

# ELEKTRONIKA W EKSPERYMENCIE FIZYCZNYM

D. B. Tefelski

Zakład VII Fizyki Jądrowej  
Wydział Fizyki Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, PL

21 maja 2020

Falowody: rodzaje fał, dopasowanie, elementy obwodów  
mikrofałowych



# Plan prezentacji

- 1 Wstęp
  - Literatura
- 2 Mikrofale
  - Pojęcia podstawowe
- 3 Propagacja mikrofal
  - Równania Maxwella
  - Falowody
- 4 Elementy bierne
  - Rezonatory, elementy rezystancyjne, indukcyjne i pojemnościowe
  - Obwody mikrofalowe

# Do przestudiowania



David J. Griffiths

Podstawy elektrodynamiki

Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2005



Janusz A. Dobrowolski

Technika wielkich częstotliwości

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa  
2001



Romułd Litwin, Marian Suski

Technika mikrofałowa

Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972

## Mikrofale

Są to fale elektromagnetyczne, których długość fali jest mniejsza od  $1\text{ m}$ . Odpowiada to częstotliwości około  $300\text{ MHz}$ . Inny podział mówi o mikrofalach jako fali o częstotliwości większej od  $1\text{ GHz}$ . Długości fal mikrofal są porównywalne lub mniejsze od wymiarów obwodów elektrycznych w których są rozpatrywane.

Zakresy mikrofal:

- Decymetrowy  $\lambda = 1 \div 10\text{ dm}$
- Centymetrowy  $\lambda = 1 \div 10\text{ cm}$
- Milimetrowy  $\lambda = 1 \div 10\text{ mm}$
- Submilimetrowy  $\lambda < 1\text{ mm}$

## Zakres mikrofał

Wg kodu literowego z II Wojny Światowej:

| pasmo | częstotliwość  | długość fali $\lambda$ |
|-------|----------------|------------------------|
| P     | 225–390 MHz    | 133–77 cm              |
| L     | 390–1550 MHz   | 77–19.2 cm             |
| S     | 1.55–5.2 GHz   | 19.2–5.75 cm           |
| G     | 3.95–5.85 GHz  | 7.6–5.15 cm            |
| C     | 5.85–8.2 GHz   | 5.2–10.9 cm            |
| X     | 5.2–10.9 GHz   | 5.75–2.75 cm           |
| J     | 10.9–17.25 GHz | 2.75–1.74 cm           |
| K     | 10.9–36 GHz    | 2.75–0.83 cm           |
| Q     | 36–46 GHz      | 0.83–0.65 cm           |
| V     | 46–56 GHz      | 0.65–0.535 cm          |

Pasma G, C i J to pasma „pomocnicze”.

## Mikrofałe

Typowe urządzenia mikrofałowe codziennego użytku:

- Telefonia komórkowa



- Kuchenki mikrofałowe
- Radary morskie, lotnicze, wojskowe, meteorologiczne



## Elementy bierne układów mikrofałowych

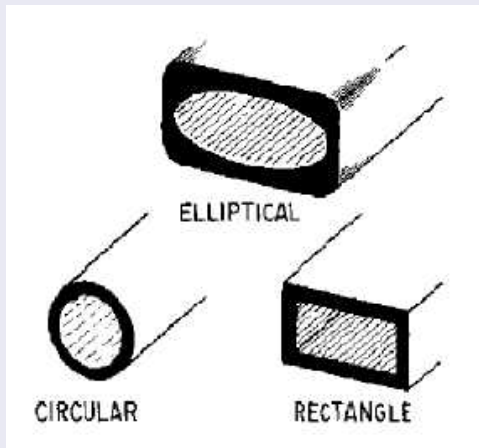
- Układy sprzęgające
- Układy tłumiące
- Układy rezonansowe
- Układy detekcyjne
- Układy modulujące
- Układy z nieodwracalnymi elementami żyotropowymi

## Elementy czynne układów mikrofałowych

- Generatory mikrofał
- Przetworniki częstotliwości
- Wzmacniacze
- Detektory i modulatory (układy czynne)

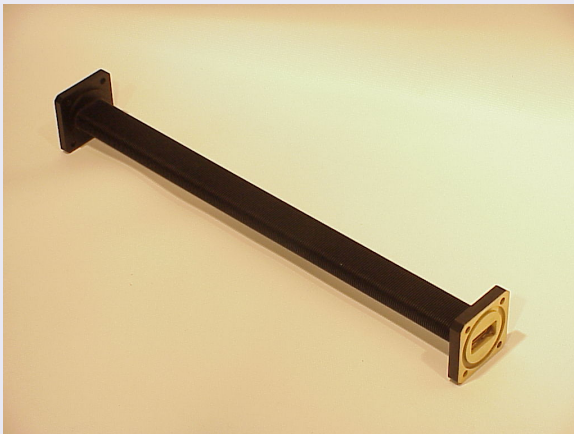


## Typowe przekroje falowodów



Rys.: Przekroje poprzeczne falowodów

## Falwód



Rys.: Falwód giętki do połączeń w trudnej sytuacji geometrycznej

## Urządzenie „Magic Tee” - magiczne T



Rys.: Urządzenie do rozdzielania fali EM.

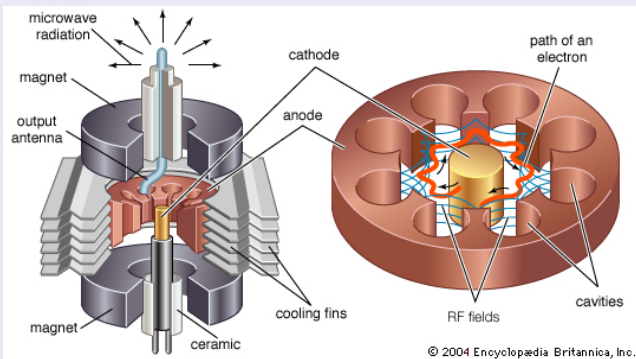
## Klistron



**Rys.:** Klistron - lampa mikrofalowa służąca do wzmacniania i generacji mikrofał

Klistron pracuje na jednej częstotliwości - ze względu na obecność wnek rezonansowych przystosowanych do tej częstotliwości. Moc w zależności od budowy od pojedynczych Watów do kilowatów. Sprawność klistronu jest rzędu 40%.

## Magnetron



Rys.: Magnetron

Magnetron (typowo w kuchenkach mikrofalowych) - może generować mikrofałe o dużym natężeniu. Generuje mało stabilnie. Działa na zasadzie „uwieżenia” elektronów w polu magnetycznym.

## Generator z diodą Gunna



Rys.: Generator z diodą Gunna

## Propagacja mikrofał

Mikrofałe w przestrzeni swobodnej rozchodzą się jak typowe fałe EM. W przestrzeni zamkniętej możliwość propagacji i sposób propagacji zależą od charakterystycznych wymiarów oraz od materiałów - izolatorów i przewodników ograniczających przestrzeń.

Własności transmisyjne opisują równania Maxwella z nałożonymi warunkami brzegowymi.

## Równania Maxwella dla fali EM w próżni

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

$\vec{E}$  – wektor natężenia pola elektrycznego,  $\vec{H}$  – wektor natężenia pola magnetycznego,  $\vec{D}$  – wektor indukcji elektrycznej,  $\vec{B}$  – wektor indukcji magnetycznej,  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $\rho$  – gęstość przestrzenna ładunku



## Warunki brzegowe pola EM na powierzchni granicznej między próżnią a przewodnikiem (metalem)

$$\mathbf{1}_n \cdot \vec{B} = 0$$

$$\mathbf{1}_n \cdot \vec{D} = \sigma$$

$$\mathbf{1}_n \times \vec{H} = \vec{K}$$

$$\mathbf{1}_n \times \vec{E} = 0$$

$\mathbf{1}_n$  – wektor jednostkowy prostopadły do powierzchni granicznej, skierowany do ośrodka 1,  $\sigma$  – gęstość powierzchniowa swobodnego ładunku elektrycznego zgromadzonego na powierzchni granicznej,  $\vec{K}$  – wektor gęstości swobodnego prądu elektrycznego płynącego po powierzchni granicznej

Warunki te określają, że pole  $\vec{B}$  na powierzchni może mieć tylko **składową styczną** do metalu, a pole  $\vec{E}$  musi być **prostopadłe** do powierzchni granicznej.

## Rodzaje (mody) fał

Mody **TE** – Transversal Electric, fale nie zawierają składowej podłużnej pola elektrycznego  $\vec{E}$ :  $E_z$  (wzdłuż kierunku propagacji  $z$ ).

Mody **TM** – Transversal Magnetic, fale nie zawierają składowej podłużnej pola magnetycznego wzdłuż kierunku propagacji  $z$ .

## Rodzaje fal (mody)

- Zbiór rozwiązań nie zawierający składowej podłużnej  $E_z$  to fale  $TE$  – inny symbol  $H$ .
- Zbiór rozwiązań nie zawierający składowej podłużnej  $H_z$  to fale  $TM$  – inny symbol  $E$ .
- Prędkość fali w falowodzie z równania **dyspersji** – zależności stałej propagacji od częstotliwości fali.

Dla falowodu bezstratnego:  $\beta^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - k_k^2$

Gdzie:  $k_k^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_k}\right)^2$ ,  $\lambda_k$  - długość fali krytyczna w danym falowodzie

## Rodzaje fal (mody)

- Prędkość fazowa fali:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_k^2}}$$

$$v_f = c \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - k_k^2 c^2}}$$

- Prędkość grupowa:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$$

$$v_g = c \frac{\sqrt{\omega^2 - k_k^2 c^2}}{\omega}$$

## Prędkość fazowa i grupowa

- Zależność pomiędzy prędkością fazową i grupową a prędkością światła:

$$v_f \cdot v_g = c^2$$

- Prędkość światła a przenikalność elektryczna i magnetyczna:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r\mu_0\epsilon_r\epsilon_0}}$$

## Wnioski dotyczące falowodów

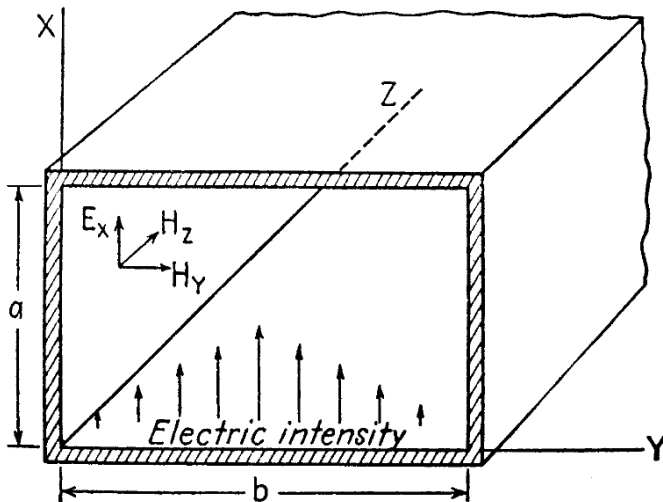
- 1 W falowodach mogą rozchodzić się fale TE lub TM.
- 2 Istnieje częstotliwość krytyczna, powyżej której istnieją mody fal.
- 3 Prędkość fazowa w falowodzie jest zawsze większa od prędkości światła
- 4 Prędkość grupowa jest mniejsza od prędkości światła
- 5 Iloczyn prędkości fazowej i grupowej równy jest kwadratowi prędkości światła
- 6 Długość fali w falowodzie  $\lambda_f$  jest większa od długości fali  $\lambda$  w wolnej przestrzeni. Gdy częstotliwość  $f \rightarrow f_k$  to  $\lambda_f \rightarrow \infty$

## Falowód prostokątny

W falowodzie prostokątnym rozchodzą się tylko mody  $TE_{mn}$  i  $TM_{mn}$ :

$$f_k = \frac{c}{2\sqrt{\mu_w \epsilon_w}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

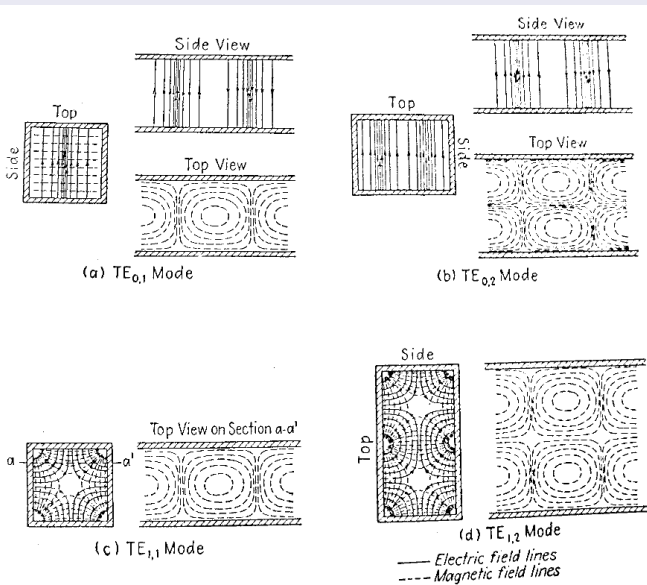
## Mod TE w falowodzie prostokątnym



$TE_{0,n}$  mode in a rectangular guide.



# Pole EM w falowodzie prostokątnym



## Falowód cylindryczny

- Rozkład pól opisany jest równaniami Bessela
- Częstotliwości krytyczne:

$$f_k r = \frac{v \zeta_{mn}}{2\pi r_0}$$

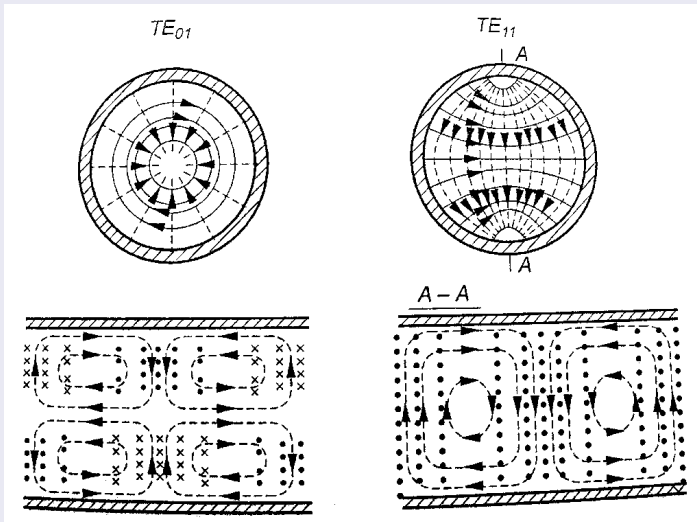
Gdzie  $\zeta_{mn}$  - n-ty pierwiastek równania:

- dla fali  $TM_{mn}$   $J_m(\zeta) = 0$
- dla fali  $TE_{mn}$   $J'_m(\zeta) = 0$

Funkcje  $J_m$  i  $J'_m$  oznaczają funkcję Bessela i pochodną funkcji Bessela m-tego rzędu.

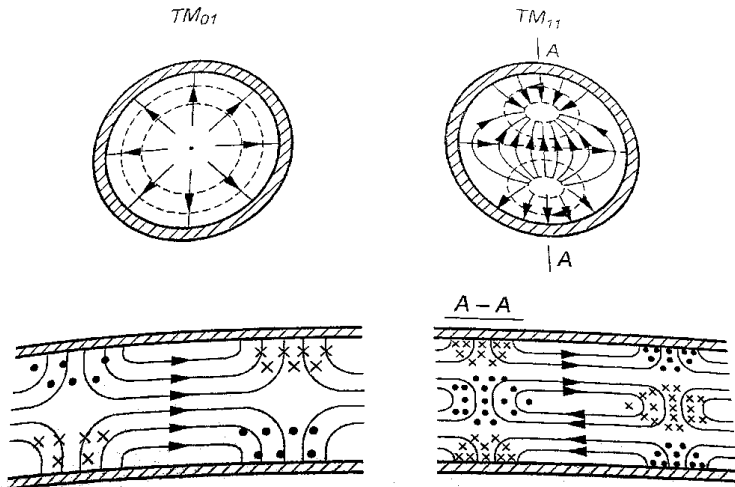
- Falowód cylindryczny zapewnia pracę jednomodową w węższym zakresie częstotliwości niż falowód prostokątny.

## Falowód cylindryczny



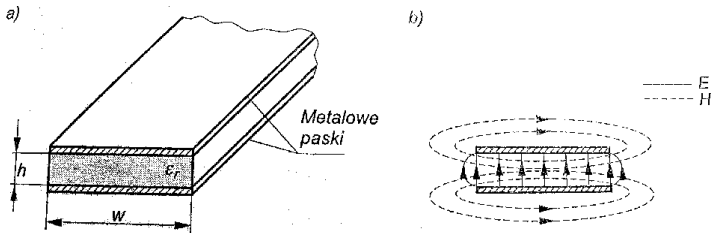
Rys.: Rozkłady pól elektromagnetycznych rodzaju TE

## Falowód cylindryczny



Rys.: Rozkłady pól elektromagnetycznych rodzaju TM

## Linia dwóch równoległych pasków



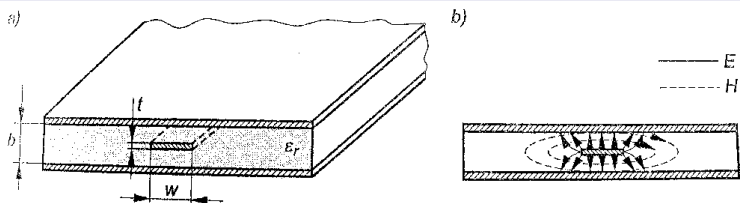
Linia transmisyjna TEM w postaci dwóch równoległych metalowych pasków: a) budowa linii, b) rozkład pola elektromagnetycznego

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \frac{h}{w} \approx \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{h}{w} [\Omega]$$

Dla  $w \gg h$  prędkość fazowa w linii paskowej:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

## Linia paskowa



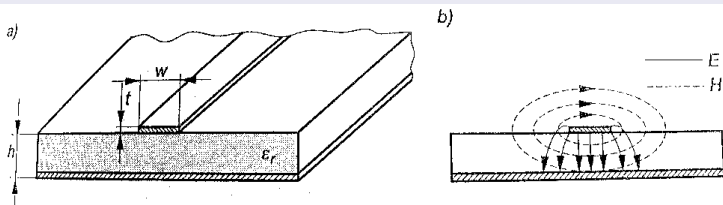
Symetryczna linia paskowa: a) budowa linii, b) rozkład pola elektromagnetycznego TEM

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{K'(k)}{K(k)} \quad k = \operatorname{sech} \left( \frac{\pi W}{2b} \right)$$

Równanie słuszne dla grubości paska  $t = 0$ .  $K$  – funkcja eliptyczna pierwszego rodzaju,  $K'$  – funkcja komplementarna do  $K$ .

$$f_c = \frac{15}{\sqrt{\epsilon_r} b} \frac{1}{\frac{W}{b} + \frac{\pi}{4}}$$

## Linia mikropaskowa

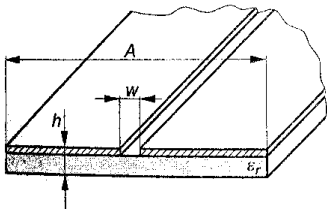


Linia mikropaskowa: a) budowa linii, b) rozkład pola elektromagnetycznego quasi-TEM

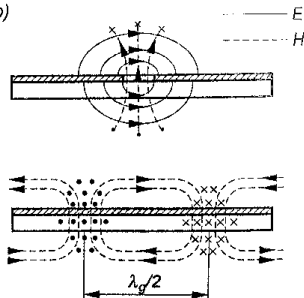
## Rozkład fali quasi-TEM

## Linia szczelinowa

a)



b)

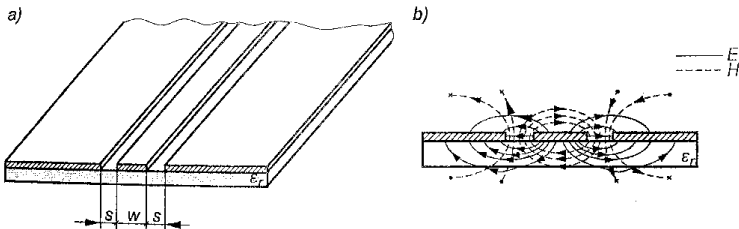


Linia szczelinowa: a) struktura linii, b) rozkład pola elektromagnetycznego

## Rozkład fali quasi-TE



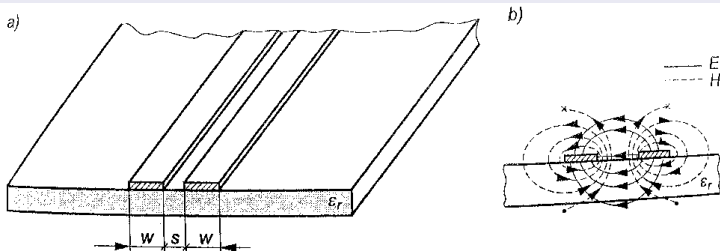
## Falowód koplanarny



Falowód koplanarny: a) struktura falowodu, b) rozkład pola elektromagnetycznego

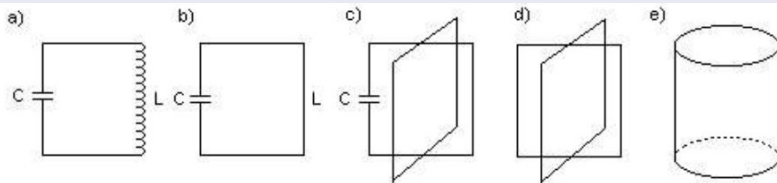
Rozkład fali quasi-TEM

## Koplanarne paski



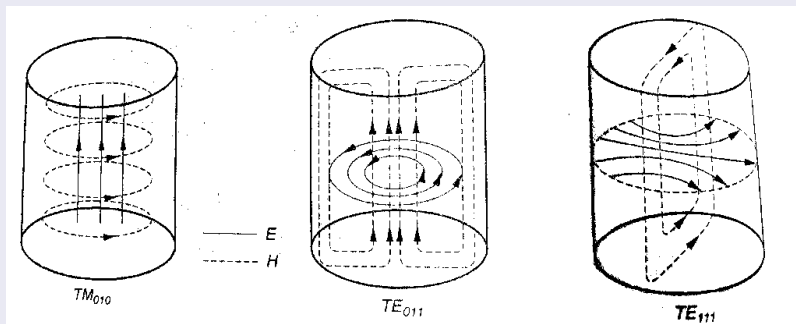
Koplanarne paski: a) struktura linii, b) rozkład pola elektromagnetycznego

## Rezonatory wnękowe



**Rys.:** Przejście od obwodów ze stałymi skupionymi do obwodu o stałych rozłożonych (rezonator cylindryczny)

## Rezonatory wnękowe

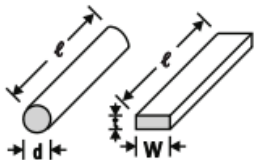


Rys.: Rozkład pól trzech „najważniejszych” modów rezonansowych w metalowej wnęce cylindrycznej

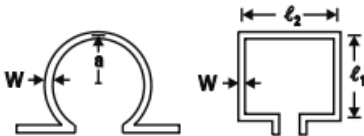
## Rezystory

Elementy rezystywne mają pochłaniać fale, a nie odbijać.

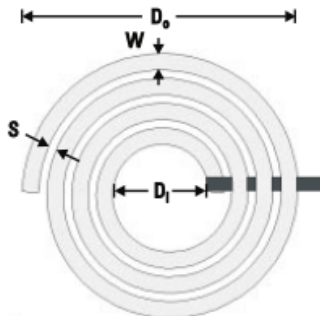
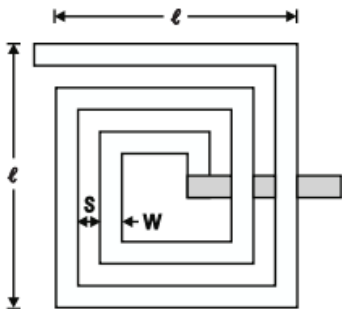
## Elementy indukcyjne



(a)

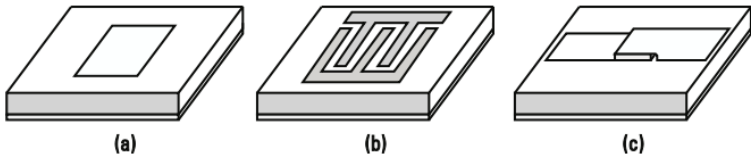


(b)



(c)

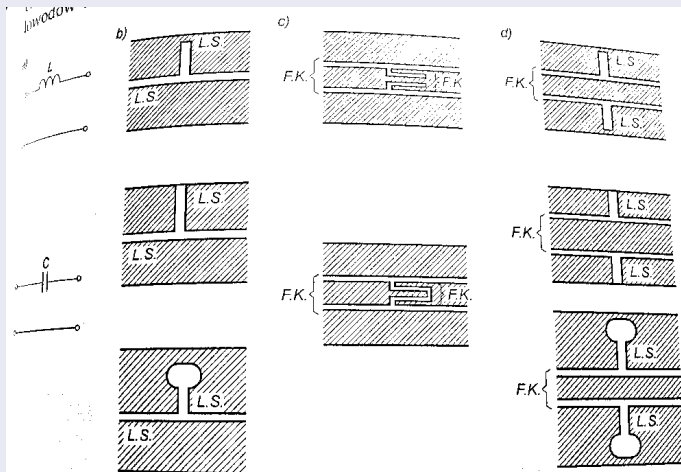
## Elementy pojemnościowe



**Figure 6.1** Monolithic capacitor configurations: (a) microstrip, (b) interdigital, and (c) MIM.

Rys.: Rodzaje kondensatorów w urządzeniach mikrofalowych

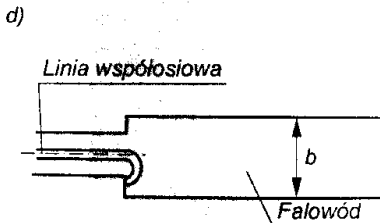
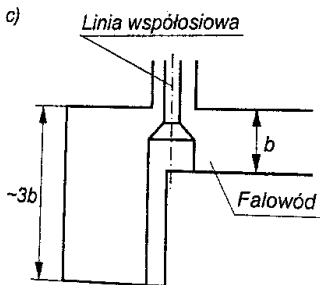
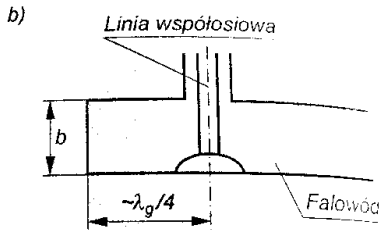
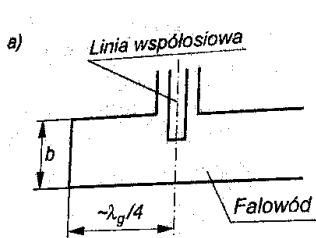
## Szeregowe elementy reaktancyjne



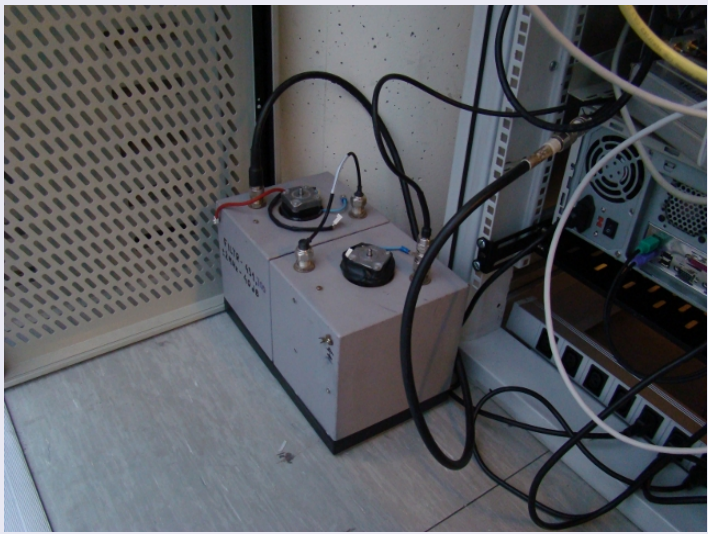
Szeregowe elementy reaktancyjne realizowane w technice linii szczelinowej i falowodu koplarnego: a) obwody zastępcze, b) realizacje w technice linii szczelinowej, c) realizacje w technice falowodu koplarnego, d) realizacje mieszane w technice falowodu koplarnego i linii szczelinowej



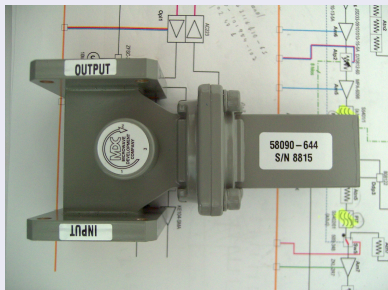
## Sprzęganie



# Filtry



## Cyrkulator



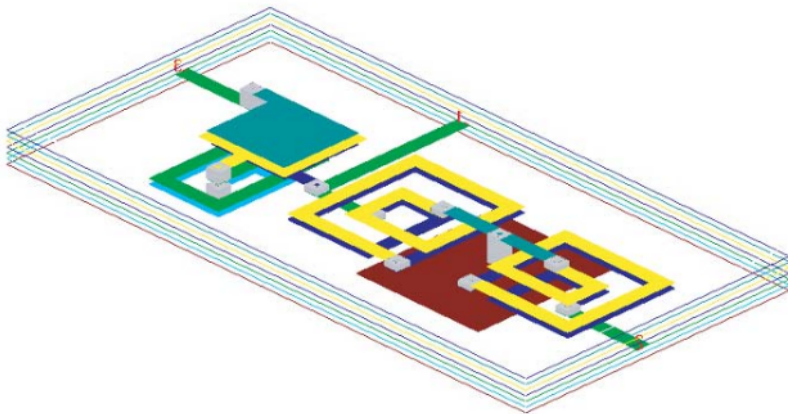
Cyrkulator mikrofalowy. Sygnał

wchodzący wrotami nr 1, wychodzi wrotami numer 2, sygnał wchodzący wrotami numer 2, wychodzi wrotami nr 3, sygnał wchodzący wrotami nr 3, wychodzi wrotami nr 1.

Macierz S cyrkulatora:

$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

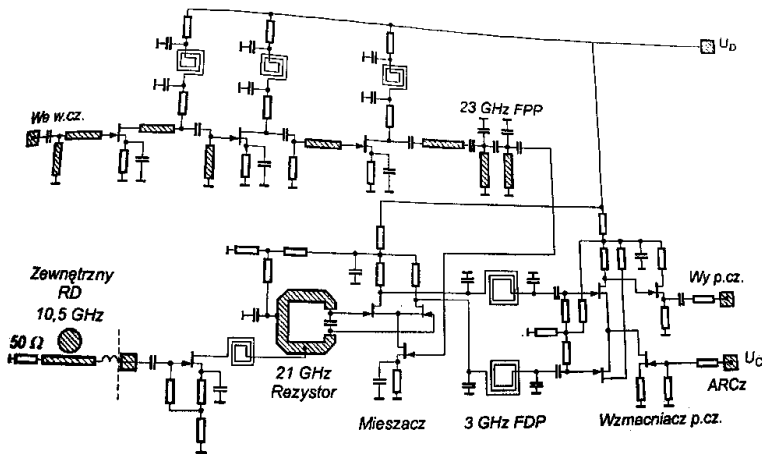
## Obwody mikrofalowe



A pseudo-lumped element lowpass/highpass diplexer realized using LTCC technology.

Rys.: Przykład projektu obwodu mikrofalowego

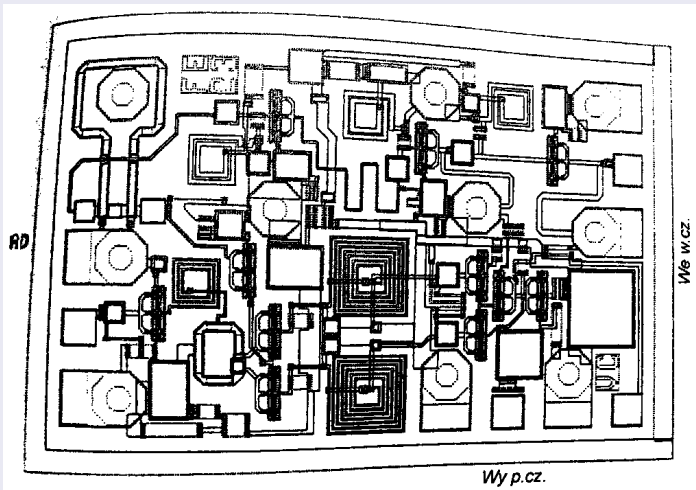
## Monolityczne Mikrofałowe Układy Scalone



Schemat elektryczny bloku wielkiej częstotliwości superheterodynowego odbiornika mikrofałowego na pasmo 23 GHz

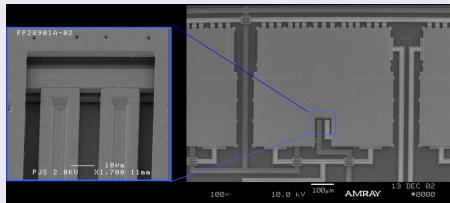
Rys.: Przykład schematu MMUS

## Monolityczne Mikrofałowe Układy Scalone...



Rys.: Przykład wykonania, całkowe rozmiary ok. 1,5mm

## Urządzenia MEMS



Mikroelektromechaniczne

systemy mikrofalowe (Micro Electro-Mechanical Systems)

Sposoby wytwarzania:

- technologie bezpośrednie – struktura jest wykonywana bezpośrednio np. za pomocą lasera
- technologie pośrednie – struktura wykonywana według szablonu np. maski fotolitograficznej