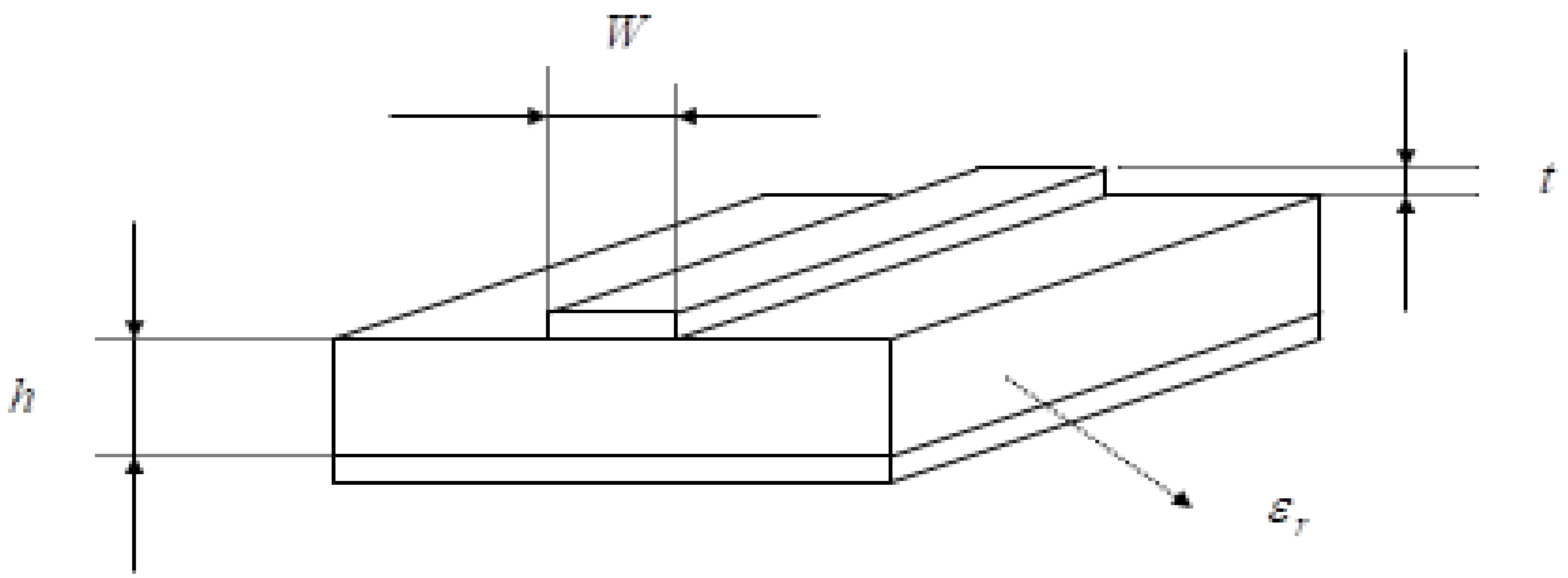
Diseño de Circuitos en Microondas

Líneas de Transmisión Microstrip

2023 – Laboratorio de Comunicaciones
Facultad de Ingeniería
UNMDP

Diseño de líneas de transmisión "microstrip"

- Una de las estructuras utilizadas para diseñar sistemas distribuidos de transmisión en plaquetas de tamaño comercial, especialmente en alta frecuencia, es la denominada estructura de microstrip. Esta estructura de línea de transmisión esta constituida por una tira de ancho que se construye sobre una plaqueta de material dieléctrico de espesor   y constante dieléctrica relativa   que se encuentra sobre un plano de masa, que es la otra pieza conductora de este sistema de transmisión de ondas TEM (Transverso – Electro – Magnética).
- La estructura se ve en la figura:

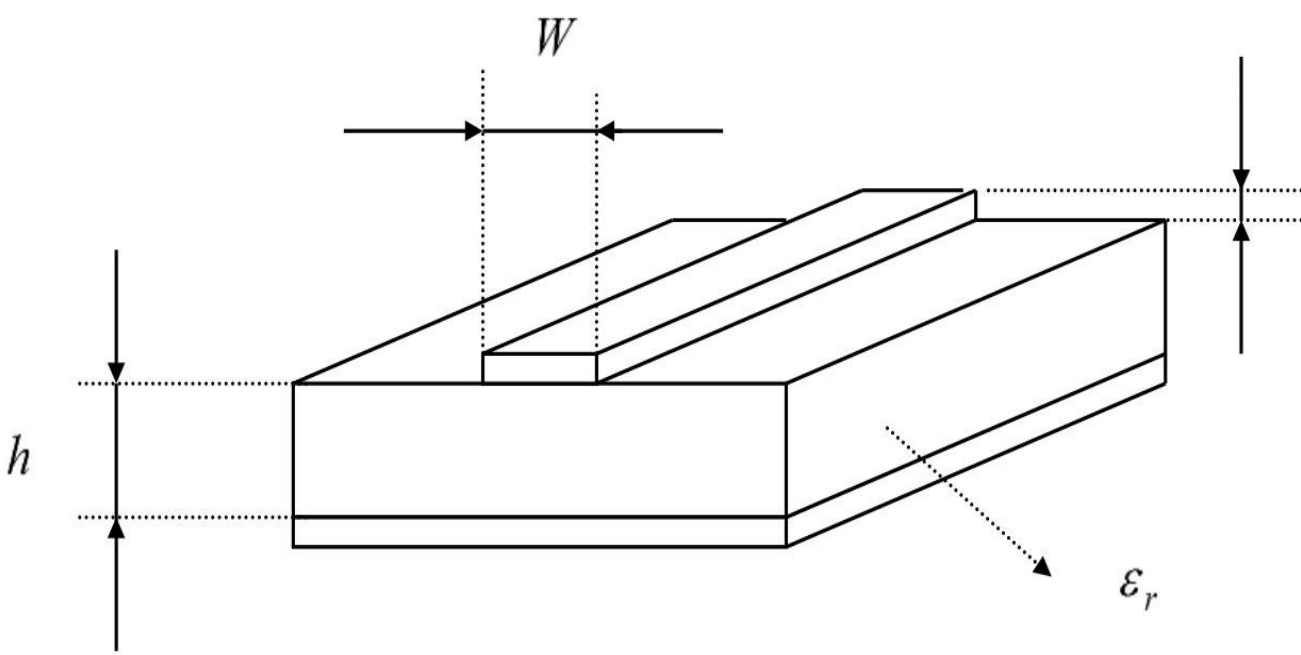


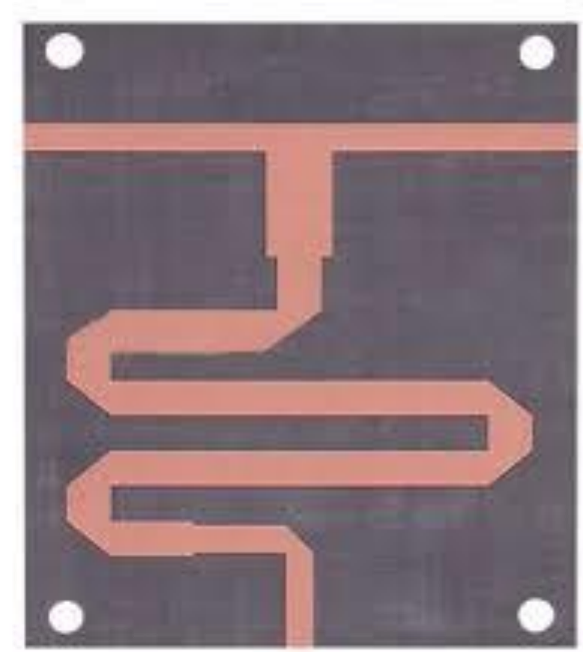
Líneas de transmisión
Circuitos de Parámetros Distribuidos

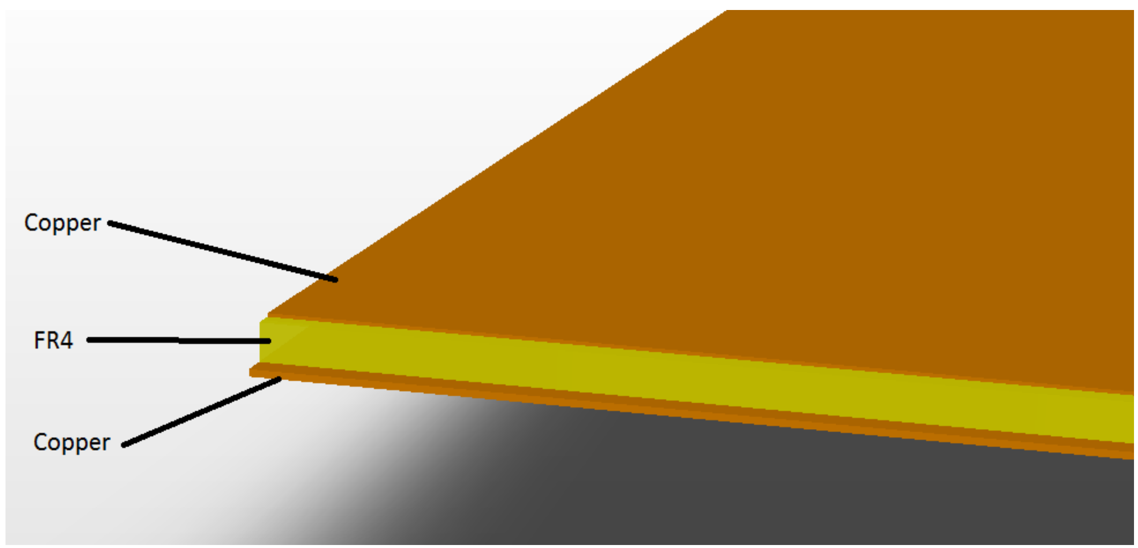
- Tamaño del circuito << longitud de onda
    - Parámetros Concentrados

- Tamaño del circuito del orden de la longitud de onda
    - **Parámetros Distribuidos**
        - Conductores de señal son líneas de transmisión
        - Impedancias, capacitancias, resistencias y conductancias por unidad de longitud
        - Resolver mediante ecuaciones de Maxwell
        - Impedancias intrínsecas y constantes de propagación

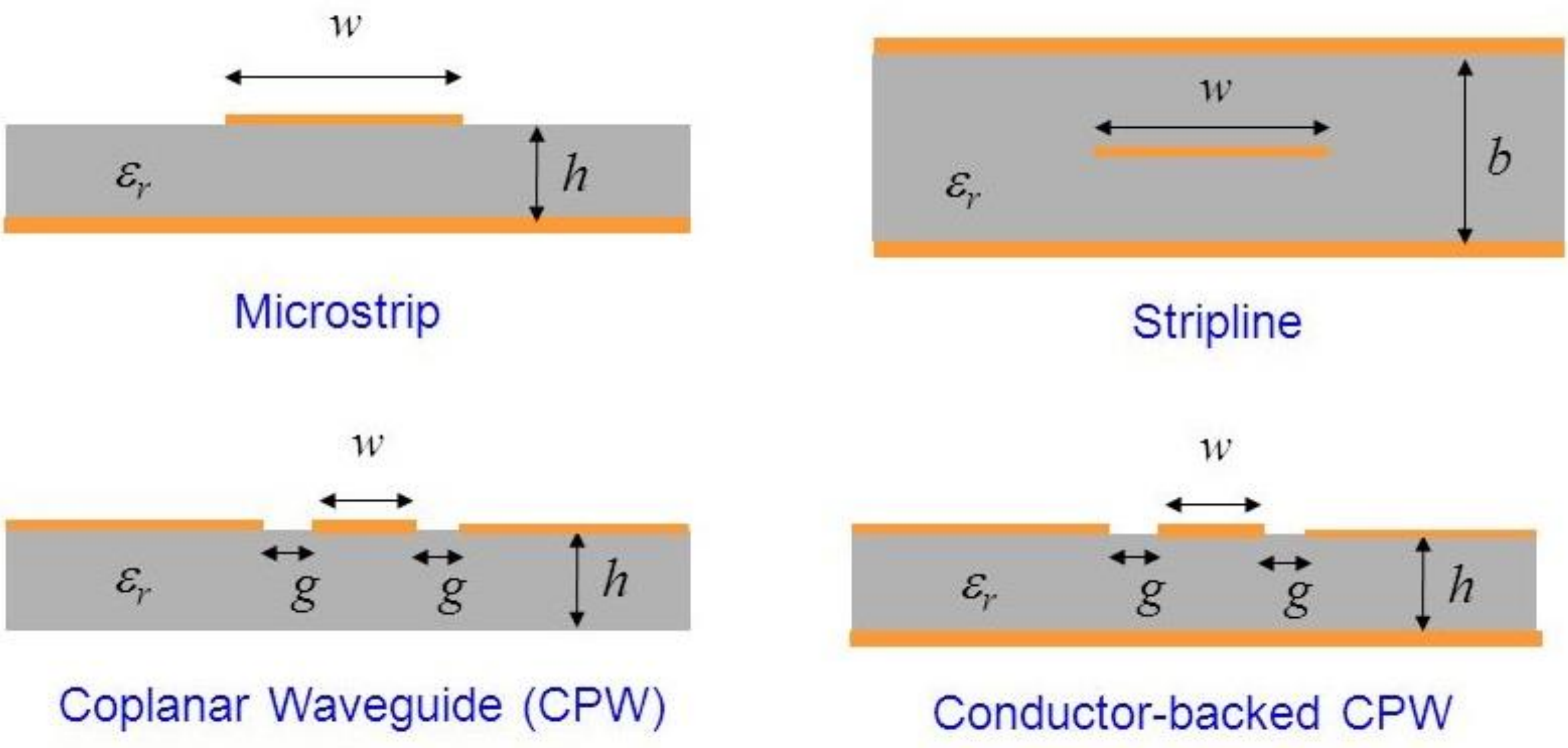
Líneas de transmisión “microstrip”







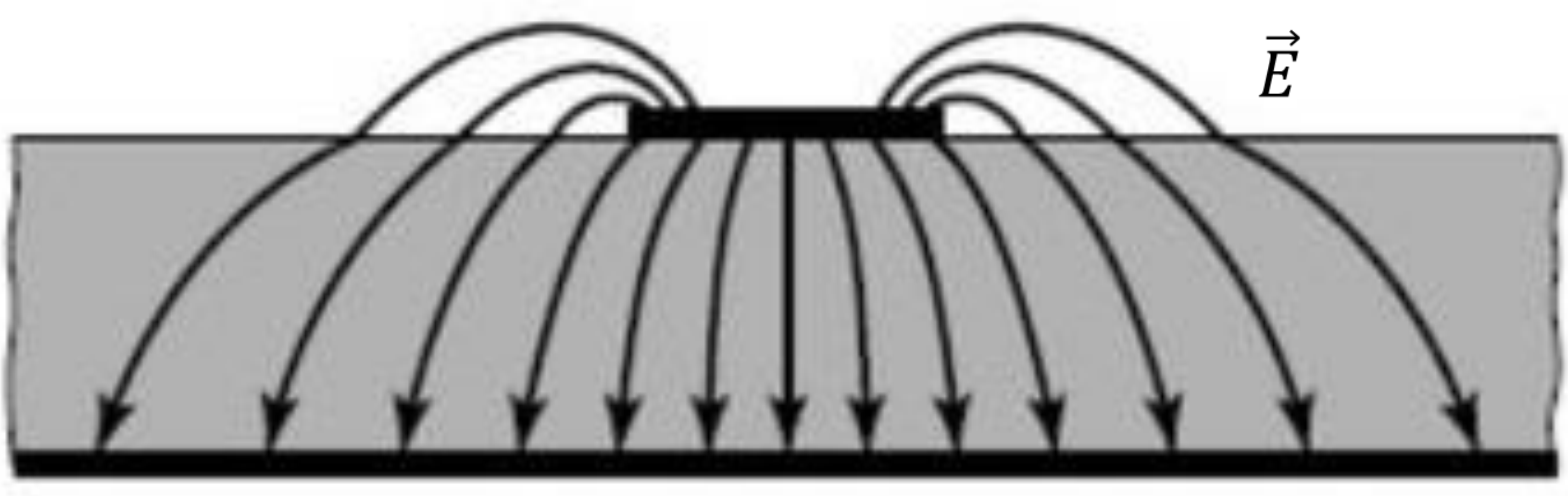
Líneas de transmisión planares



Líneas de transmisión microstrip

La estructura tiene como material dieléctrico entre conductores un material híbrido en parte de constante dieléctrica ϵ_r y en parte el vacío, de constante $\epsilon_r = 1$.

El sistema de transmisión ha sido analizado por Wheeler utilizando una transformación conforme que lleva la estructura que se ve en la figura, estudiada en corte transversal, y esencialmente de extensión infinita, a la forma de un capacitor de placas paralelas, donde el dieléctrico que lo rellena es una mezcla de dieléctrico de constante ϵ_r y el vacío.



Líneas de transmisión microstrip

La resolución matemática del problema del dieléctrico mixto entre placas del capacitor de placas paralelas del plano transformado no es simple, y ha sido desarrollada por Wheeler resultando de ella expresiones analíticas medianamente simples que determinan la impedancia característica y la constante dieléctrica efectiva de la mezcla de materiales dieléctricos para la línea de transmisión microstrip.

Estas expresiones fueron desarrolladas como expresiones de ***análisis y síntesis***, y son función de la constante dieléctrica del material ϵ_r, el espesor del material dieléctrico, h, y el ancho de la tira W.

Líneas de transmisión microstrip

En el procedimiento de **análisis** conociendo los valores de ϵ_r, h, y W, se puede determinar la impedancia característica de la línea, Z_0, y la constante dieléctrica efectiva ϵ_{re}, que es el parámetro que permite evaluar la longitud de onda dentro de la línea microstrip como $\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_{re}}}$.

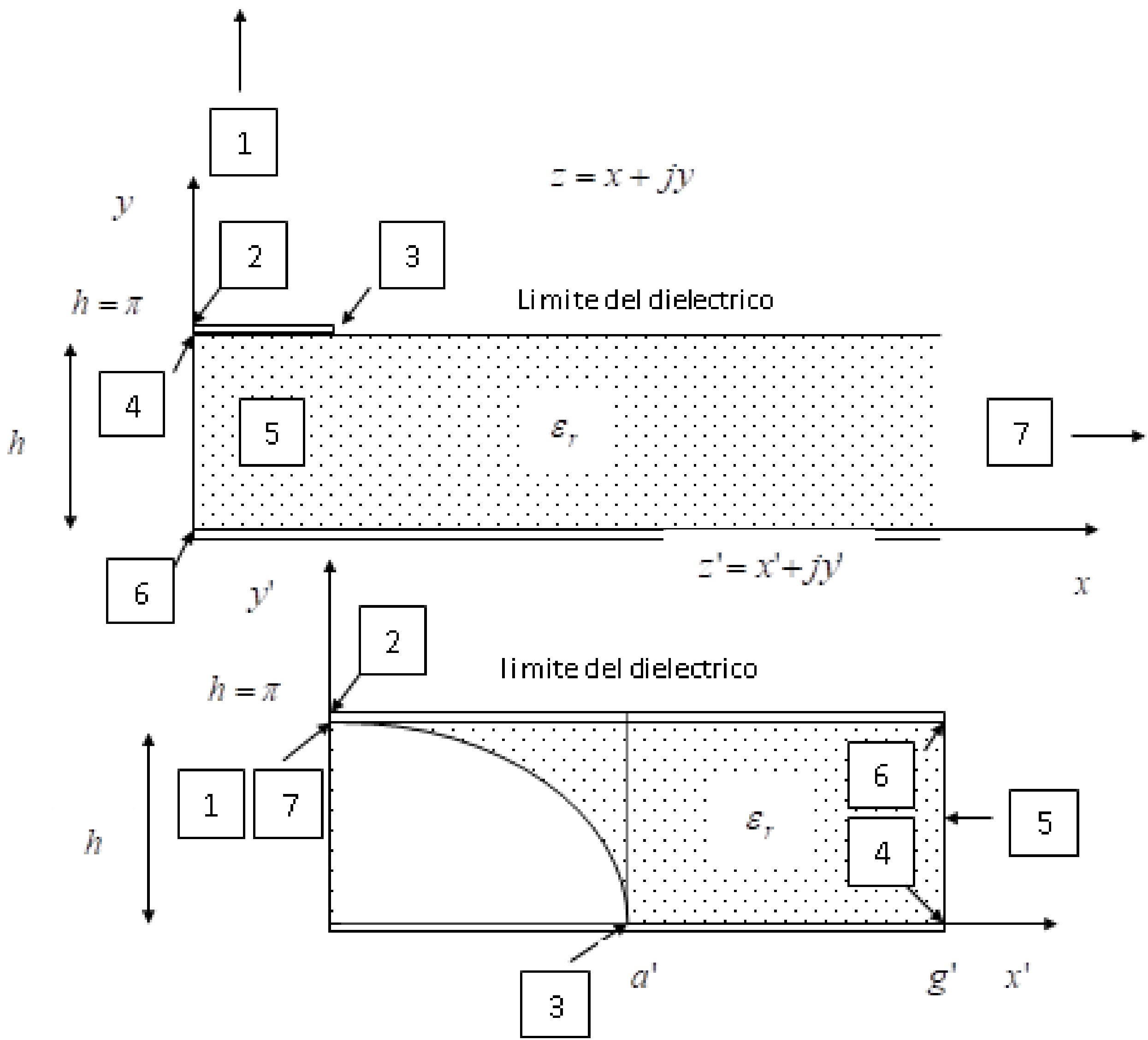
Conociendo los parámetros anteriormente mencionados se puede determinar el largo y ancho de la tira para una determinada línea de transmisión.

Las expresiones de **síntesis** permiten determinar, para un valor deseado de impedancia característica Z_0 , y conocidos los valores de ϵ_r, h, que dependen del material a utilizar, el ancho de la línea W.

El valor de la constante dieléctrica efectiva ε_{re} es resultado dependiente del valor de la impedancia característica deseada.

líneas de transmisión microstrip

La figura describe ciertos puntos de la estructura original, representada en el plano $z = x + jy$, que se transforman al plano $z' = x' + jy'$. La transformación aplicada es $z = j\pi + d.\tanh(z'/2) - z'$.



líneas de transmisión microstrip

Existen dos zonas de validez para la aproximación que se hace de la curva que determina la separación de los medios dieléctrico y vacío. Como se ve en la figura, el capacitor de placas paralelas transformado esta relleno de un dieléctrico mixto, pero es de extensión finita. El limite entre el dieléctrico y el vacío se transforma en una curva de aspecto similar a una elíptica.

La región delimitada por los puntos 1, 2, 3 y 7 es la zona fuera del dieléctrico, mientras que la zona delimitada por los puntos 3, 4, 6 y 7 es la región rellena de dieléctrico. Se necesita calcular la constante dieléctrica efectiva (relativa) de la región completa, mezcla de dieléctrico y vacío, que seguramente tendrá un valor intermedio entre 1 y ϵ_r.

se puede decir que variaría entre los valores:

líneas de transmisión microstrip

$\varepsilon_{re} = \epsilon_r$, cuando el ancho W de la tira fuera extremadamente grande, de forma que todo el campo quedara encerrado dentro del dieléctrico,

y $\frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1)$, cuando la tira es extremadamente delgada, y el campo se concentra por igual entre el dieléctrico y el vacío.

Luego:

$$\frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) \leq \varepsilon_{re} \leq \varepsilon_r$$

en este sentido se puede describir la constante ε_{re} en función de una cantidad que se puede denominar el factor de llenado q, que fue evaluado por Wheeler en su trabajo [1,2]:

$$\varepsilon_{re} = 1 + q(\varepsilon_r - 1)$$

Este factor de llenado varia entre:

$$1/2 \leq q \leq 1$$

.

Parámetros estáticos TEM

.

El propósito de diseño con líneas de transmisión microstrip es el de determinar normalmente los valores de W y la longitud eléctrica l_g de la línea para un determinado valor de impedancia característica deseada Z_0.

Para determinar la longitud eléctrica de la línea es necesario conocer la constante dieléctrica efectiva ϵ_{re} que define la longitud de onda dentro de la línea.

Expresiones para Z_0

Como es sabido una línea de transmisión de modo TEM tiene una impedancia característica dada por la expresión:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Siendo en este sistema la velocidad de fase igual a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Puede entonces encontrarse expresiones equivalentes para la impedancia característica:

$$Z_0 = vL$$

$$Z_0 = \frac{1}{vC}$$

Si ahora se supone que el material que rellena la estructura del microstrip es el vacío, estas expresiones se describen con $v = c = 3.10^8 m/s$:

Expresiones para Z_0

$$Z_{01} = \sqrt{\frac{L}{C_1}}$$

$$Z_{01} = cL$$

$$Z_{01} = \frac{1}{vC_1}$$

Ya que la inductancia es del mismo valor, porque solo cambia la constante dieléctrica del material. La combinación de estas expresiones lleva a describir la impedancia Z_0 como:

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{CC_1}}$$

La impedancia puede ser evaluada calculando la capacidad por unidad de longitud con la estructura con y sin dieléctrico.

Constante dieléctrica efectiva $\boldsymbol{\epsilon_{re}}$

Para la línea de transmisión microstrip rellena del vacío:

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$$

$$\frac{C}{C_1} = \left(\frac{c}{v}\right)^2$$

Este cociente entre las capacidades por unidad de longitud de la estructura con y sin dieléctrico se denomina la constante dieléctrica efectiva $\boldsymbol{\epsilon_{re}}$ y esta dada por:

$$\varepsilon_{re} = \left(\frac{c}{v}\right)^2$$

Finalmente resulta una expresión útil basada en la constante dieléctrica efectiva para la impedancia característica del sistema:

$$Z_0 = \frac{Z_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}$$

Longitud de onda equivalente del sistema

La longitud de onda y la velocidad de fase en el vacío están relacionadas por la expresión:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \qquad c = \lambda_0 f$$

En la línea de transmisión microstrip esta relación lleva al conocimiento de la longitud de onda en la línea:

$$\lambda_g = \frac{v}{f} \qquad v = \lambda_g f$$

Reemplazando en la expresión de la constante dieléctrica:

$$\varepsilon_{re} = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}$$

La longitud física de una línea de transmisión que debe representar una determinada longitud eléctrica θ se obtiene como:

Longitud de onda equivalente del sistema

La longitud física de una línea de transmisión que debe representar una determinada longitud eléctrica θ se obtiene como:

$$\beta l = \theta = \frac{2\pi}{\lambda_g} l$$

de donde se obtiene la longitud física:

$$l = \frac{\theta \lambda_g}{2\pi}$$

Expresiones de diseño.

Formulas de síntesis:

Para microstrip angostos (Es decir si $Z_0 > (44 - 2\varepsilon_r)$)

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{e^A}{8} - \frac{1}{4e^A}\right)^{-1}$$

$$A = \frac{Z_0\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right)$$

Si $W/h < 1.3$ La constante dieléctrica efectiva es:

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\{1 - \frac{1}{2A}\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right)\}^{-2}$$

Expresiones de diseño.

Si $\frac{W}{h} > 1.3$ La constante dieléctrica efectiva es:

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 10\frac{h}{W}\right)^{-0.555}$$

Esta expresiones permiten evaluar el ancho relativo $\frac{W}{h}$ y la constante dieléctrica relativa ε_{re} para una determinada impedancia característica Z_0 y constante del material ε_r.

Para líneas de transmisión microstirp anchas (Es decir si $Z_0 < (44 - 2\varepsilon_r)$):

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi}[d_\varepsilon - 1 - \ln(2d_\varepsilon - 1)] + \frac{\varepsilon_r - 1}{\pi\varepsilon_r}\left[\ln(d_\varepsilon - 1) + 0.293 - \frac{0.517}{\varepsilon_r}\right]$$

Donde

$$d_\varepsilon = \frac{59.95\pi^2}{Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Expresiones de diseño.

Nuevamente :

Si $W/h < 1.3$ La constante dieléctrica efectiva es:

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left[1 - \frac{1}{2A}\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right)\right]^{-2}$$

Si $\frac{W}{h} > 1.3$ La constante dieléctrica efectiva es:

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 10\frac{h}{W}\right)^{-0.555}$$

Formulas de análisis.

Las formulas de análisis permiten establecer los valores de la impedancia característica Z_0 en función del ancho relativo W/h y la constante del material ϵ_r.

Para líneas de transmisión microstrip angostas ($\frac{W}{h} < 3.3$):

$$Z_0 = \frac{119.9}{\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \left\{ \ln[4\frac{h}{W} + \sqrt{16\left(\frac{h}{W}\right)^2 + 2}] - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right) \right\}$$

Para líneas de transmisión microstrip anchas ($\frac{W}{h} > 3.3$):

$$Z_0 = \frac{119.9\pi}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \left\{ \frac{W}{2h} + \frac{\ln 4}{\pi} + \frac{\ln\left(\frac{e\pi^2}{16}\right)}{2\pi}\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r^2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2\pi\varepsilon_r}[\ln\left(\frac{\pi e}{2}\right) + \ln(\frac{W}{2h} + 0.94)] \right\}^{-1}$$

Ejemplo 1.

Determine el ancho W de la tira para diseñar una línea de transmisión microstirp de impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$ en un substrato de epoxy doble faz que tiene una constante dieléctrica relativa promedio $\varepsilon_r = 4.5$, y un espesor de plancha $h = 1.6\,mm$.

Debido a que el caso corresponde a la línea de transmisión microstrip estrecha, se emplea la ecuación:

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{e^A}{8} - \frac{1}{4e^A}\right)^{-1}$$

$$A = \frac{50\sqrt{2(4.5+1)}}{119.9} + \frac{1}{2}\left(\frac{4.5-1}{4.5+1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.5}\ln\frac{4}{\pi}\right) =$$

$$1.383079 + \frac{1}{2}\left(\frac{3.5}{5.5}\right)(0.451582 + 0.05368) = 1.383079 + 0.160766 = 1.543845$$

Luego:

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{e^{1.543845}}{8} - \frac{1}{4e^{1.543845}}\right)^{-1} = (0.58532001 - 0.0533896)^{-1} = 1.8799$$

Ejemplo 1.

Entonces:

$$W = 3.0079\, mm$$

El valor de la constante dieléctrica efectiva en la línea es:

$$\varepsilon_{re} = \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{2}\left(1 + 10\,\frac{1}{1.8799}\right)^{-0.555} = 3.379016$$

Por lo tanto la longitud de onda en esta línea de transmisión es igual a:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} = \frac{c/f}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} = \frac{3.10^8}{f\sqrt{3.379016}} = \frac{163202245.76191}{f}$$

Por ejemplo la longitud de onda es $\lambda_g = 16.32\ cm$ a una frecuencia de $f = 1GHz$

Diseño de líneas de transmisión “microstrip”

PASOS:

1- Definir si es microstrip angosto o ancho.

Si es angosto:

2- Calcular W/h, a partir de A.

3- Calcular ϵ_{re}. Esto a su vez va a depender si $W/h > 1.3$ ó $W/h < 1.3$.

Si es ancho:

2- Calcular W/h, con a partir de $d_{\in}$.

3- Calcular ϵ_{re}. Esto a su vez va a depender si $W/h > 1.3$ ó $W/h < 1.3$.

Análisis de líneas de transmisión “microstrip”

PASOS:

1- Definir si es microstrip angosto o ancho.

2- Calcular Z_0 usando la fórmula correspondiente.