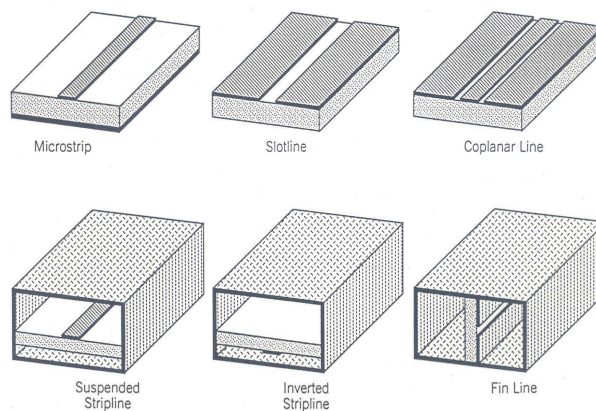


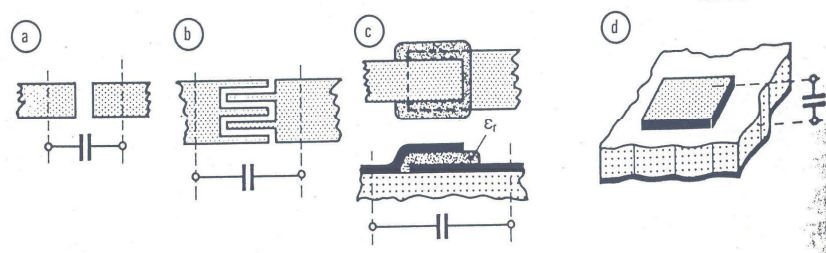
Lignes imprimées

- Lignes microruban
- Lignes à fente
- striplines
- Guides d'onde coplanaires (CPW)

Lignes imprimées

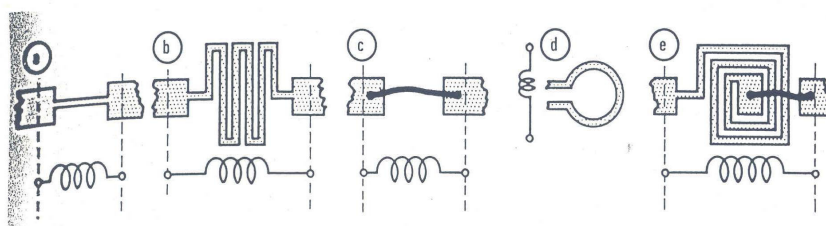


Lignes imprimées



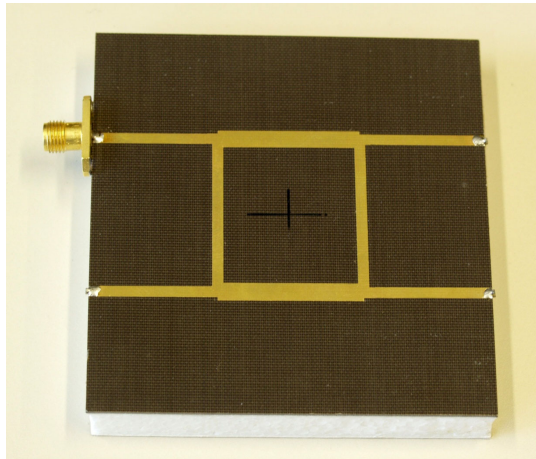
3MAG-EPFL

Lignes imprimées

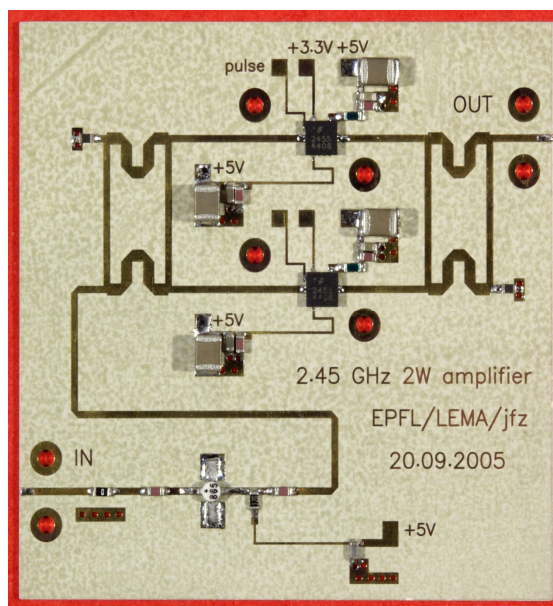


4MAG-EPFL

Lignes imprimées

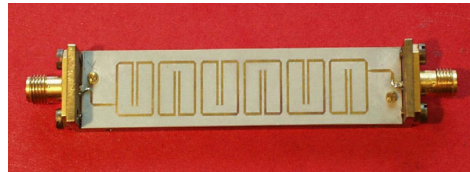
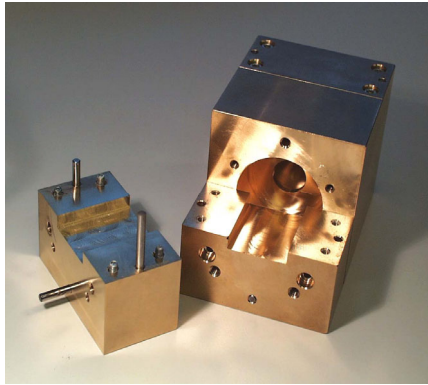


5MAG-EPFL



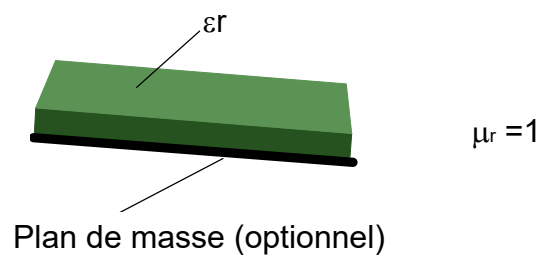
6MAG-EPFL

Lignes imprimées



7MAG-EPFL

Substrat diélectrique



8MAG-EPFL

- Céramiques : Alumine (Al_2O_3) et oxydes de Béryllium (BeO)
 - $6 < \epsilon_r < 10$ $2 \cdot 10^{-4} < \tan \delta < 4 \cdot 10^{-4}$

- Polystyrène, polyolfin, polyester, polytetrafluorethylène (Teflon)
 - $2 < \epsilon_r < 3$ $\tan \delta$ autour de $5 \cdot 10^{-4}$
- Matériaux synthétiques chargés avec de la poudre de céramique ou des fibres de verre
 - $2 < \epsilon_r < 10$ $\tan \delta$ autour de $1 \cdot 10^{-3}$
- FR4
 - $\epsilon_r = 4.4$ $\tan \delta$ autour de $2 \cdot 10^{-2}$

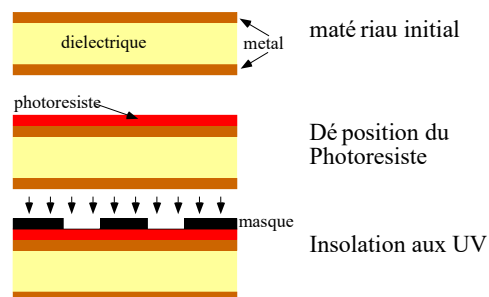
- Silicium
 $\epsilon_r = 11.9$ $\tan \delta$ autour de $4 \cdot 10^{-4}$
- Arséniure de gallium
 $\epsilon_r = 13$ $\tan \delta$ autour de $6 \cdot 10^{-4}$

- Bon marché
- Facile à produire
- Bonne répétitivité
- Léger, profil bas
- Compatible avec les circuits intégrés

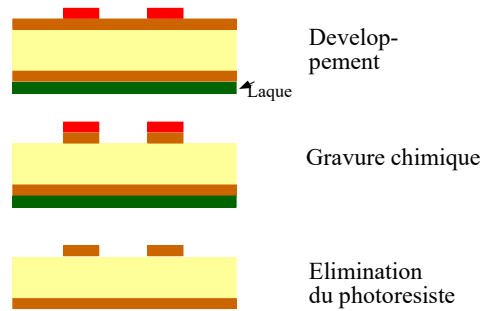
Circuits imprimés: inconvénients

- Pertes relativement élevées
- dispersion
- Structures inhomogènes donc difficile à analyser

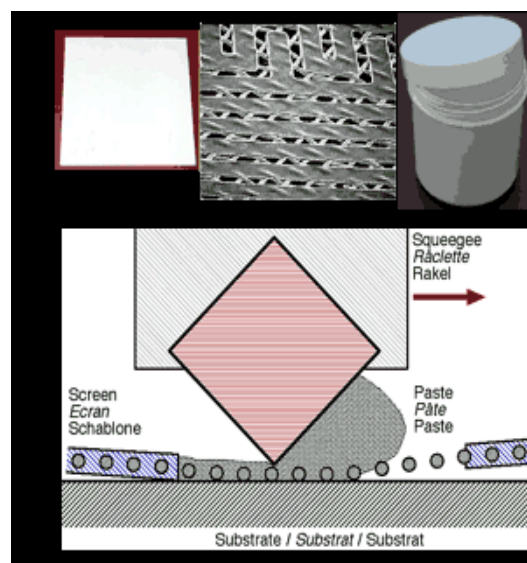
Procédé de fabrication en couches minces



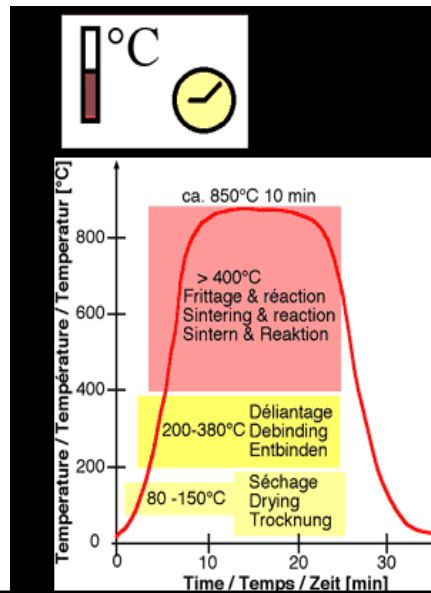
Procédé de fabrication en couches minces



Couches épaisses (sérigraphie)

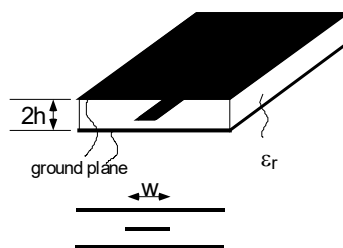


Couches épaisses (sérigraphie)



17MAG-EPFL

Stripline



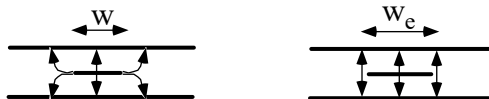
18MAG-EPFL

- Diélectrique homogène
- Deux conducteurs distincts

Le mode TEM est supporté

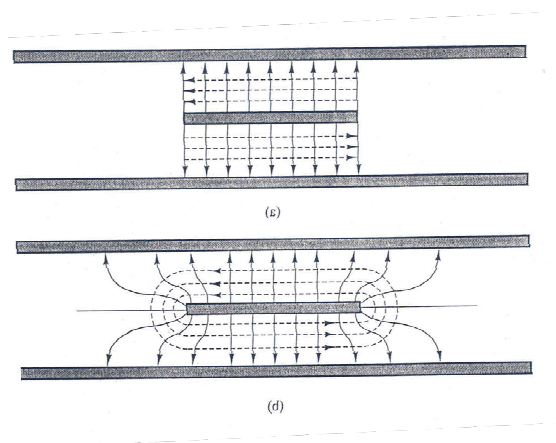
- Nous avons besoin de:
 - L'impédance caractéristique
 - La vitesse de groupe
 - La vitesse de phase
 - La constante de propagation longitudinale
 - La longueur d'onde guidée

Stripline : approximation

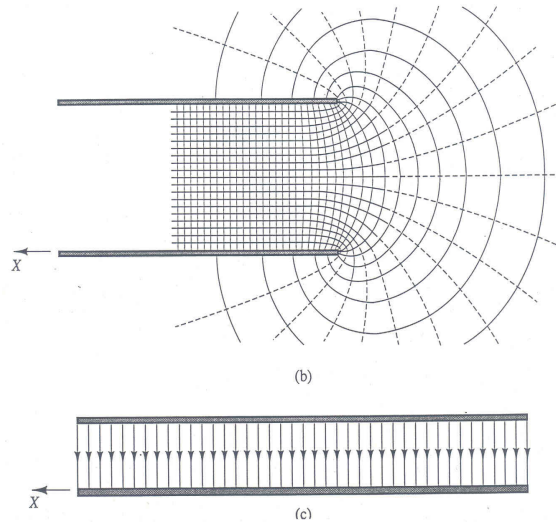


La ligne stripline est équivalente à deux guides à plaques parallèles en parallèle

Stripline : approximation



Guide à plaques parallèles



23MAG-EPFL

Guide à plaques parallèles: mode TEM

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0} = \sqrt{\epsilon_r} k_0$$

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\lambda = \frac{2\pi v_\phi}{\omega} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

24MAG-EPFL

Guide à plaques parallèles: mode TEM

Impédance caractéristique

$$u(z) = - \int_{y=0}^{y=b} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = V_o e^{-\gamma z}$$

$$i(z) = \oint_{l_{conduct}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_o} V_o}{\sqrt{\mu_o}} \frac{w}{b} e^{-\gamma z}$$

$$Z_o = 120 \pi$$

$$Z_c = \frac{u}{i} = \frac{b}{w} \frac{\sqrt{\mu_o}}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_o}} = \frac{b}{w} \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Stripline

Le coefficient de propagation longitudinal, les vitesses de groupe et de phase, la longueur d'onde sont identiques au cas du guide à plaques parallèles

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_r \epsilon_o \mu_o} = \sqrt{\epsilon_r} k_o$$

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_o \mu_o}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_o \mu_o}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\lambda = \frac{2\pi v_\phi}{\omega} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

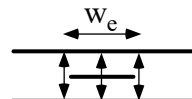
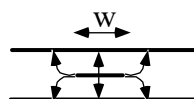
L'impédance caractéristique correspond en première approximation à l'impédance de guides à plaques parallèles en parallèle.

$$Z_c = \left(\frac{1}{Z_c^{paral.}} + \frac{1}{Z_c^{paral.}} \right)^{-1} = \frac{h}{2w} \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Stripline : approximation de second ordre (analyse)

$$Z_c = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{2h}{w_e + 0.441(2h)}$$

$$\frac{w_e}{2h} = \frac{w}{2h} \begin{cases} 0 & \text{pour } \frac{w}{2h} > 0.35 \\ \left(0.35 - \frac{w}{2h}\right)^2 & \text{pour } \frac{w}{2h} < 0.35 \end{cases}$$



Stripline : approximation de second ordre (synthèse)

$$\frac{w}{2h} = \begin{cases} x & \text{pour } \sqrt{\epsilon_r} Z_c < 120 \\ 0.85 - \sqrt{0.6 - x} & \text{pour } \sqrt{\epsilon_r} Z_c > 120 \end{cases}$$

$$x = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r} Z_c} - 0.441$$



Stripline : attenuation

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad [Np/m]$$

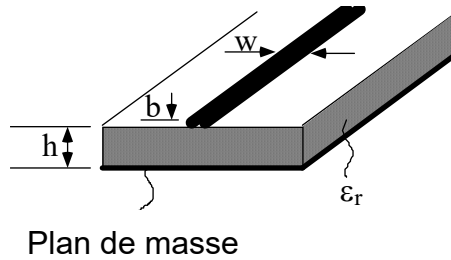
$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \quad [Np/m]$$

$$\alpha_c = \begin{cases} \frac{0.0027 R_s \epsilon_r Z_c}{30\pi(2h-t)} A & \text{pour } \sqrt{\epsilon_r} Z_c < 120 \\ \frac{0.16 R_s}{Z_c 2h} B & \text{pour } \sqrt{\epsilon_r} Z_c > 120 \end{cases} \quad [Np/m]$$

$$A = 1 + \frac{2w}{2h-t} + \frac{2h+t}{\pi(2h-t)} \ln\left(\frac{4h-t}{t}\right) \quad R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

$$B = 1 + \frac{2h}{(0.5w+0.7t)} \left(0.5 + \frac{0.414t}{w} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi w}{t} \right)$$

Ligne microruban (ou microstrip)

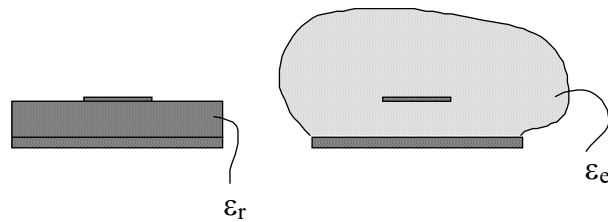


Ligne ruban

- Ligne inhomogène, mais avec deux conducteurs (piste et plan de masse)

Mode quasi TEM

Ligne microruban: permittivité effective



$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}}$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e}$$

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r$$

Ligne microruban: permittivité effective

$$\epsilon_e = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \text{ pour } \frac{w}{h} \leq 1$$

$$\epsilon_e = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-0.5} \text{ pour } \frac{w}{h} \geq 1$$

Ligne microruban: permittivité effective

Erreur : moins de 1 % pour $0.05 \leq w/h \leq 20$ et $\epsilon_r \leq 16$

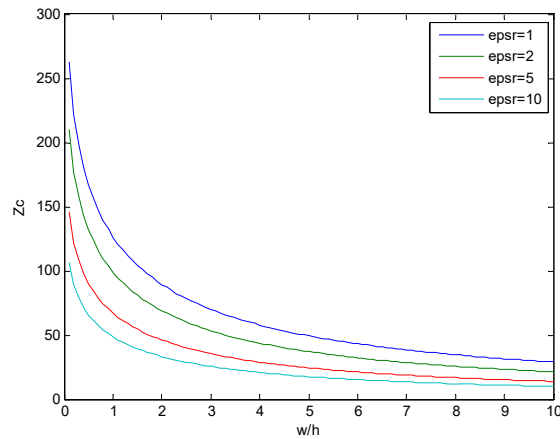
Ligne microruban: impédance caractéristique (analyse)

$$Z_c = \frac{Z_o}{2\pi\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) \quad \text{pour } \frac{w}{h} \leq 1$$

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_e}} \left(\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right) \right)^{-1} \quad \text{pour } \frac{w}{h} > 1$$

où $Z_o = 120\pi$ est l'impédance caractéristique de vide

Ligne microruban: impédance caractéristique (analyse)



Ligne microruban: impédance caractéristique (synthèse)

$$\frac{w}{h} = 4 \left[\frac{1}{2} e^A - e^{-A} \right]^{-1} \quad \text{pour} \quad \frac{w}{h} \leq 2$$

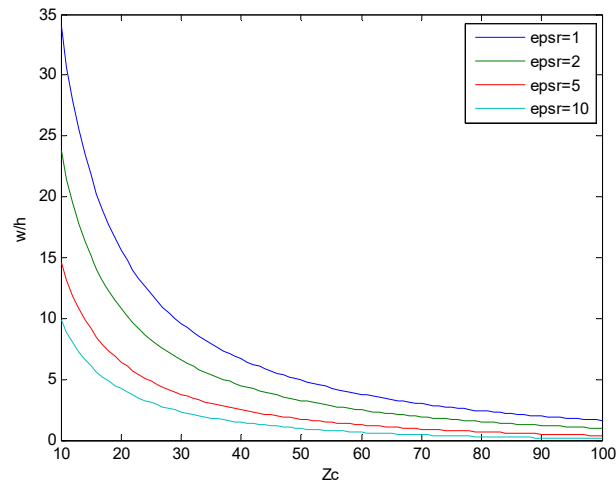
$$\frac{w}{h} = \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \ln(2B - 1)) \quad \text{pour} \quad \frac{w}{h} \geq 2$$

with

$$A = \frac{Z_c}{Z_0} \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0}{Z_c}$$

Ligne microruban: impédance caractéristique (synthèse)



Atténuation d'une ligne microruban

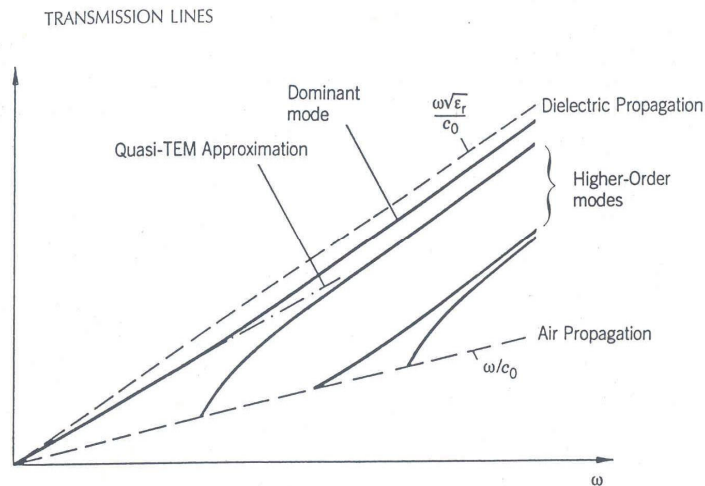
$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad [Np/m]$$

$$\alpha_d = \frac{k_o \epsilon_r (\epsilon_e - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\epsilon_e} (\epsilon_r - 1)} \quad [Np/m]$$

$$\alpha_c = \frac{R_s}{wZ_c} \quad [Np/m]$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}}$$

Modes d'une ligne microruban



41MAG-EPFL

Dispersion dans une ligne microruban

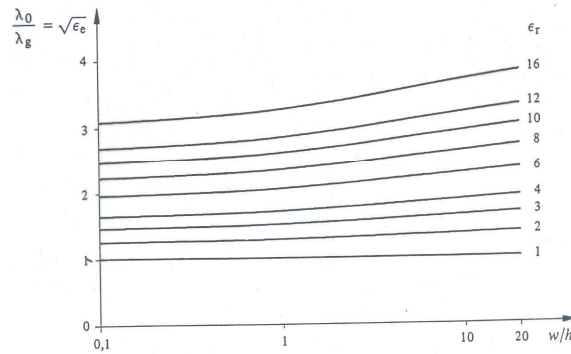
$$\epsilon_{ed}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_e}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} G$$

$$f_p = \frac{Z_c}{2h\mu_0}$$

$$G = 0.6 + 0.009Z_c$$

42MAG-EPFL

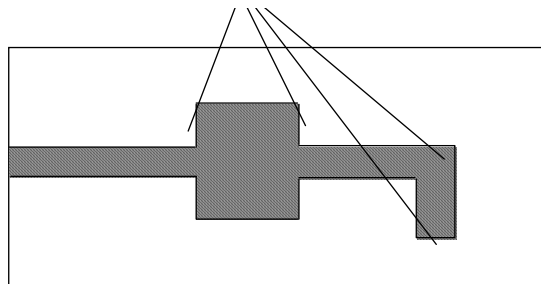
Dispersion dans une ligne microruban



Rayonnement d'une ligne microruban

Un mode TEM ne rayonne pas=> le rayonnement survient quand des modes d'ordre supérieurs sont excités par une discontinuité

Excitation locale de modes supérieurs

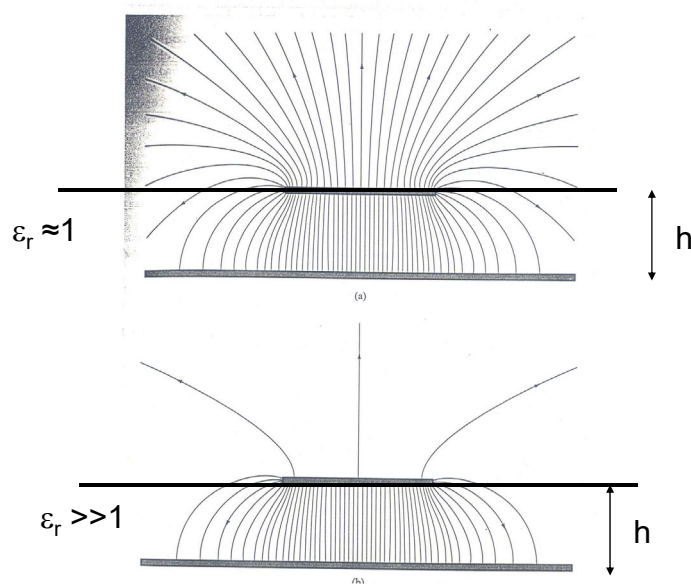


Rayonnement d'une ligne microruban

Pour une ligne $50\ \Omega$, la fréquence f_m pour laquelle le rayonnement demeure inférieur à 1 % de la puissance totale est donnée par:

$$f_m [\text{GHz}] = \frac{2.144 \sqrt{\epsilon_r}}{h [\text{mm}]}$$

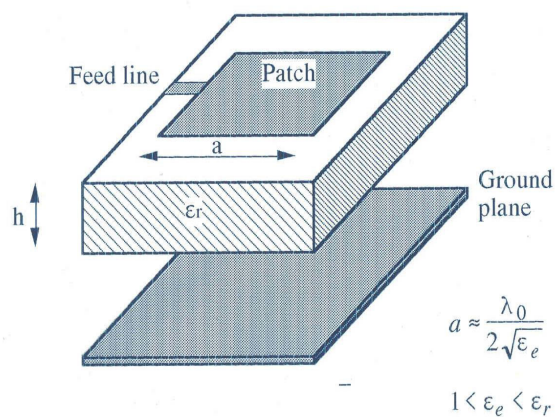
Rayonnement d'une ligne microruban



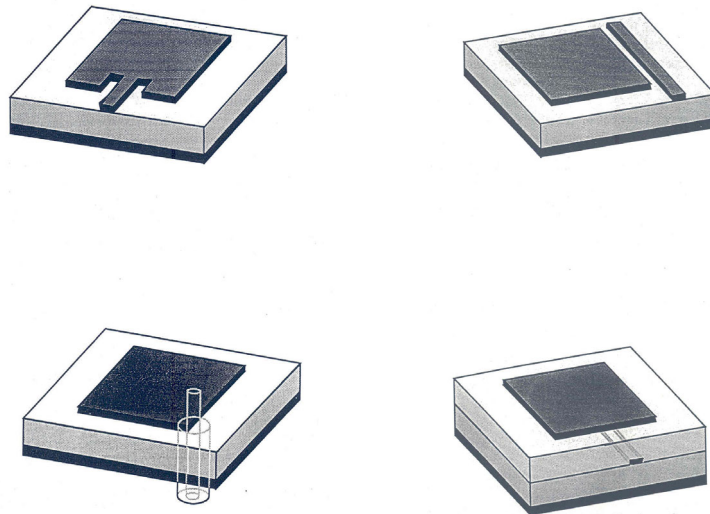
Rayonnement d'une ligne microruban

	h/λ_o	ϵ_r
Ondes guidées	↓	↑
Ondes rayonnées	↑	↓

Antennes microruban

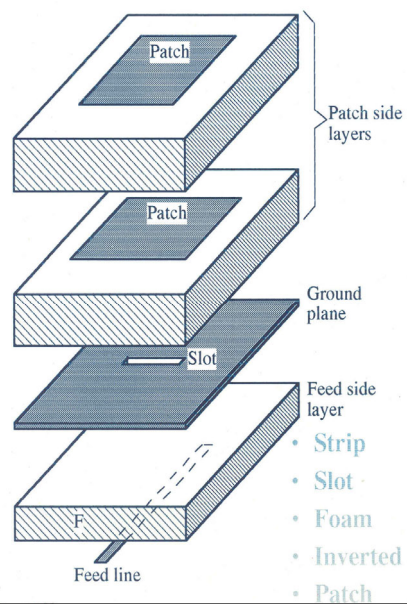


Antennes microruban



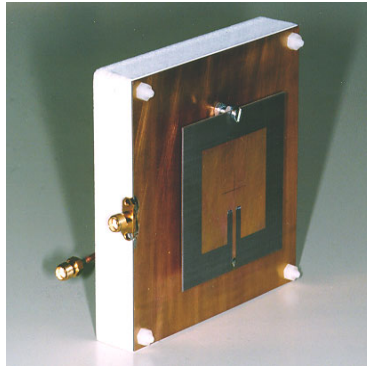
49MAG-EPFL

Antennes microruban



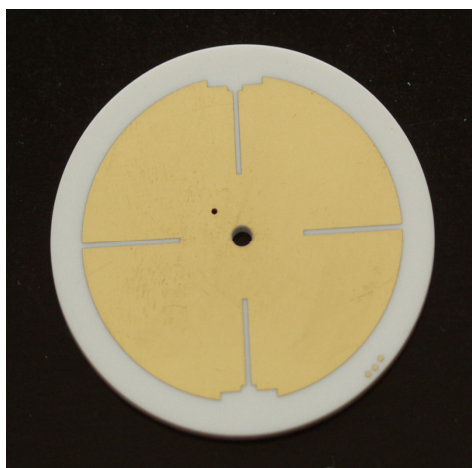
50MAG-EPFL

Antennes microruban



51MAG-EPFL

Antennes microruban



52MAG-EPFL

	Câble coaxial	Guide d'onde	stripline	microruban
Mode dom.	TEM	TE ₁₀	TEM	Quasi TEM
autres	TE, TM	TE, TM	TE, TM	Hybrid
Dispersion	aucune	moyenne	aucune	faible
Bande pass-	élevée	basse	élevée	élevée
Pertes	moyen.	basse	élevée	élevée
P max	moyen.	élevée	basse	basse
Dim.	grandes	grandes	moyen.	petites
Fabrication	moyen.	difficile	facile	facile
Composants	difficile	difficile	moyen.	facile