

Chapitre 7

Éléments Passifs Hyperfréquences

7.1 Lignes Microruban

La ligne microruban est très utilisée pour la fabrication de circuits hyperfréquences, principalement parce qu'elle s'apprête bien à une fabrication par procédé photolithographique, et également parce qu'elle permet une intégration simple des composants passives et actives par montage en surface.

Dans une ligne microruban, les lignes de champ sont surtout concentrées dans le diélectrique entre la ligne métallisée et le plan de masse, bien qu'une faible portion se retrouve également dans l'air au-dessus du substrat. Cela implique qu'une ligne microruban ne puisse supporter un mode TEM pur, puisque la vitesse de phase des champs TEM dans le diélectrique $c / \sqrt{\epsilon_r}$ diffère de celle dans l'air.

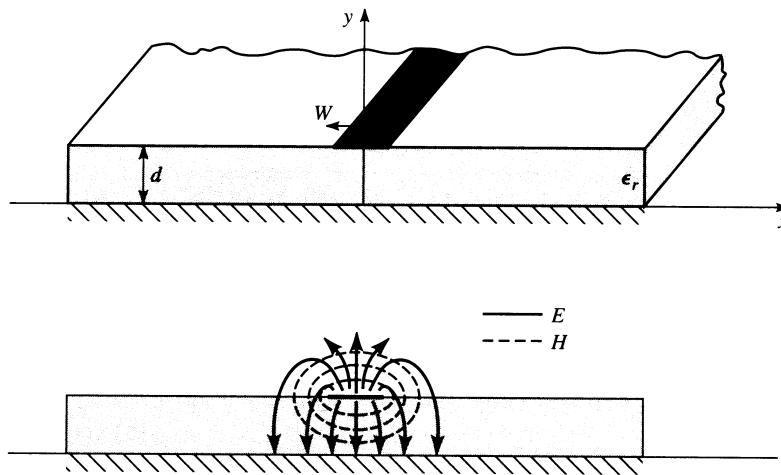


Figure 7.1: Ligne microruban

En réalité, les champs exacts d'une structure microruban correspondent à une onde TM-TE dont l'analyse exacte dépasse le cadre de ce cours. Toutefois, dans la plupart des cas

pratiques, l'épaisseur du diélectrique est électriquement suffisamment petite ($d \ll \lambda$) et par conséquent les champs sont quasi-TEM, c'est-à-dire qu'ils correspondent au cas statique. Par conséquent, on peut approximer la constante de propagation, la vitesse de phase et l'impédance caractéristique à l'aide de solutions statiques et quasi-statiques. La vitesse de phase et la constante de propagation sont alors données par :

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad \text{Équation 7-1}$$

$$\beta = \beta_o \cdot \sqrt{\epsilon_e} \quad \text{Équation 7-2}$$

Où

$$\beta_o = \frac{2\pi \cdot f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_o} \quad \text{Équation 7-3}$$

Et ϵ_e est la constante diélectrique effective de la ligne microruban. Puisque les lignes de champ sont en partie dans le diélectrique et en partie dans l'air, la constante diélectrique effective prend une valeur intermédiaire entre 1 et la constante diélectrique du substrat ϵ_r :

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r$$

La constante diélectrique effective ϵ_e dépend de l'épaisseur du substrat d et de la largeur de la trace métallisée W . Elle peut être approximée par l'équation suivante :

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{d}{W}}} \quad \text{Équation 7-4}$$

La constante diélectrique effective correspond à la constante diélectrique d'un milieu homogène qui remplacerait les régions diélectriques et l'air de la structure microruban.

L'impédance caractéristique de la ligne peut être approximée comme suit :

$$Z_o = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \cdot \ln(W/d + 1.444)]} & W/d \geq 1 \end{cases} \quad \text{Équation 7-5}$$

Si maintenant nous voulons obtenir le rapport W/d pour réaliser une ligne d'impédance caractéristique Z_o , l'équation suivante peut être utilisée :

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8 \cdot e^A}{e^{2A} - 2} & W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \cdot \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \cdot \epsilon_r} \cdot \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & W/d > 2 \end{cases} \quad \text{Équation 7-6}$$

Où

$$A = \frac{Z_o}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \cdot \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2 \cdot Z_o \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

L'atténuation dans la ligne microruban due aux pertes du diélectrique est :

$$\alpha_d = \frac{k_o \cdot \epsilon_r \cdot (\epsilon_e - 1) \cdot \tan(\delta)}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_e} \cdot (\epsilon_r - 1)} \cdot \frac{Np}{m} \quad \text{Équation 7-7}$$

Où $\tan(\delta)$ est la perte tangentielle du diélectrique.

L'atténuation due aux pertes dans le conducteur est approximée par :

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_o \cdot W} \cdot Np/m \quad \text{Équation 7-8}$$

où

$$R_s = \sqrt{\omega \cdot \mu_o / 2\sigma} \quad \text{Équation 7-9}$$

R_s correspond à la résistivité de surface et σ à la conductivité du matériau conducteur.

7.2 Éléments localisés

Les éléments localisés se doivent d'être très petits par rapport à la longueur d'onde (dimensions inférieures à $\lambda/10$) afin d'introduire un déphasage négligeable. La technologie de couches minces (thin film) permet de réduire les dimensions de ces éléments en assurant leur fonctionnement localisé jusqu'au environ 12 GHz. Au-delà, des modèles qui prennent en considération les effets parasites sont nécessaires.

7.2.1 Résistances

Les propriétés des résistances hyperfréquences sont les mêmes que celles des résistances basses fréquences : une bonne stabilité, un faible coefficient thermique de résistance et une bonne capacité à dissiper la puissance.

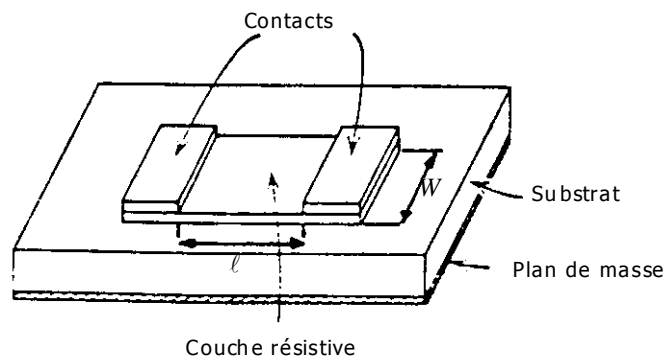


Figure 7.2 : Résistance à couche mince.

$$R \Big|_{\omega=0} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot W} = R_c \cdot \frac{l}{W}$$

Équation 7-10

Où

ρ est la résistivité du matériau de la couche résistive en Ωm

t est l'épaisseur de la couche résistive

l est la longueur de la trace

W est la largeur de la trace

R_c est la résistance au carré en Ω

Si la longueur de la trace résistive devient importante par rapport à la longueur d'onde, il faut alors tenir compte de la propagation :

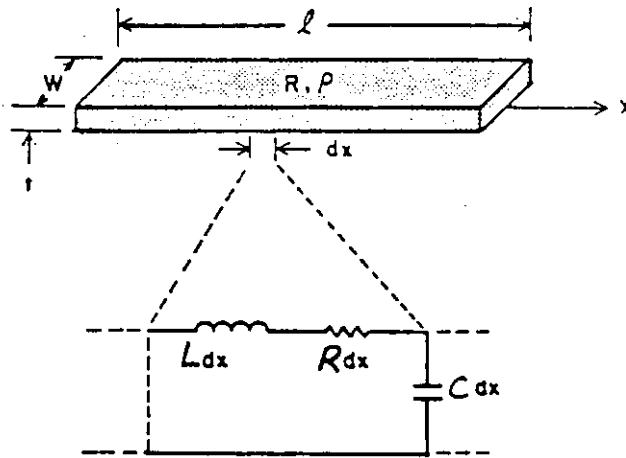


Figure 7.3: Modèle distribué de résistance

7.2.2 Inductances

Les faibles valeurs d'inductance (inférieures à 2 nH) peuvent être obtenues avec des tronçons de ligne microruban de haute impédance, avec des fils de thermo-compression ou encore avec des rubans.

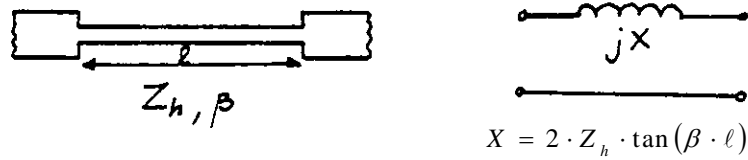


Figure 7.4: Inductance réalisée avec une ligne microruban

Pour des valeurs plus élevées, on utilise des bobines ou des inductances spirales.

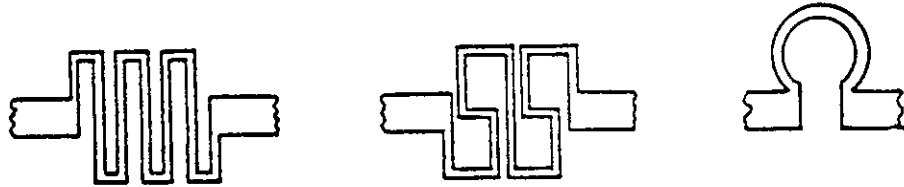


Figure 7.5: Inductances spirales

À hautes fréquences, une inductance spirale peut être représentée par un circuit équivalent à éléments localisés :

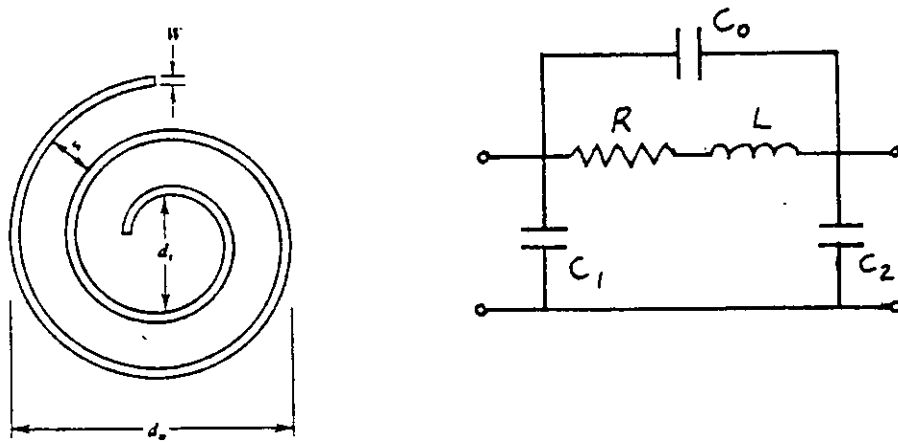


Figure 7.6: Circuit équivalent d'une inductance spirale

7.2.3 Condensateurs

Trois types de condensateurs sont principalement utilisés avec les circuits microruban, les condensateurs puce céramique multicouche, les condensateurs métal-oxyde-métal (monocouche) et les condensateurs inter-digitales.



Figure 7.7: Condensateur puce céramique multicouche

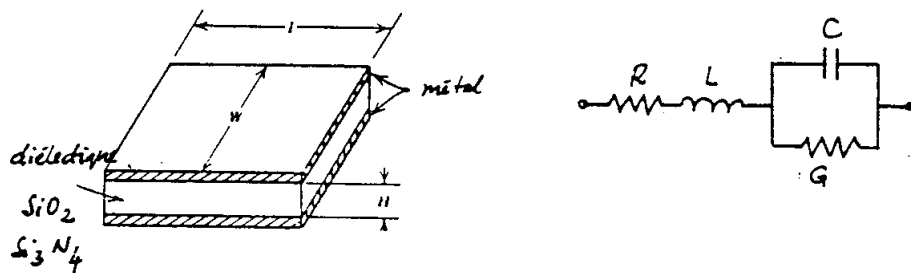


Figure 7.8: Condensateur métal-oxide-métal



Figure 7.9: Condensateur interdigital