

ANALYSE ET CONCEPTION D'UN FILTRE STOP-BANDE MULTICOUCHE MICRO-USINE A COUPLEUR MICRORUBAN ASYMETRIQUE

**Nadia Benabdallah, Nasreddine Benahmed¹, Fethi Tarik Bendimerad¹
et Boumedienne Benyoucef²**

Ecole Préparatoire des Sciences et Techniques (EPST-Tlemcen), B.P. 165 R.P, Tlemcen,
Algérie

¹ Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie
Electrique et Electronique, B.P. 119, 13000 Tlemcen, Algérie

² Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Faculté des Sciences, Département de Physique,
B.P. 119, 13000 Tlemcen, Algérie
N_Benabdallah@yahoo.fr

(Received 27 April 2010 - Accepted 9 November 2010)

RESUME

Le but de cet article est l'analyse et la conception d'une simple structure de filtre stop-bande utilisant des lignes microrubans blindées micro-usinées formant un coupleur inhomogène asymétrique, commode pour des applications très hautes fréquences en télécommunications. L'analyse est faite au moyen de la méthode des éléments finis (MEF) en 2D sous l'environnement FreeFEM. Cette technique est bien adaptée à l'étude de systèmes de lignes de transmission à géométries très complexes et n'admettant pas de solutions analytiques exactes ou mêmes approchées pour leurs paramètres électromagnétiques. La modélisation de cette structure consiste en la détermination des matrices d'inductances et de capacités ([L] et [C]). Quand ces matrices sont obtenues, il est possible d'estimer les réponses fréquentielles du filtre stop-bande micro-usiné en utilisant un modèle numérique adapté.

Le filtre stop-bande ainsi conçu au moyen de la MEF a seulement $900 \times 183 \times 1250$ μm de taille et il est facile à concevoir et à fabriquer. Sa bande de réjection à -3 dB est d'environ 40 GHz et la valeur minimale de son coefficient de transmission (S_{21}) obtenue à la fréquence de travail (f_0) égale à 60 GHz est de -77.5 dB.

Comme il n'y a pas de résultats numériques ou expérimentaux dans la littérature scientifique pour ce type de filtre stop-bande multicouche micro-usiné, et dans le but de vérifier le bien fondé des calculs numériques par la MEF, on fut obligé de faire des simulations en 3D pour les mêmes paramètres géométriques et physiques de ce filtre en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Les résultats obtenus par les deux modèles numériques (MEF et CST) montrent un bon accord des réponses fréquentielles de ce filtre stop-bande multicouche micro-usiné.

Mots clés : lignes microrubans micro-usinées, filtre stop-bande compact, structure multicouche inhomogène, analyse et conception, méthode des éléments finis (2D), Free-FEM, logiciel CST

ABSTRACT

The aim of this article is the analysis and the design of a simple structure for bandstop filters using multilayer micromachined microstrip asymmetrical couplers, convenient for high frequencies applications. The analysis is done using the finite element method (FEM) in two dimensions. This technique is adapted to study the complex configuration of the line's system, which does not have a simple analytical solution. The modeling of this structure consists in analyzing the primary inductive and capacitive matrices ($[L]$ and $[C]$). When these matrices are found, it is possible to estimate the resulting scattering parameters of the bandstop filter using an adapted numerical model.

The FEM results of a multilayer micromachined bandstop filter using asymmetrical strips and operating at 60 GHz show excellent performance in terms of rejection (-77.5 dB), size ($900 \times 183 \times 1250 \mu\text{m}$) and simplicity.

For this type of multilayer micromachined bandstop filter, there are no numerical nor experimental results in the scientific literature. In order to check the numerical calculations by the MEF one was forced, for the same geometrical and physical parameters of this filter, to make simulations in 3D by using CST MICROWAVE STUDIO software.

The results obtained by the two numerical models (FEM and CST) show a good agreement of the frequency responses of the multilayer micromachined bandstop filter.

Keywords: micromachined microstrip lines, bandstop filter and size compactness, multilayer and inhomogeneous structure, analysis and design, finite element method (2D), FreeFEM environment, CST software

INTRODUCTION

Ces dernières années, les télécommunications sans fil ont connu un développement spectaculaire. La téléphonie mobile capable de gérer les différents standards, les réseaux haut débit ainsi que les communications mondiales *via* les satellites prennent actuellement une importance sans précédent avec un nombre d'opérateurs et de services de plus en plus important.

Toutes ces applications sont appelées à monter en fréquence et demandent des circuits en nombre important et à faible coût. En effet, du point de vue coût, poids et encombrement, les circuits planaires classiques réalisés à partir de la technique des circuits intégrés sont les plus attractifs. Malheureusement, ces structures souffrent de plusieurs problèmes aux longueurs d'ondes millimétriques, principalement les pertes diélectriques qui augmentent avec la fréquence, la dispersion, les modes de substrat et le rayonnement des discontinuités.

Actuellement, il n'est pas envisageable d'utiliser des circuits planaires pour réaliser des composants ou des sous-systèmes complexes aux longueurs d'ondes millimétriques, car il est difficile d'atteindre des performances acceptables avec des circuits fabriqués par des méthodes classiques. De plus, les problèmes d'interconnexion entre les différentes parties d'un système sont très importants. Il est donc souhaitable de pouvoir intégrer l'ensemble des composants passifs d'une tête d'émission (filtres, coupleurs) ou de réception, millimétriques, avec une seule et même technologie (Blondy, 1998). A cet effet, une nouvelle technique de

micro-usinage du silicium a été mise au point, à l'institut de technologie en Californie (USA) (Rebeiz, 1993).

Cette technique consiste à supprimer le substrat par une attaque chimique pour ne laisser qu'une fine membrane diélectrique sur laquelle repose le circuit. Celui-ci est alors suspendu dans l'air, ce qui permet de réduire la plupart des défauts des circuits planaires aux longueurs d'ondes millimétriques. Cette technique permet de réaliser des composants de très grandes performances, aux très hautes fréquences. On citera les composants micro-electromécaniques (MEMs) (Barker & Rebeiz, 1998), les amplificateurs (Weller *et al.*, 1996) et les composants passifs tels que les lignes de transmission (Chen & Rebeiz, 1995 ; Dib *et al.*, 1991), les filtres passe-bas d'excellentes performances (Robertson *et al.*, 1996), les filtres passe-bande d'ondes sub-millimétriques (jusqu'à 250 GHz) (Weller *et al.*, 1995), les coupleurs directifs (Robertson *et al.*, 1998), les cavités résonnantes (Papapolymerou *et al.*, 1997 ; Brown *et al.*, 1998), les diviseurs de puissance (Weller *et al.*, 1994) et les antennes (Acharya *et al.*, 1993).

Un autre avantage de la technique de micro-usinage est qu'elle permet la réalisation multicouche des circuits ce qui offre une excellente occasion pour l'intégration tridimensionnelle, ayant pour résultat la réduction substantielle de la taille et du poids du dispositif électronique.

Pour démontrer les potentialités qu'offre la technique de micro-usinage, on propose dans cet article l'utilisation d'un filtre stop-bande micro-usiné, compact et à structure multicouche, commode pour des applications très hautes fréquences en télécommunications et on présente ses résultats d'analyse et de conception.

L'analyse électromagnétique (EM) est réalisée en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) en deux dimensions sous l'environnement FreeFEM (www.freefem.org). Cette méthode est très adaptée à l'étude de systèmes de lignes de transmission de formes complexes n'admettant pas de solution analytique exacte ou même approchée.

Par la MEF, la modélisation du filtre stop-bande consiste en l'analyse des matrices d'inductances et de capacités ([L] et [C]). Quand ces matrices sont trouvées, il est possible d'estimer les paramètres [S] du filtre stop-bande en utilisant un modèle numérique adapté (Djordjevic *et al.*, 1990).

Comme il n'y a pas de résultats numériques ou expérimentaux dans la littérature scientifique pour ce type de filtre stop-bande multicouche micro-usiné, et dans le but de vérifier le bien-fondé de ces calculs numériques par la MEF, on fut obligé de faire des simulations en 3D pour les mêmes paramètres géométriques et physiques de ce filtre en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (www.CST.com).

Les résultats du filtre stop-bande micro-usiné multicouche obtenus par la MEF ou CST démontrent l'intérêt majeur des lignes micro-usinées sur membrane à très hautes fréquences en terme de réjection, de taille et de simplicité.

FILTRE STOP-BANDE MULTICOUCHE INHOMOGENE A COUPLEUR ASYMETRIQUE MICRORUBAN MICRO-USINE BLINDE

Les filtres stop-bande sont utilisés dans de nombreuses applications pour éliminer les signaux indésirables et les interférences. Quand le coût, la taille, le poids et la simplicité sont exigés, la conception de tels filtres en très hautes fréquences peut être considérablement simplifiée par une simple structure micro-usinée. Cette nouvelle architecture du filtre est bien appropriée pour rejeter des fréquences porteuses indésirables d'un système de communications.

La structure de filtre stop-bande multicouches à lignes microrubans ordinaires a été présentée dans Jaisson (1998). Le filtre a été conçu pour opérer autour de $f_0=1842.5$ MHz et rejeter une fréquence porteuse traitée par un module à fréquence intermédiaire (FI) d'un système de communication digitale (DCS : Digital Communication System). Dans ce domaine de recherche, on a proposé et analysé, en 2008, une nouvelle structure de filtre stop-bande multicouche accordable utilisant des lignes micro-rubans ordinaires à diaphragmes métalliques et fonctionnant dans la bande de fréquences [1796-1852] MHz (Seghier *et al.*, 2008).

Dans cet article, on propose l'utilisation d'un filtre stop-bande micro-usiné compact et à structure multicouche, commode pour des applications très hautes fréquences en télécommunications et on présente ses résultats d'analyse et de conception obtenus par la MEF et CST. Ce filtre stop-bande micro-usiné peut fonctionner à n'importe qu'elle fréquence (f_0) appartenant à la bande [1-110] GHz selon la longueur physique du filtre.

La Figure 1 montre une structure formée d'une ligne micro ruban micro-usinée (SMM) reliée à un stub ouvert qui provoque un effet de réjection de bande autour d'une certaine fréquence f_0 .

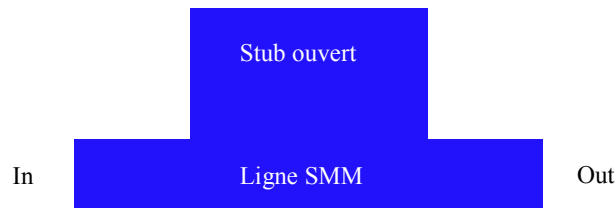


Figure 1. Stub ouvert pour filtre stop-bande.

Dans les circuits MIC où l'espace est restreint, on préfère avoir des structures un peu plus compactes. Une possibilité a été proposée par Jaisson (1998). Elle consiste à tourner le ruban ouvert et à le placer au dessus de la ligne principale en insérant entre les deux rubans une couche additionnelle de substrat diélectrique.

Un schéma électrique équivalent du filtre stop-bande multicouche est montré sur la Figure 2. Cette dernière montre que, pour une longueur (l), le filtre coupe bande est constitué de deux lignes de transmission asymétriques couplées de type quasi transverse

électromagnétique. L'extrémité gauche de la ligne supérieure est reliée à celle de la ligne inférieure chargée par $Z_{co} = 50 \Omega$, alors que son extrémité droite est laissée ouverte.

Les Figures 3-a et 3-b montrent respectivement la structure en 3D et la section transversale, du filtre stop-bande ayant une structure multicouche inhomogène micro-usinée présentant du silicium (Si) comme substrat diélectrique de permittivité relative $\epsilon_{r3}=11.7$ et des microrubans asymétriques de largeur (w_i , $i=1, 2$) placés sur de fines membranes ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) d'épaisseur (h_{mi} , $i=1, 2$) ayant une constante diélectrique $\epsilon_{r2}=4.5$.

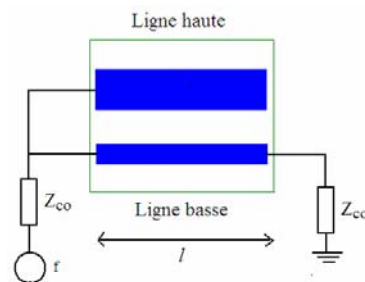


Figure 2. Circuit équivalent du filtre stop-bande.

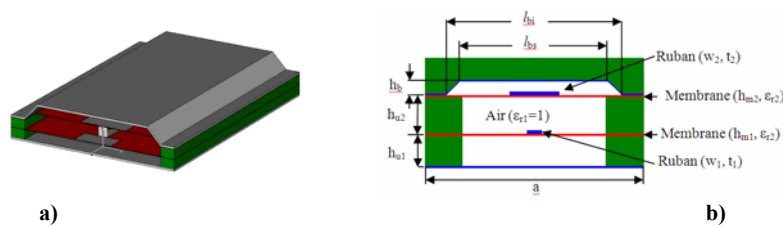


Figure 3. Représentation 3D en a) et section transversale en b) du filtre stop-bande utilisant des lignes microrubans micro-usinées blindées formant un coupleur asymétrique inhomogène.

Ce type de filtre stop-bande multicouche micro-usiné est employé ici pour créer un environnement à basse constante diélectrique ($\epsilon_{eff} \approx 1$) dans lequel les modes propageront à la même vitesse pour le coupleur inhomogène asymétrique.

RESOLUTION NUMERIQUE PAR LA MEF

Les propriétés électriques du filtre stop-bande inhomogène à coupleur asymétrique peuvent être décrites en termes de paramètres primaires (matrices d'inductances [L] et de capacités [C]) (Benahmed & Seghier, 2006 ; Seghier *et al.*, 2008).

Où

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$$

L_{ii} et C_{ii} ($i=1, 2$) sont respectivement l'inductance et la capacité propre de la ligne (i) en présence de la ligne (j) ($j=1, 2, j \neq i$).

L_{ij} et C_{ij} ($i \neq j$) sont respectivement l'inductance mutuelle et la capacité de couplage du système de lignes couplées.

La détermination de ces paramètres EM, dans le domaine électrostatique, est basée sur la résolution de l'équation de Laplace en deux dimensions (An *et al.*, 1995 ; Benabdallah, Benahmed, Benyoucef *et al.*, 2007 ; Seghier *et al.*, 2008 ; Seghier *et al.*, 2008) :

$$\text{div}[\nabla_t V(x, y)] = 0 \quad (1)$$

Où:

$V = 1$ Volt sur le $i^{\text{ème}}$ conducteur.

$V = 0$ sur tous les conducteurs restants.

La solution de cette équation représente la distribution du potentiel scalaire V aux différents nœuds de maillage de la section transversale de la structure étudiée.

Quand le potentiel V est déterminé, on calcule les éléments de la $i^{\text{ème}}$ rangée de la matrice capacité $[C]$ à partir de la charge électrique sur chaque conducteur (Benabdallah, Benahmed, Benyoucef *et al.*, 2007).

$$C_{ij} = \frac{1}{V_0} \oint_{l_j} q_s dl \quad (2)$$

Où $V_0=1$ Volt, $q_s = \epsilon_0 \epsilon_r E_N$, l_j représente le contour du $j^{\text{ème}}$ conducteur et E_N est la composante normale du champ électrique.

En supposant que la profondeur de pénétration (effet de peau) est suffisamment petite, de telle manière que le courant électrique circule seulement sur la surface des conducteurs et en supposant également la matrice capacité $[C_0]$ celle de la structure fictive (où le diélectrique est remplacé par le vide), l'analyse du mode TEM permet d'écrire :

$$[L][C_0] = \epsilon_0 \mu_0 \quad (3)$$

Ainsi on détermine la matrice $[C_0]$ par l'analyse du problème électrostatique de la structure fictive et on calcule ensuite la matrice $[L]$ par:

$$[L] = \epsilon_0 \mu_0 [C_0]^{-1} \quad (4)$$

Quand les matrices $[L]$ et $[C]$ sont déterminées il est possible d'estimer les réponses fréquentielles du filtre stop-bande en utilisant un modèle numérique adapté, sous l'environnement MATPAR (Djordjevic *et al.*, 1990).

MATPAR est un outil numérique permettant l'analyse de réseaux électriques constitués de lignes de transmission multifilaires et d'éléments discrets. Chaque ligne est décrite par ses matrices de paramètres électromagnétiques et par sa longueur physique. La ligne est interconnectée ou chargée par les composants discrets. Ces éléments peuvent être connectés d'une manière arbitraire. Le réseau électrique final a un ou plusieurs ports et, est analysé dans le domaine fréquentiel. Les réseaux électriques traités par MATPAR peuvent modéliser des systèmes compliqués constitués par plusieurs lignes de transmission et des terminaisons. Pour un réseau électrique donné, la réponse fréquentielle fournie par MATPAR est similaire à la réponse fréquentielle obtenue expérimentalement au moyen d'un analyseur de réseaux (Djordjevic *et al.*, 1990).

RESULTATS D'ANALYSE ET DE CONCEPTION PAR LA MEF

En s'inspirant des travaux de Robertson *et al.* (1998) et des travaux précédents (Dali & Benahmed, 2004) et pour montrer l'influence de la largeur du ruban de la ligne placée au dessus sur les propriétés électriques du filtre blindé de la Figure 3, on a analysé ce dernier en utilisant un coupleur asymétrique micro-usiné de longueur $l=\lambda_0/4$, où $\lambda_0 = \frac{c_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}}{f_0}$,

$c_0=3.10^8$ m/s et $\epsilon_{eff}\approx 1$) pour les caractéristiques suivantes :

- Ruban de dessous: $w_1=50 \mu\text{m}$ et $t_1=1 \mu\text{m}$;
- Substrats diélectriques : $h_{u1}=50 \mu\text{m}$ et $h_{u2}=50 \mu\text{m}$;
- Membranes : $h_{mi}=1.5 \mu\text{m}$, ($i=1,2$) et $\epsilon_{r2}=4.5$;
- $h_b=80 \mu\text{m}$; $l_{bs}=600 \mu\text{m}$; $l_{bi}=750 \mu\text{m}$ et $a=900 \mu\text{m}$;
- Constante diélectrique : $\epsilon_{r3}=11.7$;
- Longueur du filtre : $l=1250 \mu\text{m}$;
- Fréquence de réjection : $f_0=60$ GHz.

Le maillage en éléments finis du coupleur microruban sous l'environnement FreeFEM, ainsi que la distribution du potentiel scalaire V obtenue après résolution de l'équation de Laplace sont montrés dans la Figure 4.

Les iso-valeurs du potentiel scalaire variant de 1Volt à 0 de la Figure 4-b sont obtenues en excitant le ruban de dessous par 1Volt et en plaçant le ruban de dessus à la masse. Dans ces conditions, le ruban de largeur faible se trouve placé entre deux plans de masses et par conséquent (sachant que $\epsilon_{eff}\approx 1$) la ligne se comporte comme une stripline. Un raisonnement similaire peut se faire pour expliquer la forme de la distribution du potentiel scalaire V de la Figure 4-c, quand le ruban de dessus est excité par 1Volt et quand on place le ruban de dessous et le blindage à la masse.

Pour les caractéristiques géométriques et physiques mentionnées ci-dessus, on a fait varier la largeur w_2 de la ligne (SMM) de dessus de 1 à (l_{bs}/w_1) afin de varier les paramètres EM du filtre et par conséquent faire varier la valeur du minimum du coefficient de transmission (S_{21}) du filtre stop-bande.

Les éléments des matrices [L] et [C] en fonction du rapport (w_2/w_1) sont fournis par les graphes des Figures 5 et 6. Ces graphes montrent clairement que pour un rapport (w_2/w_1) légèrement supérieur à 1, la ligne inférieure du coupleur inhomogène asymétrique a un

caractère inductif ($L_{11} \gg L_{22}$) pour le filtre. Par contre, le caractère capacitif du filtre est assuré par la ligne supérieure, puisque $C_{22} \gg C_{11}$ pour $w_2/w_1 > 1$.

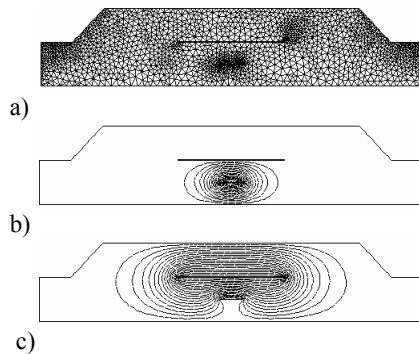


Figure 4. Filtre stop-bande micro-usiné multicouches : maillage en éléments finis en a) et distributions du potentiel scalaire obtenues pour les conditions d’excitations : 1 volt sur le ruban de dessous et 0 sur les autres conducteurs en b) et réciproquement en c).

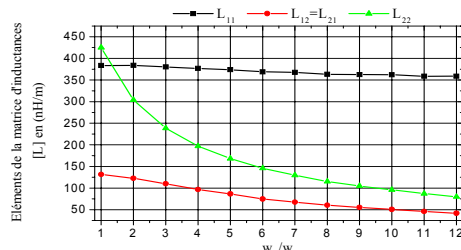


Figure 5. Influence du rapport (w_2/w_1) sur les éléments de la matrice d’inductances [L] du filtre stop-bande.

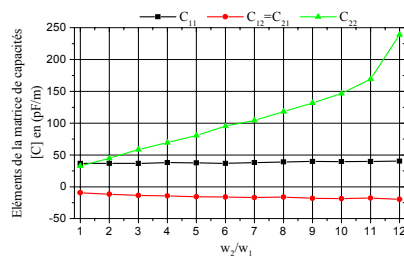


Figure 6. Influence du rapport (w_2/w_1) sur les éléments de la matrice de capacités [C] du filtre stop-bande.

La connaissance des valeurs des éléments des matrices [L] et [C] du système de lignes SMM étudiées ne permet pas uniquement la conception de filtres stop-bande micro-

usinés fonctionnant à n'importe quelle fréquence (f_0) appartenant à la bande [1-110] GHz, mais aussi la conception d'autres composants tels que, par exemple, les coupleurs directifs micro-usinés compacts et à structures multicouches, ce qui constitue une contribution à la littérature scientifique.

L'influence du rapport (w_2/w_1) sur la valeur du minimum du coefficient de transmission S_{21} du filtre stop-bande multicouche fonctionnant à 60 GHz est montrée sur le Tableau 1. De ce tableau, on constate clairement que la plus faible valeur du minimum du coefficient de transmission (S_{21}) du filtre stop-bande, calculée à la fréquence de travail $f_0=60$ GHz, est obtenue pour un rapport (w_2/w_1) égal à 5.

TABLEAU 1

Minimum du Coefficient de Transmission S_{21} du Filtre en Fonction du Rapport (w_2/w_1)

w_2/w_1	Min ($ S_{21} $) à 60 GHz
1	-60.22
2	-38.00
3	-39.80
4	-35.70
5	-77.50
6	-71.00
7	-48.47
8	-41.40
9	-41.34
10	-45.70
11	-42.83
12	-50.60

Pour (w_2/w_1) =5, on a analysé, en utilisant un outil numérique adapté sous l'environnement MATPAR, les réponses fréquentielles du filtre stop-bande pour les mêmes paramètres géométriques et physiques mentionnés ci-dessus et pour les paramètres EM obtenus par la MEF suivants :

$$[L]=\begin{bmatrix} 373.9 & 86.6 \\ 86.6 & 168.4 \end{bmatrix} \left(\frac{nH}{m} \right); [C]=\begin{bmatrix} 37.6 & -15.6 \\ -15.6 & 80.7 \end{bmatrix} \left(\frac{pF}{m} \right)$$

La Figure 7 fournit dans la plage de fréquences [1-110] GHz les résultats des réponses fréquentielles du filtre stop-bande multicouche inhomogène de la Figure 2, qui fut conçu en utilisant un coupleur microruban asymétrique micro-usiné et à structure multicouche.

Cette figure montre que le minimum du module de (S_{21}) -77.5 dB est obtenu à la fréquence de travail (f_0) de 60 GHz. La bande de réjection du filtre compact qui a été conçu et correspondante à -3 dB, est d'environ 40 GHz.

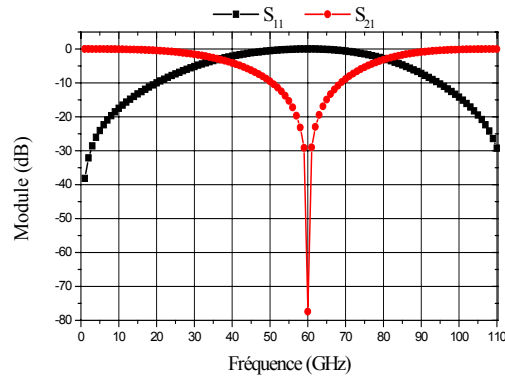


Figure 7. Réponses du filtre stop-bande micro-usiné obtenues au moyen de la MEF.

RESULTATS D'ANALYSE SOUS CST MICROWAVE STUDIO

Dans les paragraphes précédents, on a proposé l'utilisation de filtre stop-bande de type micro-usiné, très compact et à structure multicouche pour les applications très hautes fréquences en télécommunications. On a montré aussi que sa méthode de conception est facile et consiste tout d'abord à faire une analyse dans le domaine statique en résolvant l'équation de Laplace en 2D par une méthode numérique telle que la MEF dans le but de déterminer les paramètres EM (matrices d'inductances et de capacités), et ensuite à faire une analyse fréquentielle dans le but d'optimiser les paramètres géométriques (ici le rapport w_2/w_1) du filtre.

Malheureusement, ce type de filtre stop-bande multicouche micro-usiné ne présente pas de résultats numériques ou expérimentaux dans la littérature scientifique. Les calculs numériques faits au moyen de la MEF peuvent être facilement vérifiés par la méthode des moments (MoM) sous l'environnement LINPAR (Djordjevic *et al.*, 1999 ; Benabdallah, Benahmed, Benyoucef *et al.*, 2007) par exemple, mais on a pensé à l'utilisation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO pour une résolution numérique en 3D du filtre micro-usiné.

Du fait que ce filtre est à structure multicouche et pour pouvoir utiliser convenablement le 'Transient Solver' de CST, on s'est intéressé en premier lieu à la recherche des paramètres d'une ligne SMM ayant d'une part un blindage qui sera connecté (par la suite) à celui du filtre stop-bande, et d'autre part, une impédance caractéristique de 50Ω (*i.e.* $Z_{co} = 50 \Omega$, voir Figure 2), et qui va charger de part et d'autre ce dernier. La Figure 8 montre la structure en 3D et le maillage rectangulaire des différentes coupes sous CST une telle ligne SMM.

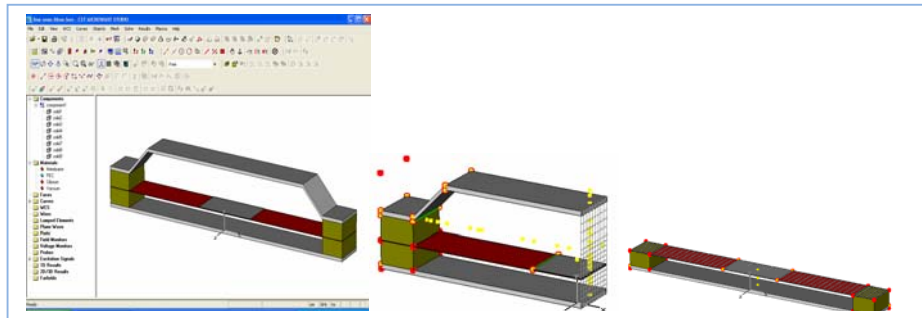


Figure 8. Représentation 3D et coupes longitudinales de la ligne SMM sous CST.

Une impédance caractéristique de 50.57Ω est obtenue numériquement pour les paramètres suivants:

- Ruban : $w_3=200 \mu\text{m}$ et $t_3=1 \mu\text{m}$;
- Substrats diélectriques : $h_{d1}=50 \mu\text{m}$ et $h_{d2}=50 \mu\text{m}$;
- Membranes : $h_{m1}=1.5 \mu\text{m}$ et $\epsilon_{r2}=4.5$;
- $h_b=80 \mu\text{m}$; $l_{bs}=600 \mu\text{m}$; $l_{bi}=750 \mu\text{m}$ et $a=900 \mu\text{m}$;
- Constante diélectrique : $\epsilon_{r3}=11.7$;
- Longueur de la ligne SMM : $l'=100 \mu\text{m}$;

Ensuite, on s'est intéressé à l'analyse du filtre multicouche de la Figure 3-a de dimensions $900 \times 183 \times 1450 \mu\text{m}$. Les différentes coupes longitudinales du filtre stop-bande chargé par deux lignes SMM ainsi que leurs maillages en éléments rectangulaires sont présentés respectivement sur les Figures 9 et 10.

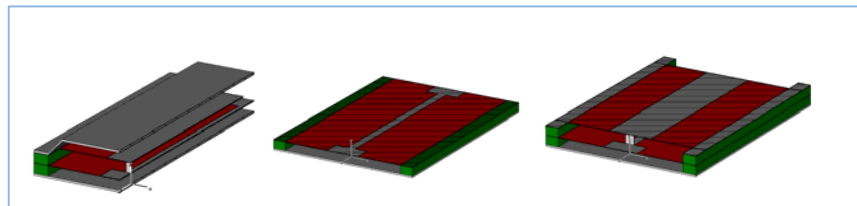


Figure 9. Coupes longitudinales du filtre stop bande micro-usiné obtenues par CST.

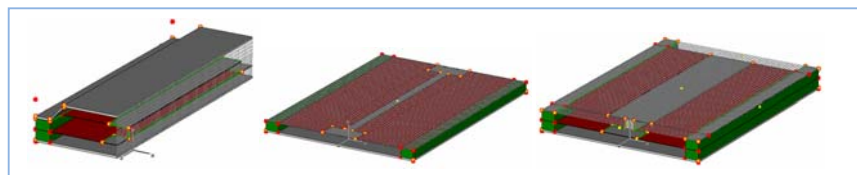


Figure 10. Maillage en éléments rectangulaires.

Enfin, l'analyse EM sous CST dans la bande de fréquences [1-110] GHz du filtre chargé par les deux lignes SMM, a fourni les résultats des réponses fréquentielles de la Figure 11.

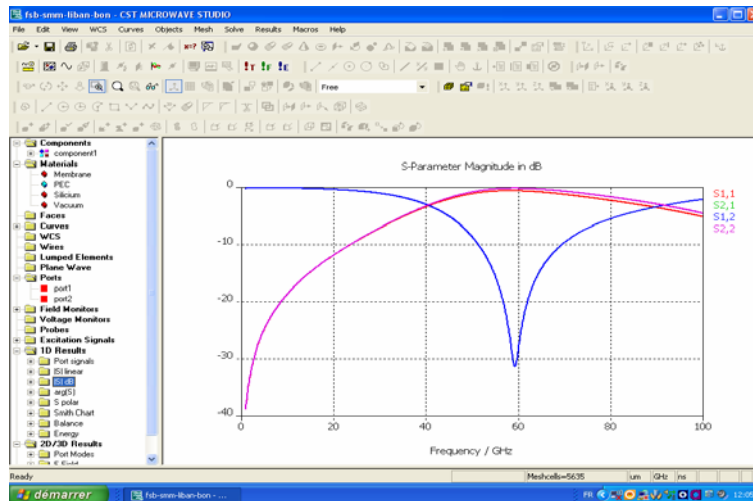


Figure 11. Réponses du filtre stop-bande micro-usiné obtenues au moyen de CST MICROWAVE STUDIO.

Au voisinage de la fréquence de travail (f_0) de 60 GHz, la Figure 11 montre, d'une part, que le minimum du module de (S_{21}) est d'environ -30 dB, et d'autre part, que la bande de réjection du filtre correspondante à -3 dB est d'environ 50 GHz.

En comparant les résultats obtenus par les deux modèles numériques : MEF (Figure 7) et CST (Figure 11), on constate clairement qu'il y a un bon accord des réponses fréquentielles de ce filtre stop-bande multicouche micro-usiné. Le faible décalage des résultats obtenus au moyen de CST MICROWAVE STUDIO est dû essentiellement aux effets des discontinuités géométriques (ici changement de largeurs des rubans : w_1 et w_3) (Benahmed *et al.*, 2009), et qui n'ont pas été pris en considération lors de l'analyse de la réponse fréquentielle du filtre en utilisant les paramètres EM obtenus par la MEF.

CONCLUSION

Une simple structure compacte de filtre stop-bande multicouche utilisant des lignes microrubans blindées micro-usinées formant un coupleur asymétrique inhomogène, a été proposée, analysée et conçue numériquement. Le filtre stop-bande qui a seulement $900 \times 183 \times 1250 \mu\text{m}$ de taille est facile à concevoir et à fabriquer.

Les résultats obtenus par la méthode des éléments finis ont montré que la bande de réjection du filtre à -3 dB est d'environ 40 GHz et que la valeur minimale du coefficient de transmission (S_{21}) obtenue à la fréquence de travail (f_0) de 60 GHz est de -77.5 dB.

Pour atteindre ces résultats sous MATPAR, il était nécessaire de déterminer les paramètres électromagnétiques ($[L]$, $[C]$) du filtre micro-usiné multicouche. Dans la bande de fréquences [1-110] GHz, le problème s'approxime par la résolution de l'équation de Laplace.

Les courbes obtenues, donnant les paramètres électromagnétiques du filtre stop-bande en fonction de ses paramètres géométriques, montrent l'intérêt du programme réalisé sous FreeFEM. Ces courbes ne permettent pas uniquement la conception de filtres stop-bande micro-usinés fonctionnant à n'importe quelle fréquence (f_0) appartenant à la bande [1-110] GHz, mais aussi la conception d'autres composants tels que, par exemple, les coupleurs directifs micro-usinés compacts et à structures multicouches.

Comme il n'y a pas de résultats numériques ou expérimentaux dans la littérature scientifique pour ce type de filtre stop-bande multicouche micro-usiné, et dans le but de vérifier le bien fondé de ces calculs numériques par la MEF, on a fait des simulations en 3D pour les mêmes paramètres géométriques et physiques de ce filtre en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Les résultats obtenus par les deux modèles numériques (MEF et CST) montrent un bon accord des réponses fréquentielles de ce filtre stop-bande multicouche micro-usiné.

REFERENCES

- Acharya, P.R., Ekstrom, H., Gearhart, S.S., Jacobsson, S., Johansson, J.F., Kollberg, E.L. and Rebeiz, G.M. 1993. Tapered slotline antennas at 802 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 41(10): 1715-1719.
- An, H., Monti, O., Bossio, R.G. and Wu, K. 1995. *A novel type of low cost high performance coaxial cable coupler*. 25th European Microwave Conference (EuMG'95).
- Barker, N.S. and Rebeiz, G.M. 1998. Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide band switches. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(11): 1881-1890.
- Benabdallah, N., Benahmed, N., Benyoucef, B., Bouhmidi, R. and Khelif, M. 2007. EM analysis of the slotted-tube resonator with circular cross section for MRI applications. *Journal of Physics in Medicine and Biology*, 52: 4943-4952.
- Benabdallah, N., Ben Ahmed, N., Seghier, S. and Bouhmidi, R. 2007. Sliced coaxial cables form compact couplers. *Microwaves and RF*, 46(7): 90-94.
- Benahmed, N., Benabdallah, N., Seghier, S., Bekri, Y. et Bouhmidi, R. 2009. Caractérisation numérique des discontinuités dans les lignes microrubans blindées. *Revue des Sciences, Technologies et Développement (ANDRU-Algérie)*, 5 : 154-168.
- Benahmed, N. and Seghier, S. 2006. Rigorous analytical expressions for the electromagnetic parameters of rectangular coaxial couplers with circular and square inner conductors. *Microwave Journal*, 49(8): 164-174.
- Blondy, P. 1998. *Analyse et conception de nouvelles technologies de circuits millimétriques sur silicium*. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Limoges, France.
- Brown, A.R., Blondy, P., Rebeiz, G.M. 1998. Microwave and millimeter wave high-Q micromachined resonators. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 9(4): 326-327.

- Chen, Y.C. and Rebeiz, G.M. 1995. Planar microwave and millimeter-wave lumped elements and coupled-line filters using micromachining techniques. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 43(4): 730-738.
- Dali, S. et Benahmed, N. 2004. *Design of 10-80 GHz directionnal coupler using the shielded membrane microstrip line*. Mediterranean Microwave Symposium (MMS'2004), Marseille, June 1-3, pp. 152.
- Dib, N.I., Harocopus, W.P., Katehi, L.P.B., Ling, C.C. and Rebeiz, G.M. 1991. *Study of a novel planar transmission line*. IEEE MTT-S Digest, Boston, pp. 623-626.
- Djordjevic, A.R., Bazdar, M., Vitosevic, G., Sarkar, T. and Harrington, R.F. 1990. *Scattering parameters of microwave networks with multiconductor transmission lines*. Artech House.
- Djordjevic, A.R., Bazdar, M., Vitosevic, G. and Sarkar, T. 1999. *LINPAR for windows: matrix parameters of multiconductor transmission lines*. Software and user's manual, Artech House.
- Jaisson, D. 1998. A Multilayer Microstrip bandstop Filter for DCS. *Applied Microwave and Wireless*, 10(3): 64-70.
- Papapolymerou, J., Cheng, J.C., East, J. and Katehi, L.P.B. 1997. A micromachined high Q-X-Band resonator. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 7(6): 168-170.
- Rebeiz, G. 1993. Millimeter wave and terahertz integrated circuit antennas. *IEEE*, 80: 1748-1770.
- Robertson, S.V., Katehi, L.P.B. and Rebeiz, G.M. 1996. Micromachined W-band filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(4): 598-606.
- Robertson, S.V., Brown, A.R., Katehi, L.P.B. and Rebeiz, G.M. 1998. A 10-60 GHz micromachined directional coupler. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(11): 1845-1849.
- Seghier, S., Benabdallah, N., Benahmed, N., Benmostefa, N. and Bouhmidi, R. 2008. Accurate closed-form formulas for the electromagnetic parameters of squared coaxial lines. *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, 62(5): 395-400.
- Seghier, S., Benabdallah, N., Benahmed, N. and Bekri, Y. 2008. Multilayer microstrip forms tunable bandstop filters. *Microwaves and RF*, 47(5): 98-106.
- Weller, T.M., Katehi, L.P.B., Herman, M.I. and Wamhof, P.D. 1994. *Membrane technology (MIST-T) applied to microstrip : a 33 GHz Wilkinson power divider*. IEEE MTT-S Digest, pp. 911-914.
- Weller, T.M., Rebeiz, G.M. and Katehi, L.P.B. 1995. A 250 GHz microshield bandpass filter. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 5(5): 153-155.
- Weller, T. M., Katehi, L.P.B., Herman, M.I., Wamhof, P.D., Lee, K., Kolawa, E.A. and Tai, B.H. 1996. New results using membrane supported circuits: a Ka-band power amplifier and survivability testing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(9): 1603-1606.

www.CST.com

www.freefem.org