



HAL
open science

Caractérisation électromagnétique du canal de propagation dans la bande millimétrique pour des réseaux sans fils sur puce

Ihsan El Masri, Pierre-Marie Martin, Thierry Le Gougec, Rozenn Allanic, Cédric Quendo

► **To cite this version:**

Ihsan El Masri, Pierre-Marie Martin, Thierry Le Gougec, Rozenn Allanic, Cédric Quendo. Caractérisation électromagnétique du canal de propagation dans la bande millimétrique pour des réseaux sans fils sur puce. XXIèmes Journées Nationales Microondes, May 2019, CAEN, France. hal-02138026

HAL Id: hal-02138026

<https://hal.science/hal-02138026>

Submitted on 23 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation électromagnétique du canal de propagation dans la bande millimétrique pour des réseaux sans fils sur puce

Ihsan El Masri, Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, Cédric Quendo

Université de Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29200 Brest, France

Ihsan.elmasri@univ-brest.fr

Résumé – Afin de développer des réseaux sans fils au niveau intra-puces, le canal de propagation est caractérisé dans la bande millimétrique (30-300 GHz). Pour cela, des antennes dipôles intégrées sur Silicium (Si) dans la bande Ka (26-40 GHz) ont été réalisées et mesurées. Des solutions novatrices sont proposées à travers des simulations dans la bande V (40-75 GHz), afin d'améliorer les niveaux limités obtenus à cause des propriétés électromagnétiques du substrat silicium. Des antennes monopôles dans la bande Sub-THz à 200 GHz sont présentées comme perspectives pour la caractérisation du canal en vue de réaliser des systèmes «Wireless Network on Chip (WiNoC)» pour des applications multi-cœurs.

1. Introduction

À l'ère de l'intelligence artificielle (IA), du Big Data et de l'Internet des objets (IO), le développement de réseaux sur puces plus efficaces est devenu une nécessité. Les interconnexions métalliques classiques utilisées pour connecter des milliers de cœurs qui forment un système multiprocesseur sur puce (MPSoC : Multi-Processor System-On-Chip), ne pourront ni supporter la quantité de communications de données entre les nombreux cœurs, ni acheminer ces données de manière optimale.

Pour assurer une transmission de données avec des latences faibles et un débit élevé en utilisant le moins de puissance et de ressources possibles, plusieurs techniques émergentes ont été proposées comme alternatives telles que les interconnexions 3D, les interconnexions optiques, les interconnexions RF guidées ou les interconnexions sans fils [1].

Dans cet article, nous avons opté pour la transmission radio sans fils appelée «WiNoC» (Wireless Interconnects Network-on-Chip) qui permet d'assurer la synchronisation pour les applications de type broadcast (de 1 émetteur à N récepteurs), une flexibilité de routage et une compatibilité avec les processus CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor).

Cette solution est développée dans le cadre du projet BBC (on-chip wireless Broadcast-Based parallel Computing) [2] qui a pour objectif de proposer un système WiNoC complet comprenant le circuit électronique, la microarchitecture de routage, le codage (CDMA: Code Division Multiple Access) et la

conception de la couche radio qui est précisément le sujet de cet article.

La Figure 1 montre l'un des scénarios étudiés dans le projet BBC pour une topologie 'mesh' (réseau maillé) avec 4 'clusters' et 4 cœurs par 'cluster'. La communication intra-puce est effectuée à l'aide des interconnexions sans fil. La réalisation de ces réseaux, implique la conception des antennes et du "transceiver", ainsi qu'une bonne connaissance du canal de propagation.

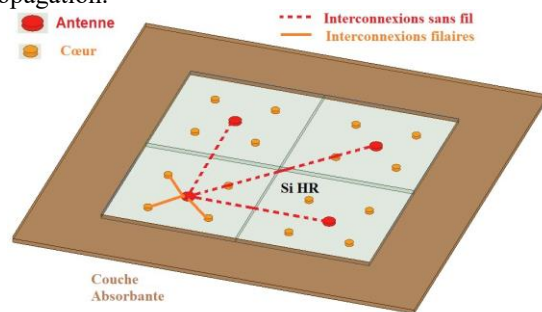


Figure 1 : Circuit WiNoC avec 4 antennes et 16 cœurs

Dans une première partie, la transmission entre deux antennes dipôles placées sur un substrat de silicium est mesurée dans la bande Ka (26-40 GHz). L'analyse de ce canal permet de valider expérimentalement les problèmes des structures sur silicium à très hautes fréquences. Puis, nous proposons une solution analysée en bande V (40-75 GHz), et permettant la limitation des problèmes engendrés par le substrat. Cette solution est reprise pour une analyse en bande Sub-THz (quelques centaines de GHz). L'excitation est dans ce cas réalisée à l'aide de monopôles conçus pour rayonner à 200 GHz. Des perspectives à ce travail seront présentées en conclusion.

2. Canal de propagation dans la bande Ka

L'un des principaux défis de la conception électromagnétique (EM) du WiNoC consiste à fournir une large bande passante pour supporter des débits de données plus élevés. Cette largeur de bande est limitée dans les fréquences millimétriques, en raison des contraintes du substrat silicium (Si).

L'état de l'art des antennes dans la bande EHF: 'Extremely High Frequency' (30-300 GHz) montrent des gains négatifs et des faibles rendements pour les antennes réalisées sur substrats Si [3]. Cela est

principalement dû aux caractéristiques EM du silicium et notamment à sa forte permittivité relative ($\epsilon_r = 11,9$), qui impliquent l'émission d'un faible pourcentage de la puissance totale dans l'air tandis qu'une partie considérable reste confinée dans le substrat. Ainsi, une cavité sera formée avec des interférences multimodes, dues à la réflexion du champ EM sur les interfaces entre le silicium et l'air [4].

Dans le but de réaliser des réseaux de type WiNoC compatibles avec la technologie CMOS, nous avons choisi pour notre premier démonstrateur, un empilement CMOS simplifié constitué d'un substrat silicium à haute résistivité (Si-HR) de 2,5 k Ω .cm (afin de réduire les pertes) et de permittivité relative $\epsilon_r = 11,9$. Une couche isolante de 330 nm de dioxyde de silicium SiO₂ ($\epsilon_r = 4$) est déposée entre le silicium et l'antenne (Figure 2).

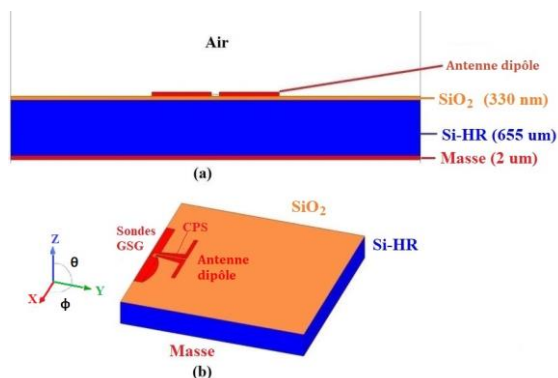


Figure 2 : (a) vue de profil ; (b) vue 3D de l'antenne

Le canal de propagation est composé de deux antennes dipôles imprimées choisies en raison de leurs diagrammes de rayonnement omnidirectionnels et de leur adéquation avec les applications WiNoC. Nous avons conçu une transition entre une ligne CPW (qui reçoit l'excitation des sondes GSG (masse-signal-masse)) vers une ligne CPS alimentant les dipôles. La longueur du dipôle est proche de $L_d = \lambda_g/2$, où λ_g est la longueur d'onde guidée. Ces circuits ont été fabriqués au laboratoire GREMAN de l'Université de Tours selon le procédé décrit dans [5] et mesurés sous pointes au Lab-STICC – Brest.

Sur la Figure 3 sont présentés les coefficients de réflexions des antennes simulés à l'aide de HFSS™ et mesurés sous pointes. Une bonne concordance entre les mesures et les résultats de simulation peut être observée malgré une différence de largeur de bande due à l'incertitude sur les pertes du Si et à l'environnement de mesure. La présence de plusieurs fréquences de résonances peut être observée. Elles sont dues au fait que le substrat Si agit comme une cavité. En effet la différence de permittivité entre le silicium et l'air se comporte en haute fréquence comme un mur magnétique (PMC) ce qui entraîne l'apparition d'ondes stationnaires à l'intérieur du substrat [6].

De nouveau nous constatons (Figure 4) un bon accord entre les simulations (sur le logiciel HFSS™) et les mesures pour le paramètre de transmission S_{21} entre les deux antennes.

Les zéros de transmission sont dus aux interférences destructives entre les rayons des différents trajets. Outre

le trajet direct entre les antennes, le champ rayonné peut trouver différents chemins en raison des réflexions provenant des multiples couches empilées le long de la hauteur de la puce, des bords du substrat et des structures métalliques dans le plan de l'antenne.

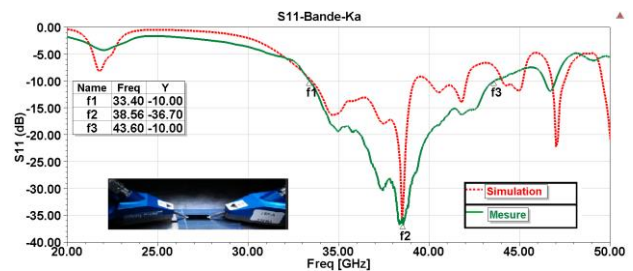


Figure 3 : Comparaison des résultats de simulation et de mesures du paramètre S_{11} en bande Ka

Lorsque les antennes sont distantes de 7,5 mm, le maximum de S_{21} est de -12,5 dB. Si nous considérons une variation de -3 dB par rapport au paramètre S_{21} maximum, la largeur de bande obtenue est de 4 GHz.

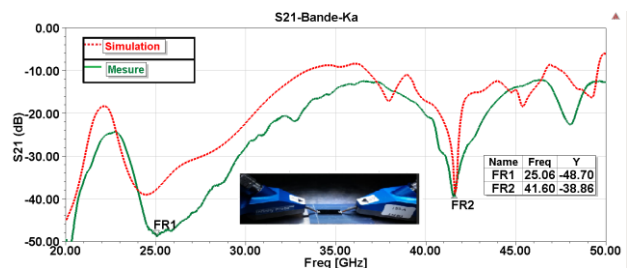


Figure 4 : Comparaison des résultats de simulation et de mesures du paramètre S_{21} en bande Ka

Nos résultats ci-dessus sont comparables à ceux trouvés dans la littérature [7],[8]. Sachant que dans celle-ci des modifications sont apportées sur le processus CMOS à travers des technologies comme le micro-usinage, amincissement du substrat ou implantation de protons. Pour limiter l'effet des frontières, il est nécessaire de limiter les réflexions aux interfaces. Nous proposons dans le paragraphe suivant une solution n'impliquant pas un changement majeur de la structure CMOS et permettant une réduction des effets des frontières.

3. Canal de propagation dans la bande V

Comme le problème est dû à l'interface entre le silicium et l'air, l'idée est d'ajouter une couche absorbante autour du silicium (Figure 5). Dans cette couche les ondes sont atténuées avant d'atteindre l'interface, ce qui réduit les réflexions. Plusieurs techniques permettent la réalisation de la couche absorbante, comme l'utilisation du Graphène [9] ou des méta-matériaux [10]. Cette couche absorbante est une approximation de la situation idéale i.e. des frontières rayonnantes tout autour du substrat.

Nous allons illustrer l'intérêt de cette technique, dans la bande V (de 40 à 80 GHz) où nous avons considéré un scénario avec deux dipôles intégrés séparés d'une distance de 14.2 mm et simulés à l'aide du logiciel CST MW studio™.

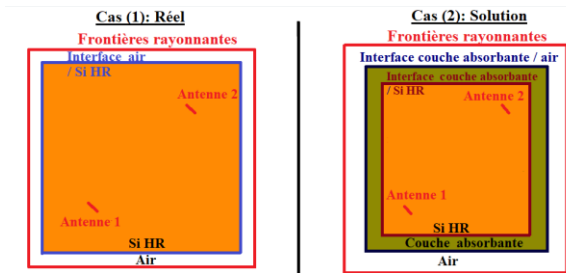


Figure 5: Les 2 cas comparés: (1) réel et (2) solution

En l'absence de la couche absorbante (courbe en rouge) nous pouvons constater de multiples résonances sur le paramètre S_{11} (Figure 6), ce qui traduit bien la présence de modes de cavité. En présence de la couche absorbante (courbe en vert) une seule résonance apparaît à la fréquence de 67 GHz avec une large bande passante d'adaptation à -10 dB de ≈ 30 GHz (50%).

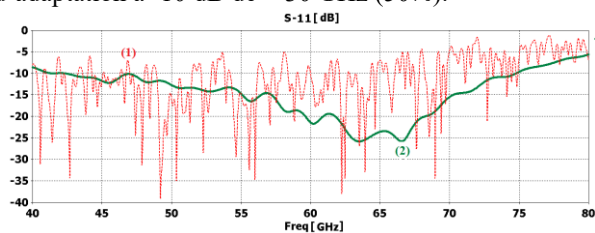


Figure 6: Comparaison des résultats de simulations du paramètre S_{11} dans les cas (1) et (2) en bande V

De même, pour le paramètre de transmission S_{21} (Figure 7) sans la couche absorbante de nombreux zéros apparaissent qui obstruent la transmission (courbe en rouge). Avec la couche absorbante (courbe en vert), les variations sont largement diminuées. On observe une bande passante à -3 dB (la référence de comparaison) qui est de 30 GHz, ce qui prouve l'intérêt de maîtriser les interfaces entre le silicium et l'air. Cette bande élargie est obtenue au détriment du niveau maximum de transmission (-20 dB au lieu de -10 dB).

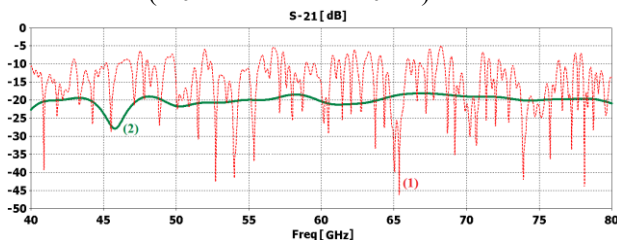


Figure 7: Comparaison des résultats de simulations du paramètre S_{21} dans les cas (1) et (2) en bande V

La contribution de l'absorbant électromagnétique peut également être montrée par l'observation de la distribution du champ électrique, comme illustré à la Figure 8. La cartographie des champs dans le cas (1) semble chaotique, un grand nombre de modes interfèrent, ce qui est typique d'une cavité surdimensionnée. Dans le cas (2), la distribution des champs peut être comparée à la propagation dans un environnement de dimensions latérales infinies.

Des circuits tests basés sur cette approche sont actuellement en cours de réalisation et de mesures. On montre dans le reste de document, que l'utilisation de cette approche rend possible la réalisation des antennes à plus hautes fréquences (autour de 200 GHz).

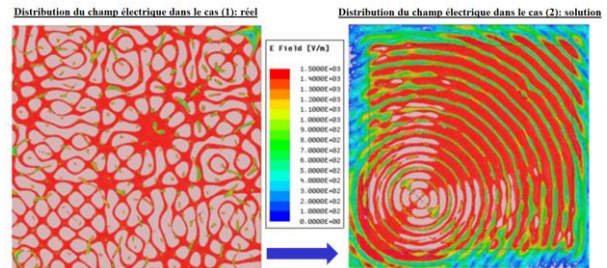


Figure 8: Comparaison des champs électriques dans le substrat dans les cas (1) et (2) en bande V

4. Canal de propagation dans la bande Sub-THz

Étant donné que les applications visées ici doivent supporter du broadcast (émission de 1 émetteur à N récepteurs), l'utilisation de monopôles verticaux omnidirectionnels semble pertinente, car ces antennes rayonnent uniformément dans le plan horizontal. Pour être inclus dans le substrat Si, il est nécessaire de considérer des fréquences plus élevées comme dans la bande Sub-THz. Cette montée en fréquence permet ainsi d'avoir des dimensions de monopôles compatibles avec l'épaisseur des substrats et permet également une augmentation des bandes passantes et des débits.

Ainsi en considérant un substrat silicium de 200 μm , des monopôles ont été conçus avec une fréquence centrale de 200 GHz. La longueur d'onde sur le silicium étant d'environ 435 μm , les monopôles sont donc, après optimisation, d'une hauteur de 148 μm , et ils sont excités par un câble coaxial conforme à leurs dimensions (Figure 9).

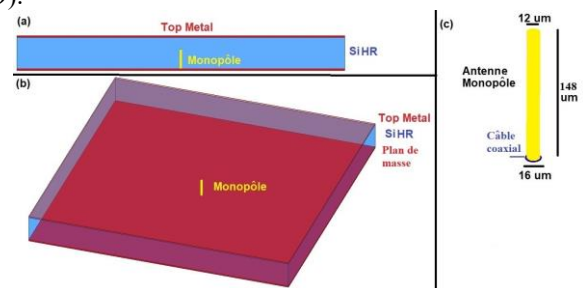


Figure 9: Conception du monopôle

Afin de réduire le temps de simulation et le stockage en mémoire, les monopôles ont été simulés sur un substrat Si-HR avec des frontières rayonnantes tout autour (approximation de la couche environnante) avec deux plans métalliques en haut et en bas pour éviter tout problème de compatibilité électromagnétique. Pour un monopôle, le paramètre de réflexion S_{11} a une large bande passante d'adaptation (à -10 dB) de 70 GHz ($\approx 35\%$) avec une résonance de -40 dB à la fréquence de 200 GHz (Figure 10).

Afin d'évaluer les performances d'un canal de transmission autour de 200 GHz nous avons étudié un réseau de 4 monopôles. La distance de séparation est de 10 mm pour les antennes adjacentes et de 14.2 mm pour les antennes diagonales (Figure 11).

Les paramètres de réflexion pour les 4 antennes S_{ii} ($i=1..4$) sont identiques à celui du monopôle tout seul (Figure 10).

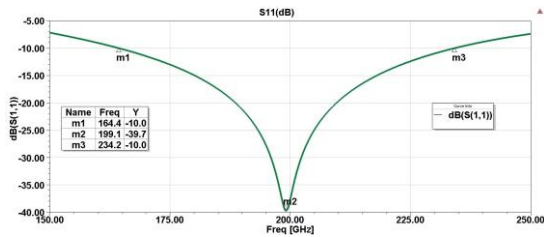


Figure 10: Paramètre S_{11} du monopôle

Pour la transmission entre monopôles S_{ij} ($i, j=1..4$ avec $i \neq j$) on peut considérer deux cas. Pour les antennes adjacentes (S_{21} ou équivalent), une bande passante à -3 dB de 80 GHz peut être observée. Pour les antennes diagonales (S_{31} ou équivalent), la bande passante est de 50 GHz et le niveau moyen dans la bande est de -31 dB (Figure 12).

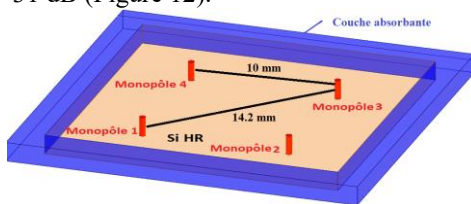


Figure 11: Un réseau de 4 monopôles

Ces bandes de transmission plates permettent d'envisager des liens avec des débits minimum de l'ordre de 32 Gbps (en considérant un codage optimal). Ces débits sont comparables avec l'état de l'art des communications intra-puces. Compte tenu de la platitude de la transmission, les faibles niveaux obtenus (-30 dB) peuvent être corrigés par des amplificateurs dans la chaîne de transmission.

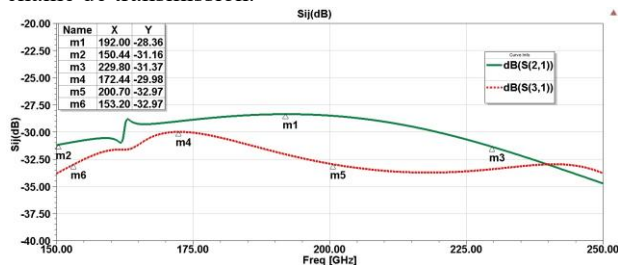


Figure 12: paramètres S_{21} et S_{31} des monopôles dans la bande Sub-THz

5. Conclusion

Dans le but de développer des réseaux sans fils sur puces de type WiNoC, nous avons étudié la propagation entre deux antennes réalisées sur un substrat silicium. A l'aide de mesures et de simulations dans la bande 20-50 GHz, nous avons mis en évidence l'effet négatif du silicium sur le rayonnement et le fait que le substrat se comporte comme une cavité entraînant des interférences et une propagation comportant un très grand nombre de zéros de transmission. Nous avons ensuite proposé l'utilisation d'une couche absorbante pour limiter les effets des frontières. L'intérêt de cette solution a été illustré à l'aide de simulations électromagnétiques dans la bande V. La maîtrise des frontières du silicium permet d'envisager des bandes passantes à -3 dB de plusieurs GHz ce qui rend cette alternative prometteuse. Nous avons illustré l'apport de cette méthode dans une bande

autour de 200 GHz et nous avons pu montrer que l'on pouvait envisager des débits de l'ordre de 32 Gbps dans ces conditions.

La réalisation et les mesures des circuits réalisés en adoptant la solution ci-dessus sont en cours. Une étude des transceivers est également à développer avec notamment comme objectif la détermination de la consommation pour la transmission d'un bit.

6. Remerciements

Nous remercions le Laboratoire d'Excellence COMINLABS, le laboratoire GREMAN de l'Université de Tours et le TECHYP (le cluster de calcul du Lab-STICC).

Références

- [1] A. Karkar, T. Mak, K.-F. Tong, and A. Yakovlev, "A Survey of Emerging Interconnects for On-Chip Efficient Multicast and Broadcast in Many-Cores," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 16, no. 1, pp. 58–72, 2016.
- [2] "Présentation - CominLabs." [Online]. Available: <https://bbc.cominlabs.u-bretagneoire.fr/>.
- [3] T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, "State of the Art in 60-GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, Aug. 2011.
- [4] H. M. Cheema and A. Shamim, "The last barrier: on-chip antennas," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 79–91, Jan. 2013.
- [5] R. Allanic *et al.*, "Three-state Microwave Tunable Resonator Integrating Several Active Elements on Silicon Technology in a Global Design," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, 2018.
- [6] A. Hajimiri, "mm-Wave Silicon ICs: Challenges and Opportunities," in *IEEE 2007 Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, San Jose, CA, USA, 2007, pp. 741–747.
- [7] S. Deb, A. Ganguly, P. P. Pande, B. Belzer, and D. Heo, "Wireless NoC as Interconnection Backbone for Multicore Chips: Promises and Challenges," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 228–239, Jun. 2012.
- [8] Y. P. Zhang, M. Sun, K. M. Chua, L. L. Wai, and D. Liu, "Antenna-in-Package Design for Wirebond Interconnection to Highly Integrated 60-GHz Radios," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 2842–2852, Oct. 2009.
- [9] B. Wu *et al.*, "Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, May 2015.
- [10] X. Zheng, Y. Chen, W. Wang, and S. Yang, "Development of Metamaterial EBG Absorbers for Application of Wireless Inter/Intrachip Communication Systems," *Metamaterials - Devices and Applications*, Apr. 2017.