

Circuits en lignes microruban : applications et aspects technologiques

Autor(en): **Zurcher, J.-F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 17

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905000>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Circuits en lignes microruban : applications et aspects technologiques

J.-F. Zurcher

621.3.049.771;

Après quelques définitions et la présentation de formules approchées de calcul, les circuits en lignes microruban sont décrits sous l'angle de leurs applications et de leur fabrication. On montre également les différences et les similitudes existant avec les circuits imprimés et les guides d'ondes. La fabrication est étudiée depuis le masque jusqu'au montage de composants, qui sont également passés en revue. Finalement, on présente quelques exemples de réalisations.

Der Aufsatz befasst sich mit dem Aufbau und der Herstellung von Schaltungen mit Mikro-Streifenleitungen. Einleitend werden diese Schaltungen definiert, einige Näherungsformeln zu deren Berechnung angegeben und Vergleiche mit gedruckten Schaltungen und Wellenleitern angestellt. Materialien und Herstellungsvorgang, von der Maske bis zum Einbau von Komponenten, sind ausführlich dargestellt. Den Schluss bilden einige Beispiele ausgeführter Schaltungen.

Les circuits en lignes microruban ont pris ces dernières années une importance croissante, liée au développement fulgurant de transistors bipolaires et MESFET travaillant jusqu'à plusieurs dizaines de GHz. Ces circuits, qui ressemblent par certains aspects aux circuits imprimés, et qui peuvent remplacer les guides d'ondes dans de très nombreuses applications, sont souvent mal connus ou confondus avec d'autres types de circuits planaires.

Le but de cet article est de présenter les circuits en lignes microruban de façon concise du point de vue des applications en hyperfréquences et de leur technologie.

1. Ligne microruban : définitions, relations utiles

Une ligne microruban («microstrip line») est une structure planaire formée d'un ruban métallique mince et étroit déposé sur une face d'une plaque diélectrique (substrat), l'autre face de la plaque étant entièrement métallisée. La figure 1 représente une telle structure, avec les paramètres la caractérisant :

- la permittivité relative du substrat ϵ_r
- l'épaisseur h du substrat, généralement mince (de 0,1 à 1 mm)
- la largeur w du ruban: cette largeur est le plus souvent de l'ordre de grandeur de l'épaisseur du substrat ($0,1 < w/h < 10$)
- l'épaisseur b du ruban, très faible et quelquefois négligée dans les calculs approchés.

Comme la ligne microruban est inhomogène par suite de la présence de deux diélectriques (substrat et air), le mode dominant est hybride. Cependant, comme les composantes longitudinales des champs dans la direction de propagation sont beaucoup plus faibles que leurs composantes transverses, le mode dominant de la ligne est un mode *quasi-TEM* [1].

De nombreux auteurs ont étudié des solutions mathématiques exactes pour les basses fréquences, permettant de calculer l'impédance caractéristique et la permittivité effective d'une ligne microruban. Ces solutions, presque toujours très compliquées, peuvent être avantageusement remplacées par des relations approchées, dont la précision est en général bien suffisante en pratique. Citons en particulier les formules de *Schneider* [2], qui ont été retouchées par *Hammerstad* [3], et dont la précision est meilleure que 1% lorsque $0,05 < w/h < 20$:

$$Z_c \approx \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_e}} \ln(8h/w + w/4h) \quad \frac{w}{h} \leq 1 \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$Z_c \approx \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \left(\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,444 \right) \right)^{-1} \quad \frac{w}{h} > 1 \quad [\Omega] \quad (2)$$

avec $Z_0 = 376,6 \Omega$ (impédance caractéristique du vide), où la permittivité effective ϵ_r est obtenue par les relations

$$\epsilon_e \approx \frac{1}{2} (\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2} (\epsilon_r - 1) \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad \frac{w}{h} \leq 1 \quad (3)$$

$$\epsilon_e \approx \frac{1}{2} (\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2} (\epsilon_r - 1) \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad \frac{w}{h} \geq 1 \quad (4)$$

Dans le cas où l'épaisseur du ruban est très mince ($b = 0$), on peut effectuer la synthèse, c'est-à-dire calculer le quotient w/h à partir de l'impédance caractéristique Z_c demandée. Ces relations approchées (à 1% près) sont dues à *Wheeler* [4].

$$\frac{w}{h} \approx 4 \left[\frac{1}{2} \exp(A) - \exp(-A) \right]^{-1} \quad \frac{w}{h} \leq 2 \quad (5)$$

$$\text{avec } A = \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} (Z_c/Z_0) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} (0,23 + 0,11/\epsilon_r) \quad (6)$$

et lorsque $w/h \geq 2$

$$\frac{w}{h} \approx \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - 0,61/\epsilon_r \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \ln(2B - 1)) \quad (7)$$

$$\text{avec } B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0}{Z_c} \quad (8)$$

Il faut noter que lorsqu'on dimensionne une ligne microruban pour obtenir une impédance caractéristique donnée, on influence en même temps la longueur d'onde.

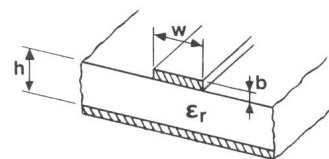


Fig. 1 Ligne microruban : aspect et définition des paramètres

- ϵ_r Permittivité effective du substrat
- h Epaisseur du substrat
- w Largeur du ruban
- b Epaisseur du ruban

Une ligne microruban présente des pertes dues à divers facteurs. Les pertes par effet Joule dans les conducteurs peuvent être évaluées grossièrement par la relation suivante:

$$\alpha_c \approx 8,686 R_m / w Z_c \quad [\text{dB/m}] \quad (9)$$

$$\text{où } R_m \approx \sqrt{\omega \mu / 2 \sigma} \quad (10)$$

L'affaiblissement par pertes diélectriques produit par le substrat est donné par:

$$\alpha_d \approx 27,3 \frac{\epsilon_e - 1}{\epsilon_r - 1} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_e} \frac{\tan \delta}{\lambda_g} \quad [\text{dB/m}] \quad (11)$$

Si, en théorie, une ligne microruban rectiligne ne rayonne pas, un rayonnement apparaît toujours en pratique, ne serait-ce qu'à cause des discontinuités toujours présentes. Les pertes par rayonnement sont approximativement proportionnelles à $(hf)^2 / \sqrt{\epsilon_r}$ pour une ligne de 50Ω . La fréquence limite correspondant à 1% de la puissance rayonnée au bout d'une ligne ouverte est donnée par:

$$f_m [\text{GHz}] \approx 2,14 \epsilon_r^{1/4} / h [\text{mm}] \quad (12)$$

Lorsqu'on monte en fréquence, il faut donc soit utiliser un substrat de grande permittivité, soit choisir une épaisseur de substrat faible. Si ces précautions sont insuffisantes, il faut blinder la ligne dans une enceinte fermée (boîtier).

2. Applications

Jusqu'à présent, on n'a parlé que de *lignes* microruban. Cependant, on peut, par combinaison de tronçons de lignes

de diverses impédances, réaliser à peu près n'importe quel élément ou circuit couramment utilisé en hyperfréquences. En particulier, la plupart des éléments connus en guides d'ondes peuvent avantageusement être réalisés en microruban, parfois sous une forme légèrement différente, à cause du passage de structures en 3 dimensions à des structures planaires. La figure 2 montre une jonction hybride (Té magique) en guides d'ondes et en lignes microruban. On voit immédiatement le gain énorme en volume et en poids; de plus, un circuit microruban est très facile à reproduire en grande série, ce qui n'est pas le cas pour son équivalent en guides d'ondes (usinage mécanique complexe).

En lignes microruban, on réalise ainsi très facilement des coupleurs, des transformateurs d'impédance, des filtres, etc. On peut aussi réaliser des capacités et des inductances à l'aide de courts tronçons de lignes, ainsi que des capacités interdigitées et des inductances sous forme de bobines spirales. Il est aussi possible de réaliser des résistances directement sur le substrat, comme on le verra par la suite.

Cependant, le grand avantage des circuits microruban est la facilité qu'il y a d'implanter des éléments actifs ou passifs et de les ajuster ultérieurement le cas échéant, puisqu'une face du circuit est directement accessible. Avec le développement rapide de semiconducteurs hyperfréquences très performants (diodes Gunn et Impatt, et surtout MES-FET) travaillant jusqu'à plusieurs dizaines de GHz, les circuits en lignes microruban ont encore pris de l'importance ces dernières années.

Actuellement, on réalise pratiquement n'importe quel circuit en lignes microruban, jusqu'à des sous-ensembles très complexes comportant des amplificateurs, des mélangeurs, des déphaseurs, des affaiblisseurs commandables et même des éléments non-réciproques à ferrites (circulateurs, isolateurs).

3. Les circuits en lignes microruban, les guides d'ondes et les circuits imprimés

Les lignes microruban présentent aussi des inconvénients: en effet, les pertes en lignes microruban sont beaucoup plus élevées qu'en guides d'ondes. Cependant, les longueurs considérées sont toujours très courtes en lignes microruban (quelques centimètres), alors que pour les lignes de transmission longues, on recourt toujours aux guides d'ondes.

Il est cependant un domaine où le guide d'ondes l'emportera toujours sur la ligne microruban, c'est celui des grandes puissances. En effet, de par leur nature, les circuits en lignes microruban ne peuvent supporter des niveaux de puissances élevés (pertes, claquages). On se limite en général à quelques Watt ou quelques dizaines de Watt.

On verra plus loin que les circuits en lignes microruban ressemblent par certains aspects aux circuits imprimés, et leur empruntent bien des techniques de fabrication. La différence fondamentale réside dans l'absence de plan de masse dans un circuit imprimé, où on considère de plus les lignes comme étant des simples éléments d'interconnexion, dont on néglige généralement l'influence. Pourtant, dans un domaine, les circuits imprimés vont par la force des choses ressembler de plus en plus aux circuits en lignes microruban, c'est celui de la logique rapide. Les circuits logiques devien-

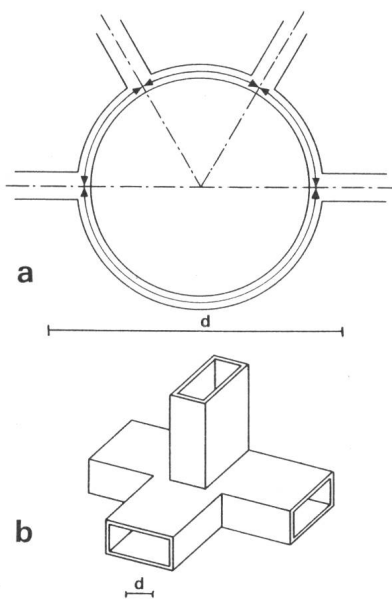


Fig. 2 Jonction hybride

a) en lignes microruban; b) en guides d'ondes;
la dimension relative est indiquée par d

nent en effet de plus en plus rapides; on parle actuellement de diviseurs travaillant à plusieurs GHz; il ne sera plus possible de monter de tels composants sans prendre des précautions quant à l'adaptation de leurs lignes d'accès!

4. Matériaux: substrats et conducteurs

D'après les formules citées, on peut voir que les paramètres d'une ligne microruban (impédance caractéristique Z_c , permittivité effective ϵ_e , déterminant la longueur d'onde dans la ligne) dépendent étroitement des caractéristiques électriques et mécaniques du substrat et des conducteurs qui lui sont associés. Les exigences sont nombreuses et souvent contradictoires. On notera en particulier: stabilité en température et dans le temps, conductivité thermique, usinabilité, résistance aux chocs et aux agents chimiques, disponibilité, adhésion du métal, faibles pertes, homogénéité, isotropie, etc. On doit très souvent se contenter d'un compromis entre ces divers facteurs.

On peut classer les matériaux utilisés comme substrats en trois catégories:

- céramiques (alumine: Al_2O_3 , saphir: monocristal d'alumine, oxyde de béryllium: BeO). Ce sont des matériaux obtenus par frittage, qui sont durs, cassants et difficiles à usiner. Leur conductivité thermique importante (surtout pour le BeO) facilite l'évacuation de la chaleur produite par les éléments actifs (transistors de puissance) du circuit. Leur permittivité relative ϵ_r se situe entre 6 et 12 environ, et leurs pertes sont faibles,
- matériaux synthétiques (PTFE: Téflon, polystyrène, polyoléfin, polyester, etc.). Ces matériaux aux propriétés très variables sont en général très faciles à usiner, mais ont certains inconvénients comme une mauvaise stabilité mécanique ou une mauvaise tenue aux hautes températures. Leur permittivité relative est de l'ordre de 2 à 3 environ, avec des pertes faibles mais supérieures à celles des céramiques.
- les matériaux composites (Epsilam-10, RT Duroïd 6010) obtenus en incorporant des poudres fines de céramiques dans des matériaux synthétiques (Téflon, polystyrène, etc.). Le facteur de pertes est légèrement plus élevé que pour les céramiques, mais l'usinabilité est très facile. Ces matériaux peuvent être inhomogènes et présenter une anisotropie de la permittivité relative. Le tableau I présente les propriétés de matériaux utilisés comme substrats. Dans des cas bien particuliers (éléments non-réciproques), on utilise des ferrites comme substrat.

Comme les pertes dépendent directement de la résistance caractéristique du métal, qui dépend de la conductivité (formule 10), on choisira naturellement des métaux très bons conducteurs pour les lignes et le plan de masse. On utilise donc le cuivre et l'or, et dans une moindre mesure l'argent (problème de sulfuration). Très souvent, le conducteur est formé de cuivre recouvert d'une mince couche d'or protégeant de l'oxydation. Suivant le type de substrat (alumine en particulier), il est nécessaire de faire usage d'une couche intermédiaire mince assurant l'adhérence du métal au substrat. On utilise souvent le chrome, mauvais conducteur, recouvert d'une couche de cuivre et d'or. On peut mettre à profit la couche de chrome pour réaliser des résistances directement sur le substrat.

5. Fabrication du masque

Quel que soit le type de substrat et le procédé de fabrication, un masque est toujours nécessaire à la réalisation d'un circuit en lignes microruban. Lorsque la fonction à réaliser par le circuit est bien définie, on commence par calculer les largeurs et longueurs de lignes des éléments nécessaires en fonction des paramètres du substrat et de la fréquence. On doit aussi étudier l'emplacement de chaque élément et les interconnexions entre éléments, ainsi que la disposition des accès (connexion avec l'extérieur). On peut alors établir un dessin du masque, presque toujours à une échelle assez grande (10 ou 8). A partir de ce dessin, on réalise le masque proprement dit à l'aide d'une feuille de mylar recouverte d'un film inactinique pelable, que l'on découpe selon le dessin. Cette méthode est très couramment utilisée pour la réalisation de prototypes, en particulier dans les petits laboratoires où l'acquisition d'un équipement coûteux n'est pas possible.

Il existe des programmes d'ordinateur très puissants permettant la conception assistée de masques. Ces programmes sont interactifs, l'opérateur peut disposer les éléments sur un écran graphique, les déplacer, réaliser les interconnexions, analyser le comportement en fonction de la fréquence du circuit qu'il vient de concevoir, etc. Une fois le

Propriétés des quelques substrats pour ligne microruban

Tableau I

Matériaux	ϵ_r à 10 GHz	$\tan \delta$ à 10 GHz	Température °C	Dispersion en fréquence	Stabilité mécanique	Résistance chimique	Propriétés physiques	Adhésion	Adaptation thermique	Coût
Polystyrène	2,54	$5 \cdot 10^{-4}$	-100+70	☆☆☆	☆☆	☆☆	☆	☆☆	★	☆
Polystyrène renforcé verre	2,62	$1 \cdot 10^{-3}$	-100+70	☆☆	☆☆	☆☆	☆	☆☆	☆	☆☆
Polystyrène renforcé quartz	2,60	$5 \cdot 10^{-4}$	-100+70	☆☆	☆☆	☆☆	☆	☆☆	☆	★
Polystyrène + céramique	3-15	$4 \cdot 10^{-3}$	-100+70	☆	☆	☆	★	☆☆	☆	★
Teflon/PTFE	2,10	$4 \cdot 10^{-4}$	-100+220	☆☆	★	☆☆☆	★★	★★★	★	-
Teflon renforcé verre	2,55	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-100+220	☆☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆☆☆	☆	☆
Teflon renforcé quartz	2,47	$6 \cdot 10^{-4}$	-100+220	☆☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆☆☆	☆	★★
Teflon renforcé céramique	2,3	$1 \cdot 10^{-3}$	- 95+220	☆☆	☆	☆☆☆	☆	☆☆☆	★	★
Résine silicone + céramique (poudre)	3-25	$4 \cdot 10^{-3}$	-100+230	☆	☆	☆☆	★	☆☆	☆	★★
Oxyde de Polyvinyle	2,55	$1,6 \cdot 10^{-3}$	-100+150	☆	☆	★	☆	☆	☆	☆
Polyoléfin	2,32	$5 \cdot 10^{-4}$	-100+60	☆☆	★	☆☆☆	★	☆	★	☆☆
Polyoléfin renforcé verre	2,42	$1 \cdot 10^{-3}$	-100+60	☆☆	☆	☆☆☆	★	☆	☆	☆
Verre	7,5	$2 \cdot 10^{-3}$	-100+550	☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	★	☆☆	★
Céramique	6,5	$6 \cdot 10^{-4}$	-1600	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	-	☆☆	★
Polyoléfin + céramique (poudre)	3-10	$1 \cdot 10^{-3}$	-100+60	☆	★	☆☆☆	☆	☆☆	★	★★
Polyester + céramique (poudre)	6	$1,7 \cdot 10^{-2}$	-100+160	☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆	☆

☆☆☆ = excellent ou très bon marché;
 ★★ = très mauvais ou très cher.
 ϵ_r , permittivité effective du matériau; $\tan \delta$, angle de pertes

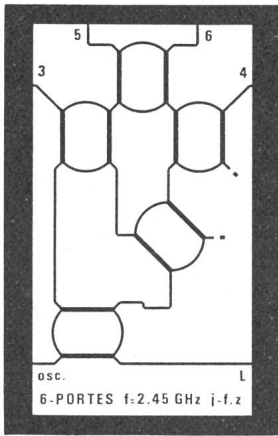


Fig. 3 Masque d'une jonction 6-portes à 2,45 GHz en lignes microruban

dessin du masque mis au point, il est possible de transférer les données nécessaires directement à un coordinatographe de haute précision qui découpe le masque à l'échelle voulue. Cette procédure est évidemment la plus confortable et la plus performante, mais elle est très coûteuse, puisqu'elle nécessite un ordinateur relativement puissant et un coordinatographe de prix élevé.

Une solution intermédiaire a été proposée [5], utilisant une calculatrice de table et un traceur (plotter) de format A3. Le programme mis au point ne permettant pas l'analyse du circuit, c'est à l'utilisateur d'étudier à l'avance l'emplacement des divers éléments et leurs interconnexions. Mais le programme se charge de toutes les tâches fastidieuses et répétitives comme le calcul des largeurs et longueurs de lignes, le traçage des éléments, la découpe du masque, etc. En fait, tout un choix d'éléments standards est à la disposition de l'utilisateur, qui n'a qu'à indiquer l'élément voulu et sa position désirée. L'élément est alors tracé immédiatement. Des éléments d'interconnexion sont également à disposition, permettant la réalisation de pratiquement n'importe quel circuit courant. Une fois le dessin terminé, tous ses paramètres sont gardés en mémoire, et le masque est réalisé directement sur le traceur ayant servi au dessin, la plume étant remplacée par un micro-couteau spécial. Le film inactinique est découpé rapidement et précisément (résolution: 25 μm), et il ne reste plus qu'à le peler pour disposer d'un masque de très bonne qualité. La figure 3 montre le masque d'une jonction 6-portes réalisé selon ce processus.

Le masque réalisé par une des méthodes présentées ci-dessus est alors réduit à son format final par des techniques photographiques courantes, utilisant des films à haute résolution. Une caméra spéciale de précision est nécessaire pour éviter des déformations.

6. Réalisation des circuits à couche épaisse

Les circuits dits à couche épaisse (Thick Films Circuits) sont réalisés par un procédé sérigraphique. La technique utilisée est la suivante: à partir du masque, et en utilisant un photoresist (laque photosensible), on rend imperméable un grillage extrêmement fin en fils d'acier aux endroits voulus. On chasse ensuite à l'aide d'un racloir une pâte conductrice à travers ce grillage, (fig. 4), la pâte se déposant sur le substrat (généralement de l'alumine à 96% de pureté, choisie à cause de la bonne adhérence pour la pâte). Après séchage, la pâte conductrice est cuite au four à environ 1000 °C, formant les pistes [6]. Ce processus est évidemment d'un usage

limité: la résolution possible est limitée par les dimensions de la maille du grillage. Il est généralement difficile d'obtenir mieux que $\pm 30 \mu\text{m}$ de précision. Ce type de circuits ne peut donc être utilisé qu'aux fréquences relativement basses ($< 1 \text{ GHz}$), où les dimensions sont suffisamment importantes pour que cette précision soit suffisante.

Les avantages des circuits à couche épaisse sont le coût un peu plus faible que celui des circuits à couche mince, et surtout la possibilité d'utiliser les techniques sérigraphiques, non seulement pour réaliser les pistes conductrices, mais aussi pour fabriquer directement sur le circuit des résistances à l'aide de pâtes résistives (palladium-oxyde de palladium-argent par exemple). Il existe également des pâtes diélectriques, grâce auxquelles on peut réaliser des condensateurs, et aussi des croisements de lignes (pour «sortir» la connexion d'une inductance en spirale par exemple).

Cependant, pour la plupart des circuits en lignes microruban, on préfère utiliser le procédé dit «à couche mince», dont la précision est bien meilleure.

7. Réalisation des circuits à couche mince

Ces circuits (Thin Film Circuits) sont caractérisés par le processus de fabrication, plus que par la minceur de la couche métallique déposée. On travaille soit par déposition, soit par enlèvement de métal, mais toujours par un procédé photolithographique direct (déposition de photoresist c'est-à-dire d'un vernis photosensible), contrairement au procédé à couche épaisse où on utilise une grille intermédiaire et un procédé sérigraphique.

Dans le cas des substrats céramiques, la couche métallique est généralement déposée par évaporation sous vide ou par destruction cathodique. Les couches déposées sont minces: de l'ordre de 20 nm pour la couche d'adhérence en chrome, quelques μm pour la couche de cuivre, environ 0,1 μm pour la couche d'or éventuelle. Si on dispose de l'équipement nécessaire pour déposer le métal, on peut réaliser directement le circuit en protégeant les parties voulues par un photoresist insolé à travers le masque durant la déposition. Mais le plus souvent, on dispose de circuits déjà métallisés, et on procède alors à l'opération inverse, c'est-à-dire à l'élimination du métal indésirable. Plusieurs bains sont souvent nécessaires pour éliminer les différents métaux.

Les matériaux synthétiques et composites utilisés comme substrats sont la plupart du temps fournis cuivrés, avec ou sans une couche d'adhésion suivant les cas. L'absence de

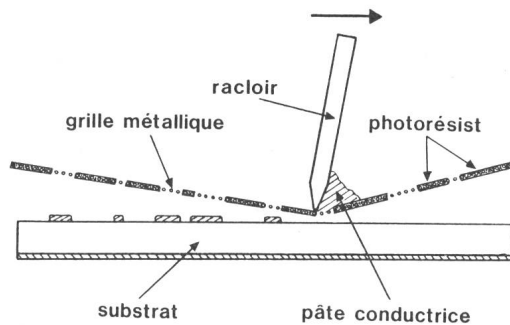


Fig. 4 Réalisation par sérigraphie d'un circuit à couche épaisse

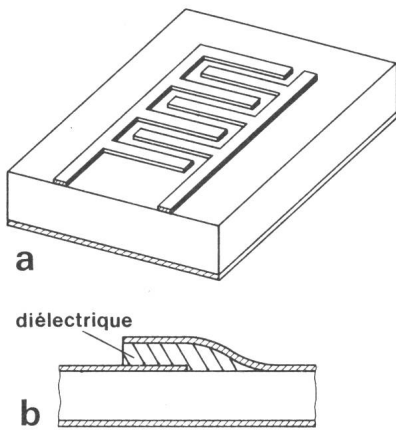


Fig. 5 Condensateurs réalisés directement sur le circuit
a) interdigitité; b) en structure «sandwich»

couche d'adhésion (le cuivre est directement lié au substrat par pressage à chaud) pour certains matériaux composites rend ceux-ci très attractifs pour la réalisation des circuits à couches minces: la technique d'attaque chimique est exactement la même que celle utilisée pour les circuits imprimés, et donc bon marché et facilement disponible [7].

Prenons par exemple la réalisation d'un circuit en lignes microruban à couche mince sur un substrat composite cuivré. Les étapes de fabrication sont les suivantes:

- nettoyage mécanique et chimique du cuivre, séchage au four,
- déposition du photorésist par trempage, pulvérisation ou centrifugation; dans tous les cas, une couche mince et uniforme est indispensable,
- cuisson du photorésist au four,
- insolation du photorésist à travers le masque: cette insolation aux UV nécessite un dispositif où les rayons tombent perpendiculairement (sinon il y a risque de sous-gravage),
- développement du photorésist: le temps du développement et la température doivent être contrôlés pour obtenir la précision requise,
- attaque chimique par immersion dans un bain agité ou par projection du liquide contre le circuit,
- élimination du photorésist restant par bain chimique,
- dépôt galvanique éventuel (or, protégeant le cuivre contre l'oxydation).

Des opérations de rinçage s'intercalent entre ces différentes étapes. Il est bien évident qu'une grande minutie est nécessaire à chaque stade de ce processus si on veut atteindre la précision requise pour le circuit fini. De cette précision dépendent directement l'impédance caractéristique des lignes et le déphasage, ou la fréquence de résonance d'un résonateur!

Certaines opérations mécaniques sont parfois encore nécessaires: découpe, perçage de trous pour le passage de

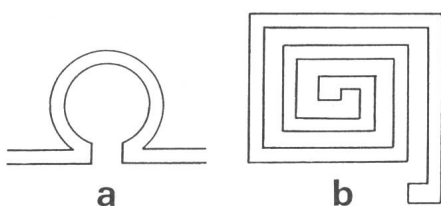


Fig. 6 Inductances réalisées directement sur le circuit
a) en forme de boucle; b) en forme de spirale carrée

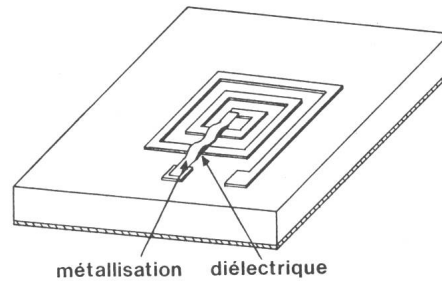


Fig. 7 Connexion de la spirale carrée par déposition d'un ruban métallique sur un diélectrique

composants ou pour des mises à la masse, etc. Si ces opérations sont faciles dans le cas de matériaux synthétiques ou composites, elles sont parfois quasiment impossibles sans des moyens spéciaux pour les substrats céramiques.

8. Composants

La plupart du temps, divers composants doivent être ajoutés aux éléments réalisés lors de la fabrication du circuit en lignes microruban. On distingue deux types de composants: les composants concentrés, le plus souvent passifs, qui sont réalisés directement sur le circuit, et les composants discrets, disponibles dans le commerce et prêts à être montés sur le circuit.

8.1 Composants concentrés

On peut réaliser sous cette forme:

- des résistances, des affaiblisseurs et des terminaisons, obtenus par déposition de couches résistives par des procédés sérigraphiques. Dans le cas de circuits sur substrats céramiques, on utilise fréquemment la couche d'adhésion en chrome pour réaliser ces éléments. La gamme de valeurs réalisables est cependant plus limitée qu'avec des pâtes résistives. Un ajustage fin des valeurs est possible par abrasion ou par laser;
- des condensateurs de deux types (fig. 5): en structure «sandwich», par déposition d'une couche diélectrique, puis d'une électrode métallique par sérigraphie; les valeurs obtenues vont de quelques pF à quelques centaines de pF. On peut également utiliser des structures interdigitées réalisées avec le reste du circuit [8], mais les valeurs obtenues sont plus faibles (de l'ordre de quelques pF);
- des inductances en forme de spirales ou de boucles (fig. 6), réalisées par attaque chimique en même temps que le circuit. Dans certains cas, on peut «sortir» la connexion centrale de la spirale en déposant par sérigraphie un diélectrique, puis un ruban métallique (fig. 7). Il est possible d'ajuster la valeur de ces inductances en déplaçant une «prise» formée d'un fil d'or.

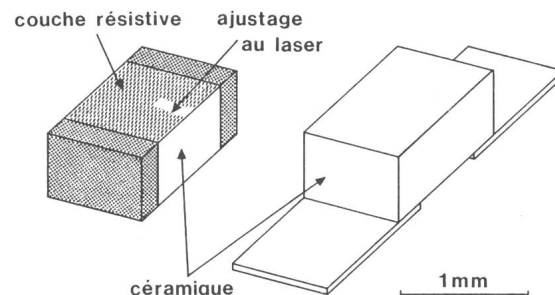


Fig. 8 Résistances pour circuits microruban

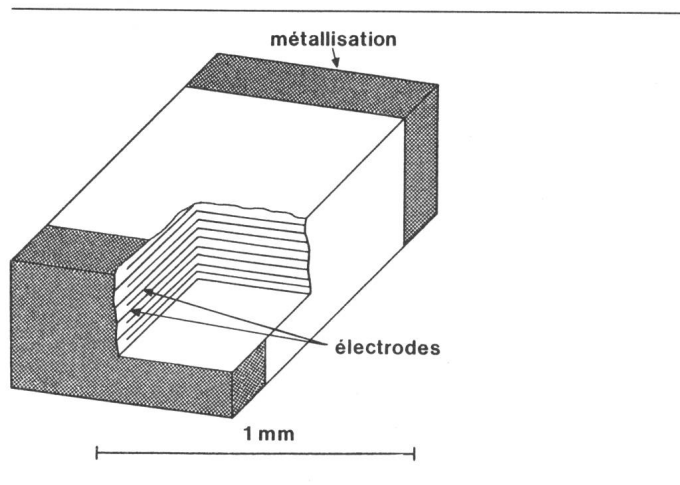


Fig. 9 Condensateur céramique miniature à électrodes métallisées

8.2 Composants discrets

Actuellement, on trouve pratiquement n'importe quel élément sous forme discrète, prêt à être monté sur un circuit microruban. Citons en particulier:

- des résistances, souvent réalisées sur de minuscules plaquettes de céramique, ajustées au laser, et munies de zones métallisées ou de rubans minces servant à la connexion (fig. 8);
- des affaiblisseurs et des terminaisons, réalisés suivant la même technique;
- des condensateurs, le plus souvent en céramique, composés de couches métalliques interdigitées, et qui se connectent de la même façon que les résistances (fig. 9);
- des condensateurs ajustables subminiatures, réalisés sous diverses formes;
- des inductances, formées de petites bobines moulées ou de couches minces de métal et de diélectrique alternées, formant une hélice plate;
- des isolateurs et des circulateurs miniatures à jonction; il s'agit de petits disques de quelques dizaines de millimètres de diamètre, munis d'un aimant permanent et de rubans de connexion. Il faut en général pratiquer un trou dans le substrat pour les placer;
- des diodes de tous types (Schottky, PIN, Gunn, Impatt, Trapatt, varactor), disponibles non encapsulées (chips), ou montées dans divers boîtiers [9]. On trouve notamment des boîtiers à élément inversé (LID: Leadless Inverted Device), micropoutres (beam lead, connexion par rubans minces), cylindriques avec ou sans vis de fixation et de refroidissement (fig. 10);
- des transistors bipolaires ou MESFET en boîtiers pour circuits planaires ou sous forme de chips non encapsulés (fig. 11).

A l'inverse des composants concentrés réalisés directement sur le circuit, les composants discrets doivent être

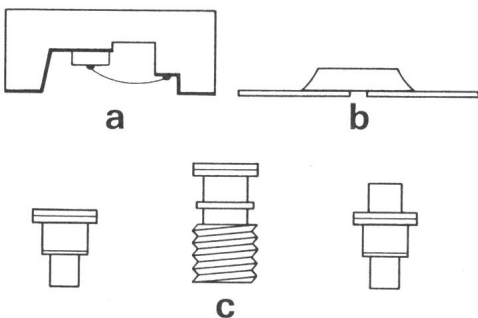


Fig. 10 Diodes montées dans divers boîtiers

- a) LID: Leadless Inverted Device
- b) Beam lead
- c) Cylindriques avec et sans vis de fixation

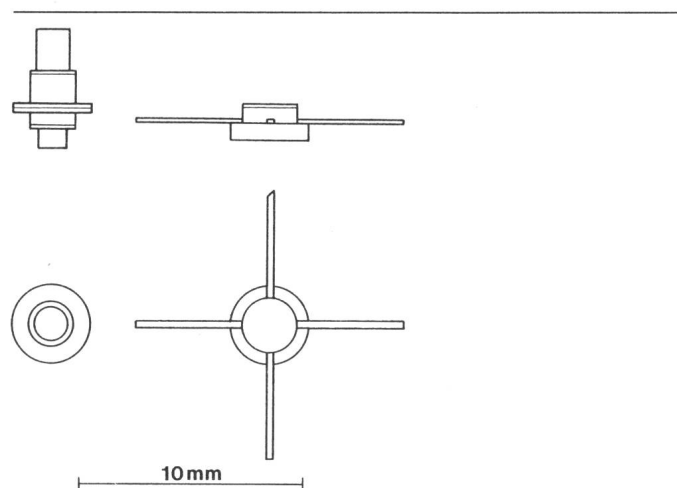


Fig. 11 Transistors pour montage sur circuits microruban

montés et connectés sur le circuit. Toutes sortes de techniques sont utilisées, suivant le type de composant et la nature du circuit. Citons:

- collage: les éléments sont maintenus en place par un colle à base de résine époxy;
- connexion par colle conductrice: on utilise une colle époxy chargée de poudre métallique (argent). Souvent, un traitement thermique est nécessaire. La solidité et la conductivité sont moins bonnes que pour une soudure, mais la mise en œuvre est plus simple et les composants sont moins sollicités;
- soudure par thermocompression: les conducteurs du circuit et les connexions des composants doivent avoir été préparés (enduits de soudure à basse température de fusion). On applique alors une pointe chauffée avec une certaine pression, ce qui provoque la fusion localisée de la soudure;
- soudure électrique: le passage du courant entre deux électrodes chauffe localement les conducteurs et fait fondre la soudure;
- soudure par ultrasons: l'énergie nécessaire à la fusion est fournie par une pointe métallique mue par ultrasons; une diffusion métallique se produit, soudant les pièces entre elles.

Il faut être très prudent dans le choix du procédé de montage, la chaleur produite ou les efforts mécaniques mis en jeu pouvant endommager les composants, toujours fragiles vu leurs faibles dimensions. Il est parfois nécessaire de les mettre en place à l'aide de micro-outils commandés par des micromanipulateurs.

Les composants actifs (transistors, diodes) sous forme de chips doivent être connectés à l'aide de fils d'or soudés par thermocompression, selon la technique utilisée pour les circuits intégrés.

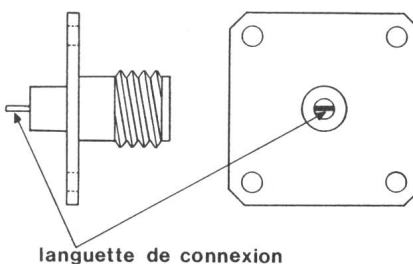


Fig. 12 Transition pour circuits en lignes microruban

9. Connexion du circuit avec l'extérieur:

Transitions

En général, les interconnexions entre circuits en lignes microruban ou avec d'autres éléments se font à l'aide de lignes coaxiales. Il est alors nécessaire de passer de la ligne microruban à la ligne coaxiale: c'est le rôle des transitions. Ce passage est facilité par le fait que le mode propagé est pratiquement le même (TEM pour la ligne coaxiale, quasi-TEM pour la ligne microruban). Cependant, toute discontinuité à l'interface affecte le rapport d'ondes stationnaires, qui doit être minimisé. La figure 12 montre une transition typique pour circuit microruban. On utilise très fréquemment des connecteurs coaxiaux miniatures, genre SMA. La lamelle métallique est appliquée par pression ou soudée sur la ligne microruban.

Lorsqu'un connecteur n'est pas indispensable, on peut passer directement de la ligne microruban à la ligne coaxiale; l'avantage est la suppression d'une discontinuité. Il est également possible de réaliser des transitions directes ligne microruban-guide d'ondes.

10. Protection des circuits: Boîtiers

Vu les très petites dimensions et parfois la fragilité des circuits en lignes microruban, il est indispensable de les enfermer dans des boîtiers, dont les principales fonctions sont de protéger le circuit contre les influences extérieures, de le blinder (suppression du rayonnement du circuit et protection contre les perturbations extérieures) et de fournir le support mécanique nécessaire aux différents accès (transitions, alimentations, etc.).

On trouve dans le commerce divers types de boîtiers, mais il est souvent nécessaire de les réaliser spécialement. Il faut veiller à ce que le boîtier forme un guide d'ondes en-dessous de la fréquence de coupure à la fréquence considérée, afin d'éviter le rayonnement et des couplages mutuels possibles entre divers points du circuit.

Dans certains cas, il peut être nécessaire de remplir partiellement les boîtiers de matériaux absorbants. Quelquefois (applications spatiales et militaires), les boîtiers sont remplis d'un gaz inerte et scellés.

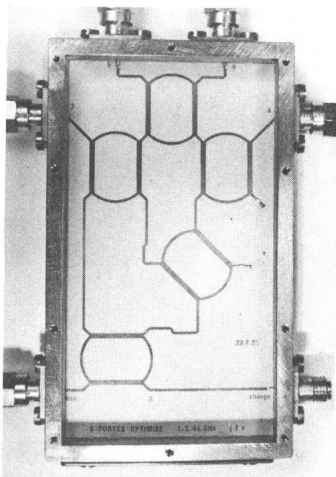


Fig. 13 Jonction 6-ports à 2,45 GHz sur substrat composite; dimensions du boîtier: 56×96 mm

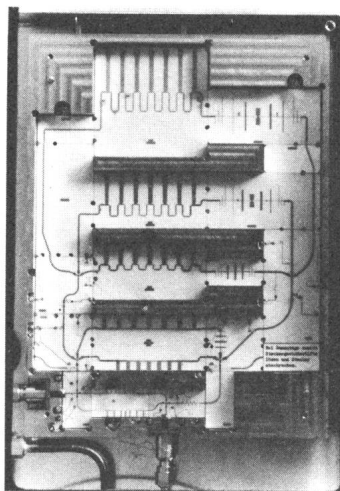


Fig. 14 Filtre commuté de 1 à 18 GHz sur substrat céramique

11. Quelques exemples de réalisations

Pour illustrer ce qui précède, voici quelques photographies de circuits en lignes microruban réalisés tant à l'EPFZ qu'à l'EPFL. La figure 13 montre le circuit de la jonction 6-ports dont le masque est représenté à la figure 3; il s'agit d'un circuit purement passif, comprenant des jonctions hybrides optimisées et deux charges adaptées. Le boîtier a été fabriqué spécialement.

La figure 14 montre un filtre commuté travaillant dans la bande de 1 à 18 GHz [10]. La commutation est effectuée par des diodes PIN. Le circuit complet est formé de 18 plaquettes en céramique supportant les divers sous-ensembles. Le boîtier, très complexe, a été conçu spécialement.

La figure 15 montre un amplificateur différentiel à 1,4 GHz, utilisant un transistor bipolaire à très faible bruit. Le gain est de 12 dB pour un facteur de bruit inférieur à 2 dB. Le substrat utilisé est un substrat composite (Epsilam-10), et le boîtier est un modèle du commerce légèrement modifié.

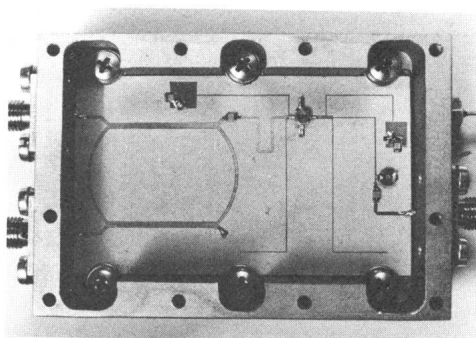


Fig. 15 Amplificateur différentiel à faible bruit à 1,4 GHz sur substrat composite

12. Conclusions

Les circuits en lignes microruban permettent de réaliser pratiquement n'importe quel circuit en hyperfréquences. Comme on peut le voir aux figures 13 à 15, cette technique permet d'obtenir des circuits complexes avec des dimensions compactes. De plus, ces circuits se prêtent très bien à une fabrication en grande série. Et surtout, il est très facile d'y inclure toutes sortes de composants actifs et passifs. Leur seule véritable limitation est la puissance, qui doit rester forcément modeste.

Il est très probable que l'on assistera dans l'avenir au développement croissant des circuits en lignes microruban. La logique rapide fera très certainement appel à ces techniques dans les années qui viennent.

Bibliographie

- [1] *F. Gardiol*: Hyperfréquences. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, volume XIII. St-Saphorin, Editions Georgi, 1981.
- [2] *M.V. Schneider*: Microstrip lines for microwave integrated circuits. *Bell Syst. Techn. J.* 48(1969)5, p. 1421...1444.
- [3] *E.O. Hammerstad*: Equations for microstrip circuit design. *Proceedings of the 5th European Microwave Conference*, 1...4 September 1975, Hamburg; p. 268...272.
- [4] *H.A. Wheeler*: Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet. *IEEE Trans. MTT* 13(1965)2, p. 172...185.
- [5] *J.-F. Zurcher*: A simple and efficient program for automatizing the design and preparing the mask for microstrip circuits. *Mikrowellen Magazin* -(1981)4, p. 407...409.
- [6] *G. Käs* u.a.: Schichtelektronik: Dickschicht- und Dünnschicht-Technik. *Kontakt und Studium Band 17*. Grafenau, Lexika-Verlag, 1978.
- [7] *M. Olyphant, D.D. Demeny* and *T.E. Novicki*: Epsilon-10, a new high dielectric constant conformable copper-clad laminate, Cu-tips No. 6. St. Paul/Minnesota, 3M Company, Electronic Product Division, 1978.
- [8] *K.C. Gupta* and *A. Singh*: Microwave integrated circuits. New York a.o., John Wiley, 1974.
- [9] 1977 Diode and transistor designer's catalogue. Palo Alto California, Hewlett-Packard Company, 1977.
- [10] *H. Benedickter*: Schaltbares Bandpassfilter 1-18 GHz. Bericht No. 80-07 des Mikrowellen-Laboratoriums der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1980.

Adresse de l'auteur

J.-F. Zurcher, ing. dipl. EPFL, 1er assistant, Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique EPFL, chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

Vous désirez mieux connaître les transformateurs...



Un exemple

Ce transformateur de secteur d'une puissance de 40 MVA vous situe la capacité de la Trafo-Union. Il est possible de le transporter par chemin de fer et son niveau de bruit n'atteint pas 45 dBA.

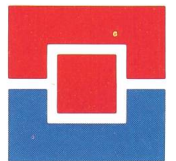
Un programme

L'entreprise Trafo-Union livre dans le monde entier le transformateur approprié à chaque besoin. Sa gamme de produits s'étend du plus petit transformateur de distribution au plus important transformateur de machines, d'une puissance supérieure à 1000 MVA.

Un partenaire

Siemens-Albis S.A. représente l'entreprise Trafo-Union en Suisse. Une longue expérience, la connaissance des particularités du marché suisse jointes à l'emprise sur les technologies d'une entreprise mondialement active, nous permettent d'être votre partenaire compétent sur le plan de la technique d'énergie.

Trafo-Union



représentée en Suisse par:

Siemens-Albis SA
Production et Distribution d'énergie
42, rue du Bugnon
1020 Renens, Tél. 021 / 34 96 31
8047 Zurich, Tél. 01 / 495 31 11
6904 Lugano, Tél. 091 / 51 92 71

alors ne manquez pas de contacter Siemens-Albis

Vous désirez mieux connaître les transformateurs en résine synthétique...



Un exemple

Notre transformateur GEAFOL est une assurance de qualité et de sécurité. Une technique sûre et écologique pour un besoin important d'électricité.

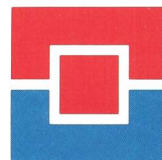
Un programme

L'entreprise Trafo-Union a déjà livré, sur le plan mondial, plus de 10 000 transformateurs GEAFOL, avec une puissance de 50 kVA – 10 MVA, pour des tensions jusqu'à 36 kV.

Un partenaire

L'entreprise Siemens-Albis S.A. représente Trafo-Union en Suisse depuis le 1er janvier 1981. Une longue expérience, la connaissance des particularités du marché suisse jointes à l'emprise sur les technologies d'une entreprise mondialement active, nous permettent d'être votre partenaire compétent sur le plan de la technique d'énergie.

Trafo-Union



représentée en Suisse par:

Siemens-Albis SA
Production et Distribution d'énergie
42, rue du Bugnon
1020 Renens, Tél. 021 / 34 96 31
8047 Zurich, Tél. 01 / 495 31 11
6904 Lugano, Tél. 091 / 51 92 71

alors ne manquez pas de contacter Siemens-Albis