



**HAL**  
open science

## Contrôle du canal de transmission pour des communications sans fils sur puces silicium en bande Q '30-50 GHz)

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

### ► To cite this version:

Ihsan El Masri, Bryan Tréguer, Thierry Le Gougec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, et al.. Contrôle du canal de transmission pour des communications sans fils sur puces silicium en bande Q '30-50 GHz). Journées nationales Microondes : JNM 2022, Jun 2022, Limoges, France. pp.962-965. hal-03693864

**HAL Id: hal-03693864**

**<https://hal.science/hal-03693864>**

Submitted on 13 Jun 2022

**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.

## Contrôle du canal de transmission pour des communications sans fils sur puces silicium en bande Q (30-50 GHz)

Ihsan El Masri, Bryan Tréguer, Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, Cédric Quendo  
Université de Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29200 Brest, France

thierry.legouguec@univ-brest.fr

**Résumé** – Afin d'améliorer les bandes passantes à -3 dB des canaux de transmission sur silicium rencontrés dans les systèmes WiNOC (Wireless Network on Chip), un contrôle de la résistivité des frontières est développé, réalisé et mesuré dans la bande Q (30-50 GHz). Ce contrôle est obtenu par l'application d'une tension de polarisation sur une jonction de type N+PP+ afin d'obtenir une couche de silicium basse résistivité qui entoure un substrat silicium haute résistivité faisant office de canal de transmission entre deux dipôles. A l'aide de cette technique, une bande passante à -3 dB de plus de 4 GHz a été mesurée autour de 44 GHz au lieu de bandes nettement plus étroites (<1 GHz) mesurées sans contrôle des frontières.

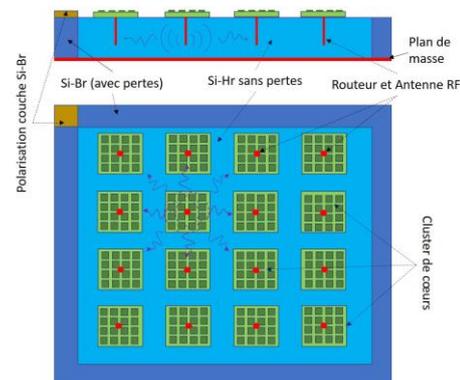
### 1. Introduction

Les nouvelles puces nécessaires au traitement des données toujours plus volumineuses, sont basées sur la mise en réseau de plusieurs cœurs, on parle notamment de NoC (Network on Chip). Les interconnexions au sein de ces réseaux engendrent des problèmes de diaphonie, de temps de latence important, de synchronisation [1]... Une des solutions envisagées est la réalisation de communications sans fils et on parle alors de WiNOC (Wireless Network on Chip). Outre la réduction des temps de latence et la limitation des phénomènes de diaphonie, ces communications facilitent la réalisation de transmission de type broadcast (1 vers N) ou multicast (N vers 1) utiles pour la mise en œuvre de calculs parallèles.

Les réseaux WiNOC utilisent des antennes placées sur ou dans des substrats silicium. Ces antennes communiquent entre-elles à travers l'air mais principalement via la propagation dans le silicium [2]. Dans ces systèmes, si l'élément rayonnant est important, la maîtrise des interfaces air/Silicium l'est tout autant pour obtenir des transmissions sur de larges bandes passantes permettant ainsi des débits importants [3]. Le concept de réseau WiNoC proposé ici est illustré sur la Figure 1 où nous considérons plusieurs clusters de cœurs pouvant communiquer entre eux via un substrat de silicium haute résistivité (Si-HR) entouré d'une couche de silicium basse résistivité (Si-BR) servant d'interface avec l'air.

Dans cette communication, nous présentons une preuve de concept de réalisation de ces frontières absorbantes contrôlables à partir d'une tension de commande. Cette technique mise en œuvre dans la bande

Q (30-50 GHz), permet un lissage du coefficient de transmission.



**Figure 1: Concept d'un réseau WiNoC utilisant la propagation dans un substrat Si-HR entouré d'un substrat Si-BR.**

La solution proposée est compatible avec les technologies CMOS et ne conduit donc pas à un changement technologique majeur. Le principe mis en œuvre est rappelé dans une 1<sup>ère</sup> partie de cette communication puis la réalisation de différents véhicules de test et les mesures associées sont présentées dans une 2<sup>ème</sup> partie. Enfin un dernier paragraphe permet de conclure et de tracer des perspectives de ce travail.

### 2. Principe mis en œuvre

Comme cela a été démontré dans [3], les interfaces latérales air/silicium autour du substrat silicium servant de milieu de propagation engendrent des réflexions des ondes qui se recombinent et créent ainsi des zéros de transmission entre les antennes. Afin de limiter les trajets multiples des signaux se propageant dans le substrat silicium, il est possible d'introduire une couche de silicium basse résistivité (Si-BR) autour du substrat silicium haute résistivité (Si-HR) dans lequel se propagent les ondes. Dans cette couche, les ondes vont être atténuées à cause des pertes élevées dans le Si-BR, ce qui va diminuer l'amplitude des ondes réfléchies aux interfaces latérales air-silicium et atténuer ainsi le problème des trajets multiples et de recombinaisons constructive et destructive des ondes [2]. L'objectif visé ici est l'obtention d'un coefficient de transmission  $S_{21}$  entre deux éléments le plus plat possible sur une bande de fréquence la plus large possible et cela afin de limiter la complexité

des circuits d'émission/réception associés à cette transmission sans fil. C'est pourquoi par la suite, le critère retenu pour évaluer les performances sera la bande passante telle que le paramètre  $S_{21}$  ne varie pas plus de 3 dB et qui sera nommée bande passante à  $-3$  dB.

La structure considérée dans cette communication est présentée sur la Figure 2. Il s'agit de deux antennes dipôles imprimés sur un substrat silicium haute résistivité (Si-HR) entouré d'une zone absorbante réalisée en introduisant deux zones de silicium dopé, l'une négativement ( $Si_{n++}$ ) sur la face supérieure et la seconde dopée positivement ( $Si_{p++}$ ) face inférieure. L'application d'une tension de polarisation entre ces deux couches entraîne une modification de la conductivité et donc de la résistivité de la couche de silicium absorbante [4][5].

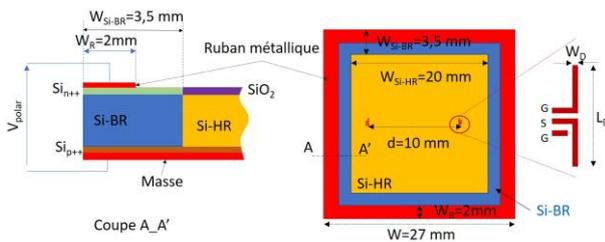


Figure 2: Architecture proposée avec la couche absorbante

### 3. Réalisation et mesures.

Plusieurs scénarios de géométrie de la couche absorbante ont été conçus et réalisés (Figure 3). Dans tous les cas, deux dipôles placés sur un substrat Si-HR sont séparés d'une distance  $d = 10$  mm. Les dipôles ont été dimensionnés pour résonner à 40 GHz.

Le scénario n°1 correspond au cas où aucune couche d'absorbant n'entoure le substrat Si-HR. Ce scénario sert de référence pour évaluer l'apport des zones de silicium basse résistivité (Si-BR) sur les coefficients de réflexion et sur la transmission entre les deux antennes.

Le scénario n°2 correspond au cas où le substrat Si-HR est entouré d'un ruban de Si-BR d'une largeur constante de 3.5 mm correspondant à une longueur d'onde guidée à 25 GHz.

Pour le scénario n°3 la zone de Si-BR est composée de motifs triangulaires inspirés du principe des chambres anéchoïques. La dimension des formes triangulaires correspond à une longueur d'onde guidée à 40 GHz.

Pour les scénarii 2 et 3, un ruban métallique placé tout autour de la zone permet la polarisation de la zone de Si-BR et donc la variation de la résistivité de la couche.

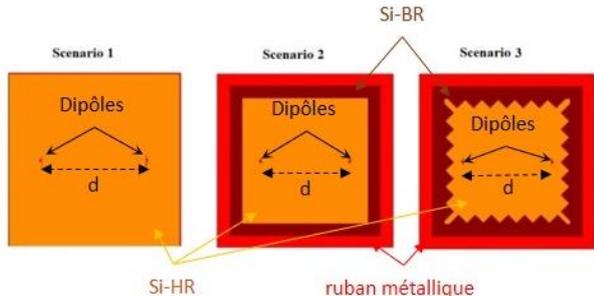


Figure 3: scénarios envisagés.

Les circuits ont été réalisés au laboratoire GREMAN de Tours et ils ont été mesurés au Lab-STICC à BREST. La Figure 4 illustre le protocole de mesure utilisé, avec les pointes de mesure RF et la pointe DC permettant la polarisation de la couche de Si-BR.

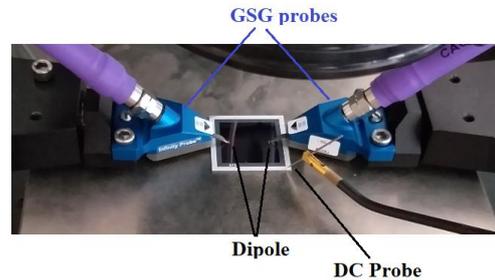
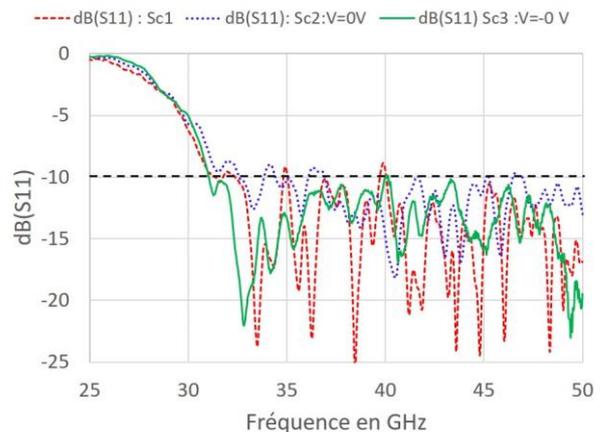
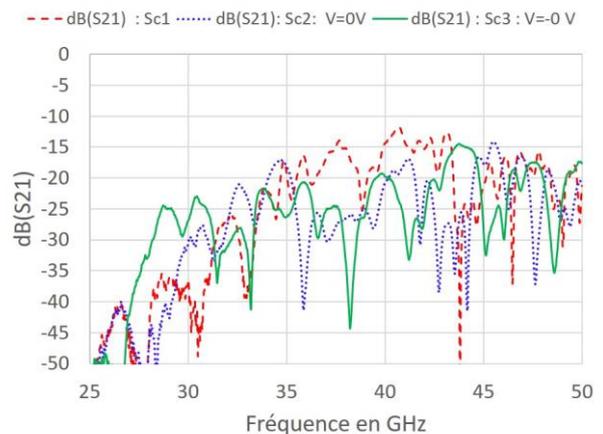


Figure 4: photographie du scénario n°2 sous test

Les premiers résultats de mesure présentés sur la Figure 5, permettent la comparaison du comportement des trois scénarii différents sans aucune polarisation de la couche de Si-BR. En ce qui concerne les coefficients de réflexion pour les trois cas (Figure 5-a), ils restent quasiment inférieurs à  $-10$  dB sur une bande allant de 32 à 50 GHz même s'ils présentent de nombreuses résonances dans cette bande.



a) Coefficient de réflexion  $S_{11}$

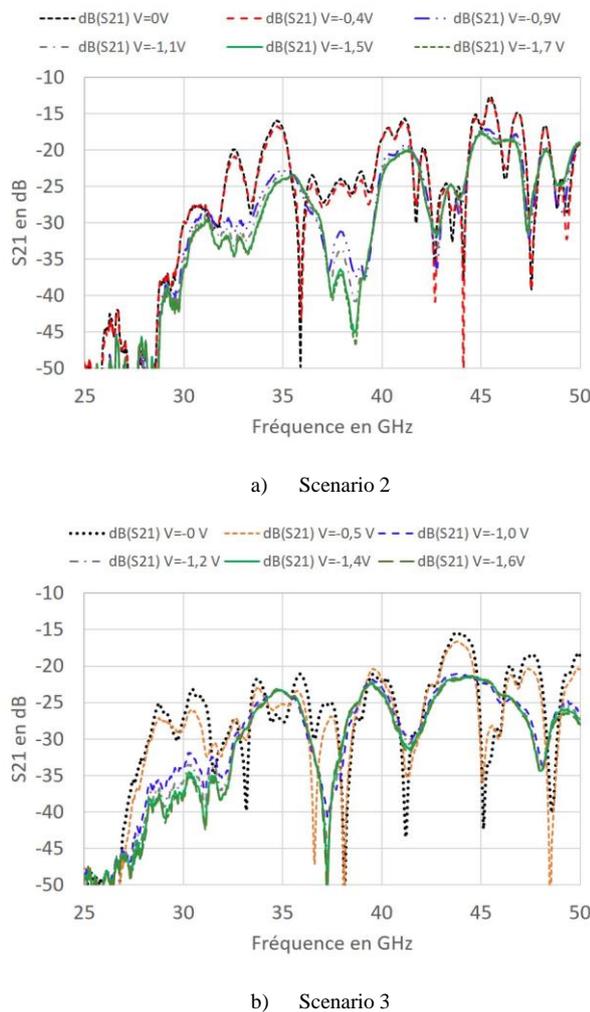


b) Coefficient de transmission  $S_{21}$

Figure 5: Comparaison des paramètres de répartition S pour les scénarii 1,2 et 3 sans polarisation : a)  $S_{11}$  et b)  $S_{21}$

Toujours en absence de polarisation des couches frontières des scénarii 2 et 3, les coefficients de transmissions entre deux antennes présentent de nombreux zéros de transmission et les bandes passantes à -3 dB restent faibles, 1,4 GHz pour le scénario 1, 0,6 GHz pour le scénario 2 et 1,5 GHz pour le scénario 3. Les niveaux de transmission maximums sont respectivement de -11,8 dB, -14,2 dB et -14,5 dB. Ces résultats démontrent l'intérêt de contrôler la résistivité des couches de Si-BR à l'aide d'une tension de polarisation afin d'augmenter les pertes dans cette zone et donc diminuer les réflexions aux interfaces.

Pour illustrer l'effet d'une tension de polarisation appliquée sur le silicium contenant des zones dopées, les résultats de variations des paramètres de transmission  $S_{21}$  des scénarii 2 et 3 pour différentes valeurs de polarisation sont présentés sur la Figure 6.



**Figure 6: variation du paramètre  $S_{21}$  en fonction de la fréquence pour plusieurs polarisations de la couche à pertes. a) scenario 2 et b) scenario 3.**

L'application d'une tension négative sur la zone dopée entraîne bien une modification de la transmission. Cela se traduit pour le scénario 2 par une diminution du niveau de transmission maximum qui passe de -12,67 dB sans polarisation à -17,65 dB pour une polarisation de -1,5 V. Cette perte de maximum de transmission est compensée par une augmentation de la bande passante à -3 dB

disponible qui passe de 0,67 GHz sans polarisation à 2,44 GHz pour une polarisation de -1,5 V.

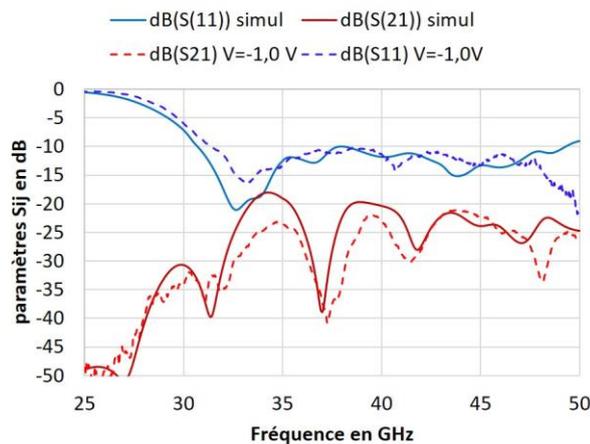
L'utilisation d'une frontière présentant des motifs triangulaires (scenario 3) entraîne une augmentation de la bande passante encore plus importante avec la tension de polarisation. En effet, la plus grande bande passante à -3 dB disponible passe de 1,5 GHz à 3,8 GHz lorsque la polarisation varie de 0 V à -1,4 V. Cette augmentation de bande passante utilisable se traduit ici par une baisse du maximum du coefficient de transmission qui passe de -15,4 dB sans polarisation à -21,3 dB pour une tension de polarisation de -1,4 V. Ce niveau de transmission est comparable aux niveaux trouvés dans la littérature [6] pour des distances inter-antennes équivalentes (autour de 10 mm) à des fréquences similaires autour de 40 GHz. Cependant les bandes passantes à -3 dB mesurées lors de cette étude sont plus importantes que celles présentées dans la littérature [7]. Une comparaison des meilleures performances en termes de bande passante à -3 dB pour les trois scénarii est donnée dans le Tableau I. La solution pour laquelle les interfaces Si-HR/Si-BR sont de formes triangulaires a permis d'obtenir la bande passante à -3 dB la plus importante, 2,4 fois plus grande que sans la zone de Si-BR, mais cela se traduit par une diminution du niveau de transmission qui est ici diminué d'environ 10 dB entre le cas de référence et le cas 3.

	$S_{21}$ max en dB	Bande Passante (GHz)	Fréquence centrale (GHz)	Bande Passante relative %
Scenario 1	-11,78	1,4	40,6	3,45
Scenario 2 V=-1,5 V	-17,37	2,48	45,73	5,41
Scenario 3 V=-1,4 V	-21,37	3,8	45,73	8,5

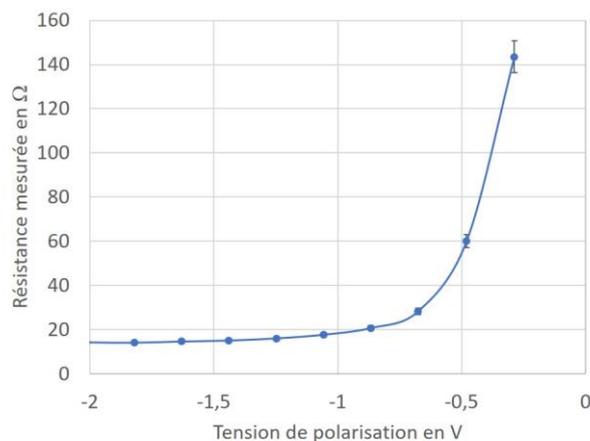
**Tableau 1: Comparaison des meilleures performances pour les trois scénarii**

Une modélisation électromagnétique de la structure n°3 pour une tension de polarisation de -1V a été effectuée afin d'évaluer la conductivité  $\sigma_{si}$  des zones à pertes. En considérant une conductivité de  $\sigma_{si}=50$  S/m, une bonne concordance entre simulations et mesures des paramètres S est obtenue comme cela est illustré Figure 7. Il faut remarquer qu'il est assez difficile de connaître la conductivité réelle de la couche de Si-BR, le profil de conductivité n'étant pas uniforme suivant l'épaisseur du substrat. Néanmoins, les analyses post mesures permettent de remonter à une valeur moyenne de la conductivité comme cela a été fait ici.

Afin d'évaluer la variation de résistivité de la couche de Si-BR en fonction de la tension de polarisation, le courant absorbé en fonction de la tension a été relevé lors des mesures et la résistance globale de la couche de Si-BR a été déterminée en considérant la loi d'Ohm. La variation de résistance de l'ensemble de la zone de Si-BR pour le scénario 3 est présentée Figure 8.



**Figure 7: Comparaison entre mesure et simulation dans le cas du scénario 3 : mesure polarisation -1 V : simulation conductivité  $\sigma_{si}=50$  s/m pour la couche à perte.**



**Figure 8: Variation de la résistance globale de la zone de Si-BR en fonction de la tension de polarisation pour le scénario n°3.**

La résistance globale diminue lorsque la tension de polarisation devient plus négative et l'on retrouve bien le comportement d'une diode présentant une résistance importante pour des faibles tensions de polarisation, une variation rapide de la résistance pour des tensions variant entre -0,5 V et -0,9 V et enfin une évolution très faible autour de 14  $\Omega$  lorsque la tension de polarisation descend en dessous de -0,9V.

L'application d'une tension de polarisation s'accompagne d'une consommation importante qui peut atteindre 120 mW dans le cas du scénario 3 et d'une polarisation de -1,4 V. Malgré cette consommation importante, nous avons démontré la possibilité de maîtriser les frontières Air/Silicium dans le cas d'application de type WiNoC. Ce comportement contrôlable des frontières pourrait être mis à profit pour réaliser des transmissions point à point ou bien de type broadcast à la demande.

#### 4. Conclusion

Dans cette communication, une solution pour maîtriser les frontières Silicium-Air dans les systèmes

WiNoC a été présentée et validée par des mesures en bande Q (30-50 GHz). Ces interfaces Silicium/air engendrent des réflexions des ondes qui entraînent des recombinaisons constructives et destructives impliquant des bandes passantes à -3dB faibles. L'influence de la forme de la zone à pertes a été analysée. L'utilisation de frontières présentant des motifs triangulaires inspirés des géométries rencontrées dans les chambres anéchoïques a permis d'obtenir une bande passante à -3 dB de 8,5% autour de 44 GHz au lieu d'une bande de 5,4% avec des frontières rectilignes et d'une bande de 3,4 % sans zone à pertes ou sans polarisation. Même si la consommation de la solution présentée est importante, elle démontre l'intérêt de contrôler les zones frontières. Une étude dans la bande U (40 à 60 GHz) sur ce type de structure est à l'étude et les mesures sont en cours de réalisation.

#### 5. Références

- [1] S. Foulon, S. Pruvost, D. Pache, C. Loyez, and N. Rolland, "A 142GHz fully integrated wireless chip to chip communication system for high data rate operation," in *2013 Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC)*, Sep. 2013, pp. 77–80, doi: 10.1109/ESSCIRC.2013.6649076.
- [2] I. El Masri, T. Le Gougec, P. M. Martin, R. Allanic, and C. Quendo, "Electromagnetic Characterization of the Intra - chip Propagation Channel in Ka and V Bands," *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, 2019, doi: 10.1109/TCPMT.2019.2930347.
- [3] I. El Masri *et al.*, "Accurate Channel Models for Realistic Design Space Exploration of Future Wireless NoCs," in *2018 12th IEEE/ACM International Symposium on Networks-on-Chip, NOCS 2018*, 2018, doi: 10.1109/NOCS.2018.8512171.
- [4] R. Allanic *et al.*, "Impact of the doped areas sizes in the performances of microwave SPST switches integrated in a silicon substrate," in *IEEE 22nd Workshop on Signal and Power Integrity, SPI 2018 - Proceedings*, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/SaPIW.2018.8401644.
- [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] F. Lemic *et al.*, "Survey on Terahertz Nanocommunication and Networking: A Top-Down Perspective," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1506–1543, 2021, doi: 10.1109/JSAC.2021.3071837.
- [7] S. Abadal, C. Han, and J. M. Jornet, "Wave Propagation and Channel Modeling in Chip-Scale Wireless Communications: A Survey from Millimeter-Wave to Terahertz and Optics," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 278–293, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961849.