

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **240101**
(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **430972**

(22) Data zgłoszenia: **28.08.2019**

(51) Int.Cl.
H01P 1/22 (2006.01)
H03H 7/00 (2006.01)
H03H 7/24 (2006.01)

(54)

Tłumik mikrofalowy o płynnie regulowanym tłumieniu

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

08.03.2021 BUP 05/21

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

14.02.2022 WUP 07/22

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA,
Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

JAROSŁAW JUDEK, Warszawa, PL
MICHAŁ ŚWINIARSKI, Warszawa, PL
MARIUSZ ZDROJEK, Warszawa, PL
JERZY K. PIOTROWSKI, Warszawa, PL
KAROLINA CZERNIAK, Bartoszyce, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Oliwia Czarnocka

PL 240101 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest tłumik mikrofalowy o płynnie regulowanym tłumieniu zawierający regulowane układy rezystywne.

Tłumiki mikrofalowe służą redukcji mocy sygnału bez zmiany jego kształtu. Z reguły działają w określonym podzakresie pasma od 300 MHz do 300 GHz. Pasma pracy tłumika jest określone przez zakres częstotliwości w którym ma on zasadniczo stałą charakterystykę tłumienia i zapewnia dopasowanie impedancyjne do przewodnicy falowej, w której ma być zastosowany. Dopasowanie impedancyjne jest wymagane z reguły zarówno od strony wejścia jak i wyjścia.

Znane są różne topologie/konfiguracje tłumików konstruowanych z zastosowaniem elementów o stałych skupionych, w szczególności konfiguracje typu Π i typu T. Ta ostatnia występuje w wygodnym w konstrukcji wariacie z mostkiem (ang. *bridged-T*). Przykład takiej konfiguracji tłumika zilustrowano na pos. 1. Impedancje Z_{01} i Z_{02} w tej konfiguracji są równe impedancji Z_0 przewodnic falowych w które tłumik jest włączony.

Rezystancje R_3 i R_4 spełniają warunek $R_3 \cdot R_4 = Z_0^2$. Przy czym $R_3 = Z_0(K-1)$, zaś $R_4 = \frac{Z_0}{K-1}$, gdzie K stanowi współczynnik tłumienia w skali liniowej.

Tłumiki o regulowanym tłumieniu w omówionych powyżej konfiguracjach zapewnia się stosując regulowane elementy o stałych skupionych. W zakresie mikrofalowym jako elementów o zmiennej rezystancji stosuje się najczęściej diody PIN lub tranzystory polowe (FET). W przypadku diod PIN sygnał sterujący stanowi prąd o określonym natężeniu odpowiadającym określonej impedancji elementu. W przypadku tranzystorów sygnał sterujący stanowi sygnał napięciowy a wartość napięcia odpowiada określonej impedancji elementu.

Znane jest zastosowanie grafenu jako kanału tranzystora polowego. Znana jest konstrukcja grafenowego tranzystora polowego z bramką dolną na podłożu Si/SiO₂. Z publikacji J. Judek, M. Zdrojek, J. Sobieski, A. Przewłoka, and J. K. Piotrowski, "Characterization of the CVD graphene monolayer as an active element of a one-port microwave device", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 46, no. 10, pp. 4340, 2017, znana jest konstrukcja polowego tranzystora grafenowego pracującego w paśmie mikrofalowym, w którym rezystancja kanału jest stała w funkcji napięcia źródło-dren oraz jest nie liniową funkcją napięcia bramki.

Z publikacji K. Byun, Y. J. Park, J.-H. Ahn, and B.-W. Min, "Flexible graphene based microwave attenuators", Nanotechnology, vol. 26, pp. 055201, 2015 znane jest zastosowanie grafenu do konstrukcji tłumika pracującego w paśmie mikrofalowym o wybranej lecz stałej wartości stratności.

Z publikacji L. Pierantoni, D. Mencarelli, M. Bozzi, R. Moro, S. Moscato, L. Perregrini, F. Micciulla, A. Ca-taldo, and S. Bellucci, "Broadband microwave attenuator based on few layer graphene flakes", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 8, 2015, znane jest wykorzystanie wielowarstw grafenu jako elementu stratnego o regulowanej stratności w obwodach mikrofalowych w których jako przewodnicę falową zastosowano linię mikropaskową.

Znane jest wykorzystanie monowarstw grafenu jako elementu stratnego o regulowanej stratności w obwodach mikrofalowych z wykorzystaniem falowodów jako przewodnic falowych.

Tłumiki w konfiguracji typu T z mostkiem mogą być tłumikami o płynnie regulowanym tłumieniu. W takim przypadku wartości rezystancji części elementów muszą się zmieniać w zależności od żądanej wartości tłumienia przy warunku dopasowania impedancyjnego. Zależności takie mają postać analityczną i są znane. Znane jest zastosowanie diod PIN lub tranzystorów polowych jako elementów o zmiennej rezystancji. Sterowanie w/w tłumikami odbywa się poprzez podanie dwóch wartości prądów lub napięć. Konieczność regulacji dwóch różnych elementów dwoma różnymi sygnałami dla uzyskania pożądanego tłumienia przy jednoczesnym zapewnieniu równości $R_3 \cdot R_4 = Z_0^2$ zapewniającej obustronne dopasowanie na wymaganym poziomie jest dość niewygodne. W przypadku regulacji skokowej dopuszczalne wartości sygnałów sterujących można tabelaryzować ale w przypadku płynnej regulacji potrzebny jest rozbudowany układ sterujący i kalibracja każdego egzemplarza tłumika.

Celem wynalazku jest ułatwienie procesu sterowania w wybranym wąskim paśmie pracy tłumika i zapewnienie, spełnienia warunku dopasowania w pełnym zakresie sterowania.

Zgodnie z wynalazkiem zapewnia się tłumik mikrofalowy o płynnie regulowanym tłumieniu, dopasowany obustronnie do linii o określonej impedancji na częstotliwości pracy, wyposażony w port wejściowy mający pierwszy zacisk i drugi zacisk, oraz port wyjściowy mający pierwszy zacisk i drugi zacisk. Tłumik zawiera cztery układy rezystywne połączone w konfigurację typu „T” z mostkiem. Pierwszy układ

rezystywny o impedancji odpowiadającej określonej impedancji ma pierwszy zacisk połączony z pierwszym zaciskiem portu wejściowego tłumika, a drugi zacisk połączony z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego o impedancji odpowiadającej określonej impedancji. Drugi zacisk drugiego układu rezystywnego jest dołączony do pierwszego zacisku portu wyjściowego tłumika. Trzeci układ rezystywny ma pierwszy zacisk połączony z pierwszym zaciskiem pierwszego układu rezystywnego a drugi zacisk połączony z drugim zaciskiem drugiego układu rezystywnego, natomiast czwarty układ rezystywny jest włączony pomiędzy połączenie drugiego zacisku pierwszego układu rezystywnego z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego a połączenie drugiego zacisku portu wejściowego z drugim zaciskiem (Pwy2) portu wyjściowego. Trzeci i czwarty układu rezystywny stanowią układy o regulowanej impedancji wyposażone w wejścia sterujące. Zgodnie z wynalazkiem czwarty układ rezystywny jest włączony pomiędzy połączenie drugiego zacisku pierwszego układu rezystywnego Z01 z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego Z02 a połączenie drugiego zacisku portu wejściowego z drugim zaciskiem portu wyjściowego, za pośrednictwem transformatora ćwierćfalowego wykonanego z linii o impedancji odpowiadającej określonej impedancji, a impedancje trzeciego i czwartego układu rezystywnego odpowiadają sobie, zaś wejścia sterujące trzeciego i czwartego układu rezystywnego są ze sobą połączone.

Korzystnie trzeci i czwarty układ rezystywny stanowią tranzystory FET z kanałem w postaci warstwy grafenowej.

Tłumik mikrofalowy korzystnie jest wykonany technice koplanarnej na podłożu krzemowym.

Zastosowanie transformatora ćwierćfalowego o impedancji linii w którą włączony jest tłumik zapewnia obustronne dopasowanie w całym zakresie sterowania. Sterowanie odbywa się za pomocą jednego tylko sygnału sterującego, nie zaś dwóch wymaganych przy regulowanych tłumikach typu T z mostkiem znanych w stanie techniki. Stanowi to znaczne uproszczenie sterowania kosztem szerokości pasma pracy, które jest ograniczone pasmem pracy transformatora ćwierćfalowego.

Zastosowanie tranzystorów FET z warstwą grafenu zapewnia liniową zależność rezystancji od napięcia sterującego co w połączeniu z redukcją wymiaru przestrzeni sygnałów sterujących uzyskaną dzięki zastosowaniu transformatora ćwierćfalowego stanowi dalsze uproszczenie ułatwiające sterowanie.

Elementy tłumika można wykonać w sposób wygodny powtarzalny w technice koplanarnej.

Przedmiot wynalazku został ukazany w przykładach wykonania na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia schemat ideowy tłumika według wynalazku, natomiast Fig. 2 a i b przedstawiają przykładową realizację, Fig. 3 przedstawia rodzinę częstotliwościowych charakterystyk parametrów rozproszenia $|S_{11}|$ i $|S_{21}|$ tłumika według przykładu wykonania wynalazku, natomiast Fig. 4 przedstawia zależność wartości parametrów $|S_{11}|$ i $|S_{21}|$ dla jednej wartości częstotliwości $f = 10$ GHz.

Na Fig. 1 przedstawiono schemat ideowy tłumika w przykładzie wykonania wynalazku pracującego w przewodnicy falowej o impedancji Z_0 . Tłumik ma płynnie regulowane tłumienie i jest dopasowany obustronnie na częstotliwości pracy.

Port wejściowy Pwe ma pierwszy zacisk Pwe1 i drugi zacisk Pwe2. Port wyjściowy Pwy ma pierwszy zacisk Pwy1 i drugi zacisk Pwy2.

Tłumik zawiera cztery układy rezystywne połączone w konfigurację typu „T” z mostkiem.

Pierwszy układ rezystywny Z01 ma impedancję Z_0 równą impedancji charakterystycznej linii wejściowej z dokładnością do 10%. Taka zbieżność oznacza że impedancje te odpowiadają sobie. Gorsze lecz wciąż dobre wyniki uzyskiwano przy równości z tolerancją $\pm 20\%$. Pierwszy zacisk pierwszego układu rezystywnego Z01 jest połączony z pierwszym zaciskiem Pwe1 portu wejściowego tłumika Pwe. Drugi zacisk pierwszego układu rezystywnego Z01 jest połączony z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego Z02.

Drugi układ rezystywny Z02 ma impedancję równą impedancji Z_0 linii wyjściowej. Drugi zacisk drugiego układu rezystywnego Z02 jest dołączony do pierwszego zacisku Pwy1 portu wyjściowego Pwy tłumika.

Trzeci układ rezystywny Z3 stanowi układ o regulowanej impedancji wyposażony w wejście sterujące i włączony w układ tłumika tak, że mostkuje pierwszy Z01 i drugi Z02 układ rezystywny.

Czwarty układ rezystywny Z4 jest włączony pomiędzy połączenie drugiego zacisku pierwszego układu rezystywnego Z01 z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego Z02 a połączenie drugiego zacisku Pwe2 portu wejściowego Pwe z drugim zaciskiem Pwy2 portu wyjściowego Pwy, za po-

średnictwem transformatora ćwierćfalowego T4 wykonanego z linii o impedancji Z_0 . Czwarty układ rezystywny również ma regulowaną impedancję i ma wejście sterujące połączone z wejściem sterującym trzeciego układu rezystywnego.

Impedancje trzeciego i czwartego układu rezystywnego odpowiadają sobie dzięki temu, że stosuje się takie same układy o połączonych wejściach sterujących, sterowane tym samym sygnałem z wejścia sterującego WEs. Ich impedancje są wówczas w całym paśmie pracy i w całym zakresie sterowania równe: $Z_3 \simeq Z_4$.

Wynikiem transformacji impedancji czwartego układu rezystywnego przez transformator T4 jest impedancja o wartości $\frac{Z_0^2}{Z_4} \simeq \frac{Z_0^2}{Z_3}$. Dzięki temu tłumik według wynalazku zawsze jest spełniony warunek dopasowania na częstotliwości pracy transformatora i w jej bezpośrednim sąsiedztwie ponieważ niezależnie od wartości Z_3 iloczyn $\frac{Z_0^2}{Z_3} \cdot Z_3$ zawsze jest równy Z_0^2 .

Zastosowanie jednakowych tranzystorów FET z kanałami w postaci warstwy grafenowej jako trzeciego i czwartego elementu impedancyjnego zapewnia możliwość liniowego sterowania.

Wykonanie w technice koplarnarnej ułatwia wykonywanie układów rezystywnych.

Fig. 2 przedstawia schematycznie topografię tłumika mikrofalowego o płynnie regulowanym tłumieniu wykonanego w technice koplarnarnej sterowanego napięciem. Fig. 2 (a) przedstawia widok z góry układu metalizacji oraz umieszczenia elementów, a Fig. 2b (b) przekrój poprzeczny wzdłuż linii A-A ilustrujący strukturę podłoża.

Szerokość środkowego paska metalizacji stanowiącej falowód koplarny wynosi $100 \mu\text{m}$, a szerokość szczeliny – $50 \mu\text{m}$. Jako metalizację zastosowano warstwę o grubości 5 nm chromu pokrytą 100 nm warstwą złota. Jako podłoże zastosowano wysokorezystywny krzem o grubości $525 \mu\text{m}$ i oporności właściwej ρ powyżej $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. Podłoże pokryto warstwą dielektryczną 7 wykonaną z SiO_2 metodą termicznego utleniania na sucho o grubości 50 nm .

Segment 1 falowodu koplarnarnego stanowi wejściową prowadnicę falową a segment 2 falowodu koplarnarnego stanowi wyjściową prowadnicę falową sygnału mikrofalowego.

Transformator ćwierćfalowy zrealizowano w postaci segmentu 3 falowodu koplarnarnego, mającego długość $2,6 \text{ mm}$.

Trzeci układ impedancyjny stanowi tranzystor FET, którego kanał stanowi fragment monowarstwy grafenowej 4.

Czwarty układ impedancyjny stanowi identyczny tranzystor FET, którego kanał stanowi fragment monowarstwy grafenowej 5. Podłoża tranzystorów FET stanowiące ich bramki stanowią jednocześnie ich wejścia sterujące. Są one połączone. Zastosowanie wysokorezystywnego krzemu jako podłoża umożliwia wykonanie falowodu koplarnarnego i tranzystorów w tej samej technologii.

Monowarstwę grafenu wyhodowano metodą CVD na miedzi i przeniesiona na podłoże.

Tak wykonane pierwszy i drugi układ rezystywny wykazują znaczną liniowość regulacji rezystancji w funkcji napięcia sterującego i mają niewielkie pojemności pasożytnicze, dzięki czemu mają dobry rezystancyjny charakter.

Pierwszy i drugi układ rezystywny Z_{01} i Z_{02} o impedancji Z_0 zrealizowano w postaci metalizacji 6 o oporności powierzchniowej równej $50 \Omega/\square$.

Uzyskane pasmo pracy przy dopasowaniu na poziomie -20 dB i zafalowaniu tłumienia poniżej 2 dB to $8 \text{ GHz} \div 12 \text{ GHz}$.

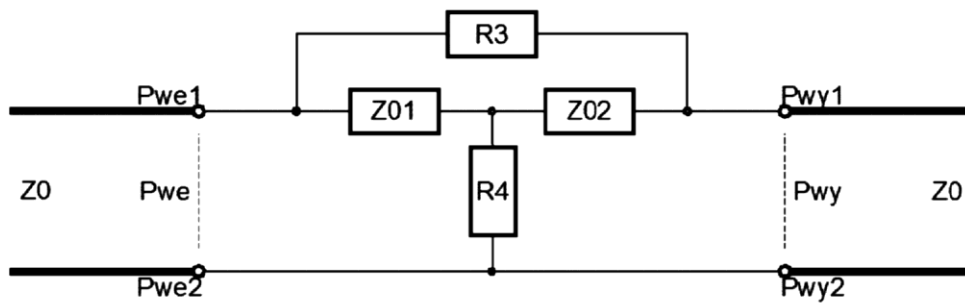
Fig. 3 przedstawia rodzinę charakterystyk częstotliwościowych modułów współczynnika odbicia S_{11} i współczynnika transmisji S_{21} wyrażonych w dB , uzyskanych dla różnych wartości napięcia sterującego. Na Fig. 4 przedstawiono przebieg zmienności tych parametrów w funkcji logarytmu z napięcia sterującego.

Znawca w dziedzinie zapoznawszy się z powyższym opisem jest w stanie bez trudu zrealizować tłumik według wynalazku w innej technice – np. w postaci układu linii mikropaskowych a także w innych pasmach pracy oraz stosując różne typy znanych w stanie techniki układów rezystywnych i regulowanych układów rezystywnych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Tłumik mikrofalowy o płynnie regulowanym tłumieniu, dopasowany obustronnie do linii o określonej impedancji (Z_0) na częstotliwości pracy (f), wyposażony w
 - port wejściowy (Pwe) mający pierwszy zacisk (Pwe1) i drugi zacisk (**Pwe2**), oraz
 - port wyjściowy (Pwy) mający pierwszy zacisk (Pwy1) i drugi zacisk (Pwy2),zawierający cztery układy rezystywne połączone w konfigurację typu „T” z mostkiem, w której pierwszy układ rezystywny (Z_{01}) o impedancji odpowiadającej określonej impedancji (Z_0) ma pierwszy zacisk połączony z pierwszym zaciskiem (Pwe1) portu wejściowego tłumika (Pwe), a drugi zacisk połączony z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego (Z_{02}) o impedancji odpowiadającej określonej impedancji (Z_0), którego drugi zacisk jest dołączony do pierwszego zacisku (Pwy1) portu wyjściowego (Pwy) tłumika, zaś trzeci układ rezystywny (Z_3) ma pierwszy zacisk połączony z pierwszym zaciskiem pierwszego układu rezystywnego (Z_{01}), a drugi zacisk połączony z drugim zaciskiem drugiego układu rezystywnego, natomiast czwarty układ rezystywny (Z_4) jest włączony pomiędzy połączenie drugiego zacisku pierwszego układu rezystywnego (Z_{01}) z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego (Z_{02})
 - a
 - połączenie drugiego zacisku (Pwe2) portu wejściowego (Pwe) z drugim zaciskiem (Pwy2) portu wyjściowego (Pwy),
 - przy czym trzeci i czwarty układu rezystywny stanowią układy o regulowanej impedancji wyposażone w wejścia sterujące,
 - znamienny tym, że**
 - czwarty układ rezystywny (Z_4) jest włączony pomiędzy
 - połączenie drugiego zacisku pierwszego układu rezystywnego (Z_{01}) z pierwszym zaciskiem drugiego układu rezystywnego (Z_{02})
 - a
 - połączenie drugiego zacisku (Pwe2) portu wejściowego (Pwe) z drugim zaciskiem (Pwy2) portu wyjściowego (Pwy),
 - za pośrednictwem transformatora ćwierćfalowego (T_4) wykonanego z linii o impedancji odpowiadającej określonej impedancji (Z_0), a impedancje trzeciego i czwartego układu rezystywnego odpowiadają sobie, zaś wejścia sterujące trzeciego (Z_3) i czwartego (Z_4) układu rezystywnego są ze sobą połączone.
2. Tłumik mikrofalowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że trzeci i czwarty układ rezystywny stanowią tranzystory FET z kanałem w postaci warstwy grafenowej.
3. Tłumik mikrofalowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że jest wykonany technice koplanarnej na podłożu krzemowym.

Rysunki



Pos. 1 (stan techniki)

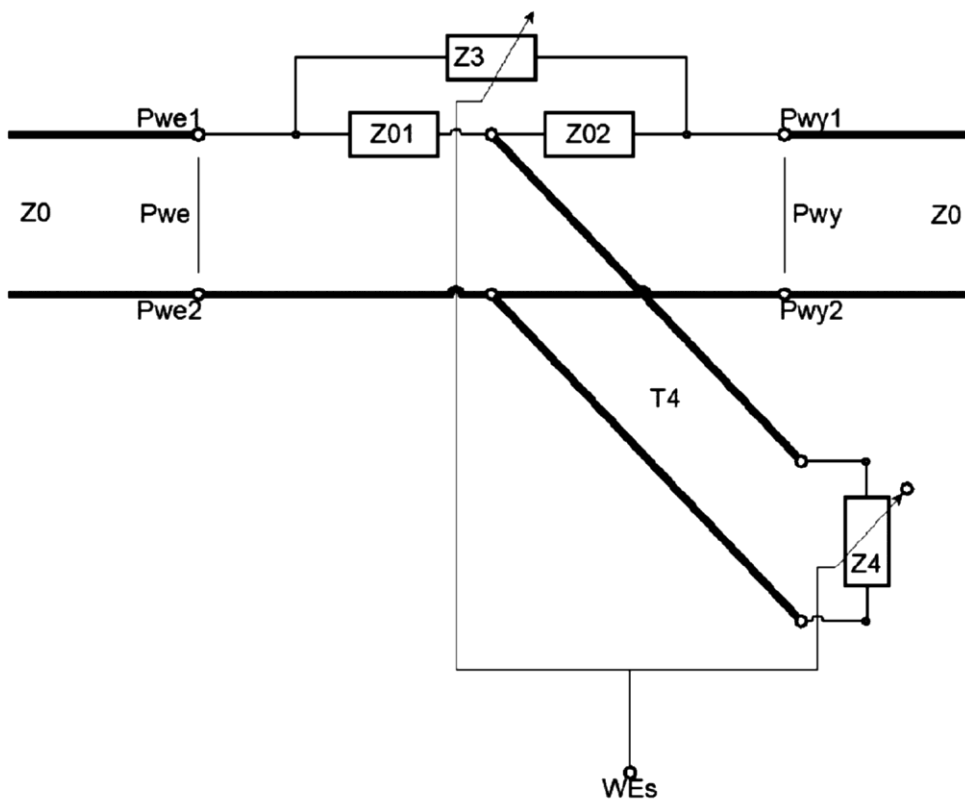


Fig. 1

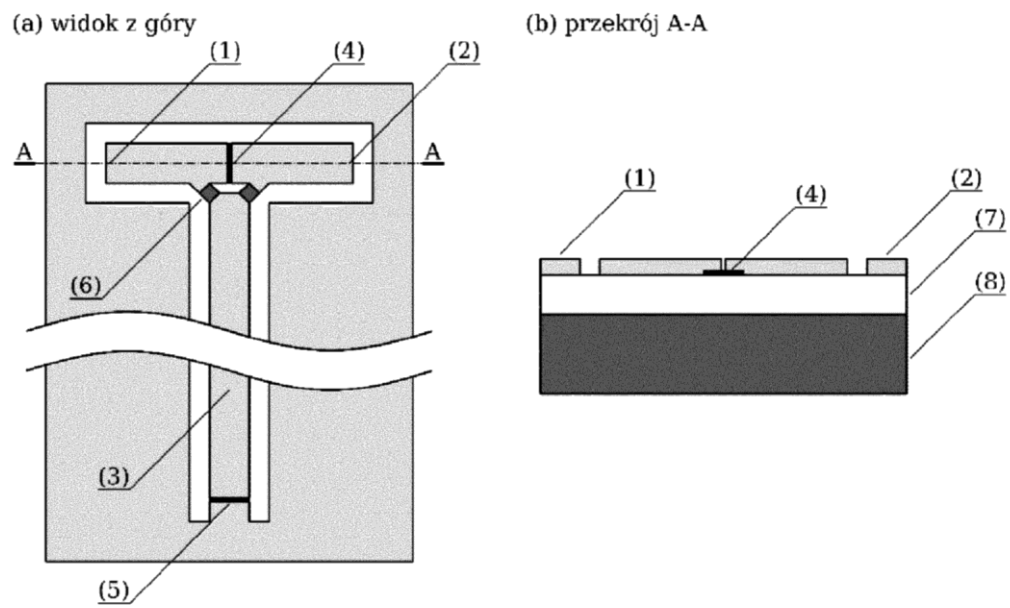


Fig. 2

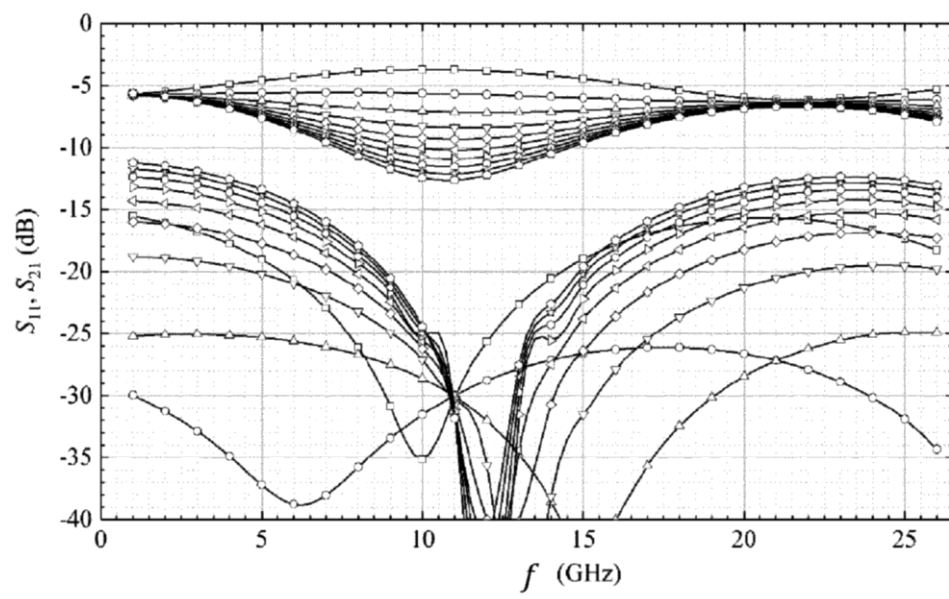


Fig. 3

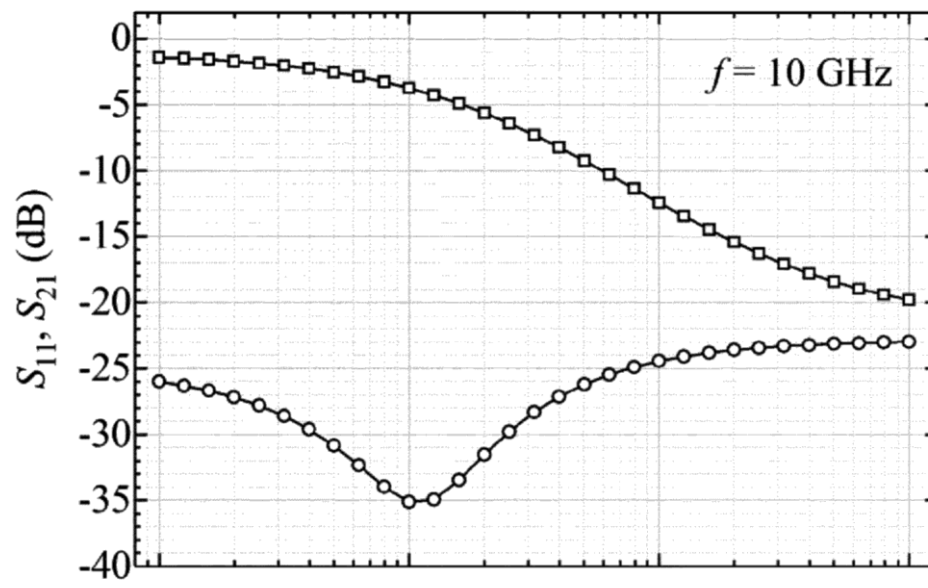


Fig. 4