągłości skokowej przed modyfikacją,  $T_{S2}$  – macierz łańcuchowa modelu obwodowego symetrycznej nieciągłości skokowej po modyfikacji.

Każdy z elementów kaskady opisującej model obwodowy jest nieliniową funkcją względnej stałej dielektrycznej testowanego materiału podłoża. Operacje mnożenia macierzy i ich odwrotności umożliwiają kalibrację układu polegającą na eliminacji wpływu złączy mikrofalowych zainstalowanych na wejściu i wyjściu linii mikropaskowej. Operacja śladu umożliwia porównanie parametrów modelu obwodowego z parametrami układu uzyskanymi na podstawie pomiarów. Wyznaczenie badanej względnej przenikalności elektrycznej polega na przybliżonym numerycznym rozwiązaniu równania ze śladami macierzy łańcuchowych za pomocą znanych procedur numerycznych, w taki sposób, że ślad wypadkowej macierzy uzyskanej dla modelu obwodowego linii mikropaskowej jest równy śladowi wypadkowej macierzy uzyskanej z danych pomiarowych  $T_1$  i  $T_2$ .

### Zastrzeżenia patentowe

1. Szerokopasmowa metoda pomiaru stałej dielektrycznej cienkich podłoży dielektrycznych, w której dokonuje się konwersji otrzymanych macierzy rozproszenia  $S$  z obu pomiarów na macierze łańcuchowe oraz znanymi metodami matematycznymi przy pomocy modelu obwodowego całej struktury dokonuje się ekstrakcji względnej stałej dielektrycznej badanego podłoża dielektrycznego **znamienna tym**, że próbkę badanego podłoża dielektrycznego (2) umieszcza się na przewodzącej powierzchni (1) połączonej z masą układu pomiarowego, a na próbce badanego podłoża dielektrycznego (2) umieszcza się przewodzący pasek (3), złożony z linii skrajnych (3a, 3c) i środkowej (3b), tworząc tym samym mikropaskową linię transmisyjną, zaś końce paska (3) podłącza się do wrót dwuwrotowego wektorowego analizatora sieci (4), a następnie dokonuje się pomiaru parametrów macierzy rozproszenia  $S$ , modyfikuje się szerokość środkowego odcinka (3b) przewodzącego paska (3) i dokonuje się ponownego pomiaru macierzy parametrów rozproszenia  $S$  tak zmodyfikowanego paska (3).
2. Metoda według zastrz. 1, **znamienna tym**, że modyfikacja szerokości środkowej linii (3b) paska (3) w ciągu niejednorodnej linii mikropaskowej polega na jej zmniejszeniu do szerokości linii skrajnych (3a, 3c).
3. Metoda według zastrz. 1, **znamienna tym**, że modyfikacja szerokości środkowej linii (3b) paska (3) w ciągu niejednorodnej linii mikropaskowej polega na jej zwiększeniu do szerokości nie większej niż trzykrotność szerokości linii skrajnych (3a, 3c).

Rysunki

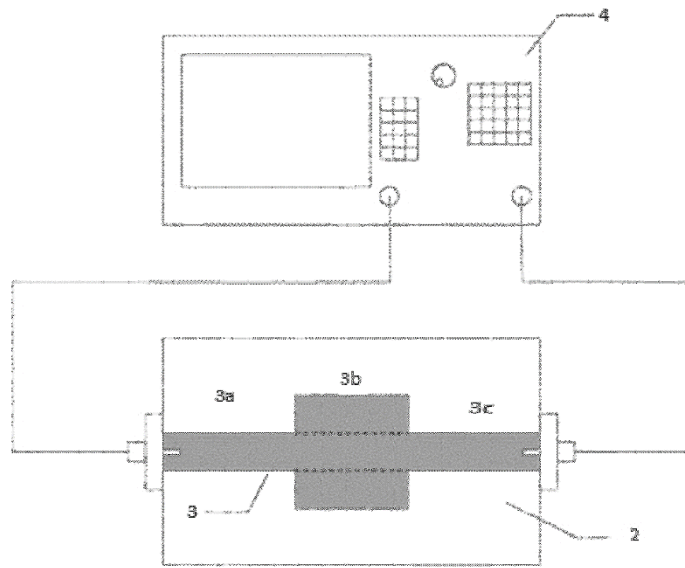


Fig. 1

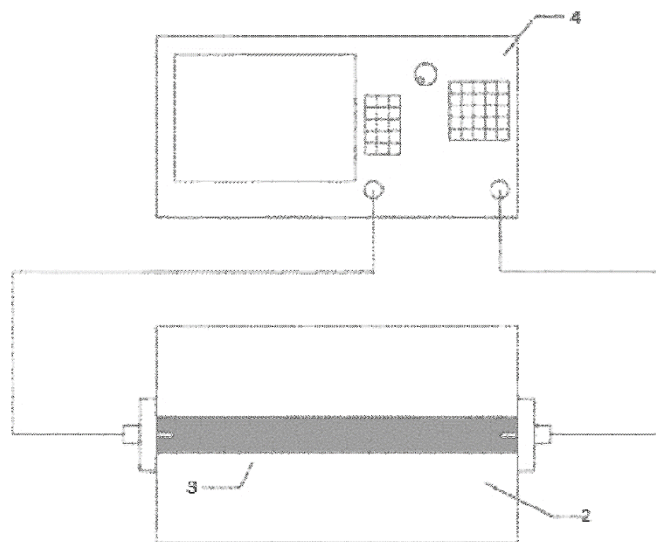


Fig. 2

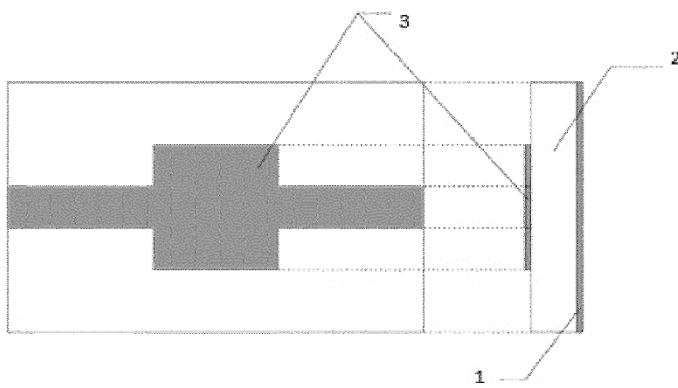


Fig. 3

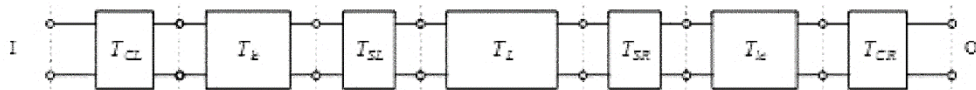


Fig 4.